

**DER LANDTAG NRW**



**ENQUETEKOMMISSION**

**ENQUETEKOMMISSION ZUR ZUKUNFT DER  
CHEMISCHEN INDUSTRIE IN NORDRHEIN-WESTFALEN  
IM HINBLICK AUF NACHHALTIGE ROHSTOFFBASEN,  
PRODUKTE UND PRODUKTIONSVERFAHREN**

## **Herausgeberin**

Die Präsidentin des Landtags Nordrhein-Westfalen  
Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in  
Nordrhein-Westfalen im Hinblick auf nachhaltige Rohstoffbasen,  
Produkte und Produktionsverfahren

Platz des Landtags 1  
40221 Düsseldorf

[www.landtag.nrw.de](http://www.landtag.nrw.de)

Der vorliegende Bericht ist zugleich Landtagsdrucksache 16/8500

Redaktion: Johanna Högner, Mirjam Hufschmidt, Landtag NRW  
Bildnachweise: © Anatoly Tipyashin – Fotolia.com (Titel), Bernd Schälte, Landtag NRW  
Layout und Satz: de haar grafikdesign, 50973 Köln  
Druck: Landtag NRW

© Landtag NRW, April 2015

**DER LANDTAG NRW**



**ENQUETEKOMMISSION**

**ENQUETEKOMMISSION ZUR ZUKUNFT DER  
CHEMISCHEN INDUSTRIE IN NORDRHEIN-WESTFALEN  
IM HINBLICK AUF NACHHALTIGE ROHSTOFFBASEN,  
PRODUKTE UND PRODUKTIONSVERFAHREN**



Liebe Bürgerinnen und Bürger,

mit der Einrichtung einer Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen im Dezember 2012 hat sich der Landtag erstmalig im Rahmen einer solchen Kommission mit einem der wichtigsten Industriezweige unseres Bundeslandes beschäftigt. Dies unterstreicht die Bedeutung der chemischen Industrie für Nordrhein-Westfalen und stellt sicher, dass auch in Zukunft die Wettbewerbsfähigkeit und Arbeitsplätze gesichert werden, gleichzeitig aber auch der ökologische Strukturwandel vorangetrieben wird. Daher lagen die Schwerpunkte in der Analyse nachhaltiger Rohstoffbasen, Produkte und Produktionsverfahren.

Die Mitglieder der Enquetekommission II in der 16. Wahlperiode erarbeiteten in der Zeit von April 2013 bis April 2015 den nun vorliegenden Abschlussbericht. Hierin geben sie den interessierten Leserinnen und Lesern einen Überblick über die aktuelle Situation der chemischen Industrie in NRW, die genutzten Verfahren und hergestellten Produkte sowie den Stand der Forschung und Entwicklung. Da die chemische Industrie aber auch in Zukunft erfolgreich bleiben soll, folgten hieraus – ergänzt um die Analyse bestehender Herausforderungen – verschiedene Optionen und Schlussfolgerungen aus deren Bewertungen. Im Ergebnis liegt nun eine Vielzahl von Handlungsempfehlungen vor, die sich von der Schaffung bestimmter Lehrstühle über die Unterstützung des Baus von Pilot- und Demonstrationsanlagen bis hin zu grundsätzlichen Bestrebungen wie der Intensivierung der Kreislaufwirtschaft erstrecken.

Mit großer Freude stelle ich insbesondere fest, dass sich die Mitglieder der Enquetekommission in großer Einigkeit und innerhalb des zeitlichen Rahmens auf den nun vorgelegten Kommissionsbericht verständigt haben.

Ich möchte den Mitgliedern sowie den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Enquetekommission für die in den knapp zwei Jahren geleistete Arbeit herzlich danken. Für den Bericht wünsche ich mir, dass er sowohl dem Landtag als Entscheidungshilfe als auch der Fachöffentlichkeit als anregende Lektüre zur Fortsetzung der im Dialog begonnenen Diskussion dienen möge.

Herzlichst, Ihre



Carina Gödecke





Liebe Bürgerinnen und Bürger,

es steht außer Frage, dass Deutschland weit besser als andere Industriegesellschaften durch die Finanz- und Wirtschaftskrise seit 2008 gekommen ist. Zu verdanken haben wir dies unter anderem unseren industriellen Kernen, von deren Erhalt und nachhaltiger Zukunft unser Wohlstand abhängt, vor allem in Nordrhein-Westfalen, dem größten Chemie-Standort Europas. Darum haben wir in dieser Legislaturperiode die Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen im Hinblick auf nachhaltige Rohstoffbasen, Produkte und Produktionsverfahren ins Leben gerufen.

Die Bedeutung der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen liegt vor allen Dingen darin, dass sie einen der großen Innovationsmotoren für die gesamte Industrie in unserem Land darstellt. Und da dies so bleiben soll, hat sich der Landtag in seinem Einsetzungsbeschluss auf drei Oberthemen verständigt – Rohstoffe/Werkstoffe, Energieumsätze, Verfahren –, da selbstverständlich nicht die gesamte Bandbreite der Chemie behandelt werden konnte. Anhand dieser Schlüsselfragen ist es der Kommission dennoch in sehr intensiver Arbeit über zwei Jahre gelungen, unterschiedliche Denkansätze zusammenzuführen. Zudem konnten Handlungsempfehlungen für die wichtigen Querschnittsthemen Innovationsfähigkeit, Technologieakzeptanz sowie für die gesellschaftlichen Herausforderungen von Qualifikation, demografischer Entwicklung und guten Arbeitsverhältnissen erarbeitet werden.

Wie Sie bei Ihrer Lektüre dieses Abschlussberichtes sicherlich feststellen werden, bewegte sich die Arbeit der Kommission über die üblichen Fachgrenzen hinweg: Naturwissenschaft, Ökonomie, Ökologie, soziale und gesellschaftliche Fragestellungen, aber auch globale Fragen, wie die nach wie vor zu starke Abhängigkeit der Chemie vom Öl, wurden in den Blick genommen. Dabei sind wir unter anderem zu den Schlüssen gekommen, dass unsere Rohstoffbasis stärker diversifiziert werden muss, Stoffkreisläufe im Sinne des „Cradle-to-Cradle“-Konzeptes (von der Wiege zur Wiege) geschlossen, vollständige Wertschöpfungsketten erhalten sowie vorhandene Innovationspotenziale intensiviert, ausgebaut und stärker vernetzt werden müssen.

„Life Cycle Analysen“, „rohstoffflexible Bioraffineriekonzepte“, „Power to Gas/Chemicals“ oder „SusChemSys“ – auch wenn Sie vielleicht solche Begriffe zum ersten Mal hören, so bietet Ihnen dieser Abschlussbericht doch auch einen tieferen Einblick in die komplexen Aufgaben, die eine Industriegesellschaft zu bewältigen hat. Dass es der Kommission dabei gelungen ist, sehr konkrete und greifbare Handlungsempfehlungen zu erarbeiten, darf durchaus als ein Zeichen ihrer erfolgreichen Arbeit angesehen werden.



So beinhalten diese Empfehlungen unter anderem die Errichtung von Pilot- und Demonstrationsanlagen, die Einrichtung von Lehrstühlen (etwa für Verfahrenstechnik und biomimetische Chemie), die Einführung eines NRW-Innovationspreises, aber auch die Empfehlung, die in der Enquetekommission begonnene Arbeit in einem intensiveren Austausch zwischen Industrie, Forschung, Wissenschaft und Politik nun fortzusetzen. Auch für die Bundesebene haben wir Empfehlungen ausgesprochen. So plädieren wir etwa für die Einführung einer steuerlichen Forschungsförderung.

Als Vorsitzender der Enquetekommission „Chemie“ danke ich den Abgeordneten des Landtages von Nordrhein-Westfalen in der Kommission, meinem Stellvertreter Dr. Gerd Hachen, allen Sachverständigen und Referenten, die trotz der komplizierten und fachübergreifenden Materie einen so großen Konsens erzielen konnten. Mein besonderer Danke gilt auch dem Kommissionssekretariats mit Johanna Högner, Mirjam Hufschmidt, Markus Preuß, Gisela Lange und Sascha Symalla, die sich weit über das übliche Maß eingebracht haben.

Alle Mitglieder der Kommission verbinden nun mit dem hier einvernehmlich vorgelegten Abschlussbericht die Hoffnung, dass es uns hiermit gelingt, eine belastbare Brücke in eine wirtschaftlich, sozial und ökologisch nachhaltige Zukunft für eine unserer Schlüsselindustrien und damit für Nordrhein-Westfalen insgesamt zu bauen.



Hans Christian Markert, MdL

# Inhalt

<b>I.</b>	<b>EINLEITUNG</b> .....	<b>3</b>
<b>I.1</b>	<b>Zielsetzung</b> .....	<b>3</b>
I.1.1	Herausforderungen der Zukunft an unsere Industriegesellschaft .....	3
I.1.2	Chemische Industrie in Deutschland .....	3
I.1.3	Chemische Industrie in NRW.....	5
I.1.4	Herausforderungen für die chemische Industrie – Megatrends .....	6
<b>I.2</b>	<b>Themen und Untersuchungsfeld</b> .....	<b>11</b>
I.2.1	Stoffumsätze: Rohstoffe und Werkstoffe .....	11
I.2.2	Verfahren.....	12
I.2.3	Energieumsätze: Elektrochemie und Energiespeicher.....	12
<b>I.3</b>	<b>Vorgehensweise der Enquetekommission Chemie</b> .....	<b>13</b>
I.3.1	Allgemeine Vorgehensweise und Mitglieder .....	13
I.3.2	Verwendete Methodik .....	15
I.3.3	Nachhaltigkeitskriterien.....	16
<b>II.</b>	<b>STOFFUMSÄTZE</b> .....	<b>19</b>
<b>II.1</b>	<b>Rohstoffsituation</b> .....	<b>19</b>
II.1.1	Organische Rohstoffe .....	23
II.1.2	Anorganische Rohstoffe .....	46
II.1.3	Annahmen .....	52
II.1.4	Optionen.....	60
II.1.5	Bewertung der Rohstoffoptionen .....	85
<b>Anhänge</b> .....	<b>91</b>	<b>91</b>
Anhang 1 .....	91	91
Anhang 2 .....	94	94
Anhang 3 .....	95	95
<b>II.2</b>	<b>Werkstoffe</b> .....	<b>99</b>
II.2.1	Einleitung.....	99
II.2.2	Rohstoffbezogene Betrachtungen.....	105
II.2.3	Betrachtungen zur Nutzung nach Ende des Produktlebens .....	125
II.2.4	Annahmen .....	136
II.2.5	Optionen.....	146
II.2.6	Bewertung der Werkstoffoptionen .....	159
<b>Anhang</b> .....	<b>162</b>	<b>162</b>

III.	VERFAHREN .....	167
	Gesamteinleitung für alle Verfahrenskapitel .....	167
III.1	<b>Intensivierte chemische Verfahren</b> .....	168
III.1.1	Prozessintensivierung.....	168
III.1.2	Prozessentwicklung und Prozessintegration.....	184
III.1.3	Annahmen .....	191
III.1.4	Optionen.....	192
III.1.5	Bewertung.....	195
III.2	<b>Verfahren der Kohlechemie</b> .....	199
III.2.1	Ist-Zustand.....	199
III.2.2	Option D.1: Verfahren der Kohlechemie .....	202
III.2.3	Bewertung Option D.1: Verfahren der Kohlechemie.....	205
III.3	<b>Biotechnologische Verfahren</b> .....	207
III.3.1	Einleitung.....	207
III.3.2	Bedeutung der Biotechnologie .....	209
III.3.3	Beispiele biotechnologischer Produktion .....	211
III.3.4	Potenzial biotechnologischer Verfahren zur Nutzung alternativer Rohstoffe .....	217
III.3.5	Annahmen .....	220
III.3.6	Option E.1: Vermehrter Einsatz biotechnologischer Verfahren in der chemischen Industrie .....	221
III.3.7	Bewertung Option E.1: Vermehrter Einsatz biotechnologischer Verfahren .....	223
III.4	<b>Bioraffinerien</b> .....	225
III.4.1	Einleitung.....	225
III.4.2	Definition und Konzept .....	225
III.4.3	Funktionsprinzip.....	227
III.4.4	Entwicklungsstand der wichtigsten Bioraffinerie-Konzepte.....	235
III.4.5	Annahmen .....	242
III.4.6	Option F.1: Technologiekonzept Bioraffinerie allgemein.....	245
III.4.7	Bewertung Option F.1: Technologiekonzept Bioraffinerie allgemein.....	250
III.5	<b>Verfahren der biomimetischen Chemie</b> .....	253
III.5.1	Einleitung.....	253
III.5.2	Nutzung biologischer Katalysemechanismen zur Herstellung ausgewählter Grundchemikalien.....	253
III.5.3	Bioinspirierte Materialien und Wirkstoffe .....	258
III.5.4	Annahmen .....	260
III.5.5	Optionen.....	264
III.5.6	Bewertung .....	269
IV.	ENERGIEUMSÄTZE .....	273
IV.1	<b>Einleitung</b> .....	273
IV.2	<b>Stofflicher Teil/Elektrochemische Verfahren</b> .....	275
IV.2.1	Einführung in die elektrochemischen Verfahren .....	275

IV.2.2	Elektrochemische Verfahren für anorganische Produkte (Elektrolysen).....	279
IV.2.3	Elektrochemische Verfahren zur Herstellung organischer Produkte.....	291
IV.2.4	Sonstige elektrochemische Verfahren .....	294
<b>IV.3</b>	<b>Energiespeicher .....</b>	<b>299</b>
IV.3.1	Einführung in die Energiespeichersysteme.....	299
IV.3.2	Mechanisch/Kinetische Speicher .....	304
IV.3.3	Wärmespeicher.....	310
IV.3.4	Batterien.....	314
IV.3.5	Power to Gas/Power to Chemicals.....	320
IV.3.6	Potenzial Demand Side Management (DSM)/Supply Side Management (SSM).....	333
<b>IV.4</b>	<b>Annahmen .....</b>	<b>335</b>
IV.4.1	Relevante Megatrends .....	335
IV.4.2	Auswirkungen der Megatrends auf die Elektrochemie .....	342
IV.4.3	Auswirkungen der Megatrends auf die Energiespeicherarten .....	343
<b>IV.5</b>	<b>Optionen.....</b>	<b>349</b>
IV.5.1	Ausbau der elektrochemischen und energieintensiven Produktion organischer Produkte.....	350
IV.5.2	Nutzung bestehender Verfahren zum Einsatz volatiler Strommengen .....	351
IV.5.3	Ausbau chemierelevanter Energiespeicherlösungen.....	354
<b>IV.6</b>	<b>Bewertung.....</b>	<b>365</b>
IV.6.1	Potenzial des Ausbaus der elektrochemischen und energieintensiven Produktion organischer Produkte .....	365
IV.6.2	Nutzung bestehender Verfahren zum Einsatz volatiler Strommengen .....	367
IV.6.3	Energiespeicher.....	368
<b>V.</b>	<b>HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN .....</b>	<b>375</b>
a.	Rohstoffe .....	377
	Fazit.....	377
	Handlungsempfehlungen.....	377
b.	Werkstoffe .....	379
	Fazit.....	379
	Handlungsempfehlungen.....	379
c.	Verfahren.....	381
	Fazit.....	381
	Handlungsempfehlungen.....	381
d.	Energieumsätze.....	383
	Fazit.....	383
	Handlungsempfehlungen.....	382
e.	Querschnittsthema: Stärkung Innovationsfähigkeit.....	385
	Handlungsempfehlungen.....	385
f.	Querschnittsthema: Dialog für Industrie- und Technologieakzeptanz.....	387
	Handlungsempfehlungen.....	387
g.	Querschnittsthema: Gesellschaftliche Herausforderungen – Qualifikation, demografische Entwicklung und gute Arbeitsverhältnisse .....	388
	Handlungsempfehlungen.....	388

ANHANG .....	391
Anhörungen .....	391
Gutachten .....	391
Vorträge .....	391
LITERATURVERZEICHNIS .....	393

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Importabhängigkeit Deutschlands .....	21
Abbildung 2:	Rohstoffbasis der chemischen Industrie Deutschland 2011 .....	22
Abbildung 3:	Welterdölförderung und Verwendung in der chemischen Industrie (s. auch Abbildung 23, Anhang 1) .....	24
Abbildung 4:	Globale Erdölvorräte 2011 .....	27
Abbildung 5:	Welterdgasförderung und stoffliche Verwendung in der chemischen Industrie....	28
Abbildung 6:	Globale Erdgas-Ressourcen nach WEO 2012, Volumenangaben sind Normvolumina (V <sub>n</sub> ) .....	29
Abbildung 7:	Globale Erdgasvorräte 2011 .....	30
Abbildung 8:	Verteilung der globalen Hartkohle-Reserven (2010) .....	31
Abbildung 9:	Bedeutung von Steinkohle und Braunkohle in Deutschland, gezeigt am Primär-Energieverbrauch über die Zehnjahresperiode im Vergleich mit der BIP-Entwicklung .....	32
Abbildung 10:	Chemie-Rohstoffquelle Kohle.....	34
Abbildung 11:	Anteile nachwachsender Rohstoffe am Rohstoffmix der Chemie und abgeleitete Folgeprodukte .....	35
Abbildung 12:	Verwendung der globalen Biomasse aus Landbau des Jahres 2008 .....	36
Abbildung 13:	Anbau nachwachsender Rohstoffe in Deutschland .....	37
Abbildung 14:	Weltweiter Verbrauch von Pflanzenölen .....	39
Abbildung 15:	Importe und Exporte von landwirtschaftlichen Gütern .....	40
Abbildung 16:	Preisentwicklung (Weltmarktpreise) der wichtigen Agrarrohstoffe Zucker und Weizen von 1985 bis 2012 (nicht inflationsbereinigt) in US-Dollar/Tonne...	41
Abbildung 17:	Gewinnung von Koch- und Kalisalz und Verwendung .....	47
Abbildung 18:	Phosphatgewinnung und Verwendung .....	48
Abbildung 19:	Flussspat – Gewinnung und Verwendung.....	49
Abbildung 20:	Recyclingraten wichtiger Industriemetalle.....	52
Abbildung 21:	Energieverbrauch in Deutschland durch Verkehrssituation Personen- und Güterverkehr, 1990-2009, Index 1990 = 100.....	57
Abbildung 22:	Weltzusatzbedarf an Strom .....	58
Abbildung 23:	Der Weg des Öls in den Alltag .....	92
Abbildung 25:	Preisentwicklung OPEC-Erdöl seit 1960 in US-Dollar pro Barrel .....	94
Abbildung 26:	Erdgaspreise ab Grenze (Pipeline) in EURO per TJ von 1991 bis 2013 (jeweils 1. Jan.).....	95
Abbildung 27:	Kraftwerkskohle-Importe frei Grenze in Euro pro t Steinkohleneinheit (SKE) von 1996 bis 2013 (jeweils 1. Jan.) .....	95
Abbildung 28:	Vorkommen von Elementen und deren Vergesellschaftung .....	96
Abbildung 29:	Einteilung der thermoplastischen Kunststoffe.....	100
Abbildung 30:	Wertschöpfungskette von Kunststoffen.....	102
Abbildung 31:	Kunststoff-Produktionsstandorte in Deutschland.....	103
Abbildung 32:	Übersicht zur Kunststoffbranche in NRW .....	104
Abbildung 33:	Produkte aus 1 t Erdöl.....	105
Abbildung 34:	Kunststoffbedarf nach Anwendungsfeldern und Kunststoffsorten in Europa 2011 .....	109
Abbildung 35:	In Handys verwendete Werkstoffsorten (anteilig) .....	111
Abbildung 36:	Einteilung der Kunststoffe nach Rohstoffquelle und biologischer Abbaubarkeit..	115
Abbildung 37:	Zertifikat für biobasierte Kunststoffe mit einer Gültigkeit von 5 Jahren.....	118
Abbildung 38:	Anteil der unterschiedlichen Materialien an Biopolymer-Produktion, 2012.....	119

Abbildung 39:	Weltweite Produktionskapazitäten von biobasierten Kunststoffen .....	120
Abbildung 40:	Flächennutzung für biobasierte Kunststoffe .....	123
Abbildung 41:	Durchschnittlicher Ertrag an Kohlenhydraten für verschiedene Nutzpflanzen...	124
Abbildung 42:	Nachnutzungspfade von Werkstoffen nach ihrem Produktleben.....	130
Abbildung 43:	Allgemeines Recycling-Symbol.....	132
Abbildung 44:	Der Grüne Punkt, Duales System Deutschland .....	132
Abbildung 45:	Gesamtkunststoffabfälle in Europa – Recycling und Wiedergewinnung 2006-2011 .....	133
Abbildung 46:	cradle to cradle-Symbol .....	134
Abbildung 47:	Europäische Erfassungsquoten für Verpackungen im Jahr 2011 .....	135
Abbildung 48:	Entwicklung der Produktionskapazitäten in Europa zwischen 2011 und 2020 (ohne Celluloseacetat und Duroplaste).....	140
Abbildung 49:	Weltweite Biokunststoffproduktionskapazitäten.....	141
Abbildung 50:	Forschungs- und Entwicklungsbedarf bei biobasierten Kunststoffen.....	142
Abbildung 51:	Hauptbereiche beim Kunststoffrecycling .....	145
Abbildung 52:	Übersicht über Verfahren und Verfahrensapparate der Prozessintensivierung....	169
Abbildung 53:	Übersicht der Erweiterung des Nutzungsbereichs von Prozessbedingungen (Druck, Temperatur) durch Prozessintensivierungsmaßnahmen (wie z.B. Prozessierung im laminaren Bereich) .....	170
Abbildung 54:	Systematischer Aufbau verschiedener Katalysatorformen.....	172
Abbildung 55:	Reduzierung des Lösemittelverbrauchs beim Sildenafil-Citrat-Prozess durch Prozessintensivierungsmaßnahmen .....	176
Abbildung 56:	Exemplarische Darstellung Mikroreaktionstechnik.....	178
Abbildung 57:	„Tal des Todes“ .....	185
Abbildung 58:	schematischer Aufbau des F <sup>3</sup> -Containers.....	187
Abbildung 59:	F <sup>3</sup> -Container .....	188
Abbildung 60:	Bilder des EvoTrainers.....	189
Abbildung 61:	EvoTrainer schematisch .....	190
Abbildung 62:	Verfahrensschema der direkten Kohleverflüssigung .....	199
Abbildung 63:	Verfahrensschema der indirekten Kohleverflüssigung über Vergasung.....	201
Abbildung 64:	Annex-Polygenerationskonzept.....	203
Abbildung 65:	Verteilung von Umsatz und FuE-Ausgaben dedizierter Biotechnologie- unternehmen .....	210
Abbildung 66:	Konzept der Bioraffinerie im Überblick .....	226
Abbildung 67:	Schematische Darstellung des Funktionsprinzips einer Bioraffinerie.....	228
Abbildung 68:	Landkarte mit realisierten Pilot- und Demonstrationsanlagen (Top-Down-Ansatz rot; Bottom-up-Ansatz grün) .....	236
Abbildung 69:	Entwicklungsstand von Bioraffineriekonzepten .....	239
Abbildung 70:	Ein vereinfachtes Schema der natürlichen Photosynthese in grünen Pflanzen ...	255
Abbildung 71:	Geteilte elektrochemische Zellen A (Galvanische Zelle zur Stromerzeugung als Daniell-Element: Zink-Elektrode in ZnSO <sub>4</sub> -Lösung und Kupfer-Elektrode in CuSO <sub>4</sub> -Lösung) und die Elektrolysezelle B, bei der elektrische Energie in das System eingebracht wird.....	276
Abbildung 72:	Vergleich der über verschiedene Industrien gemittelten Stromkosten ohne Steuern in wichtigen Industrieländern 2012, Basis IEA.....	279
Abbildung 73:	Elektrolyseprinzip Diaphragma-Verfahren.....	281
Abbildung 74:	Elektrolyseprinzip Amalgam-Verfahren.....	282
Abbildung 75:	Elektrolyseprinzip Membran-Verfahren .....	283
Abbildung 76:	Elektrolyseprinzip Membranverfahren (links) versus Verfahren mit SVK (rechts) .....	284

Abbildung 77:	Vergleich der verschiedenen Chlor-Alkali-Elektrolyse-Verfahren .....	286
Abbildung 78:	Schema der Wasserelektrolyse.....	287
Abbildung 79:	Prinzipieller Aufbau einer alkalischen Elektrolysezelle .....	288
Abbildung 80:	Prinzipieller Aufbau einer HTEL-Zelle .....	289
Abbildung 81:	Elektrolyseprinzip der Proton-Exchange-Membran .....	290
Abbildung 82:	Produktionselektrolysezelle der BASF als Plattenstapel .....	293
Abbildung 83:	Ressourcenverbrauch zur Herstellung einer Tonne Aluminium aus Aluminiumoxid.....	294
Abbildung 84:	Jährliche Produktion von Primär- und Sekundäraluminium in Deutschland ...	295
Abbildung 85:	Verteilung Sonnenstunden Deutschland 2012.....	300
Abbildung 86:	Mittlere Windgeschwindigkeiten Deutschland.....	300
Abbildung 87:	Funktionsschema Pumpspeicherkraftwerk.....	305
Abbildung 88:	Prinzip Schwungradspeicher .....	307
Abbildung 89:	Bedarfsgerechte Schwungradspeicher-Lösungen .....	308
Abbildung 90:	Darstellung Prinzip adiabatischer Druckluftspeicher .....	309
Abbildung 91:	Vergleich Latentwärmespeicher (roter Verlauf) und sensibler Wärmespeicher (blauer Verlauf) .....	312
Abbildung 92:	Schematischer Aufbau einer Batterie im Entladezustand .....	314
Abbildung 93:	Aufbau einer Redox-Flow-Batterie.....	318
Abbildung 94:	Schema Konversionsverfahren zur Wasserstoffherzeugung und Methanisierung aus überschüssigem Strom regenerativer Quellen.....	321
Abbildung 95:	Übersichtsmatrix: H <sub>2</sub> -Toleranz ausgewählter Elemente im Erdgasnetz .....	323
Abbildung 96:	Aufbau der PEM-Brennstoffzelle <sup>1075</sup> .....	325
Abbildung 97:	Anwendungsfelder für Power to Gas.....	327
Abbildung 98:	Spezifische Gestehungskosten für Wasserstoff und synthetisches Methan im Vergleich zu anderen Energieträgern (wälzbare Kosten nach GasNZV abgezogen) .....	330
Abbildung 99:	Abschätzung der zeitlichen Entwicklung der Rahmenbedingungen (eigene Darstellung) .....	336
Abbildung 100:	Prognose 2035 – Globale Stromerzeugung nach Quelle und Regionen, nach dem WEO „New Policies Scenario“ .....	337
Abbildung 101:	Zuwachs der Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen in Europa .....	337
Abbildung 102:	Prognose Entwicklung der Bruttostromerzeugung bis 2050 .....	338
Abbildung 103:	Verteilung der insgesamt installierten Leistung 2030 in Deutschland.....	339
Abbildung 104:	Leistungsüberschuss und Überschusserzeugung bei 80%-Anteil EE .....	341
Abbildung 105:	Verfügbare Überschussmengen für Energiespeicher unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen .....	342

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Methodikbestandteile und ihre Kurzbeschreibung, eigene Darstellung.....	16
Tabelle 2:	Übersicht über die verwendeten Nachhaltigkeitskriterien, eigene Darstellung .....	16
Tabelle 3:	Veredelungskette der Naphtha-Crackprodukte, eigene Darstellung .....	25
Tabelle 4:	Ölverbrauch und Umrechnungsfaktoren für gebräuchliche Mengenangaben (eigene Berechnungen) .....	25
Tabelle 5:	Globale Erdöl- Ressourcen und Reserven .....	26
Tabelle 6:	chemische Wertschöpfungskette von Erdgas .....	28
Tabelle 7:	Erdgasverbrauch 2011 (Differenzen in der Umrechnung sind Rundungsfehler) ..	29
Tabelle 8:	Einsatzmengen nachwachsender Rohstoffe in Kilotonnen zur stofflichen Nutzung in Deutschland .....	34
Tabelle 9:	Zur Verfügung stehende Wald-, Weide-, Acker- und Gesamtfläche weltweit, Deutschland und Nordrhein-Westfalen .....	36
Tabelle 10:	Vergleich des Ertrags, des gebundenen CO <sub>2</sub> und des Energiegehalts verschiedener Biomasseträger.....	38
Tabelle 11:	Holznutzung 2011 in Mio. m <sup>3</sup> .....	43
Tabelle 12:	Umrechnungsfaktoren für Steinkohle- und Rohöleinheiten sowie Heizwerte .....	91
Tabelle 13:	Vergleich der weltweiten, europäischen und deutschen Produktionskapazitäten der wichtigsten petrochemischen Kunststoffsorten im Jahr 2011 .....	106
Tabelle 14:	Eigenschaften der bedeutendsten petrochemischen Kunststoffe .....	108
Tabelle 15:	Eigenschaften wichtiger biobasierter Kunststoffe .....	118
Tabelle 16:	Vergleich der Erhebungen zu den globalen Produktionskapazitäten biologisch abbaubarer Kunststoffe 2012, eigene Darstellung .....	127
Tabelle 17:	Heizwerte ausgewählter Werkstoffe.....	131
Tabelle 18:	Recyclingnummern für Kunststoffe .....	162
Tabelle 19:	Vor- und Nachteile von homogener und heterogener Katalyse.....	172
Tabelle 20:	Heterogen katalysierte Reaktionen .....	174
Tabelle 21:	Beispielhafte Prozesse, die bereits industriell Anwendung finden, eigene Darstellung .....	184
Tabelle 22:	Eckdaten der Biotechbranche in Deutschland .....	209
Tabelle 23:	Produkte der weißen Biotechnologie, die im Tonnenmaßstab hergestellt werden.....	212
Tabelle 24:	Enzyme, die in Waschmitteln verwendet werden .....	213
Tabelle 25:	Marktentwicklung biotechnologischer Verfahren in der Chemie bis 2025 für den US-Markt (Datenstand 2008).....	220
Tabelle 26:	Unterschiede zwischen fossilen organischen und nachwachsenden Rohstoffen, eigene Darstellung .....	228
Tabelle 27:	Verfügbarkeit landwirtschaftlicher Rohstoffe für Bioraffinerien in Nordrhein-Westfalen (regionale Gewinnung) .....	230
Tabelle 28:	Generelle Unterschiede zwischen petrochemischen und bio-basierten Verfahren, eigene Darstellung.....	230
Tabelle 29:	Top-Kandidaten für zuckerbasierte Plattformchemikalien .....	233
Tabelle 30:	Aktuell aussichtsreichste Bioraffineriekonzepte .....	237
Tabelle 31:	Industrielle CO <sub>2</sub> -Ströme in Deutschland heute.....	238
Tabelle 32:	Details zum Entwicklungsstand der einzelnen Bioraffinerie-Konzepte .....	240
Tabelle 33:	Marktpotenzial der einzelnen Bioraffineriekonzepte .....	243
Tabelle 34:	Voraussichtlich verfügbare industrielle CO <sub>2</sub> -Ströme in Deutschland in 2030.....	244
Tabelle 35:	Herausforderungen bei Etablierung der einzelnen Bioraffineriekonzepte.....	249

Tabelle 36:	Fakten zur Effektivität und Effizienz der Sonnenenergienutzung (max. rel. genutzte Sonneneinstrahlung) .....	265
Tabelle 37:	Wesentliche Acetylen-basierte Prozessketten .....	298
Tabelle 38:	Vor- und Nachteile von Batterien, eigene Darstellung ” .....	315
Tabelle 39:	Vor- und Nachteile von Redox-Flow-Batterien im Vergleich zu klassischen Batterien, eigene Darstellung” .....	318
Tabelle 40:	Redox-Flow-Batteriesysteme, eigene Darstellung .....	319
Tabelle 41:	Beschreibung ausgewählter Speicherformen für Wasserstoff, eigene Darstellung	322
Tabelle 42:	Überschussstrommengen, SNG-Produktion und CO <sub>2</sub> -Bedarf für unterschiedliche H <sub>2</sub> -Zumischungen unter heutigen Bedingungen .....	327
Tabelle 43:	Überblick Speichermoleküle aus energieintensiven Verfahren .....	332
Tabelle 44:	Demand Side Management-Potenzial nach Stromspannungs-Strängen, Erläuterung .....	334



# Inhalt Kapitel I

I.	<b>EINLEITUNG</b> .....	3
I.1	<b>Zielsetzung</b> .....	3
I.1.1	Herausforderungen der Zukunft an unsere Industriegesellschaft .....	3
I.1.2	Chemische Industrie in Deutschland .....	3
I.1.3	Chemische Industrie in NRW.....	5
I.1.4	Herausforderungen für die chemische Industrie – Megatrends .....	6
I.2	<b>Themen und Untersuchungsfeld</b> .....	11
I.2.1	Stoffumsätze: Rohstoffe und Werkstoffe .....	11
I.2.2	Verfahren.....	12
I.2.3	Energieumsätze: Elektrochemie und Energiespeicher.....	12
I.3	<b>Vorgehensweise der Enquetekommission Chemie</b> .....	13
I.3.1	Allgemeine Vorgehensweise und Mitglieder .....	13
I.3.2	Verwendete Methodik .....	15
I.3.3	Nachhaltigkeitskriterien.....	16



# I. Einleitung

## I.1 Zielsetzung

### I.1.1 Herausforderungen der Zukunft an unsere Industriegesellschaft

Die Herausforderungen an unsere Industriegesellschaft haben sich in den letzten Jahrzehnten stark verändert. Dabei stehen Gesellschaft und Wirtschaft im Spannungsfeld ökologischer, ökonomischer und sozialer Entwicklungen.

Industrielle Prozesse und die sich wandelnden Konsumgewohnheiten einer wachsenden und sich weiter entwickelnden Weltbevölkerung verstärken den bereits heute bestehenden Druck auf die Ökosysteme weltweit. Das ökonomische Spannungsfeld industrieller Produktion zeigt sich durch stärkeren Wettbewerb in den globalen Märkten. Märkte, die stark wachsen und zudem zunehmend Qualität, Know-how und Stabilität gewährleisten, werden von Investoren bevorzugt. Neben der Marktdynamik bieten niedrige(re) Energie- und Rohstoffpreise vielen Regionen, mit denen Nordrhein-Westfalen im Wettbewerb steht, einen Standortvorteil.

Der Verlust von Arbeitsplätzen wegen mangelnder Wettbewerbsfähigkeit oder auch eine geringe Akzeptanz industrieller Tätigkeit infolge von Umweltbelastungen haben unmittelbare Auswirkungen auf soziale Faktoren. Der Faktor Arbeit ist in vielen Bereichen der Industrie nicht der größte Kostenfaktor. Dieser Umstand, vor allem aber die hohe Qualifikation und das Engagement der Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer sowie eine funktionierende Sozialpartnerschaft haben dafür gesorgt, dass Arbeitsplätze in der deutschen Industrie in der Regel gut bezahlt und sicher sind.

Die chemische Industrie ist zum einen als rohstoff- und energieintensiver Industriesektor, zum anderen als Innovationstreiber für Prozesse, Stoffe und Materialien, die in nahezu allen anderen Industriebereichen Verwendung finden, maßgeblicher Gestalter dieser Entwicklungen.

### I.1.2 Chemische Industrie in Deutschland

*„Die Chemie ist die Wissenschaft der Stoffe und ihrer Umwandlung, die von der chemischen [...] Industrie praktisch angewandt wird, indem sie [Roh]Stoffe für eine Vielzahl unterschiedlichster Produkte unter Einsatz von Energie zu Endprodukten weiterverarbeitet. Dies tut sie selbst oder zusammen mit ihren Partnern in der Wertschöpfungskette.“<sup>1</sup>* Die chemische Industrie nutzt vor allem einen Teilstrom der Mineralölverwertung, steht damit am Beginn vieler Wertschöpfungsketten und ist dementsprechend für viele nachgeschaltete Branchen zentraler Materiallieferant.

2013 generierte die deutsche chemische Industrie rund 190 Mrd. Euro Umsatz und ist damit nach der Automobilindustrie und dem Maschinenbau die drittgrößte Industriebranche Deutschlands. Zudem beschäftigte sie knapp 438.000 Mitarbeiter und investierte über 6 Mrd. Euro in Deutschland. Die chemische Industrie hat daher eine herausragende Bedeutung für die deutsche Wirtschaft. Im

---

1 Deutsche Industrievereinigung und Biotechnologie (DIB) im Verband der chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Forschungs- und technologiepolitische Empfehlungen der chemischen und biotechnischen Industrie zur Ressourceneffizienz und zur Rohstoffbasis im Wandel. (2014), S. 5.

weltweiten Vergleich belegt die deutsche Chemie derzeit nach China, den USA und Japan Platz vier.<sup>2</sup> Entsprechend ihrer zentralen Stellung innerhalb der industriellen Wertschöpfungskette und ihrer Wirtschaftsleistung ist die chemische Industrie für Deutschland eine Schlüsselindustrie.

Die Palette chemischer Produkte ist entsprechend vielfältig. Etwa 37% des Umsatzes entfallen auf Basischemikalien, ca. 43% auf Spezialchemikalien (z.B. Farben, Lacke, Wasch- und Reinigungsmittel, Pflanzenschutzmittel, Spezialkunststoffe) und ca. 20% auf Pharmazeutika.<sup>3</sup> Die chemische Industrie nimmt damit eine zentrale Position in der industriellen Wertschöpfungskette ein, denn sie ist mit fast allen Branchen über Lieferbeziehungen eng verzahnt.<sup>4</sup> Fast 80% ihrer Produkte gehen in die industrielle Weiterverarbeitung, nur etwa 17% direkt an den Endverbraucher. Zu den größten industriellen Kunden der Chemiebranche zählen neben Kunststoffverarbeitern die Auto-, Verpackungs- und Bauindustrie. Gleichzeitig ist die Chemiebranche selbst ein wichtiger Abnehmer von Industriegütern (z.B. Mineralölerzeugnisse, Gas und Maschinen) und diverser Dienstleistungen.<sup>5</sup>

Als Stoffumwandlerin am Anfang vieler Wertschöpfungsketten ist die chemische Industrie eine besonders rohstoff- und energieintensive Branche. 2011 wurden von ihr mehr als 40 Mio. t mineralische und organische Rohstoffe eingesetzt und zu ca. 30.000 verschiedenen Stoffen und fast eine Million Zubereitungen umgewandelt.<sup>6</sup> Dafür benötigt die deutsche Chemieindustrie jedes Jahr rund 50 TWh Strom und 131 TWh anderer Energieträger (Öl, Gas, Kohle u.a.)<sup>7</sup>. Nicht zuletzt aus diesen Gründen hat die chemische Industrie in den vergangenen Jahrzehnten ihre Prozesse hinsichtlich Rohstoff- und Energieeffizienz und eines schonenden Umgangs mit der Umwelt stark optimiert: Der Energieeinsatz der Branche wurde seit 1990 um ein Fünftel reduziert, obwohl die Produktion im gleichen Zeitraum um fast 60% gestiegen ist.<sup>8</sup> Die Abfallmenge wurde zwischen 1990 und 2009 um 80% gesenkt. Dadurch konnte die chemische Industrie ihren Rohstoffeinsatz verringern. Sie wird aber, trotz hoher Ressourceneffizienz und vermehrter Kreislaufführung, weiterhin auf neu abgebaute Rohstoffe angewiesen sein. Einen großen Beitrag der chemischen Industrie zur Ressourceneffizienz liefert die Nutzungsphase chemischer Produkte, z.B. die Einsparung von Energierohstoffen durch Dämmstoffe oder der Leichtbau. Daneben kann die chemische Industrie als Innovationstreiber auch die Effektivität von Stoffkreisläufen durch nachhaltiges Produktdesigns verbessern.

Einen wesentlichen Beitrag zur Effizienz leisten die Verbundstrukturen der chemischen Industrie, in welchen Stoff- und Energieströme einzelner Prozesse und Anlagen miteinander gekoppelt werden: Produkte in einer Anlage dienen in einer anderen als Ausgangsstoff für einen sich anschließenden Produktionsprozess (sog. Koppelproduktion). Hierdurch wird der Anfall von Restströmen bzw. Abfällen weitestgehend vermieden.<sup>9,10</sup> Dies gilt in vergleichbarer Weise für die Energienutzung. Diese Art

---

2 Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Auf einen Blick: Chemische Industrie 2014. (2014), S. 2.

3 Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Die deutsche chemische Industrie 2030.VCI-Prognos-Studie. (2013), S. 6. ebd., S.6.

5 Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Auf einen Blick: Chemische Industrie 2014. (2014), S. 2.

6 Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Die deutsche chemische Industrie 2030.VCI-Prognos-Studie. (2013), S. 29.

7 Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Auf einen Blick: Chemische Industrie 2014. (2014), S. 3.

8 Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Die deutsche chemische Industrie 2030.VCI-Prognos-Studie. (2013), S. 29 f. ebd., S. 29.

10 Deutsche Industrievereinigung Biotechnologie (DIB) im Verband der chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Forschungs- und technologiepolitische Empfehlungen der chemischen und biotechnischen Industrie zur Ressourceneffizienz und zur Rohstoffbasis im Wandel. (2014), S. 6.

des Verbunds ist in deutschen Chemieparks optimal realisiert, weshalb diese auch eine weltweite Vorreiter- und Vorbildfunktion haben. Wesentliche Standortvorteile von Chemieparks sind: Kostensparnisse durch Synergieeffekte; eine erprobte und optimierte Infrastruktur; ein breites Dienstleistungsangebot der Chemieparkbetreiber bei Planung, Bau und Betrieb von Anlagen; räumliche Nähe von Produzenten und Abnehmern, die nicht nur einen Austausch von Stoff- und Energieströmen, sondern auch einen vereinfachten Wissenstransfer in Forschung und Entwicklung ermöglicht.<sup>11</sup>

Als zentraler Materiallieferant (vgl. Werkstoffkapitel) für die industrielle Wertschöpfungskette ist die chemische Industrie Impulsgeber und Innovationsmotor für nachgeschaltete Branchen und liefert Lösungen für die Herausforderungen der Zukunft (vgl. Megatrends).<sup>12</sup> Sie zählt neben Fahrzeugbau, Elektroindustrie, Maschinenbau zu den innovationsstärksten Branchen der deutschen Wirtschaft.<sup>13</sup> Chemie und Pharma investieren pro Jahr über 10 Mrd. Euro in Forschung und Entwicklung (FuE), was über 17% aller FuE-Aufwendungen der deutschen Industrie ausmacht.<sup>14</sup> Die FuE-Intensität der deutschen Chemie liegt im Vergleich zu anderen Technologiebranchen gemessen am Umsatz mit 3,5% etwas unter dem Durchschnitt von 4%, gemessen am Anteil des FuE-Personals an den Beschäftigten (7,5%) ist sie jedoch überdurchschnittlich. Im internationalen Vergleich nimmt die deutsche chemische Industrie damit Rang 2 ein.<sup>15</sup> Die hieraus resultierenden Forschungsleistungen lassen sich sehr gut an den Patentanmeldungen ablesen. Hier ist das südliche NRW im europaweiten Vergleich führend.<sup>16</sup>

Wie die deutsche Industrie insgesamt, so ist auch die chemische Industrie exportstark: 2012 erwirtschaftete sie einen Auslandsumsatz von knapp 113 Mrd. Euro bei einem Gesamtumsatz von rund 187 Mrd. Euro. Im Ausland stellten deutsche Chemieunternehmen 2012 Chemikalien im Wert von mehr als 191 Mrd. Euro her. Dennoch bleibt Europa der Heimatmarkt der deutschen Chemie.<sup>17</sup>

### 1.1.3 Chemische Industrie in Nordrhein-Westfalen

Die nordrhein-westfälische chemische Industrie ist mit über 91.200 Beschäftigten und knapp 47 Mrd. Euro Umsatz (Stand 2013<sup>18</sup>) das Rückgrat der deutschen Chemie und eine der Schlüsselindustrien Nordrhein-Westfalens. NRW nimmt damit unter den internationalen Chemieregionen EU-weit Rang 5 und weltweit Rang 13 ein<sup>19</sup>. Etwa 28% aller Beschäftigten der chemischen Industrie Deutschlands arbeiten in NRW. Die in der NRW-Chemie Beschäftigten sind gut ausgebildet und werden mit wettbewerbsfähigen Löhnen vergütet. Mit diversen Chemieparks ist die Verbundstruktur in NRW besonders stark ausgeprägt, die zentrale Lage in Europa, eine gut ausgebaute Infrastruktur mit Anbindung an die internationale Verkehrsnetze und der Zugang zum größten Pipelinennetzwerk Europas sind weitere Standortvorteile.<sup>20</sup> Um diese Vorteile des Chemiestandortes NRW zu erhalten, ist es auch notwendig die entsprechenden Investitionen in die Verkehrsinfrastruktur zu tätigen.

11 Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Synergieeffekte sparen Kosten. (2013), S. 1 f.

12 Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Die deutsche chemische Industrie 2030. VCI-Prognos-Studie. (2013), S.33.

13 Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH; Niedersächsisches Institut für Wirtschaftsforschung e.V. (Hg.): Innovationsindikatoren Chemie 2014. (2014), S. 10.

14 Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Auf einen Blick: Chemische Industrie 2014. (2014), S. 4.

15 Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH; Niedersächsisches Institut für Wirtschaftsforschung e.V. (Hg.): Innovationsindikatoren Chemie 2014. (2014), S. 10.

16 Perrey, Karen et al.: Landtag NRW (Hg.): Gutachten „Innovationsleistungsfähigkeit der chemischen Industrie in NRW – Katalyse“ für die Enquete-Kommission II des Landtags von Nordrhein-Westfalen. (2014), S. 6 f.

17 Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Auf einen Blick: Chemische Industrie 2014. (2014), S. 3.

18 Forster, Michael: Statistisches Landesamt NRW (IT.NRW) (Hg.): Die Industrie in Nordrhein-Westfalen. (2014).

19 ebd.

20 ebd.

Die Unternehmensstruktur der NRW-Chemie ist trotz der Existenz großer Chemieunternehmen stark mittelständisch geprägt: 2013 waren über 80% der Unternehmen kleine und mittlere Unternehmen (KMU)<sup>21</sup>. Zu den Großunternehmen (19%) zählen fünf Unternehmen mit mehr als 1.000 Mitarbeitern<sup>22</sup>. Die Unternehmensstrukturen sind nicht statisch; gerade in Großunternehmen sind immer wieder Ausgründungen, Abspaltungen und Zukäufe mit der Absicht, die Wettbewerbsfähigkeit zu erhöhen, zu beobachten. Im Vergleich zu anderen deutschen Chemieregionen ist für NRW die hohe Bedeutung der Grundstoffchemie kennzeichnend: Sie erwirtschaftet mit einem Anteil von nur 40% bezogen auf die Anzahl an Unternehmen in NRW 70% des nordrhein-westfälischen Chemieumsatzes<sup>23</sup>. Die hohe Dichte an Grundstoffindustrie ist unter anderem mit der Nähe zu den niederländischen und belgischen Seehäfen sowie die gute Anbindung dorthin über den Rhein und das Pipelinennetz begründet. Die Grundstoffindustrie ist Basis für die Spezialchemie in unserem Bundesland. Bedeutend für die Erfolgsgeschichte der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen ist die Existenz und Ausbaufähigkeit dieser Wertschöpfungsketten.

Die führende Position der chemischen Industrie Nordrhein-Westfalen gründet vor allem auch auf der besonderen Forschungslandschaft des Landes. So verfügt Nordrhein-Westfalen über eine der höchsten Forschungsdichten in ganz Europa: 72 Hochschulen, 13 Fraunhofer-Institute, 12 Max-Planck-Institute, 10 Institute der Leibniz-Gemeinschaft, 3 Helmholtz-Zentren (z.B. Forschungszentrum Jülich), 5 Johannes-Rau-Forschungsinstitute, 41 Technologie- und Gründerzentren sowie 30 Technologietransferstellen<sup>24</sup>.

### 1.1.4 Herausforderungen für die chemische Industrie – Megatrends

Die Schlüsselrolle der chemischen Industrie in NRW bzw. Deutschland gilt es nachhaltig zu sichern. Hierzu ist es wichtig, zukünftige Entwicklungen frühzeitig zu erkennen, diese zu analysieren und Handlungsoptionen abzuleiten. Basis für diese Betrachtungen sind die sogenannten Megatrends. Megatrends bezeichnen langfristige und global übergreifende Transformationsprozesse, die sich in einem Betrachtungshorizont von mehr als 15 Jahren vollziehen werden und durch ihre Einflussstärke sowie ihre Reichweite gekennzeichnet sind<sup>25,26</sup>. Aus ihnen lassen sich – bei allen Unsicherheiten, denen Prognosen unterliegen – erwartete Entwicklungen in Gesellschaft und Wirtschaft ableiten und Zukunftsmärkte beschreiben. Nachfolgend sollen die für die chemische Industrie in NRW relevantesten Trends kurz beschrieben werden.

#### Demografischer Wandel

Unter dem demografischen Wandel wird die Verschiebung bzw. Veränderung in der Alterszusammensetzung der Bevölkerung verstanden. Während in den Entwicklungs- und Schwellenländern von einem dynamischen Wachstum ausgegangen wird, erwartet man für Europa lediglich eine Stabilisierung der Bevölkerungszahl. Dabei werden Frankreich und Großbritannien

21 Bis zu 249 Mitarbeiter.

22 Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Unternehmensstruktur NRW-Chemie / Spartenstruktur NRW-Chemie. (2014).

23 ebd.

24 NRW.INVEST GmbH: Wissen für die Welt: Forschungseinrichtungen in Nordrhein-Westfalen unter: [http://www.nrwinvest.com/nrwinvest\\_deutsch/NRW\\_im\\_Ueberblick/Daten\\_Fakten/Forschung\\_Entwicklung/index.php](http://www.nrwinvest.com/nrwinvest_deutsch/NRW_im_Ueberblick/Daten_Fakten/Forschung_Entwicklung/index.php). Online am 17.11.2014; Perrey, Karen et al.: Landtag NRW (Hg.): Gutachten „Innovationsleistungsfähigkeit der chemischen Industrie in NRW – Katalyse“ für die Enquete-Kommission II des Landtags von Nordrhein-Westfalen. (2014), S. 17.

25 Megatrends erstrecken sich auf alle Weltregionen und verschiedenste Akteure (Regierungen, Unternehmen, Individuen) und bewirken tiefgreifende, mehrdimensionale Umwälzungen aller gesellschaftlichen Teilsysteme. Ihre Auswirkungen können regional unterschiedlich sein. Quelle: Z\_punkt GmbH (Hg.): Megatrends. (2008).

26 vgl. Z\_punkt GmbH (Hg.): Megatrends update. (2013), S. 3.

aufgrund der Zuwanderung aus ehemaligen Kolonien weiter stärker wachsen. Deutschland hingegen wird deutlich an Bevölkerung verlieren und somit eine Sonderrolle innerhalb Europas einnehmen.<sup>27</sup>

Durch die sinkende Zahl an Erwerbstätigen infolge der Überalterung und der Abnahme der Bevölkerung, wird es vermutlich langfristig zu einem Fachkräftemangel kommen, den es auszugleichen gilt. Weniger Konsumenten im Inland führen auch zu Rückgängen in der Nachfrage von Halb- und Fertigerzeugnissen. Die weltweite dynamische Entwicklung hingegen wird die Exportnachfrage weiter erhöhen.<sup>28</sup>

### **Neue Mobilitätsmuster**

Die globale Mobilität wird in den nächsten Jahren sehr schnell und stark anwachsen, insbesondere durch den Nachholbedarf der Schwellenländer. Dies wird neue Konzepte für die Mobilität erforderlich machen. Neue Fahrzeugkonzepte und Antriebstechnologien werden auf den Markt drängen und heutige Konzepte ablösen.

Die neuen Technologien eröffnen der chemischen Industrie interessante Marktchancen für innovative Lösungen, z.B. mit Leichtbauwerkstoffen, neuer Speichertechnik und Wasserstofftechnologien. Neben neuen technischen Lösungen werden sich zudem neue Mobilitätsmuster durchsetzen (z.B. durch Zuwachs an Sharing-Modellen oder die intelligente Vernetzung der Nutzung von Individual- und öffentlichen Verkehrssystemen).

Neue intelligente Logistikkonzepte werden erforderlich werden, u.a. weil Rohstoffe, Halb- und Fertigprodukte infolge des Megatrends Globalisierung 2.0 im vernetzten Verbund transportiert werden müssen. Intermodale Mobilitätsmuster werden zunehmen.<sup>29</sup>

### **Lernen von der Natur**

Der Trend Lernen von der Natur weist darauf hin, dass zunehmend natürliche Strukturen, Prinzipien und Prozesse als Innovationsleitbilder dienen. Besonders die Bionik, bei der Designkonzepte aus der Natur in die industrielle Welt übertragen werden, ist hier zu nennen. Dieser Trend beschreibt auch die Organisation von Produktionssystemen nach biologischen Vorbildern, mit den Schwerpunkten der Dezentralisierung und Kreislaufwirtschaft.<sup>30</sup> In der Natur laufen, unter Berücksichtigung der teilweise sehr langen Zyklen, alle Prozesse des Aufbaus und Abbaus von Stoffen dezentral ab und es gibt keinen Abfall.

### **Konvergenz von Technologien**

Bereits heute nimmt die thematische Überlappung von unterschiedlichen Forschungsfeldern zu. Diese Entwicklung wird sich verstärkt fortsetzen und zu einem vernetzten Denken führen. Eine besondere Rolle spielen dabei die Informations- und Kommunikationstechnik. Sie beschleunigen die Vernetzung unterschiedlicher Disziplinen. Die bereits heute genutzten Systeme der SMART Grids, SMART Metering und SMART Materials sind erste Ansätze solcher neuen Impulse der zukünftigen Technologien. Dieses Verschmelzen der verschiedenen Disziplinen wird auch als neues Zeitalter der Technologie mit der Abkürzung NBIC bezeichnet. NBIC leitet sich aus den Technologien Nanotech,

27 Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Die deutsche chemische Industrie 2030. VCI-Prognos-Studie. (2013), S. 35; Prognos AG (Hg.): Der Wirtschaftsstandort NRW 2030. Aktivieren – Stärken – Ausbauen. (2014), S. 3.

28 Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Die deutsche chemische Industrie 2030. VCI-Prognos-Studie. (2013).

29 Burmeister, Klaus: Wertschöpfungsperspektiven für die Zukunft: Megatrends und nachhaltige Zukunftsmärkte unter: [http://www.forschungsnetzwerk.at/downloadpub/2012MT\\_und\\_ZM\\_komp.pdf](http://www.forschungsnetzwerk.at/downloadpub/2012MT_und_ZM_komp.pdf) (2012). Online am 10.12.2014.

30 Z\_punkt GmbH (Hg.): Megatrends update. (2013).

Biotech, Infotech und Cognotech ab, die interdisziplinär zusammengeführt werden, und beschreibt die Vision der "2. Natur".<sup>31</sup>

### Globalisierung 2.0

Der Megatrend Globalisierung 2.0 beschreibt die Verlagerung der ökonomischen Machtzentren. Durch die Zunahme der globalen Vernetzung und Kommunikationswege wachsen die bisherigen Märkte enger zusammen. Der hierdurch geschaffene Austausch, in Kombination mit geringen Transportkosten, ermöglicht eine Fragmentierung bestehender Wertschöpfungsketten. Prozessschritte können in den optimal dafür geeigneten Regionen durchgeführt werden. Hierdurch kommt es zwangsläufig zu Produktionsverlagerungen und damit zu global fragmentierten und verteilten Wertschöpfungsketten. Insgesamt wird diese Entwicklung ein volatileres Marktumfeld und eine Verlagerung der ökonomischen Zentren bewirken.<sup>32</sup> Für die chemische Industrie in NRW besteht die Gefahr, dass durch die Fragmentierung der Wertschöpfungsketten die Vorteile der Verbundstruktur verloren gehen.

### Wissensbasierte Ökonomie

In der Wirtschaft von morgen wird Innovation noch mehr als heute der zentrale Wachstumstreiber und Wettbewerbsfaktor sein. Wertschöpfung wird wissens- und datenbasiert generiert, indem die Entwicklung von Innovationen zielgerichtet auf Basis von rasant anwachsendem Wissen und Datenmengen erfolgt. Beschleunigt wird dieser Trend durch ein steigendes globales Wissensniveau. Denn mit zunehmendem wirtschaftlichem Erfolg der Entwicklungs- und vor allem der Schwellenländer erhalten immer mehr Menschen Zugang zu Bildung. Die wissensbasierte Ökonomie erfordert ein lebenslanges Lernen. Dieser Trend ist eng mit dem der Business Ökosysteme und auch der Konvergenz der Technologien verbunden.<sup>33</sup>

### Business Ökosystem

Unter Business Ökosystemen werden neue Wertschöpfungspartnerschaften über bestehende Systemgrenzen wie Industriesektoren hinweg verstanden. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Grenzen zwischen Branchen, Märkten und Unternehmen mehr und mehr auflösen. Die zunehmende Vernetzung („Business Mash-Ups“) ermöglicht Systeminnovationen und bietet gerade an den Schnittstellen das Potenzial für neue Märkte mit innovativen und individuellen Lösungen. Die beschriebene Vernetzung und Auflösung traditioneller Systemstrukturen erfordert gleichzeitig ein gezieltes Management der damit verbundenen Komplexität.<sup>34</sup>

### Neue Konsummuster

In engem Zusammenhang mit den demografischen Entwicklungen steht die Entwicklung neuer Konsummuster. Es ist davon auszugehen, dass sich Konsumausgaben und -präferenzen verschieben werden. So wird, bedingt durch den wirtschaftlichen Aufstieg der Schwellenländer, von einem verstärkten Wohlstand und großem Nachholbedarf der dortigen Bevölkerung ausgegangen. Es wird erwartet, dass sich die Bevölkerung dieser Länder am westlichen Lebensstandard orientiert. Das wird sich im Konsumverhalten niederschlagen und eine erhöhte Kaufbereitschaft hochwertiger Konsumgüter zur Folge haben.

Demgegenüber wird erwartet, dass die Bedeutung von kurzlebigen Luxusgütern im Konsumverhalten der westlichen Welt abnimmt. Bei einem Teil der Bevölkerung ist hier ein Trend zum Konsum

31 Burmeister, Klaus: Wertschöpfungsperspektiven für die Zukunft: Megatrends und nachhaltige Zukunftsmärkte unter: [http://www.forschungsnetzwerk.at/downloadpub/2012MT\\_und\\_ZM\\_komp.pdf](http://www.forschungsnetzwerk.at/downloadpub/2012MT_und_ZM_komp.pdf) (2012). Online am 10.12.2014.

32 Heß, Werner: Ein Blick in die Zukunft – acht Megatrends, die Wirtschaft und Gesellschaft verändert (2008), S.8 ff.

33 Z\_punkt GmbH (Hg.): Megatrends update. (2013).

34 ebd.

nachhaltiger Güter erkennbar. Nachhaltigkeitsaspekte haben damit einen zunehmenden Einfluss auf die Kaufentscheidung. Für nachhaltige Güter besteht teilweise sogar die Bereitschaft einen Mehrpreis gegenüber konventionellen Produkten zu zahlen. Ein weiterer Trend im Konsumverhalten der westlichen Welt ist bedingt durch den demografischen Wandel und der damit einhergehenden älteren Gesellschaft. So wird erwartet, dass Ausgaben zunehmend zur gesundheitlichen Vorsorge sowie für medizinische Produkte und Präparate getätigt werden.<sup>35</sup> Zu analysieren ist, ob sich neue Konsummuster auch dadurch ergeben, dass zunehmend Mietlösungen – wie bisher im Chemikalienleasing umgesetzt – ausgeweitet werden.

### Umbrüche beim Verbrauch von Energie und Ressourcen

Aus den Megatrends lässt sich ein veränderter Verbrauch an Energie und Ressourcen wie fossilen Energieträgern, Wasser, Metallen usw. ableiten. Es wird erwartet, dass der globale Energieverbrauch bis 2030 um 45% ansteigen wird. Ressourcen wie etwa Wasser werden immer knapper. So wird davon ausgegangen, dass der Anteil der an Wasserknappheit leidenden Weltbevölkerung auf 25% ansteigen wird. Heute haben 1,1 Milliarden Menschen keinen Zugang zu sauberem und sicherem Trinkwasser, was einem Anteil von 16% entspricht.<sup>36</sup>

Von entscheidender Bedeutung wird es sein, diesem Trend zu begegnen und gegenzusteuern. Es wird erwartet, dass bis 2030 durch Effizienzmaßnahmen erhebliche Einsparpotenziale und veränderte Konsumgewohnheiten in den Ländern der OECD<sup>37</sup> aber auch den Schwellenländern zu generieren sind. Hiermit einher gehen die zunehmende Bedeutung regenerativer Energiequellen und nachwachsende Rohstoffe. Diese fallen stärker als heutige Energie- und Rohstoffquellen dezentral an, wodurch sich ein Bedarf an dezentraleren (Produktions-)Infrastrukturen ergibt.<sup>38,39</sup>

### Klimawandel und Umweltbelastung

Auch in den nächsten Jahren wird, bedingt durch die wachsende Weltbevölkerung und eines erhöhten Ressourcenverbrauchs, ein weiterer Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emissionen und Umweltbelastungen erwartet. Der resultierende Klimawandel führt zu einem weiteren Anstieg der globalen Temperaturen. Gerade die Umweltprobleme in Schwellen- und Entwicklungsländern werden hierbei als Risikofaktor gesehen. Als Folge des Klimawandels werden Engpässe in der Ernährungsversorgung befürchtet, die weitreichende Folgen nach sich ziehen. Als weitere Gegenmaßnahme werden vermehrte Investitionen im Bereich „Clean-Tech“ erwartet. Hier kann durch den gezielten Einsatz innovativer Technik ein Beitrag zur Emissionsminderung und Ressourcenschonung geleistet werden.<sup>40</sup>

### Urbanisierung

Unter Urbanisierung wird allgemein die Ausbreitung von Städten bzw. die Ausdehnung der damit verbundenen Lebensräume verstanden. Dieses Phänomen beinhaltet sowohl die tatsächliche Ausbreitung urbaner Lebensräume als auch den Zuwachs bzw. Zustrom der Bewohner aus ländlichen Landstrichen in diese Gebiete. Prognosen gehen davon aus, dass im Jahre 2050 bereits 70% der Welt-

35 Burmeister, Klaus: Wertschöpfungsperspektiven für die Zukunft: Megatrends und nachhaltige Zukunftsmärkte unter: [http://www.forschungsnetzwerk.at/downloadpub/2012MT\\_und\\_ZM\\_komp.pdf](http://www.forschungsnetzwerk.at/downloadpub/2012MT_und_ZM_komp.pdf) (2012). Online am 10.12.2014.

36 World Health Organization (WHO) (Hg.): World Health Statistics 2011.

37 Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung.

38 Roland Berger Strategy Consultants Holding GmbH: Trend Compendium 2030-Trend 4: Climate change & ecosystem at risk unter: <http://www.rolandberger.com/gallery/trend-compendium/tc2030/content/assets/trendcompendium2030.pdf>. Online am 10.12.2014.

39 Burmeister, Klaus: Wertschöpfungsperspektiven für die Zukunft: Megatrends und nachhaltige Zukunftsmärkte unter: [http://www.forschungsnetzwerk.at/downloadpub/2012MT\\_und\\_ZM\\_komp.pdf](http://www.forschungsnetzwerk.at/downloadpub/2012MT_und_ZM_komp.pdf) (2012). Online am 10.12.2014.

40 Roland Berger Strategy Consultants Holding GmbH: Trend Compendium 2030-Trend 4: Climate change & ecosystem at risk unter: <http://www.rolandberger.com/gallery/trend-compendium/tc2030/content/assets/trendcompendium2030.pdf>. Online am 10.12.2014.

bevölkerung in städtischen Lebensräumen beheimatet sein werden. Zum heutigen Zeitpunkt leben rund 50% der Weltbevölkerung in städtischen Lebensräumen.<sup>41</sup>

Durch diese Verlagerung und Konzentration im städtischen Wohnraum entstehen neue Herausforderungen. So wird diese Entwicklung einen steigenden Ressourcenverbrauch und erhöhte Anforderungen an Infrastruktur und Logistik verursachen. Neue Ver- und Entsorgungswege gilt es zu etablieren, welche – nicht zuletzt auch im Zusammenhang mit erhöhter Emission – neue Mobilitätskonzepte notwendig machen.

Die chemische Industrie kann durch veränderte Wertschöpfungsketten den Zugang zu Ressourcen verlieren, bietet jedoch mit ihren Innovationen in unterschiedlichsten Bereichen Lösungsansätze diese Entwicklungen nachhaltig zu begleiten.<sup>42</sup>

---

41 United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat) (Hg.): Cities and Climate Change Global Report on Human Settlements 2011. (2011).

42 Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Die deutsche chemische Industrie 2030.VCI-Prognos-Studie. (2013).

## 1.2 Themen und Untersuchungsfeld

Durch die industrielle Wirtschaftsweise ist – bei durchaus vorhandenen Fehlentwicklungen in der Vergangenheit sowie auch in anderen Weltregionen – der Wohlstand der Menschheit stark gestiegen, Hunger und viele Krankheiten wurden in Teilen der Welt erfolgreich bekämpft. Die chemische Industrie nimmt eine Schlüsselstellung beim Fortschritt ein. Jede industrielle Aktivität beeinflusst jedoch die Umwelt und führt zu ökologischen Belastungen. Fortschritt und die Industrieproduktion ermöglichen es, mehr Menschen zu ernähren und deren Leben in Wohlstand zu gewährleisten.

Die Megatrends zeigen auf, in welchen technischen und gesellschaftlichen Bereichen Veränderungsprozesse zu erwarten sind, die neue Treiber der industriellen Entwicklung werden können. Der Bericht dieser Enquetekommission will sich der Frage stellen, wie die chemische Industrie weitere Beiträge für eine ökonomisch, ökologisch und sozial nachhaltige Entwicklung liefern kann.

Beurteilungsgrößen für die Umweltauswirkungen sind die Klimagasemissionen und die Effizienz bei Stoff- und Energieumsätzen gemessen am Carbon Footprint und vergleichend bewertet durch Lebenszyklusanalysen. Neben der Energiewirtschaft, der Metall-, Zement- und Papierherstellung gehört die chemische Industrie zu den Hauptemittenten. Es bleibt Aufgabe auch der Politik, Umweltbelastungen und soziale Verwerfungen, die durch industrielle Produktion entstehen, abzufedern und rahmensetzend zu gestalten.

Für die Zukunftsbetrachtung wurden die Annahmen des vorliegenden Berichts von den Megatrends (s. I.1 Zielsetzungen) abgeleitet und deren Auswirkungen auf die wirtschaftliche und technische Entwicklung beurteilt (s. Tabelle 1). Dafür wurden auch allgemein zugängliche Prognosen bzw. Marktanalysen verwendet, z.B. Marktforschungsberichte für die Produkte und Daten der Energie- und Rohstoff-Institute (Berichte der Internationalen Energieagentur und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe). Dabei wurden auch regionale Unterschiede einbezogen.

### 1.2.1 Stoffumsätze: Rohstoffe und Werkstoffe

Die Rolle der chemischen Industrie als rohstoffintensiver Sektor wird beschrieben. Die Verfügbarkeit und der Bedarf an Rohstoffen werden nach Menge, Herkunft, Art der Gewinnung und ihrer Verwendung in der Veredelungskette aufgezeigt. Dabei wird auch die Nutzung der Rohstoffe, die als Koppelprodukte anderer Branchen anfallen, beschrieben. Die wichtigsten organischen Rohstoffe sind die Naphtha-Fraktion des Erdöls, Erdgas und nachwachsende Rohstoffe. Weiter werden die Potenziale von bisher weniger genutzten Rohstoffen (z.B. Kohle, Wasserstoff, Kohlendioxid, Abfälle, Abwässer) und die Substitutionspotenziale nachwachsender Materialien unter Berücksichtigung von konkurrierendem Bedarf betrachtet. Die anorganischen Stoffe wie Natriumchlorid, Kalisalz, Phosphate, Kalk und Kalziumfluorid werden in der chemischen Industrie in vergleichbaren Mengen wie die organischen Rohstoffe zur Herstellung anorganischer Grundchemikalien verwendet. Davon sind Phosphate und Kalisalz auch essenzielle Düngemittel. Bei den nachwachsenden Rohstoffen besteht eine Verwendungskonkurrenz mit Nahrungs- und Futtermitteln (Zucker und Stärke), Biogas (z.B. Mais) und Treibstoffen (Zucker, Stärke, Pflanzenöle). Außerdem werden Bodenschätze beschrieben, die Schlüsselrohstoffe für Katalysatoren in chemischen Verfahren (z.B. Platin und andere Edelmetalle) und für Zukunftstechnologien (Seltenerdmetalle für Solartechnik und elektronische Bauelemente) sind. Die Verfügbarkeit der genannten Rohstoffe wird anhand der statischen Reichweiten beurteilt. Außerdem wird die Importabhängigkeit (Erdgas, Erdöl, Steinkohle, Phosphat) sowie die Autarkie (Salz, Kali, Braunkohle, Wasser) gezeigt.

Das Kapitel Werkstoffe beschäftigt sich mit Kunststoffen und abgeleiteten Verbundwerkstoffen. Im ersten Teil, den rohstoffbezogenen Betrachtungen, wird neben der Rohstoffverfügbarkeit schwerpunktmäßig untersucht, welche Materialinnovationen bei erdöl- und biobasierten Werkstoffen möglich und notwendig sind. Der Fokus des zweiten Teils, nachnutzungsbezogene Betrachtungen, liegt auf dem nachhaltigen Umgang mit Werkstoffen nach ihrem Produktleben, wobei die Möglichkeit der thermischen Verwertung und eines vermehrten Recyclings sowie der Kompostierung von biologisch abbaubaren Werkstoffen auf ihre Nachhaltigkeit hin (vor dem Hintergrund der Meeresvermüllung) untersucht werden.

### 1.2.2 Verfahren

Im Verfahrensteil werden beispielhaft die Fortschritte bei den technischen Verfahren zur Stoffumwandlung und -trennung gezeigt. Die Prozessintensivierung stellt eine ganz neue Methodik in der chemischen Prozesstechnik dar, die auf einem radikalen Wechsel in der Wahl der Prozessapparate und der Prozessierung selbst (neue Prozessfenster) beruht. Dies erlaubt u.a. maßgebliche Effizienzsteigerungen bei Material- und Energieeinsatz, die Integration von mehreren Reaktions- und Verfahrensschritten auf kleinem Raum und die Durchführung neuer Synthesewege zu neuen Produkten. Mikroreaktoren, Flow Chemistry und Katalyse haben hier eine Schlüsselrolle. Biotechnologische Verfahren basieren auf dem Einsatz von isolierten Enzymen sowie der Anwendung von Mikroorganismen als Katalysatoren. Außerdem wird die Verfahrensentwicklung bei Bioraffinerien für den effizienten Umsatz von nachwachsenden Rohstoffen wie Ernterückständen, die bisher wenig oder kaum verwendet werden, beschrieben. Im Verfahrenskapitel Biomimetische Chemie wird das durch Vorgänge in der Natur inspirierte Innovationspotenzial chemischer Synthesen und Materialien betrachtet. Die entsprechenden potenziellen technischen Verfahren könnten nach den Vorbildern der natürlichen Prozesse bei niedrigen Temperaturen und Drücken ablaufen. Diese Bioprozesse werden nach Effizienzkriterien und Wirtschaftlichkeit bewertet und mit konventionellen chemischen Verfahren bei hohen Drücken und Temperaturen (z.B. Ammoniaksynthese) verglichen. Darüber hinaus wird der mögliche Einfluss bioinspirierter Ansätze auf Materialforschung und -entwicklung umrissen.

Das Kapitel stellt ferner Verfahren der Kohlechemie dar, mit denen der bislang in NRW fast ausschließlich energetisch eingesetzte Rohstoffe Braunkohle künftig auch stofflich als Grundstoff für die chemische Industrie genutzt werden kann. Dabei wird die weltweite Verfolgung dieser Technologieverfahren in den Blick genommen sowie die Bedingungen für die Wettbewerbsfähigkeit sowie eine soziale und ökologische Einordnung vorgenommen.

### 1.2.3 Energieumsätze: Elektrochemie und Energiespeicher

Das Potenzial zur Verminderung von Emissionen und Reststoffanfall und die Randbedingungen für Effizienzsteigerungen in der Chemieproduktion durch die vermehrte Anwendung elektrochemischer Verfahren werden diskutiert. Weiterhin wird das Potenzial elektrochemischer Verfahren zur Aufnahme von fluktuierendem Strom sowie zur Netzstabilisierung bei Einspeisung von volatilem Strom aus erneuerbaren Quellen analysiert, ebenso die Nutzung der Verfahren zur Speicherung von Überschussstrom in Form von energiereichen Stoffen. Die elektrochemischen Verfahren sind auch für die Produktion organischer Stoffe geeignet und könnten daher künftig als Ersatz für etablierte Verfahren dienen. Zudem bieten sie Vorteile durch eine hohe Selektivität. Die Elektrochemie ist bereits heute ein wesentlicher Stromverbraucher bei den großtechnischen Verfahren Chlor-Alkali-Elektrolyse, Aluminiumherstellung und der Metallraffination. Daneben werden auch die Potenziale von Power to Gas (PtG) und Power to Chemicals (PtC) bei der Langzeitspeicherung sowie die mechanischen, elektrochemischen und thermischen Energiespeicher im Rahmen der Energiewende untersucht.

## I.3 Vorgehensweise der Enquetekommission Chemie

### I.3.1 Allgemeine Vorgehensweise und Mitglieder

Die Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen setzte sich aus zwölf Abgeordneten der fünf Fraktionen zusammen, die in der 16. Wahlperiode dem Landtag Nordrhein-Westfalens angehörten. Darüber hinaus waren fünf von den Fraktionen vorgeschlagene Sachverständige durch die Präsidentin berufene Mitglieder der Kommission.

In der konstituierenden Sitzung am 23. April 2013 wählten die Kommissionsmitglieder den Abgeordneten Hans Christian Markert (Bündnis 90/Die Grünen) einstimmig zu ihrem Vorsitzenden und den Abgeordneten Dr. Gerd Hachen (CDU) ebenfalls einstimmig zum stellvertretenden Kommissionsvorsitzenden.

Der Enquetekommission Chemie gehörten folgende Mitglieder an:

Abgeordnete	
SPD	<p>Guido van den Berg, MdL (Sprecher)</p>  <p>Hans Peter Müller, MdL</p> 
	<p>Cornelia Ruhkemper, MdL</p>  <p>Manfred Krick, MdL<sup>43</sup></p> 
	<p>Rainer Thiel, MdL</p> 
CDU	<p>Dr. Gerd Hachen, MdL (stv. Vorsitzender)</p>  <p>Oskar Burkert, MdL</p> 
	<p>Matthias Kerkhoff, MdL (Sprecher)</p> 

43 Zunächst war Frank Börner, MdL Ordentliches Mitglied (bis 01. April 2014).

Abgeordnete				
Bündnis 90/ Die Grünen	Dr. Birgit Beisheim, MdL (Sprecherin)		Hans Christian Markert, MdL (Vorsitzender)	
FDP	Dietmar Brockes, MdL (Sprecher)			
PIRATEN	Kai Schmalenbach, MdL <sup>44</sup> (Sprecher)			
Sachverständige				
	Thomas de Win		Dr. Walter Leidinger	
	Prof. Dr. Michael Dröscher		Hans-Jürgen Mittelstaedt	
	Prof. Dr. Volker Hessel			
Stellvertretende Mitglieder				
SPD	Dietmar Bell, MdL			
	Inge Blask, MdL			
	Frank Börner, MdL			
	Gabriele Hammelrath, MdL			
	Frank Sundermann, MdL			
CDU	Lothar Hegemann, MdL			
	Josef Hovenjürgen, MdL			
	Winfried Schittges, MdL			
Bündnis 90/Die Grünen	Wibke Brems, MdL			
	Herbert Franz Goldmann, MdL			
FDP	Henning Höne, MdL			
PIRATEN	Oliver Bayer, MdL			

44 Seit Januar 2015 vertreten durch Hanns-Jörg Rohwedder, MdL.

**Referentinnen und Referenten der Fraktionen**

SPD	Daniel Marker
CDU	Evelyn Hepp
Bündnis 90/Die Grünen	Dr. Sebastian Ritter
FDP	Dr. Hugo Obermann
PIRATEN	Dr. Andrea Holtkamp/Svenja Sudeikat

**Kommissionssekretariat**

Teamassistentin	Gisela Lange
Kommissionsassistenten/Kommissionsassistentin	Sascha Symalla/ Markus Preuß/ Mirjam Hufschmidt
Wissenschaftliche Referentin	Johanna Högner

Die Enquetekommission Chemie hat in insgesamt 30 Sitzungen nicht-öffentlich getagt. Zu jedem Themenkomplex wurde eine Expertenanhörung durchgeführt. Entsprechend fanden im Rahmen der Kommissionsarbeit insgesamt sieben Anhörungen statt. Darüber hinaus waren weitere externe Gäste geladen, die – ergänzend – zu speziellen Fragen Stellung genommen haben (vollständige Liste im Anhang). Hierzu zählten auch Experten, die im Auftrag der Enquetekommission fachliche Gutachten bzw. Studien erstellten, deren Ergebnisse in den Bericht eingeflossen sind (vollständige Liste im Anhang).

Neben Informationsterminen auf der K 2013 in Düsseldorf sowie an verschiedenen Chemie-Standorten in Nordrhein-Westfalen unternahm die Kommission im Januar 2014 eine Informationsreise nach Brüssel.



Die Enquetekommission Chemie zu Besuch bei der Firma BIOTEC in Emmerich, 17. Januar 2014.

### 1.3.2 Verwendete Methodik

Um das Potenzial der betrachteten Themenfelder für die Zukunftssicherung der chemischen Industrie ableiten zu können, wurde die in Tabelle 1 beschriebene Methodik etabliert:

Tabelle 1: Methodikbestandteile und ihre Kurzbeschreibung, eigene Darstellung

Methodikbestandteil	Kurzbeschreibung
Ist-Zustand	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Beschreibung der Technologie/der Situation zum Zeitpunkt der Berichterstellung (Stand der Technik)</li> <li>· basierend auf Literaturdaten</li> </ul>
Annahmen	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Beschreibung von künftigen Herausforderungen der jeweiligen Themenbereiche</li> <li>· Spiegelung der erwarteten Megatrends mit den jeweiligen Themenbereichen und Skizzierung der Auswirkungen der Megatrends auf die einzelnen Bereiche</li> <li>· Abschätzung der Auswirkungen der Megatrends auf die wirtschaftliche und technische Entwicklung (Marktprognosen und Forschungstrends) im gewählten Betrachtungshorizont von ca. 30 Jahren</li> </ul>
Optionen	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Aufzeigen möglicher Szenarien, mit denen auf die in den Annahmen aufgezeigten Herausforderungen reagiert werden kann</li> <li>· Beschreibung der Auswirkungen dieser Szenarien auf die ökologische, ökonomische und soziale Nachhaltigkeit anhand verabreiteter Nachhaltigkeitskriterien</li> </ul>
Bewertung	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Prüfung und Bewertung der in den Optionen beschriebenen Potenziale hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit</li> </ul>
Fazit	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Zusammenfassung der Einzelkapitel und Ergebnisse aus der Optionenbewertung</li> <li>· Identifikation der nachhaltigsten Option(en)</li> </ul>
Handlungsempfehlungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Konkrete Empfehlungen an die Politik zur Umsetzung der gefundenen Ergebnisse, welche einer nachhaltigen Ausrichtung der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen und damit ihrer Zukunftsfähigkeit dienen</li> </ul>

### 1.3.3 Nachhaltigkeitskriterien

Die in den Optionen und Bewertungen verwendeten Nachhaltigkeitskriterien sind in der folgenden Tabelle 2 aufgelistet:

Tabelle 2: Übersicht über die verwendeten Nachhaltigkeitskriterien, eigene Darstellung

Ökologie	Ökonomie	Soziales
<b>Ressourcenschonung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>· Stoffliche Nutzung</li> <li>· Energetische Nutzung</li> <li>· Kreislaufwirtschaft</li> </ul>	<b>Innovation (= Markterfolg)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>· Fähigkeit (Invention = Erfindung)</li> <li>· Potenzial (Wissen, Akzeptanz)</li> <li>· Umsetzung/Fähigkeit der Markterschließung</li> <li>· Forschung</li> </ul>	<b>Beschäftigung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>· Sicherung</li> <li>· Ausbau</li> <li>· Qualität</li> </ul>
<b>Carbon Footprint</b> (im Einzelfall auch darüber hinaus weitere Treibhausgase)	<b>Wettbewerbsfähigkeit (nat./internat.)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>· Wirtschaftlichkeit</li> <li>· Erhalt und Ausbau der Wertschöpfungskette/Stärkung der Clusterstrukturen</li> <li>· Infrastruktur</li> <li>· Versorgungssicherheit</li> <li>· Arbeitskräfteverfügbarkeit (Qualität und Quantität)</li> <li>· Forschung</li> </ul>	<b>Bildung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>· Stärkung (= Verbesserung) der Aus- und Weiterbildung</li> <li>· Teilhabe</li> <li>· Mündiger Konsument</li> </ul>
<b>Emissionsminderung</b> (jeglicher Eintrag in Luft/ Wasser/ Boden/ Menschen)		<b>Lebensqualität</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>· Gesundheit/Lebenserwartung</li> <li>· Wohlstand (auch Verfügbarkeit von Konsumgütern unter geänderter Ressourcennutzung)</li> </ul>
<b>Biodiversität/Flächennutzung</b>		<b>Sicherung der Finanzierung staatlicher Gemeindefragen</b>
		<b>Verbesserung der ethischen Standards (internat.)</b>

# Inhalt Kapitel II.1

II.	STOFFUMSÄTZE.....	19
II.1	<b>Rohstoffsituation</b> .....	19
II.1.1	Organische Rohstoffe .....	23
II.1.1.1	Erdöl.....	23
II.1.1.2	Erdgas.....	27
II.1.1.3	Kohle .....	31
	Braunkohle .....	32
	Steinkohle .....	33
II.1.1.4	Nachwachsende Rohstoffe .....	34
II.1.1.4.1	Nachwachsende Rohstoffe erster Generation .....	38
II.1.1.4.2	Nachwachsende Rohstoffe zweiter Generation.....	43
II.1.1.4.3	Nachwachsende Rohstoffe dritter Generation .....	44
II.1.1.5	Kohlendioxid .....	45
II.1.1.6	Synthesegas .....	46
II.1.1.7	Wasserstoff.....	46
II.1.2	Anorganische Rohstoffe .....	46
II.1.2.1	Anorganische Rohstoffe mit mengenmäßiger Bedeutung .....	47
II.1.2.1.1	Stein- und Kalisalz.....	47
II.1.2.1.2	Phosphat .....	48
II.1.2.1.3	Flussspat/Calciumfluorid.....	48
II.1.2.1.4	Schwefel.....	49
II.1.2.2	Strategische anorganische Rohstoffe .....	49
II.1.2.2.1	Legierungsbestandteile und Werkstoffe .....	50
II.1.2.2.2	Katalysatoren .....	50
II.1.2.2.3	Technologisch wichtige Stoffe.....	50
II.1.2.2.4	Lithium für die Stromspeicherung.....	50
II.1.2.2.5	Seltene Erden .....	51
II.1.2.2.6	Rezyklierung von Industriemetallen .....	51
II.1.3	Annahmen .....	52
II.1.3.1	Relevante Megatrends .....	52
II.1.3.2	Auswirkung der Megatrends auf die Rohstoffsituation .....	56
II.1.4	Optionen.....	60
Option A.1:	Unveränderte Rohstoffbasis.....	61
Option A.2:	Substitution durch Rohstoffe aus alternativen Primärquellen .....	64
Option A.2a:	Erdgas.....	65
Option A.2b:	Kohle .....	67
Option A.2c:	Nachwachsende Rohstoffe erster Generation (Agrarbiomasse) .....	70
Option A.2d:	Nachwachsende Rohstoffe zweiter Generation (lignocellulose-haltige Biomasse)..	73
Option A.2e:	Nachwachsende Rohstoffe dritter Generation (Algenbiomasse).....	75
Option A.2f:	Manganknollen und andere maritime Primärrohstoffquellen für anorganische Rohstoffe.....	76
Option A.3:	Substitution durch alternative Rohstoffe aus Sekundärquellen .....	77
Option A.3a:	Substitutionspotenzial von Urban Mining als Sekundärrohstoffquelle für organische und anorganische Rohstoffe .....	78
Option A.3b:	Vermehrte stoffliche Nutzung von CO <sub>2</sub> .....	79
Option A.3c:	Vermehrte stoffliche Nutzung von Lebensmittel- und Agrarabfällen .....	80

Option A.3d:	Vermehrte stoffliche Nutzung technischer Abfälle .....	82
Option A.3e:	Vermehrte stoffliche Nutzung von Abwasser .....	84
II.1.5	Bewertung der Rohstoffoptionen .....	85
Option A.1:	Unveränderte Rohstoffbasis .....	85
Option A.2:	Substitution durch Rohstoffe aus alternativen Primärquellen.....	86
Option A.2a:	Erdgas.....	86
Option A.2b:	Kohle .....	86
Option A.2c:	Nachwachsende Rohstoffe erster Generation (Agrarbiomasse) .....	87
Option A.2d:	Nachwachsende Rohstoffe zweiter Generation (lignocellulosehaltige Biomasse) ...	87
Option A.2e:	Nachwachsende Rohstoffe dritter Generation (Algenbiomasse) .....	88
Option A.2f:	Manganknollen und andere maritime Primärrohstoffquellen für anorganische Rohstoffe .....	88
Option A.3:	Substitution durch alternative Rohstoffe aus Sekundärquellen.....	88
Option A.3a:	Substitutionspotenzial von Urban Mining als Sekundärrohstoffquelle für organische und anorganische Rohstoffe .....	88
Option A.3b:	Vermehrte stoffliche Nutzung von CO <sub>2</sub> .....	89
Option A.3c:	Vermehrte stoffliche Nutzung von Lebensmittel- und Agrarabfällen .....	89
Option A.3d:	Vermehrte stoffliche Nutzung technischer Abfälle .....	90
Option A.3e:	Vermehrte stoffliche Nutzung von Abwasser .....	90
<b>Anhänge</b> .....		<b>91</b>
Anhang 1 .....		91
Anhang 2 .....		94
Anhang 3 .....		95

## II. Stoffumsätze

### II.1 Rohstoffsituation

Dieses Kapitel betrachtet die aktuelle Rohstoffsituation der chemischen Industrie global, sowie die in Deutschland und insbesondere in Nordrhein-Westfalen, soweit spezifische Informationen verfügbar sind. Es werden Annahmen für die zukünftige Rohstoffsituation der chemischen Industrie getroffen und daraus verschiedene Handlungsoptionen abgeleitet, die entsprechend der drei Säulen der Nachhaltigkeit (Ökonomie, Soziales und Ökologie) bewertet werden. Es gilt dabei die Frage zu beantworten, wie eine zukünftig benötigte Rohstoffbasis nachhaltig gesichert werden kann, um die chemische Industrie am Standort Nordrhein-Westfalen zu stützen und auszubauen. Die Rohstoffe werden eingeteilt in

- Primärrohstoffe (natürliche Ressourcen, die unbearbeitet aus ihrer natürlichen Quelle extrahiert wurden) und
- Sekundärrohstoffe (Koppelprodukte, die durch Bearbeitung der Primärrohstoffe anfallen oder nach Gebrauch wiederverwendet [Recycling] werden).

#### Begriffserklärungen zu Rohstoffsituation

**Statische Reichweite von nicht-erneuerbaren Rohstoffen:** Anzahl Jahre, für die bei aktuellem Verbrauch die weltweit bekannten Reserven noch reichen werden (Reserven-Reichweite).<sup>44</sup>

**Reserven:** Teil der Rohstoffressourcen, die derzeit technisch und wirtschaftlich abbaubar sind (hinreichend geringe Förderkosten, zu kostendeckenden Preisen vermarktbar).

**Ressourcen:** Alle nachgewiesenen und vermuteten nutzbaren Rohstoffe, auch wenn sie heute noch nicht wirtschaftlich gewinnbar sind.<sup>45</sup>

Die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit der Industrie und des verarbeitenden Gewerbes in Deutschland beruht zu einem erheblichen Anteil auf der Verfügbarkeit von Rohstoffen. Insbesondere gilt dies für die rohstoffintensive chemische Industrie<sup>47</sup>. Die Funktionsfähigkeit der Industrie ist direkt abhängig von der kontinuierlichen und verlässlichen Versorgung mit Rohstoffen.

Charakteristisch für den Rohstoffeinsatz in der chemischen Industrie ist die Verwendung von anorganischen, mineralischen Stoffen (z.B. Steinsalz), organischen, fossilen Stoffen (Erdgas, Kohle, Erdölprodukte) und organischen Stoffen pflanzlichen und tierischen Ursprungs (nachwachsende Rohstoffe). Überwiegend werden derzeit Rohstoffe verwendet, die in anderen Branchen wie der Mineralölindustrie oder Kokereien als Nebenprodukte anfallen (Sekundärrohstoffe). Bei der Herstellung der Treibstoffe Benzin, Dieselöl, Kerosin und der Heizstoffe leichtes und schweres Heizöl aus Rohöl durch destillative Trennung fällt die leicht siedende Fraktion Naphtha zu 7 bis 15% an, die als chemischer Rohstoff in Crackern verwendet wird. Außerdem werden die Erdölprodukte in den Raffinerien von den in Benzin und Diesel unerwünschten Stoffen wie Aromaten und Schwefel befreit. Diese Koppelprodukte sind ebenfalls wertvolle Rohstoffe für die chemische Industrie. Die Verar-

45 Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Abteilung [III] (Hg.): Kurzbericht – Verfügbarkeit und Versorgung mit Energierohstoffen. (2006), S. 2-3.

46 Maugeri, Leonardo: Oil: never Cry Wolf – why the petroleum age is far from over. In: Science (2004), 5674, S. 1114–1115, S. 3.

47 Bardt, Hubertus: Sichere Energie- und Rohstoffversorgung. Deutscher Instituts-Verlag (2008). ISBN 978-3-602241-33-0.

beitung der Rohstoffe in der chemischen Industrie erfolgt über vielstufige physikalische, chemische und biologische Prozesse. Dabei anfallende Nebenprodukte werden in weiteren Verarbeitungsketten stofflich und energetisch verwendet. Der dadurch entstehende Stoffverbund ist kennzeichnend für die chemische Industrie in Deutschland und spiegelt sich wider in den zahlreichen Verbundstandorten in NRW.

Neben diesem Stoffverbund wird in den Produktions- und Entsorgungsanlagen, die in Chemieparks oder Verbundstandorten angesiedelt sind, auch die eingesetzte und freiwerdende Energie kaskadenartig genutzt. Dies führt zu energie- und materialeffizienten Herstellungsprozessen mit einer hohen Wertsteigerung der verarbeiteten Rohstoffe. In der chemischen Industrie werden aus den Grundchemikalien, die heute überwiegend aus der Erdölfraction Naphtha gewonnen werden, Polymere und Spezialchemikalien hergestellt. Diese werden wiederum zu Farbstoffen, Arzneimitteln, Kunststoffen und vielen weiteren Formulierungen weiterverarbeitet, um in einem weiteren Schritt zum Endprodukt wie z.B. einer Wandfarbe, einem Medikament oder einer Verpackung veredelt zu werden. Innerhalb der beschriebenen chemischen Wertschöpfungskette sind Großunternehmen vor allem in den ersten Stufen zu finden, während kleine und mittelständische Unternehmen vielfach an der Weiterverarbeitung und Produktherstellung beteiligt sind.

Darüber hinaus ist die chemische Industrie durch eine enge Verknüpfung mit anderen Branchen der verarbeitenden Industrie gekennzeichnet. Etwa 58% der Umsätze resultieren durch Verkäufe von Vorprodukten innerhalb der Branche, etwa 24% des Umsatzes werden durch Belieferung an andere Industriebranchen und gewerbliche Weiterverarbeiter, 4% an den Dienstleistungssektor und nur ca. 14% durch Fertigprodukte an Konsumenten erzielt.

Zusammenfassend sind wichtige Merkmale der Branche die hohe Spezialisierung, die Koppelproduktion und die Verbundwirtschaft. Die Produkte und Reststoffe des einen Betriebs sind die Rohstoffe des anderen<sup>48</sup>.

Deutschland ist bei wesentlichen Stoffen importabhängig<sup>49,50</sup>, wie in Abbildung 1 gezeigt. Hierzu zählen Flussspat (79,5%), Mineralöl (98%) und Phosphat (100%). Dagegen besitzt Deutschland große eigene Vorkommen bei Kalisalz, Steinsalz, Gips, Kalk- und Dolomitstein, Braunkohle, Kaolin und Feldspat. Gips und Anhydrit entstehen außerdem bei der Rauchgasentschwefelung von Kohlekraftwerken und dem Aufschluss von Flussspat ( $\text{CaF}_2$ ) mit Schwefelsäure. Diese Rohstoffe müssen gar nicht oder nur zu einem geringen Anteil importiert werden. Für Kalisalz, Schwefel und Gips bestehen sogar Exportüberschüsse.

---

48 Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Auf einen Blick: Chemische Industrie 2014. (2014).

49 GDCh; DECHEMA; DGMK; VCI (Hg.): Positionspapier: Rohstoffbasis im Wandel. (2010).

50 Bardt, Hubertus: Sichere Energie- und Rohstoffversorgung. Deutscher Instituts-Verlag (2008). ISBN 978-3-602241-33-0.

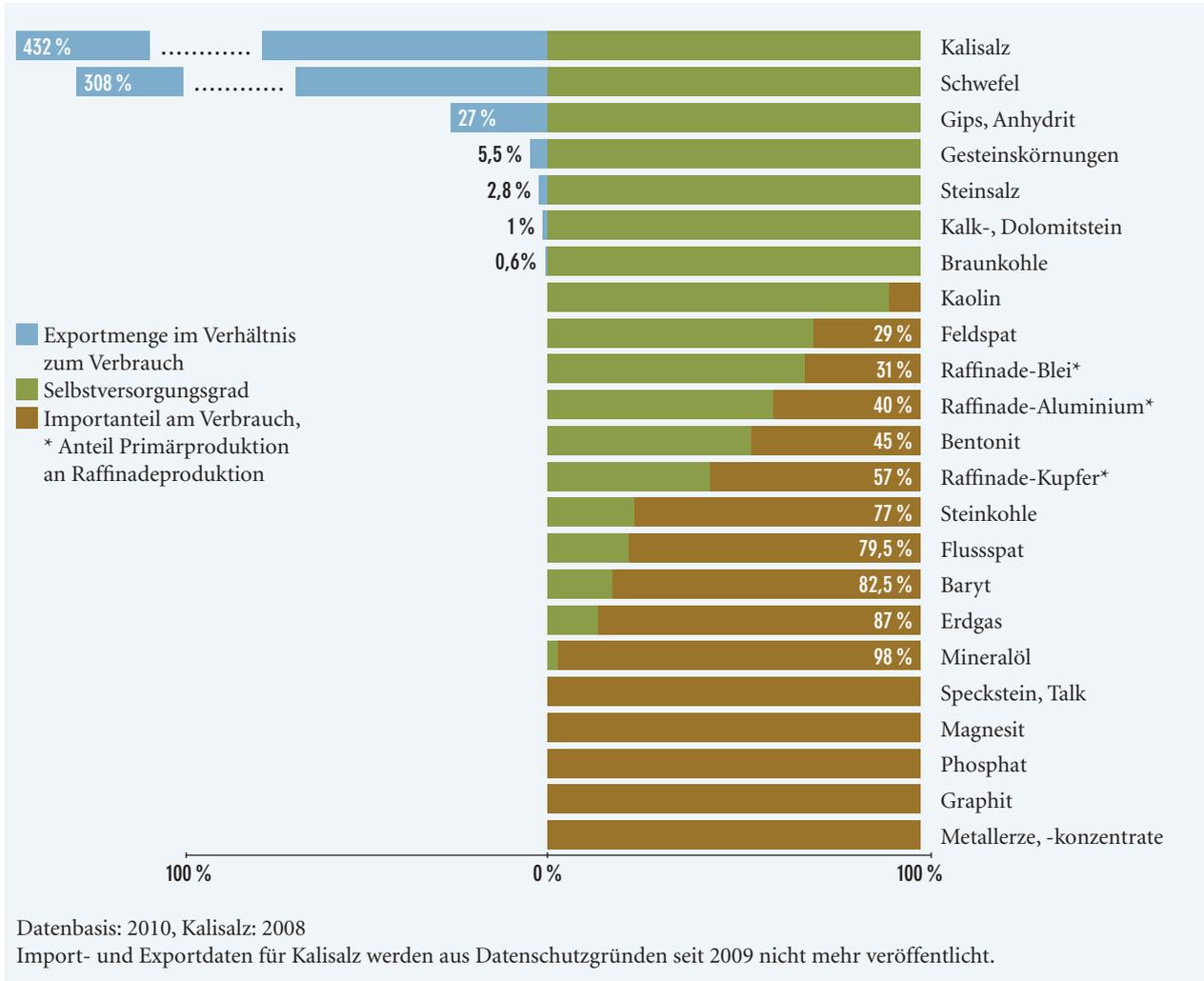


Abbildung 1: Importabhängigkeit Deutschlands<sup>51</sup>

2011 setzte die deutsche chemische Industrie insgesamt 42,4 Mio. t Rohstoffe ein<sup>52</sup>, davon 21,2 Mio. t anorganische und 21,2 Mio. t organische mit 15,3 Mio. t Erdöl als dominierendem organischen Rohstoff. Es folgen Erdgas (3 Mio. t), nachwachsende Rohstoffe (2,7 Mio. t) und Kohle (0,2 Mio. t) wie in Abbildung 2 gezeigt.

51 Berglar, Kai; Al Barazi, Siyamend et al.: Deutsche Rohstoffagentur (dera) (Hg.): Rohstoffversorgung für die deutsche Industrie-Anteil der Top 5 Länder am Weltverbrauch 2005. (2011).

52 Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Factbook 05 – Die Formel Ressourceneffizienz. (2012).

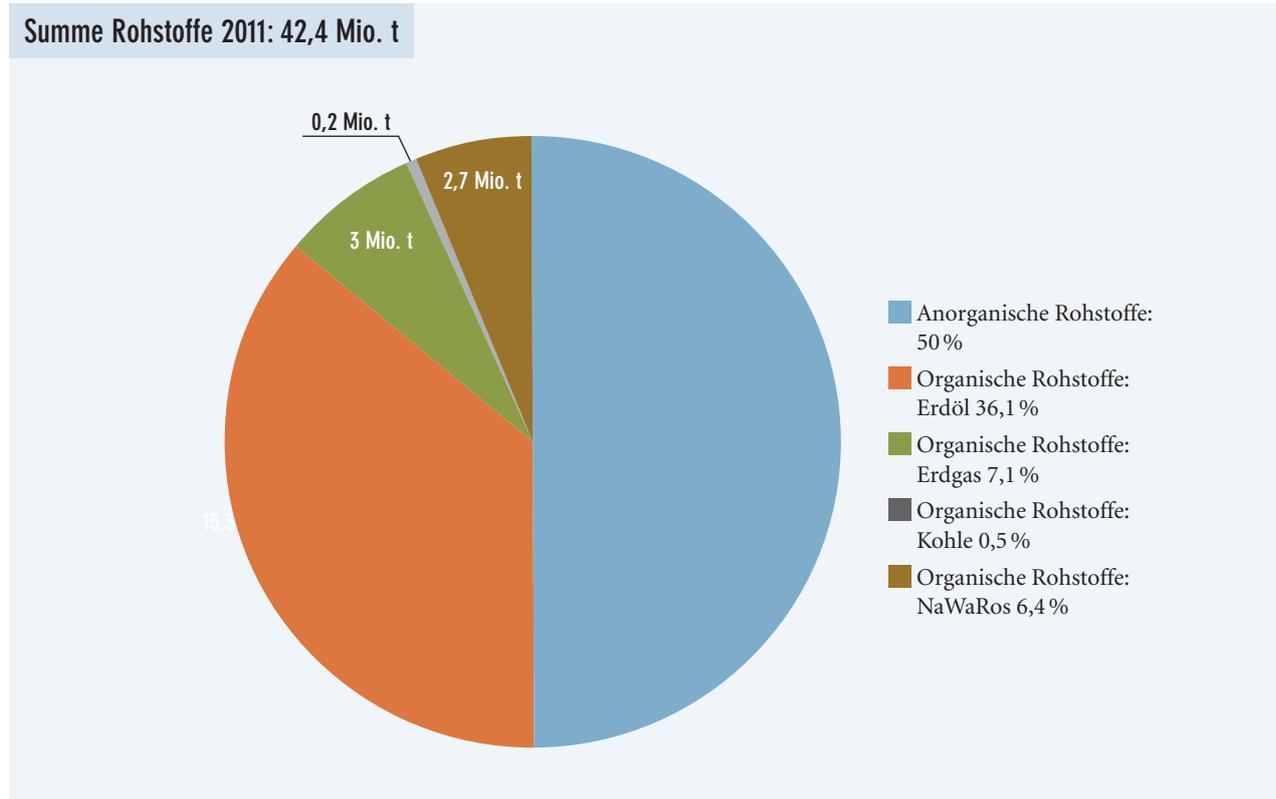


Abbildung 2: Rohstoffbasis der chemischen Industrie Deutschland 2011<sup>53</sup>

Zur Bewertung der Sicherheit bei der Rohstoffversorgung (Kritikalität<sup>54</sup>) sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Technische Entwicklung,
- Geologische Verfügbarkeit (Reserven und Ressourcen),
- Geopolitische Einflussfaktoren,
- Ökologische Konsequenzen der Extraktion,
- Transportarten und Transportwege und
- Ökonomische Entwicklung.

Die meisten Rohstoffe werden auf einem offenen Wettbewerbsmarkt global gehandelt mit den daraus resultierenden Preiszyklen. Hersteller und Abnehmer sichern sich zumindest zum Teil gegen starke Preisschwankungen durch langfristige Lieferverträge mit Abnahmeverpflichtungen und festen Preisen, evtl. auch mit Preisanpassungsklauseln ab. Mengen, die außerhalb solcher Verträge auf den Markt kommen, werden nach Spotpreisen gehandelt, die stark schwanken können. Der Rohstoffmarkt wird durch unvorhersehbare Ereignisse wie Naturkatastrophen, Kriege, Streiks, Unterbrechung von Transportwegen, usw. und Einflüsse wie Spekulation und staatliche Eingriffe beeinflusst. Im Folgenden werden nun die unterschiedlichen Rohstoffquellen der chemischen Industrie eingehender beleuchtet.

53 Eigene Darstellung, Zahlen-Quellen: ebd.

54 Kritikalität: Störung der sicheren Versorgung mit Rohstoffen aus Gründen aller Art.

## II.1.1 Organische Rohstoffe

Organische Rohstoffe sind Stoffe, die Kohlenstoffverbindungen enthalten, mit Ausnahme der Carbonate und des Kohlendioxids, die den anorganischen Stoffen zugerechnet werden. Organische Rohstoffe entstammen entweder nicht erneuerbaren Quellen wie Erdöl, Erdgas, Steinkohle, Braunkohle (fossile Rohstoffe), oder aus erneuerbaren Quellen wie pflanzlicher oder tierischer Biomasse (nachwachsende Rohstoffe). Alle organischen Rohstoffe enthalten neben Kohlenstoff die Elemente Wasserstoff und teilweise Stickstoff, Sauerstoff, Phosphor und Schwefel in gebundener Form, jedoch in unterschiedlichen Konzentrationen. Die organischen Rohstoffe unterscheiden sich im Kohlenstoff- und Wassergehalt. Außerdem gibt es noch Unterschiede im Gehalt an anorganischen Beimengungen, die bei Pyrolyse oder Verbrennung Asche bilden.<sup>55</sup>

In der chemischen Industrie werden die organischen Rohstoffe stofflich und energetisch genutzt. Abbildung 2 zeigt, dass dafür in der deutschen chemischen Industrie im Jahr 2011 21,2 Mio. t eingesetzt wurden. Der dominierende organische Rohstoff der chemischen Industrie ist Naphtha, das eine leichtsiedende Fraktion des Rohöls darstellt (Kapitel II.1.1.1). Der Anteil des Chemierohstoffs Naphtha am gesamten Erdölverbrauch beträgt global ca. 10% und in Deutschland 14% (s. Tabelle 4). Daneben werden vor allem Erdgas (Kapitel II.1.1.2) und nachwachsende Rohstoffe (Kapitel II.1.1.4) eingesetzt. Weitere Rohstoffe mit z.T. aktuell geringer Einsatzmenge sind Kohlendioxid (Kapitel II.1.1.5), Synthesegas (Kapitel II.1.1.6) und Wasserstoff (Kapitel II.1.1.7). Die aufgeführten Rohstoffe werden hoch spezifisch für definierte Zielprodukte verwendet: Erdgas mit dem Hauptbestandteil Methan ( $\text{CH}_4$ ) wird als C1-Baustein eingesetzt, Naphtha nach einem Crack-Prozess für eine Vielzahl von Verbindungen mit 2, 3, 4 und mehr Kohlenstoffatomen. Eine Übersicht wird in den folgenden Kapiteln gezeigt.

Zur Vergleichbarkeit der unterschiedlichen organischen Rohstoffe werden die Mengen der fossilen und der nachwachsenden Rohstoffe mit ihren Heizwerten normiert (s. Anhang 1). Zusätzlich werden die unterschiedlichen Kohlenstoffgehalte der Rohstoffe berücksichtigt. Der Vergleich der Kohlenstoffgehalte ermöglicht Betrachtungen der Substitutionspotenziale. Für Gemische werden in diesem Bericht Literatur-<sup>56</sup>, Durchschnitts- und Schätzwerte verwendet.

Die Kohlenstoffgehalte beim Erdöl betragen 83-87% (ca. 85%), die Teilfraktion Naphtha wird als Oktan  $\text{C}_8\text{H}_{18}$  mit 84% Kohlenstoff (C) berechnet. Für Erdgas ergibt sich ein auf den Hauptbestandteil Methan bezogener stöchiometrischer Wert von 75% C. Für die Kohlenhydrate Zucker, Stärke und Cellulose ergeben sich stöchiometrisch 30% C; dieser Gehalt wird auch für die Holztrockenmasse angenommen (der höhere Kohlenstoffgehalt im Lignin wird dabei vernachlässigt). Bei den Pflanzenölen und Fetten wird vereinfacht mit 82% C (bezogen auf Tri-Palmitinsäureglycerid) gerechnet.

### II.1.1.1 Erdöl

Erd- oder Mineralöl ist ein in der Erdkruste eingelagertes, hauptsächlich aus Kohlenwasserstoffen bestehendes Stoffgemisch. Es ist ein fossiles Umwandlungsprodukt von abgestorbenen, tierischen und pflanzlichen Organismen, das aus Faulschlamm vor Millionen Jahren in abgetrennten und eingetrockneten Meeren entstanden ist. Erdöl ist in Deutschland derzeit die wichtigste Rohstoffquelle für die chemische Industrie und wird in Raffinerien durch Destillationsverfahren in Benzin, Dieselöl, leichte und schwersiedende Heizöle und Asphalt getrennt. Ein Teil der Benzinfraktion, das Naph-

55 Obernberger, Ingwald: Aschen aus Biomassefeuerungen – Zusammensetzung und Verwertung. In: VDI Bericht (1997), S. 199–222.

56 Speight, James G.: The Chemistry and Technology of Petroleum. Taylor & Francis (1999). ISBN 978-0-824702-17-5, S. 215–216.

tha, wird als Ausgangsprodukt für die chemische Produktion verwendet. Das Raffinerie-Verfahren ist in Grenzen so steuerbar, dass der Anfall von Zielprodukten optimiert und damit dem Bedarf angepasst werden kann.

Im Folgenden wird die Wertschöpfungskette auf der Basis von Erdöl detaillierter beschrieben. Naphtha wird in Crack-Prozessen zu folgenden Basischemikalien verarbeitet:

- Ethylen ( $C_2$ -Fraktion),
- Propylen ( $C_3$ -Fraktion),
- Butene (Isobutylen und Butenisomere als  $C_4$ -Fraktion),
- Aromaten (Benzol, Toluol, Xylole und weitere aromatische Verbindungen).

Abbildung 3 zeigt schematisch die Prozesse vom Rohöl zu den daraus resultierenden Basischemikalien:

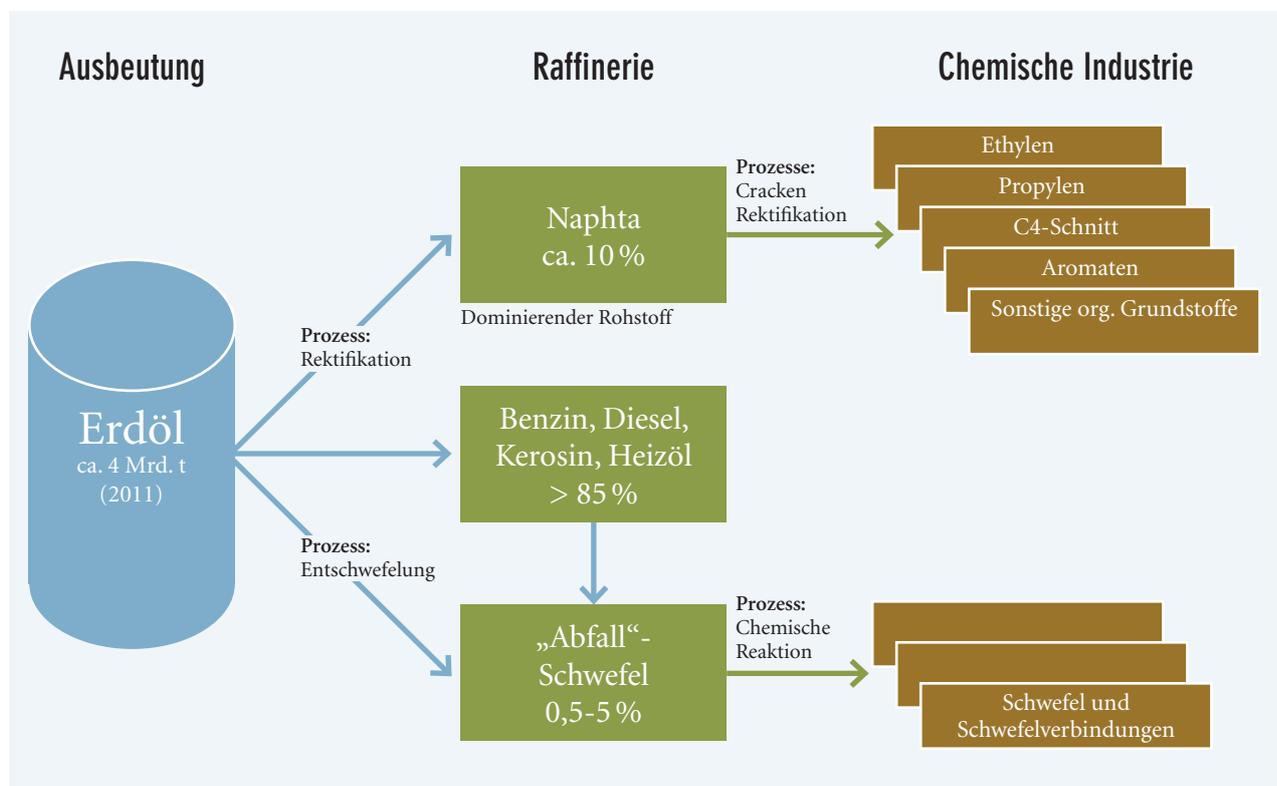


Abbildung 3: Weltrohdölerförderung und Verwendung in der chemischen Industrie<sup>57</sup> (s. auch Abbildung 23, Anhang 1)

Die Folgeprodukte der aus Naphtha gewonnenen Basischemikalien und deren Startprodukte der Veredelungskette sind vereinfacht in Tabelle 3 dargestellt.

57 Eigene Darstellung nach H. Schobert: Chemistry of Fossil Fuels and Biofuels, S. 192 ff.

Tabelle 3: Veredelungskette der Naphtha-Crackprodukte, eigene Darstellung<sup>58,59</sup>

Ethylen (C <sub>2</sub> )	Propylen (C <sub>3</sub> )	Butene (C <sub>4</sub> )	Benzol (Aromaten)	Toluol (Aromaten)	o-,m-,p-Xylol (Aromaten)
Polyethylen	Polypropylen	Isobutylene	Cumol	Toluylendiisocyanat	Terephthalsäure
Ethylenoxid	Propylenoxid	Butadien	Phenol	Polyurethane	PET (Polyester)
Ethylenglycol	Propylenglycol	Synth. Kautschuk	Aceton	Benzaldehyd	Phthalsäure
Dichlorethan	Acrylnitril	Polychloropren	Bisphenol A	Benzylalkohol	Phthalsäureester
Vinylchlorid	Polyacrylnitril-fasern	MTBE	Cyclohexan	Benzoessäure	
PVC	Adiponitril		Caprolactam	Benzoes.Ester	
Polyester	Acrylamid		Polyamid 6, 6.6		
			Phenol-Formaldehyd-Harze		

Die im Kapitel Werkstoffe behandelten Polymere und die dort erwähnten Monomere sind in obiger Darstellung markiert. Ergänzend zeigt Anhang 1 die Übersicht „Weg des Öls in den Alltag“.

Tabelle 4 fasst den Verbrauch an Erdöl und Naphtha im Jahr 2011 weltweit, national sowie in NRW zusammen. Danach wurden 2011 weltweit ca. 4 Mrd. t Erdöl gefördert<sup>60</sup>. Rund 10% der Gesamtmenge wurden als Teilfraktion „Naphtha“ zur Herstellung von organischen Grundstoffen verwendet. In Deutschland setzte die chemische Industrie 2011 hierzu 15,3 Mio. t der Erdölfraktion Naphtha ein. Das entspricht 14% des deutschen Gesamterdölverbrauchs von 109 Mio. t<sup>61</sup>. Zur leichteren Vergleichbarkeit mit anderen Rohstoffen werden die Rohöl-Tonnagen unter Berücksichtigung der Heizwerte und der Kohlenstoffgehalte in weitere gebräuchliche Einheiten umgerechnet.

Tabelle 4: Ölverbrauch und Umrechnungsfaktoren für gebräuchliche Mengenangaben (eigene Berechnungen)

	Mio.t	Mio.t SKE	Mio.Barrel/d	Mio. t KE
<b>Erdöl-Verbrauch 2011</b>				
Welt	4000	5716	88,8	3400
Deutschland	109	155	2,23	93
NRW	39	56	0,81	33
<b>Naphtha-Verbrauch 2011</b>				
Welt	400	(572)	(8,17)	336
Deutschland	15,3	(21,8)	(0,31)	12,9

SKE=Steinkohle-Einheiten zum Heizwert-Vergleich; 1 Barrel=158,99 l – entsprechend 134,14 kg Rohöl;  
KE=Kohlenstoff-Einheiten für Vergleiche der Chemierohstoffe aus verschiedenen Quellen

2010 wurden 2,5 Mio. t des in Deutschland verbrauchten Erdöls aus nationalen Quellen gefördert. Das heißt: Erdöl wird zu 98% importiert (vgl. Abbildung 1). Der Anteil des Erdöls am Primärenergieverbrauch in Deutschland liegt mit 161 Mio. t Steinkohleneinheiten (SKE) bei 33,6%. Das Mineralöl bzw. die daraus hergestellten Produkte werden in Deutschland zu 62% für Verkehr, zu 17%

58 Kaiser, W.: Kunststoffchemie für Ingenieure: Von der Synthese bis zur Anwendung. Hanser (2011). ISBN 978-3-446430-47-1.  
 59 In diesem Bericht werden die Trivialnamen „Ethylen, Propylen“ usw. statt der wissenschaftlichen Bezeichnungen „Ethen, Propen“ usw. wegen der Nutzung der Trivialnamen im allgemeinen Sprachgebrauch verwendet. Quellen: eigene Recherchen.  
 60 International Energy Agency (IEA) (Hg.): World Energy Outlook 2012. (2012), S. 85, Umrechnung von 88,8 Mio. barrel/d.  
 61 Deutsche Rohstoffagentur (dera) (Hg.): Rohstoffinformationen – Deutschland Rohstoffsituation 2010. (2010), S. 10.

für Haushalte (Gebäudeheizung, Warmwasserbereitung), zu 9% für Handel und Gewerbe, zu ca. 9% als Rohstoffe (chemische Grundstoffe) und zu 3% für andere Zwecke in der Industrie verwendet.<sup>62</sup>

Die Erdölreserven in Deutschland lagen nach den Veröffentlichungen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe mit Sitz in Hannover (BGR) am 1. Januar 2011 bei 35,9 Mio. t. Die globalen Erdölreserven und -ressourcen liegen nach den Erhebungen der Internationalen Energie Agentur (IEA)<sup>63</sup> in Summe bei 5.871 Mrd. Barrel, entsprechend 787 Mrd. t, wie in der folgenden Tabelle 3 gezeigt. Sie teilen sich auf in konventionelles und unkonventionelles Öl.<sup>64</sup>

Tabelle 5: Globale Erdöl- Ressourcen und Reserven<sup>65</sup>

	Mrd. Barrel	Mrd. t	Mrd. t KE
<b>konventionelles Öl</b>			
Rohöl	2245	301	256
Erdgaskondensate	433	58	49
Σ konventionelles Öl	2678	359	305
<b>unkonventionelles Öl</b>			
Schweröl und Ölsande	1880	252	214
Ölschiefer (Kerogenöl)	1073	144	122
Schieferöl	240	32	27
Σ unkonventionelles Öl	3193	428	364
Σ konventionelle + unkonventionelles Öl	5871	787	669

Entsprechend Abbildung 4<sup>66</sup> unterscheidet die BGR nach Reserven und Ressourcen und gibt die verfügbaren Reserven konventionellen Erdöls mit 168 Mrd. t an (Stand 2011). Bei einem Weltverbrauch in 2011 von ca. 4 Mrd. t ist dessen statische Reichweite nach den Reserven größer als 40 Jahre. Die Schätzungen der Weltrohölvorräte von IEA (veröffentlicht im World Energy Outlook, WEO) und BGR sind unter Berücksichtigung der Schätzgenauigkeit vergleichbar. Die statische Ressourcen-Reichweite des Erdöls beträgt fast zwei Jahrhunderte.

62 Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (Hg.): Energiestatistiken. (2012).

63 International Energy Agency (IEA) (Hg.): World Energy Outlook 2012. (2012), S. 101.

64 Konventionelles Erdöl (= billiges, rasch verfügbares Erdöl): 95% des heute geförderten Erdöls ist konventionelles Erdöl. Es zeichnet sich dadurch aus, dass es einfach, rasch und daher auch billig aus Bohrlöchern gefördert werden kann. Unkonventionelles Erdöl (= teures, nur langsam produzierbares Erdöl), Quelle: Blum, Andreas: Ressource Erdöl: eine kurze Begriffserklärung unter: <http://raize.ch/Geologie/erdoel/oil-begriffe.html>. Online am 24.2.2014.

65 International Energy Agency (IEA) (Hg.): World Energy Outlook 2012. (2012).

66 Steinbach, Volker: Verfügbarkeiten und Potenziale fossiler Kohlenwasserstoffe und mineralischer Rohstoffe für die chemische Industrie (2013), Folie 12.

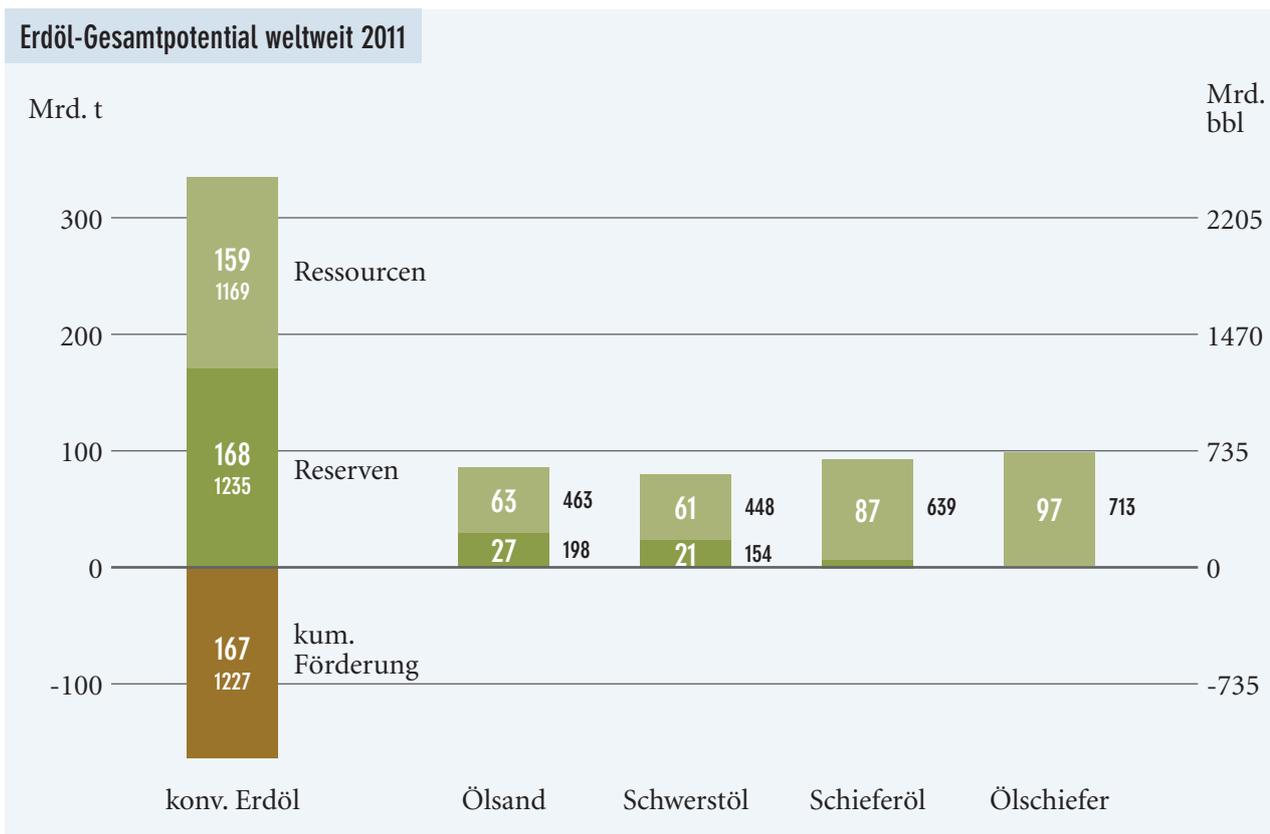


Abbildung 4: Globale Erdölvorräte 2011<sup>67</sup>

Die Erdölpreise sind volatil, abhängig von der Weltkonjunktur und politischen Konflikten. Derzeit beträgt der Barrelpreis rund 50 US-Dollar, zwischenzeitlich lag er bei über 100 US-Dollar. Die Entwicklung des Erdölpreises seit Mitte der 70er Jahre ist im Anhang 2 dargestellt und zeigt eine Steigerung von ca. 10 US-Dollar pro Barrel auf über 100 US-Dollar pro Barrel. Erdöl wird global über feste Kontrakte und Spotmärkte gehandelt. Über 75% des deutschen Bedarfs stammen aus den fünf Ländern Russland, Vereinigtes Königreich, Norwegen, Kasachstan und Nigeria (Reihenfolge nach abnehmender Menge). Der Rest verteilt sich auf mehrere andere Lieferländer. Erdöl (Rohöl) wird über Pipelines und Tankschiffe transportiert<sup>68</sup>. Erdölprodukte werden ebenfalls weltweit gehandelt und über Pipelines, Hochseetanker, Binnenschiffe, Bahn- und Straßentankwagen befördert.

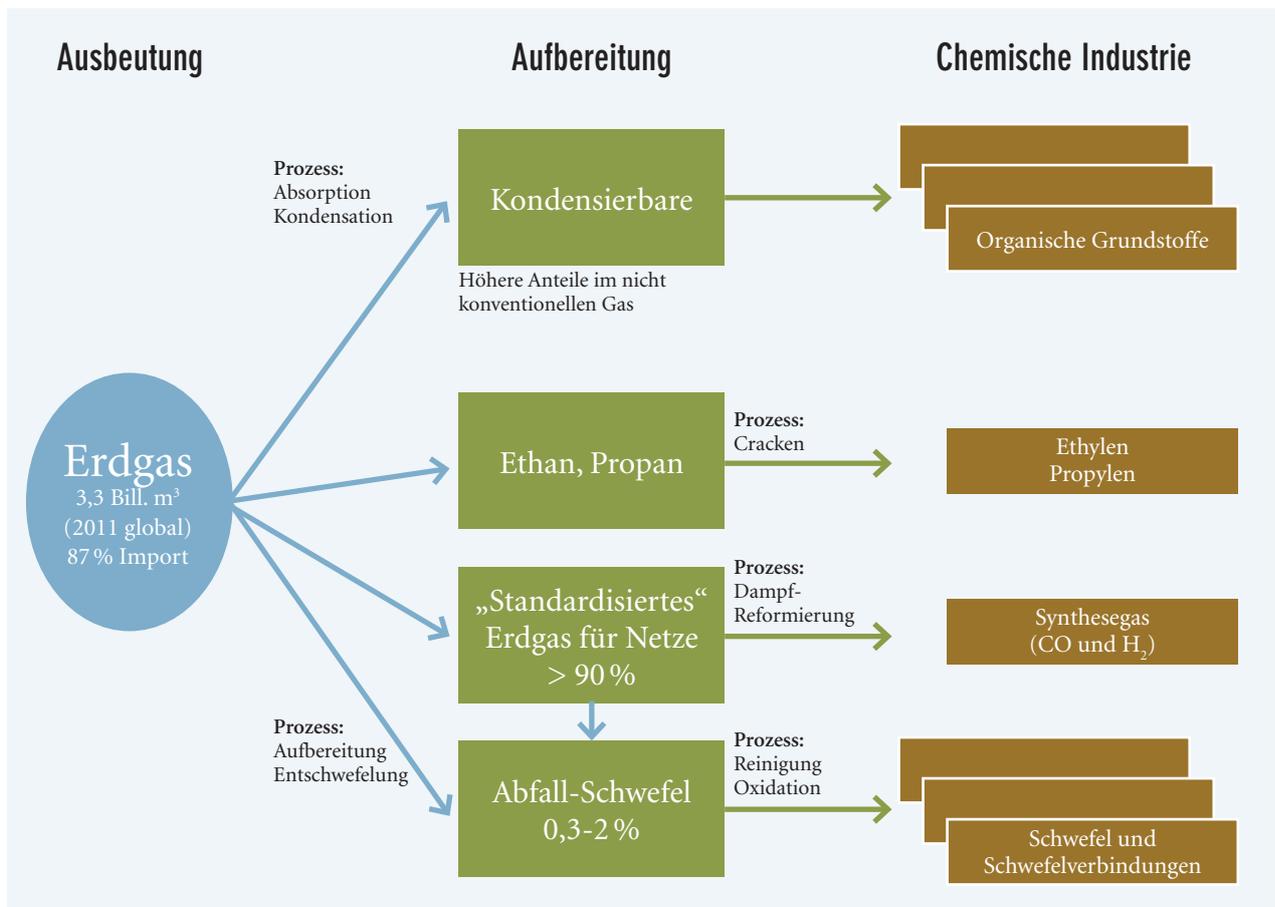
### II.1.1.2 Erdgas

Erdgas ist ein brennbares Naturgas, das in Poren und Lagerstätten in der Erdkruste, sehr häufig zusammen mit Erdöl und Kohle vorkommt. Der Hauptbestandteil von Erdgas ist Methan (CH<sub>4</sub>, 75% Kohlenstoff und 25% Wasserstoff). In der chemischen Industrie wird Erdgas als Energieträger und stofflich zur Herstellung von Synthesegas eingesetzt. Erdgaskondensate<sup>69</sup>, die aus Ethan, Propan, Butan, Pentan und weiteren leicht siedenden Kohlenwasserstoffen (Zusammensetzung nach Erdgasher Herkunft sehr unterschiedlich) bestehen, fallen bei der Reinigung des Gases an der Gewinnungsquelle an. Sie werden wie Naphtha bzw. Naphtha-Crackprodukte verwendet. Abbildung 5 zeigt schematisch die Prozesse zur Gewinnung und Aufbereitung von Erdgas zu den dabei gewonnenen Grundchemikalien.

67 ebd.

68 Messner, J.; Babies, H. G.: Deutsche Rohstoffagentur (dera) (Hg.): MENA – Der Nahe Oste und Nordafrika – Eine Schlüsselregion für die Erdölversorgung der Welt. (2011).

69 Als Erdgaskondensate werden die Begleikohlenwasserstoffe des Methans im natürlichen Erdgas bezeichnet, die an der Erdgasquelle durch technische Verfahren wie Kondensation und Adsorption abgetrennt werden.

Abbildung 5: Welterdgasförderung und stoffliche Verwendung in der chemischen Industrie<sup>70</sup>

Die auf Erdgas basierende Wertschöpfungskette zeigt Tabelle 6<sup>71</sup>.

Tabelle 6: chemische Wertschöpfungskette von Erdgas

Erdgas (Methan)			
Synthesegas →	Ammoniak		
	Methanol	Formaldehyd	Ameisensäure, Formiate
Methylchlorid			
Ruß			
Wasserstoff			
Acetylen			

Von den fossilen Energieträgern ist Erdgas derjenige mit dem größten Wachstum beim Verbrauch.<sup>72</sup> Tabelle 7 zeigt den Erdgasverbrauch (2011) weltweit, in Deutschland und Nordrhein-Westfalen.

<sup>70</sup> Eigene Recherchen, Zahlenquellen: International Energy Agency (IEA) (Hg.): World Energy Outlook 2012. (2012).

<sup>71</sup> Baerns, M.; Hofmann, H.; Renken, A.; Falbe, J.; Fetting, E.; Keim, W.; Onken, U.: Chemische Reaktionstechnik: Lehrbuch der Technischen Chemie. Wiley (1999). ISBN 978-3-527308 41-5.

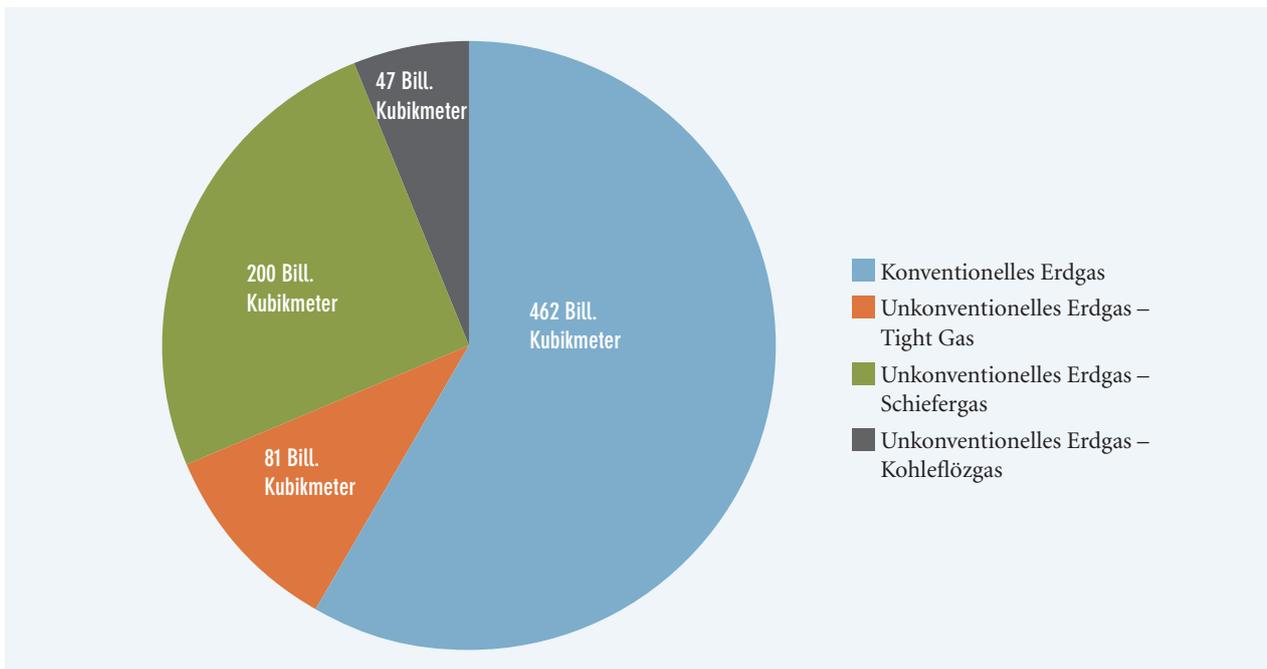
<sup>72</sup> vgl. Statistisches Bundesamt: Erdgasverbrauch in Deutschland in den Jahren 1998 bis 2013 (in Milliarden Kubikmeter) unter: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/41033/umfrage/deutschland---erdgasverbrauch-in-milliarden-kubikmeter/> (2015). Online am 23.02.2015.

Tabelle 7: Erdgasverbrauch 2011 (Differenzen in der Umrechnung sind Rundungsfehler)<sup>73</sup>

Erdgas	Bill. m <sup>3</sup>	Mio. t SKE	Mio. t KE
Welt	3,30	3597	2199
EU	0,54	589	359
Deutschland	0,09	99	60
NRW <sup>73</sup>	0,02	27	16

Der Anteil der heimischen Erdgasförderung am Verbrauch beträgt rund 14%. Erdgas trägt zu fast 22% zum deutschen Primärenergieverbrauch bei. In Deutschland wurde Erdgas 2009 zu 44,4% für Haushalte (Gebäudeheizung, Warmwasserbereitung), zu 37,4% in der Industrie (einschließlich Stromerzeugung und Rohstoff) und zu 18,2% in Handel sowie Gewerbe eingesetzt. Erdgas ist Primärenergieträger für fast 12% der Stromerzeugung.<sup>75</sup>

Die Schätzungen über die globalen Erdgasreserven und -ressourcen sind durch die Fortschritte bei der Ausbeutung von unkonventionellem Erdgas in den vergangenen Jahren angestiegen. Die IEA schätzt die globalen bekannten Ressourcen von konventionellem und unkonventionellem Erdgas (Schiefergas, Tight-/Aquifer- und Kohleflözgas<sup>76</sup>) im WEO 2012 (Abbildung 6) auf 790 Bio. m<sup>3</sup>, was einer statischen Reserven- und Ressourcen-Reichweite von über zwei Jahrhunderten entspricht.

Abbildung 6: Globale Erdgas-Ressourcen nach WEO 2012, Volumenangaben sind Normvolumina (Vn)<sup>77</sup>

73 International Energy Agency (IEA) (Hg.): World Energy Outlook 2012. (2012).

74 Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz (MKULNV) (Hg.): EnergieDaten.NRW 2012. (2012), S. 6

75 Andruleit, Harald et al.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (Hg.): Energierohstoffe 2009: Reserven, Ressourcen, Verfügbarkeit. (2009).

76 Schiefergas, Tight Gas, Aquifer gas: in Gesteinsporen gebundenes Gas, gewinnbar durch Fracking, Kohleflözgas: Erdgas in Kohlevorkommen, gewinnbar mit Fracking-Technologie.

77 Normvolumen (Vn) = Volumen bei einem Druck von 101,325 kPa und 0 °C.

Die Reserven werden von der BGR mit 191 Bio. m<sup>3</sup> (Vn) angegeben<sup>78</sup> (s. Abbildung 7). Die statische Reichweite der Reserven beträgt über 50 Jahre.

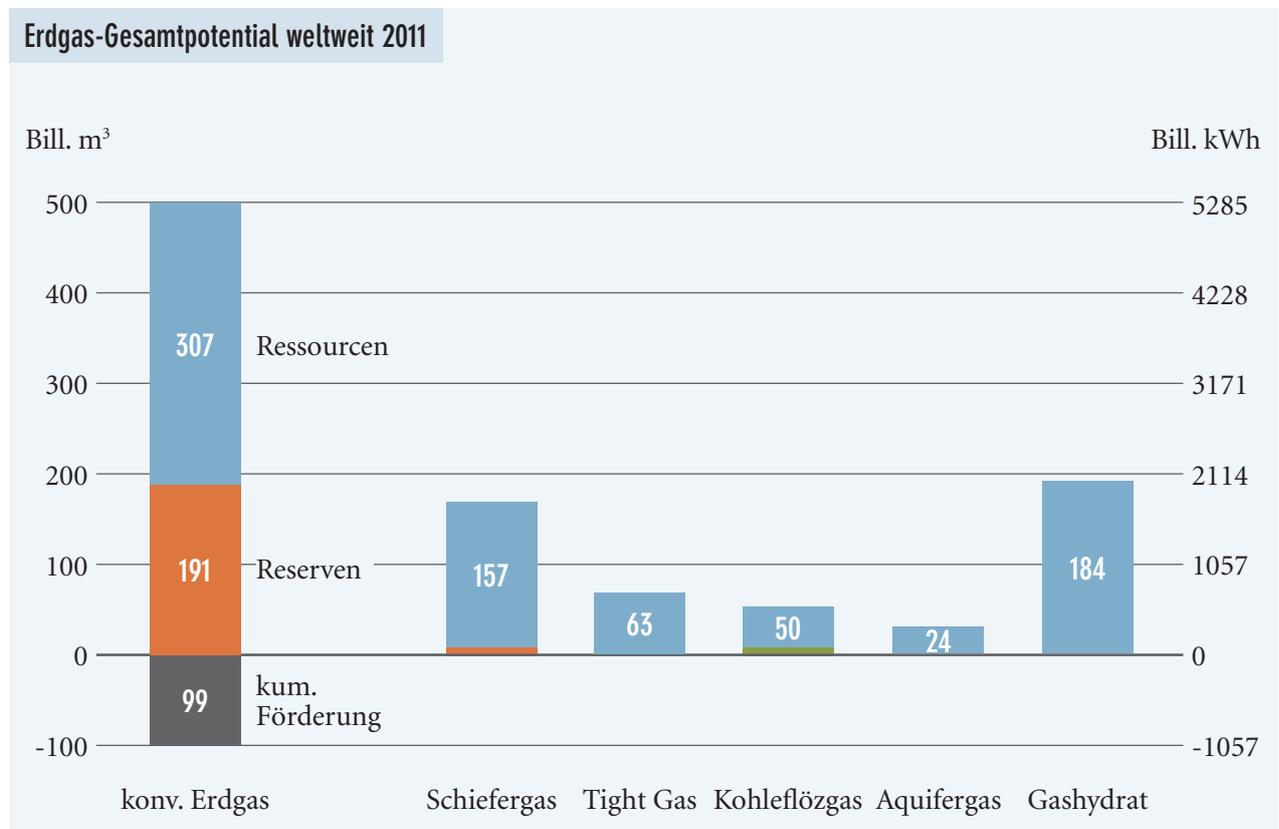


Abbildung 7: Globale Erdgasvorräte 2011<sup>79</sup>

Die Gewinnung von unkonventionellem Erdgas hat in den letzten Jahren insbesondere in Nordamerika in größerem Umfang zugenommen. In der WEO 2012-Schätzung über die entsprechenden Ressourcen (Abbildung 6) sind die Gashydrat-Ressourcen (184 Bio. m<sup>3</sup>) nicht enthalten. Die BGR schätzt die Ressourcen an unkonventionellem Erdgas (inkl. Gashydraten) entsprechend Abbildung 7 auf ca. 480 Bio. m<sup>3</sup>. Hieraus ergeben sich statische Ressourcen-Reichweiten von 100 Jahren nach WEO 2012 und von 150 Jahren nach BGR.

In Deutschland werden ebenfalls nennenswerte Mengen Erdgas in nicht-konventionellen Lagerstätten (Schiefergas, Tight-Gas) vermutet<sup>80</sup>. Das sind Lagerstätten, in denen das Gas in Poren des Gesteins gebunden vorliegt und erst durch technische Verfahren (z.B. Hydraulic Fracturing in Verbindung horizontalen Bohrungen) freigesetzt werden muss. Der Umfang der Vorkommen wurde jedoch noch nicht exakt ermittelt. Die BGR ist von der Bundesregierung beauftragt worden, das Potenzial an Schiefer- und Kohleflözgas in Deutschland abzuschätzen. Die aus unkonventionellen Vorkommen gewinnbaren Gasmengen könnten erheblich sein. Der Geologische Dienst Nordrhein-Westfalen hat anhand der Durchschnittsgehalte von Methan in den Kohleflözen des Ruhrgebiets berechnet, dass allein in den Kohleflözen des Landes rund 2.200 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas enthalten sein könnten. Eine Aus-

78 Steinbach, Volker: Verfügbarkeiten und Potenziale fossiler Kohlenwasserstoffe und mineralischer Rohstoffe für die chemische Industrie (2013), Folie 12.

79 Steinbach, Volker: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (Hg.): Energierohstoffe im 21. Jahrhundert – Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit fossiler Energierohstoffe. (2013).

80 s.vgl. Staatliche Geologische Dienste der Deutschen Bundesländer (SGD); Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (Hg.): Stellungnahme zu den geowissenschaftlichen Aussagen des UBA-Gutachtens, der Studie NRW und der Risikostudie des ExxonMobil InfoDialogprozesses zum Thema Fracking. (2013).

beutung der vermuteten Vorkommen ist zurzeit politisch nicht umsetzbar, weil die Bedenken gegen die Beherrschbarkeit möglicher Umweltrisiken bei der Gewinnung nicht ausgeräumt sind.

Die wesentlichen Erdgaslieferländer für Deutschland sind Russland, Norwegen und die Niederlande, aus denen 2011 in Summe mehr als 96% des Gesamtimports per Pipelines bezogen wurden<sup>81,82</sup>. International wird Erdgas auch in verflüssigter Form, tiefgekühlt mittels Tankschiff transportiert. In Deutschland gibt es 2013 jedoch noch kein Terminal für die Übernahme von verflüssigtem Erdgas (LNG). Die Erdgaspreise sind weniger volatil als die des Erdöls. Die Preisentwicklung wird in Anhang 2 gezeigt. In den USA hat die Gewinnung von Schiefergas zu einer deutlichen Preissenkung des Erdgases geführt. Die Preise liegen dort zurzeit 2/3 unter dem europäischen Preisniveau. Diese Entwicklung bei den Energiepreisen hat in den USA zu einem Ausbau von Produktionsanlagen mit einer vermehrten Erdgasnutzung geführt<sup>83</sup>. Die IEA geht im WEO 2012 von einer Anpassung der regional unterschiedlichen Preisniveaus beim Erdgas aus, weil die Märkte durch den zunehmenden globalen Transport von LNG flexibler bedient werden können<sup>84</sup>.

### II.1.1.3 Kohle

Braunkohle und Steinkohle sind Sedimentablagerungen, die durch anaeroben Abbau von Pflanzenresten (Inkohlung) entstanden sind. Der Kohlenstoffgehalt der getrockneten Steinkohle liegt bei 80 bis über 90%, der von Braunkohle-Trockenmasse bei 65-75%. Global gehandelt und transportiert werden nur die Hartkohlen (Steinkohle). Braunkohle wird wegen der niedrigeren Kohlenstoffgehalte und der höheren Wasser- und Aschegehalte nicht über weite Strecken transportiert. Die Kohlevorkommen liegen in allen Regionen der Welt. Kohle ist der fossile Rohstoff mit den höchsten Ressourcen. Die bekannten Reserven der Hartkohlen betragen 728 Mrd. t<sup>85</sup>.

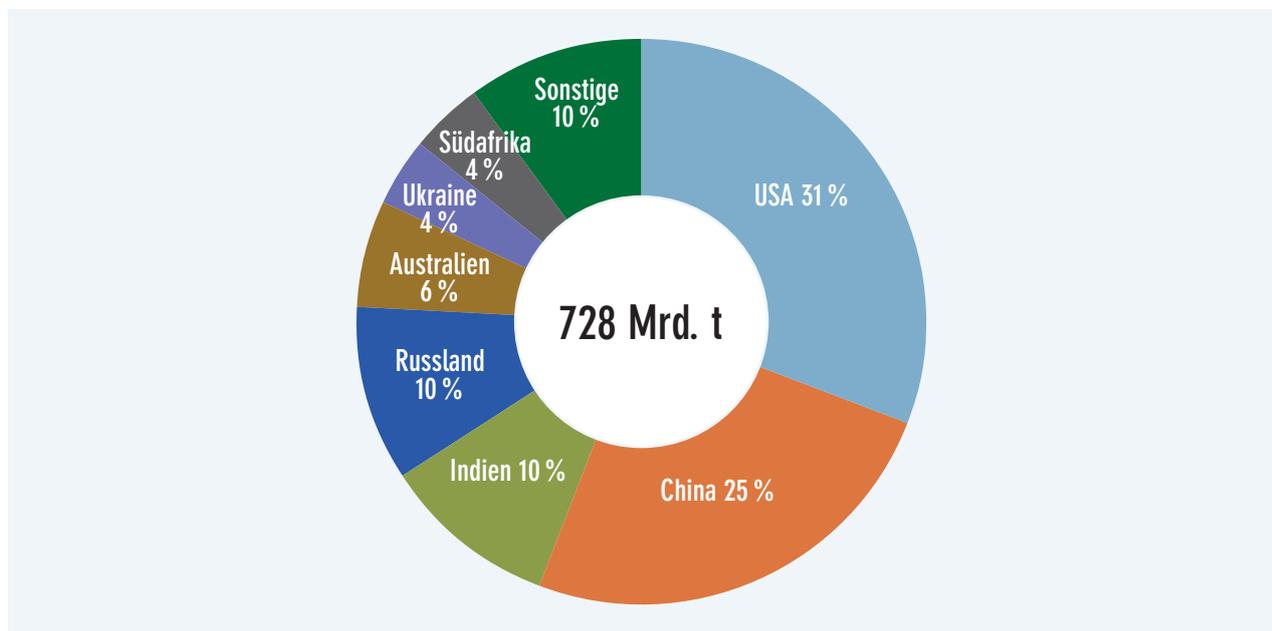


Abbildung 8: Verteilung der globalen Hartkohle-Reserven (2010)<sup>86</sup>

81 Bidder, Benjamin: Umstrittene Erweiterungspläne – Ostsee-Pipeline durch Naturschutzgebiet geplant. In: SPIEGELONLINE WISSENSCHAFT (2013).

82 manager magazin online: Erdgas: Wintershall und Statoil schmieden Pipeline-Pakt unter: <http://www.manager-magazin.de/unternehmen/energie/a-868306.html> (2012). Online am 04.03.2014.

83 Herz, Carsten; Siebenhaar, Hans-Peter: Fracking-Boom in USA: Schiefergas jagt Europäern Angst ein. In: Handelsblatt Online (2013).

84 International Energy Agency (IEA) (Hg.): World Energy Outlook 2012. (2012), S. 125.

85 ebd., S. 164.

86 ebd.

Steinkohle ist weltweit der derzeit wichtigste und am besten verfügbare Energieträger. Die statische Reichweite der Weltkohlereserven beträgt bei einem Weltjahresverbrauch in 2010 von rund 5 Mrd. t mehr als 140 Jahre (zur Preisentwicklung s. Grafik in Anhang 2).<sup>87</sup> Die Bedeutung der Kohle als ein wesentlicher Primärenergieträger in Deutschland zeigt Abbildung 9.

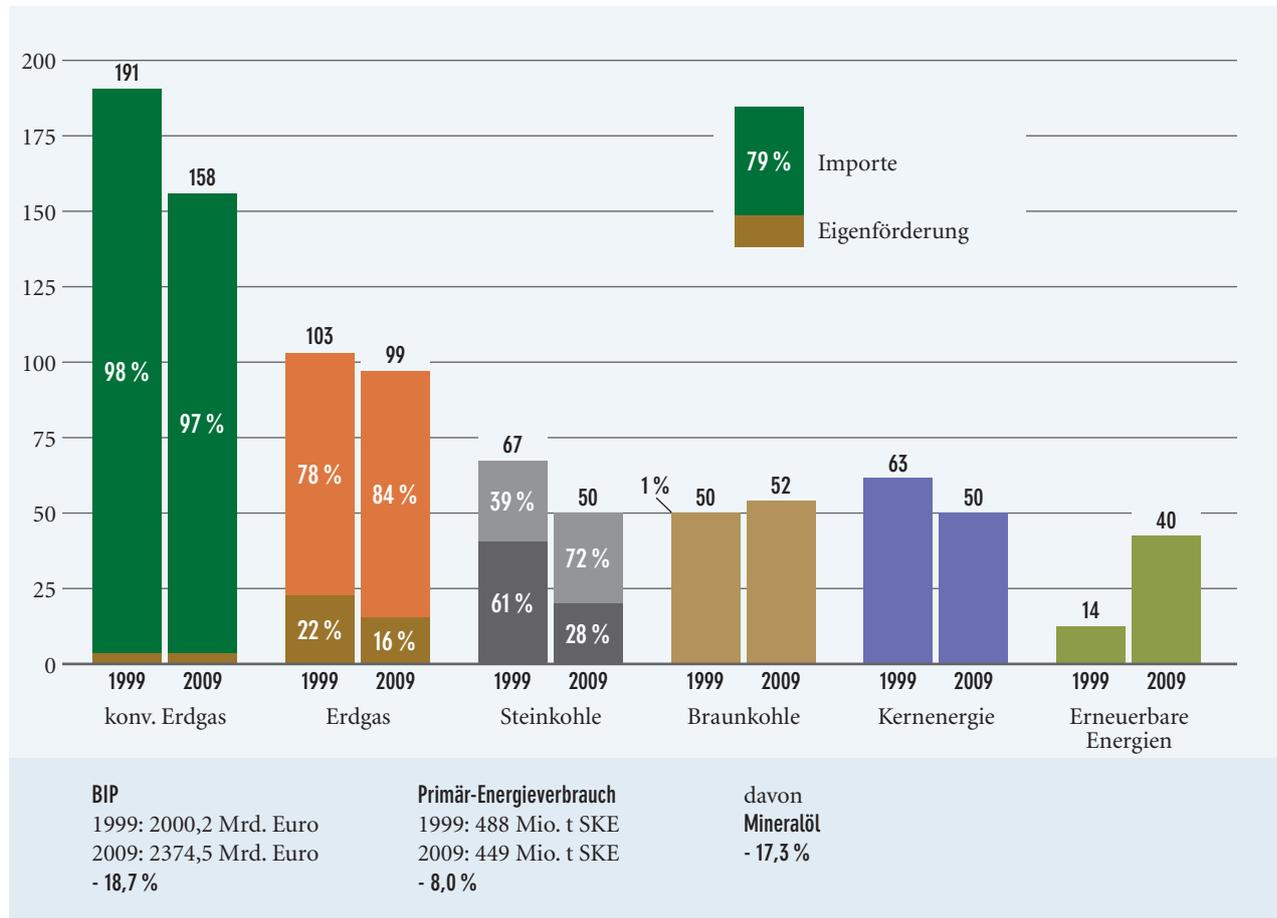


Abbildung 9: Bedeutung von Steinkohle und Braunkohle in Deutschland, gezeigt am Primär-Energieverbrauch über die Zehnjahresperiode im Vergleich mit der BIP-Entwicklung<sup>88,89</sup>

### Braunkohle

Heimische Braunkohle kann im Gegensatz zur heimischen Steinkohle wettbewerbsfähig gefördert werden und ist noch über lange Zeiträume verfügbar<sup>90,91</sup>. Derzeit werden die jährlich in Deutschland geförderten 170-180 Mio. t Braunkohle zu 90% energetisch verwertet, 10% werden stofflich genutzt. Bei der energetischen Nutzung von Kohle verdoppeln sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Vergleich zur Erdgasnutzung<sup>92</sup>, wobei in der Klimabilanz der Erdgasnutzung die Emissionen von Treibhausgasen wie z.B. Methan durch Verluste bei der Förderung in Osteuropa und Asien sowie beim Transport

87 ebd., S. 157.

88 Babies, Hans Georg; Bahr, Andreas; Benitz, Uwe et al.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (Hg.): Kurzstudie – Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen 2010. (2009), S. 11.

89 Statistisches Bundesamt (Hg.): Bruttoinlandprodukt 2011 für Deutschland Begleitmaterial zur Pressekonferenz. (2012).

90 TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERGAKADEMIE FREIBERG; Meyer, Bernd: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Rohstoffe“ der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2013).

91 GDCh; DECHEMA; DGMK; VCI (Hg.): Positionspapier: Rohstoffbasis im Wandel. (2010).

92 Lahl, Uwe; Zeschmar-Lahl, Barbara (Hg.): Going Green – Chemie: Handlungsfelder für eine ressourceneffiziente Chemieindustrie. Heinrich-Böll-Stiftung (2011). ISBN 978-3-86928-065-3.

nach Westeuropa unberücksichtigt sind<sup>93,94</sup>. Braunkohle ist nach der Schließung der Steinkohlezichen in Deutschland der einzige heimische fossile Energierohstoff von Bedeutung. Im Jahr 2012 hatte Braunkohle einen Anteil von rund 24% am Primärenergieverbrauch Deutschlands. Sie deckte im selben Jahr knapp 45% des deutschen Strombedarfs und damit mehr als Kernenergie und erneuerbare Energien zusammen.<sup>95</sup> Etwa 90% der abgebauten Braunkohle werden zur Stromerzeugung und für Fernwärme verwendet. Das Gesamtvorkommen in Deutschland beträgt 77 Mrd. t, von denen ca. 40 Mrd. t wirtschaftlich abbaubar sind. Jährlich wurden im Durchschnitt ca. 170 Mio. t Braunkohle abgebaut – nach Heizwert entspricht das ca. 52,3 Mio. t Steinkohleneinheiten (SKE). 2013 lag die Rohbraunkohle-Fördermenge bei rund 183 Mio. t (entsprechend 56 Mio. t SKE) und trug damit zu knapp 40% der heimischen Primärenergiegewinnung bei<sup>96</sup> (s. auch Abbildung 9, Stand 2009). Im Jahr 2012 betrug die Fördermenge in Nordrhein-Westfalen 101,7 Mio. t Rohbraunkohle<sup>97</sup>. Die statische Reichweite der Gesamtvorkommen wird daher auf mehr als 200 Jahre geschätzt. Die erschlossenen bzw. genehmigten Vorkommen in den deutschen Braunkohlerevieren (Rheinland, Lausitz und Mitteldeutschland) liegen bei 7 Mrd. t und reichen noch mehr als 30 Jahre. In den deutschen Braunkohlerevieren werden die Kohlen wasserfeucht zu den Kraftwerken transportiert. Die Förderkosten werden auf 11 Euro pro Tonne bei einem Heizwert von 10.500 kJ/kg geschätzt<sup>98</sup>. Eine wirtschaftliche Trocknung der Braunkohle erfolgt durch Ausnutzung der in den Kraftwerksabgasen enthaltenen Energie.

### Steinkohle

Der Abbau von Steinkohle in Deutschland ist wegen der Schachttiefen bis zu 1.750 m derzeit nicht wirtschaftlich. Die Förderung der Steinkohle wird in Deutschland seit Jahrzehnten subventioniert. Das Ende der Subventionierung ist für 2018 beschlossen. Die Importquote betrug 2009 ca. 72% (s. Abbildung 9). Lieferländer sind Kolumbien, Russland, die USA, Australien, Südafrika und Kanada. Nur 13,8 Mio. t Steinkohle (28% des Gesamtverbrauchs) wurden somit in Deutschland gefördert. Steinkohle gehört zu den Energieträgern, die weltweit zu relativ stabilen Preisen gehandelt werden.

In Deutschland wurden 2010 trotz der großen globalen Verfügbarkeit lediglich 0,2 Mio. t Kohle als Rohstoff für die chemische Industrie verwendet. Abbildung 10 zeigt die Einsatzmöglichkeiten für die stoffliche Verwendung.

---

93 Fritsche, Uwe R.: Öko-Institut e.V. (Hg.): Endenergiebezogene Gesamtemissionen für Treibhausgase aus fossilen Energieträgern unter Einbeziehung der Bereitstellungsvorketten. (2007).

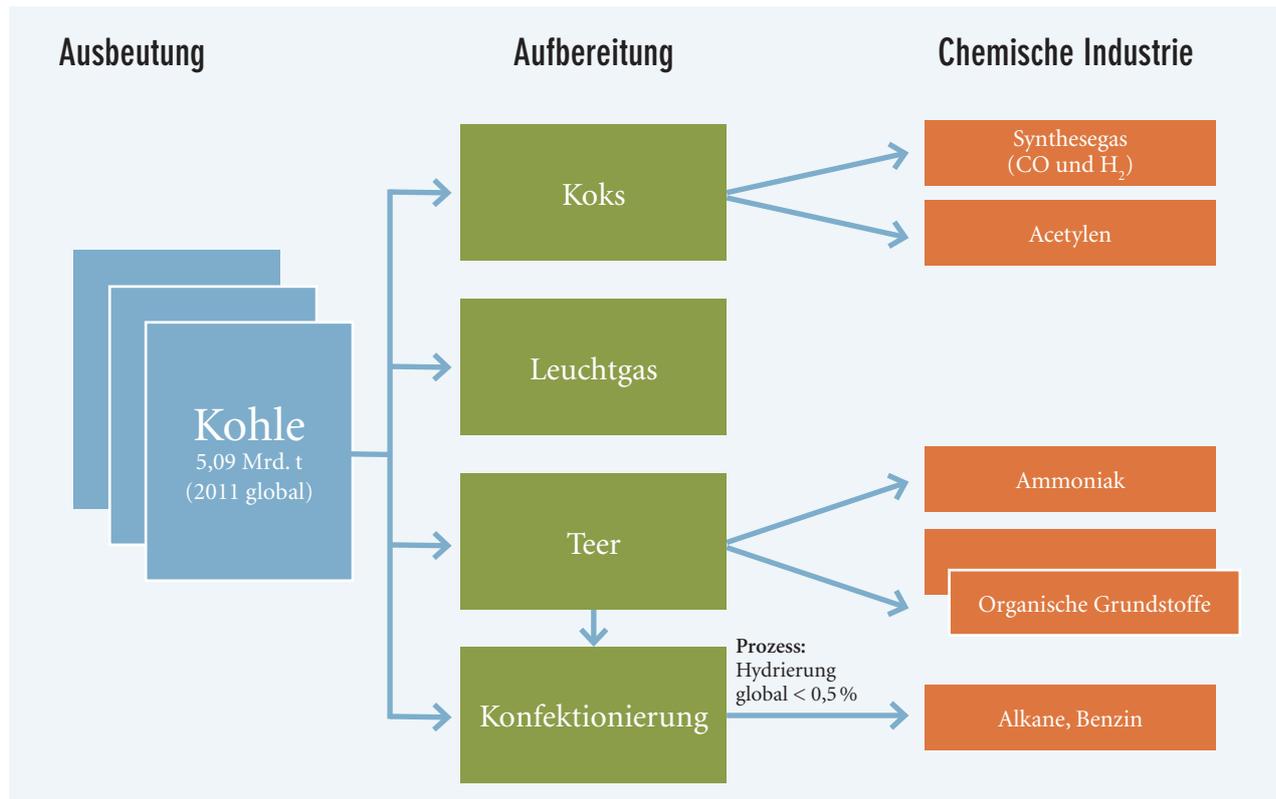
94 Kavalov, B.; Petric, H.; Georgakaki, A.: European Commission (Hg.): Liquefied Natural Gas for Europe – Some Important Issues for Consideration. (2009).

95 Deutsche Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie (Hg.): Von Kohlehalden und Wasserstoff: Energiespeicher – zentrale Elemente der Energieversorgung (2013). ISBN 978-3-9809691-5-4, S. 7.

96 Bundesverband Braunkohle: Anteil der Braunkohle am Primärenergieverbrauch in Deutschland unter: <http://www.braunkohle.de/128-0-Anteil-der-Braunkohle-am-Primärenergieverbrauch-in-Deutschland.html>. Online am 23.02.2015.

97 DEBRIV: Braunkohle in Deutschland 2013 – Daten und Fakten unter: [http://www.brd.nrw.de/planen\\_bauen/pdf/Braunkohle\\_in\\_Deutschland\\_DEBRIV\\_Statistikfaltblatt.pdf](http://www.brd.nrw.de/planen_bauen/pdf/Braunkohle_in_Deutschland_DEBRIV_Statistikfaltblatt.pdf) (2014). Online am 14.04.2014.

98 Emele, Lukas: (Hg.): Entwicklung der Strompreise im Verhältnis zur Kaufkraft und Abhängigkeit der Strompreise von den Primärenergiekosten im Untersuchungszeitraum 1950 bis heute. (2009).

Abbildung 10: Chemie-Rohstoffquelle Kohle<sup>99</sup>

#### II.1.1.4 Nachwachsende Rohstoffe

Nachwachsende pflanzliche und tierische Biomasse sind eine weitere Gruppe organischer Rohstoffe. Diese erneuerbaren Rohstoffe (vor allem die pflanzlichen) finden in der chemischen Industrie schon seit Langem Verwendung. Ihre Menge lag im Jahre 2011 bei 3,5 Mio. t, was einem Anteil von 13% entspricht<sup>100</sup>. Die Zunahme der Einsatzmenge nachwachsender Rohstoffe seit 1991 ist für Fette/Öle, Kohlenhydrate und Sonstige (ohne Holz) in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Einsatzmengen nachwachsender Rohstoffe in Kilotonnen zur stofflichen Nutzung in Deutschland<sup>101</sup>

Jahr	1991	1998	2005	2007	2008	2009	2010	2011	2012 (Prognose)
Fette und Öle	900	1.150	1.150	1.450	1.450	1.200	1.200	1.210	1.120
Kohlenhydrate	747	846	1.166	1.508	1.482	1.333	1.518	1.578	1.421
Sonstige	350	460	487	673	599	598	770	765	745
Insgesamt	1.997	2.456	2.803	3.631	3.576	3.131	3.488	3.553	3.286

Aus nachwachsenden Rohstoffen können Kohlenhydrate (Stärke, Cellulose, Zucker), Lipide (Öle und Fette), Proteine, Harze, Fasern, Pigmente, Tenside, Aromastoffe sowie pharmazeutische Wirkstoffe gewonnen werden. Diese werden als Grundstoffe für die Produktion von Kunststoffen, Waschmitteln, Lebensmittelzusätzen, Kosmetika, Farben und Lacken, Kleb- und Baustoffen, Hydraulikölen, Schmiermittel bis hin zu Arzneimitteln eingesetzt<sup>102</sup>.

99 Schobert, Harold H.: Chemistry of fossil fuels and biofuels. Cambridge Univ. Press (2013). ISBN 978-0-521114-00-4.

100 Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Daten und Fakten zum Thema: Rohstoffbasis der chemischen Industrie. (2013).

101 Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (Hg.): Jahresbericht Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. 2013/2014. (2014).

102 Pude, Ralf; Werner, Antje; Vollrath, Birgit; Gödeke, Katja: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V (Hg.): Pflanzen für Industrie und Energie. (2012).

Abbildung 11 zeigt die Anteile der eingesetzten Grundstoffe und deren Verwendung in der chemischen Industrie.

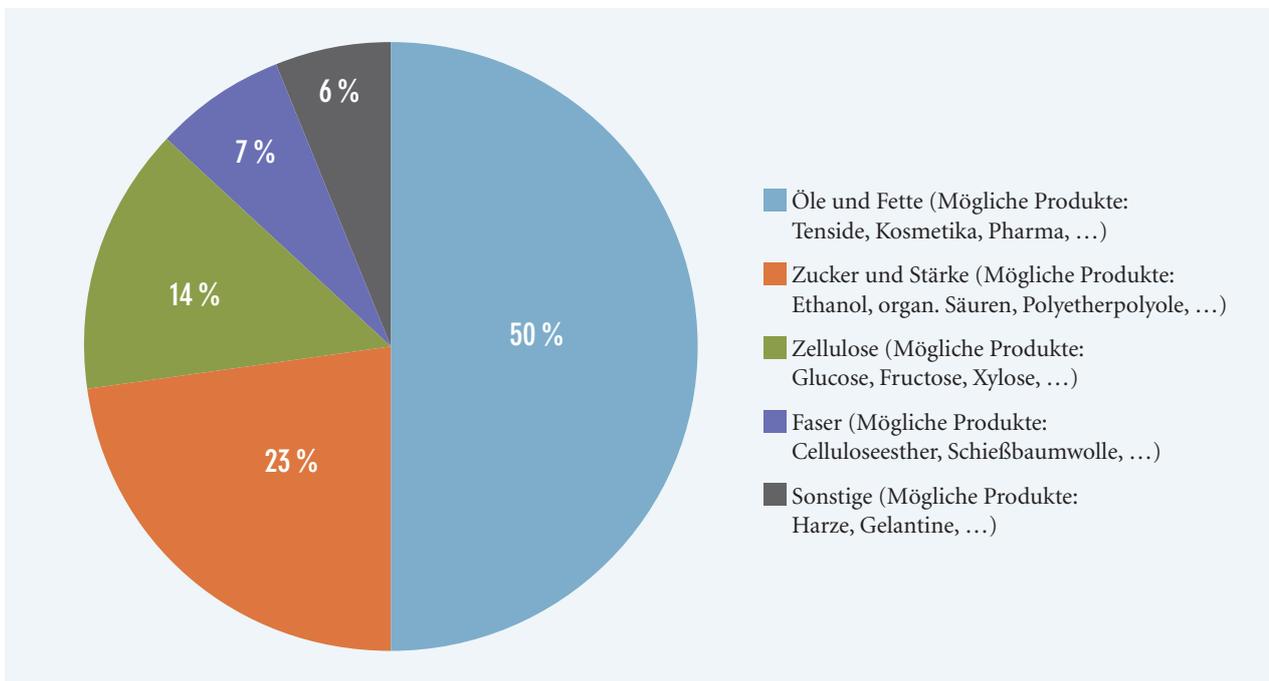


Abbildung 11: Anteile nachwachsender Rohstoffe am Rohstoffmix der Chemie und abgeleitete Folgeprodukte<sup>103</sup>

Die Möglichkeiten für einen weiteren Ausbau des Anteils an nachwachsenden Rohstoffen trotz der bereits guten Position Deutschlands bestehen vor allem in den Bereichen chemische Prozesstechnik, Katalysator-Entwicklung und Biotechnologie<sup>104</sup> (s. auch III. Verfahren).

Nutzungskonkurrenzen ergeben sich aus den unterschiedlichen Verwendungszwecken verschiedener Biomasseträger, die als Nahrungsmittel, Energierohstoff, für die Herstellung von Textilien oder als Konstruktionsmaterial im Möbel- sowie Häuserbau eingesetzt werden können (Übersicht über die Verwendung nachwachsender Rohstoffe im Anhang 1<sup>105</sup>). Nach Angaben des Umweltbundesamtes (UBA) wurden 2008 weltweit 10 Mrd. t Biomasse (ohne Holz) geerntet. Hiervon wurde mit 60% der größte Teil für die Viehfütterung sowie 32% als Lebensmittel und jeweils 4% für stoffliche und energetische Zwecke verwendet (Abbildung 12)<sup>106</sup>.

103 GDCh; DECHEMA; DGMK; VCI (Hg.): Positionspapier: Rohstoffbasis im Wandel. (2010).

104 Grimm, Vera; Braun, Matthias; Teichert, Olav, Zweck, Axel: Zukünftige Technologien Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH (Hg.): Übersichtsstudie: Biomasse – Rohstoff der Zukunft für die chemische Industrie. (2011), S. 9.

105 Entnommen aus Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Factbook 05 – Die Formel Ressourceneffizienz. (2012), S. 54.

106 Raschka, Achim; Carus, Michael: nova-Institut GmbH (Hg.): Stoffliche Nutzung von Biomasse – Basisdaten für Deutschland, Europa und die Welt. (2012).

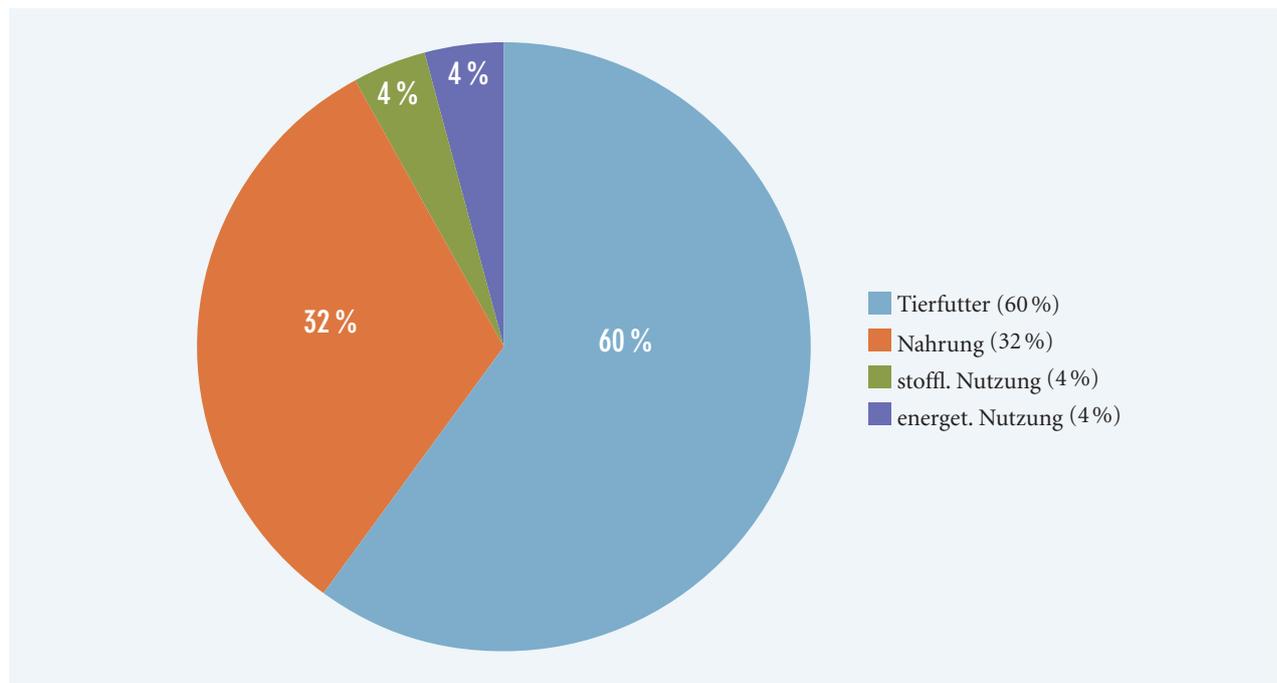


Abbildung 12: Verwendung der globalen Biomasse aus Landbau des Jahres 2008<sup>107</sup>

Über die direkte Konkurrenz um den Rohstoff selbst hinaus besteht eine Konkurrenz in der Flächennutzung. So konkurriert die Biomasseproduktion für die chemische Industrie mit den Flächenanforderungen der Nahrungsmittel-, Viehfutter- und der Energierohstoffproduktion sowie mit Siedlungs-, Verkehrs- und Naturschutzflächen. Tabelle 9 zeigt die derzeitige Verfügbarkeit von Forst- und landwirtschaftlichen Flächen auf der Welt, in der EU, in Deutschland und in Nordrhein-Westfalen.

Tabelle 9: Zur Verfügung stehende Wald-, Weide-, Acker- und Gesamtfläche weltweit, Deutschland und Nordrhein-Westfalen

	Weltweit <sup>107</sup>	Deutschland <sup>108</sup>	NRW <sup>109</sup>
Gesamtfläche [Mio. ha]	13.400	35,7	3,4
Wald [Mio. ha]	3.900	8,8	0,9
Weide [Mio. ha]	4.700	4,6	0,4
Acker [Mio. ha]	1.500	11,9	1,0
Rest [Mio. ha]	3.300	10,4	1,1

In Deutschland wurden 2013 nachwachsende Rohstoffe für die stoffliche und energetische Nutzung auf rund 2,4 Mio. ha angebaut (vgl. Abbildung 13). Dies entspricht 20% der Ackerfläche Deutschlands. Wie Abbildung 13 zeigt, wird der weitaus größere Teil der Anbaufläche für den Anbau von Energiepflanzen genutzt.

107 Carus, Michael et al.: Umweltbundesamt (UBA) (Hg.): Ökologische Innovationspolitik – Mehr Ressourceneffizienz und Klimaschutz durch nachhaltige stoffliche Nutzungen von Biomasse. (2014), S. 44.

108 Barilla Center for Food & Nutrition; Nierenberg, D.; Rubinelli, L.; Worldwatch Institute: Eating Planet 2012: Nutrition Today. the Centre (2012). ISBN 978-8-866270-29-4.

109 Barilla Center for Food & Nutrition; Nierenberg, D.; Rubinelli, L.; Worldwatch Institute: Eating Planet 2012: Nutrition Today. the Centre (2012). ISBN 978-8-866270-29-4.

110 Information und Technik Nordrhein-Westfalen (IT.NRW) (Hg.): Statistisches Jahrbuch Nordrhein-Westfalen 2011. (2011).

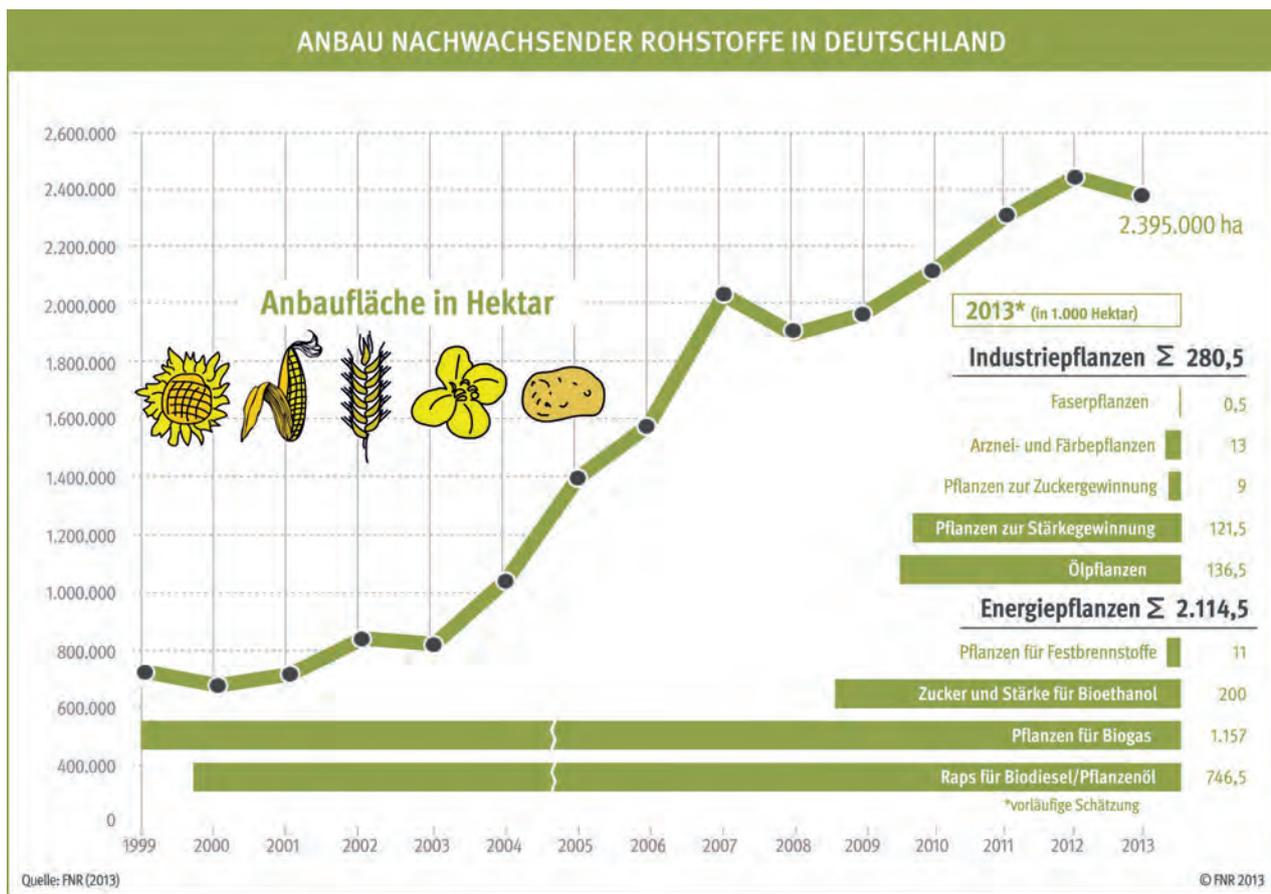


Abbildung 13: Anbau nachwachsender Rohstoffe in Deutschland<sup>111</sup>

Nachwachsende Rohstoffe werden entsprechend des Entwicklungsstandes ihrer Verarbeitungsverfahren in erste bis dritte Generation unterteilt. Zur ersten Generation gehören Biomasse-Rohstoffquellen, die bereits wirtschaftlich als Grundstoff in der chemischen Industrie verwendet werden. In der Regel ist der Zugriff auf die Molekülstruktur der für die chemische Industrie interessanten Verbindungen dieser Rohstoffe direkt möglich. Die zweite Generation umfasst lignocellulosehaltige Biomasseträger, für die erst vereinzelt Verfahren zur stofflichen Verwertung existieren (z.B. Holz). Biomasse der dritten Generation (Algen) wird bereits kommerziell – in kleinem Maßstab – umgesetzt (z.B. Kosmetika).<sup>112</sup>

Wie fossile Rohstoffe unterscheiden sich auch nachwachsende Rohstoffe unterschiedlicher Quelle stark im Kohlenstoff- und Wassergehalt sowie in der chemischen Zusammensetzung. In Tabelle 10 ist ein Vergleich des Ertrags und der Menge an gebundenem CO<sub>2</sub> verschiedener Vertreter der unterschiedlichen Biomassegenerationen pro Hektar und Jahr sowie des Energiegehalts pro Fläche dargestellt.

Die Produktion nachwachsender Rohstoffe ist abhängig von der Qualität der Ressource Boden, die durch Verdichtung, Versalzung, Erosion, Kontamination und Verlust organischer Substanz beeinträchtigt wird. Gründe dafür sind nicht nachhaltige Bewirtschaftung, Flächenversiegelung und der Klimawandel. Die Neuausbildung von ertragreichem Boden ist sehr zeitintensiv. Die Beeinträchti-

111 Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.: Grafik Anbau nachwachsender Rohstoffe in Deutschland unter: [http://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/r/z/rz\\_fnr4\\_0252\\_grafik\\_nawaro\\_anbau\\_101013\\_deut.jpg](http://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/r/z/rz_fnr4_0252_grafik_nawaro_anbau_101013_deut.jpg) (2013). Online am 05.03.2014.

112 NRW hat in Bergheim-Niederaußem eine Versuchsanlage, die im Jahr 6.000 Kilogramm Algen (Trockensubstrat) produziert, wodurch 12.000 Kilogramm CO<sub>2</sub> gebunden werden, s. Vogel Business Media GmbH & Co. KG: RWE nimmt Algenzucht-Pilotanlage zur Kohlendioxid-Konversion in Betrieb unter: [http://www.process.vogel.de/anlagen\\_apparatebau/aufbereitung/articles/153304/](http://www.process.vogel.de/anlagen_apparatebau/aufbereitung/articles/153304/) (2008). Online am 21.05.2014.

gung der Bodenstruktur mit der Vielfalt der kleinen und Kleinstlebewesen ist mit dem Verlust an Biodiversität verbunden<sup>113</sup>.

Tabelle 10: Vergleich des Ertrags, des gebundenen CO<sub>2</sub> und des Energiegehalts verschiedener Biomasseträger<sup>114</sup>

Biomasse	Ertrag in t(TS)/ha*a	gebundenes CO <sub>2</sub> in t/ha*a	Energiegehalt in MWh/ha
<b>Erste Generation</b>			
Mais, Ganzpflanze	15-20	25-35	75-100
<b>Zweite Generation</b>			
Waldholz (Buche)	4-7	7-12	20-35
schnellwachsende Bäume	6-20	10-35	30-100
<b>Dritte Generation</b>			
Mikroalgen (Becken)	40-60	66-100	166-250
Mikroalgen (Reaktor)	80-120	130-200	333-500

#### II.1.1.4.1 Nachwachsende Rohstoffe erster Generation

Zur Biomasse erster Generation zählen Feldfrüchte wie Zuckerrüben, Weizen, Mais, oder Raps, aus denen Zucker, Stärke, pflanzliche Öle etc. gewonnen werden können sowie Baumwolle und Kautschuk. Baumwolle dient zum Beispiel als Faserquelle und Kautschuk als Grundstoff für die Gummiherstellung. Da nachwachsende Rohstoffe in der Landwirtschaft produziert werden, unterliegt ihre Verfügbarkeit saisonalen Schwankungen, die z.B. durch gewählte Fruchtfolgen und Erntequalität bestimmt werden.

Vielen Biomasseträgern erster Generation ist gemein, dass sie auch als Lebensmittel genutzt werden können. Hierunter fallen bspw. die oben genannten zucker-, stärke- und ölhaltigen Pflanzen.

##### Zucker- und stärkehaltige Pflanzen

Zu den zuckerhaltigen Pflanzen zählen Zuckerrüben und Zuckerrohr, zu den stärkehaltigen Weizen, Kartoffeln, Mais und Reis. 2012/2013 wurden global 175 Mio. t Zucker (Saccharose) produziert<sup>115</sup>. Hauptrohstoffquellen sind Zuckerrohr (70-80%) und Zuckerrüben<sup>116</sup>. Vor allem Zuckerrüben besitzen eine hohe Energie-, Dünger- und Wassernutzungseffizienz sowie eine hohe Trockenmasseproduktion und eine hohe CO<sub>2</sub>-Bindung<sup>117,118</sup>. Die Hektarerträge belaufen sich bei beiden Pflanzen auf etwa 10 t<sup>119</sup>. Größter Zuckerproduzent der Welt ist Brasilien. Dort wird vor allem Zuckerrohr angebaut. Die ausgepressten Zuckerrohrreste (Bagasse) werden energetisch verwertet.

Die chemische Industrie nutzt Zucker in Form von Saccharose oder Glucose als Ausgangsstoff für chemische Synthesen und Fermentationen z.B. zur Herstellung von Ethanol, Essigsäure, Aminosäu-

113 Scheffer, Fritz; Schachtschabel, Paul; Blume, Hans-Peter: Lehrbuch der Bodenkunde. Spektrum, Akad. Verl. (2002). ISBN 978-3-827413-24-6.

114 Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.: Enenergiepflanzen: Algen unter: <http://energiepflanzen.fnr.de/pflanzen/algen/> (2013). Online am 05.03.2014.

115 United States Department of Agriculture (Hg.): Sugar: World Markets and Trade. (2013).

116 Deutsche Melasse Handelsgesellschaft mbH: Melasse, Zuckerrübenmelasse und Zuckerrohrmelasse unter: <http://www.deutsche-melasse.de/DMH-Company-profile.45.0.html?&L=1>. Online am 14.04.2014.

117 GDCh; DECHEMA; DGfK; VCI (Hg.): Positionspapier: Rohstoffbasis im Wandel. (2010).

118 Carus, Michael; Dammer, Lara: nova-Institut GmbH (Hg.): Food or non-food: Which agricultural feedstocks are best for industrial uses? (2013).

119 SÜDZUCKER: FAQ Zuckerrübe/Zuckerrohr unter: <http://www.suedzucker.de/Pdf/de/FAQ/Zuckerruebe-Zuckerrohr.pdf> (2013). Online am 5.3.2014.

ren, anderen organischen Säuren, Dextranen, Vitaminen, Duft-, Aroma- und Süßstoffen. Aus Stärke kann ebenfalls Glucose gewonnen und ähnlichen Wertschöpfungsketten zugeführt werden.

### Ölhaltige Pflanzen

Zu den mengenmäßig wichtigsten ölhaltigen Pflanzen zählen Ölpalmen, Soja und Raps. In Ölmühlen wird aus den Ölkörnern oder dem öligen Fruchtfleisch Speiseöl gepresst, die Pressrückstände sind eiweißreich und werden als Viehfutter verwendet. Deutschland importierte im Jahre 2012 7,8 Mio. t Ölsamen. Aus importierten und heimisch produzierten Ölsamen wurden 4,4 Mio. t Öl gepresst. Der Importanteil von Öl belief sich im gleichen Jahr auf nur 2,4 Mio. t<sup>120</sup>, was Deutschland zu einem wichtigen Ölmühlenstandort macht.

In der chemischen Industrie werden Öle vor allem für Kosmetika, Tenside, Pharmaprodukte, Additive und als Ausgangsstoff für Glycerin verwendet (Abbildung 11). Der weltweite Verbrauch der Pflanzenöle hat sich im Zeitraum von zwei Jahrzehnten von 1993 bis 2013 mehr als verdoppelt<sup>121</sup> (Abbildung 14). Durch die Anbauverfahren, insbesondere bei Palmöl, in den Herstellungsländern durch Plantagen und die damit verbundene Zerstörung von Regenwäldern, ist ein kritischerer Blick auf diesen Rohstoff in Westeuropa entstanden. Mittlerweile werden hier sogar Produkte damit beworben, dass sie nicht aus Palmöl hergestellt sind.

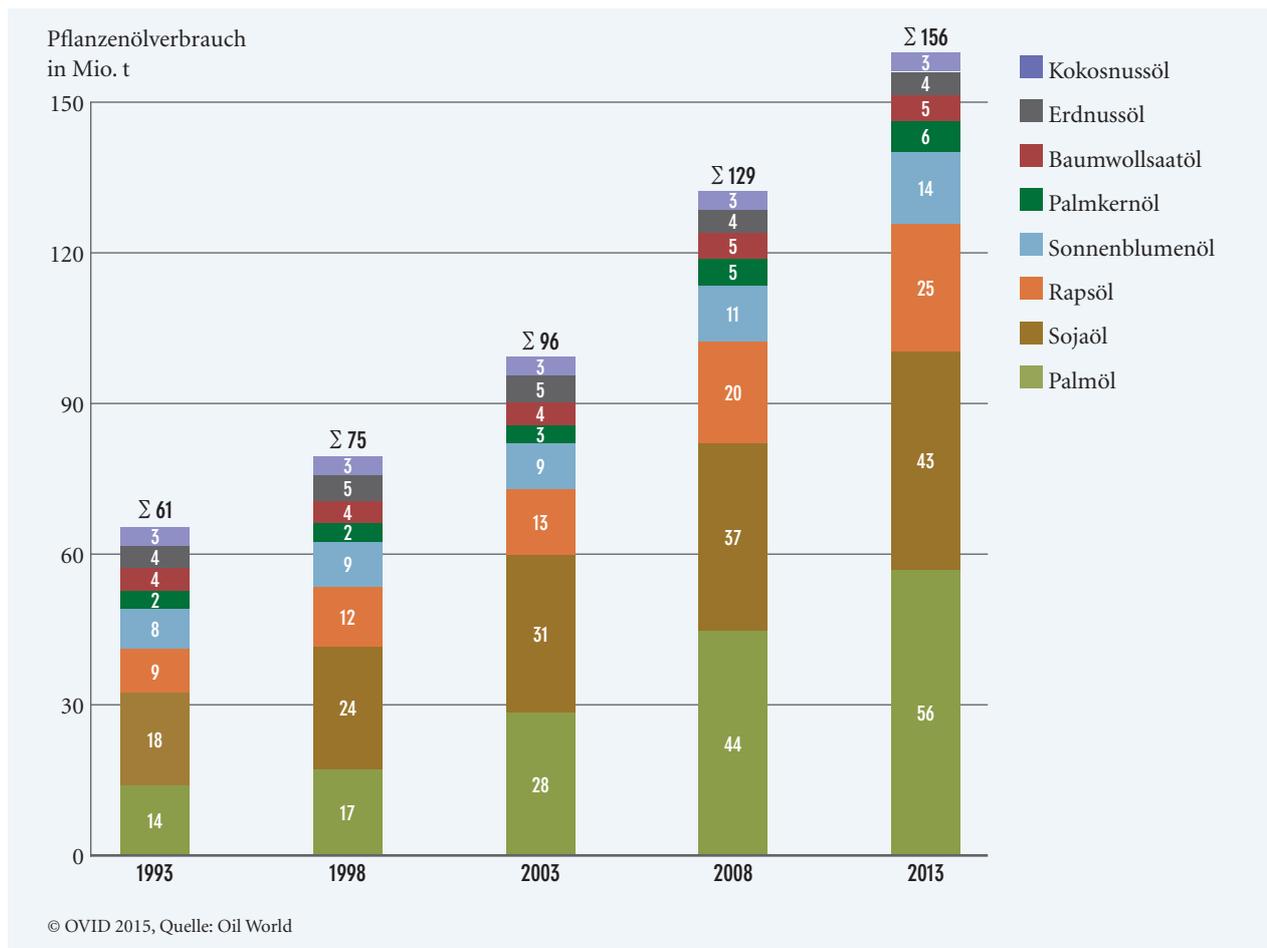


Abbildung 14: Weltweiter Verbrauch von Pflanzenölen<sup>122</sup>

120 OVID Verband der ölsaatenverarbeitenden Industrie in Deutschland e.V.: OVID: Daten & Fakten ölhaltige Pflanzen unter: <http://www.ovid-verband.de/unsere-branche/daten-und-grafiken/>. Online am 05.03.2014.

121 Verband der Ölsaaten verarbeitenden Industrie in Deutschland – OVID.

122 ebd.

Die eingangs genannten Ölpflanzen stellen die dominierende Quelle nachwachsender Rohstoffe für die chemische Industrie und die Biodiesel-Herstellung dar. Sie zeigen die größte Mengensteigerung: In der EU ist der Verbrauch von Speiseölen im Zeitraum von 2002/03 bis 2006/07 mit 12,7 Mio. t pro Jahr in etwa konstant geblieben<sup>123</sup>. In Deutschland hingegen ist die Speiseölnachfrage seit 2008 leicht rückläufig<sup>124</sup>. Die Verwendung von Fetten und Ölen für industrielle Zwecke (stofflich und energetisch) stieg im Vergleichszeitraum von 2002/03 bis 2006/07 hingegen um das Dreifache von 2,5 auf 8,2 Mio. t<sup>125</sup>.

Ölhaltige Rohstoffe für die chemische Industrie können auch aus tierischer Biomasse gewonnen werden. So werden Schlachtabfälle als Rohstoffe für die Produktion von langkettigen Fettsäuren (zum Beispiel Stearinsäure (C<sub>18</sub>)) und ihren Derivaten verwendet. Andere Produkte aus Schlachtabfällen sind Gelatine und Proteine.

### Entwicklung der Agrarwirtschaft für nachwachsende Rohstoffe erster Generation

Für die Produktion öl-, zucker- und stärkehaltiger Pflanzen sind große Landflächen mit ertragreichen Böden erforderlich. In Deutschland hat die Anbaufläche für nachwachsende Rohstoffe seit 1999 stark zugenommen (Abbildung 13). In diesem Zeitraum hat sich die Importabhängigkeit Deutschlands für Agrarprodukte verringert (Abbildung 15).

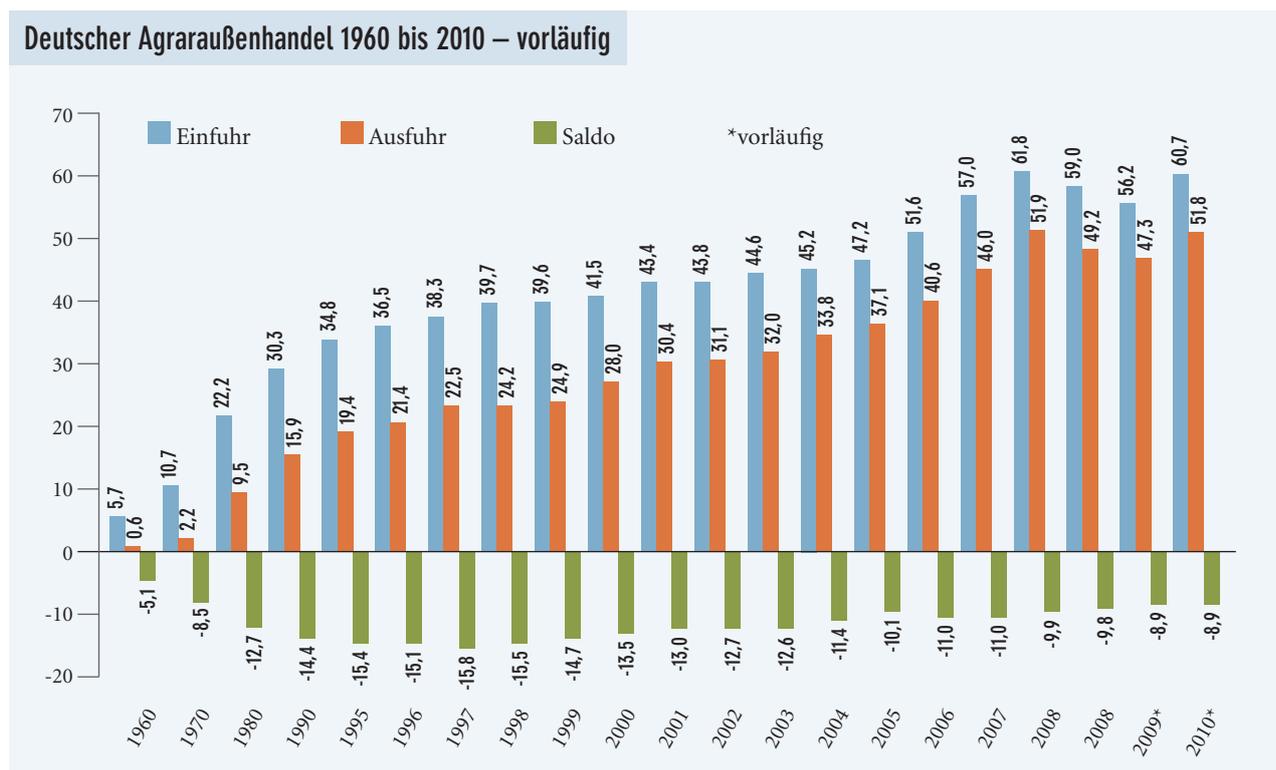


Abbildung 15: Importe und Exporte von landwirtschaftlichen Gütern<sup>126</sup>

Die Preise für Agrarprodukte unterliegen starken Schwankungen (insbesondere auch saisonal). Abbildung 16 kann zum Beispiel die jährliche Preisentwicklung für Zucker und Weizen in den letzten 30 Jahren entnommen werden. Bei der Preisentwicklung für stärke- und zuckerhaltige, nachwach-

123 GDCh; DECHEMA; DGMK; VCI (Hg.): Positionspapier: Rohstoffbasis im Wandel. (2010).

124 Union zur Förderung von Öl- und Proteinpflanzen e.V. (ufop) (Hg.): Geschäftsbericht 2012/2013. (2013).

125 GDCh; DECHEMA; DGMK; VCI (Hg.): Positionspapier: Rohstoffbasis im Wandel. (2010).

126 Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) (Hg.): Deutscher Außenhandel mit Agrar- und Ernährungsgütern 2010- Daten und Fakten. (2011).

sende Rohstoffe spielen Subventionen eine wichtige Rolle. So wird die Landwirtschaft in der EU, den USA und Japan subventioniert.

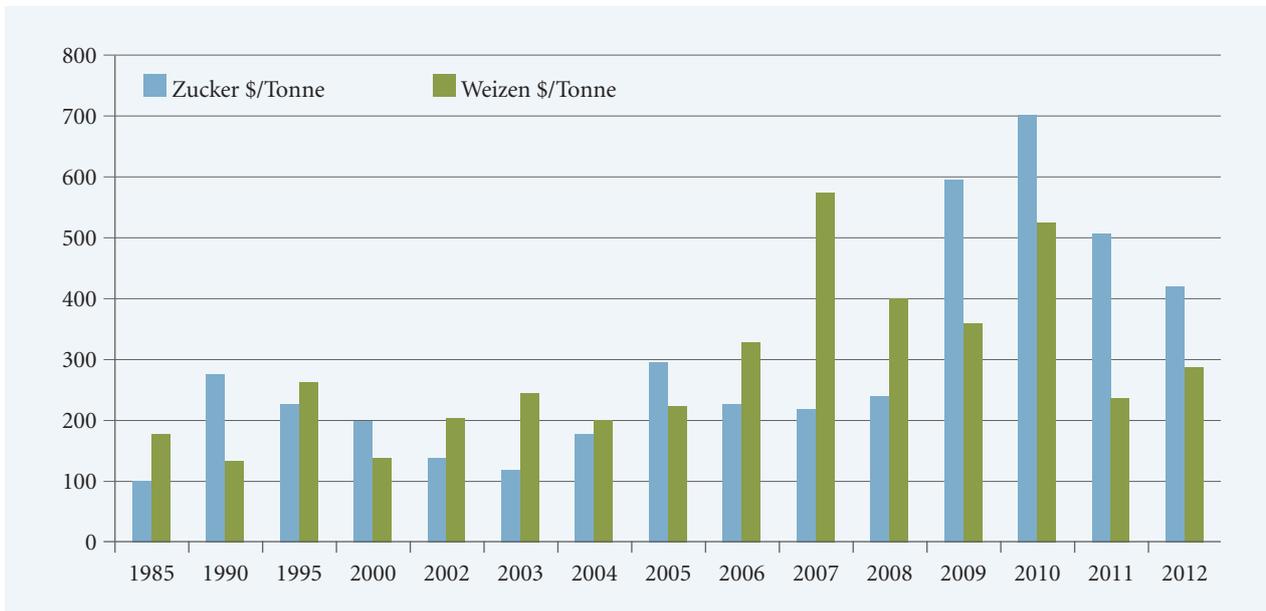


Abbildung 16: Preisentwicklung (Weltmarktpreise) der wichtigen Agrarrohstoffe Zucker und Weizen von 1985 bis 2012 (nicht inflationsbereinigt) in US-Dollar/Tonne<sup>127</sup>

### Reststoffe nachwachsender Rohstoffe erster Generation

Weltweit werden ein Drittel aller Lebensmittel weggeworfen, was sich auf 1,3 Mrd. t summiert. In Europa und Nordamerika belaufen sich die Lebensmittelabfälle auf 95-115 kg pro Jahr und Einwohner. In Deutschland werden Lebensmittel vor allem im Supermarkt und nach dem Kauf weggeworfen, wohingegen in ärmeren Ländern mangelnde Kühlung, Verpackung oder Marketinginstrumente als Ursachen für Lebensmittelabfälle verantwortlich sind.<sup>128</sup>

Darüber hinaus fallen Reststoffe auch bei der landwirtschaftlichen Produktion an, wie folgendes Beispiel zeigt. Kartoffeln sind in Deutschland für die chemische Industrie bereits ein wichtiger Lieferant für Stärke<sup>129</sup>. Sie werden als Lebensmittel starren Qualitätsvorgaben des Einzelhandels unterworfen. Die UN-Welternährungs-organisation (FAO)<sup>130</sup> geht von 20% des Kartoffelernteverlustes im Agrarsektor aus<sup>131</sup>, der auf diese Weise als Nahrungsmittel, Chemie- oder Energierohstoff ungenutzt bleibt. Bei 10,7 Mio. t Kartoffelernte im Jahre 2012 in Deutschland<sup>132</sup> kann von einem Ernterückstand von 2,1 Mio. t Kartoffeln ausgegangen werden.

Bei einem angenommenen Stärkeanteil der Kartoffeln von 20% ist somit ein Potenzial von 0,42 Mio. t Stärke für die Gesamtjahresernte zu erwarten, das biotechnologisch in Ethanol umgewandelt

127 Castelligasse: Antimon Rohstoffmärkte unter: <http://www.castelligasse.at/Politik/Rohstoffmaerkte/rohstoffe.htm> (2014). Online am 04.02.2014.

128 Gustavsson, Jenny; Cederberg, Christel; Sonesson, Ulf: Food + Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (Hg.): Global Food Losses and Food Waste. (2011).

129 GDCh; DECHEMA; DGMK; VCI (Hg.): Positionspapier: Rohstoffbasis im Wandel. (2010).

130 Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen, Food and Agriculture Organization of the United Nations.

131 Gustavsson, Jenny; Cederberg, Christel; Sonesson, Ulf: Food + Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (Hg.): Global Food Losses and Food Waste. (2011).

132 Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV): Besondere Ernte- und Qualitätsermittlung (BEE) 2012 unter: <http://www.bmelv-statistik.de/de/fachstatistiken/besondere-ernteermittlung/> (2013). Online am 12.03.2014.

und wiederum als chemischer Roh- oder Brennstoff verwendet werden kann. Im schlechten Kartoffelerntejahr 2013<sup>133</sup> mit 9,2 Mio. t Ertrag und Ernteabfällen von 1,84 Mio. t entsprach dies einer nicht-genutzten Stärkemasse von 0,37 Mio. t.<sup>134</sup> Ähnliche Berechnungen lassen sich auch für andere Standardlebensmittel anstellen.

Nicht oder anderweitig genutzte Lebensmittel werden als Abfall in Verbrennungsanlagen entsorgt, als Bioabfall kompostiert oder in Biogasanlagen fermentiert. Durch Fermentation können aus 140 kg Großmarktabfällen 15 kg Methangas gewonnen werden. Würden die Obst- und Gemüseabfälle, die innerhalb der EU in der Landwirtschaft und im Einzelhandel anfallen (etwa 30% von etwa 200 Mio. t<sup>135</sup>), auf diese Weise behandelt werden, könnten 21,4 Mio. t Methan für die stoffliche oder energetische Verwertung nutzbar gemacht werden. Dies entspricht in etwa einem Zehntel des in der EU (und Norwegen) verbrauchten Erdgases.<sup>136,137</sup>

Die Gärreste von Biogasanlagen – sofern sie noch ausreichend organische Verbindungen enthalten – können als hydrothermale Kohle einer weiteren chemisch-stofflichen Verwertung zugeführt werden<sup>138</sup>. Fraunhofer UMSICHT forscht an der Optimierung der oben beschriebenen Prozesse und versucht, stoffliche Verwendungsmöglichkeiten zu erschließen.

Eine direkte stoffliche Nutzung von Lebensmittelabfällen ist am ehesten geeignet, wenn die Biomasseart rein anfällt. In Kommunen, in denen keine Biotonne zur Verfügung gestellt wird, fallen die Lebensmittelabfälle nicht direkt biologisch verwertbar an. Im Hausmüll werden sie mit anderen Abfallsorten vermischt. Im Einzelhandel werden Lebensmittelabfälle meist verpackt weggeworfen. Hier fallen sie in einem Mix aus Kunststoffen, Metallen und Cellulose an, was sie für eine Verwertung in Biogasanlagen ohne Vorbehandlung ungeeignet macht. Folglich ist das Potenzial der stofflichen Verwertung stark von sortenreiner Sammlung und Sortierung abhängig, was nur durch Akzeptanz bei Landwirten, Groß- und Einzelhandel sowie Endverbrauchern zu gewährleisten ist.

Nordrhein-Westfalen verfügt über eine hohe Bevölkerungsdichte. Transportkosten von Handel und Endabnehmern zu Biogasanlagen sind somit gering. Derzeit verfügen 358 von 396 Gemeinden in Nordrhein-Westfalen über eine Biotonne. Nach der Abfallverordnung ist ab 2015 die Getrennterfassung für alle verpflichtend<sup>139</sup>. Große Städte wie Düsseldorf, Duisburg und Gelsenkirchen werden dann angeschlossen sein<sup>140</sup>. 2,3 Mio. Einwohner in Nordrhein-Westfalen haben derzeit kein Nutzungsangebot für die Biotonne<sup>141</sup>.

133 Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL): Kartoffelernte 2013 – Vorläufige Daten zu Anbauflächen, Hektarerträgen und Erntemengen unter: [http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Landwirtschaft/Markt-Statistik/Kartoffelernte2013.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Landwirtschaft/Markt-Statistik/Kartoffelernte2013.pdf?__blob=publicationFile) (2012).

134 Eigene Berechnungen.

135 Gustavsson, Jenny; Cederberg, Christel; Sonesson, Ulf: Food + Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (Hg.): Global Food Losses and Food Waste. (2011).

136 Methandichte: 0,72 g/l.

137 Götz, Roland: Deutsches Institut für Internationale Politik und Sicherheit (Hg.): Diskussionspapier – Der künftige Erdgasbedarf Europas. (2007).

138 Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI); Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits-, und Energietechnik (UMSICHT) (Hg.): Biokohle – Hydrothermale Carbonisierung von Biomasse. (2013).

139 Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch § 44 Absatz 4 des Gesetzes vom 22. Mai 2013 (BGBl. I S. 1324) geändert worden ist.

140 Reppold, Vera: Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz (MKULNV) (Hg.): Abfallbilanz Nordrhein-Westfalen für Siedlungsabfälle 2010/2011. (2011), S. 47.

141 ebd., S. 47.

#### II.1.1.4.2 Nachwachsende Rohstoffe zweiter Generation

Die Biomassenutzung zweiter Generation basiert auf cellulosehaltigen Rohstoffen. Cellulose ist eine wichtige Gerüstsubstanz von Pflanzen und besteht wie Stärke aus Glucoseketten. Wichtigster Vertreter ist Holz, das durch die Forstwirtschaft in großer Menge zur Verfügung gestellt wird. Im Jahre 2011 wurden 3,7 Mio. m<sup>3</sup> Holz nach Deutschland importiert, 7,7 Mio m<sup>3</sup> wurden exportiert<sup>142</sup>. Deutschland ist damit der größte Holzproduzent Europas. Die Holzpreise sind seit den 1950er Jahren moderat gestiegen; erst der Ausbau erneuerbarer Energiegewinnung führte zu einem Preisanstieg, der über der Inflationsrate lag<sup>143</sup>.

Holzige Substanz besteht zu einem großen Teil aus Lignin und Cellulose (Lignocellulose). Holz kann energetisch, für bauliche Anwendungen, für die Papierproduktion, aber auch als Grundstoff für die chemische Industrie genutzt werden. Für die stoffliche Nutzung ist vor allem Cellulose von Interesse. Es wird als Chemierohstoff zur Herstellung von Nitrocellulose (Schießbaumwolle) und Celluloseacetat eingesetzt. Darüber hinaus kann es zu Glucose abgebaut werden und so Eingang in die chemischen Wertschöpfungsketten finden.

Zur Cellulose- bzw. Papierherstellung wird der Ligninanteil abgetrennt und fällt als Nebenprodukt an. Technisch wird Lignin heute im Wesentlichen energetisch und nur in geringen Mengen als Rohstoff stofflich genutzt. Es kann als Grundstoff für Harze, Kleb- und Kunststoffe<sup>144</sup> (vgl. Kapitel II.2.2.2) oder als Rohstoff für Bioraffinerien (vgl. Kapitel III.4) verwendet werden. Lignin findet in der chemischen Synthese des Aromastoffs Vanillin Verwendung. Mittels Pyrolyse kann es zu Methan, Phenolen, Kohlenmonoxid, Benzol, Ethylen und Acetylen umgewandelt werden<sup>145</sup>. In Entwicklung sind Verfahren, um aus Lignin Kohlefasern zu produzieren<sup>146</sup>. Allerdings ist der biologische und chemische Holzaufschluss zur Abtrennung technisch aufwändig, was die Wirtschaftlichkeit beeinträchtigt.

Tabelle 11: Holznutzung 2011 in Mio. m<sup>3</sup> <sup>147</sup>

	stofflich	energetisch	insg.
Welt	1.578	1.891	3.469
Europa	524	162	686
Deutschland	45	11	56

Cellulose und Lignocellulose fallen auch in Form von Park-, Agrar- und Gartenabfällen der Biotop- und Landschaftspflege in großen Mengen an<sup>148</sup>, die heute in Deutschland überwiegend kompostiert werden.

142 Food + Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (Hg.): FAO Statistical Yearbook 2013- World food and agriculture. (2013).

143 Schulte, Andreas: Wald in Nordrhein-Westfalen. Aschendorff (2003). ISBN 978-3-402064-81-8.

144 Bischoff, Roland: Gemüse im Tank/Bioabfälle und Holzspäne ersetzen Erdöl. In: Bild der Wissenschaft Plus (2014), 1, S. 10–14.

145 Schobert, Harold H.: Chemistry of fossil fuels and biofuels. Cambridge Univ. Press (2013). ISBN 978-0-521114-00-4.

146 Kamm, Birgit; Kamm, Michael; Hirth, Thomas; et al.: Lignocellulose-based Chemical Products and Product Family Trees. In: Biorefineries – industrial processes and products: status quo and future directions (2006).

147 Food + Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (Hg.): FAO Statistical Yearbook 2013- World food and agriculture. (2013).

148 Vogt, Regine et al.: Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu); Öko-Institut für angewandte Ökologie (Hg.): Beitrag der Abfallwirtschaft zur nachhaltigen Entwicklung in Deutschland. (2006).

### II.1.1.4.3 Nachwachsende Rohstoffe dritter Generation

Biomasse der dritten Generation umfasst Algen aus Hydrokulturen in offenen Algenfarmen oder geschlossenen lichtdurchlässigen Reaktoren. Ein wesentlicher Vorteil von Algen als Biomasseproduzent ist – aufgrund hoher Wachstumsraten – eine 5-10-mal höhere Biomasseproduktivität verglichen mit Landpflanzen. Entsprechend Tabelle 10 weisen Mikroalgen, die in Becken und Reaktoren gezüchtet werden, höhere Trockenmassenerträge, Energiedichte und gebundenes CO<sub>2</sub> pro Hektar und Jahr auf als Biomasse erster und zweiter Generation.

Dem steht jedoch ein hoher Aufwand bei der Entwässerung zur Trockenmassengewinnung gegenüber. Algen nutzen ebenso wie Landpflanzen Kohlendioxid als Kohlenstoffquelle, bieten allerdings den Vorteil, dass hierzu auch Abgase genutzt werden können. Auch diese Option wird in der Versuchsanlage Niederaußem bereits angewendet. Den geringen Anforderungen von Algenkultivierung an Phosphor- und Stickstoffzufuhr steht ein hoher Aufwand an Temperaturregulierung gegenüber.

Die Algenproduktion ist vor allem in warmen Regionen mit hohem Lichteinfall ergiebig<sup>149</sup>, wobei sich dann der Kühlaufwand vergrößert, um optimale Wachstumstemperaturen für eine hohe Produktivität einstellen zu können. Da Algenkulturen auch in Salzwasser angelegt werden können, sind auch küstennahe Wüstenregionen als Produktionsstandorte denkbar.

Algen können im Gegensatz zu Landpflanzen bei ausreichender Lichtmenge ganzjährig geerntet werden und sind nicht an landwirtschaftliche Fläche gebunden<sup>150</sup>. Die für die ergiebige Produktion von Algen benötigte Fläche wird als sehr groß eingeschätzt<sup>151</sup>.

Die gesamte Algenbiomasse mit den Inhaltsstoffen Terpenen, Aromaten, Lipiden, Kohlenhydraten, Farbstoffen, Vitaminen, Proteinen, Antioxidantien etc.<sup>152</sup> kann genutzt werden<sup>153</sup>. Darüber hinaus sind Algen, im Gegensatz zu nachwachsenden Rohstoffen der zweiten Generation, frei von Lignin. In Algenfarmen fällt jedoch überwiegend das Kohlenhydrat Alginat an, das für die üblichen Labororganismen wie z.B. Bierhefe unverdaulich ist und somit nicht mit den technischen Standardmikroorganismen und den daraus gewonnenen Enzymen fermentiert werden kann<sup>154</sup>. Es kann allerdings als Eindicker und Stabilisator in Nahrungsmitteln, in der Textilindustrie und für die Verkapselung von Medikamenten stofflich genutzt werden<sup>155</sup>. Mithilfe erbgutmodifizierter Bakterien konnte ein biotechnologischer Weg aufgezeigt werden, um Alginat direkt in Ethanol zu überführen<sup>156</sup>.

---

149 Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina – Nationale Akademie der Wissenschaften – (Hg.): Bioenergy – Chances and Limits. (2012).

150 Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik (IGB) (Hg.): Algen – Nachhaltige Rohstoffquelle für Werkstoffe und Energie. (2012).

151 ebd.; Michael Groß: Biosprit aus Algen? In: Nachrichten aus der Chemie (2013), 10, S. 1035–1036.

152 Letcher, T. M.; Scott, J. L.; Peter, L.: Materials for a Sustainable Future. Royal Society of Chemistry (2012). ISBN 978-1-849734-07-3, S. 215 ff.

153 Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik (IGB) (Hg.): Algen – Nachhaltige Rohstoffquelle für Werkstoffe und Energie. (2012).

154 ebd.

155 Renneberg, R.; Süßbier, D.; Berkling, V.: Biotechnologie für Einsteiger. Spektrum Akademischer Verlag (2012). ISBN 978-3-827430-47-2.

156 Savage, Philip: Algae Under Pressure and in Hot Water. In: Science (2012), 6110, S. 1039–1040.

### II.1.1.5 Kohlendioxid

Kohlendioxid ist eine gasförmige, anorganische Kohlenstoffverbindung. Da es neue Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten gibt, Kohlendioxid zur Gewinnung von C1-Kohlenstoffen und künftig ggf. von höherwertigen Chemikalien zu nutzen und es Pflanzen und Algen mittels Photosynthese als Kohlenstoffquelle dient, wird Kohlendioxid hier im Kapitel als organischer Rohstoff behandelt.

Kohlendioxidmoleküle werden von infraroter Strahlung zu Wärmeschwingung angeregt, weswegen eine erhöhte atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration eine gemittelte Temperaturerhöhung (Klimawandel) zufolge hat. Weiterhin besitzt CO<sub>2</sub> als Endprodukt vieler Prozesse einen geringen Energiegehalt, so dass es zur stofflichen Nutzung mit hohem Energiebedarf aktiviert werden muss.

Kohlenstoffdioxid ist ein Gas, das von Natur aus in geringen Konzentrationen in der Atmosphäre vorkommt. In größeren Mengen entsteht es durch z.B. Verbrennungs- und Fermentationsprozesse. Die weltweite anthropogene Emission betrug im Jahr 2011 34.000 Mio. t<sup>157</sup>. Deutschland verursa- che dazu einen Anteil von etwa 800 Mio. t<sup>158</sup>, NRW einen von 283 Mio. t<sup>159</sup> bei. Hauptemittenten sind die Energieproduktion (45%), der Transportbereich (24%), Stahlwerke (6%), Zement- und Kalkfabriken (4%), sowie chemische Prozesse (2%), bei denen CO<sub>2</sub> als Abfallprodukt anfällt<sup>160</sup>. In der chemischen Industrie wird CO<sub>2</sub> vor allem bei der Ammoniak- oder Ethylenoxidproduktion freigesetzt.

Kohlendioxid findet als Kohlensäure, als Reinigungs-, Desinfektions-, als Kühl- und Kältemittel, bei der Produktion von Harnstoff, Methanol, dem Arzneiwirkstoff Acetylsalicylsäure sowie als Extrakti- onsmittel für z.B. Koffein und in Feuerlöschern Verwendung<sup>161,162</sup>. Die derzeitige stoffliche Nutzung von CO<sub>2</sub> weltweit wird auf 178 Mio. t pro Jahr geschätzt, was einem Anteil an den anthropogenen Emissionen von 0,6% entspricht.<sup>163</sup>

CO<sub>2</sub>-Moleküle sind sehr stabil. CO<sub>2</sub> für die Synthese als C1-Quelle zu nutzen ist energieintensiv. Die stoffliche Umsetzung wird durch reaktive Reaktionspartner oder hohe Energiezugabe möglich<sup>164,165</sup>. Die Hürde für die stoffliche Nutzung von Kohlendioxid ist der geringe Energiegehalt seiner Mole- küle. Geeignete Katalysatoren helfen die Wirtschaftlichkeit der stofflichen Umsetzung von Kohlen- dioxid zu verbessern. Die Reinheit des Gases zum Einsatz in der chemischen Industrie stellt eine weitere wichtige Anforderung dar. Neuere Verfahren nutzen CO<sub>2</sub> als C1-Baustein, u.a. auch für die Produktion von Kunststoffen<sup>166</sup>. Forschungsaktivitäten einer Reihe von Hochschulen und Unterneh- men konzentrieren sich darauf, effiziente chemische und biologische Verfahren der CO<sub>2</sub>-Nutzung

157 Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien (IWR): Klima: Weltweiter CO<sub>2</sub>-Ausstoß steigt 2012 um 1,3% auf neu- en Rekordwert unter: <http://www.iwr.de/news.php?id=24965> (2011). Online am 18.03.2014.

158 Umweltbundesamt (UBA) (Hg.): Treibhausgasausstoß in Deutschland 2012 – vorläufige Zahlen aufgrund erster Berechnungen und Schätzungen des Umweltbundesamtes. (2013), S. 3.

159 Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW) (Hg.): Treibhausgas-Emissionsin- ventar Nordrhein-Westfalen 2011. (2013).

160 GDCh; DECHEMA; DGMK; VCI (Hg.): Positionspapier: Rohstoffbasis im Wandel. (2010).

161 Bayer Technology Services GmbH; Peters, Martina: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Rohstoffsituation – Schwerpunkt Rohstoffeffizienz und Rohstoffsubstitution“ der Enquete Kommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2013).

162 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Hg.): Climate Change 2007: The Physical Science BasisSummary for Policymakers. (2007).

163 ebd.

164 ebd.

165 GDCh; DECHEMA; DGMK; VCI (Hg.): Positionspapier: Rohstoffbasis im Wandel. (2010).

166 Budzinski, Adalbert: Kunststoffe aus CO<sub>2</sub> – wird die Traumreaktion bald Realität. In: Chemische Rundschau – Chemie Plus (2011), 03, S. 26–28, S. 26 ff.

zu entwickeln. Näheres zum Entwicklungsstand bei der Umsetzung und Nutzung von Kohlendioxid wird in den Berichtsteilen III.1.1.2, III.1.1.3 und III.3.4.3 sowie III.4.4.2 dargelegt.

### II.1.1.6 Synthesegas

Synthesegas ist ein wichtiges Ausgangsstoffgemisch für Synthesereaktionen in der chemischen Industrie, das aus den Komponenten Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H<sub>2</sub>) besteht. Synthesegas wird heute hauptsächlich aus Erdgas hergestellt und auch bei der Stahlproduktion freigesetzt. Es kann flexibel zur Synthese verschiedenster organischer Verbindungen wie z.B. von Ammoniak, Methanol, Aldehyden aus Alkenen (Oxosynthese) und benzinähnlichen Alkanen (Fischer-Tropsch-Synthese) verwendet werden.

Beide Komponenten des Synthesegases können aus organischen Rohstoffen, erneuerbaren wie nicht erneuerbaren, gewonnen werden. Bei ihrer Umsetzung zu Synthesegas ist die Verfügbarkeit von Wasserstoff der limitierende Faktor. Die Zugabe von Wasserstoff kann dazu dienen, das stöchiometrische Verhältnis von CO und H<sub>2</sub> im Synthesegasgemisch demjenigen des zu synthetisierenden Produkts anzupassen.

### II.1.1.7 Wasserstoff

Wasserstoff ist wegen des Einsatzes als Teil des Synthesegases und bei der Nutzung von kohlenstoffreichen Rohstoffen als H-Quelle ein wichtiger Chemierohstoff. Er fällt in vielen chemischen Reaktionen als Nebenprodukt an und kann unter Wärmerückgewinnung verbrannt werden. Auch in Brennstoffzellen wird er als Einsatzstoff verwendet. Die Oxidation von Wasserstoff setzt dabei sehr viel Energie frei und als Reaktionsprodukt entsteht nur Wasser.

Als Wasserstoffquellen kommen folgende Verfahren infrage<sup>167</sup>:

- Dampfreformierung,
- Chloralkalielektrolyse,
- Spaltung von Wasser,
- Dehydrierungsprozesse,
- Fermentation aus Biomasse,
- Methanspaltung.

Derzeit werden jährlich etwa 50 Mio. t Wasserstoff produziert, wofür 2% des weltweiten Energiebedarfs gebraucht werden<sup>168</sup>. Bei den klimaschonenden Verfahren der Wasserstoffherstellung gibt es noch ein Verbesserungspotenzial, das jedoch noch großen Forschungsanstrengungen bedarf (vgl. Kapitel IV.3.5).

## II.1.2 Anorganische Rohstoffe

Anorganische Rohstoffe sind neben den organischen Rohstoffen die zweite wesentliche Rohstoffgruppe in der chemischen Industrie. Anorganische Rohstoffe sind überwiegend Minerale und Metalle. Anders als die organischen Rohstoffe, die als Kohlenstofflieferanten die zentrale Rolle für die gesamte chemische Wertschöpfungskette haben, sind die Anorganika nur für bestimmte Teile dieser Wertschöpfungskette bedeutsam. Nachfolgend werden beispielhaft solche Anorganika betrachtet, die entweder in großen Mengen von der chemischen Industrie gebraucht werden oder eine besondere strategische Bedeutung haben.

167 GDCh; DECHEMA; DGMK; VCI (Hg.): Positionspapier: Rohstoffbasis im Wandel. (2010).

168 ebd.

### II.1.2.1 Anorganische Rohstoffe mit mengenmäßiger Bedeutung

In diesem Abschnitt werden anorganische Rohstoffe behandelt, die durch ihren mengenmäßig großen Anteil am Rohstoffmix für die chemische Industrie bedeutend sind. Es werden beispielhaft beleuchtet:

- Stein- und Kalisalz
- Phosphatgestein
- Flussspat
- Schwefel.

#### II.1.2.1.1 Stein- und Kalisalz

Steinsalz dient als Rohstoff für die Herstellung von Kochsalz und für die Produktion von Chlor, Natronlauge und Soda mittels Elektrolyse (Abbildung 17). Chlor ist ein Grundbaustein der chlorchemischen Wertschöpfungskette, die eine Vielzahl von Produkten wie Kunststoffe, Desinfektionsmittel, Pestizide, Arzneimittel etc. enthält. Mengenmäßig wichtigstes Produkt, das aus Chlor und Ethylen hergestellt wird, ist der Kunststoff Polyvinylchlorid. Die bei der Elektrolyse des Kochsalzes anfallende Natronlauge reagiert stark basisch und kann somit eingesetzt werden, um pH-Bedingungen, die Reaktionen benötigen, einzustellen. Natronlauge ist ein wichtiges Aufschluss-, Abbeiz-, Neutralisierungs- und Reinigungsmittel. Soda findet als Backtriebmittel, Trägerstoff und Säureregulator Verwendung. Die chemische Industrie setzt Soda außerdem zur Herstellung einer vielfältigen Produktpalette von Bleichmitteln, Chromaten, Füllstoffen, Farben etc. ein.

Kalisalz besteht hauptsächlich aus Kaliumchlorid und wird vor allem als wichtiger Mineraldünger eingesetzt. In Deutschland gibt es große Vorkommen von beiden Salzen (vgl. Abbildung 1). Die Kalisalzförderung betrug im Jahr 2010 rund 3 Mio. t. Im gleichen Jahr wurden ca. 19 Mio. t Steinsalz gewonnen. Deutschland ist mit einem Anteil von 40% an der europäischen Salzgewinnung der größte Salzhersteller Europas. Es ist bezogen auf Stein- und Kalisalz Selbstversorger und Nettoexporteur.

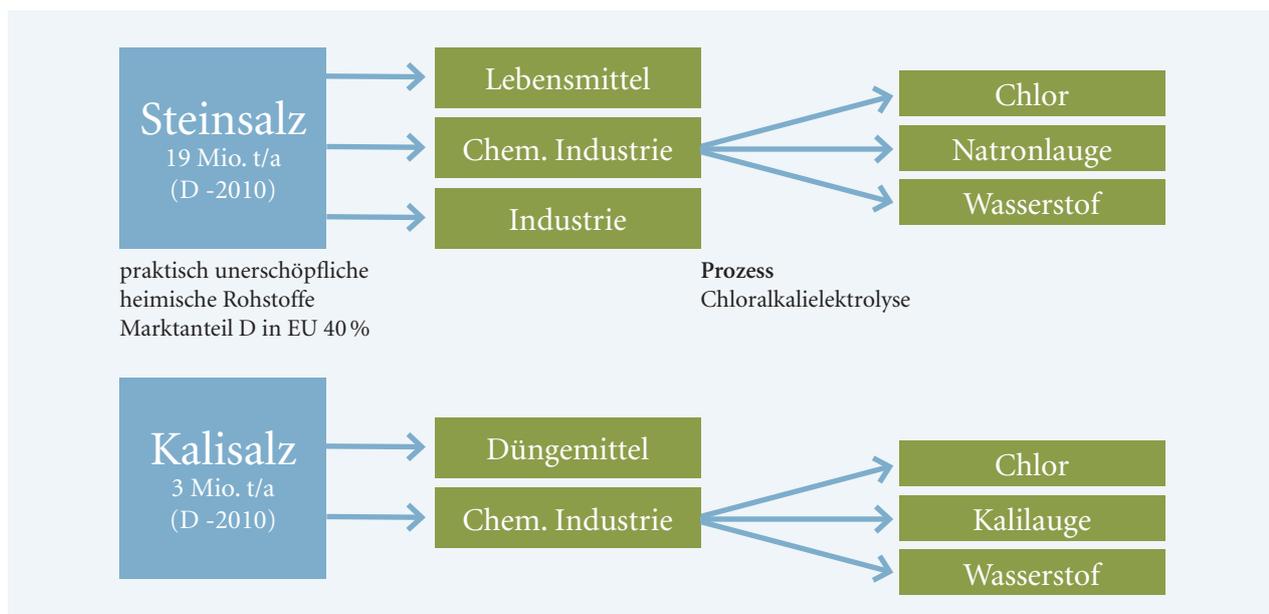


Abbildung 17: Gewinnung von Koch- und Kalisalz und Verwendung<sup>169</sup>

169 Eigene Darstellung nach Vereinigung Rohstoffe und Bergbau e.V. (VRB): Fakten und Zahlen: Der Beitrag der Rohstoffindustrie zur Gesamtwirtschaftlichen Wertschöpfung unter: <http://www.v-r-b.de/pages/layout1sp.php?idpage=15> (2014).

### II.1.2.1.2 Phosphat

Rohstoffe für die Herstellung von elementarem Phosphor und Phosphorverbindungen sind Phosphatminerale. Die wesentlichen Vorkommen liegen in Marokko und der Westsahara, dem südlichen Mittelmeerraum, in den USA, China, Jordanien, Russland, Südafrika und Syrien. Die Reserven dieser Erzeugerländer werden mit 67 Mrd. t angegeben<sup>170</sup>. Etwa 77% der globalen Reserven liegen in politisch unsicheren Gebieten, was ein erhöhtes Lieferrisiko bedeutet. Die Weltproduktion an Phosphaten betrug 2010 176 Mio. t. Die statische Reichweite beträgt mehr als 350 Jahre. Vulkanisches Phosphaterz enthält Schwermetalle. Phosphate fallen in großem Maße im Abwasser und im Tiermehl an. Mehr als 80% des Phosphats wird zu Düngemitteln verarbeitet; es ist essenziell für die Landwirtschaft. Ein weiteres wichtiges Phosphorprodukt ist die Phosphorsäure. Aus einem kleineren Teil wird elementarer Phosphor hergestellt, der Ausgangsmaterial für Organophosphorverbindungen ist.

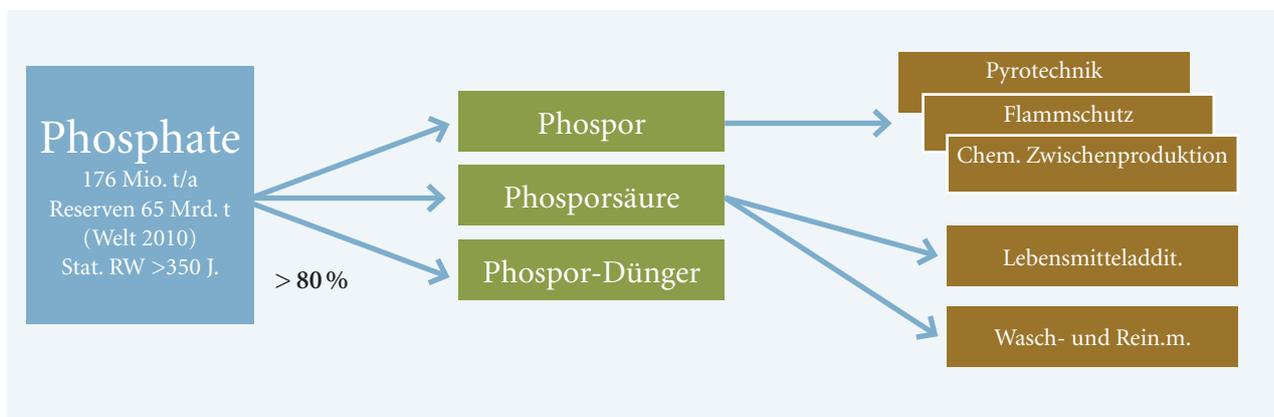


Abbildung 18: Phosphatgewinnung und Verwendung<sup>171</sup>

Mineralische Phosphate werden in der chemischen Industrie zu Phosphor oder Phosphorsäure weiterverarbeitet. Phosphor findet z.B. Verwendung in der Pyrotechnik, als Flammschutzmittel oder als chemisches Zwischenprodukt; Phosphorsäure als Lebensmitteladditiv oder in Wasch- und Reinigungsmitteln (vgl. Abbildung 18). Wegen der großen Bedeutung von Phosphat als Düngemittel schwankt der Preis von Phosphor mineralien mit denen von Agrarprodukten. Er stieg im Zeitraum von 2003 bis 2013 um ca. 300%<sup>172</sup>.

### II.1.2.1.3 Flussspat/Calciumfluorid

Fluor und Fluorverbindungen werden aus dem natürlichen Mineral Flussspat gewonnen, das im Wesentlichen aus Calciumfluorid ( $\text{CaF}_2$ ) besteht. Fluor kann zur Oberflächenbehandlung von Kunststoffen, als Grundstoff für Trockenschmiermittel, Elektrodenmaterial oder die Glaskeramikproduktion genutzt werden. Außerdem wird Flusssäure zur Uranverarbeitung eingesetzt. Bei der Metallverhüttung wird Flussspat/Calciumfluorid als Flussmittel zum Schmelzen der Schlacken genutzt. Weitere Anwendungen sind die Glas- und Emaille-Herstellung. Die Flussspat-Weltproduktion betrug 2010 rund 5,4 Mio. t. Die weltweiten Reserven liegen bei 230 Mio. t. Die Weltressourcen werden auf 500 Mio. t geschätzt<sup>173</sup>.

170 Jasinski, Stephen M.: U.S. Geological Survey (Hg.): Phosphate Rock. (2013).

171 Eigene Darstellung nach U.S. Geological Survey: Phosphate Rock – Statistics and Information unter: [http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate\\_rock/](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/) (2015). Online am 24.02.2015.

172 index mundi: Phosphate Rock unter: [http://www.indexmundi.com/en/commodities/minerals/phosphate\\_rock/](http://www.indexmundi.com/en/commodities/minerals/phosphate_rock/) (2009-2010). Online am 24.03.2014.

173 United States Geological Survey, Mineral Industry Surveys – Fluorspar in the second quarter 2011, 2011.

Weitere Ressourcen mit einem Mengenäquivalent von knapp 1,3 Mrd. t Flussspat sind in Phosphat-Vorkommen enthalten. Reserven und Ressourcen sind über den gesamten Globus verteilt. Die Hauptförderländer sind heute China, Mexiko, die Mongolei, Russland, Südafrika und Namibia. Größere europäische Vorkommen befinden sich in Spanien, Frankreich und Russland. In Deutschland wird ebenfalls Flussspat gewonnen. Der Importanteil beträgt hier 83%.

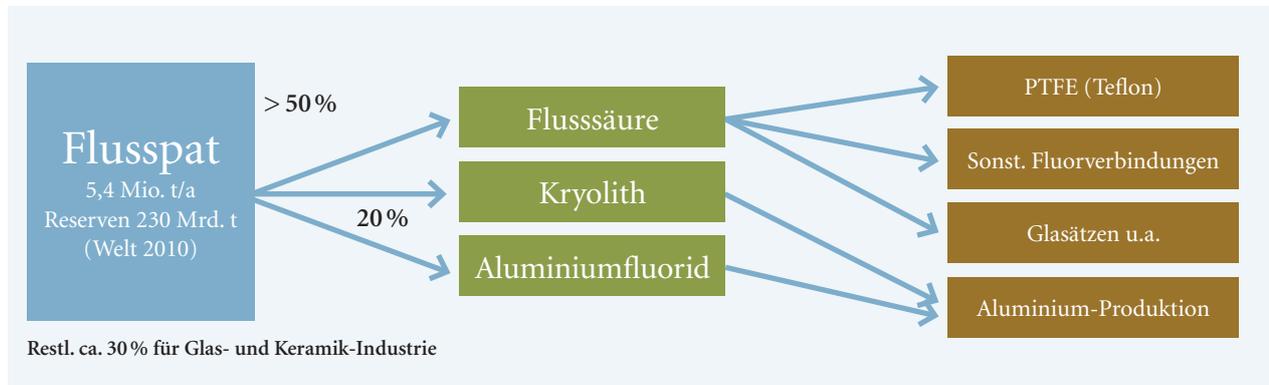


Abbildung 19: Flussspat – Gewinnung und Verwendung<sup>174</sup>

#### II.1.2.1.4 Schwefel

Natürliches Erdöl enthält ca. 0,5 bis 5% Schwefel, das bei Verwendung der Ölprodukte als Kraftfahrzeugtreibstoff und Heizöl zu unerwünschten Schwefeldioxid-Emissionen führen würde und daher vorab in den Raffinerieprozessen aus den Erdölprodukten entfernt wird. Die dabei anfallende Schwefelmenge deckt zurzeit den gesamten Bedarf an Schwefelrohstoff zur Herstellung von Schwefelsäure und anderen schwefelhaltigen Produkten. Darunter fällt die Herstellung von Oleum. Die Schwefelverbindungen sind wichtige anorganische Grundchemikalien.

#### II.1.2.2 Strategische anorganische Rohstoffe

Als strategische anorganische Rohstoffe werden hier Stoffe betrachtet, die für die chemische Industrie als Katalysatoren, wichtige Additive, als Behälterwerkstoffe und Legierungsbestandteile dafür oder technologisch wichtig sind. Daneben werden die strategischen Grundstoffe der Initiative der Europäischen Union (EU) kurz beschrieben. Weitere Programme gibt es von der Bundesregierung unter Führung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung mit dem Forschungs- und Entwicklungsprogramm für neue Rohstofftechnologien<sup>175</sup>, bei dem der künftige Bedarf wirtschaftsstrategischer Rohstofftechnologien der Hightech-Industrie in Deutschland analysiert wird.

Anfang 2011 hat die EU die Versorgungssicherheit bei 14 Rohstoffen als kritisch eingestuft: Antimon, Beryllium, Gallium, Germanium, Graphit, Indium, Magnesium, Kobalt, Niob, Calciumfluorid, Platinmetalle, Seltene Erden, Tantal, Wolfram<sup>176</sup>. Als Kriterium diente die Einschätzung, dass viele Staaten bei den strategischen Rohmaterialien in hohem Maße importabhängig sind und sich ein Teil der Exporteure in politisch krisenanfälligen Regionen befindet. Die strategischen Rohstoffe sind für Innovationen in Hochtechnologie unerlässlich.

<sup>174</sup> Eigene Darstellung nach U.S. Geological Survey: Fluorspar – Statistics and Information unter: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/fluorspar/> (2015). Online am 24.02.2015.

<sup>175</sup> Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Hg.): Wirtschaftsstrategische Rohstoffe für den Hightech-Standort Deutschland. (2012).

<sup>176</sup> Europäische Kommission (Hg.): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen – Grundstoffmärkte und Rohstoffe: Herausforderungen und Lösungsansätze. (2011)

Ein Teil dieser Rohstoffe ist auch für den wirtschaftlichen Erfolg der chemischen Industrie wichtig. Diese Rohstoffe wurden hinsichtlich ihrer Verfügbarkeit, ihrer Substitutionsmöglichkeiten und Preisentwicklungen analysiert. Das Ergebnis wird hier nach Gruppen von Stoffen zusammengefasst.

#### II.1.2.2.1 Legierungsbestandteile und Werkstoffe

Wolfram, Beryllium, Kobalt und Niob sind wichtige Legierungsbestandteile, die teilweise schon in sehr geringen Konzentrationen zu einer wesentlichen Eigenschaftssteigerung der Werkstoffe führen. Alle Stoffe sind zwar durch andere substituierbar, die Substitute haben jedoch oft eine geringere Wirkung. So ist Naturgraphit ein beständiger Werkstoff für chemische Apparate, kann durch andere Werkstoffe mit weniger günstigen Eigenschaften ersetzt werden. Magnesium ist ein metallischer Werkstoff für die Leichtbauweise. Der Rohstoff für die Magnesiumherstellung ist überall verfügbar, die weltweiten Produktionskapazitäten sind aber mit einem Anteil von 85% in China konzentriert. Magnesium als Legierungsbestandteil ist durch andere Metalle substituierbar. Preisschwankungen und hohe Preise haben wegen der geringen Konzentrationen der Legierungsbestandteile meistens nur einen geringen Einfluss auf den Preis des Endprodukts.

#### II.1.2.2.2 Katalysatoren

Wichtige Katalysator-Metalle sind Antimon (Polyester-Herstellung) und Antimonsulfid (für Vulkanisation), Platinmetalle und Rhenium. Alle Katalysatoren sind durch andere substituierbar, die Platinmetalle untereinander und z.T. durch andere Elemente. Rhenium (als Nichtplatinmetall) wird hauptsächlich als Katalysator in Erdölreformier- und Crackprozessen sowie als Fischer-Tropsch-Katalysator eingesetzt. Es ist selten und teuer, aber nicht knapp.

Ein wichtiges Flammenschutzmittel-Additiv im System mit organischen Bromverbindungen für Kunststoffe, insbesondere für Polybutylenterephthalat, ist Antimontrioxid, das ausreichend verfügbar ist, jedoch mit einem Anteil von über 85% aus China stammt.

#### II.1.2.2.3 Technologisch wichtige Stoffe

Technologisch wichtige Stoffe für elektronische Bausteine vieler Geräte der Informationstechnologie und Unterhaltungselektronik sind Gallium, Germanium, Indium und Tantal. Fast alle Stoffe sind durch andere oder technologisch substituierbar.

#### II.1.2.2.4 Lithium für die Stromspeicherung

Lithium wird seit Mitte der 2000er Jahre hauptsächlich für Batterien und Akkumulatoren verwendet. Ein deutlich steigender Bedarf wird mit Zunahme der Hybridfahrzeuge und der Elektromobilität erwartet. Sein Anteil an der Erdkruste beträgt lediglich 0,006%. Wegen der erwarteten hohen Nachfrage gibt es zurzeit umfangreiche Explorationen. Der maximale Li-Gehalt in den Salzseen mit Abbaupotenzial in Bolivien, Chile, Argentinien und Brasilien beträgt 0,16%. Die Reichweite wird bis zum Jahr 2100 geschätzt<sup>177</sup>. Neben den südamerikanischen Salzseen liegen wirtschaftlich abbaubare Vorkommen in drei Salzseen im Himalaya-Gebirge (China-Tibet). In Chile werden derzeit ca. 45.000 t pro Jahr als Lithiumcarbonat gewonnen, das entspricht nahezu der halben Weltproduktion. Weitere Lithium-Vorkommen in der Größenordnung der bolivianischen werden in Afghanistan vermutet<sup>178</sup>. Eine Lagerstätte mit rund 18 Mio. t und einem Lithiumgehalt von 1,6%, dem größten Vorkommen in Europa, befindet sich auf der Koralm in Österreich<sup>179</sup>. In Südamerika liegen die Ab-

177 FfE Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.: Reichweitenabschätzung der Lithiumvorkommen unter: <http://www.ffe.de/die-themen/ressourcen-und-klimaschutz/298-reichweitenabschaetzung-der-lithiumvorkommen> (2010). Online am 24.03.2014.

178 Rohstoffe mit Billionen-Wert in Afghanistan entdeckt. In: Die WELT (2010).

179 Österreichischer Rundfunk: Bald «Lithium»-Abbau auf der Koralm? unter: <http://ktnv1.orf.at/stories/498485> (2012). Online am 24.03.2014.

baukosten von Lithiumcarbonat zwischen 2.000 und 5.000 US-Dollar pro Tonne. In Deutschland kommt Lithium als Lithiumglimmer zusammen mit Zinnerzen im Erzgebirge vor. Der Abbau wurde dort nach 1945 eingestellt. Zurzeit wird die Abbauwürdigkeit der auf ca. 50.000 t geschätzten Lithiumvorkommen untersucht<sup>180</sup>.

#### II.1.2.2.5 Seltene Erden

Als Metalle der Seltenen Erden werden folgende 17 Elemente bezeichnet: Scandium, Yttrium, Lanthan, Cer, Praseodym, Neodym, Promethium, Samarium, Europium, Gadolinium, Terbium, Dysprosium, Holmium, Erbium, Thulium, Ytterbium und Lutetium. Die Situation des Rohstoffmarktes und die Bedeutung für die deutsche Industrie wurden in der Chemischen Rundschau beschrieben<sup>181</sup>. Viele der Seltenerdmetalle sind sich in den Eigenschaften sehr ähnlich. Dadurch können viele untereinander substituiert werden, wenn sich Verfügbarkeit oder Preise ändern.

Im Jahr 2010 war China praktisch der alleinige Produzent der Seltenen Erden. Es wurden ca. 130.000 t (als Metalloxid) abgebaut. Die Reserven Chinas werden mit 55 Mio. t (als Metalloxid) angegeben, dies entspricht der Hälfte der heute bekannten Weltreserven von 110 Mio. t. Bedeutende Reserven liegen in den USA (ca. 13 Mio. t bezogen auf Metalloxid) und in den Ländern der Gemeinschaft Unabhängiger Staaten (GUS)<sup>182</sup> (ca. 19 Mio. t bezogen auf Metalloxid), die zurzeit aber nicht abgebaut werden. Die Rohstoffpolitik in China hat in den letzten Jahren zu vermehrter Exploration von Seltenerdmetallen und der Reaktivierung stillgelegter Minen geführt. Trotz der raren Vorkommen wird nicht mit einer dauerhaften Verknappung gerechnet.<sup>183</sup> Durch die chemische und physikalische Ähnlichkeit der Metalle der Seltenen Erden ist die Abtrennung und Aufbereitung sehr aufwendig. Es werden chromatographische und Ionenaustausch-Verfahren angewandt. Wegen der geringen Konzentration der Seltenen Erden in den Produkten gibt es bis heute praktisch keine Sekundärrohstoffe der Seltenen Erden. Recycling-Verfahren lohnen sich bisher nur bei sehr großen Teilen wie Permanentmagneten.

#### II.1.2.2.6 Rezyklierung von Industriemetallen

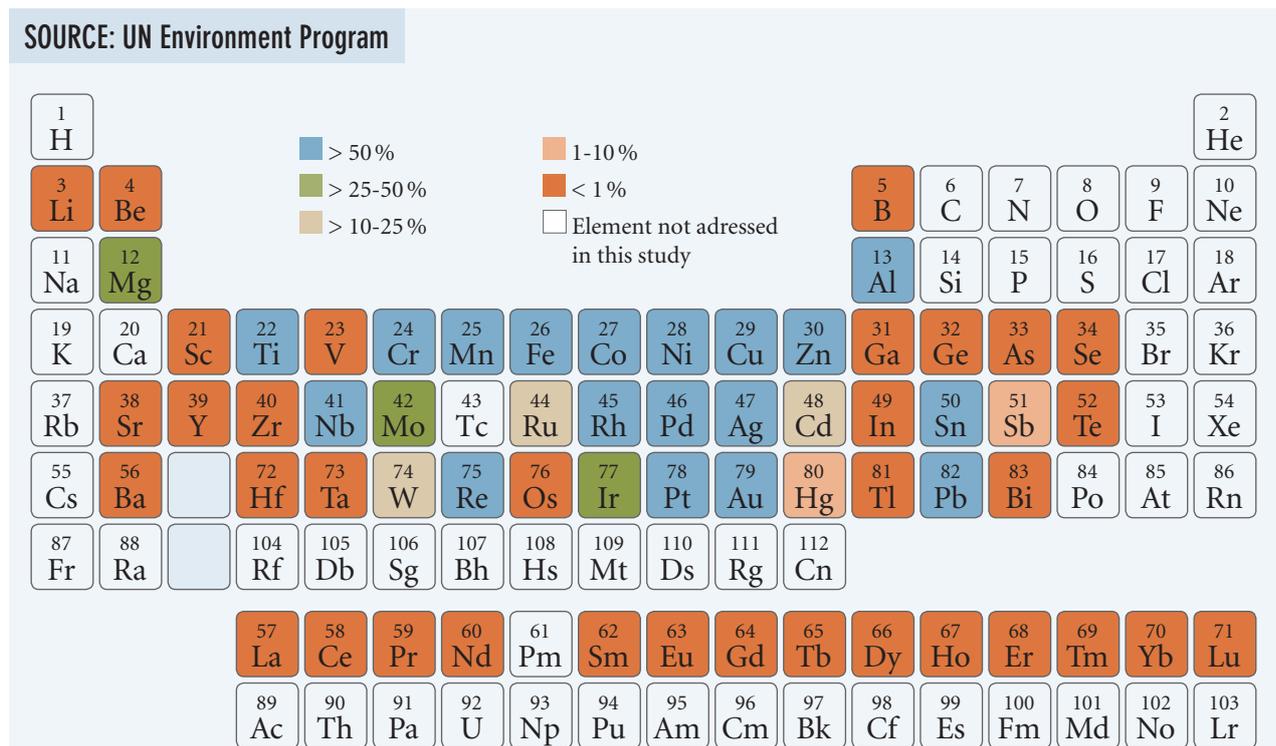
Abbildung 20 zeigt die Recycling-Raten wichtiger Industriemetalle aus Konsumprodukten nach deren Lebensende.

180 Gutzmer, Jens: Freiburger Wissenschaftler erkunden heimische Lithiumvorkommen (14.01.2010).

181 Elektronikschrott und Kehrrechtsschlacke – Nicht Selten – und dennoch rar. In: Chemische Rundschau (2010), 12.

182 Zusammenschluss von zwölf Teilrepubliken der ehemaligen Sowjetunion

183 Humphries, Marc: Congressional Research Service (Hg.): Rare Earth Elements: The Global Supply Chain. (2013).

Abbildung 20: Recyclingraten wichtiger Industriemetalle<sup>184</sup>

Die Abbildung verdeutlicht, dass die Recyclingraten der Elemente, die in niedrigen oder sehr niedrigen Konzentrationen verwendet werden, äußerst gering sind. Zum einen fehlen noch die technischen Verfahren, zum anderen ist die Wirtschaftlichkeit des Recyclings nicht gegeben. Der Wiedereinsatz der in Spuren eingesetzten Metalle im Gemisch wurde von den Autoren des UNEP<sup>185</sup>-Berichts nicht untersucht und nicht beschrieben.

Anhang 3 zeigt, welche Elemente mit anderen als Haupt- und Nebenkomponten vorkommen. Bei einem Abbau der Erze fallen neben den erwünschten Metallen auch andere an.

## II.1.3 Annahmen

Die folgenden Annahmen stellen die für die Abschätzung der zukünftigen Rohstoffbasis der chemischen Industrie wesentlichen Zukunftsentwicklungen und deren Auswirkungen auf die Rohstoffsituation dar. Für alle verwendeten Rohstoffe sind die relevanten Megatrends: Demografische Entwicklung, neue Konsummuster, Konvergenz von Technologien, Umbrüche bei Energie und Ressourcen, Klimawandel und Umweltbelastung sowie Urbanisierung und neue Mobilitätsmuster.

### II.1.3.1 Relevante Megatrends

#### Demografische Entwicklung

Es wird derzeit davon ausgegangen, dass die Weltbevölkerung von heute fast 7,2 Mrd. Menschen bis zum Jahr 2050 auf voraussichtlich 9,6 Mrd. Menschen wachsen wird<sup>186</sup>. Dabei ist zu beachten, dass das Bevölkerungswachstum der Zukunft fast ausschließlich in den Entwicklungs- und Schwellenländern stattfinden wird. In Europa hingegen wird die Bevölkerung von heute ca. 742 Mio. Men-

184 T. E. Graedel et al.: UNEP – International Resource Panel (Hg.): Recycling Rates of Metals – A Status Report. (2011).

185 United Nations Environment Programme, Umweltprogramm der Vereinten Nationen.

186 UN Prognose: Die Erde hat nun 7,2 Milliarden Bewohner. In: Die WELT (2013).

schen auf voraussichtlich nur noch 639 Mio. Menschen am Ende des Jahrhunderts abnehmen. Dies entspricht einem Rückgang um 14%. Die Vereinten Nationen gehen zudem davon aus, dass die durchschnittliche Lebenserwartung der Menschen weltweit von heute 70 Jahren auf 82 Jahre im Jahr 2100 steigen wird<sup>187</sup>. Dies führt in den Industrienationen ohne eine starke Zuwanderung und in China (aufgrund der Ein-Kind-Politik) zu einer Überalterung der Gesellschaft.

Mit der wachsenden Bevölkerung und insbesondere der wachsenden Mittelschicht in den Entwicklungs- und Schwellenländern kommt es dort zu einer Steigerung des Wohlstands mit vermehrter Nachfrage nach allen Gütern und damit zur Bildung neuer, stärker wachsender Märkte. Die dadurch hervorgerufene Produktion von mehr Gütern erfordert einen zunehmenden Bedarf an Rohstoffen aller Art, einschließlich Nahrungs- und Futtermitteln.

In Industriestaaten mit einer stärker alternden Bevölkerung wie etwa Deutschland wird die Zahl der Erwerbstätigen zunehmend sinken. Mit einer sinkenden Zahl von Erwerbstätigen fehlen auch die Fachkräfte für die Industrie. Damit wird die Möglichkeit des wirtschaftlichen Wachstums begrenzt. Wenn der Mangel an Fachkräften nicht durch geeignete Maßnahmen wie einer stärkeren Einbeziehung bisher nicht oder nur begrenzt Erwerbstätiger (Frauen, Teilzeitbeschäftigte, Arbeitslose) und Zuwanderung oder Rationalisierung/Produktivitätssteigerung kompensiert werden kann, wird die Wirtschaftsleistung in diesen Ländern sinken. Gleichzeitig verändern sich Nachfrage und Konsummuster.

Die Rohstoffströme verändern sich entsprechend der regional unterschiedlich wachsenden Nachfrage nach Gütern und neu entstehenden Produktionsstandorten. Bei einer zunehmenden Nachfrage nach Rohstoffen bei gleichbleibendem Angebot steigen die Rohstoffpreise. Daneben kann es zu Konkurrenzen bei der regionalen Verteilung von Rohstoffen und zwischen verschiedenen Nutzungen von Rohstoffen, wie z.B. zwischen der stofflichen und der Nutzung für die Energieerzeugung kommen.

### **Neue Konsummuster**

Die Bevölkerung der Schwellenländer wird stärker am Wohlstand partizipieren, was zu nachholendem Konsum führt. Diese Steigerung der Nachfrage nach materiellen Gütern führt wiederum zu einem steigenden Ressourceneinsatz. Wachsende Rohstoffströme fließen zu den Produktionsstandorten, die diese Wachstumsregionen (vor allem Schwellenländer) bedienen. Dem steigenden Bedarf steht kein Rückgang der Nachfrage in den Industrieländern gegenüber. Die Folge der wachsenden Rohstoffnachfrage sind vielmehr steigende Preise. Dieser Preisdruck begünstigt Innovationen, die die Nutzung von Substituten und die Erschließung neuer Rohstoffquellen möglich machen. Trotzdem kann es entlang geopolitischer, wirtschaftlicher und sozialer Konfliktlinien zu Verteilungs- und Nutzungskonkurrenzen kommen.

Durch das Vorhandensein von insgesamt mehr Gütern steigt auch das Angebot an Sekundärrohstoffen. In den hoch entwickelten Volkswirtschaften ist in Teilen der Bevölkerung eine spezifische Nachfrage nach umweltfreundlichen Produkten und Dienstleistungen feststellbar. Dieser Trend folgt einem steigenden Nachhaltigkeitsbewusstsein. In besonderem Maße gilt dies für Deutschland. Kaufentscheidungen werden mit steigendem Wohlstand stärker von Nachhaltigkeitserwägungen abhängig gemacht werden und davon, welches „Gefühl“ sich beim Kauf eines Produktes einstellt. Bei der Beurteilung der Nachhaltigkeit von Produkten wird die Verwendung von nachhaltigeren

---

<sup>187</sup> Stiftung Weltbevölkerung: Weltbevölkerung wächst bis 2050 stärker als angenommen auf 9,6 Milliarden Menschen unter: [http://www.weltbevoelkerung.de/informieren/unsere-themen/bevoelkerungsdynamik/aktuell/news-ansicht/display/weltbevoelkerung-waechst-bis-2050-staerker-alsangenommen-auf-96-milliarden-menschen.html?no\\_cache=1](http://www.weltbevoelkerung.de/informieren/unsere-themen/bevoelkerungsdynamik/aktuell/news-ansicht/display/weltbevoelkerung-waechst-bis-2050-staerker-alsangenommen-auf-96-milliarden-menschen.html?no_cache=1). Online am 09.01.2014.

Rohstoffen eine immer wichtigere Rolle spielen. Neben der zunehmenden Bedeutung von Nachhaltigkeitserwägungen wachsen in den betreffenden Ländern auch die Anforderungen an die Qualität von Produkten. Bei der Ernährung steigt der globale Verbrauch tierischer Lebensmittel, während der Fleischverbrauch in den Industrieländern zurückgeht oder stagniert<sup>188</sup>. Dies ist insofern von Bedeutung, da die Erzeugung tierischer Nahrungsmittel mit einem höheren Ressourcenverbrauch einhergeht als die pflanzlicher<sup>189</sup>.

### Konvergenz von Technologien

Unter diesem Megatrend werden neue Technologieansätze wie die Miniaturisierung in Verbindung mit neuen Konstruktionsprinzipien, die zunehmende Nutzung der Biotechnologie sowie die Verschmelzung verschiedener Technologien wie etwa von Nano-, Bio-, Informations- und Neurotechnologie verstanden (Technologie-konvergenz<sup>190</sup>). Ein Beispiel dafür ist die Fernüberwachung von Körperfunktionen Erkrankter<sup>191</sup>. Diese Technologiekonvergenz<sup>192</sup> erlaubt eine technologische Substitution und führt zu mehr Effizienz bei Ressourcen und Energie und zur Entwicklung neuer Werkstoffe und Konstruktionsprinzipien mit hoher Innovationsdynamik (z.B. bei den Smartphones und Tablet-Computern). Dies hat die Entwicklung neuer leistungsfähiger Produkte bzw. von Produkten mit neuen Eigenschaften und/oder für neue Anwendungen zur Folge.

Durch neue Technologien wird sich der Rohstoffmix verändern. Heute gebräuchliche Rohstoffe können durch andere und bisher nicht verwendete Rohstoffe ersetzt werden, sodass es zu (heute noch nicht absehbaren) Verschiebungen in der Rohstoffnachfrage kommt. Solche neu eingesetzten Rohstoffe werden zukünftig vermehrt nachgefragt und damit wird der Verbrauch anderer Rohstoffe vermindert.

Ein weiterer Fortschritt ergibt sich durch Untersuchung natürlicher Strukturen und Prozesse und ihrer Nachahmung in technischen Produktionsanlagen und Maschinen. Dafür ist neues Know-how zu erarbeiten, das zum Teil längere Entwicklungszeiten erfordert. Auch die Ausbildungsanforderungen können sich ändern<sup>193</sup>. In einigen Industrieländern ist zu beobachten, dass die Anwendung von neuen Technologien auch Anstrengungen zur Sicherung der Akzeptanz dafür erfordert.

### Umbrüche bei Energie und Ressourcen

Dieser Megatrend beschreibt vor allem Energieumbrüche infolge eines zunehmenden Energiebedarfs durch die steigende Weltbevölkerung sowie durch verändertes Nachfrageverhalten bei zunehmendem Einkommen. Um diesem steigenden Energiebedarf gerecht zu werden, erscheint es sinnvoll, Energie vermehrt aus erneuerbaren Quellen zu nutzen sowie Einsparpotenziale beim Energieverbrauch zu erschließen. Deutschland hat gesellschaftlich entschieden, dass ein nuklearer Ausbau kein Lösungsszenario sein sollte, da die Technologie in Bezug auf sichere Beherrschbarkeit und Endlagerung nicht verantwortbar erscheint. Die zunehmende Verwendung von erneuerbaren Energien und die vermehrte Nutzung von Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) bei der konventionellen Stromerzeugung (aber auch ständig effizienteren Produkten) wird voraussichtlich zu einer Reduzierung des Einsatzes fossiler Ressourcen für die Stromerzeugung und die Beheizung von Räumen führen.

188 Weingärtner, Lioba; Trentmann, Claudia: Handbuch Welternährung. Campus-Verlag (2011). ISBN 978-3-593393-54-4, Seite 31 ff.

189 ebd., Seite 190 ff.

190 Krankenhaus-IT online: Technologie-Konvergenz krempelt die Klinik-IT um unter: <https://www.kh-it.de/files/downloads/top-news/KH-IT-Journal-Ingolstadt-2013.pdf> (2013). Online am 15.04.2014.

191 Geräteanordnung zur Fernüberwachung von Körperfunktionen, EP 1356762 A1.

192 ebd.

193 Gleich, Arnim von; Pade, Christian; Petschow, Ulrich; Pissarskoi, Ulrich: Bionik: Aktuelle Trends und zukünftige Potenziale. IÖW (2007). ISBN 978-3-932092-86-2, S. 73 ff.

Im Verkehrssektor steigt die Effizienz bei Transportleistungen. So wird durch den Preisanstieg bei Treibstoffen, den technischen Fortschritt bei der Entwicklung verbrauchsarmer Antriebssysteme, die Abgabepolitik der EU-Mitgliedsstaaten zur Emissionsminderung und gesetzliche Vorgaben zur Grenzwertsetzung ein weiterer Rückgang der Verbräuche von fossilen Treibstoffen trotz vermehrter Transportleistungen eintreten<sup>194</sup>. Eine weitere Ressourcenschonung bei fossilen Energieträgern tritt durch ständige Verbesserungen der Gebäudeisolierung und der nachhaltigen Bauweise ein. Bereits heute werden Nullenergiehäuser für Wohnen und Arbeiten realisiert<sup>195</sup>. Damit nimmt der Energiebedarf für Heizung und Kühlung ab. Bei dieser Entwicklung ist Deutschland zurzeit noch Vorreiter. In anderen Regionen wird diese Entwicklung jedoch nachgeholt werden. Ein Teil des Effizienzgewinns geht aber durch sogenannte Reboundeffekte wie bspw. größere Elektrogeräte mit mehr Funktionen, größere Wohnungen, vermehrtes Reisen, leistungsstärkere Transportmittel und steigenden Gütertransport wieder verloren.

Bei einer abnehmenden Nachfrage von fossilen Energieträgern in den Industrieländern stehen diese eher für eine stoffliche Nutzung zur Verfügung. Da Güter aller Art mit steigendem Wohlstand vermehrt nachgefragt werden, wird der Rohstoffbedarf – auch der nach fossilen Rohstoffen – insgesamt trotzdem steigen.

Eine Besonderheit beim Recycling wird sich dadurch ergeben, dass wegen der Zunahme an Verbrauchsgütern aufgrund des ansteigenden Konsums in den Schwellenländern auch ein erhöhter Recyclingbedarf durch Ressourcenknappheit entsteht. Durch den erhöhten Konsum wird sich auch die Menge an recyclingfähigen Gütern erhöhen.

Bei den nachwachsenden Rohstoffen kommt es weiter zu Konkurrenzen bei der Nutzung als Nahrungs- und Futtermittel, Energieträger oder Rohstoff, die zu Preissteigerungen, Marktverschiebungen und Konflikten führen können. Die Autoren der VCI-Prognos-Studie gehen von einem Anstieg des Anteils der nachwachsenden Rohstoffe am Gesamtrohstoffmix von 6% (2011) auf 8% in 2030 aus<sup>196</sup>. Dies entspricht einem Anstieg der nachwachsenden Rohstoffe in dem Prognosezeitraum von zwei Jahrzehnten um 33%. Gleichzeitig sinkt der Anteil der fossilen Rohstoffe von 44% (2011) auf 39% in 2030. Bezogen auf den Anteil nachwachsender an den organischen Rohstoffen bedeutet dies einen Anstieg von aktuellen 12,6% auf rund 17% in 2030.

### **Klimawandel und Umweltbelastung**

Die Verwendung von fossilen Energierohstoffen führt zu Emissionen des Treibhausgases Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>). Die IEA rechnet im 450 ppm-Szenario im WEO 2012 mit einem Anstieg der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen auf 32,4 Gt bis 2020 und danach mit einer Abnahme auf 22,1 Gt in 2035. Dies setzt eine Abnahme des Anteils der fossilen Energieträger am Primärenergieverbrauch von 82% in 2011 auf 63% in 2035 voraus<sup>197</sup>.

Der Einsatz von Erdöl und anderen fossilen Rohstoffen für die Produktion von chemischen Produkten kann an deren Lebensende zur Freisetzung von CO<sub>2</sub> führen. Derzeit werden ca. 10% des verarbeiteten Erdöls für die Produktion von chemischen Produkten verbraucht. Die Beiträge der chemischen Industrie an den CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland sind heute noch gering. Erst wenn

194 Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (Hg.): Energie in Deutschland – Trends und Hintergründe zur Energieversorgung. (2010).

195 Weizsäcker, Ernst Ulrich von; Desha, Cheryl: Faktor Fünf – Die Formel für nachhaltiges Wachstum. Droemer (2010). ISBN 3-426-27486-8, S. 74 ff.

196 Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Die deutsche chemische Industrie 2030. VCI-Prognos-Studie. (2013), S. 31.

197 International Energy Agency (IEA) (Hg.): World Energy Outlook 2012. (2012), S. 241.

in Zukunft der Umstieg der Energieerzeugung auf Erneuerbare Energien vollzogen sein wird, steigt der relative Anteil. Es gibt ein Potenzial, den Einsatz von klimaneutralen (ohne Regenwaldrodung und andere klimaschädliche Landnutzungsänderungen) nachwachsenden Rohstoffen zu erhöhen. Dabei sind die konkurrierenden Nutzungen für Nahrungs- und Futtermittel sowie Energie zu berücksichtigen.

### Urbanisierung und neue Mobilitätsmuster

Die Bevölkerung in den Städten wird zunehmen. Gleichzeitig werden ländliche Gebiete verlassen. Diesen Trend gibt es in allen Weltregionen, in Industrieländern wie in Entwicklungsländern. Die Städte wachsen weiter zu Megastädten. Dieser Ausbau beansprucht Ressourcen für den Bau von Wohnungen und Infrastruktur. Durch die Nutzung nachhaltiger Baustoffe und einer nachhaltigen Architektur wird der Energieverbrauch für die Baustoffherstellung und der für Heizung und Kühlung im Gegenzug wesentlich gesenkt.

Die Versorgung der räumlich dicht wohnenden Menschen führt zur Realisierung neuer Konzepte bei der Logistik und dem Personentransport. Der motorisierte Individualverkehr wird durch die kombinierte Nutzung von verschiedenen Verkehrsmitteln (Intermodalität) und Massentransportmitteln wie Busse und Bahnen sowie die Verwendung von Fahrrädern für Kurzstrecken ersetzt. Bahnen sind überwiegend elektrifiziert und verbrauchen weniger Ressourcen als der motorisierte Individualverkehr. Mit steigendem Wohlstand nehmen jedoch die Transporte von Menschen und Gütern insgesamt zu. Die Gütertransporte steigen auch wegen der arbeitsteiligen Produktion in einer globalisierten Wirtschaft an. In den Ballungsgebieten und in Regionen mit einer gut ausgebauten Infrastruktur werden Verkehrsmittel weitgehend elektrifiziert. In infrastrukturell weniger entwickelten Regionen bleiben die konventionellen Treibstoffe jedoch dominierend. Durch die Elektrifizierung der urbanen Verkehrsmittel wird die zunehmende Mobilität daher zumindest nicht zu einer weiteren Steigerung der Verbräuche von fossilen und nachwachsenden Treibstoffen führen, wenn der benötigte Strom mit Sonnen-, Wind- oder Wasserenergie erzeugt wird<sup>198</sup>.

### II.1.3.2 Auswirkung der Megatrends auf die Rohstoffsituation

Erdöl wird derzeit ganz überwiegend für Energieerzeugung und Mobilität verbraucht und nur zu einem geringeren Teil als zentraler Rohstoff in der chemischen Industrie genutzt. Für die künftige Verfügbarkeit von Öl als Rohstoff in der chemischen Industrie ist damit die Entwicklung des globalen Energieverbrauchs der entscheidende Faktor. Dieser soll von 2010 bis 2030 um ca. 50% steigen<sup>199</sup>. Dabei wird der Erdölverbrauch global bis 2035 um 19% (Basis 2011) zunehmen, in den OECD-Ländern ist jedoch ein Rückgang um 21% prognostiziert<sup>200</sup>.

So hat der Treibstoffverbrauch in Deutschland in den letzten zwei Jahrzehnten trotz der gestiegenen Transportleistungen (vgl. Abbildung 21) abgenommen. Seit 2009 ist die positive Entwicklung weiter fortgeschritten. Die Option für die Zukunft ist eine weitere Effizienzsteigerung im Transportsektor. Durch Rechtsakte der EU und deren nationale Umsetzungen werden Konsumenten über die Kraftstoffverbräuche informiert und steuerliche Anreize für Verbrauchsverringern geschaffen<sup>201</sup>. Die

198 Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Hg.): Megastädte – die Welt von morgen nachhaltig gestalten. (2010).

199 Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Die deutsche chemische Industrie 2030. VCI-Prognos-Studie. (2013), S. 9; International Energy Agency (IEA) (Hg.): World Energy Outlook 2012. (2012).

200 ebd., S. 85 (New Policies Scenario).

201 Richtlinie 1999/94/EG.

Bundesregierung will den Verbrauch fossiler Kraftstoffe für die Mobilität auch durch das Programm „Elektromobilität“ weiter verringern<sup>202</sup>.

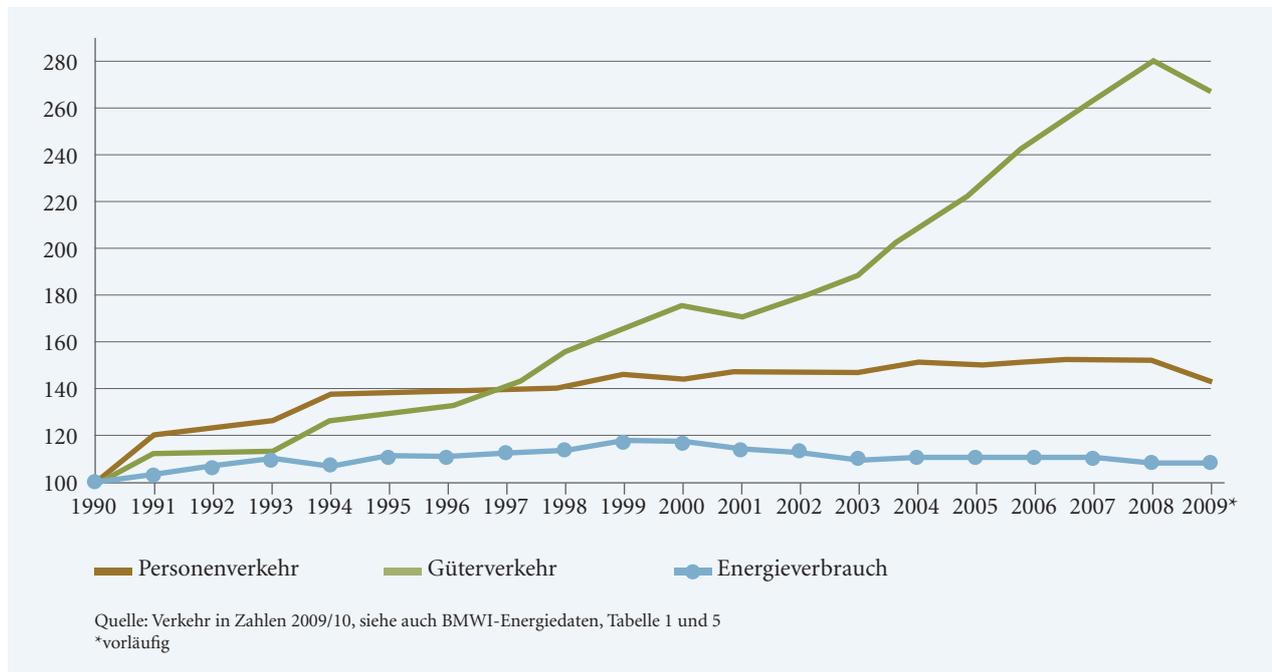


Abbildung 21: Energieverbrauch in Deutschland durch Verkehrssituation Personen- und Güterverkehr, 1990-2009, Index 1990 = 100<sup>203</sup>

Der Ölpreis soll trotz dieser gegenläufigen Entwicklung in den OECD-Staaten 2030 bei 135 US-Dollar pro Barrel liegen (Preise auf Basis 2010)<sup>204</sup>. Das globale Wirtschaftswachstum wird auf 3%, das in der EU auf 1,7% und das in Deutschland auf 1,3% pro Jahr geschätzt<sup>205</sup>. Das Wachstum des globalen Handels wird mit 4,2% pro Jahr nach der Prognose stärker steigen als das Wirtschaftswachstum. Damit steigen auch die Transportleistungen<sup>206</sup>. Der zukünftig vermehrt nachgefragte Strom wird global (wie Abbildung 22 zeigt) lediglich zu 44% aus erneuerbaren Quellen erzeugt. Dies würde zu einem wesentlichen Mehrverbrauch fossiler Rohstoffe führen, besonders von Kohle.

202 Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi); Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU); Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Hg.): Regierungsprogramm Elektromobilität. (2011).

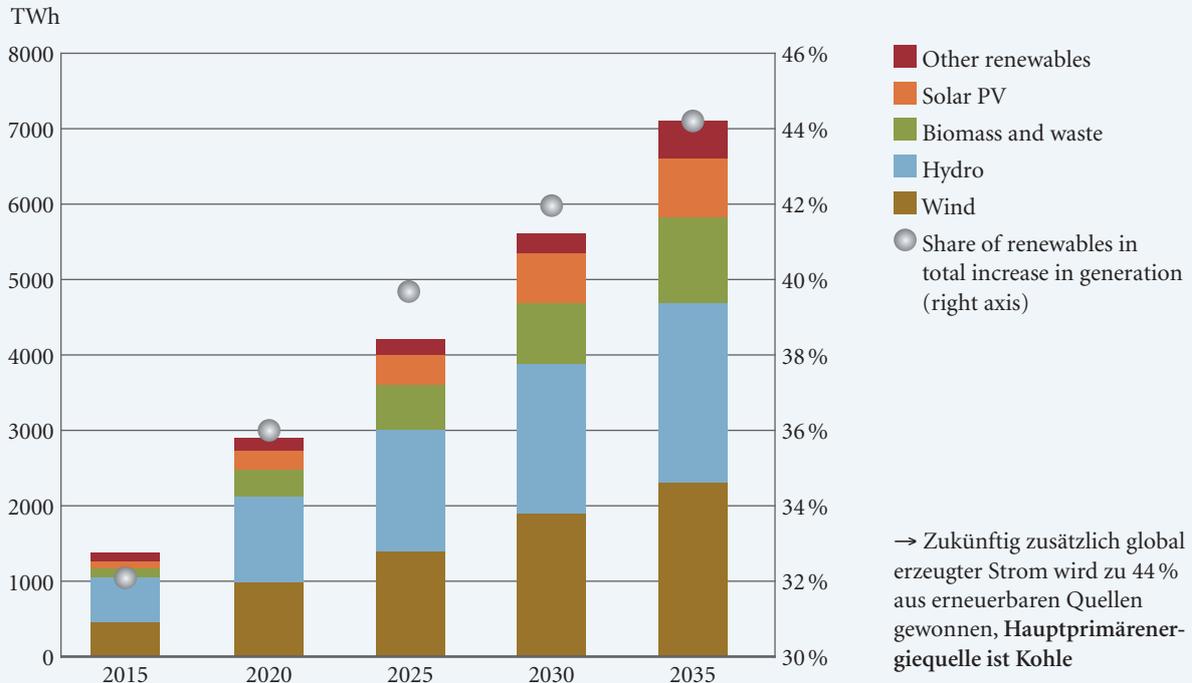
203 Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (Hg.): Energie in Deutschland – Trends und Hintergründe zur Energieversorgung. (2010).

204 International Energy Agency (IEA) (Hg.): World Energy Outlook 2012. (2012), S. 82.

205 Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Die deutsche chemische Industrie 2030. VCI-Prognos-Studie. (2013), S. 11 ff.

206 ebd., S.12.

### Incremental global renewables-based electricity generation relative to 2009 by technology in the New Policies Scenario



Quelle: WEO 2011, S. 184

Abbildung 22: Weltzusatzbedarf an Strom

Globale Wachstums- und Wohlstandssteigerungen führen auch zu gesteigerten Ressourcenverbräuchen. Unklar ist, ob Effizienzsteigerungen bei Technologien oder Produkten zu einer Entkopplung von weltweiten Ressourcenverbräuchen führen können, die letztlich auch eine Verlängerung der statischen Reichweiten von Reserven auslösen könnte.

Weitere Reichweiten-Verlängerungen werden durch Erschließung bisher nicht zugänglicher Rohstoffquellen aufgrund des technischen Fortschritts eintreten<sup>207</sup>. Durch Fortschritte in der Geophysik, Geochemie und Bergbautechnik können die vorhandenen Reserven besser ausgebeutet und neue Rohstoffreserven effizienter erschlossen werden. Beispiele sind die Offshore-Ölförderung und die Gewinnung von Öl und Gas durch Fracking.

Trotz der großen Ressourcen bei den Energierohstoffen geht die BGR in neuen Analysen bei einer dynamischen Betrachtung davon aus, dass Erdöl der einzige Energierohstoff ist, bei dem in den kommenden Jahrzehnten eine steigende Nachfrage wahrscheinlich nicht mehr gedeckt werden kann<sup>208</sup>. Im Betrachtungszeitraum dieses Berichts wird es nach allen Prognosen jedoch nicht zu einer Verknappung von chemierelevanten Rohstoffen kommen.

Die Nahrungsmittel-Nachfrage steigt durch den zunehmenden Wohlstand der bis zum Jahr 2050 auf voraussichtlich 9,6 Mrd. Menschen angewachsenen Weltbevölkerung nach einer FAO-Schät-

207 Huy, Dieter et al.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (Hg.): Deutschland – Rohstoffsituation 2012. (2013).

208 ebd. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hg.): Deutschland – Rohstoffsituation 2012. (2013).

zung um ca. 70%<sup>209</sup>. Zu dieser wachsenden Nachfrage nach Nahrungsmitteln kommt eine steigende Nachfrage nach nachwachsenden Rohstoffen für Mobilität und die stoffliche Nutzung bei einem globalen Wirtschaftswachstum von 3% pro Jahr hinzu. Die für die Landwirtschaft zur Verfügung stehende spezifische Fläche wird nach Schätzungen der FAO von heute 2.100 m<sup>2</sup> pro Einwohner auf 1.800 m<sup>2</sup> pro Einwohner im Jahr 2050 zurückgehen. Bei den Ertragssteigerungen schätzt die FAO, dass die landwirtschaftlich genutzte Fläche bis 2050 bei einer Produktionssteigerung von 54% um insgesamt 9% zunehmen wird. Die Flächenzunahme um 9% ist nur ein Bruchteil der 1,6 Mrd. ha kulturfähigen, aber heute noch nicht genutzten Landes<sup>210</sup>. Diese Fläche ist größer als die heute genutzte Ackerfläche von 1,5 Mrd. ha und kann zukünftig zur landwirtschaftlichen Produktion verwendet werden.<sup>211</sup> Es ist davon auszugehen, dass weitere Ausweisungen von Land- zu Ackerfläche weiteren Druck auf Ökosysteme und Biodiversität ausüben.

Um ein konkreteres Bild der für eine stärkere stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe in der chemischen Industrie benötigten Flächen zu bekommen, sollen die entsprechenden Flächenbedarfe anhand der weltweiten und bundesdeutschen Polyethylen-Produktion verdeutlicht werden. Für den weltweiten Verbrauch von Polyethylen von 65,8 Mio. t<sup>212</sup> im Jahre 2011 bspw. müsste Zucker auf einer Fläche von 20 Mio. ha angebaut werden, was etwa der Gesamtfläche Deutschlands oder ca. 1% der gesamten globalen Agrarfläche entspricht. Bei dem von der Prognos-Studie prognostizierten Wachstum der globalen chemischen Industrie von jährlich 4,5% werden sich zudem die Produktionsmenge von Polyethylen bis zum Jahr 2030 und damit auch die entsprechend erforderliche Ackerfläche mehr als verdoppeln.

Allein für den aktuellen deutschen Polyethylen-Verbrauch müsste eine Anbaufläche genutzt werden, die der Gesamtfläche des Staates Slowenien entspricht. Da die Prognos-Studie bei den Standardkunststoffen für Deutschland nicht von einem Produktionszuwachs bis 2030 ausgeht, würden sich hier auch nicht die Flächenanforderungen für die Polyethylenproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen erhöhen. Demgegenüber besteht in Deutschland das Potenzial, die Produktivität landwirtschaftlicher Produktion durch Ausweitung der Anbauflächen von derzeit 2,5 Mio. ha auf 4 Mio. ha zu erhöhen.<sup>213, 214</sup>

Der geografische Radius, aus dem Chemieanlagen bedient werden können, ist aufgrund des niedrigeren Energie- und höheren Wassergehalts der nachwachsenden Rohstoffe eingeschränkt. So kann eine Biogasanlage, die 1 Mio. t Methan pro Jahr produziert, wirtschaftlich aus einem Umkreis von 80-90 km mit nachwachsenden Rohstoffen erster Generation versorgt werden<sup>215</sup>. Skaleneffekte, die sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit der Anlage auswirken, erweitern den Versorgungsradius und damit die Transportkosten. Im Vergleich dazu ist der Radius bei energetischer Nutzung kleiner. Die IEA geht davon aus, dass der Radius für Anlagen, die Bioenergie erzeugen, bei etwa 50 km liegt<sup>216</sup>.

---

209 Erb, Karl-Heinz et al.: Alpen-Adria Universität Wien (Hg.): Eating the Planet: Feeding and fuelling the world sustainably, fairly and humanely – a scoping study. (2009), S. 8.

210 ebd.

211 ebd.

212 Chemical Online: World Ethylene Market To Cross 160 Million Tons By 2015, According To New Report By Global Industry Analysts unter: <http://www.chemicalonline.com/doc/world-ethylene-market-to-cross-160-million-0001?VNETCOOKIE=NO> (2008). Online am 15.04.2014.

213 Schütte, Andreas (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.), Landtag NRW (Hg.): Enquetekommission II Protokoll 5. Sitzung (nichtöffentlich). (2013), S. 5.

214 Witzke, Harald (Humboldt Universität Berlin), ebd., S. 6.

215 Schütte, Andreas (Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e.V.), ebd., S. 42.

216 Sims, Ralph E. H.: International Energy Agency (IEA) (Hg.): Bioenergy Project Development & Biomass Supply. (2007).

Als ein weiterer Anhaltspunkt, welcher geografische Radius aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten für die Versorgung der chemischen Industrie in NRW mit nachwachsenden Rohstoffen relevant ist, kann das Einzugsgebiet der Holzwerkstoffindustrie dienen. Dort ist die Belieferung aus einem Umkreis von 200 km wirtschaftlich<sup>217</sup>. Die Holzwerkstoffe haben jedoch einen höheren Marktwert als Rohstoffe für die chemische Industrie oder Brennholz. Für die energetische Verwertung werden Radien wahrscheinlich geringer anzusetzen sein.

Insgesamt ist für die Beurteilung des künftigen Potenzials nachwachsender Rohstoffe als Rohstoffbasis der nordrhein-westfälischen Chemie ein Radius von maximal 200 km realistisch. Wegen des gut ausgebauten Schienen- und Wasserstraßennetzes, das Transportkosten verringert<sup>218</sup>, sowie der bereits vorherrschenden Logistik und Holzbearbeitungsinfrastruktur dürfte das in diesem Radius bestehende Potenzial von nachwachsenden Rohstoffen auch nutzbar sein. Da Holz in Deutschland nicht durch Kahlschlag gewonnen wird, ist der Aufwand der Erstverladung in den Wäldern wesentlich höher als der Ferntransport. Die Nutzung von Wasserwegen und Bahnen mit einem mehrfachen Umschlag ist daher unwirtschaftlich. Momentan wird jedoch die energetische Nutzung von Pflanzenmaterial subventioniert, was Marktverschiebungen zuungunsten der stofflichen Nutzung zufolge hat.

Das Potenzial der Versorgung von Holzbiomasse wurde für Nordrhein-Westfalen unter Berücksichtigung spezifischer Nutzungseinschränkungen wie Fläche für Naturschutzgebiete und technisch schwer erschließbare Waldflächen geschätzt. 8,1% der gesamtdeutschen Waldfläche liegt in NRW<sup>219</sup>.

Die rohstoffliche Nutzung von Stroh in Nordrhein-Westfalen ist eingeschränkt. Nur 20% des Strohs kann derzeit verwendet werden. Der Rest wird als Einstreu in der Tierhaltung verwendet, was als besonders artgerechte Haltung gilt, oder verbleibt auf dem Feld und dient dort der Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit<sup>220</sup>.

Nordrhein-Westfalen und die Anrainerbundesländer Hessen und Rheinland-Pfalz verfügen über hohe Bestände an Hartholz. Die konkurrierende Industriezweige Sägewerke, Holzwerkstoff- und Zellstoffindustrie bevorzugen hingegen Weichholz. Außerdem werden 60% des Hartholzes zum Heizen verwendet. Die derzeitige deutsche Marktversorgung mit Holz kann – insbesondere auch durch die hohen Recyclingraten beim Papier – durch die inländischen Bestände/Ernten gedeckt werden. Ohne zusätzliche Holzimporte und ohne Ausweitung von forstwirtschaftlichen Flächen das Potenzial der rohstofflichen Nutzung daher gering.

## II.1.4 Optionen

Wie in den Annahmen beschrieben, stehen der chemischen Industrie veränderte Rohstoffanforderungen bevor. Zum einen ergeben sich diese durch eine zu erwartende erhöhte globale Nachfrage nach allen Konsumgütern, zum anderen durch einen veränderten Rohstoffmix, der sich durch technische Neuentwicklung und veränderte Konsumgewohnheiten ergeben wird und nicht prognostizierbar ist. Die Eigenschaft „nachhaltig produziert“ kann, insbesondere in den Industrieländern, zu einer größeren Nachfrage und somit zu einer qualitativen Marktentwicklung führen. Unter Berücksichtigung dieser sich ändernden zukünftigen Rahmenbedingungen für die Rohstoffversorgung der chemischen Industrie sollen im Folgenden verschiedene rohstoffbezogene Handlungsszenarien

217 Essel, Roland (nova-Institut GmbH – Chemie Knapsack, Hürth), Landtag NRW (Hg.): Enquetekommission II Protokoll 5. Sitzung (nichtöffentlich). (2013), S. 7f.

218 Carus, Michael et al.: Biocore Europe (Hg.): Building tomorrow's biorefineries. (2014), S. 17, 19.

219 Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V (Hg.): Potenzialatlas – Bioenergie in den Bundesländern. (2013), S. 64.

220 ebd., S. 14.

(Optionen) für die chemische Industrie in Nordrhein-Westfalen vorgestellt und anhand des Leitmodells der Nachhaltigkeit bewertet werden.

Jede Option wird zunächst kurz beschrieben und in Zusammenhang mit den Untersuchungsaufträgen des Einsetzungsbeschlusses sowie den Herausforderungen, die sich aus der Beschreibung der Rohstoffsituation und den zugrunde gelegten Annahmen ergeben, gestellt. Sodann wird aufgezeigt, wie sich die jeweilige Option auf die als relevant definierten Nachhaltigkeitskriterien auswirkt. Im Einzelnen werden folgende Optionen hinsichtlich der zukünftigen Rohstoffbasis der chemischen Industrie betrachtet:

- **Option A.1 unveränderte Rohstoffbasis:**

Dieser Option liegt das Postulat zugrunde, dass der derzeitige Rohstoffmix der chemischen Industrie mit Erdöl als Hauptrohstoffquelle anteilmäßig unverändert beibehalten wird. In dieser Option sollen, wie im Einsetzungsbeschluss gefordert, mögliche Nachhaltigkeitsprobleme des derzeitigen Rohstoffmix bewertet werden.

- **Option A.2 Substitution durch Rohstoffe aus alternativen Primärquellen:**

Option A.2 bewertet das Potenzial zusätzlicher organischer und anorganischer Primärrohstoffquellen. Zur Substitution von Erdöl kommt eine Ausweitung bereits genutzter organischer Rohstoffe wie Erdgas, Kohle und nachwachsende Rohstoffe erster Generation infrage. Daneben stellen auch nachwachsende Rohstoffe zweiter und dritter Generation (lignocellulosehaltige Biomasse und Algen) alternative Primärrohstoffquellen für die chemische Industrie dar. In Bezug auf anorganische Rohstoffe werden Substitutionspotenziale aus bisher nicht genutzten marinen Primärquellen (z.B. Manganknollen) bewertet.

- **Option A.3 Substitution durch alternative Rohstoffe aus Sekundärquellen:**

Diese Option beschreibt das Substitutionspotenzial von Sekundärrohstoffen, die derzeit als Emissionen oder Abfall anfallen und entweder deponiert bzw. emittiert oder energetisch bzw. im Downcycling verwertet werden. Als organische sekundäre Rohstoffquellen werden in diesem Bericht CO<sub>2</sub> aus Abgasströmen, Lebensmittelabfälle und Agrarreststoffe betrachtet. Als Sekundärquellen für anorganische Rohstoffe stehen Urban Mining<sup>221</sup>, technische Abfälle und Abwasser im Fokus der Bewertung.

### **Option A.1: Unveränderte Rohstoffbasis**

#### **Beschreibung**

Bei einer unveränderten Nutzung der derzeitigen Rohstoffbasis bleiben die Anteile der jeweiligen Rohstoffe Erdöl, Erdgas, Kohle und nachwachsende Rohstoffe zwar weitgehend unverändert, die jeweils eingesetzten Mengen können entsprechend des prognostizierten Wirtschaftswachstums aber steigen.

#### **Begründung**

Wie in der Reichweiten-Abschätzung gezeigt, steht für den Betrachtungszeitraum dieses Berichts ausreichend Erdöl zur Verfügung. Außerdem sind nach den statischen Reichweiten die Rohstoffe noch Jahrzehnte verfügbar. Im Betrachtungszeitraum des Berichtes kann davon ausgegangen werden, dass die globalen Erdölpreise eine wirtschaftliche Nutzung in der chemischen Industrie aufgrund der hohen Wertschöpfung ihrer Produkte zulassen. Voraussetzung dafür ist, dass keine gravierenden Umbrüche in der Verfügbarkeit und der Preisentwicklung erfolgen.

221 Urban Mining umfasst „die Identifizierung anthropogener Lagerstätten, die Quantifizierung der darin enthaltenen Sekundärrohstoffe [sowie] Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen vor dem Hintergrund der zur Verfügung stehenden technischen Rückgewinnungsvarianten [...]“. Quelle: URBAN MINING® e.V.: Urban Mining. Von der Kreislaufwirtschaft zur Rohstoffindustrie unter: <http://www.urban-mining-verein.de/index.php?id=92>. Online am 24.02.2015.

Darüber hinaus wird der derzeitige Rohstoffmix in der chemischen Industrie seit Jahrzehnten wirtschaftlich mit hoher Wertschöpfung eingesetzt. Die Produktionsverfahren, die Verflechtung der Verbundstandorte und die Logistik sind auf diesen Rohstoffmix hin optimiert. Die Effizienz von Rohstoff- und Energieverbrauch wurde über Jahrzehnte ständig verbessert. So ermöglichen die hohen Verwertungsraten von Nebenprodukten in der für die chemische Industrie typischen Koppelproduktion eine hohe Rohstoffeffizienz. Emissionen in Gewässer sowie die Freisetzung luftfremder Stoffe und Treibhausgase wurden drastisch vermindert. Die bei den chemischen Prozessen anfallende Abwärme wird im Produktionsverbund genutzt. Die hierdurch erzielten Effizienzgewinne haben in Deutschland bereits zu einer Entkopplung des Wirtschaftswachstums von Rohstoff- und Energieeinsatz geführt. Diese Entkopplung wird in den nächsten Jahrzehnten in den Schwellen- und Entwicklungsländern nachgeholt werden. Ebenfalls optimiert wurde die Logistik der Rohstoffversorgung durch Pipelineverbünde. Die von der chemischen Industrie eingesetzten Rohstoffe sind überwiegend Koppelprodukte anderer Wirtschaftszweige.

Die heute eingesetzten nachwachsenden Rohstoffe stammen aus heimischen und überseeischen Quellen. Sie werden zumeist für Produkte genutzt, deren Zielstrukturen im Rohstoff bereits vorgebildet oder hieraus leicht synthetisierbar sind. Beispiele hierfür sind Tenside aus Fettsäuren sowie Stärke und Zucker als Rohstoff für Fermentationsprozesse. Cellulose wird unter weitgehendem Strukturverlust lediglich chemisch modifiziert (Schießbaumwolle, Celluloseacetat). Die in der chemischen Industrie eingesetzten nachwachsenden Rohstoffe sind oftmals ebenfalls Koppelprodukte aus anderen Branchen.

### Auswirkungen auf die Nachhaltigkeitsaspekte

#### Ökologie

##### *Ressourcenschonung*<sup>222</sup>

Da diese Option keine Änderung des derzeitigen Rohstoffmix vorsieht, ergeben sich keine prinzipiellen Veränderungen hinsichtlich Ressourcenschonung im Vergleich zur heutigen Situation. Hierbei unberücksichtigt sind die oben beschriebenen Effizienzsteigerungen durch optimierte Verfahren sowie das prognostizierte Weltwirtschaftswachstum. Denn durch die oben beschriebenen Effizienzsteigerungen und eine verbesserte Produktivität sind ein verminderter Energiebedarf und damit eine Ressourcenschonung möglich, jedoch steht dieser ein erhöhter Ressourcenbedarf durch den Anstieg der weltweiten Produktion gegenüber, sodass insgesamt mehr Ressourcen als heute benötigt werden<sup>223</sup>.

##### *Carbon Footprint*

Die stoffliche Nutzung der heute eingesetzten Rohstoffe bedeutet einen qualitativen Vorteil gegenüber der energetischen Nutzung bzw. deren Nutzung als Treibstoffe, da hierbei der Kohlenstoff zumindest zeitweise in den chemischen Produkten gebunden wird<sup>224</sup>. Eine unveränderte Petrochemie lässt keine Rückschlüsse auf den weltweiten Carbon Footprint zu, da Rohöl hauptsächlich im Mobilitätssektor eingesetzt wird. Sollte hier der Umstieg auf Elektromobilität, Hybrid- oder Brennstoffzellen gelingen, könnte die statische Reichweite erhöht werden und eine Preisstabilität gewahrt bleiben. Auch eine sektorübergreifende Reduktion des Carbon Footprints erscheint so möglich. Da die Chemie nicht der Hauptabnehmer von Rohölprodukten ist, ist sie nicht trendsetzend für die

222 Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Die Formel Ressourceneffizienz. (2012).

223 Siehe II.2.3.7 Auswirkung der Megatrends auf die Rohstoffsituation.

224 Qualitative Abschätzung nach Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU); Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (BDI) (Hg.): Produktbezogene Klimaschutzstrategien – Product Carbon Footprint verstehen und nutzen. (2010).

Fördermengen und den Carbon Footprint insgesamt. Bei der thermischen Verwertung chemischer Produkte an deren Lebensende entstehen Treibhausgasemissionen. Diese Emissionen sind jedoch geringer im Vergleich zu denen der Energiewirtschaft, den Haushalten und dem Verkehr. Bei steigenden Erdölpreisen wird die Erdölförderung in abgelegenen Regionen und schwer zugänglichen Meerestiefen wirtschaftlich. Auch schwer zu extrahierende Ölsorten können dann kostendeckend gewonnen werden. Die Erdölförderung wird somit technisch und energetisch aufwändiger, wodurch die Energiebilanz der Förderung und Verarbeitung ungünstiger wird. Analog zu den Betrachtungen hinsichtlich der Ressourcenschonung ist insgesamt von einer Zunahme der CO<sub>2</sub>-Emissionen auszugehen, sollten keine weiteren Effizienzsteigerungen erreicht werden können.

#### *Biodiversität/Flächennutzung*

Die Ausweitung der Ölförderung in Regionen wie Naturschutzgebieten, der Arktis oder tieferen Meeresregionen können die lokale Biodiversität gefährden<sup>225</sup>. Havarierisiken steigen in unzugänglichen Gebieten und erfordern einen höheren Aufwand an Risikominderungsmaßnahmen zu deren Beherrschung. Bei der Förderung von Ölsanden bleiben die Landflächen (Tagebaue) bis zum Ende der Rekultivierungen über Jahrzehnte brach liegen.

#### **Ökonomie**

##### *Innovation*

Durch die jahrzehntelange Nutzung des derzeitigen Rohstoffmix ist bereits viel Wissen für dessen effiziente Nutzung vorhanden, das bei einer Änderung des Rohstoffmix erst generiert werden müsste. Diese Erfahrung bedeutet einen großen wirtschaftlichen Vorteil für die Fähigkeit zur Invention und Innovation und damit für die Markterschließung neuer Produkte. Die Branche zeichnet sich durch hohe Innovationsleistungen aus<sup>226</sup>.

##### *Wettbewerbsfähigkeit*

Das Wirtschaftswachstum der chemischen Industrie liegt in Deutschland über dem Industriedurchschnitt<sup>227</sup>. Die Branche erwirtschaftet durch die effiziente Verwendung des Koppelproduktes Naphtha hohe Gewinnmargen, obwohl sich der Erdölpreis seit 1960 bis heute fast ver Hundertfacht hat (s. Abbildung 25, Anhang 2). Bis 2030 wird eine Preisentwicklung von heute 100 US-Dollar pro Barrel auf 135 US-Dollar pro Barrel prognostiziert (s. Kapitel II.1.3.2 Auswirkung der Megatrends auf die Rohstoffsituation). Neben Naphtha finden Erdgas, Kohle und nachwachsende Rohstoffe (erste Generation) dort Einsatz, wo ihre Nutzung einen ökonomischen Vorteil darstellt. Die derzeit genutzten Verfahren auf Basis nachwachsender Rohstoffe sind wirtschaftlich.<sup>228</sup>

Die seit Jahrzehnten optimierte Produktion auf dieser Rohstoffbasis trägt zur hohen Wirtschaftlichkeit der chemischen Industrie in Deutschland bei. Die Branche ist tief in die nationale Gesamtwirtschaft integriert. Negative Auswirkungen hätten damit auch Einfluss auf die vielfältigen Abnehmerindustrien. Im internationalen Vergleich bedeutet die einzigartige Verbundstruktur der nordrhein-westfälischen chemischen Industrie einen Wettbewerbsvorteil, der Wettbewerbsnachteile gegenüber anderen Chemiestandorten auszugleichen vermag. Aktuell wie zukünftig besteht gegenüber Erdöl fördernden Regionen sowie den USA ein Nachteil durch höhere Energie- und Rohstoffpreise (z.B. ist der Gaspreis gegenüber USA um den Faktor 2-3 höher). Die nordrhein-westfälische

225 Marsh Risk Management Research (Hg.): Managing Risk on the new frontiers of energy exploration. (2013) RIA Novosti: Russland will weiter nach Arktis-Öl bohren (2013).

226 siehe diverse Geschäftsberichte der Unternehmen der chemischen Industrie; GDCh; DECHEMA; DGMK; VCI (Hg.): Positionspapier: Rohstoffbasis im Wandel. (2010).

227 siehe diverse Geschäftsberichte der Unternehmen der chemischen Industrie.

228 Henkel KGaA (Hg.): Geschäftsbericht 2001. (2002), S. 10.

Chemiebranche dagegen profitiert von ihrer geografischen Nähe zu den Seehäfen Rotterdam in den Niederlanden und Antwerpen in Belgien. So bildet der Rhein eine direkte Transportverbindung zu den Seehäfen. Neben einem dichten Bahn- und Straßennetz bieten Pipelineverbindungen zwischen den nordrhein-westfälischen Chemiestandorten untereinander und den Seehäfen weitere Transportmöglichkeiten. Hieraus historisch gewachsen verfügt Nordrhein-Westfalen über Raffinerien, die eine direkte Versorgung der hiesigen chemischen Industrie mit Naphtha und anderen Erdölprodukten ermöglicht. Die Verbundstruktur in den nordrhein-westfälischen Chemieparks ermöglicht den effizienten Austausch von Stoffen und Energie zwischen Prozessen und Produktionsanlagen und trägt damit zusätzlich zur Wettbewerbsfähigkeit der nordrhein-westfälischen chemischen Industrie bei. Es ist jedoch zu erwarten, dass durch die auch zukünftig bestehenden Preisunterschiede für Energie und insbesondere Erdgas zu anderen Chemieregionen die Raffinerie- und Cracker-Kapazitäten in Nordrhein-Westfalen abnehmen werden, wodurch dieser Wettbewerbsvorteil verloren geht.

### Soziales

Die starke Sozialpartnerschaft zwischen den Tarifparteien ist eine wichtige Säule für die Stärke der Chemieindustrie in Nordrhein-Westfalen. Sie ermöglicht hohe Standards z.B. in den Bereichen der Ausbildung, der Nachwuchsförderung, Vereinbarkeit von Beruf und Familie, Gesundheitsschutz, etc. Die hohe Ertragskraft in der petrobasierten Chemie sichert Arbeitsplätze in Deutschland; die Unternehmen tragen dadurch einen großen Anteil an der Sozialversicherung und den Steuern für die Finanzierung der öffentlichen Aufgaben. Die Arbeitnehmer werden in der chemischen Industrie sehr gut ausgebildet und erhalten überdurchschnittlich hohe Löhne und Sozialleistungen. Gesundheits- und Arbeitsschutzstandards sichern eine Arbeitsqualität, die in anderen weltweiten Produktionsstandorten noch lange nicht gesichert erscheinen. Die Mitbestimmung sichert nicht nur einen Betriebsfrieden, minimiert Produktionsausfälle, sondern ist häufig auch Treiberin für die Ansiedlungsstrategie an Standorten, um Wertschöpfungsketten zu erhalten.

Die Produkte der chemischen Industrie sind Fortschrittstreiber. Durch stete Fortentwicklung der Produkte z.B. aus den Bereichen Lifesciences, Gesundheitsschutz und Medizin trägt die chemische Industrie wesentlichen Anteil an der hohen Lebensqualität in unserer Industriegesellschaft.

### Option A.2: Substitution durch Rohstoffe aus alternativen Primärquellen

#### Substitution von Erdöl durch organische Rohstoffe aus alternativen Primärquellen

Erdöl stellt derzeit den mit Abstand wichtigsten Rohstoff der chemischen Industrie dar. Gemäß der langfristigen Prognosen (d.h. über den Betrachtungszeitraum dieses Berichts hinaus) könnte eine Verknappung des Rohstoffs Erdöl oder des Erdölraffinationsprodukts Naphtha entsprechend veränderter Mobilitätsgewohnheiten und einer damit verbundenen verminderten Nachfrage nach Petrotreibstoffen eintreten. Dies wird nach den Prognosen der IEA und der Prognos-Studie jedoch erst jenseits des Betrachtungshorizonts dieses Berichts eintreten. Diesem sinkenden Angebot des Koppelprodukts Naphtha der Erdölraffination steht möglicherweise eine global steigende Nachfrage nach Naphtha-basierten chemischen Produkten gegenüber. Die Preise für Naphtha könnten dann so stark steigen, dass die Verwendung von Substituten wirtschaftlich wird. Hierzu eignet sich die Ausweitung der bereits genutzten alternativen Rohstoffe Erdgas (Option A.2a), Kohle (Option A.2b) und nachwachsende Rohstoffe erster Generation (Option A.2c). Daneben stellen aber auch nachwachsende Rohstoffe zweiter Generation (Option A.2d) und dritter Generation (Option A.2e) alternative primäre Rohstoffquellen dar. In den jeweiligen Optionen wird betrachtet, ob der Rohstoff in ausreichenden Mengen verfügbar ist und die alternative Rohstoffbasis entsprechend ihrer Zusammensetzung die bisherigen Grundchemikalien substituieren kann.

## Option A.2a: Erdgas

### Beschreibung

Kohle und Erdgas werden in Deutschland derzeit bereits in großem Maßstab zur energetischen Nutzung verwendet, spielen aber als Chemierohstoffe eine, bezogen auf den Mengeneinsatz, geringe Rolle. Erdgas hat einen aktuellen Anteil an organischen, in der Chemie eingesetzten Rohstoffen von 14%<sup>229</sup> und wird heute in der chemischen Industrie überwiegend zur Synthesegasherstellung verwendet (Folgeprodukte s. Tabelle 6). Diese Option prüft die Möglichkeit einer vollständigen bzw. teilweisen Substitution von Erdöl durch Erdgas.

### Begründung

Erdgas ist noch länger verfügbar als Öl; die Infrastruktur wie Verteilernetze und Pipelines sind fast überall an und zwischen den nordrhein-westfälischen Chemiestandorten vorhanden. Entsprechend einer dynamischen Reichweiten-Abschätzung ist eine Ausweitung der stofflichen Nutzung von Erdgas möglich (vgl. Annahmen). Derzeit wird es überwiegend (> 90%) energetisch genutzt. Bei einem zunehmenden Einsatz erneuerbarer Energien und bei einer Einsparung von Heizungserdgas durch verbesserte Wärmedämmung von Wohnungen könnten die derzeit dort genutzten Mengen potenziell als chemischer Rohstoff eingesetzt werden.

### Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte

#### Ökologie

##### *Ressourcenschonung*

Die Ressource Erdöl wird zwar geschont, insgesamt ergibt sich jedoch keine Schonung fossiler Ressourcen. Aus energetischer Sicht ist der Einsatz von Erdgas als Chemierohstoff mit Ausnahme der C1-Produkt-Herstellung weniger effizient als die Naphthaverwendung, da mehr Prozessstufen für die Herstellung von mit Naphtha vergleichbaren Basischemikalien notwendig sind (vgl. technische Substituierbarkeit unter dem ökonomischen Nachhaltigkeitsaspekt Innovation)<sup>230</sup>. Diese benötigen zusätzliche Prozessenergie.

##### *Carbon Footprint*

Das C-H-Verhältnis von Erdgas ist günstiger als jenes des Erdöls. Dies führt zu ca. 25% niedrigeren CO<sub>2</sub>-Emissionen<sup>231</sup> bei der Erdgasverbrennung zur Wärme- und Stromerzeugung sowie für Mobilitätszwecke. Allerdings entstehen bei der Herstellung von chemischen Produkten aufgrund des beschriebenen erhöhten Energieaufwandes mehr Treibhausgase als beim Einsatz von Erdöl. Darüber hinaus besitzt Methan, das bei der Förderung und dem Transport in die Atmosphäre gelangt, eine vielfach höhere Klimarelevanz als CO<sub>2</sub>.

#### Ökonomie

##### *Innovation*

Erdgas enthält als Hauptbestandteil Methan (C1) und kann die aus Naphtha hergestellten chemischen Rohstoffe wie folgt ersetzen: Aus dem rohen Erdgas können Ethan, Propan und Butan sowie weitere, kondensierbare Kohlenwasserstoffe als Einsatzstoffe für Cracker verwendet werden. Diese Option ist an den Erdgasquellen bei der Reinigung des rohen Gases verfügbar. Allerdings enthält Erdgas weniger C4-Schnitt als Erdöl und keine (nennenswerten Mengen an) Aromaten.

229 Datenbasis 2011, in: Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Daten und Fakten zum Thema: Rohstoffbasis der chemischen Industrie. (2013)

230 GDCh; DECHEMA; DGMK; VCI (Hg.): Positionspapier: Rohstoffbasis im Wandel. (2010), S. 15 ff.

231 Emissionen in den Förderländern des Erdgases sowie Transportverluste sind bei der Betrachtung nicht berücksichtigt worden.

Eine überall verfügbare Option ist der Einsatz von erdgasbasiertem Synthesegas zur Herstellung von Naphtha-ähnlichen Alkanen (Fischer-Tropsch-Verfahren). Auch nach diesem Verfahren sind aromatische Verbindungen nicht verfügbar.

Es gibt bereits Verfahren zur Umwandlung von Erdgas in flüssige Kohlenwasserstoffe (Gas-to-Liquid (GtL)), die vereinzelt zur Kraftstoffherstellung genutzt werden, wenn das Erdgas wegen fehlender Pipelineanbindung anderweitig nicht genutzt werden kann.

Durch die, im Vergleich zu anderen Regionen höheren Erdgaspreise in Deutschland ist die Produktionsroute über Erdgas für chemische Grundstoffe in Nordrhein-Westfalen nicht wirtschaftlich und würde an anderen Standorten angewandt werden. Die Abwanderung nordrhein-westfälischer Produktionskapazitäten, z.B. in die USA (vgl. Wettbewerbsfähigkeit) würde die Innovationsfähigkeit der Chemiebranche in Nordrhein-Westfalen senken, da auch das Know-how und die industrielle Finanzkraft für notwendige Forschung und Entwicklungen an den neuen Standorten gebündelt werden.

#### *Wettbewerbsfähigkeit*

Durch die Nutzung von Schiefergas in den USA sind die dortigen Erdgaspreise um den Faktor 2-3 niedriger als in Europa. Diese Differenz bei den Rohstoff- und Energiekosten führt bei einer Substitution des derzeit genutzten Erdöls durch Erdgas zu einer Abwanderung nordrhein-westfälischer Produktionskapazitäten – insbesondere für Grundchemikalien – in die USA. Derzeit erfordert die Versorgung mit Erdgas ein Pipelinennetz, weshalb nur europäische Bezugsquellen genutzt werden können. Durch eine Verflüssigung wäre auch ein interkontinentaler Transport per Schiff möglich. Allerdings gibt es bisher kein Übernahmeterminal für verflüssigtes Erdgas in Deutschland. Da eine zusätzliche Importinfrastruktur für LNG zu einer höheren Versorgungssicherheit beitragen kann, sollte die Option des Baus eines LNG-Terminals hier mit betrachtet werden. Eine Schaffung solcher Übernahmeterminals könnte Deutschland hier in eine deutlich günstigere Position bringen.

Allgemein gilt, dass der Einsatz von Erdgas als Chemierohstoff wirtschaftliche Vorteile bei der Herstellung von C1-Produkten durch die einfachere Prozessführung im Vergleich zur Verwendung von Kohle oder Erdölprodukten bietet. Die Produktion von Grundchemikalien mit mehr Kohlenstoffatomen ist zwar technisch möglich, aber weniger wirtschaftlich als auf Erdölbasis. Bei einer möglichen Substitution besteht für Erdgas als chemischer Rohstoff – z.B. im Vergleich zu nachwachsenden Rohstoffen – der Vorteil, dass bestehende Wertschöpfungsketten beibehalten werden könnten, da erdölbasierten Grundstoffe durch solche aus Erdgas substituiert werden können. Zudem ist in Nordrhein-Westfalen bereits eine Infrastruktur in Form von Verteilernetzen und Pipelines vorhanden. Hierdurch, sowie durch die längere Verfügbarkeit von Erdgas gegenüber Erdöl können sich Investitionen in neue Anlagen und Infrastruktur leichter amortisieren als bei der Nutzung anderer alternativer Rohstoffe. Die Substitution von petrobasierten Treibstoffen für die Mobilität durch Erdgas wäre mit geringeren Kosten (Umrüstungen der Fahrzeuge, Anpassung von Infrastruktur, Erdgas-Tanksäulen etc.) verbunden.<sup>232</sup>

#### **Soziales**

Während der EU-Marktanteil in der globalen chemischen Industrie von 36% in 1999 auf 20% in 2011 gefallen ist, hat sich der Umsatz in absoluten Zahlen dennoch von 295 auf 539 Mrd. Euro fast verdoppelt. Europa profitiert nach wie vor vom weltweiten Wachstum der Wirtschaft und besonders der Chemie, auch wenn sich Produktionskapazitäten in andere aufstrebende Regionen, vor allem

---

232 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Erdgasfahrzeuge – eine saubere Alternative unter: <http://www.bmu.bund.de/themen/luft-laerm-verkehr/verkehr/foerderprojekte/erdgasfahrzeuge/erdgasfahrzeuge-im-aufwind/> (2009).

nach Asien, verlagern<sup>233</sup>. Die Substitution von Öl durch andere Rohstoffe würde die Abwanderung von Produktionsstandorten beschleunigen und zu einem Abbau von Arbeitsplätzen in der hiesigen chemischen Industrie führen. Gleichzeitig werden die verbleibenden Arbeiten wegen geringerer Margen der chemischen Industrie niedriger entlohnt und Ausbildungskapazitäten abgebaut. Außerdem vermindert sich der Beitrag der chemischen Industrie zum Bruttoinlandsprodukt. Steuereinnahmen gehen verloren und können nicht mehr für Bildung, Forschung oder andere öffentliche Aufgaben eingesetzt werden.

## Option A.2b: Kohle

### Beschreibung

Derzeit beträgt der Anteil der Kohle 2%<sup>234</sup> am organischen Rohstoffmix der chemischen Industrie. Eine Ausweitung ist daher denkbar.

### Begründung

Entsprechend der statischen Reichweiten der organischen Rohstoffe ist Kohle der am längsten verfügbare fossile Rohstoff. Zudem bestehen in Nordrhein-Westfalen große Braunkohlevorkommen, die aktuell zu >90% zur Stromerzeugung eingesetzt werden.

### Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte

#### Ökologie

##### *Ressourcenschonung*

Die Substitution von Erdöl durch Kohle führt nicht zu einer Schonung fossiler Rohstoffe. Außerdem besteht hierdurch, abhängig vom angewandten Verfahren, ein erhöhter Kohlenstoffbedarf, bzw. bei der Kohlehydrierung ein zusätzlicher Wasserstoffbedarf.

##### *Carbon Footprint*

Für die chemische Industrie ist ein Rohöleinsatz von ca. 16 Mio. t pro Jahr notwendig. Alternativ ist hierfür der Einsatz von 71 Mio. t Rohbraunkohle, der jährlich etwa 100 Mio. t Braunkohle in Nordrhein-Westfalen abgebauten denkbar. Bei einer stofflichen Nutzung wird im Gegensatz zu einer Verbrennung etwa 50% des Ausgangskohlenstoffs in den Chemieprodukten gebunden. Somit ist theoretisch bei stofflicher Nutzung statt Verbrennung von 71 Mio. t Rohbraunkohle eine Einsparung von jährlich ca. 35 Mio. t CO<sub>2</sub> möglich.<sup>235</sup> Im Vergleich zu der Nutzung von Rohöl als Ausgangskohlenstoff ergibt sich damit ein CO<sub>2</sub>-Anfall, der um den Faktor 2 höher ist. Durch die Einkopplung von erneuerbarem Strom und die Nutzung von Biomasse kann dieser Nachteil jedoch verringert werden.

##### *Emissionen*

Durch den Kohleabbau in Tagebauen wird Staub emittiert.

##### *Biodiversität/Flächennutzung*

Der Kohleabbau in Tagebauen stellt einen lange andauernden Eingriff in die Natur dar. Die Rekultivierung erfolgt in NRW zeitnah und unter Berücksichtigung der ökologischen Standards.

---

233 CHEManager International: Competitiveness Trends in the European Chemicals Industry – European Market Share unter: <http://www.chemanager-online.com/en/news-opinions/graphics/competitiveness-trends-european-chemicals-industry-0> (2012)

234 GDCh; DECHEMA; DGMK; VCI (Hg.): Positionspapier: Rohstoffbasis im Wandel. (2010).

235 Landtag NRW (Hg.): Enquetekommission II Protokoll 5. Sitzung (nichtöffentlich). (2013); TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERGAKADEMIE FREIBERG; Meyer, Bernd: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Rohstoffe“ der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2013).

## Ökonomie

### *Innovation*

„Theoretisch ließe sich der Kohlenstoffbedarf der organischen chemischen Industrie mit einem Viertel der gegenwärtigen deutschen Braunkohlenproduktion decken. Wegen der Umwandlungsverluste und des Prozessenergiebedarfs wäre aber die Hälfte der aktuellen Produktion erforderlich, um die aktuell 8,6 Mio. t Olefine pro Jahr herzustellen.“<sup>236</sup> Langfristig kann der Kohlenstoffbedarf für die Verflüssigungs- und Vergasungsprozesse gesenkt werden, indem Überschussenergie aus Erneuerbaren Energien eingesetzt wird. „Das durch die Kohlechemie partiell substituierbare Produktspektrum der organischen Chemie betrifft die mengenmäßig stärksten Basischemikalien mit einem jährlichen Verbrauch von knapp 1 Mio. t/a (Methanol) bis knapp 5 Mio. t/a (Ethylen).“<sup>237</sup>

Kohle (Braun- und Steinkohle) kann die aus Naphtha hergestellten chemischen Rohstoffe technologisch wie folgt ersetzen: Durch Verkokung können flüchtige Kohlenwasserstoffe und aromatenreicher Teer gewonnen werden (s. Abbildung 10). Die flüchtigen Kohlenwasserstoffe können anstelle von Naphtha in einem Crackprozess zur Herstellung von Ethylen, Propylen, Butene usw. eingesetzt werden. Aus Teer können die Aromaten Benzol, Toluol, Xylole und phenolische Verbindungen gewonnen werden. Mittels Kohlevergasung kann zudem aus Koks Synthesegas hergestellt werden, das im Fischer-Tropsch-Verfahren zu Ethan, Propan und Butan (Coal-to-Liquid (CtL)) weiter umgesetzt wird. Diese Verfahren sind seit Jahrzehnten bekannt. Großtechnisches Know-how stammt aus dem historischen Einsatz des Fischer-Tropsch-Verfahrens (1930er Jahre bis Kriegsende), was in den letzten zehn Jahren eine weltweite Renaissance erfahren hat. Eine ProcessNet-Studie (DECHEMA-VDI-GVC) zieht das Fazit, dass die Kohleverflüssigungstechnik trotz der hohen Verfügbarkeit von Kohle kein zusätzliches Potenzial zur Energieversorgung für Deutschland oder der Welt darstellt<sup>238</sup>. Der innovative Aspekt der Kohlenutzung liegt bei der Betrachtung dieser Option nicht im Bereich Energieversorgung, sondern im Bereich der stofflichen Nutzung mit der künftigen Einbindung von erneuerbarer Überschussenergie.

### *Wettbewerbsfähigkeit*

Kohle ist in vielen Regionen im Tagebau kostengünstig abbaubar und wird wirtschaftlich zur Stromerzeugung eingesetzt. Interessant kann zudem das mögliche Zusammenspiel einer Braunkohlechemie werden, wenn diese Energie als Sekundärprodukt liefert. In Zeiten ausfallenden erneuerbaren Stroms können Gase wie Wasserstoff aus der Kohlvergasung auch energetisch genutzt werden. So könnte Strom oder Wärme über eine Gasturbine umgeleitet und produziert werden. Diese Option könnte das vergleichsweise unwirtschaftliche Vorhalten von Kraftwerkskapazitäten allein für die kurzfristige Stromerzeugung umgehen. Ob ein solches Verfahren mit dem chemischen Prozess kompatibel wäre, ist zu prüfen, da viele Prozesse nicht einfach abgeschaltet werden können, sondern auf Minimalniveaus weiter laufen müssten. In Deutschland wurden kohlebasierte Chemieprozesse nach dem II. Weltkrieg aus Wirtschaftlichkeitsgründen durch Verfahren auf Erdölbasis ersetzt. In China werden entsprechend einer Mitteilung in der Anhörung im Rahmen der Enquetekommission 50% der Ethylen-Produktionsanlagen auf Kohlebasis betrieben.<sup>239</sup> Ob diese Anlagen wirtschaftlich betrieben werden, ist nicht bekannt. Unter Wettbewerbsgesichtspunkten kann ein Zusammenwachsen der Energiewirtschaft und der Chemieindustrie strategisch interessant sein und würde einen neuen konzeptionellen Ansatz voraussetzen. Stromüberschüsse aus Erneuerbaren Energien sowie die Umwandlung in Wasserstoff und die Weiterverarbeitung von Kohlenstoff zu Olefinen oder auch Me-

236 Meyer, Bernd et al.: Landtag NRW (Hg.): Gutachten „Stoffliche Nutzung von Braunkohle“ für die Enquete-Kommission II des Landtags von Nordrhein-Westfalen. (2014), S. 10.

237 ebd., S. 34.

238 processnet.org: Kraftstoffe aus Kohle unter: [http://www.processnet.org/processnet\\_media/FG\\_Chemische\\_Reaktionstechnik-p-8/Chemische\\_Energieforschung-p-89/Kraftstoffe\\_aus\\_Kohle-p-688.pdf](http://www.processnet.org/processnet_media/FG_Chemische_Reaktionstechnik-p-8/Chemische_Energieforschung-p-89/Kraftstoffe_aus_Kohle-p-688.pdf). Online am 29.04.2014.

239 Haas, Thomas (Evonik Industries AG), Landtag NRW (Hg.): Enquetekommission II Protokoll 5. Sitzung (nichtöffentlich). (2013), S. 29.

than, Ammoniak, Methanol, Dimethylether, Oxoprodukten und anderen Basischemikalien könnten Bausteine eines vernetzt zusammenarbeitenden Energie-Chemie-Sektors sein.<sup>240</sup>

Formen der Kohlenutzung werden heute oft pauschal in der Öffentlichkeit negativ wahrgenommen. Eine neutrale oder im Einzelfall positive Haltung zur Kohlenutzung ist nur über einen langfristig und breit angelegten, kritischen Dialog über den Weg der chemischen Nutzung erreichbar. Zur Glaubwürdigkeit und zum positiven Image-Aufbau würde eine „Vorzeiganlage“, an der sich die erwarteten positiven Effekte zur Verbreiterung der Rohstoffbasis, der Minimierung der Umwelteinwirkungen, der Wirtschaftlichkeit und der langfristigen Arbeitsmarkteffekte nachvollziehbar belegen lassen, beitragen.<sup>241</sup>

### Soziales

Der Abbau von Braunkohle im Tagebau kann Gesundheitsgefahren durch Staubemissionen hervorrufen. Die Umsiedlung der Bevölkerung in den Abbaugebieten der heimischen Braunkohle stellt für die Anwohner eine große Belastung dar. Allerdings werden die von der Umsiedlung Betroffenen gesetzlich vor nicht gerechtfertigten Nachteilen geschützt und entschädigt<sup>242</sup>. In der EEFA243-Analyse wird die wirtschaftliche Bedeutung des Braunkohlebergbaus beschrieben: „Über die unbestrittene energiewirtschaftliche Bedeutung für eine sichere und vor allem preiswürdige Energieversorgung hinaus, fällt der rheinischen Braunkohle auch eine nicht zu vernachlässigende gesamt- und regionalwirtschaftliche Bedeutung zu. So waren 2009 bei der RWE Power AG in der Braunkohlennutzung unmittelbar 13.438 Personen beschäftigt. Die Kosten der Braunkohlenproduktion (Löhne, Vorleistungs- und Investitionsgüternachfrage), die im Rheinland anfallen, werden zumindest teilweise in anderen Wirtschaftszweigen nachfragewirksam und stellen so einen wichtigen Impulsgeber für die Region und die gesamte Wirtschaft dar“<sup>244</sup>.

## Substitution von Erdöl durch nachwachsende Rohstoffe

### Beschreibung

Diese Optionen beschreiben das Potenzial der Substitution petrochemischer organischer Rohstoffe durch verschiedene Formen nachwachsender Rohstoffe. Im Folgenden wird das Potenzial der Erdölsubstitution durch nachwachsende Rohstoffe erster Generation (Option A.2c), zweiter Generation (Option A.2d) und dritter Generation (Option A.2e) behandelt. Die Substitution von Erdöl durch nachwachsende Rohstoffe spielt auch im Rahmen der Bioökonomie<sup>245</sup> eine wichtige Rolle. Bioökonomie umfasst auch die Kaskadennutzung von biogenen Reststoffen (s. Option A.3c).

### Begründung

Nach der Prognos-Studie wird der Anteil nachwachsender Rohstoffe am organischen Rohstoffmix bis 2030 von heute knapp 13% auf 17% moderat ausgeweitet. Für diese moderate Ausweitung sind die entsprechend steigenden Mengen global im Betrachtungszeitraum verfügbar. Nachwachsende Rohstoffe sind im Gegensatz zu Erdöl, Erdgas und Kohle erneuerbar und damit theoretisch unerschöpflich. Nachwachsende Rohstoffe werden auch vor dem Hintergrund des Klimawandels als Erdölsubstitut in Betracht gezogen, weil die resultierenden Produkte einen Kohlenstoffspeicher dar-

240 Meyer, Bernd et al.: Landtag NRW (Hg.): Gutachten „Stoffliche Nutzung von Braunkohle“ für die Enquete-Kommission II des Landtags von Nordrhein-Westfalen. (2014), S. 16, 74.

241 ebd., S. 108 f.

242 Meurer, Sebastian: Die Umsiedlung ist beendet. In: *RP Online* (2008)

243 EEFA Institut: Energy Environment Forecast Analysis, Berlin und Münster.

244 Buttermann, Hans Georg; Freund, Florian; Hillebrand, Elmar: EEFA – Energy Environment Forecast Analysis GmbH & Co. KG (Hg.): Bedeutung der rheinischen Braunkohle – sektorale und regionale Beschäftigungs- und Produktionseffekte. (2010), S. 3.

245 Die Bioökonomie umfasst alle industriellen und wirtschaftlichen Sektoren und ihre dazugehörigen Dienstleistungen, die biologische Ressourcen (Pflanzen, Tiere, Mikroorganismen) produzieren, ver- und bearbeiten oder in irgendeiner Form nutzen.

stellen können. Andererseits soll geprüft werden, ob eine solche Ausweitung der stofflichen Nutzung nachwachsende Rohstoffe in der chemischen Industrie negative Auswirkungen auf die Versorgung der Weltbevölkerung mit Nahrungsmitteln haben kann.

Die nordrhein-westfälische Landesregierung hat 2013 eine Bioökonomiestrategie beschlossen. Sie beschreibt, wie das Thema kohärent mit anderen Strategien und Maßnahmen bearbeitet werden soll. Konkrete fachliche Schritte sollen in einem dialogorientierten Prozess entwickelt werden. Als eine Maßnahme wird das Bioeconomy Science Center (BioSC), ein Forschungsnetzwerk aus Instituten der Universitäten Aachen, Bonn und Düsseldorf in Kooperation mit dem Forschungszentrum Jülich, durch das Land mit rund 5,8 Mio. Euro pro Jahr für zehn Jahre gefördert.

### **Option A.2c: Nachwachsende Rohstoffe erster Generation (Agrarbiomasse)**

#### **Beschreibung**

Diese Option beschreibt das Potenzial der Substitution fossiler organischer Rohstoffe durch nachwachsende Rohstoffe, die bereits jetzt wirtschaftlich nutzbar sind. Die mögliche Ausweitung einer stofflichen Nutzung dieser nachwachsenden Rohstoffe erster Generation steht in Konkurrenz mit der Nutzung als Nahrungs- und Futtermittel, zur Energiegewinnung sowie zur Herstellung von Treibstoffen. Gerade im Hinblick auf eine mögliche Konkurrenz zur Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln werden in dieser Option auch die Auswirkungen einer ressourcenschonenderen Ernährungsweise betrachtet.

#### **Begründung**

Nachwachsende Rohstoffe erster Generation finden bereits vielfach als Grundstoff in der chemischen Industrie Verwendung. Ein Trend zur noch stärkeren Nutzung nachwachsender Rohstoffe in der chemischen Industrie ist erkennbar<sup>246, 247</sup>.

#### **Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte**

##### **Ökologie**

###### *Ressourcenschonung*

Durch die Substitution von Erdöl durch nachwachsende Rohstoffe erster Generation werden fossile Ressourcen geschont. Für den Anbau, die Ernte, den Transport und die Verarbeitung dieser Rohstoffe sind weitere Ressourcen wie Wasser, Dünger, Energie und Treibstoffe erforderlich. Dies kann Folgewirkungen für den Wasser- und Ökohaushalt der Regionen haben sowie versteckte CO<sub>2</sub>-Belastungen bedeuten. Ob mittels Substitution von Erdöl durch nachwachsende Rohstoffe insgesamt Ressourcen geschont werden, kann nur durch Erstellen einer Ökobilanz bestimmt werden. Wichtig für die korrekte Bilanzierung erscheint, dass nicht nur Quellenbilanzen, sondern komplette Prozess- und Wirkungsbilanzen entstehen.

###### *Carbon Footprint*

Pflanzen nehmen CO<sub>2</sub> aus der Luft auf. Im Gegensatz zur Nutzung fossiler Rohstoffe wird somit bei der Verwendung kein unterirdisch eingelagerter Kohlenstoff emittiert. Eine verstärkte stoffliche Nutzung bindet den enthaltenen Kohlenstoff und stellt damit eine Kohlenstoffsénke dar. Andererseits sind die Emissionen aus dem eingesetzten Mineraldünger und dem Energieaufwand zur Produktion und Verarbeitung (sofern nicht aus erneuerbaren Energien) sowie für den Transport zu berücksichtigen.

246 Haas, Thomas (Evonik Industries AG), Landtag NRW (Hg.): Enquetekommission II Protokoll 5. Sitzung (nichtöffentlich). (2013), S. 64.

247 Peters, Martina (Bayer Technology Services GmbH), ebd., S. 64.

Aktuell finden nachwachsende Rohstoffe erster Generation neben ihrer Nutzung als Lebens- und Futtermittel vor allem Verwendung zur Energiegewinnung und Treibstoffherstellung.

Werden Waldflächen oder Grasland zu Anbauflächen umgewidmet, führt dies zu zusätzlichen Treibhausgasemissionen.

### *Biodiversität/Flächennutzung*

Betrachtungen, die nachwachsende Rohstoffe in den Blick nehmen, müssen sich vor allem auf die Schlüsselressource Anbaufläche konzentrieren. Der Import von virtuellem Land<sup>248</sup> in die EU hat stark zugenommen<sup>249</sup>. Schon heute werden nachwachsende Rohstoffe und Nahrungsmittel nach Europa und Deutschland zur Bedarfsdeckung importiert. Die benötigte Ackerfläche für den EU-Import entspricht mit 29 Mio. ha in etwa der Fläche Italiens<sup>250</sup>. Der Einsatz nachwachsender Rohstoffe erster Generation als Erdölsubstitut in der chemischen Industrie erfordert zusätzliche Fläche. Hierdurch ist mit einem Verlust an Biodiversität durch Flächenumwandlung von Grasland, Savannen und Wäldern vorwiegend im Tropengürtel zu rechnen<sup>251</sup>. Der neue Flächenbedarf steht in Konkurrenz zum Anbau von Nahrungs- und Futtermittel sowie Energiepflanzen.

### **Einfluss einer ressourcenschonenderen Ernährung:**

65% der Lebensmittelabfälle gelten als vermeidbar<sup>252</sup>. Würden diese vollständig vermieden, würde sich der deutsche Bedarf an Ackerfläche für Nahrungsmittel um 2,4 Mio. ha reduzieren. Folglich würden statt der heute 6,8 Mio. im Ausland benötigten Hektar nur noch 4,4 Mio. ha gebraucht. Hierdurch könnte die inländische Nachfrage nach landwirtschaftlichen Primärprodukten ohne Netto-Importe befriedigt werden.<sup>253</sup>

In Nordrhein-Westfalen besteht durch Umwidmung von landwirtschaftlichen Flächen, die derzeit zum Anbau von Futterpflanzen bzw. Biomasse zur energetischen Verwertung genutzt werden, ein größeres Flächenpotenzial zum Anbau nachwachsender Rohstoffe erster Generation. Vor allem im nördlichen und östlichen Nordrhein-Westfalen gibt es große Kapazitäten an Biogasanlagen, die unter anderem mit Gülle und Mist betrieben werden. Nebenbei wird viel Mais angebaut, der sowohl als Futtermittel als auch direkt in Biogasanlagen verwendet wird, die nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) gefördert werden<sup>254</sup>. Ohne diese Förderung wäre die Biogaserzeugung nicht wirtschaftlich. Auf den heute subventionierten Flächen könnten Pflanzen angebaut werden, die die chemische Industrie mit nicht subventionierten Rohstoffen versorgen.

## **Ökonomie**

### *Innovation*

Nachwachsende Rohstoffe erster Generation werden – im Gegensatz zu Biomasse zweiter und dritter Generation – bereits seit langem in der chemischen Industrie erfolgreich verwendet.

---

248 Umrechnung der importierten flächenverbrauchenden Güter in Landfläche.

249 Witzke, Harald (Humboldt Universität Berlin), ebd., S. 30.

250 WWF Deutschland (Hg.): Fleisch frisst Land. (2013).

251 Bringezu, Stefan; O'Brien, Meghan; Schütz, Helmut: Beyond biofuels: Assessing global land use for domestic consumption of biomass. In: Land Use Policy (2012), 1, S. 224–232.

252 Bringezu, Stefan (Wuppertal Institut), Landtag NRW (Hg.): Enquetekommission II Protokoll 5. Sitzung (nichtöffentlich). (2013), S. 38.

253 Noleppa, Steffen; Witzke, Harald von: WWF Deutschland (Hg.): Tonnen für die Tonne. (2012), S. 38.

254 Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V (Hg.): Potenzialatlas – Bioenergie in den Bundesländern. (2013), S. 66.

Aus nachwachsenden Rohstoffen können die C1-Basischemikalien Methan und Methanol biotechnologisch sowie mittels Vergasung (Pyrolyse) über Synthesegas gewonnen werden. Der C2-Grundstoff Ethanol kann sowohl chemisch als auch biotechnologisch hergestellt und dann zu Ethylen (C2), Propylen (C3) und Butadien (C4) umgewandelt werden. Darüber hinaus ist die biotechnologische Produktion von Propandiol (C3) und Butandiol (C4) möglich. Die Herstellung von Aromaten aus nachwachsenden Rohstoffen ist bislang schwierig, aber technisch über Vergasung und den Einsatz des entstehenden Synthesegases möglich. Neben der Herstellung von Naphtha-Analoga (Drop-in-Basischemikalien) kann alternativ auch die Syntheseleistung der Natur – insbesondere für länger-kettige Kohlenstoffverbindungen – genutzt werden. Hierbei stehen als Plattformchemikalien Dicarbonsäuren (Kohlenstoffverbindung mit  $C \geq 3$  und zwei Säuregruppen) sowie C5- und C6-Zucker im Fokus, die über neue Wertschöpfungsketten zum gewünschten Produkt führen können (vgl. Kapitel III.4.3).

Der Aufschluss nachwachsender Rohstoffe erster Generation sowie ihre Überführung in Grundchemikalien ist nach wie vor (groß)technisch noch nicht befriedigend gelöst. Dies gilt insbesondere für die Nutzung der von der Natur gebildeten Grundbausteine, die eine Anpassung der nachfolgenden Wertschöpfungsketten erforderlich machen. Hieran sowie an der Optimierung bereits entwickelter Verfahren (vor allem für eine verbesserte Ressourceneffizienz und Wirtschaftlichkeit) wird intensiv geforscht. Es ist damit zu rechnen, dass im Laufe des Betrachtungshorizonts neue verbesserte Verfahren entwickelt und großtechnisch realisiert werden. Dennoch profitieren bestehende petrochemische Verfahren von einem jahrzehntelangen Erfahrungs- und Wissensvorsprung.

Die Fähigkeit zur Markterschließung wird voraussichtlich eher bei hochpreisigen Konsumprodukten und einer stofflichen Nutzung gegeben sein oder bei Produkten, für die der Konsument bereit ist, einen Mehrpreis aufgrund teurerer nachwachsender Rohstoffe zu bezahlen. Generell ist die gesellschaftliche Akzeptanz für die Nutzung nachwachsender Rohstoffe hoch, jedoch bei nachwachsenden Rohstoffen erster Generation aufgrund der Konkurrenz zu Nahrungsmitteln tendenziell geringer als bei anderen nachwachsenden Rohstoffen.

#### *Wettbewerbsfähigkeit*

Auch zukünftig ist davon auszugehen, dass Agrarrohstoffe preislich nur eingeschränkt wettbewerbsfähig im Vergleich zu fossilen Rohstoffen sein werden (siehe vorstehend „Substitution von Erdöl durch nachwachsende Rohstoffe“). Darüber hinaus ist ihr Transportradius (mit Ausnahme von Ölfrüchten) mit max. 100 km deutlich kleiner. Nordrhein-Westfalen ist nicht in der Lage, den Bedarf hiesiger Chemieunternehmen an nachwachsenden Rohstoffen erster Generation auf eigenen Produktionsflächen zu bedienen. Aufgrund des eingeschränkten Transportradius (vor allem aus zuckerhaltigen Agrarpflanzen) ist davon auszugehen, dass neue Produktionskapazitäten zum Aufschluss nachwachsender Rohstoffe erster Generation und ihrer Umwandlung in Plattformchemikalien nicht in Nordrhein-Westfalen, sondern in rohstoffreichen Weltregionen wie Brasilien und Malaysia entstehen werden. Für Agrarbiomasse mit einer hohen Transportwürdigkeit (z.B. Ölfrüchte) ist ein Transport über das Infrastrukturnetz zu NRW-Standorten möglich.

Die Erdölsubstitution durch nachwachsende Rohstoffe erster Generation erfordert den Umbau bestehender Wertschöpfungsketten in der chemischen Industrie. Dieser Umbau ist mit großen Investitionen der Industrie für neue Anlagen bzw. für die Anpassung der Produktionsstandorte und Chemie-parks in Nordrhein-Westfalen verbunden. Darüber hinaus sind Investitionen seitens Industrie und Staat in Forschung zur Entwicklung geeigneter Technologien hierfür erforderlich.

## Soziales

### *Beschäftigung*

Der vorstehende Veränderungsprozess kann zu einem Wegfall gut bezahlter Arbeitsplätze führen. Selbst wenn die Ansiedlung von Bioraffinerien in Nordrhein-Westfalen wirtschaftlich sein wird, ist hierdurch zwar mit einem Beschäftigungspotenzial vorwiegend für Saisonarbeitskräfte in der Landwirtschaft zu rechnen, jedoch nicht in der chemischen Industrie. Zudem würden Bioraffinerien sehr wahrscheinlich wegen der benötigten Prozessinfrastruktur an oder in der Nähe von bestehenden Chemiestandorten bzw. Chemieparcs aufgebaut werden, sodass kein zusätzliches Beschäftigungspotenzial im ländlichen Raum entsteht. Die Nutzung nachwachsender Rohstoffe erster Generation erfordert neues Wissen und damit eine veränderte Ausbildung.

### *Lebensqualität*

Sollte eine Ausweitung der stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe eine Verknappung von Nahrungsmitteln zur Folge haben, bedeutete dies gravierende soziale Nachteile für die betroffenen Menschen<sup>255</sup>. Gegenwärtig leben knapp eine Milliarde Menschen von weniger als einem Euro pro Tag, was dazu führt, dass wenigstens 70% der Haushaltseinkommen für Lebensmittel aufgewendet werden müssen.

### *Sicherung der Finanzierung staatlicher Gemeinaufgaben*

Bei einer Abwanderung von Produktionsstandorten gingen Nordrhein-Westfalen entsprechende Steuereinnahmen mit den bereits oben beschriebenen Folgen verloren.

### *Verbesserung ethischer Standards*

Die Produktion nachwachsender Rohstoffe außerhalb Deutschlands bzw. der EU schränken die Möglichkeiten der Einflussnahme auf eine soziale Nachhaltigkeit der Produktion ein. Allerdings haben sich die meisten börsenorientierten Unternehmen zur globalen Einhaltung ethischer und sozialer Standards in ihren Unternehmensrichtlinien verpflichtet. Fast alle DAX-Unternehmen der chemischen Industrie veröffentlichen ihre Leistungen zur Einhaltung der Standards in den Geschäftsberichten und sind im Dow Jones Sustainability Index gelistet. Die Einkaufsabteilungen dieser Unternehmen sind daher verpflichtet, die Einhaltung der Standards beim Rohstoffbezug zu beachten<sup>256</sup>.

## **Option A.2d: Nachwachsende Rohstoffe zweiter Generation (lignocellulose-haltige Biomasse)**

### **Beschreibung**

Diese Option beschreibt das Potenzial der Substitution petrochemischer organischer Rohstoffe durch lignocellulosehaltige Biomasse (nachwachsende Rohstoffe zweiter Generation).

### **Begründung**

Nachwachsende Rohstoffe zweiter Generation eignen sich nicht als Nahrungs- oder Futtermittel. Die Nutzung lignocellulosehaltiger Biomasse als nachwachsender Chemierohstoff stellt damit eine Alternative zur Ausweitung der stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe erster Generation dar. Zudem ist Deutschland größter Holzproduzent Europas<sup>257</sup>.

255 Witzke, Harald (Humboldt Universität Berlin) Landtag NRW (Hg.): Enquetekommission II Protokoll 5. Sitzung (nichtöffentlich). (2013), S. 6.

256 SAM Sustainable Asset Management AG (Hg.): DJSI 2012 Review Results. (2012).

257 Food + Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (Hg.): FAO Statistical Yearbook 2013- World food and agriculture. (2013).

## Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte

### Ökologie

#### *Ressourcenschonung*

Die Nutzung lignocellulosehaltiger Biomasse als Chemierohstoff schont fossile Ressourcen sowie nachwachsende Rohstoffe erster Generation, die damit zur Deckung des Nahrungs- und Futtermittelbedarfs zur Verfügung stehen. Im Vergleich zur Produktion von Agrarbiomasse ist die Bewirtschaftung von Waldfläche rohstoffschonend. Fossile Ressourcen kommen jedoch unter Umständen bei der Herstellung von Dünger und Pestiziden sowie in Form von Treibstoffen oder zur Gewinnung benötigter Energie zum Einsatz.

#### *Carbon Footprint*

Ebenso wie nachwachsende Rohstoffe erster Generation wirkt sich die stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe zweiter Generation im Vergleich zu fossilen Rohstoffen positiv auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz bezüglich entsprechender Emissionen bis zum Ende des Produktlebens aus. Die stoffliche Nutzung lignocellulosehaltiger Biomasse bedeutet auch einen Vorteil gegenüber deren energetischer Nutzung, da Kohlenstoff zunächst im Produkt gebunden bleibt. Eine vermehrte Holznutzung mindert jedoch die CO<sub>2</sub>-Speicherung der entsprechenden Wälder. Es ist davon auszugehen, dass der Anbau nachwachsender Rohstoffe zweiter Generation gegenüber dem erster Generation pro Hektar zumeist weniger Emissionen zur Folge hat.

#### *Biodiversität/Flächennutzung*

Die Holzernte ist mit negativen Einflüssen auf die Biodiversität wie Verlust von organischer Substanz, Bodenverdichtung und Erosion verbunden. Durch eine verstärkte stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe zweiter Generation besteht die Gefahr, dass hierzu Waldnaturschutzflächen umgewidmet werden.

### Ökonomie

#### *Innovation*

Aus Cellulose und Hemicellulose lassen sich heute bereits C6- und C5-Zucker gewinnen. Eine Umwandlung dieser Stoffe aus nachwachsenden Rohstoffen erster Generation ist jedoch aufgrund der hier nicht nötigen Ligninabtrennung einfacher und damit auch wirtschaftlicher. Das Lignin aus nachwachsenden Rohstoffen zweiter Generation stellt eine Quelle für Aromaten dar, die durch keine andere Biomasseform in dieser Menge hergestellt werden können. Allerdings gibt es bislang keine zufriedenstellende (groß)technische Lösung für dessen Aufschluss. Hieran wird intensiv geforscht. Die Produktion ganz neuer, hochwertiger Chemikalien aus lignocellulosehaltiger Biomasse (die aus anderen Biomasseformen nicht ohne Weiteres abgeleitet werden können) ist denkbar. Ligninbasierte Chemieproduktionen werden bereits pilotiert, bislang ist die Wirtschaftlichkeit dieser Prozesse allerdings nicht gegeben. Ob eine großtechnische Realisierung im Betrachtungshorizont möglich ist, kann derzeit nicht abgeschätzt werden. Die Akzeptanz von Bioraffination in Deutschland wurde im Zuge der Biocore-Studie bei relevanten Interessensgruppen als positiv bewertet<sup>258</sup>.

#### *Wettbewerbsfähigkeit*

Eine Studie, die verschiedene Bioraffineriekonzepte untersucht hat, kommt zu dem Ergebnis, dass ein wirtschaftlicher Betrieb verschiedener Bioraffinerietypen unter der Voraussetzung einer geringen Subventionierung bzw. aufgrund von Nachhaltigkeitserwägungen der Käufer und Konsumenten

höherer erzielbarer Preise möglich wäre.<sup>259</sup> Die Nutzung von Holz als chemischem Grundstoff erfordert Großinvestitionen in eine Holzbioraffinerie mit eigener Wertschöpfungskette. Lignocellulose als Grundstoff einer solchen Holzbioraffinerie ist chemisch und biotechnologisch nicht leicht aufzuschließen, was die Möglichkeiten ihrer wirtschaftlichen Nutzung einschränkt. Die Überführung von cellulosehaltiger Biomasse in Ethanol wird von der Firma INEOS bereits wirtschaftlich in einer großindustriellen Anlage in den USA betrieben<sup>260</sup>. Ethanol ist jedoch als geringwertige chemische Substanz nicht die beste Plattformchemikalie als Produkt der Holzbioraffination.

## Soziales

### *Beschäftigung*

Eine Studie stellt fest, dass die regionale Wertschöpfung in Deutschland verbessert würde. Vor allem für den ländlichen Raum stellt dies eine wirtschaftliche Entwicklungsperspektive mit Ausbau von Beschäftigung dar.<sup>261</sup> Allerdings besteht dieses Beschäftigungspotenzial nur sehr eingeschränkt für die chemische Industrie.

## Option A.2e: Nachwachsende Rohstoffe dritter Generation (Algenbiomasse)

### Beschreibung

Die Option A.2e betrachtet das Potenzial von Algenbiomasse (nachwachsende Rohstoffe dritter Generation) für die Erdölsubstitution.

### Begründung

Algen haben einen höheren Hektarertrag als nachwachsende Rohstoffe erster und zweiter Generation (vgl. Tabelle 10). Darüber hinaus ist ihre Produktion nicht an Agrarflächen gebunden und die Biomasse kann im Gegensatz zu den anderen Biomasseformen vollständig verwertet werden.

### Auswirkungen auf Nachhaltigkeitskriterien

## Ökologie

### *Ressourcenschonung*

Nachwachsende Rohstoffe dritter Generation bieten wie andere Biomasseformen das Potenzial zur Schonung fossiler Ressourcen. Dies ist jedoch nur dann gegeben, wenn für Düngung, Energie zur Produktion und Aufarbeitung nicht mehr fossile Rohstoffe eingesetzt werden, als für das analoge petrochemische Produkt. Hier ist vor allem der große energetische Aufwand zur Trocknung und Extraktion der Algen für die Energiebilanz unvorteilhaft.

### *Carbon Footprint*

Analog zu den Ausführungen zur Ressourcenschonung wirkt sich die CO<sub>2</sub>-Bindung aus der Atmosphäre oder aus Abgasströmen positiv auf die Ökobilanz aus. Diesen Einsparungen stehen jedoch Emissionen aus der Erzeugung der Energie für Aufarbeitungsprozesse gegenüber.

259 Piotrowski, Stephan et al.: nova Institute GmbH (Hg.): New nova Methodology for Techno-Economic Evaluations of Innovative Industrial Processes (nTEE). (2014).

260 Schill, Sue: Ineos declares commercial cellulosic ethanol online in Florida. In: BIOMASS Magazine (2013).

261 Piotrowski, Stephan et al.: nova Institute GmbH (Hg.): New nova Methodology for Techno-Economic Evaluations of Innovative Industrial Processes (nTEE). (2014).

### *Biodiversität/Flächennutzung*

Die Produktion nachwachsender Rohstoffe dritter Generation ist nicht an landwirtschaftlich nutzbare Flächen gebunden, was einen Vorteil gegenüber nachwachsenden Rohstoffen erster und teilweise auch zweiter Generation bedeutet.

### **Ökonomie**

#### *Innovation*

Es gibt zurzeit nur wenige Beispiele für die Produktion von Algenbiomasse im großtechnischen Maßstab<sup>262</sup>. Ein Durchbruch ist bisher aber nicht gelungen. Dies ist vor allem auf den hohen Energiebedarf für die Produktion und Aufarbeitung der Algen zurückzuführen, der eine Nutzung vielfach unwirtschaftlich macht. Es gibt derzeit intensive Forschungsbemühungen zur Optimierung hin zu einer wirtschaftlichen Algenbiomasseproduktion. Diese Bestrebungen werden durch die Vorgabe einer 2,5%-igen Algen-Biodieselquote bis 2030<sup>263,264</sup> durch das Europäische Parlament beflügelt. Ob eine Ausweitung von Algenproduktionskapazitäten wirtschaftlich innerhalb des Betrachtungshorizonts dieser Enquetekommission möglich ist bzw. realisiert werden wird, ist derzeit nicht absehbar.

#### *Wettbewerbsfähigkeit*

Den hohen Hektarerträgen nachwachsender Rohstoffe dritter Generation steht ein unvorteilhafter Energieaufwand gegenüber. Derzeit stellen Chemieprodukte aus Algenbiomasse einen Nischenmarkt dar.

### **Soziales**

#### *Beschäftigung*

Da Algen in wärmeren Regionen besser wachsen, besteht Beschäftigungspotenzial vor allem außerhalb Deutschlands. Daher ist mit einem Verlust von Arbeitsplätzen in der nordrhein-westfälischen Chemieindustrie bei einer Substitution von Erdöl durch Algenbiomasse zu rechnen.

### **Anorganische Rohstoffe: Substitutionspotenziale**

Die heimischen Rohstoffe Stein- und Kalisalz sind bei Zugrundelegung der gegenwärtigen Abbau-mengen praktisch unerschöpflich und werden deshalb hier nicht weiter betrachtet.

Die Reichweiten der durch Bergbau geförderten anorganischen Rohstoffe können durch Erschließung und Nutzung zusätzlicher primärer Quellen verlängert werden. Beispiele sind marine Ressourcen. In der nachfolgenden Option 2f wird beschrieben, für welche Rohstoffe marine Ressourcen wie Manganknollen zusätzliche Primärrohstoffquellen darstellen.

### **Option A.2f: Manganknollen und andere maritime Primärrohstoffquellen für anorganische Rohstoffe**

#### **Beschreibung**

Die Tiefsee bietet mit Manganknollen, polymetallischen Sulfiden und Krusten ein sehr großes, bisher nicht angetastetes Ressourcenpotenzial zur Gewinnung mineralischer und metallischer Rohstoffe. Die Manganknollen enthalten neben Mangan auch Nickel, Kupfer, Kobalt, Zink, Molybdän, Lithium und Seltene Erden. Aus den maritimen Massivsulfiden sind Kupfer, Gold, Silber, Zink, Blei, Indium, Selen, Germanium und Wismut gewinnbar<sup>265</sup>. In dieser Option soll das Substitutionspoten-

262 Die Algenversuchsanlage am Innovationszentrum Kohle in Niederaußem.

263 2009/28/EG (Erneuerbare-Energien-Richtlinie).

264 2009/30/EG (Kraftstoff-Qualitätsrichtlinie).

265 Steinbach, Volker; Wilken, Hildegard: Forschung auf dem Rohstoffsektor in der BGR (2012).

zial dieser Quellen als Alternative zum Abbau der genannten anorganischen Rohstoffe im Bergbau betrachtet werden.

### **Begründung**

Durch den zunehmenden Ressourcenbedarf einer wachsenden Weltbevölkerung wird mit einer Verteuerung anorganischer, insbesondere metallischer Rohstoffe gerechnet. Darüber hinaus werden zunehmend physische Lieferrisiken vorausgesagt. Metallische anorganische Rohstoffe sind teilweise und temporär knapp und unterliegen starken zyklischen Preisänderungen. Sie sind wichtig als Werkstoffe für Reaktoren, Katalysatoren und als Bauelemente für elektrische und elektronische Apparate. Eine Substitution knapper Stoffe durch andere ist stofflich und technologisch möglich. Substitute sind jedoch häufig weniger wirksam. Alternativen Primärrohstoffen kommt damit eine besondere Bedeutung zur Sicherung der Rohstoffversorgung zu. Seit 2006 erkundet die BGR ein Explorationsgebiet im Ostpazifik<sup>266</sup>.

### **Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte**

#### **Ökologie**

Durch die Absaugung der Bodenschätze mit der heutigen Technik trübt sich das Tiefenwasser. Dadurch werden die marinen Organismen gestört. Zurzeit wird daran gearbeitet, die Technik ökologisch verträglicher zu gestalten.

#### **Ökonomie**

Bei der Gewinnung der Rohstoffe aus der Tiefsee handelt es sich um eine bisher kaum erprobte, sehr aufwändige Technik. Es werden jedoch große gewinnbare Mengen erwartet. Durch die Lage der Fundstellen in internationalen Gewässern können sich alle Nationen Schürfrechte sichern. Die technische Machbarkeit wurde demonstriert; die Wirtschaftlichkeit kann zurzeit noch nicht beurteilt werden und ist besonders von der Marktentwicklung für die entsprechenden Rohstoffe abhängig.

#### **Soziales**

Durch die Rohstoffgewinnung aus alternativen Quellen wird die Rohstoffversorgung der heimischen Industriestandorte gesichert oder gar verbessert, wodurch auch Arbeitsplätze in der chemischen Industrie erhalten bleiben. Darüber hinaus besteht Beschäftigungspotenzial im Bereich der Rohstoffgewinnung. Dortige Arbeitsplätze sind anspruchsvoll hinsichtlich der Ausbildung der Beschäftigten und ermöglichen hohe Einkünfte.

### **Option A.3: Substitution durch alternative Rohstoffe aus Sekundärquellen**

#### **Beschreibung**

Diese Optionen beschreiben das Substitutionspotenzial von Sekundärrohstoffen, die derzeit als Emissionen oder Abfall anfallen und entweder deponiert bzw. emittiert oder energetisch bzw. im Downcycling verwertet werden. Als organische sekundäre Rohstoffquellen werden in dieser Option das Substitutionspotenzial von CO<sub>2</sub> aus Abgasströmen (Option A.3b), von Lebensmittelabfällen und Agrarreststoffen (Option A.3c) betrachtet. Als Sekundärquellen für anorganische Rohstoffe stehen Urban Mining (Option A.3a), technische Abfälle (Option A.3d) und Abwasser (Option A.3e) im Fokus der Betrachtung.

---

266 Die Bundesregierung: Manganknollen – Wertvolle Rohstoffe am Meeresgrund unter: <http://www.bundesregierung.de/Content/Archiv/DE/Archiv17/Artikel/2013/09/2013-09-24-manganknollen-im-pazifik.html> (2013). Online am 10.12.2014.

### Begründung

Eine vermehrte stoffliche Nutzung von Abfällen entspricht den Vorgaben des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG). Darüber hinaus kann die Nutzung von Abfall- und Koppelprodukten einen Beitrag zur Ressourcenproduktivität leisten, die gemäß Einsetzungsbeschluss der Enquetekommission Untersuchungsgegenstand dieses Berichts sein soll.

### Option A.3a: Substitutionspotenzial von Urban Mining als Sekundärrohstoffquelle für organische und anorganische Rohstoffe

#### Beschreibung

Deponien und alte Abraumhalden aus früherer Bergbautätigkeit sind eine potenzielle Sekundärrohstoffquelle. Aber auch Ressourcen, die in Gebäude- und Infrastrukturbestand eingebaut sind, stellen eine solche dar. So wird das Kupferpotenzial im Gebäude- und Infrastrukturbestand heute schon größer eingeschätzt als die verbleibenden natürlichen Ressourcen<sup>267</sup>.

#### Begründung

Die steigende Weltbevölkerung, zunehmender Wohlstand und ein urbaner Lebensstil erhöhen die Rohstoffnachfrage und Güterproduktion und damit die Verfügbarkeit von Sekundärrohstoffen am Produktlebensende. Dadurch erhöht sich das Recyclingpotenzial.

#### Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte

##### Ökologie

Die Gewinnung von Sekundärrohstoffen hilft Ressourcen zu schonen. Es ist jedoch auch der Energiebedarf zu berücksichtigen, der zur Gewinnung der Sekundärrohstoffe aufgebracht werden muss. Dieser steigt mit zunehmender Dissipation an. Umweltgefahren ergeben sich durch die Freisetzung von Schadstoffen bei Luft- und Wasserzutritt beim Abgraben von Deponien und Halden. Dies gilt für Bergbauhalden wie auch für Hausmülldeponien.

##### Ökonomie

Es ist heute noch nicht möglich, das wirtschaftliche Potenzial der Altablagerungen zu beurteilen. Zur Abschätzung sind eine Vielzahl von Informationen zur Zusammensetzung der Stoffgemische, zu ihrer Verteilung und Konzentrationen im Lager, zur Zugänglichkeit des Lagers, zu nötigen Maßnahmen zur Vermeidung ökologischer Probleme bei den Abgrabungen etc. notwendig, die derzeit noch nicht vorliegen. Erste Urban Mining-Pilotprojekte beurteilten das Potenzial skeptisch<sup>268</sup>. Das Mengenpotenzial ist allerdings erheblich. Die Rohstoffnachfrage wird sich durch den Technologiefortschritt verändern und unter Umständen bisher nicht genutzte Rohstoffe erfordern. Der Bedarf an diesen Rohstoffen kann nicht durch Urban Mining gedeckt werden.

##### Soziales

Die Gewinnung von Sekundärrohstoffen kann zur Schaffung neuer und Erhaltung vorhandener heimischer Arbeitsplätze in der Recyclingindustrie beitragen. Ein positives Beschäftigungspotenzial für die chemische Industrie wird hierbei aber nicht gesehen.

267 Fricke, Klaus: Urban Mining – nur ein Modebegriff? In: Müll und Abfall (2009), 10, S. 489.

268 Gosten, Alexander: Untersuchung über den Nutzen des Deponierückbaus – Gedanken zum Deponierückbau unter heutigen Rahmenbedingungen am Beispiel einer BSR-Deponie. In: Recycling und Rohstoffe (2009).

### Option A.3b: Vermehrte stoffliche Nutzung von CO<sub>2</sub>

#### Beschreibung

Diese Option beschäftigt sich mit dem Substitutionspotenzial von Kohlendioxid als Kohlenstoffquelle für chemische Synthesen.

#### Begründung

Der anthropogene Ausstoß von CO<sub>2</sub> trägt wesentlich zum Megatrend Klimawandel bei. Eine stoffliche Nutzung und damit Fixierung von CO<sub>2</sub> kann somit einen Beitrag zur Begegnung dieser Entwicklung leisten. Die industrielle organische Chemie beruht derzeit auf der stofflichen und energetischen Koppelnutzung von hauptsächlich fossilen Rohstoffen mit CO<sub>2</sub> als letztem Kopplungsprodukt. Die Nutzung von Kohlendioxid hat das Potenzial, den organischen Stoffkreislauf zu schließen. Nordrhein-Westfalen besitzt eine hohe Dichte an Kraftwerken und Industriestandorten, an denen große Mengen kohlendioxidhaltige Abgase anfallen (z.B. Stahl-, Zement- und Kalkindustrie).

#### Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte

##### Ökologie

###### *Ressourcenschonung*

Die kreislaufwirtschaftliche Nutzung des in (fossilen) Rohstoffen gebundenen Kohlenstoffs hat eine Schonung jeglicher Primärrohstoffe (fossiler sowie nachwachsender) zur Folge. Allerdings ist die Aufreinigung und Aktivierung von Kohlendioxid sehr energieintensiv.

###### *Carbon Footprint*

Die kreislaufwirtschaftliche Kohlenstoffnutzung wirkt sich positiv auf die Ökobilanz aus. Schätzungen gehen von einem CO<sub>2</sub>-Emissionsanteil von 1-7% aus, der in Chemikalien gebunden werden kann.<sup>269</sup> Einen relativierenden Effekt hat die Energiegewinnung aus nicht-erneuerbaren Quellen.

###### *Biodiversität/Flächennutzung*

Die Schonung primärer Rohstoffquellen reduziert den entsprechenden Flächenbedarf.

##### Ökonomie

###### *Innovation*

Die rohstoffliche Nutzung von Kohlendioxid ist Gegenstand intensivster Forschungsanstrengungen. Hierbei kommt der Suche nach geeigneten (chemischen und biologischen) Katalysatoren, der energieeffizienten Gasabscheidung sowie neuen plasmabasierten Verfahren zur Umwandlung von CO<sub>2</sub> in Synthesegas<sup>270</sup> eine bedeutende Rolle zu. Verfahren, die zur CO<sub>2</sub>-Fixierung genutzt werden können, werden in den Kapiteln III.1, III.3 und III.5 diskutiert.

Die Akzeptanz der Senkung der Klimagasreduktion kann als hoch angesehen werden. Vor allem im nordrhein-westfälischen Verbund von großindustriellen Anlagen verschiedener Sektoren könnte eine Nutzung der lokalen Infrastruktur und eine Stärkung der Clusterbildung für ein Stoffstrommanagement, das die Bereiche Energie, Stahl- und Chemieindustrie einbezieht, genutzt werden<sup>271</sup>. Eine

269 Styring et al.: Centre for Low Carbon Futures (Hg.): Carbon Capture and Utilisation in the green economy- Using CO<sub>2</sub> to manufacture fuel, chemicals and materials. (2011), S. 18.

270 Lebouvier, Alexandre; Iwarere Samuel A.; d'Argenlieu Philippe; Ramjugernath Deresh; Fulcheri Laurent: Assessment of Carbon Dioxide Dissociation as a New Route for Syngas Production: A Comparative Review and Potential of Plasma-Based Technologies. In: Energy Fuels (2013), 5, S. 2712–2722.

271 Peters, Martina (Bayer Technology Services GmbH), Landtag NRW (Hg.): Enquetekommission II Protokoll 5. Sitzung (nicht-öffentlich). (2013), S. 9.

gerade für Nordrhein-Westfalen interessante Möglichkeit könnte ferner in der stofflichen Nutzung von Synthesegasströmen – etwa aus der Stahlindustrie – bestehen, die neben CO<sub>2</sub> auch das energiehaltige CO und H<sub>2</sub> enthalten.

### Wettbewerbsfähigkeit

CO<sub>2</sub> steht in Nordrhein-Westfalen in Stahlwerken, Kraftwerken, in der Zement- und Kalkindustrie in großem Umfang in räumlicher Nähe von Chemiestandorten zur Verfügung. Es muss jedoch hinsichtlich der Versorgungssicherheit berücksichtigt werden, dass die Kohlendioxidkonzentration dieser industriellen Abgasströme für den Einsatz in der chemischen Industrie zu gering ist und zudem andere (hochkonzentrierte) Beimengungen (Ruß, Stickstoff) chemische Prozesse stören. Dies macht eine technisch und energetisch sehr aufwändige CO<sub>2</sub>-Atrennung bzw. -Reinigung erforderlich.<sup>272</sup> Des Weiteren macht die Tatsache, dass Kohlendioxidmoleküle sehr stabil und damit reaktionsträge sind, ihre Umsetzung energieintensiv. Somit ist die Wirtschaftlichkeit der CO<sub>2</sub>-Nutzung eingeschränkt. Bisher werden nur wenige Verfahren kommerziell eingesetzt.

Sich ändernde wirtschaftliche und ordnungspolitische Rahmenbedingungen bergen die Gefahr, dass energieintensive Industrien wie Stahl und Zementindustrie in NRW beeinträchtigt werden. Dann fiel dieser Wirtschaftszweig als CO<sub>2</sub>-Quelle für die chemische Industrie weg. Ein weiterer wichtiger Aspekt der Wirtschaftlichkeit von CO<sub>2</sub>-nutzenden Chemieprozessen ist die Verfügbarkeit von Wasserstoff. Würde Kohlendioxid mit Wasserstoff zu Synthesegas umgesetzt, könnte es in einer Vielzahl von Synthesen wirtschaftlich eingesetzt werden<sup>273</sup>. Die Synthesegasherstellung aus CO<sub>2</sub> ist durch die beiden Faktoren Strom und Wasserstoff<sup>274</sup> limitiert. Wie groß das zukünftige Potenzial beider Faktoren ist, wird im Rahmen des Kapitels Energiespeicher untersucht. Die Zeit bis zu der Strom wirtschaftlich als Reduktionsmittel eingesetzt werden könnte, wird mit 10 bis 15 Jahren angegeben.<sup>275</sup>

### Soziales

#### *Beschäftigung*

Ein Stoffverbund von Stahl-, Energie-, Zement- und Kalkindustrie mit der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen macht eine stoffliche Nutzung von CO<sub>2</sub> möglich. Dies könnte die Beschäftigung in den genannten Sektoren sichern und fördern, die für Nordrhein-Westfalen eine besondere industrielle Bedeutung besitzen. Vor allem der synergetische Betrieb unterschiedlicher Wirtschaftszweige bietet das Potenzial für neue Geschäftsmodelle und damit für neue Beschäftigungsmöglichkeiten.

#### *Sicherung der Finanzierung staatlicher Gemeinaufgaben*

Der subventionsfreie Erhalt der genannten Industriesektoren sichert – insbesondere aufgrund ihrer wirtschaftlichen Größe – in großem Umfang Steuereinnahmen, die zur Finanzierung staatlicher Gemeinaufgaben eingesetzt werden können.

## Option A.3c: Vermehrte stoffliche Nutzung von Lebensmittel- und Agrarabfällen

### Beschreibung

Option A.3c betrachtet das Substitutionspotenzial einer stofflichen Nutzung von Bioabfällen (gemäß Bioabfallverordnung) in Form von Lebensmittel- und Agrarabfällen.

272 Meyer, Bernd (Technische Universität Bergakademie Freiberg), ebd., S. 49.

273 Haas, Thomas (Evonik Industries AG), ebd., S. 59.

274 Bringezu, Stefan (Wuppertal Institut), ebd., S. 8.

275 Meyer, Bernd (Technische Universität Bergakademie Freiberg), ebd., S. 18.

## Begründung

In Industrieländern fallen 95-115 kg Lebensmittelabfälle pro Jahr und Einwohner auf dem Acker, im Vertrieb oder in Haushalten an<sup>276</sup>. Derzeit werden sie entweder kompostiert, zu Biogas umgesetzt oder energetisch verwertet, weshalb hier das Potenzial zur stofflichen Nutzung betrachtet wird.

## Auswirkungen auf Nachhaltigkeitskriterien

### Ökologie

#### *Ressourcenschonung*

Die stoffliche Nutzung von Lebensmittelabfällen macht bisher ungenutzte Ressourcen nutzbar. Hierdurch kann eine Schonung nachwachsender oder fossiler Primärrohstoffe erzielt werden.

#### *Carbon Footprint*

Der Carbon Footprint der weltweiten Lebensmittelabfälle wird mit 3,3 Gt CO<sub>2</sub>-Äquivalenten angegeben<sup>277</sup>. Eine Verminderung der Lebensmittelabfälle wirkt sich entsprechend positiv auf den Ausstoß klimaaktiver Gase<sup>278</sup> aus. Die Ökobilanz des Prozesses der hydrothermalen Carbonisierung von Lebensmittelabfällen ist wegen des hohen Energiebedarfs für die Verkohlung noch zu analysieren.

#### *Biodiversität/Flächennutzung*

Die Substitution primärer Rohstoffe durch Lebensmittel- und Agrarabfällen führt zu einem reduzierten Flächenbedarf zur Gewinnung dieser Rohstoffe. So wird die weltweite Fläche, die für die Produktion von weggeworfenen Lebensmitteln benötigt wird, auf 1,4 Mrd. ha oder 30% der globalen Anbaufläche quantifiziert<sup>279</sup>. Das Flächeneinsparungspotenzial in Deutschland und Nordrhein-Westfalen wurde in Option A.2c beschrieben.

### Ökonomie

#### *Innovation*

Am Beispiel von Kartoffelernteverlusten wurde das Potenzial von Agrarreststoffen im Abschnitt II.1.1.4.1 dargelegt. Lebensmittelabfälle können für die Produktion der Plattformchemikalien Methan (Methanol) und Ethanol aus Vergärungsprozessen eingesetzt werden. Das Potenzial der stofflichen Verwertung ist stark abhängig von einer möglichst sortenreinen Sammlung und Sortierung (d.h. reine Biomasse), was die Akzeptanz der Sammelnden (Landwirte, Groß- und Einzelhandel sowie Endverbraucher) voraussetzt. Erleichtert wird die Sammlung durch die flächendeckende Nutzung einer Biotonne. Allerdings haben 2,3 Mio. Einwohner in Nordrhein-Westfalen derzeit kein entsprechendes Nutzungsangebot.<sup>280,281</sup>

#### *Wettbewerbsfähigkeit*

Die stoffliche Nutzung ansonsten ungenutzter Lebensmittel- und Agrarabfällen stellt einen prinzipiell wirtschaftlichen Vorteil dar. Dieser Vorteil ist auch im Vergleich zur energetischen Nutzung gegeben. Allerdings stehen diesen möglichen Einnahmen finanzielle Aufwendungen für die Samm-

276 Gustavsson, Jenny; Cederberg, Christel; Sonesson, Ulf: Food + Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (Hg.): Global Food Losses and Food Waste. (2011).

277 Food + Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (Hg.): Food wastage footprint – Impacts on natural resources-Summary report. (2013), S. 3.

278 Methan ist um einige Größenordnungen klimaaktiver als CO<sub>2</sub>.

279 ebd., S. 3.

280 Reppold, Vera: Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz (MKULNV) (Hg.): Abfallbilanz Nordrhein-Westfalen für Siedlungsabfälle 2010/2011. (2011), S. 47.

281 Durch den angestrebten Ausbau des Biotonnenangebots in Nordrhein-Westfalen ergeben sich neue Nutzungspotenziale für die stoffliche Nutzung von Biomasse.

lung und Aufbereitung der Abfallströme gegenüber. Darüber hinaus bestehen für viele Abfallströme schon heute Verwendungen, zu denen eine Nutzung als Chemierohstoff in Konkurrenz steht. Die Wirtschaftlichkeit der Nutzung als Chemierohstoff ist nur dann gegeben, wenn diese eine höhere Wertschöpfung verspricht als die Konkurrenzanwendung. Der geringere Energiegehalt von Biomasseabfällen gegenüber dem derzeit eingesetzten Erdöl beschränkt deren wirtschaftlichen Einsatz als Chemierohstoff weiter.

Zurzeit wird der Betrieb von Biogasanlagen zur Energiegewinnung nach dem EEG bezuschusst und ist im freien Wettbewerb unwirtschaftlich. Vorhandene, zumeist für die dezentrale Energiegewinnung errichtete Biogasanlagen sind zudem zu klein für eine stoffliche Nutzung. Infolgedessen wäre der Neubau größerer Anlagen erforderlich. Biogas ist für die stoffliche Nutzung nicht wettbewerbsfähig mit Erdgas, das selbst in Deutschland nur halb soviel kostet wie Biogas.

### *Soziales*

Ob ein Ausbau von Beschäftigung in der Abfallverwertung möglich ist, ist derzeit unklar. Das zusätzliche Beschäftigungspotenzial in der chemischen Industrie ist voraussichtlich gering. Eine Effizienzsteigerung bei dieser Option ist in großem Maße abhängig vom ersten Bearbeitungsschritt, der Sammlung. Alle weiteren Schritte der Weiterverarbeitung sind mit weiteren Verlusten verbunden, sodass der mündige Konsument gefordert ist, Bio- und Hausmüll sachgerecht zu sammeln und zu sortieren. Es kommt nicht zu einer Minderung der Lebensqualität, da ausschließlich Lebensmittel genutzt werden, die nicht bzw. nicht mehr als Nahrung verwendet werden.

## **Option A.3d: Vermehrte stoffliche Nutzung technischer Abfälle**

### **Beschreibung**

Diese Option beschäftigt sich mit dem Potenzial des vermehrten stofflichen Recyclings technischer Abfälle. Darunter fallen Abfälle aus dem Bereich des Konsums (z.B. Autos und Elektrogeräte), wie auch Abfälle der Bauteile des Maschinen und Anlagenbaus (z.B. Windräder).

### **Begründung**

Der Zuwachs technischer Geräte und Apparate ist groß. Innovationen im Bereich der Werkstoffe halten nicht mit Innovationen für deren stoffliche Wiederverwertung Schritt. Die Möglichkeit einer späteren wirtschaftlichen Verwertungsmöglichkeit dieser Abfälle außerhalb der thermischen Verwertung könnte ihre Lagerung auf speziellen Halden sinnvoll erscheinen lassen. Außerdem wird die Wirtschaftlichkeit der stofflichen Verwertbarkeit einer Vielzahl technischer Abfälle eher gegeben sein, wenn größere Mengen zu recyceln sind.

Die chemische Industrie könnte von einer einfacheren Verfügbarkeit z.B. von Katalysatormetallen profitieren.

### **Auswirkungen auf Nachhaltigkeitskriterien**

#### **Ökologie**

##### *Ressourcenschonung*

Bergbauliche Ressourcen können durch eine verstärkte Rezyklierung von technischen Geräten geschont werden. Die Energieintensivität der Rezyklierungsverfahren ist abhängig von den angewandten Verfahren und muss mit der Rohstoffgewinnung aus primären Quellen verglichen werden.

### *Carbon Footprint*

Ob sich die Verwertung technischer Geräte positiv oder negativ auf den Carbon Footprint auswirkt, muss mit dem Ausstoß an Klimagasen verglichen werden, der mit dem gleichen Ertrag konventionell produzierter Rohstoffe einhergeht, was in der Regel erst durch eine Lebenszyklusanalyse (Ökobilanz) zuverlässig abgeschätzt werden kann.

## **Ökonomie**

### *Innovation*

Für die Gewinnung von Sekundärrohstoffen aus technischen Abfällen müssen diese gesammelt und verwertet werden. Durch die Miniaturisierung der Bauteile und der Tendenz zu Verbundwerkstoffen wird die Rezyklierung technisch aufwändig. Derzeit genutzte Recyclingverfahren sind deshalb auf die einfachere Wiedergewinnung von Hauptkomponenten ausgelegt. Für die Rezyklierung von gering konzentrierten Elementen und die Aufbereitung von z.B. Verbänden stehen bislang keine wirtschaftlichen Trennverfahren zur Verfügung. Hierzu sind entsprechende Forschungsaktivitäten notwendig, die auch die Wirtschaftlichkeit in den Blick nehmen müssen. Die Öko-Design-Richtlinie schreibt zwar die Zerlegbarkeit der Geräte zur Wiedergewinnung der Rohstoffe als Produktdesignaspekt vor, doch der schnelle technische Fortschritt sowie die stoffliche Dissipation setzen der Umsetzung der Richtlinie Grenzen. Durch den Export technischer Geräte (z.B. Autos, Alt- und Neuwagen) geht zudem dem deutschen Rohstoffmarkt Sekundärmaterial verloren. Eine Exportnation kann ihre Rohstoffnachfrage nicht durch Rezyklierung heimischer Konsumgüter befriedigen. Wenn allerdings Innovationen in der Wiederverwertung stattfinden, kann dieses Know-how auch mit den Warenströmen exportiert werden.

### *Wettbewerbsfähigkeit*

Die Aufbereitung von Metallen, die nur in geringen Konzentrationen in technischen Geräten vorhanden sind sowie von Verbund- und Carbonfaserwerkstoffen ist energetisch und technologisch aufwändig. Bei den derzeitigen Rohstoffpreisen ist die Rezyklierung mit Ausnahme von Massemetallen zumeist nicht wirtschaftlich. Der Ausbau von Anlagen zum Recycling weiterer (gering konzentrierter) Bestandteile sowie von Verbund- und Carbonfaserwerkstoffen ist mit Investitionen verbunden, die zusätzlich erwirtschaftet werden müssen. Neue Verfahren und ein Design technischer Produkte, die eine Trennung in Einzelkomponenten möglich macht, können die Wirtschaftlichkeit des Recyclings von Rohstoffen aus technischen Geräten verbessern. Wie beschrieben, ist dieses Potenzial jedoch begrenzt.

## **Soziales**

### *Beschäftigung*

Das verstärkte Recycling technischer Geräte und Apparate führt zum Ausbau von Arbeitsplätzen in der entsprechenden Recyclingindustrie.

### *Bildung*

Bei der Abfalltrennung und der Nachfrage nach komplex zusammengesetzten Produkten ist der mündige Konsument gefragt, der stoffliche Zusammenhänge versteht und danach seine Kaufentscheidung und sein Entsorgungsverhalten orientiert.

### *Sicherung staatlicher Aufgaben*

Sollte eine wirtschaftliche Aufarbeitung von Rohstoffen mit hoher Kritikalität möglich sein, könnte dies die entsprechende Versorgung der hiesigen Wirtschaft verbessern. Insoweit kann das staatliche Interesse auch durch Lenkungsmaßnahmen zugunsten einer Kreislaufwirtschaft unterstützt werden. Insbesondere die Förderung von Mietlösungen bei Produkten mit besonders kritischen Roh-

stoffen wie seltenen Erden können die Verantwortung für ein wiederverwertbares Produktdesign auf Produzentenseite stärken.<sup>282</sup>

### **Option A.3e: Vermehrte stoffliche Nutzung von Abwasser**

#### **Beschreibung**

Die Option beschreibt das Potenzial der Gewinnung von Phosphat aus Abwasser. Der bei der Abwasseraufbereitung anfallende Klärschlamm stellt eine entsprechende Sekundärrohstoffquelle dar.

#### **Begründung**

Phosphat spielt eine wichtige Rolle für die chemische Industrie z.B. zur Herstellung von Mineraldünger. Für die chemische Industrie gewinnt Phosphat indirekt an Bedeutung, wenn dort mehr nachwachsende Rohstoffe (erste Generation) eingesetzt werden sollen.

#### **Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte:**

#### **Ökologie**

##### *Ressourcenschonung*

Eine kreislaufwirtschaftliche Nutzung von Phosphat hat eine Ressourcenschonung zur Folge. Die mit der Phosphatgewinnung aus Abwasser verbundene Energie ist derjenigen bei der Gewinnung aus primären Lagerstätten gegenüberzustellen. Die Dringlichkeit des Ressourcenschutzes von Phosphat ergibt sich neben der Endlichkeit der Lagerstätten vor allem durch die Unersetzlichkeit von Phosphor.

##### *Biodiversität/Flächennutzung*

Der Abbau von Phosphaterz erfolgt im flächenverzehrenden Tagebau. Verstärktes Phosphorrecycling würde die hierfür nötige Fläche reduzieren.

#### **Ökonomie**

##### *Innovation*

Die direkte Einbringung von Klärschlamm zwecks Düngung in Landwirtschaft und Landschaftsbau wird durch die Klärschlammverordnung limitiert und reglementiert. Einschränkungen ergeben sich durch potenzielle Bodenkontamination mit Krankheitserregern, Medikamentenrückständen und die Schwermetallbelastung des Klärschlammes. Politisches Ziel ist es, die Aufbringung von Klärschlamm auf Feldern in Deutschland zu verbieten<sup>283</sup>. Er wird alternativ verbrannt und seine Asche einschließlich des Phosphatanteils deponiert. Das im Abwasser gelöste Phosphat kann chemisch ausgefällt werden. Für die Gewinnung von Phosphat aus dem Klärschlamm können neue Verfahren wie z.B. eine Phosphorextraktion genutzt werden<sup>284</sup>.

##### *Wettbewerbsfähigkeit*

Stärkeres Phosphorrecycling könnte den Import von Phosphaterzen vermindern. Allerdings wird die Wirtschaftlichkeit der beschriebenen Verfahren durch den hierfür benötigten Energieaufwand stark beeinträchtigt, der sich vor allem durch die hohe Verdünnung von Phosphat im Abwasser ergibt.

---

282 Miet- und Leasingkonzepte könnten sich den Megatrend der neuen Konsumgüter zu nutze machen; im Werkstoff-Kapitel wird hierzu das Cradle to Cradle-Konzept vorgestellt.

283 Die Bundesregierung (Hg.): Deutschlands Zukunft gestalten – Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD. (2013), S. 84.

284 Gaschen, Annina; Liechti, Jürgen: CO<sub>2</sub>-Bilanz-Klärschlamm – eine weitgehend ungenutzte Ressource. In: Umwelt Perspektiven (2010), 4, S. 2–5.

Bei einer Trennkanalisation, in der Schmutz- und Regenwasser getrennt aufgefangen werden, ist die Ausfällung von Phosphat als Eisen-, Aluminium-, oder Calciumphosphat leichter möglich. Eine generelle Einführung von einer Trennkanalisation hätte hohe Infrastrukturkosten zur Folge. Die Phosphatextraktion aus Klärschlamm erfordert zusätzliche teure Verfahrensschritte wie Entwässerung, Trocknung und Monoverbrennung. Eine kostendeckende Vermarktung des extrahierten Phosphats wäre nicht möglich. Die zusätzlichen Kosten dafür müssten über Abwassergebühren finanziert werden.

## Soziales

### *Beschäftigung*

Durch ein Phosphatrecycling aus Abwasser entsteht kein Beschäftigungspotenzial in der chemischen Industrie. Das Know-how der chemischen Industrie kann jedoch einen Beitrag zur Erschließung des Geschäftsfeldes leisten.

### *Lebensqualität*

Die von den Bürgern aufzubringende Abwassergebühr würde weiter steigen.

## II.1.5 Bewertung der Rohstoffoptionen

### Option A.1: Unveränderte Rohstoffbasis

Die Rohstoffbasis für die chemische Industrie in NRW wird zwar weiterhin vom Erdöl dominiert sein, sie wird sich aber im Betrachtungszeitraum, insbesondere mittel- bis langfristig, verändern. Dabei werden Grad und Geschwindigkeit dieser sich ändernden Verteilung zwischen fossilen, alternativen und erneuerbaren Rohstoffen von der wirtschaftlichen Verfügbarkeit des Erdöls, der Innovationskraft der Wertschöpfungskette, den Standortfaktoren und dem globalen Wettbewerb bestimmt. Das besondere Risiko für die chemische Industrie in NRW liegt in der möglichen kostenbedingten Abwanderung von Teilen der ölbasierten Wertschöpfungskette (z.B. Teile der Grundstoff-, Kautschuk- und Kunststoffherzeugung) bzw. ein Zerreißen bestehender Wertschöpfungsketten, das durch den Zuwachs neuer Wertschöpfungsstufen kaum ausgeglichen werden kann. Ein weiteres Risiko liegt darin, dass die Umsetzung hier entwickelter neuer Verfahren nicht in NRW erfolgt.

Solange Rohöl im Bereich Energie und Verkehr eingesetzt wird, ist die stoffliche Nutzung der 10%-Fraktion Naphta in der chemischen Industrie klimaneutral sinnvoll, wenn der Kohlenstoff in Produkten gebunden ist. Die ökologischen Indikatoren, wie z.B. die Endlichkeit der fossilen Ressourcen und die Klimaproblematik zeigen in Richtung Wandel der Rohstoffbasis. Dies wird sich aber erst im mittel- bis langfristigen Zeitraum auswirken, wenn Verkehrs- und Energiesektor signifikant weniger Ölfractionen konsumieren.

Ökonomisch wird sich die Zukunft der Chemie in NRW im globalen Wettbewerb der Standorte entscheiden. Grundsätzlich werden solche Standorte Vorteile haben, die eine vollständige Wertschöpfungskette anbieten. Aufgrund der Innovationszyklen von 10 bis 15 Jahren liegen kurz- bis mittelfristig Vorteile wahrscheinlich in Regionen mit direktem Zugang zu preiswerten Rohstoffen.

Die sozialen Risiken liegen im Verlust von Arbeitsplätzen, wenn Teile der Wertschöpfungskette sowohl im Bereich der Grundstoffe als auch in der weiterverarbeitenden Industrie abwandern. Es bestehen jedoch Chancen auf Beschäftigungspotenzial in neuen Teilen der geänderten Wertschöpfungsketten auf Basis nachwachsender Rohstoffe, wenn es gelingt, parallel zu den abwandernden Bereichen neue aufzubauen. Eine große Chance besteht in dem hohen Qualifikationsniveau der Beschäftigten in der chemischen Industrie, sowie der Sozialpartnerschaft und dem hohen Innovationspotenzial.

## Option A.2: Substitution durch Rohstoffe aus alternativen Primärquellen

### Substitution von Erdöl durch organische Rohstoffe aus alternativen Primärquellen

#### Option A.2a: Erdgas

Insgesamt wird kurz- bis mittelfristig die Bedeutung dieses Rohstoffs mit der Erschließung neuer Erdgasquellen insbesondere in den USA steigen. Ob dies ein anhaltender Prozess ist, kann hier nicht abschließend beurteilt werden. Neben Erdgas spielt verflüssigtes Gas (C1- bis C4-Bestandteile) als Rohstoff eine mögliche Rolle.

Ökologisch erhöht sich mit zunehmendem stofflichen Erdgaseinsatz einerseits die Methanemission (bei Förderung und Transport), andererseits erniedrigen sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber dem jetzigen Rohstoffmix.

Erdgas hat eine längere Reichweite als Erdöl. Ökonomisch gefährdet der Erdgasboom in den USA kurz- bis mittelfristig den Standort NRW, da die Infrastruktur zum Erdgasimport über den Schifftransport z.Z. nicht vorhanden ist. Erdgas ist zudem für die Herstellung einiger Basischemikalien wie die C4-Chemie oder Aromaten auf absehbare Zeit nicht wirtschaftlich geeignet. Dieser Nachteil kann durch den Einsatz von Flüssiggas zumindest teilweise kompensiert werden.

Wie oben beschrieben gefährdet der Erdgasboom in den USA Arbeitsplätze hoher Wertschöpfung in tarifgebundenen Bereichen mit hohen Entgelten in NRW durch Verschiebung von Teilen der chemischen Wertschöpfungskette (Teile der Grundstoff- und Kunststoffherstellung) in die Länder mit billigem Erdgas. Auch hier kann aufgrund des aktuellen Verdrängungswettbewerbs der OPEC die Nachhaltigkeit dieser Gefahr nicht seriös eingeschätzt werden.

#### Option A.2b: Kohle

Als heimischer Rohstoff ist Kohle zur stofflichen Nutzung eine denkbare Kohlenstoffquelle. Bis zur Verdrängung der Kohle in den 60er Jahren durch das preiswertere und effektivere Erdöl war in Deutschland die gesamte Chemieproduktion kohlebasiert. Das Wissen um diese Prozesse und Technologien ist aber nicht kontinuierlich weiterentwickelt worden, sodass heute nach den Entwicklungen in den 80er und 90er Jahren weiterer ergänzender Forschungsaufwand zum optimierten Einsatz bewährter Techniken und auf Synergieeffekte angelegte Prozessoptimierungen erforderlich ist, um die Chancen einer Kohlenutzung zu realisieren.

Ökologisch sind die höheren spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen zu bewerten. Als heimische Kohlenstoffquelle wird Braunkohle mittel- bis langfristig dann besonders attraktiv, wenn CO<sub>2</sub> wieder in den Kohlenstoffkreislauf zurückgeführt wird und die Energie aus erneuerbaren Quellen stammt.

Ökonomisch erfordert die Umstellung auf Kohle zur stofflichen Nutzung in der chemischen Industrie in NRW hohe Investitionen in die Forschung und Infrastruktur, wenn z.B. die Synthesegas- bzw. Fischer-Tropsch-Anlagen in NRW stehen sollen. Grundsätzlich muss diese stoffliche Kohlenutzung gemeinsam mit Wasserstoffgewinnung, CO<sub>2</sub>-Nutzung und erneuerbaren Energien betrachtet werden. Die Kohlenutzung in Deutschland steht in Konkurrenz zu ähnlichen Entwicklungen in China und Südafrika. Geopolitisch wäre eine eigene Rohstoffquelle mittel- und langfristig vorteilhaft.

Sozial würde der Einsatz von Braunkohle Arbeitsplätze in den NRW-Tagebauen sowie in der bisherigen Petrochemie und im Anlagenbau erhalten. Besonders Arbeitsplätze im Forschungs- und hochqualifizierten Bereich würden profitieren. Die Umsiedlung der Bevölkerung in den Abbaugebieten der heimischen Braunkohle stellt für die Betroffenen einen großen Eingriff dar.

## Substitution von Erdöl durch nachwachsende Rohstoffe

### Option A.2c: Nachwachsende Rohstoffe erster Generation (Agrarbiomasse)

In NRW steht Landwirtschaftsfläche zum Anbau von Agrarbiomasse nicht in dem für einen Ersatz von Öl erforderlichen Volumen zur Verfügung, wie sie für eine weitgehende Substitution von Erdöl insbesondere zur Herstellung von Grundstoffchemikalien erforderlich wäre. Ein Import würde mit Ausnahme von Ölfrüchten eher auf der Stufe der Zwischenprodukte erfolgen, nicht auf der Stufe agrarischer Rohstoffe. In diesem Fall würden Teile der Wertschöpfungskette in NRW gefährdet.

Ökologisch ist diese Option nur dann positiv zu bewerten, wenn damit nicht die Nahrungsmittelproduktion eingeschränkt wird und die Aufwendungen für die landwirtschaftliche Bewirtschaftung den ökologischen Nutzen nicht überwiegen. So dürfen keine großflächigen Monokulturen die biologische Vielfalt beeinträchtigen oder zu erhöhtem Dünge- und Pflanzenschutzmitteleinsatz führen.

Ökonomisch sind diese Rohstoffe heute nur in bestimmten Wertschöpfungsketten wirtschaftlich wettbewerbsfähig und werden dort auch bereits eingesetzt. Dabei geht es insbesondere um Rohstoffe mit spezifischen Eigenschaften, die aufwändige chemische Synthesen ersetzen können. Mittelfristig sind zusätzlich weitere Drop-in-Lösungen zu erwarten. Langfristig haben auch neue Wertschöpfungsketten Chancen, insbesondere bei Spezialchemikalien. Der Logistikaufwand ist zu beachten. Weiterhin besteht ein Wettbewerbsnachteil zu der subventionierten, energetischen Nutzung.

Sozial wird es geringe positive Beschäftigungsentwicklungen in der Landwirtschaft und mittel- bis langfristig in der biobasierten Industrie geben, sollte es zu einer Ansiedlung von Bioraffinerien zur Nutzung nachwachsender Rohstoffe erster Generation in Nordrhein-Westfalen kommen. Grundsätzlich stellt sich die ethische Frage „Tank oder Teller“ sowie die Frage nach der Nutzung als Material-Rohstoff oder Energierohstoff, die sich über eine Konkurrenz der Anbauflächen ergibt. Eine bessere Nutzung von Lebensmittelressourcen könnte neue Agrarflächen für den Anbau von Agrarbiomasse zur stofflichen Nutzung in der Chemie ermöglichen.

Als mögliche soziale Auswirkung ergibt sich ein weiteres „Ausbluten“ der ländlichen Regionen, da bäuerliche Landwirtschaft weiter verschwindet.

### Option A.2d: Nachwachsende Rohstoffe zweiter Generation (lignocellulose-haltige Biomasse)

Hier wird eine zunehmende Bedeutung der Lignocellulose erwartet. Die Nutzung von Biomasse aus Holz oder holzartigen Rohstoffen wie Stroh steht jedoch in Konkurrenz zu zahlreichen anderen industriellen und wirtschaftlichen Nutzungen (z.B. Bau- und Energiewirtschaft). Als Rohstoff für die chemische Industrie kommt sie daher zurzeit nur begrenzt in Frage. Hier ist eine Unterscheidung zwischen Holz und Holzabfällen zu treffen. Insbesondere das bei der Papierherstellung anfallende Lignin als Abfallstoff könnte einer stärkeren Nutzung zugeführt werden.

Ökologisch ist die Nutzung von Lignocellulose-Biomasse der Nutzung der 1. Generation vorzuziehen. NRW bietet theoretisch ein beträchtliches Potenzial für die Holznutzung. Allerdings ist dabei darauf zu achten, dass möglichst eine nachhaltige Forstwirtschaft erfolgt. Die Umwandlung bestehender Waldflächen zum Anbau schnellwachsender Holzarten in Monokulturen für die stoffliche oder energetische Nutzung verursacht nachhaltige Schäden für die Wald-Ökosysteme.

Ökonomisch werden die nachwachsende Rohstoffe 2. Generation erst mittel- bis langfristig einsetzbar sein, da es heute noch keine wirtschaftlich wettbewerbsfähigen Prozesse zur Verarbeitung dieser

Rohstoffgruppe gibt. Hier sind noch große Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen erforderlich. Abgesehen davon wird Holz als Baustoff und für die Papierherstellung oder als Holz-Pellets zur thermischen Nutzung heute schon wirtschaftlich genutzt. Die Wirtschaftlichkeit der Nutzung von Lignocellulose als Chemierohstoff ist abhängig davon, ob eine höhere Wertschöpfung als in den genannten Konkurrenzanwendungen erzielt werden kann.

Sozial kann es zu mehr Arbeitsplätzen in der Forstwirtschaft führen. Darüber hinaus könnten Arbeitsplätze in der bisherigen Petrochemie durch jene in den neuen Bioraffinerien substituiert werden, sofern diese hier gebaut werden.

#### **Option A.2e: Nachwachsende Rohstoffe dritter Generation (Algenbiomasse)**

Der Einsatz von Algen wird langfristig als insgesamt verhalten positiv bewertet.

Ökologisch ist die Produktion von Algenbiomasse differenziert zu betrachten. Die Produktion von Algenbiomasse ermöglicht hohe Hektarerträge, kann auf Flächen stattfinden, die nicht zur Nahrungsmittelproduktion geeignet sind, und kann die direkte Nutzung von CO<sub>2</sub>-Abgasströmen ermöglichen. Die Energiebilanz wird jedoch durch den hohen Trocknungsaufwand eingeschränkt.

Ökonomisch werden Algen, wenn überhaupt, erst langfristig von Bedeutung sein, da hier noch ein großer Forschungs- und Entwicklungsbedarf insbesondere für Technologien zur Steigerung der Raum-Zeit-Ausbeute und Trocknung von Algen vorliegt und die Lernkurve beträchtlich sein sollte. Inwieweit die Nutzung von Algen in NRW ökonomisch durchführbar ist, kann derzeit nicht abschließend bewertet werden.

Sozial bietet diese Rohstoffbasis langfristig neue Arbeitsplätze, die aber in anderen Teilen der Wertschöpfungskette verloren gehen. Insgesamt ist deshalb kein Zugewinn zu erwarten, da die Algenproduktion – wenn entsprechend automatisiert – nur wenige Arbeitsplätze bringt.

#### **Anorganische Rohstoffe: Substitutionspotenziale**

##### **Option A.2f: Manganknollen und andere maritime Primärrohstoffquellen für anorganische Rohstoffe**

Diese potenzielle Rohstoffquelle könnte die Versorgung NRWs mit metallischen und mineralischen Rohstoffen für innovative Technologien verbessern. Eine Bewertung ist zurzeit aber noch nicht möglich.

##### **Option A.3: Substitution durch alternative Rohstoffe aus Sekundärquellen**

##### **Option A.3a: Substitutionspotenzial von Urban Mining als Sekundärrohstoff-Quelle für organische und anorganische Rohstoffe**

Insgesamt eine positive Bewertung, aber wegen des Aufwandes auf spezifische Rohstoffe, insbesondere Metalle, beschränkt. (Zum Thema Kunststoff-Recycling siehe Werkstoff-Kapitel)

Ökologisch heißt Urban Mining mehr Kreislauf, insbesondere bei Metallen, und damit weniger Primärrohstoff-Verbrauch und weniger Abfall. Der logistische Aufwand für Sammlung, Trennung und Aufbereitung ist aber erheblich und darf den Nutzen nicht überwiegen.

Ökonomisch wird Urban Mining bereits da eingesetzt, wo es sich heute schon lohnt, d.h. der Wert der gewonnenen Stoffe die Kosten übersteigt. Durch Verbesserung der Verfahren und Logistik kann sich der Anteil mittelfristig ausweiten.

Sozial kann es neue Arbeitsplätze in der Logistik und Aufbereitung geben, falls die Verfahren wirtschaftlich sind. Dabei ist aber darauf zu achten, dass es auch qualitativ hochwertige Arbeitsplätze werden.

### **Option A.3b: Vermehrte stoffliche Nutzung von CO<sub>2</sub>**

CO<sub>2</sub> wird mittel-, eher langfristig, als Rohstoff eingesetzt werden können und wird insgesamt positiv bewertet. CO<sub>2</sub> besitzt als Rohstoff für NRW besonderes Potenzial, da sich hier CO<sub>2</sub>-Emittenten und -Abnehmer in ungewöhnlich großer Menge in räumlicher Nähe finden.

Ökologisch macht eine CO<sub>2</sub>-Nutzung Sinn, wenn mehr CO<sub>2</sub> in den Syntheseprodukten gespeichert, als bei der dafür notwendigen Energiegewinnung emittiert wird. Dadurch wird im Sinne des Cradle to Cradle-Ansatzes der Kohlenstoffkreislauf geschlossen (geschlossener Lebenszyklus). Die stofflich nutzbare Menge von CO<sub>2</sub> kann nur in geringem Umfang den derzeitigen Ausstoß von CO<sub>2</sub> aus z.B. Verbrennungsprozessen kompensieren.

Ökonomisch fehlt es heute noch an wirtschaftlich nutzbaren Technologien und Marktumsetzung für den CO<sub>2</sub>-Einsatz. Erste Produktbeispiele, die CO<sub>2</sub>-Bausteine enthalten, sind zwar vorhanden, es sind aber noch hohe technische und wirtschaftliche Hürden für die flächendeckende kommerzielle Anwendung zu überwinden. Dazu ist offen, welche CO<sub>2</sub>-Ströme in NRW langfristig zur Verfügung stehen werden. Hier gibt es zurzeit eine dynamische Entwicklung, sowohl mit CO<sub>2</sub> in der Kunststoffproduktion als auch als Rohstoff für die Methan- und Methanolsynthese. Allerdings sind die eingesetzten Stoffmengen klein, bezogen auf die Gesamtstoffströme.

Die Verwendung dieses Rohstoffs erfordert einen hohen Energieeinsatz.

Als wirtschaftliche Hemmnisse für die Nutzung von Kohlendioxid aus Abgasen gelten neben der hohen aufzubringenden Energie zur stofflichen Nutzung die Anforderungen an Reinigung und Aufkonzentrierung von nicht-reinen CO<sub>2</sub>-Quellen aus Abgasströmen.

Der Ersatz von erdgas- oder erdölbasierten Rohstoffen durch CO<sub>2</sub>-basierte schafft keine neuen Arbeitsplätze, da der Rohstoffwechsel und damit auch die Arbeitsplatzverschiebung innerhalb der chemischen Industrie erfolgt.

### **Option A.3c: Vermehrte stoffliche Nutzung von Lebensmittel- und Agrarabfällen**

Auch diese Option wird als Perspektive positiv bewertet, wobei das erste Ziel ist, das Entstehen der Abfälle zu vermeiden.

Ökologisch macht es Sinn, wenn der Logistikaufwand den positiven Effekt nicht zunichtemacht. Der Logistikaufwand ist durch den dezentralen Anfall entsprechender Abfälle verhältnismäßig hoch.

Voraussetzung für eine ökonomisch sinnvolle Nutzung von Lebensmittel- und Agrarabfällen als Rohstoffquelle ist, dass ausreichende Mengen in NRW vorhanden sind. Die Logistik-Kosten schränken die Wettbewerbsfähigkeit dieser Rohstoffgruppe ein. Es besteht Entwicklungsbedarf hinsichtlich Logistikkonzepten und Rohstoffaufschluss. Hier ist eine Lernkurve zu durchschreiten, sodass die wirtschaftliche Nutzung eher mittelfristig ansteht.

Sozial können neue Arbeitsplätze in der Logistik entstehen, allerdings nicht zwangsläufig in NRW und vermutlich im gering qualifizierten Bereich.

**Option A.3d: Vermehrte stoffliche Nutzung technischer Abfälle**

Auch diese Option wird positiv bewertet.

Ökologisch macht die kreislaufwirtschaftliche Nutzung der in technischen Abfällen enthaltenen Rohstoffe Sinn, wenn der Logistikaufwand den positiven Effekt nicht zunichtemacht.

Soweit ökonomisch sinnvoll, werden technische Abfälle auch heute schon als Sekundärrohstoffquelle eingesetzt. Dies kann zukünftig auch bei sonstigen Abfällen erfolgen, die heute noch nicht wirtschaftlich eingesetzt werden können, wenn die Produkte hinsichtlich ihrer Rezyklierbarkeit weiterentwickelt und die Aufbereitungsverfahren und Logistik verbessert werden.

Sozial können neue, auch anspruchsvolle Arbeitsplätze in der Aufbereitung und Logistik entstehen. Im Wesentlichen gibt es diese Arbeitsplätze schon, z.B. in den Bereichen Kunststoff- und Metallrecycling. Neue Konzepte für Produktlebensläufe bieten Chancen für neue Arbeitsplätze.

**Option A.3e: Vermehrte stoffliche Nutzung von Abwasser**

Auch diese Option wird aufgrund der Endlichkeit und Unerlässlichkeit von Phosphor, das in Abwasser enthalten ist, als positiv bewertet.

Ökologisch macht es Sinn, wenn geeignete Abwässer vorhanden sind und der energetische und technische Aufwand, der sich durch die hohe Verdünnung von Phosphor in Abwasser ergibt, den ökologischen Nutzen nicht überwiegt.

Ökonomisch ist es dann vorteilhaft, wenn die Mengen ausreichen. Die Klärschlamm-Nutzung ist auf wenige Ausnahmen beschränkt, die einer strengen gesetzlichen Regelung unterliegen. Langfristig kann die Rückgewinnung von Phosphor wirtschaftlich sinnvoll werden.

Neue Rückgewinnungsstufen in der Abwasserbehandlung führen kaum zu neuen Arbeitsplätzen, da sie in die bestehende Abwasserbehandlung integriert werden, es sei denn, neue Stufen der Wertschöpfungsketten entstehen.

# Anhänge

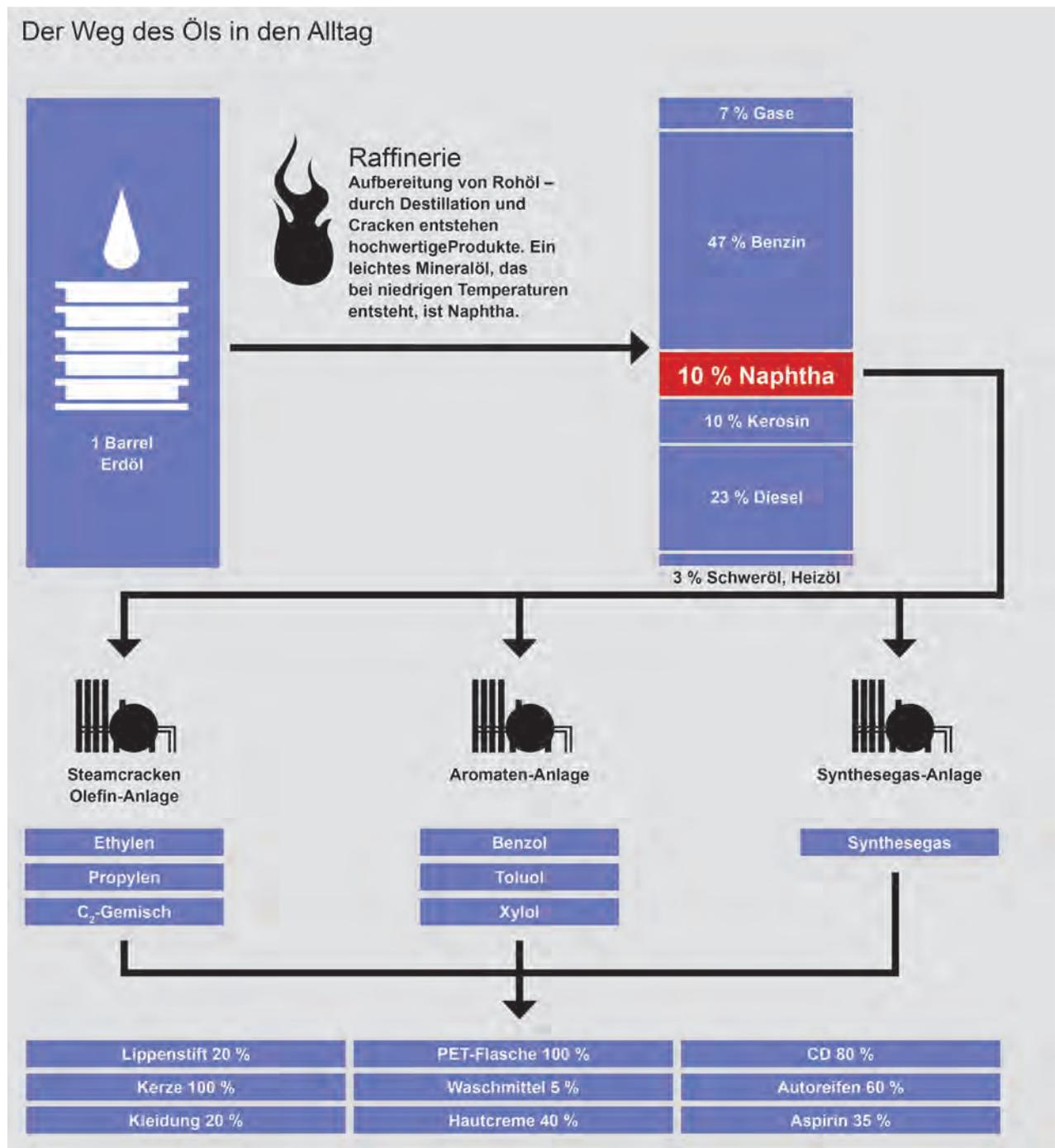
## Anhang 1

Um Verfügbarkeit, Verbräuche und Energiegehalte verschiedener organischer Rohstoffe trotz ihrer unterschiedlichen Zusammensetzung miteinander vergleichen zu können, haben sich unterschiedliche Maßeinheiten etabliert. Mit der folgenden Tabelle können die unterschiedlichen gebräuchlichen Maßeinheiten wie Tonnen Steinkohleeinheiten (SKE) und Tonnen Rohöleinheiten (RÖE) verglichen werden. Quelle für die Heizwerte ist eine vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Referat III C 3 erstellte Tabelle<sup>285</sup>:

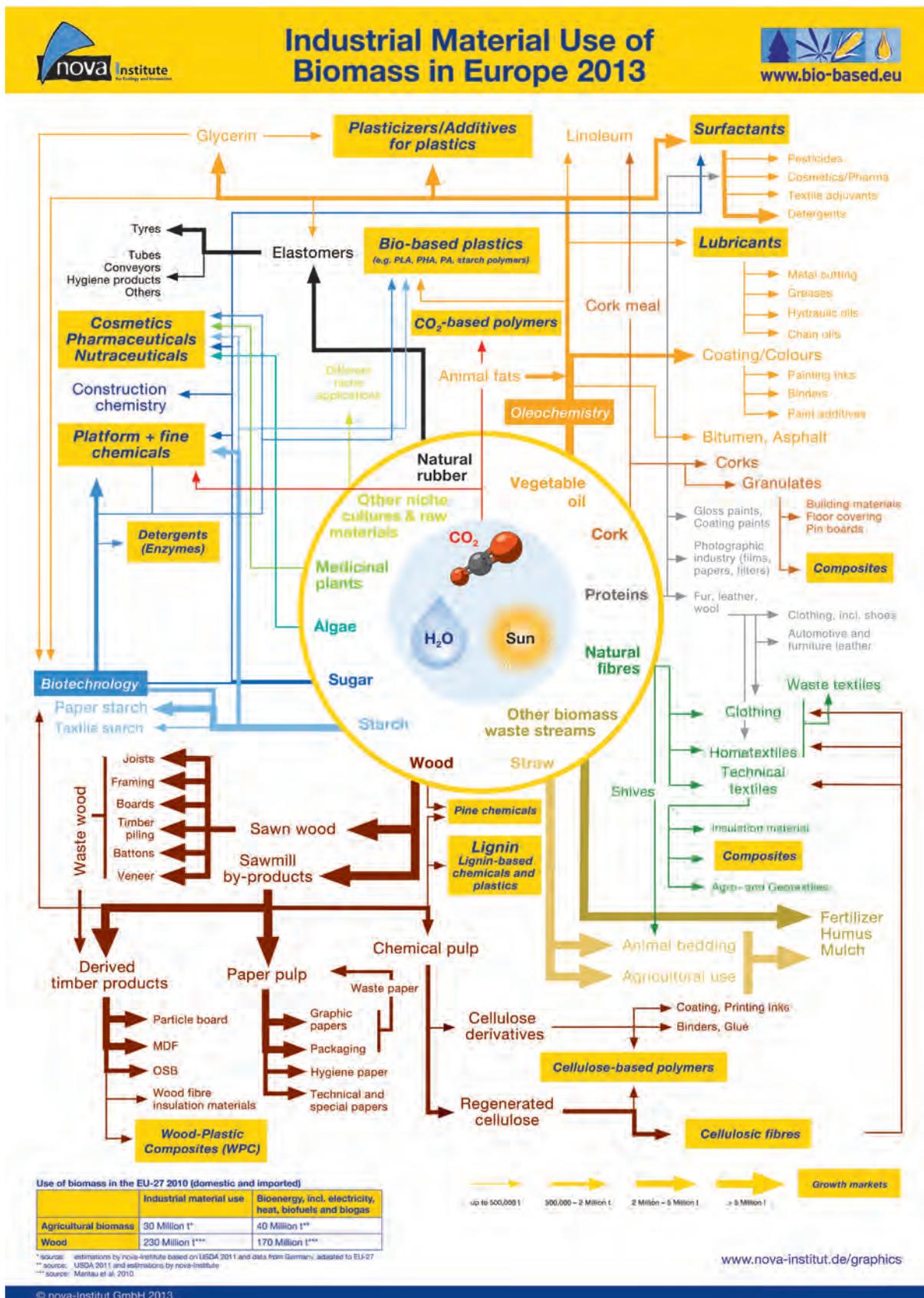
Tabelle 12: Umrechnungsfaktoren für Steinkohle- und Rohöleinheiten sowie Heizwerte

	PJ	Mio. t SKE	Mio. t RÖE	Mrd. kcal	TWh
1 Petajoule (PJ)	-	0,034	0,024	238,8	0,278
1 Mio. t Steinkohleeinheit (SKE)	29,308	-	0,7	7.000	8,14
1 Mio. t Rohöleinheit (RÖE)	41,869	1,429	-	10.000	11,63
1 Mrd. Kilokalorien (kcal)	0,0041868	0,000143	0,0001	-	0,001163
1 Terawattstunde (TWh)	3,6	0,123	0,0861	859,8	-
1 Mrd. m <sup>3</sup> Erdgas (Normvolumen)	32	1,09	0,754	7.540	8,89

285 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Kennziffern des Energieverbrauchs – Deutschland unter: <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten-und-analysen/Energiedaten/energiegewinnung-energieverbrauch.html> (2014). Online am 03.02.2015.

Abbildung 25: Der Weg des Öls in den Alltag<sup>286</sup>

286 Entnommen aus: Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Factbook 05 – Die Formel Ressourceneffizienz. (2012); Öl-Grafik: chemgapedia.de

Abbildung 24: Industrielle Verwendung von Biomasse<sup>287</sup>

287 Entnommen aus: nova-Institut GmbH: Industrial Material Use of Biomass in Europe 2013 unter: [http://www.nova-institut.de/bio/data/images/14-01\\_industrial\\_material\\_use\\_of\\_biomass\\_in\\_europe\\_2013\\_nova\\_institut.pdf](http://www.nova-institut.de/bio/data/images/14-01_industrial_material_use_of_biomass_in_europe_2013_nova_institut.pdf) (2013). Online am 02.03.2015.

## Anhang 2

Rohstoffpreise

Preisentwicklung OPEC-Erdöl

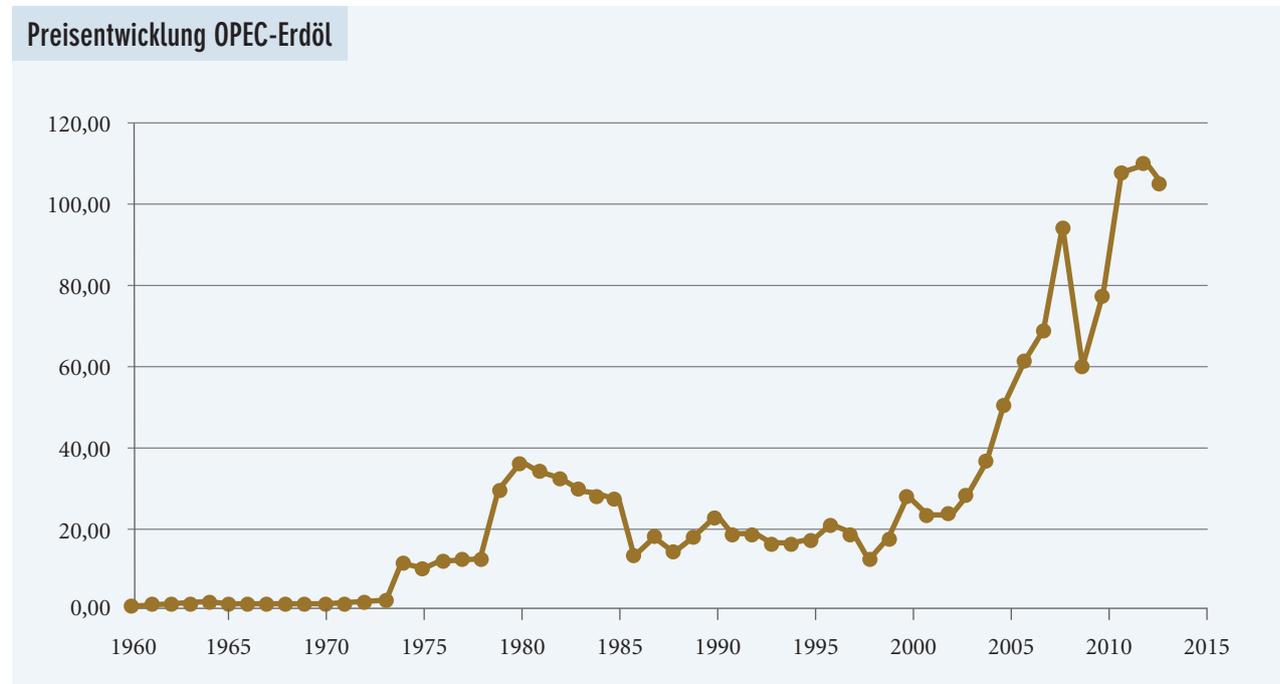
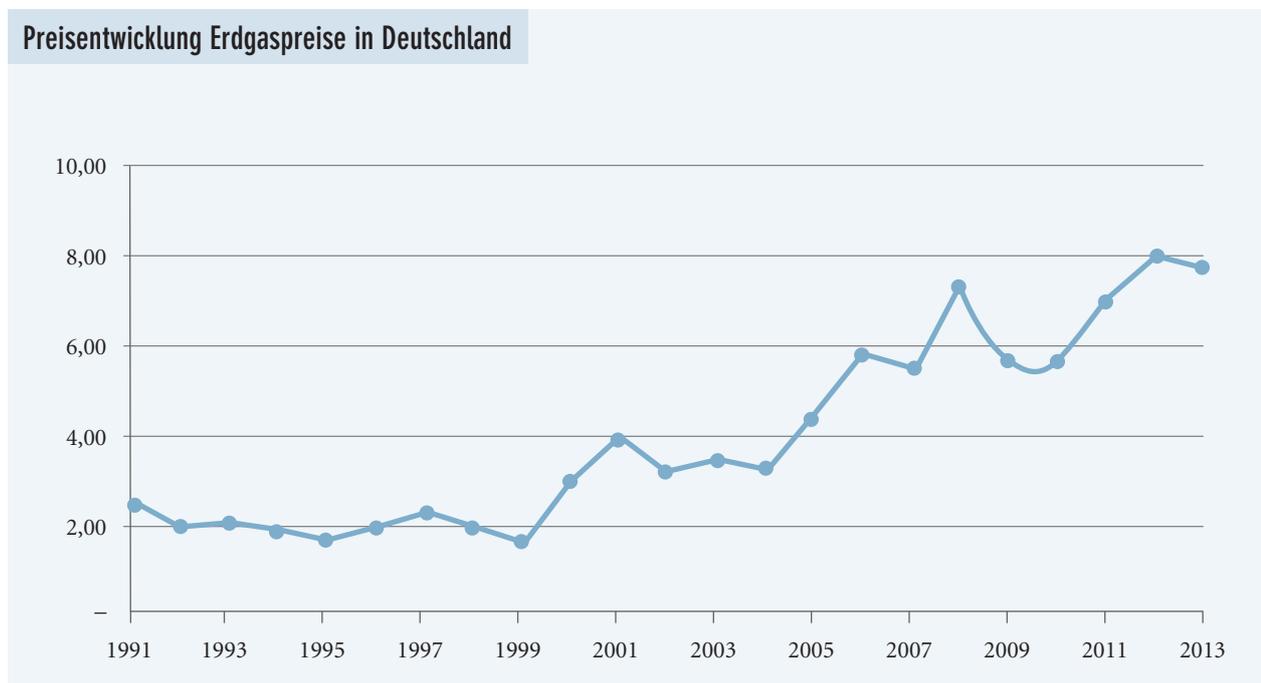


Abbildung 25: Preisentwicklung OPEC-Erdöl seit 1960 in US-Dollar pro Barrel<sup>288</sup>

288 Statistisches Landesamt NRW: Preisentwicklung ausgewählter OPEC-Rohöle in den Jahren 1960 bis 2014 (in US-Dollar je Barrel) unter: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/810/umfrage/rohhoelpreisentwicklung-pec-seit-1960/>. Online am 04.12.2014.

## Entwicklung Erdgaspreise in Deutschland

Abbildung 26: Erdgaspreise ab Grenze (Pipeline) in EURO per TJ von 1991 bis 2013 (jeweils 1. Jan.)<sup>289</sup>

## Preisentwicklung importierter Steinkohle

Abbildung 27: Kraftwerkskohle-Importe frei Grenze in Euro pro t Steinkohleneinheit (SKE) von 1996 bis 2013 (jeweils 1. Jan.)<sup>290</sup>

289 Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BMWi) (Hg.): Aufkommen und Export von Erdgas- Entwicklung der Grenz- übergangspreise ab 1991. (2014).

290 Eigene Darstellung nach Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA): Drittlandskohlepreis unter: <http://www.bafa.de/bafa/de/energie/steinkohle/drittlandskohlepreis/index.html> (2014). Online am 02.03.2015.

### Anhang 3

Die Metalle kommen in der Natur als Erze, häufig vergesellschaftet mit anderen Metallen vor. Bei der Gewinnung eines bestimmten Metalls fallen daher als Nebenprodukte andere Metalle und Verbindungen von Nichtmetallen an. Abbildung 28 zeigt, welche Elemente mit anderen zusammen vorkommen. Bei der Raffination von Kupfer finden sich andere Elemente wie Gold (Au), Silber (Ag), Molybdän (Mo), etc. im Anodenschlamm angereichert und sind damit wirtschaftlich extrahierbar.

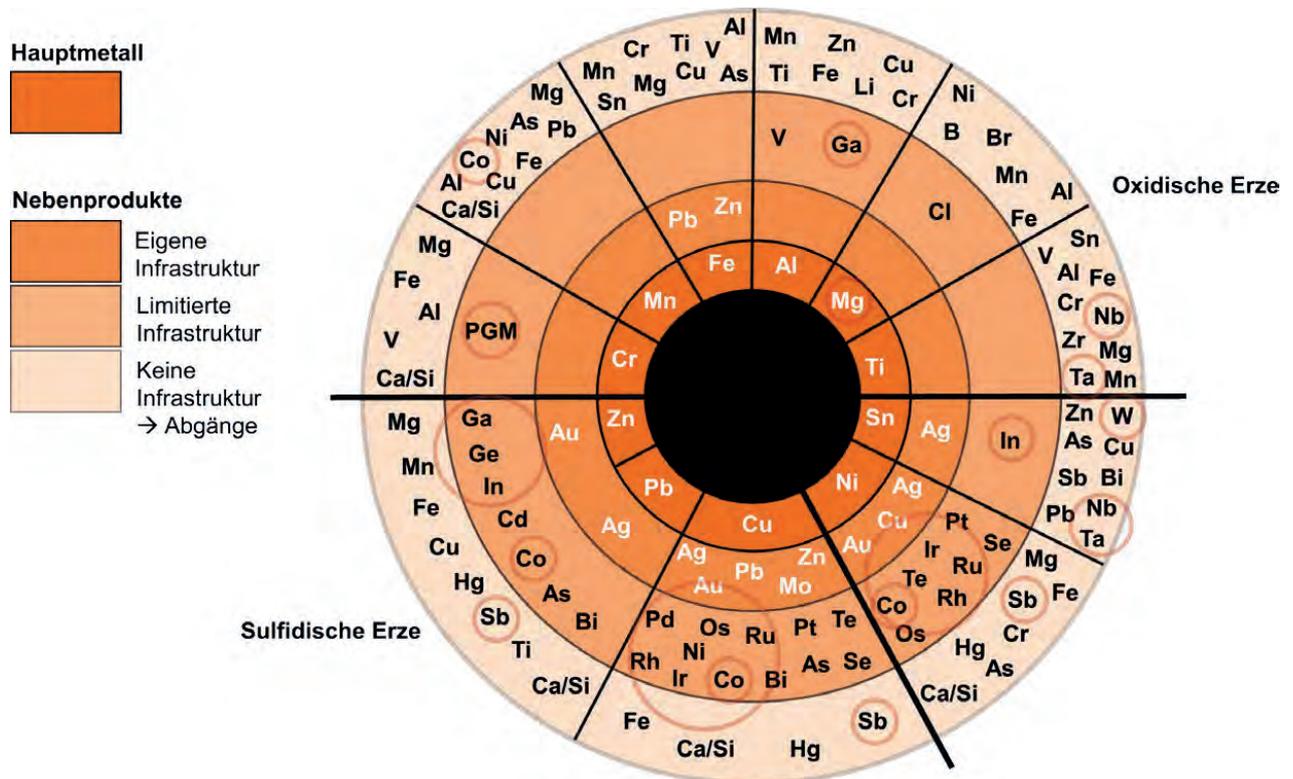


Abbildung 28: Vorkommen von Elementen und deren Vergesellschaftung<sup>291</sup>

291 Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Hg.): Wirtschaftsstrategische Rohstoffe für den Hightech-Standort Deutschland. (2012).

# Inhalt Kapitel II.2

II.2	Werkstoffe.....	99
II.2.1	Einleitung.....	99
	Wichtige Begriffsdefinitionen Kunststoffe .....	99
	Kunststoffbranche in Deutschland und NRW .....	103
II.2.2	Rohstoffbezogene Betrachtungen.....	104
II.2.2.1	Petrochemische Kunststoffe .....	104
II.2.2.2	Biobasierte Kunststoffe.....	114
II.2.3	Betrachtungen zur Nutzung nach Ende des Produktlebens .....	125
II.2.3.1	Biologisch abbaubare Kunststoffe .....	125
II.2.3.2	Recycling .....	130
II.2.4	Annahmen .....	136
II.2.4.1	Relevante Megatrends .....	136
II.2.4.2	Auswirkungen der Megatrends auf Werkstoffproduktion .....	138
II.2.5	Optionen.....	146
II.2.5.1	Materialbezogene Optionen .....	146
Option B.1a:	Fortentwicklung der Materialeigenschaften bei gleichbleibender Rohstoffbasis (weiterhin Hauptnutzung Erdöl) .....	146
Option B.1b:	Umstellung der derzeitigen Polymerwerkstoffproduktpalette auf ausschließlich biobasierte Rohstoffbasis .....	149
Option B.1c:	Vermehrtes rohstoffliches Recycling zur Ausweitung der Nutzung von Sekundärrohstoffquellen (Rezyklaten) .....	152
II.2.5.2	Verwertungsbezogene Optionen .....	154
Option B.2a:	Ausweitung der Verwendung von (biologisch) abbaubaren Kunststoffen für kurzlebige Produkte .....	154
Option B.2b:	Vermehrte energetische Verwertung von Polymerabfällen .....	156
Option B.2c:	Ausweitung des werkstofflichen Recyclings .....	157
II.2.6	Bewertung der Werkstoffoptionen .....	159
II.2.6.1	Materialbezogene Optionen .....	159
Option B.1a:	Fortentwicklung der Materialeigenschaften bei gleichbleibender Rohstoffbasis (weiterhin Hauptnutzung Erdöl) .....	159
Option B.1b:	Umstellung der derzeitigen Polymerwerkstoffproduktpalette auf ausschließlich biobasierte Rohstoffbasis.....	159
Option B.1c:	Vermehrtes rohstoffliches Recycling zur Ausweitung der Nutzung von Sekundärrohstoffquellen (Rezyklaten) .....	160
II.2.6.2	Verwertungsbezogene Optionen .....	160
Option B.2a:	Ausweitung der Verwendung von (biologisch) abbaubaren Kunststoffen für kurzlebige Produkte .....	160
Option B.2b:	Vermehrte energetische Verwertung von Polymerabfällen .....	161
Option B.2c:	Ausweitung des werkstofflichen Recyclings .....	161
Anhang	.....	162



## II.2 Werkstoffe

### II.2.1 Einleitung

Dieses Kapitel widmet sich der Betrachtung von Werkstoffen, insbesondere von Kunststoffen und abgeleiteten Verbundwerkstoffen und ihrer Bedeutung für die Zukunft der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen. Die chemische Industrie ist durch kontinuierliche Forschung und Entwicklung Innovationstreiber für neue Werkstoffe. Das Kapitel ist dabei wie folgt aufgebaut: Zunächst wird in den rohstoffbezogenen Betrachtungen das Potenzial neuer Werkstoffe mit innovativen Eigenschaften aufgezeigt. Dabei werden in den Unterkapiteln die Potenziale petrochemischer und biobasierter Kunststoffe hierfür aufgezeigt. Hierauf folgen Betrachtungen zur Nutzung nach Ende des Produktlebens. Hierbei wird zwischen biologisch abbaubaren Kunststoffen und recyclefähigen Kunststoffen unterschieden.

Als Werkstoffe werden (zumeist Festkörper-)Materialien bezeichnet, die in Umwandlungsprozessen zu Endprodukten oder Halbzeugen<sup>292</sup> gefertigt und deren Qualität und Eigenschaften durch die Wahl der eingesetzten Werkstoffe bestimmt werden.

Werden zwei oder mehr dieser Werkstoffe zu einem neuen Werkstoff mit eigenen technischen Eigenschaften verbunden, handelt es sich um einen Verbundwerkstoff, Kompositwerkstoff oder Composite. Hierzu zählen u.a. faserverstärkte Kunststoffe und Metall-Kunststoff-Hybride. Verbundwerkstoffe vereinen idealerweise die gewünschten Eigenschaften der Ursprungswerkstoffe und gleichen deren unerwünschte Eigenschaften aus<sup>293</sup>.

Dieser Bericht fokussiert sich wegen ihrer herausragenden Bedeutung für die chemische Industrie im Wesentlichen auf Kunststoffe sowie Verbundwerkstoffe mit Kunststoffanteilen. Im Folgenden werden grundlegende, für das Verständnis dieses Kapitels notwendige Begriffe erläutert. Diese Begriffsfestlegung soll ein einheitliches Verständnis sicherstellen und die Lesbarkeit erleichtern.

#### Wichtige Begriffsdefinitionen Kunststoffe

Als Kunststoff werden Werkstoffe bezeichnet, die sich aus makromolekularen organischen Verbindungen zusammensetzen. Sie bestehen im Wesentlichen aus Molekülketten (Polymeren) mit sich wiederholenden Grundeinheiten (Monomeren), die sowohl linear als auch verzweigt oder vernetzt sein können. Ihre Länge variiert von einigen Tausend bis über eine Million Moleküleinheiten. Technische Eigenschaften können anwendungsspezifisch bestimmt werden, z.B. durch gezielte Auswahl des Ausgangsmaterials, des Herstellungsverfahrens oder der Additive<sup>294</sup>. Kunststoffe werden nach ihrem mechanisch-thermischem Verhalten in Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere unterteilt.

Thermoplaste lassen sich in einem bestimmten Temperaturbereich (thermo-plastisch) verformen. Dieser Vorgang ist reversibel, das heißt er kann durch Abkühlung und Wiedererwärmung bis in den schmelzflüssigen Zustand (fast) beliebig oft wiederholt werden, solange nicht durch Überhitzung die sogenannte thermische Zersetzung des Materials eintritt. Duroplaste sind Kunststoffe, die nach

---

292 Halbzeuge sind vorgefertigte Rohmaterialformen wie z.B. Bleche, Platten oder Rohre (vgl. Ensinger GmbH: Halbzeuge aus technischen Kunststoffen unter: <http://www.ensinger-online.com/de/technische-kunststoffe-halbzeuge/halbzeuge-aus-technischen-kunststoffen/>. Online am 17.12.2013).

293 vgl. Agerer, Markus: Verbundwerkstoffe – Grundlagen unter: <http://www.maschinenbau-wissen.de/skript/werkstofftechnik/verbundwerkstoffe/86-grundlagen-verbundwerkstoffe>. Online am 19.12.2013.

294 vgl. Agerer, Markus: Kunststoffe – Einführung unter: <http://www.maschinenbau-wissen.de/skript/werkstofftechnik/kunststoffe/80-kunststoffe>. Online am 19.12.2013.

ihrer Aushärtung nicht mehr verformt werden können und bei denen eine weitere Temperaturerhöhung direkt zur thermischen Zersetzung führt. Dagegen sind Elastomere formfeste Kunststoffe, die sich unter Zug- und Druckbelastung verformen lassen und danach selbstständig in ihre ursprüngliche Gestalt zurückfinden. Zu diesen gehören die thermoplastischen Elastomere sowie Kautschuk, der als Grundstoff für z.B. Gummi dient.

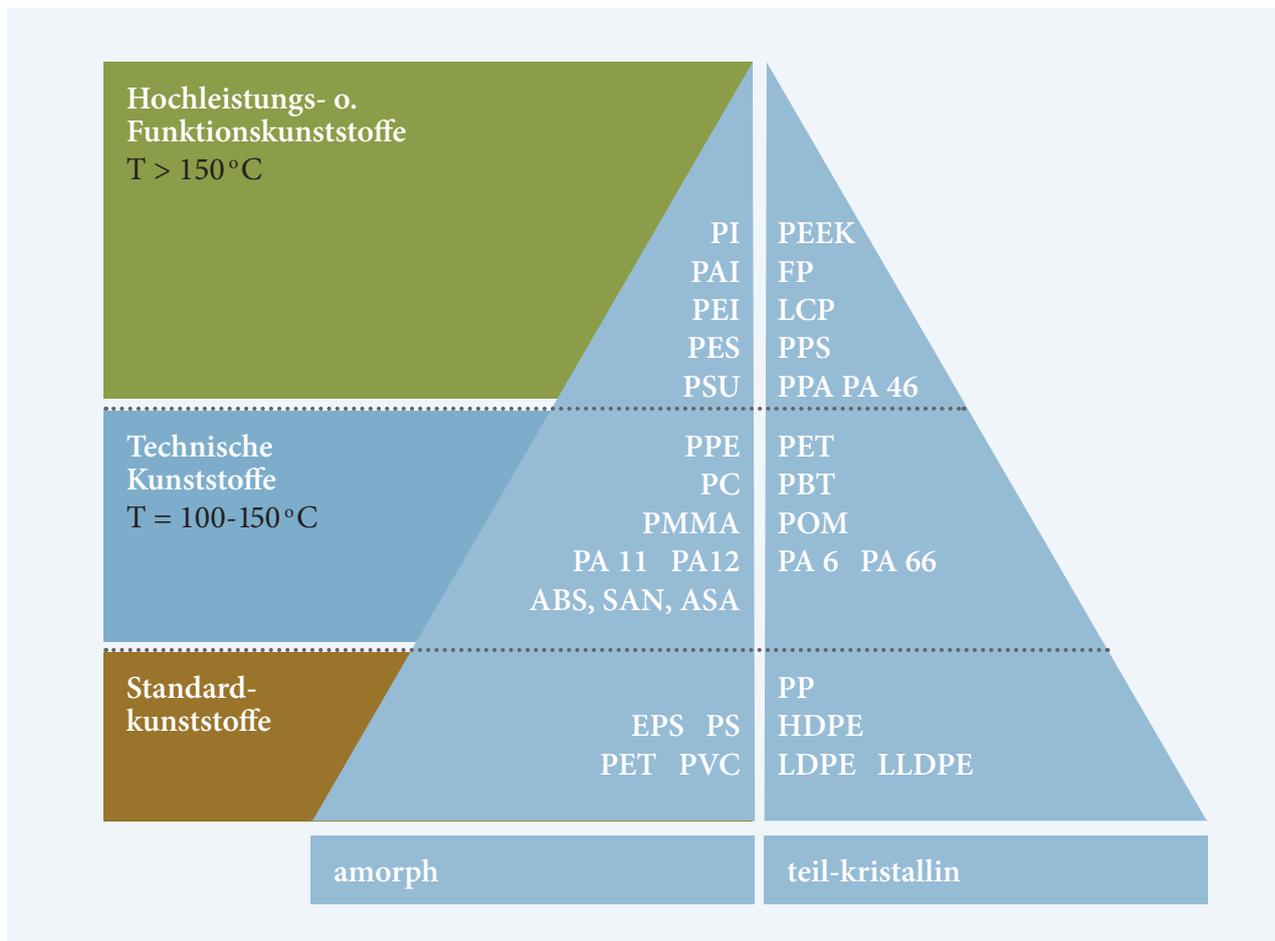


Abbildung 29: Einteilung der thermoplastischen Kunststoffe<sup>295</sup>

Die wichtigste Klasse der thermoplastischen Kunststoffe kann entsprechend Abbildung 29 in Standardkunststoffe, technische Kunststoffe und Hochleistungs- oder Funktionskunststoffe unterteilt werden. Die Standardkunststoffe umfassen vor allem die mengenmäßig wichtigsten Kunststoffe Polyethylen mit geringer Dichte (low density bzw. linear low density (PE-LD/PE-LLD)) und hoher Dichte (PE-HD), Polypropylen (PP), Polyvinylchlorid (PVC), Polystyrol (PS) sowie Polyethylenterephthalat (PET; wird teilweise auch zu den technischen Kunststoffen gezählt) (s. Abbildung 29). Sie stellen historisch gesehen die Basis der Kunststoffentwicklung dar. Technische Kunststoffe verfügen über bessere mechanische Eigenschaften, da sie auch oberhalb von 100°C und unterhalb von 0°C ihre Werkstoffeigenschaften behalten, weshalb sie häufig zu Konstruktionszwecken eingesetzt werden. Hochleistungskunststoffe stellen aufgrund ihrer noch besseren mechanischen Eigenschaften eine Weiterentwicklung der technischen Kunststoffe dar. Sie sind auch noch bei für Kunststoffe extremen Temperaturen (>150°C) einsetzbar. Diese Kunststoffklasse ist teuer und besitzt nur ein vergleichbar kleines Verkaufsvolumen. Funktionspolymere stellen eine besondere Klasse der Kunststoffe dar, die nicht Hauptbestandteil des Endprodukts ist, aber signifikanten Einfluss auf die Eigenschaften hat. Sie werden für die jeweilige Anwendung maßgeschneidert und müssen sehr hohe

295 vgl. PlasticsEurope (Hg.): Business Data and Charts 2011/2012. (2012a).

Qualitätsansprüche erfüllen. Diese Spezialitätenkunststoffe verfügen deshalb nur über einen sehr kleinen Marktanteil (wenige 10.000 t) und sind aufgrund der an sie gestellten Anforderungen und dem damit verbundenen Entwicklungsaufwand sehr hochpreisig. Ein Beispiel ist das Polyetherether-keton (PEEK), das in der Elektronik oder in der Medizintechnik Einsatz findet.

Entsprechend ihrer Anwendung lassen sich Kunststoffe auch in Gebrauchs- und Verbrauchskunststoffe unterteilen. Während Gebrauchs Kunststoffe in langlebigen Produkten zu finden sind, die eine Funktion oder einen ästhetischen Nutzen z.B. als Sitzmöbel, Fensterrahmen oder Kinderspielzeug haben, dienen Verbrauchskunststoffe nur einer zeitlich stark eingeschränkten Nutzung und werden danach stofflich oder thermisch verwertet. Als Beispiel sind hier die Verpackungskunststoffe zu nennen.

Zur Einstellung bestimmter Materialeigenschaften werden Kunststoffe vielfach mit anderen Kunststoffen gemischt. Die entstehende Kunststoffmischung wird als Blend oder auch Polymerlegierung bezeichnet. Eine gezielte Optimierung der Materialeigenschaften kann auch durch die Zugabe von Zuschlagsstoffen, sogenannten Additiven, erfolgen. Zu diesen zählen Weichmacher für eine bessere Formbarkeit und Haptik<sup>296</sup>, Stabilisatoren als Schutz gegen Umwelteinflüsse wie z.B. Licht und Sauerstoff, Farbstoffe und Pigmente sowie Verstärkungstoffe wie Glas- oder Carbonfasern und Füllstoffe. Dieser Veredelungsprozess während der Herstellung wird auch als Compoundierung bezeichnet.

Die wichtigsten Verfahren zur Verarbeitung von Kunststoffen sind das Spritzgießen, die Extrusion, das Blasformen sowie das Tiefziehen. Am häufigsten wird das Spritzgießen eingesetzt, bei dem die geschmolzene Kunststoffmasse in eine vorgefertigte Form eingespritzt wird. Im Spritzguss lassen sich sofort einsetzbare dreidimensionale Formteile in großer Anzahl herstellen. Zur Extrusion wird das zu verarbeitende Material durch Erhitzen verflüssigt und unter Druck durch eine Düse gepresst. Auf diese Weise können Platten, Folien und Rohre hergestellt werden. Das Blasformen ist eine Variante der Extrusion, bei der zunächst ein Schlauchstück extrudiert wird, welches in einer Metallform später mit Druckluft aufgeblasen wird, wodurch sich verschiedenste dreidimensionale Hohlkörper fertigen lassen. Durch Tiefziehen (Thermoformen) werden Tafeln, Platten oder Folien aus thermoplastischen Kunststoffen in geformte Teile (z.B. Becher) umgeformt. Dazu werden die weichen, aber nicht geschmolzenen Formmassen in eine Form eingespannt und mittels Unterdruck in die spätere Form gebracht.<sup>297</sup> Weitere Verarbeitungsverfahren sind das Pressen von Duroplasten, Schäumen, Gießen und Kalandrieren. Bei Letzterem wird die Formmasse im Spalt zwischen beheizten Walzen zu Folien verarbeitet.

Mittels Extrusion können Kunststoffe in Faserform gebracht werden. Fasern sind in Längsrichtung stark belastbar und haben eindimensional verstärkende Eigenschaften auf Materialien. Sie sind leicht und biegsam und können durch Verspinnen mit anderen Materialien im Verbund oder durch Oberflächenbehandlung funktionalisiert werden. Wenn synthetische Materialien in Faserform polymerisiert werden, können diese zu Garn versponnen und dann gestrickt, gewirkt, verwebt oder als Vliese werkstofflich nutzbar gemacht werden<sup>298</sup>.

Die Wertschöpfungskette von Kunststoffen umfasst die Herstellung der Kunststoff-Rohstoffe, d.h. Basispolymere und/oder deren Vorstufen (Monomere und Präpolymere), die Herstellung des Kunststoffs (inkl. seiner Additive), der meist in Form von Granulaten zur Herstellung von Gebrauchs-

296 Haptik wird definiert als Lehre vom Tastsinn, wobei sich das Wort aus dem Griechischen ableitet und dort u.a. „berühren“ bzw. „angreifen“ bedeutet; vgl. <http://www.duden.de/rechtschreibung/Haptik>.

297 vgl. BASF: Kunststoffverarbeitung von Styrolpolymeren und technischen Thermoplasten im BASF PlasticsPortal unter: <http://www.plasticsportal.net/wa/kunststoffe/kunststoffverarbeitung.html>.

298 vgl. Heymann, Eric: Deutsche Bank AG (Hg.): Textil-/Bekleidungsindustrie: Innovationen und Internationalisierung als Erfolgsfaktoren. (2011).

oder Verbrauchsprodukten eingesetzt wird. Diese Produkte gelangen über den Handel zum Endverbraucher. Nach dessen Nutzung wird es idealerweise einer Nachnutzung in Form von Recycling, Kompostierung, thermischer Verwertung oder einer sonstigen Verwertungsform zugeführt.

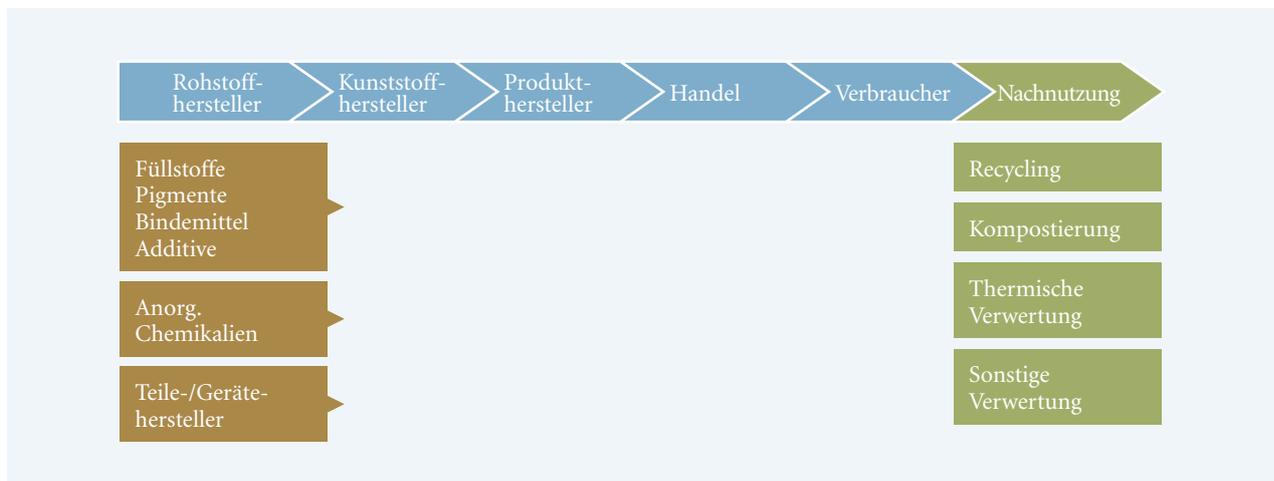


Abbildung 30: Wertschöpfungskette von Kunststoffen<sup>299</sup>

Die Nutzungsdauer bzw. der Lebenszyklus eines Kunststoffes variiert stark abhängig von seiner jeweiligen Anwendung und dem damit verbundenen Anforderungsprofil. Während z.B. Verpackungskunststoffe zur Produktgruppe mit einer kurzen Lebensdauer von wenigen Tagen bis Wochen gehören, können Kunststoffe im Bereich von Infrastruktur und Gebäuden einen Lebenszyklus von mehreren Dekaden haben. Darüber hinaus ist zu beachten, dass die Nutzungsdauer eines Werkstoffs oftmals kürzer ist als seine technische Leistungsfähigkeit. Das bedeutet, dass er in der Regel nicht mehr genutzt und entsorgt bzw. wiederverwertet wird, bevor er aufgrund seiner Eigenschaften nicht mehr funktionstüchtig oder gebrauchsfähig ist. Die technische Leistungsfähigkeit eines Produktes ist nicht nur vom Werkstoff selbst abhängig, sondern wird in wesentlichem Maße durch das jeweilige Anforderungsprofil und die Gebrauchsweise durch den Nutzer bestimmt. Darüber hinaus sind oftmals technische Normen und Sicherheitsauflagen zu erfüllen. Insbesondere Letztere können ein Nutzungsende vor dem Verlust der technischen Leistungsfähigkeit sinnvoll bzw. notwendig machen. Die Gebrauchsdauer hängt damit ab von den Werkstoffeigenschaften, dem Anforderungsprofil, der technischen Leistungsfähigkeit und dem Verbraucherverhalten. Als weiterer Begriff ist in diesem Zusammenhang auch die Beständigkeit oder Langlebigkeit eines Werkstoffs zu nennen. Diese bezeichnet den Zeitraum bis der Werkstoff in der Umwelt zerfällt und abgebaut ist. Prominentes Beispiel für Anwendungen mit vergleichsweise kurzer Nutzungsdauer aber langer Beständigkeit (mehrere hundert Jahre) sind Kunststoffverpackungen, sofern sie nicht biologisch abbaubar sind.

Viele Herausforderungen im Umgang mit Kunststoffprodukten ergeben sich daraus, dass die in der Regel relativ große Widerstandsfähigkeit gegenüber chemischen, biologischen oder photolytischen Abbauprozessen die gewünschte oder geplante Anwendungs- bzw. Nutzungsdauer übersteigt. Dies ist dann problematisch, wenn die langlebigen Werkstoffe wie z.B. Kunststoffverpackungen nach ihrer Nutzung keiner Verwertung zugeführt werden und stattdessen in die Umwelt gelangen. Prinzipiell ergeben sich unterschiedliche Szenarien für die Rückführung eines Werkstoffs in die Biosphäre oder Technosphäre. Diese unterschiedlichen Wege der Rückführbarkeit der Kunststoffprodukte können

<sup>299</sup> eigene Darstellung nach Kreis Recklinghausen; WiN Emscher-Lippe Gesellschaft zur Strukturverbesserung mbH: Oberflächenatlas NRW unter: [http://www.chemieatlas.de/oberflaeche\\_nrw/](http://www.chemieatlas.de/oberflaeche_nrw/). Online am 24.02.2015; Kreis Recklinghausen; WiN Emscher-Lippe Gesellschaft zur Strukturverbesserung mbH: Polymeratlas NRW unter: [http://www.chemieatlas.de/polymere\\_nrw/](http://www.chemieatlas.de/polymere_nrw/). Online am 24.02.2015; Grabowski, Heinrich; Gnau, Peter: Zielgruppe Bio-Kunststoffe und Entsorger unter: <http://www.go-greenpartners.de/14.html> (2013). Online am 19.12.2013.

im Vorfeld der Produktion durch das gezielte Design eines Werkstoffes/Produktes eingeplant bzw. berücksichtigt werden.<sup>300</sup>

### Kunststoffbranche in Deutschland und NRW

Die Kunststoffbranche in Deutschland setzte sich 2011 aus 7.080 Unternehmen entlang der gesamten Wertschöpfungskette inklusive Dienstleistungen rund um Kunststoffe zusammen. Diese erwirtschafteten mit 384.000 Beschäftigten einen Umsatz von 90,5 Mrd. Euro<sup>301</sup>. Abbildung 31 zeigt die deutschen Produktionsstandorte, die sich in besonderer Weise in Nordrhein-Westfalen konzentrieren.

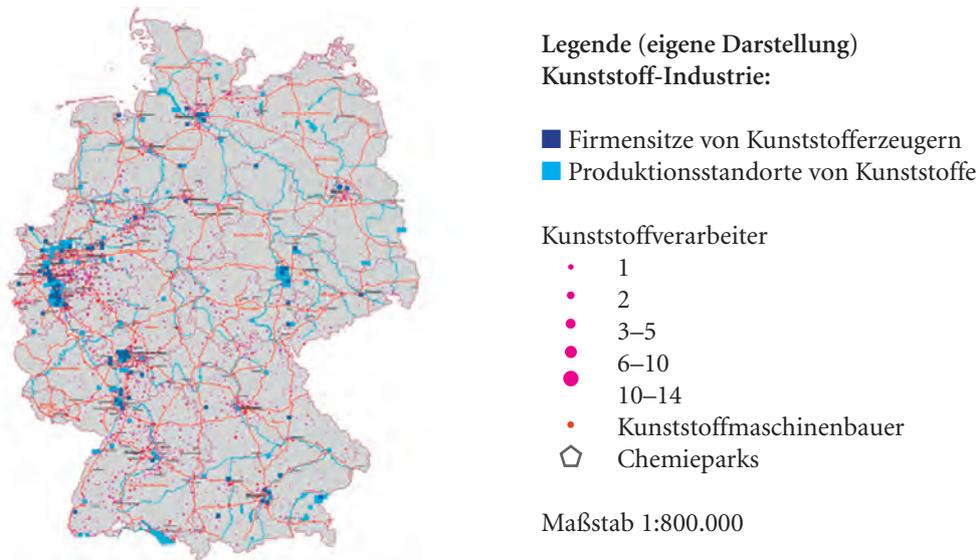


Abbildung 31: Kunststoff-Produktionsstandorte in Deutschland<sup>302</sup>

Die nordrhein-westfälische Kunststoffbranche umfasste 2011 laut der Branchenvertretung Kunststoffland.NRW 960 Betriebe. Dort waren 116.467 Menschen beschäftigt. Es wurden 35,7 Mrd. Euro erwirtschaftet<sup>303</sup>. Die hiesige Branche ist stark von kleinen und mittelständischen Betrieben geprägt<sup>304</sup>. Die Hälfte der in NRW erzeugten Kunststoffe bzw. Kunststoffprodukte wurden exportiert<sup>305</sup>. Kunststoffland.NRW vertritt die Ansicht, dass die Kunststoffbranche mit ihrem ausgeprägten Querschnittscharakter in Nordrhein-Westfalen Träger und Treiber von Innovationen auf folgenden Gebieten ist: Werkstoffe, Produktionsprozesse und Produkte für nahezu alle Lebensbereiche. Zudem gibt es eine durchgängige Wertschöpfungskette von Kunststoffherzeugern, -verarbeitern und -maschinenbauern, eine breite Wissenschafts-, Forschungs- und Dienstleistungslandschaft sowie ein breites Spektrum von Anwendern<sup>306</sup> (vgl. hierzu auch Abbildung 32).

300 vgl. Kagermann, Henning: Chemie bringt das E-Auto weiter. In: Nachrichten aus der Chemie (2013), 61, S. 995.  
 301 vgl. Wirtschaftsvereinigung Kunststoff VVK (Hg.): Konjunkturbericht der deutschen Kunststoff-Industrie. (2012)  
 302 vgl. PlasticsEurope: Kunststoff-Produktionsstandorte in Deutschlandbranche Deutschland (2013). Online am 19.12.2013; zur vorliegenden Verwendung genehmigt von PlasticsEurope.  
 303 vgl. kunststoffland NRW: Zahlen und Fakten unter: <http://www.kunststoffland-nrw.de/ueber-uns/zahlen-und-fakten.html> (2012b). Online am 19.12.2013.  
 304 Dispan, Jürgen: Kunststoffverarbeitung IMU-Infodienst 4-13 // Kunststoffverarbeitung in Deutschland. IMU-Inst. (2013). ISBN 978-3-934859-46-3, S.7.  
 305 vgl. kunststoffland NRW: Zahlen und Fakten unter: <http://www.kunststoffland-nrw.de/ueber-uns/zahlen-und-fakten.html> (2012a). Online am 19.12.2013.  
 306 vgl. ebd.

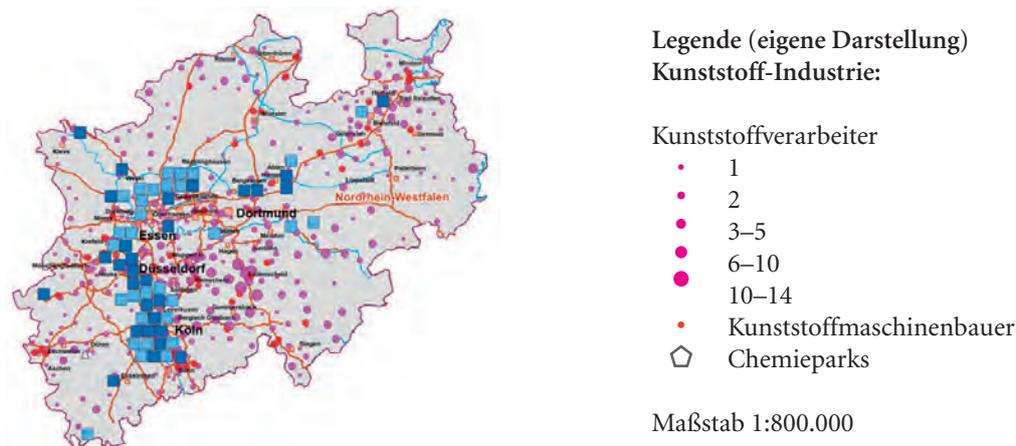


Abbildung 32: Übersicht zur Kunststoffbranche in NRW<sup>507</sup>

Die einmalige räumliche Nähe von Herstellern, Verarbeitern, Anwendern und Forschungseinrichtungen und die damit verbundene Wissensdichte haben zahlreiche bahnbrechende Innovationen aus Nordrhein-Westfalen in der Geschichte der Kunststoffentwicklung hervorgebracht. Beispielhaft sind hier die Erfindung von Polyurethan 1935 durch Otto Bayer (IG Farbenindustrie AG, später Bayer AG Leverkusen) sowie von Polycarbonat 1953 durch Hermann Schnell (Bayer AG Leverkusen) oder 1953 die Entwicklung der bis heute eingesetzten „Ziegler-Natta-Katalysatoren“ zur Herstellung der mengenmäßig wichtigsten Kunststoffe Polyethylen und Polypropylen durch Karl Waldemar Ziegler am Kaiser-Wilhelm-Institut Mülheim/Ruhr (heute Max-Planck-Institut für Kohleforschung) zu nennen.

## II.2.2 Rohstoffbezogene Betrachtungen

### II.2.2.1 Petrochemische Kunststoffe

#### Verarbeitung von Rohöl in der Raffinerie

Das vorgereinigte Erdöl (nach Abtrennung unerwünschter Bestandteile wie Sedimente und Wasser und einer Entsalzung) wird zunächst zur Raffinerie transportiert. Die dortige Primärverarbeitung wird als Rohöldestillation bzw. atmosphärische Destillation bezeichnet. Hierdurch werden Kerosin, Heizöl, Benzin und Diesel gewonnen. Durch den weiteren Verarbeitungsschritt der Vakuumdestillation entstehen schweres Heizöl, Bitumen und Petrolkoks. Durch das anschließende sogenannte Cracken oder mittels Steam-Reforming wird ebenfalls Benzin gewonnen. Bei der Rohöldestillation entstehen auch die für die Polymerproduktion relevanten Olefine, Paraffine, Naphtene, Aromaten sowie Synthesegas. Hieraus werden durch Weiterverarbeitung in Chemieanlagen Basischemikalien für die Polymerproduktion gewonnen.

#### Von der Basischemikalie zum Polymer zum Verbraucherendprodukt

Im Bereich der Olefine lassen sich aus der Basischemikalie Ethylen – teilweise über verschiedene Zwischenschritte – PE, Polyester und PVC bilden, die zu einem breiten Produktspektrum von der Plastiktüte bis zum Fensterrahmen weiterverarbeitet werden können. Aus dem Olefin Propylen können u.a. PP und Polyacrylate gebildet werden. Diese finden z.B. Verwendung in Sportschuhen oder Kinderspielzeugen. Aus den  $C_4$ -Fraktionen der Olefine lassen sich mittels unterschiedlicher Zwischenschritte unter anderem Co-Bausteine für PE sowie Polyester und verschiedene synthetische

Kautschuke herstellen. Anwendungsbeispiele aus diesen Olefinen gewonnener Kunststoffe sind Autoreifen, kunststoffverstärkte Autoteile und Kinderspielzeug.

Aus Synthesegas werden Methanol und durch Zugabe von Stickstoff Ammoniak als Basischemikalien für die Polymerherstellung gewonnen. Mittels verschiedener weiterer Zwischenschritte lassen sich aus Ammoniak Polyurethane (PUR) und Polyamide (PA) gewinnen. Aus Methanol leiten sich unter anderem Thermoplastische Polyurethane (TPU) und aromatische PUR ab. Diese Polymere können als Verbundstoffe z.B. in der Möbelindustrie zum Einsatz kommen.

Zur Gruppe der Aromaten zählen Benzol, Toluol sowie die Xylole. Benzol kann über verschiedene Zwischenstufen z.B. zu PS, ungesättigtem Polyester (UP), Epoxidharzen (EP) oder Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR) verarbeitet werden. Aus Toluol werden aromatische PUR gewonnen, während aus Xylolen u.a. PET, Polycarbonate (PC), Weichmacher oder verzweigte Polyester (Alkydharze) gebildet werden. Beispiele für Verbraucherendprodukte sind hier CD/DVDs, Schaummatratzen, Hartschalenkoffer sowie Schaumstoffchips zur Polsterung von Versandwaren.

In der Gruppe der Paraffine bzw. Naphthene werden bspw. aus der Basischemikalie Butan über diverse Zwischenschritte Polyester oder verschiedene Polyamide (PA) gebildet. Diese lassen sich etwa zu Kunststoffstühlen, aber auch höherwertigen Anwendungen wie z.B. im Automobilbau weiterverarbeiten.

#### Anteil der Kunststoffproduktion am Erdölverbrauch

Die konventionellen Kunststoffe werden, wie oben beschrieben, über verschiedenste Konversions- und Veredlungsschritte aus Erdöl hergestellt. Kunststoff ist dabei nur eines von verschiedenen Endprodukten, die aus Erdöl gewonnen werden. Wie in Abbildung 33 dargestellt, wird aus einer Tonne Erdöl nur ein Teilstrom für 40 kg Kunststoffe genutzt. Insgesamt werden 4-6% des global verwendeten Erdöls für die Kunststoffproduktion eingesetzt<sup>308</sup>.

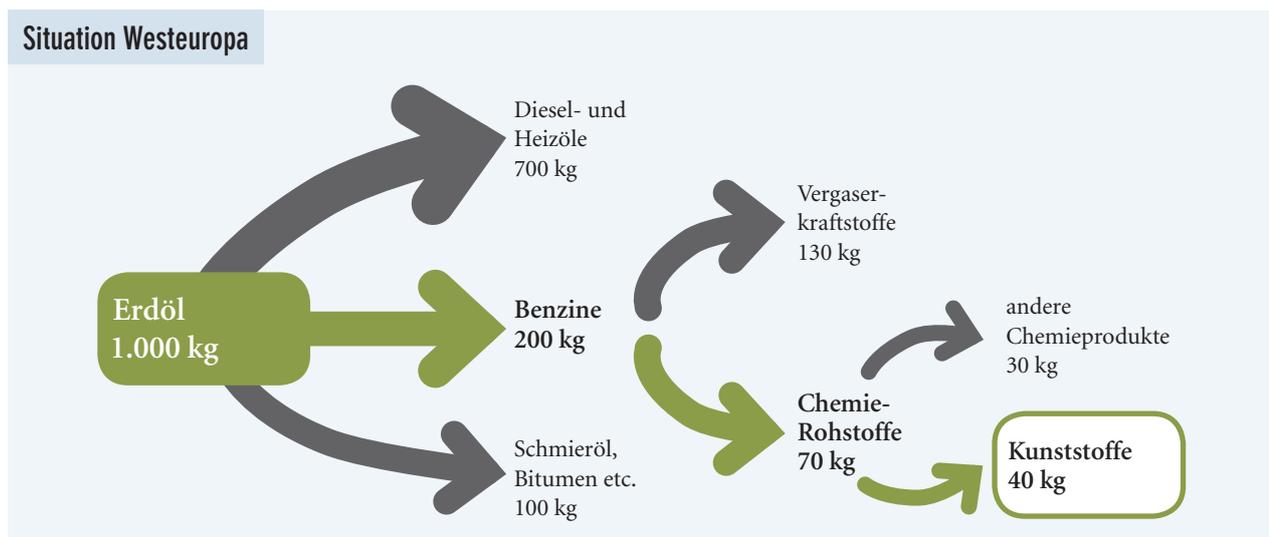


Abbildung 33: Produkte aus 1 t Erdöl<sup>309</sup>

308 vgl. PlasticsEurope (Hg.): Too valuable to be thrown away. (2009), S. 3.

309 Ausschnitt aus: Bayer MaterialScience: (Hg.): Vom Erdöl zu Polymeren. (2005).

### Kunststoffproduktion – Historisch und aktuell

Seit 1950 ist die weltweite Kunststoffproduktion (inklusive Elastomere, Beschichtungen und Dichtungen, Klebstoffe und Fasern<sup>310</sup>) von jährlich 1,7 Mio. t auf ca. 280 Mio. t im Jahr 2011 gestiegen. Im Durchschnitt lagen die jährlichen Wachstumsraten bei 5%. Dabei verzeichnete Europa geringere Wachstumsraten seit Ende des 20. Jahrhunderts, was auf das allgemein größere Wirtschaftswachstum der Schwellenländer (insbesondere die sogenannten BRIC-Staaten<sup>311</sup>) gegenüber den westlichen Industrienationen zurückzuführen ist<sup>312</sup>.

### Produzierte Kunststoffsorten weltweit, in Europa und Deutschland

Weltweit wurden 2011 ca. 235 Mio. t Kunststoffe (im engeren Sinne) produziert. Das Gesamtproduktionsvolumen verteilt sich dabei auf die in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten Kunststoffsorten. Darüber hinaus fasst Tabelle 13 auch die Anteile dieser Kunststoffsorten für die europäische und deutsche Produktion im selben Jahr zusammen.

Tabelle 13: Vergleich der weltweiten, europäischen<sup>313</sup> und deutschen<sup>314</sup> Produktionskapazitäten der wichtigsten petrochemischen Kunststoffsorten im Jahr 2011

	weltweit	Europa	Deutschland
Gesamtproduktionsmenge	235 Mio. t	47 Mio. t	10,6 Mio. t
<b>Anteile verschiedener Kunststoffsorten (in Mio. t)</b>			
<b>Standardkunststoffe</b>	<b>199,8</b>		
PP	53,0	8,9	1,8
PE-LD / PE-LLD	40,6	8,0	1,5
PE-HD	36,3	5,6	1,3
PVC	36,2	5,2	1,9
PS und EPS	16,7	3,5	0,8
PET	16,3	3,1	nicht gesondert aufgeschlüsselt
<b>Technische Kunststoffe</b>	<b>21,5</b>		
davon PUR	12,4	3,3	
<b>Funktionskunststoffe</b>	<b>1,0</b>		

Insgesamt machten 2011 die Standardkunststoffe 85% des globalen Kunststoffmarktes aus. Die technischen Kunststoffe stellten insgesamt mit ca. 21,5 Mio. t weniger als 10% der weltweit produzierten Kunststoffe dar. Der Anteil der Hochleistungskunststoffe war mit deutlich weniger als 1% (weniger als 1 Mio. t) um mehr als das Zehnfache kleiner<sup>315</sup>. Für die deutsche Kunststoffproduktion können darüber hinaus noch folgende Anteile angegeben werden: 6,1% Polyamid (PA), 13,9% sonstige Thermoplaste und 11,5% andere Kunststoffsorten<sup>316</sup>. Tabelle 13 zeigt, dass die europäischen

310 Abgrenzung entsprechend PlasticsEurope; Kunststoffe gesamt umfassen alle Thermoplaste, Duroplaste, Elastomere sowie Beschichtungen und Dichtungen, Klebstoffe und Fasern, bei der Erfassung der Kunststoffe im engeren Sinne werden Elastomere sowie Beschichtungen und Dichtungen, Klebstoffe und Fasern nicht berücksichtigt, so dass diese Gruppe die thermoplastischen Standard- und Technischen Kunststoffe sowie PUR-Elastomere umfasst.

311 BRIC = Brasilien, Russland, Indien und China.

312 vgl. Prognos AG: Verband der chemischen Industrie (Hg.): Die deutsche chemische Industrie 2030VCI-Prognos-Studie. (2013), Abb. 23.

313 vgl. PlasticsEurope (Hg.): Plastics – the Facts 2012. (2012), S. 8.

314 vgl. Consultic Marketing & Industrieberatung: PlasticsEurope (Hg.): Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland. (2012), Folie 4.

315 vgl. PlasticsEurope (Hg.): Business Data and Charts 2011/2012. (2012a), S. 5, 8.

316 vgl. Consultic Marketing & Industrieberatung: PlasticsEurope (Hg.): Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland. (2012), Folie 4.

und deutschen Produktionszahlen die herausragende weltweite Bedeutung der Polyolefine sowie der Standardkunststoffe insgesamt widerspiegeln.

Weltweit werden mit 40% die meisten Kunststoffe in Asien hergestellt, während in Europa 25% der globalen Produktionskapazitäten zu finden sind. Davon entfällt wiederum ein Viertel auf Deutschland, das damit in Europa führend ist.<sup>317</sup> Von den in Deutschland 2011 verarbeiteten Kunststoffen wurden 40% importiert. Die in Deutschland produzierten Kunststoffe wurden zu 57% exportiert. Hauptimportquellen und Hauptabnehmer waren dabei die EU-27-Staaten<sup>318</sup>.

### Marktpreise

Die Einteilung in Standard-, technische und Hochleistungskunststoffe spiegelt sich nicht nur in den Produktionsmengen, sondern auch in den Marktpreisen wieder. So kostete 2011 eine Tonne eines Standardkunststoffs im Durchschnitt weniger als 2.000 Euro, für eine Tonne eines technischen Kunststoffs mussten 2.000 bis 4.000 Euro bezahlt werden. Für Hochleistungskunststoffe wurden 4.000 bis 10.000 Euro pro t bezahlt.<sup>319</sup> Aktuell besteht ein hoher Wettbewerbsdruck auf europäische Kunststoffhersteller aufgrund hoher Energiekosten bei gleichzeitig niedrigen Rohstoffkosten insbesondere in den USA, welche durch die dortige unkonventionelle Öl- und Gasgewinnung bedingt sind<sup>320</sup>.

### Mengenmäßig wichtigste petrochemische Kunststoffe und deren Eigenschaften

Tabelle 14 stellt die Eigenschaften der mengenmäßig wichtigsten petrochemischen Kunststoffe PE-LD, PE-LLD, PE-HD, PP, PS und PVC kurz dar.

---

317 Baunemann, Rüdiger (PlasticsEurope Deutschland) Landtag NRW (Hg.): Enquetekommission II Protokoll 6. Sitzung (nichtöffentlich). (2013).

318 vgl. PlasticsEurope (Hg.): Grafiken zum Wirtschaftspressegespräch. (2012), Folie 5.

319 vgl. PlasticsEurope (Hg.): Business Data and Charts 2011/2012. (2012b), S. 7.

320 vgl. Evonik Industries AG; Häger, Harald: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Werkstoffe“ der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2013), Antwort auf Frage 4.

Tabelle 14: Eigenschaften der bedeutendsten petrochemischen Kunststoffe<sup>321</sup>

	Polyethylen PE-LD	Polyethylen PE-HD	Polypropylen (PP)	Polyvinylchlorid (PVC)	Polystyrol (PS)
<b>Monomer</b>	Ethylen	Ethylen	Propylen	Vinylchlorid	Styrol
<b>Dichte</b>	0.91 g/m <sup>3</sup>	0.95 g/m <sup>3</sup>	0.91 g/m <sup>3</sup>	1.4 g/m <sup>3</sup>	1.05 g/m <sup>3</sup>
<b>Mechanisch und chemisch</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• geringe Festigkeit</li> <li>• Flexibilität &gt; PE-HD und PP</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• geringe Festigkeit</li> <li>• gute Dimensionsstabilität</li> <li>• Flexibilität &lt; PE-LD</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• geringe Festigkeit</li> <li>• hohe Steifigkeit,</li> <li>• sehr geringe Wasseraufnahme (&lt; 0,1 %)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• relativ gute Festigkeit</li> <li>• hohe Steifigkeit und Dimensionsstabilität</li> <li>• kaum Wasseraufnahme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• geringe Festigkeit</li> <li>• große Steifigkeit</li> <li>• spröde</li> </ul>
<b>Thermische Beständigkeit</b>	40°C bis 95°C	-40°C bis 110°C	0°C bis +100°C, nicht witterungsbeständig	witterungsbeständig	tiefemperaturbeständig, nicht witterungsbeständig
<b>Chemische Beständigkeit</b>	beständig gegenüber: Alkalien und organischen Lösemitteln	wie PE-LD	beständig gegenüber: Alkoholen, organischen Lösemitteln und Fetten	beständig gegenüber: Säuren, Laugen, Alkohol, Öl und Benzin	beständig gegenüber: Säuren, Laugen und Alkohol
<b>Verwendung</b>	preisgünstiger Kunststoff für technische Schweißkonstruktionen, Verpackungen und Massengüter	unzerbrechliche Gefäße, Flaschen, Behälter, Isolier- und Verpackungsmaterial (Plastikfolien usw.)	preisgünstiger Kunststoff für technische Schweißkonstruktionen, Chemieapparatebau	Baubereich (z.B. Rohre, Fensterprofile), Folien, Kunstleder, Verbundwerkstoffe (z.B. Rotorblätter für Windkraftanlagen)	breites Einsatzfeld, Styropor® zur Wärmedämmung (Bau & Verpackungsmaterial), Elektrotechnik (optische Linsen & Lacke)

### Anwendungsfelder von Kunststoffen

In Europa wurden 2011 ungefähr 39,4% der verarbeiteten Kunststoffe für Verpackungen, 20,5% im Baugewerbe, 8,3% für den Automobilbereich, 5,4% im Elektro- und Elektronikbereich sowie 26,4% in anderen Sektoren eingesetzt<sup>322</sup>. In Deutschland zeigten sich ähnliche Anteile für die genannten Anwendungsfelder. 2011 wurden hier 34,7% der verarbeiteten Kunststoffe im Verpackungsbereich, 23,4% im Bau, 9,9% für Fahrzeuge, 6,2% für Elektro- und Elektronikbereich sowie 22,1% in sonstigen Bereich angewendet<sup>323</sup>. Hauptanwendungsfelder von Kunststoffen sind damit zurzeit die Bereiche Verpackungen, Bau und Automobil.

### Spezifische Anteile von Kunststofftypen in verschiedenen Anwendungsfeldern

In Europa wurden 2011 für Kunststoffverpackungen mengenmäßig am häufigsten PE-LD/-LLD eingesetzt, gefolgt von – zu je gleichen Anteilen – PE-HD, PP und PET. Im Bausektor wurde hauptsächlich PVC verwendet. Andere wichtige Kunststoffsorten in diesem Bereich waren PE-HD, PP, PS-E und PUR. Damit dominieren die Polyolefine den Verpackungsbereich. Im Automobilsektor wurde mengenmäßig am häufigsten PP verwendet. Daneben fanden in größeren Anteilen auch PUR, PA

321 Quellen für diese Tabelle: a) Rotert, H.Hermann: Eigenschaften von Kunststoffen unter: <http://www.rotert-os.de/wiki/wichtige-informationen/eigenschaften-kunststoffe>. Online am 7.1.2014; b) FU Berlin: Kunststoffe zum Kennenlernen unter: <http://www.chemie.fu-berlin.de/chemistry/kunststoffe/polystyrol.htm> (2001). Online am 7.1.2014, c) Karrer, Martin: karrer.Raumgefühle (Hg.): Kunststoffe / Eigenschaften.

322 vgl. PlasticsEurope (Hg.): Plastics – the Facts 2012 – An analysis of European plastics production, demand and waste data for 2011. (2012), S.7.

323 vgl. PlasticsEurope (Hg.): Geschäftsbericht 2012 PlasticsEurope Deutschland e.V. (2013), S.30.

und sonstige Thermoplaste Anwendung (vgl. Abbildung 34<sup>324</sup>). Der statistische Pro-Kopf-Verbrauch beträgt in Westeuropa ca. 100 kg pro Jahr<sup>325</sup>.

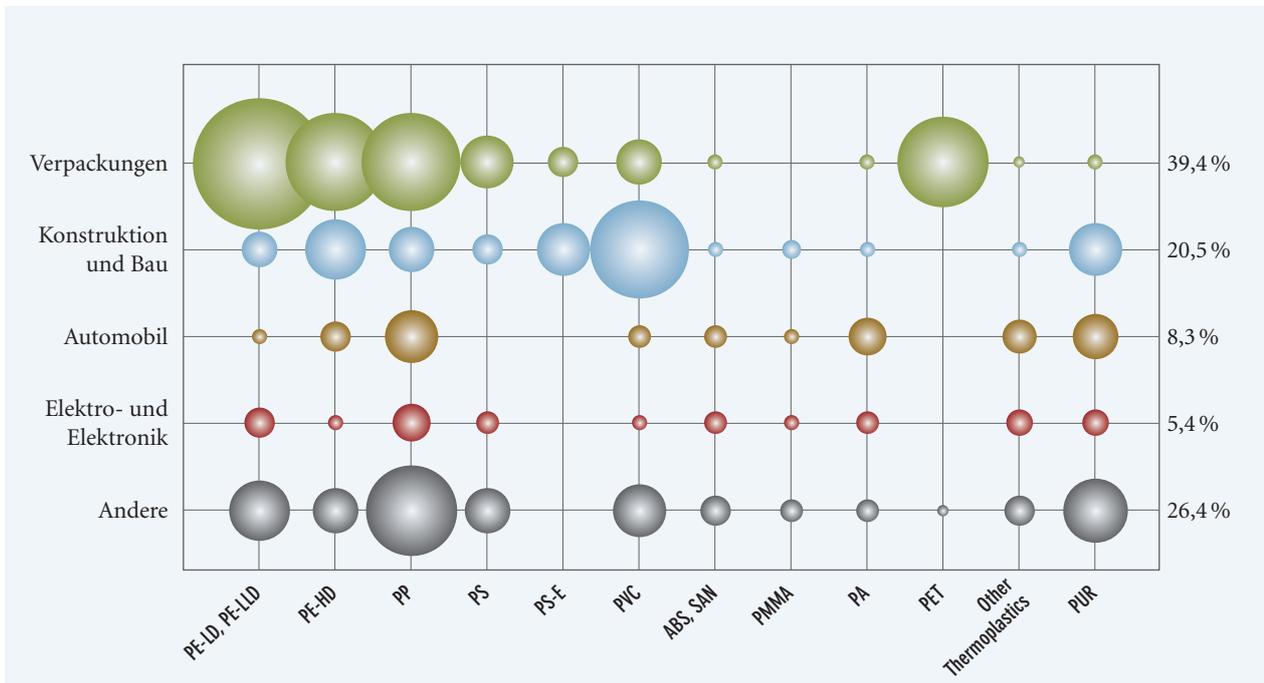


Abbildung 34: Kunststoffbedarf nach Anwendungsfeldern und Kunststoffsorten in Europa 2011<sup>326</sup>

### Anwendungsbeispiele

Die unterschiedlichen Anteile verschiedener Kunststoffe in den oben betrachteten Anwendungsfeldern ergeben sich aus den anwendungsspezifischen Anforderungsprofilen. Um diese zu erfüllen, sind unterschiedliche Eigenschaften der Kunststoffe erforderlich. Einen wesentlichen Einfluss auf die Anforderungsprofile der Kunststoffe bzw. ihrer Produkte hat die Produktlebensdauer/Nutzungsdauer. Zur Verdeutlichung der sich aus den unterschiedlichen Produktlebensdauern ergebenden Unterschiede in den Anforderungsprofilen wurden vorliegend drei Zeiträume gewählt: Kurzfristig (Nutzungsdauer von wenigen Tagen bis zu einem Jahr), mittelfristig (Nutzungsdauer von einigen Jahren) und langfristig (Nutzungsdauer von einem Jahrzehnt bis zu mehreren Jahrzehnten). Als Anwendungsbeispiele wurden anhand dieser zeitlichen Einteilung folgende Produkte zur weiteren Untersuchung ausgewählt: PET-Flaschen und Lebensmittelverpackungen mit kurzer Nutzungsdauer, Handys/Smartphones sowie kohlefaserverstärkte Kunststoffe im Automobilbau als Beispiele für mittelfristige Anwendungen, Windenergieanlagen als Beispiel für mittel- bis langfristige Kunststoffanwendungen.

Ein weiteres Anwendungsbeispiel für faserförmige Kunststoffe sind Industrietextilien. Werkstoffeigenschaften von Industrietextilien wie Gewicht, optische, elektronische, akustische, chemische, biologische, wärmeleitende Eigenschaften, Porosität, Steifigkeit/Biegsamkeit etc. können über die drei Parameter Faser, Textil- und Verbundstruktur eingestellt werden. Kunststofffasereigenschaften

324 vgl. PlasticsEurope (Hg.): Plastics – the Facts 2012 – An analysis of European plastics production, demand and waste data for 2011. (2012), S.7; für EU 27 plus Norwegen und Schweiz, erfasst wurden die Kunststoffe im engeren Sinne (Standard- und technische Kunststoffe sowie PUR-Elastomere).

325 vgl. Evonik Industries AG; Häger, Harald: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Werkstoffe“ der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2013), Antwort auf Frage 1.

326 Modifiziert nach PlasticsEurope (Hg.): Plastics – the Facts 2012 – An analysis of European plastics production, demand and waste data for 2011. (2012), S.7; erfasst wurden Kunststoffe allgemein inklusive other plastics (~5,7 Mio. t) in der EU27 plus Norwegen und Schweiz PlasticsEurope.

werden durch den verwendeten Kunststoffmix mit den Additiven, der Fadenstärke und der Funktionalisierung der Fadenoberfläche eingestellt. Untersuchungen haben gezeigt, dass Kunstfasern in der ökologischen Bewertung auch natürlichen Materialien wie Baumwolle überlegen sein können. Konventionelle Textilien leiden über alle Verarbeitungsstufen hinweg unter erheblichen Belastungen für die Umwelt (Einsatz von Pestiziden, Entlaubungsmitteln, Farbstoffen, Veredlungschemikalien), so dass auch Greenpeace fallweise Kunstfasern einen ökologischen Vorteil einräumt.<sup>327</sup> Ein herausragendes Unternehmen der Kunstfaserbranche in NRW ist die Firma DRALON in Dormagen. Die Eigenschaften der Textilstruktur werden durch das Strick-, Wirk- oder Webmuster verwirklicht. Dieses kann auch dreidimensional verarbeitet werden. In der Verbundstruktur lassen sich Vorteile von Textil und Verbundmatrix kombinieren. Innovative Anwendungsbeispiele für textile Werkstoffe finden in verschiedenen Abnehmerbranchen Verwendung wie z.B. Mobilität (Sicherheits- und Leichtbauanwendungen), Kommunikation (Elektronik in Textilien, Fasersensorik), Technik (Bewässerungs-, Wassergewinnungs- und Düngungssysteme), Gesundheit, Lifesciences (Textilprothetik, Sensorik/Überwachung von Körperfunktionen und verbesserte, klassische medizinische Textilanwendungen), Bauen und Wohnen (Leicht-, Fein-, transluzenter Beton, pflegearme Wohntextilien, textile Lösungen für Luft-, Feuchte- und Wärmetransport).

**PET-Flaschen und Lebensmittelverpackungen als Beispiel für kurzfristige Kunststoffanwendungen**  
Kunststoffe dienen als Verpackungsmaterialien für alle möglichen gewerblichen und industriellen Zwecke. Dementsprechend ist die Verpackungsindustrie der größte Kunde der Kunststoffindustrie. Kunststoff ist ein vergleichsweise leichtes Verpackungsmaterial: Obwohl über 50% der Waren in Europa in Kunststoff verpackt werden, haben diese einen Gewichtsanteil von lediglich 17%.<sup>328</sup>

Insbesondere als Lebensmittelverpackung haben Kunststoffe eine wichtige Bedeutung. Das Anforderungsprofil für Lebensmittelverpackungen (nicht erfasst sind hier Umverpackungen zum Warentransport) sieht wie folgt aus:

- Schutz des verpackten Inhalts in der gesamten Logistikkette vor Beschädigung, Verlust und Verderb (Hygiene, Frische und Nährwerte erhalten);
- möglichst geringes Gewicht (Vorteil z.B. gegenüber Glas);
- reißfest und gasundurchlässig z.B. für kohlenensäurehaltige Getränke;
- Resistenz des Verpackungsmaterials gegenüber dem Inhalt/Lebensmittel (etwa Säuren);
- physiologische Unbedenklichkeit sowie möglichst keine flüchtigen Komponenten, welche in das Nahrungsmittel diffundieren könnten (Inertheit).

Typische Verpackungsformen sind Folien, Flaschen und Schachteln. Transparente Verpackungen aus Kunststoffen haben – z.B. gegenüber Pappe – den Vorteil, dass die Ware sichtbar ist, wodurch Qualität und Frische der Lebensmittel für den Verbrauch erkennbar sind, was als zusätzlicher Kaufanreiz dienen kann. Ein wichtiger Vorteil ist auch der Schutz gegen Feuchtigkeit.

Die für Lebensmittelverpackungen mengenmäßig am meisten eingesetzten Kunststoffsorten sind PE-LD und PE-LLD, PE-HD, PP, PS und PET (s. Abbildung 34). Aus Kostengründen sowie aufgrund der verhältnismäßig geringen Anforderungen (im Vergleich etwa zu Kunststoffen in technischen Anwendungsbereichen) sind in diesem Bereich hauptsächlich die kostengünstig produzierbaren Standardkunststoffe vertreten.

327 Schildt, J.; Baum, A.; Brodde, K.; Leesch, K.: Textil-Fibel 4: Wissenswertes über Fäden, Fasern und faire Kleidung zum Wohlfühlen. Greenpeace Media GmbH (2011). ISBN 978-3-9811689-6-9.

328 vgl. PlasticsEurope: The Plastics Portal unter: <http://www.plasticseurope.de/anwendung/verpackung.aspx>. Online am 09.01.2014.

PET-Flaschen und Lebensmittelverpackungen aus Kunststoff werden je nach Haltbarkeit des verpackten Produktes wenige Tage bis mehrere Monate verwendet. Weil PET sich einfach formen lässt, kann es in fast jede beliebige Verpackungsgeometrie überführt werden. Typische Anwendung von PET sind vor allem Getränkeflaschen. PET-Produkte mit zusätzlicher Sauerstoffbarriere sind für Bier oder vakuumverpackte Molkereiprodukte wie etwa Käse und verarbeitetes Fleisch einsetzbar<sup>329</sup>. Durch die gute Eignung von PET als Ersatz für die herkömmliche Glasflasche erfuhr dieses in den letzten Jahren einen verstärkten Einsatz und somit unter den Standardkunststoffen das dynamischste Wachstum.

### Handys/Smartphones als Beispiel für Kunststoffanwendungen mit mittelfristiger Nutzungsdauer

Die durchschnittliche Nutzungsdauer eines Handys beträgt aktuell nur rund 18 Monate. Jährlich werden in Deutschland ca. 33 Mio. neue Handys gekauft. Rund 80% der Bestandteile eines Handys können wiederverwertet werden<sup>330</sup>, wobei hierbei die thermische Verwertung der Kunststoffe miteinbezogen ist<sup>331</sup>. In einem Handy sind ca. 56% Kunststoffe, 28% Metalle und 16% Glas bzw. Keramik enthalten, die sich in ca. 60 verschiedene Stoffe unterteilen lassen. Kunststoffe werden in dieser Anwendung hauptsächlich für Tastatur und Gehäuse verwendet<sup>332</sup>. Die in Handys verwendeten Kunststoffsorten lassen sich Abbildung 35 entnehmen.

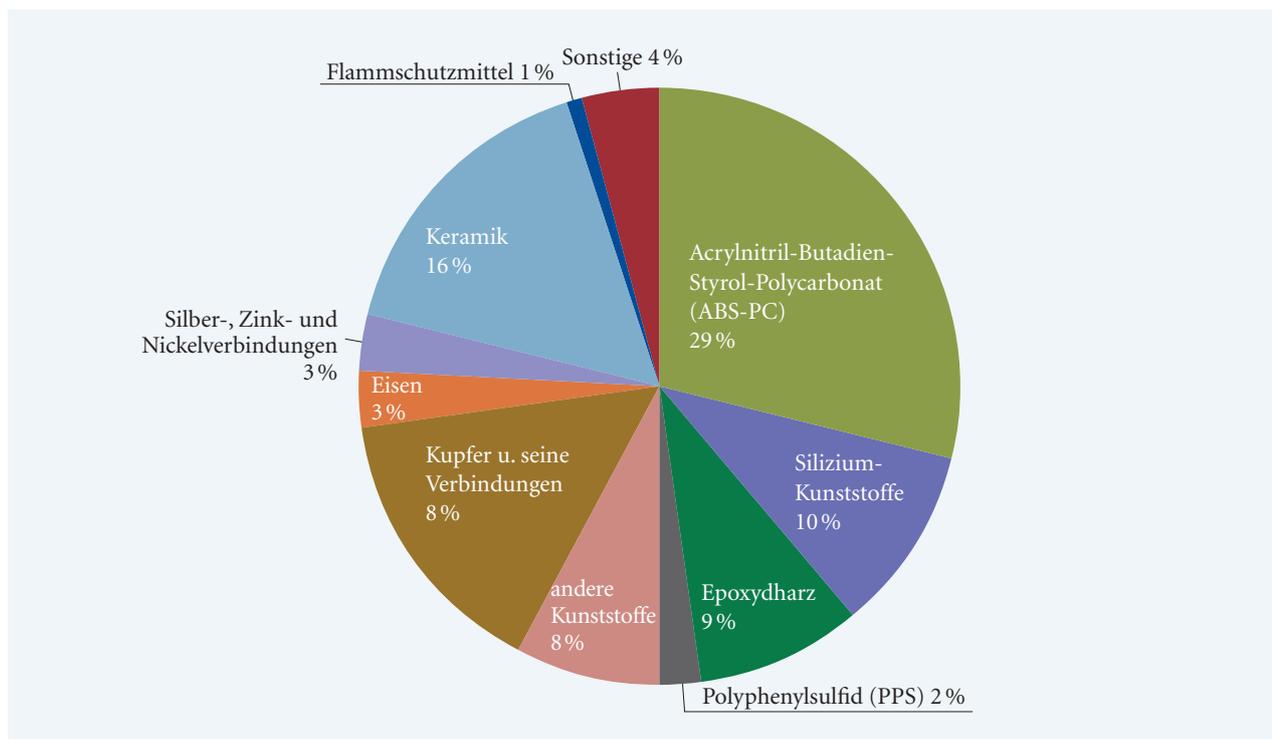


Abbildung 35: In Handys verwendete Werkstoffsorten (anteilig)<sup>333</sup>

Mengenmäßig sind die Kunststoffe Acrylnitril-Butadien-Styrol-Polycarbonat (ABS-PC), Silikone, Epoxydharz und Polyphenylsulfid (PPS) am stärksten vertreten. Sie zählen zu den technischen

329 vgl. ebd.

330 vgl. Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest: Handys, Smartphones, Apps unter: [http://www.mpfs.de/fileadmin/Infoset\\_neu/Infoset\\_Handy.pdf](http://www.mpfs.de/fileadmin/Infoset_neu/Infoset_Handy.pdf). Online am 09.01.2014.

331 vgl. Bundesministerium für Bildung und Forschung: Rohstoffquelle Handy unter: [http://www.die-rohstoff-expedition.de/fileadmin/handy.wissenschaftsjahr-2012/content\\_de/Pressebereich/Download/WJ2012\\_Rohstoffquelle\\_Handy.pdf](http://www.die-rohstoff-expedition.de/fileadmin/handy.wissenschaftsjahr-2012/content_de/Pressebereich/Download/WJ2012_Rohstoffquelle_Handy.pdf). Online am 09.01.2014.

332 vgl. ebd.

333 Modifiziert nach Deutsche Umwelthilfe: Alte Handys: zu wertvoll für den Müll unter: [http://baublog.haus-krekel.de/wp-content/uploads/2010/10/duh-flyer\\_handy-recycling\\_klein.pdf](http://baublog.haus-krekel.de/wp-content/uploads/2010/10/duh-flyer_handy-recycling_klein.pdf). Online am 09.01.2014.

Kunststoffen oder Funktionskunststoffen, wie sie häufig in der Elektronik- und Unterhaltungsindustrie eingesetzt werden. In diesem Bereich sind Halbleiter- und Isolationsfunktionen sowie thermische Stabilitäten jenseits der Raumtemperatur aufgrund der Abwärme der eingesetzten Lithium-Ionen-Akkus gefragt. Für diese Anwendung sind damit insgesamt höhere Anforderungen an die einzusetzenden Kunststoffe gestellt.

So verfügt ein ABS-PC-Blend über eine gute chemische Beständigkeit, hohe Schlag- und Kerbschlagfestigkeit, gute Schalldämpfung, relativ geringe Wasseraufnahme und ist gut verklebbar<sup>334</sup>. Silikone (siliziumbasierte Kunststoffe) können als Isolatoren oder Halbleiter dienen<sup>335</sup>. Sie sind verwitterungsbeständig und resistent gegenüber UV-Strahlung, besitzen eine sehr gute Flammwidrigkeit, gute Temperaturverträglichkeit und besitzen eine gute Wasserabweisung<sup>336</sup>. Epoxidharze werden häufig als stabiler und chemikalienbeständiger Klebstoff eingesetzt<sup>337</sup>. PPS verfügt über eine hohe mechanische Festigkeit, gute Wärmeformstabilität, gute chemische Beständigkeit, hohe Härte sowie gute dielektrische Eigenschaften.

### Kunststoffe im Automobilbau als Beispiele für mittelfristige Anwendungen

#### *Stoßfänger aus schlagzähmodifiziertem PP*

Statt der klassischen Stoßstange besitzen Automobile zunehmend hoch integrierte sogenannte Frontend-Module, die aus Stoßfängersystem, Scheinwerfern, Scheinwerferwaschanlage, Sensorik, Crashmanagement-System, Kabelbaum, Haubenschloss und ggf. sogar Kühlsystem auf einem Montageträger bestehen. Die Außenhaut solcher Stoßfängersysteme besteht dabei meist aus PP-Produkten, die im Spritzgießverfahren hergestellt werden. In einigen Fällen wird auch faserverstärktes PUR eingesetzt. Aus Stabilitätsgründen werden für den Montageträger Metall- oder Metall-Kunststoff-Verbundwerkstoffe aus Stahlblechen mit glasfaserverstärkter Polyamid-Ummantelung verwendet. Reine Kunststoffkonstruktionen weisen bisher nicht die erforderliche Crashesicherheit auf. Das fertig montierte Frontend-Modul kann direkt am Band eingebaut werden. Diese Minimierung des Montageaufwands stellt einen wesentlichen Vorteil von Kunststoffbauteilen dar<sup>338</sup>.

#### *Fahrgastzellen aus kohlefaserverstärkten Kunststoffen (CFK)*

Faserverstärkte Kunststoffe finden dort, wo das Gewicht kritisch, aber gleichzeitig eine hohe mechanische Festigkeit gefordert ist, etwa im Automobil oder in Flugzeugen, verstärkte Anwendung. Durch die Gewichtsverminderung wird Kraftstoff eingespart. Bei Elektroautos wird so die Reichweite deutlich erhöht<sup>339</sup>.

Zur Herstellung der entsprechenden CFK-Verbundwerkstoffe werden etwa 10.000 bis 24.000 Kohlenstofffasern (Carbon), die mit einer Dicke von jeweils 5-8 µm zehnmal dünner sind als ein menschliches Haar<sup>340</sup>, zu einem Bündel zusammengefasst. Das entstehende schwarze Garn wird als Gelege in eine Kunststoffmatrix eingebettet und sodann in einer Form bei hohen Temperaturen ausgehärtet. Die mechanischen und dynamischen Eigenschaften von Kohlenstofffasern sind durch eine hohe Festigkeit, ein hohes Elastizitätsmodul, eine niedrige Dichte und geringe Kriechneigung, eine

334 vgl. Karrer, Martin: karrer.Raumgefühle (Hg.): Kunststoffe / Eigenschaften.

335 vgl. Wacker Chemie AG (Hg.): Silicone – Verbindungen und Eigenschaften., S. 10.

336 vgl. Lambrecht, Jens; Wolf, Hans Peter, Gerlach, Ernst: (Hg.): Chemische Eigenschaften von Siliconelastomeren.

337 vgl. FU Berlin: Kunststoffe zum Kennenlernen: Epoxidharze unter: <http://www.chemie.fu-berlin.de/chemistry/kunststoffe/epoxidharze.htm> (2004). Online am 09.01.2014.

338 vgl. INGENIEUR.de: Smarter Kunststoff-Einsatz wird Kernkompetenz der Autobauer unter: <http://www.ingenieur.de/Themen/Kunststoffe/Smarter-Kunststoff-Einsatz-Kernkompetenz-Autobauer>. Online am 09.01.2014.

339 vgl. Hilscher, Jürgen: BMW i3: Elektroauto mit Carbon-Fahrgastzelle in der BMW Welt unter: <http://www.bimmertoday.de/2013/09/23/bmw-i3-2013-elektroauto-serie-bmw-welt-carbon-life-drive-modul/>. Online am 09.01.2014.

340 vgl. Niesing, Birgit: Carbon in Serie. In: weiter.vorn, 3/12, S. 6–13, S.13.

gute Schwingungsdämpfung sowie eine geringe Materialermüdung charakterisiert. Ihre Festigkeiten übertreffen die der meisten Metalle und anderer Faserverbundwerkstoffe bei gleichzeitig deutlich geringerem Gewicht, weshalb sie oftmals auch als Leichtbauwerkstoff der Zukunft angesehen werden<sup>341</sup>. Kohlenstoff ist chemisch inert und nicht korrosiv, besitzt also eine hohe chemische Beständigkeit, worin ein weiterer Vorteil gegenüber dem Standardkonstruktionswerkstoff Stahl besteht. Die entsprechenden Kohlenstofffasern nehmen praktisch kein Wasser auf und besitzen nur eine geringe Wärmeausdehnung sowie -leitfähigkeit, was ihnen eine hohe Maß- und Formstabilität verleiht. Eine weitere wichtige Werkstoffeigenschaft der Kohlenstofffasern ist ihre geringe Brennbarkeit<sup>342</sup>.

#### *Windenergieanlagen als Beispiel für mittel- bis langfristige Kunststoffanwendungen*

Windräder sind hohen mechanischen und physikalischen Belastungen durch Wind und Wetter ausgesetzt. Darüber hinaus sollen sie möglichst viele Jahre mit geringem Wartungsaufwand zuverlässig arbeiten. Die Rotorblätter sollen außerdem einen möglichst geringen Reibungswiderstand aufweisen, damit die Windenergie mit hoher Effizienz in Strom umgewandelt werden kann. Dies stellt höchste Anforderungen an das verwendete Material. In Offshoreanlagen steigen die beschriebenen Anforderungen durch extremere Wetter- und Witterungsbedingungen sowie einen erhöhten Salzgehalt, der zu einer verstärkten Korrosion führt. Bei heutigen Windenergieanlagen sind häufig sowohl die Gondel als auch die Rotorblätter größtenteils aus glasfaserverstärkten (GFK) oder kohlefaserverstärkten Kunststoffen gefertigt.

#### **Tailored Non-crimp Fabrics (TNCFs) als Beispiel für mittel- bis langfristige Anwendung**

Neue Werkstoffe wie TNCFs können mit Textilien produziert werden. TNCFs verfügen über eine gute Drapierbarkeit<sup>343</sup>. Komplexe dreidimensionale Strukturen können maßgeschneidert werden. Hierdurch wird der Verschnitt drastisch reduziert. Teure Carbonfasern können genau an der Stelle eingesetzt werden, an der sie benötigt werden. Auf diese Weise können Halbzeugregionen, die mechanisch besonders beansprucht sind, mit hoher Biegefestigkeit und Scherfestigkeit ausgestattet werden. Dies verbessert die Prozesssicherheit des Materials. Zusätzlich werden nachfolgende Prozessschritte deutlich verringert. Mit dem Einsatz von TNCF werden Material- und Prozesskosten sowie Taktzeiten deutlich reduziert. Durch die Verringerung der Prozessschritte und die Materialeffizienz ist die Großserientauglichkeit gegeben. TNCFs können in Automobilanwendungen wie z.B. Cabriodächern Verwendung finden.

Die beschriebenen Beispiele zeigen, dass die Wahl des eingesetzten Werkstoffs durch das Anforderungsprofil definiert ist. Um die vielfältigen Anforderungsprofile abzudecken, bedarf es eines entsprechend diversifizierten Werkstoffspektrums. Dies gilt in besonderer Weise für die Kunststoffe.

#### **Entwicklungsstand**

Die Standardkunststoffe wurden bezüglich ihres Eigenschaftsprofils in den letzten 30 Jahren stark weiter entwickelt und konnten auf diese Weise ihre dominierende Rolle behalten, wozu in besonderer Weise Innovationen im Bereich der Additive beigetragen haben. Darüber hinaus prägen ständige Weiterentwicklungen auch die technischen und die Hochleistungskunststoffe, wie auch die Anwendungsbeispiele im Bereich Automobil und Windenergie gezeigt haben. Insgesamt sind konventionelle Kunststoffe in jeden Anwendungsbereich etabliert und stellen damit einen der wichtigsten

341 vgl. Seiwert, Martin; Hennersdorf, Angela; Kiani-Kress, Rüdiger; Brück, Mario: Alles auf eine Faser. In: Wirtschaftswoche (2011), 48, S. 52–63.

342 vgl. Arbeitskreis Nachhaltigkeit AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. (Hg.): Nachhaltigkeit von Faserverbundkunststoffen – Betrachtung anhand ausgewählter Anwendungsbeispiele. (2010), S.8.

343 Drapierbarkeit: sphärische Verformbarkeit von Textilien, die Eigenschaft sich an die Kontur dreidimensionaler Oberflächen anpassen zu können. Quelle: Österreichisches Chemiefaser-Institut (Hg.): Zusammenfassungen / Abstracts 1992., S. 10.

Werkstoffe der heutigen Zeit dar. Entsprechend ausgeprägt sind die Abstimmungen und Verzahnungen entlang der Wertschöpfungskette für petrochemische Kunststoffe.

### II.2.2.2 Biobasierte Kunststoffe

Das nachfolgende Kapitel beschäftigt sich mit der Werkstoffgruppe der biobasierten Kunststoffe und ihrer Bedeutung für die Zukunft der chemischen Industrie in NRW.

#### Geschichtliches

Mit der Gründung der ersten Celluloid-Fabrik Ende des 19. Jahrhunderts beginnt die industrielle Geschichte der biobasierten Kunststoffe. Mit Beginn der Ära der petrochemisch basierten Kunststoffe (Bakelit, Acrylglas etc.) zu Anfang des 20. Jahrhunderts wurden diese aber weitestgehend verdrängt. Erneute gesellschaftliche Aufmerksamkeit erlangten die biobasierten Kunststoffe in den 80er Jahren des 20. Jahrhunderts unter anderem infolge der Ölkrise in den 70er Jahren. In den letzten 20 Jahren erlebten die Biokunststoffe eine Renaissance, wie die vermehrte Entwicklung neuartiger Biokunststoffe z.B. auf Stärkebasis oder fermentativ hergestellte Polyhydroxyalkanoate zeigt.

In diesem Zusammenhang wird meist zwischen Biokunststoffen erster, zweiter und dritter Generation unterschieden<sup>344</sup>. Als biobasierte Kunststoffe der ersten Generation bezeichnet man Kunststoffe, die sich aufgrund vielfältiger Gründe nicht am Markt behaupten konnten. Zu den Gründen gehörten laut Endres 2009<sup>345</sup> unausgereifte Materialeigenschaften und ungünstige politische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen. Biobasierte Kunststoffe der zweiten Generation sind nahezu ausschließlich im Bereich der bioabbaubaren Kunststoffe für Verpackungen, in der Landwirtschaft und im Gartenbau zu finden. Aktuell rücken verstärkt auch technische Anwendungen von Biopolymeren wie z.B. in der Automobilindustrie in den Vordergrund. Diese dritte Generation der Biopolymerwerkstoffe zeichnet sich im Gegensatz zur zweiten Generation entsprechend der Anforderungsprofile in technischen Anwendungen durch Beständigkeit aus.

#### Begriffsdefinitionen

Der Begriff Biokunststoff ist nicht geschützt und wird daher nicht einheitlich verwendet. Der Begriff umfasst vielmehr eine diverse Polymerfamilie, wobei sich das Präfix „Bio“ sowohl auf die Rohstoffbasis (biobasiert<sup>346</sup>) als auch auf die biologische Abbaubarkeit bezieht, auf die Verträglichkeit mit menschlichen oder tierischen Körpern (biokompatibel) oder gar eine biotechnologische Herstellung beziehen kann. Im Sinne der Eindeutigkeit werden in diesem Bericht die Begrifflichkeiten Biopolymer, biobasierter Kunststoff und biologisch abbaubarer Kunststoff gegeneinander abgegrenzt. Der Begriff Biokunststoff wird in diesem Bericht nur dann verwendet, wenn eine eindeutige Zuordnung zu biobasierten und biologisch abbaubaren Kunststoffen z.B. auf Grundlage der Datenbasis nicht möglich ist oder aber beide Bedingungen erfüllt sind. Abbildung 36 zeigt im Materialkoordinatensystem die rohstofflichen und abbaubezogenen Unterscheidungsmerkmale von Kunststoffen. Die vier Eigenschaften im Einzelnen: a) nicht biologisch abbaubar, b) biologisch abbaubar, c) biobasiert und d) fossil basiert.

344 Endres, H.-J.; Siebert-Raths, A.: Technische Biopolymere. Hanser Verlag (2009). ISBN 978-3-446-41683-3.

345 vgl. ebd.

346 Kohlenstoffquelle aus nachwachsenden Rohstoffen.

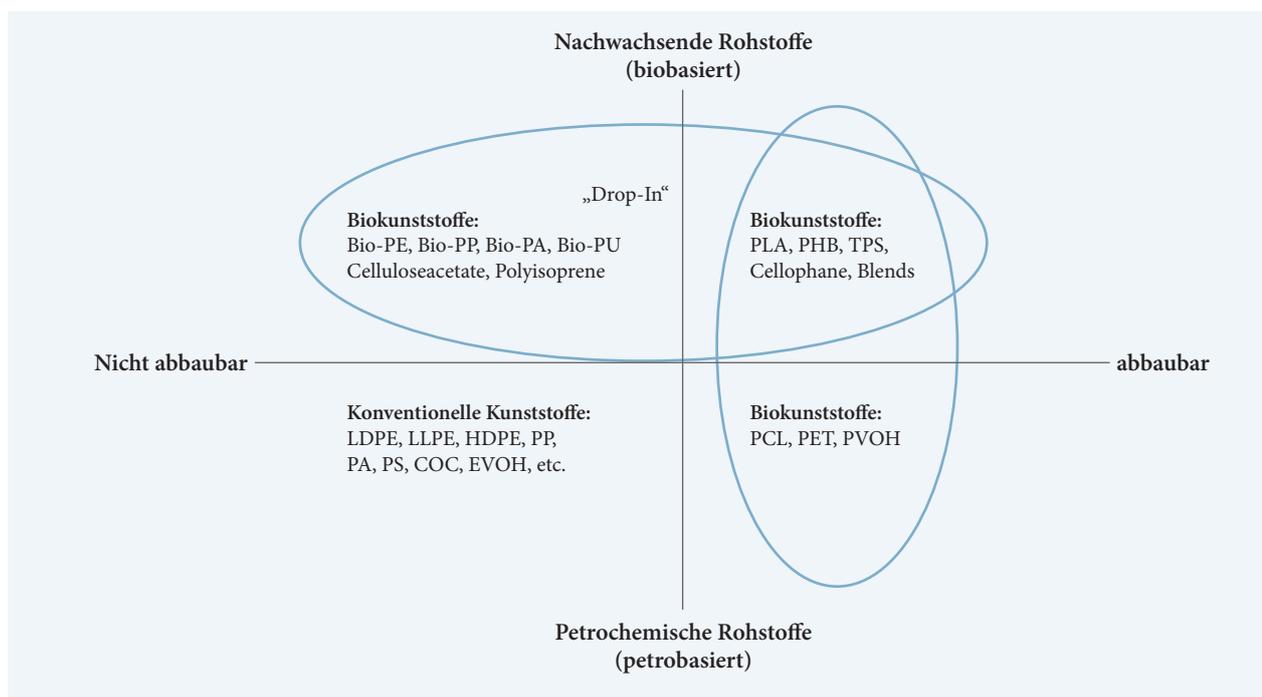


Abbildung 36: Einteilung der Kunststoffe nach Rohstoffquelle und biologischer Abbaubarkeit<sup>347</sup>

Aus dieser Kombination ergeben sich vier Gruppen von Kunststoffen mit folgenden Eigenschaften:

1. Gruppe: biobasiert und biologisch abbaubar;
2. Gruppe: biobasiert und nicht biologisch abbaubar;
3. Gruppe: fossil basiert und biologisch abbaubar;
4. Gruppe: fossil basiert und nicht biologisch abbaubar.

Die Gruppen 1 bis 3 werden als Biokunststoffe bezeichnet. Die nachfolgenden Betrachtungen sind auf die Gruppen 1 und 2, also die biobasierten Kunststoffe, d.h. auf Basis nachwachsender Rohstoffe, beschränkt. Die biologische Abbaubarkeit ist unabhängig von der Rohstoffbasis und wird in Kapitel II.2.3.1 gesondert betrachtet.

Bei den biobasierten Kunststoffen werden entsprechend der Herstellungsart Biopolymere, chemisch synthetisierte Kunststoffe aus biobasierten Monomeren sowie biotechnologisch hergestellte Kunststoffe unterschieden. Ein weiterer wichtiger Begriff im Zusammenhang mit biobasierten Kunststoffen ist der der Drop-in-Lösung. Er beschreibt die Eigenschaft eines biobasierten Materials, als Substitut für einen Kunststoff auf petrochemischer Basis eingesetzt werden zu können, da es dieselbe chemische Struktur wie sein petrochemisches Pendant besitzt. Hieraus ergeben sich (nahezu) identische Eigenschaften des biobasierten und konventionellen Kunststoffs, wodurch eine einfache Einschleusung in bestehende Wertschöpfungsketten möglich ist. Dies gilt insbesondere für die Verarbeitung auf bereits bestehenden Anlagen.

Ein Biopolymer oder auch natives Polymer ist ein bereits in Pflanzen oder Tieren synthetisiertes Polymer, das damit auf der Syntheseleistung der Natur basiert. Der Begriff Biopolymer wird in diesem Bericht ausschließlich für native Polymere verwendet. Als chemisch synthetisierte Kunststoffe aus biobasierten Monomeren werden Kunststoffe bezeichnet, deren Ausgangsmaterial biobasiert ist,

<sup>347</sup> Modifiziert nach: European Bioplastics (Hg.): Was sind Biokunststoffe? Begriffe, Werkstofftypen und Technologien – eine Einführung. (2012).

der Polymerisationsschritt jedoch synthetisch stattfindet. Bei biotechnologisch hergestellten Kunststoffen ist es z.B. mit Hilfe der weißen Biotechnologie möglich, Monomere oder Polymere fermentativ aus Bakterien zu gewinnen. Mit Hilfe der grünen Biotechnologie (vgl. Kapitel III.3.1.1) können Biopolymere zudem in transgenen Pflanzen hergestellt werden.

### Beispiele, Eigenschaften und Anwendungsgebiete

Beispiele für Biopolymere sind Cellulose und Stärke. Cellulose bildet als Gerüstsubstanz den Hauptbestandteil pflanzlicher Zellwände und kann z.B. aus Baumwolle (98%), Holz (ca. 50%) oder Stroh (30%) gewonnen werden. Es handelt sich um ein aus Glucoseeinheiten bestehendes Polymer (Polysaccharid). Bekannt ist Cellulose vor allem aus dem Bereich der Papierherstellung. In biobasierten Kunststoffen wird Cellulose meist als Celluloseacetat eingesetzt oder auch als Faser in faserverstärkten Kunststoffen/Verbundwerkstoffen verarbeitet. Stärke wird aus stärkehaltigen Pflanzen wie Mais gewonnen. Sie ist ebenfalls aus Glucoseuntereinheiten aufgebaut. Erst durch eine chemische Modifikation lassen sich Stärke und Cellulose thermoplastisch, also als Schmelze, verarbeiten.<sup>348</sup> Bei Stärke spricht man dann von thermoplastischer Stärke. Diese stellt mit einem Anteil von 80% zurzeit den wichtigsten Vertreter der biobasierenden Kunststoffe dar<sup>349</sup>.

Bei den Beispielen zu chemisch synthetisierten Kunststoffen aus biobasierten Monomeren sind zwei Gruppen zu unterscheiden: Zum einen solche Kunststoffe, die als sogenannte Drop-in verwendet werden können und zum anderen neuartige Kunststoffe, die in solcher Form petrobasiert nicht auf dem Markt zu finden sind. Das Paradebeispiel für chemisch synthetisierte Kunststoffe aus biobasierten Monomeren als Drop-in-Lösung ist Bio-PE aus Bioethanol. Da es die gleiche chemische Struktur besitzt wie petrochemisch hergestelltes PE, unterscheiden sich die Materialeigenschaften generell nicht von denen des konventionellen PEs. Das Bio-PE kann so auf den gleichen Anlagen wie herkömmliches PE eingesetzt werden. Das Bioethanol wird zunächst aus Zuckerrohr oder Zuckerrüben hergestellt, welches dann chemisch zum Grundbaustein Bio-Ethylen dehydriert wird, der anschließend chemisch polymerisiert wird. Hieraus resultiert schließlich Bio-PE<sup>350</sup>. Marktführer für Bio-PE ist die Firma Braskem in Brasilien, die über Fertigungsanlagen auch am Standort Wesseling verfügt.

PET wird mittels Polykondensation aus Monoethylenglykol und Terephthalsäure oder Dimethylterephthalat hergestellt. Es ist ein thermoplastischer Polyester. Die für die Herstellung von PET benötigte Terephthalsäure wurde bislang aus Kostengründen aus fossilen Rohstoffen synthetisiert. Nun gibt es erste Ansätze, Terephthalsäure biobasiert herzustellen. Grundlage für das hier biobasierte Monoethylenglykol (30 Gewichtsprozent) ist ebenfalls Bioethanol aus Zuckerrohr<sup>351</sup>.

Dem gegenüber stehen die Beispiele für neuartige chemisch synthetisierte Kunststoffe aus biobasierten Monomeren, die nicht als Werkstoffsubstitut dienen sollen, sondern völlig neue Nischen besetzen. So initiieren einige große Softdrinkhersteller (z.B. Coca-Cola, Danone) die Einführung von Getränkeflaschen, sogenannten plant bottles<sup>TM</sup> <sup>352</sup> aus Polyethylen-Furanoat (PEF). Dies könnte eine 100%-biobasierte Alternative zu PET sein. Hier wird 2,5 Furandicarbonsäure (FDCA)

348 vgl. Mecking, Stefan: Biologisch abbaubare Werkstoffe– Natur oder Petrochemie? In: Angewandte Chemie (2004), 9, S. 1096–1104.

349 vgl. biokunststoffe.de; greentech GmbH & Cie. KG: biokunststoffe/Beispiele/ Eigenschaften/ Anwendungsgebiete Biopolymere unter: <http://www.bio-plastics.org/en/information--knowledge-a-market-know-how/bioplastic-types/starch-blends-a-derivates>. Online am 20.12.2013.

350 vgl. Jansen, Marco: Braskem S.A. (Hg.): Green PE: conventional performance from a sustainable source. (2012).

351 vgl. BIOCUM AG; biotechnologie.de: Marktstudie: Biopolymere weltweit auf Wachstumskurs unter: <http://www.biotechnologie.de/BIO/Navigation/DE/Hintergrund/studien-statistiken,did=162988.html> (2013). Online am 20.12.2013.

352 vgl. Gotro, Jeffrey: Polyethylene Furanoate (PEF): 100% Biobased Polymer to Compete with PET? unter: <http://polymerinnovationblog.com/polyethylene-furanoate-pef-100-biobased-polymer-to-compete-with-pet/> (2013). Online am 20.12.2013.

mit Ethylenglykol zu PEF polymerisiert. In den Niederlanden wurde eine Technologie entwickelt, um FDCA aus Biomasse herzustellen<sup>353</sup>. Ein weiteres Beispiel für chemisch synthetisierte Kunststoffe aus biobasierten Monomeren ist das Bio-Polyamid (Bio-PA). Polyamide sind lineare Polymere mit wiederkehrenden Amidbindungen in der Hauptkette. Aufgrund ihrer hohen Beständigkeit gegenüber organischen Lösungsmitteln sowie gleichzeitiger Zähigkeit und Festigkeit werden sie häufig als Konstruktionswerkstoffe eingesetzt. Bio-PA kann aus Rizinusöl hergestellt werden. Die Firma Evonik Industries hat ein breites Produktportfolio für Polyamide dieser Art<sup>354</sup>.

Ein Beispiel für biotechnologisch hergestellte Kunststoffe ist Polylactid (PLA), dessen Grundbaustein Milchsäure bzw. Lactat als deren Salz fermentativ aus Bakterien gewonnen werden kann. Als Ausgangsmaterial wird dabei Glucose eingesetzt. Auch die bakterielle Speichersubstanz Polyhydroxybuttersäure (PHB) kann durch die Umsetzung nachwachsender Monomere gewonnen werden. Ein weiteres Beispiel für einen interessanten Bio-Polyester sind Polysuccinate. Sie bestehen aus Butandiol und Bernsteinsäure. Butandiol ist zudem für die Herstellung der Plattformchemikalie Butadien geeignet. Sowohl Butandiol als auch Bernsteinsäure können biotechnologisch hergestellt werden. Dies geschieht erfolgreich bei der Firma Thyssen Krupp Uhde in einer Pilotanlage<sup>355</sup>. Beim Polybutylensuccinat-Adipat (PBSA) wird neben der Bernsteinsäure noch Adipinsäure einpolymerisiert. Auch bei diesem Kunststoff kann je nach Monomerherkunft der biobasierte Anteil unterschiedlich groß sein.<sup>356</sup> Das Biopolymer Cyanophycin (CGP), ein Biopolymer, welches als bakterieller Stickstoffspeicher verwendet wird<sup>357</sup> und zunächst nur in Cyanobakterien vermutet wurde, wird aufgrund seiner ähnlichen Eigenschaften zum Polyacrylat (dem Vorläufer für PLEXIGLAS®<sup>358</sup>) als interessantes neuartiges Biopolymer gehandelt. Seine Herstellung ist sowohl in Bakterien als auch in transgenen Pflanzen (Kartoffeln<sup>359</sup>) möglich. Für die (biotechnologische) Herstellung von biobasierten Kunststoffen ist zu beachten, dass diese aufgrund des Kohlenstoffgehalts von nachwachsenden Rohstoffen eine theoretische Maximalausbeute von 30-35% besitzen. Darüber hinaus müssen die entsprechenden Fermentationen mit energetischem Aufwand gekühlt werden, da biologische Reaktionen zumeist bei Temperaturen um 35°C ablaufen<sup>360</sup>. Tabelle 15 zeigt wichtige biobasierte Kunststoffe und für diesen Bericht relevante Eigenschaften.

---

353 vgl. FNR; Biopolymernetzwerk: Biobasiertes PET unter: <http://biopolymernetzwerk.fnr.de/biobasierte-werkstoffe/werkstoffe/biobasiertes-pet/>. Online am 20.12.2013.

354 vgl. Evonik Industries AG: VESTAMID® Terra – Because we care unter: <http://www.vestamid.de/product/vestamid/de/produkte-dienstleistungen/vestamid-terra/pages/default.aspx>. Online am 20.12.2013.

355 vgl. KunststoffWeb: Uhde Inventa-Fischer: Verfahren zur Produktion von PBS (22.05.2012).

356 vgl. FNR; Biopolymernetzwerk: Biobasierte Polysuccinate unter: <http://biopolymernetzwerk.fnr.de/biobasierte-werkstoffe/werkstoffe/biobasierte-polysuccinate/>. Online am 20.12.2013.

357 vgl. Steinbüchel, Alexander: Cyanophycin – Biosynthese und Abbau unter: <http://mibi1.uni-muenster.de/Biologie.IMMB.Steinbuechel/Forschung/Cyanophycin.html>. Online am 20.12.2013.

358 vgl. Evonik Industries AG: Sie begegnen PLEXIGLAS® Tag für Tag unter: <http://www.plexiglas.de/product/plexiglas/de/Pages/default.aspx>. Online am 20.12.2013.

359 vgl. Steinbüchel, Alexander: Cyanophycin – Biosynthese und Abbau unter: <http://mibi1.uni-muenster.de/Biologie.IMMB.Steinbuechel/Forschung/Cyanophycin.html>. Online am 20.12.2013.

360 vgl. Evonik Industries AG; Häger, Harald: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Werkstoffe“ der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2013), Antwort auf Frage 3.

Tabelle 15: Eigenschaften wichtiger biobasierter Kunststoffe

	Thermoplastische Stärke	Celluloseacetat	Bio-Polyethylen	Bio-Polyamid	Polylactid	Polyhydroxyalkanoate	Bio-Polypropylen
<b>Abkürzung</b>	TPS	CA	Bio-PE	Bio-PA	PLA	PHA	Bio-PP
<b>Herkunft</b>	Biopolymer	Biopolymer	biobasierte Monomere	biobasierte Monomere	biotechnologisch hergestellt	biotechnologisch hergestellt	biobasierte Monomere
<b>Monomer</b>	Glucose	Glucose	Ethylen (Ethen)	Aminocarbonsäuren, Lactame, Diamine, Dicarbonsäuren	Milchsäure (2-Hydroxypropansäure)	Es gibt sehr viele verschiedene, z.B. 3-Hydroxybuttersäure (3PHB)	Propylen (Propen)
<b>Eigenschaften</b>	nimmt leicht Wasser auf	transparent, schwer entflammbar, leicht zu färben	milchig-trüb, sehr geringe Wasseraufnahme	hohe Festigkeit, hohe Zähigkeit, beständig gegenüber organischen Lösemitteln	gut einstellbares Eigenschaftsprofil, hohe CO <sub>2</sub> - und O <sub>2</sub> -Durchlässigkeit, biologisch abbaubar	wasserunlöslich, lineare Polymere, bioabbaubar	teilkristallin, hart, hohe Steifigkeit
<b>Verwendung</b>	Medikamentenkapselhüllungen, als Beimischung zu anderen Polymeren	Textilfasern, Gewebe, Displays	Folien, Shampooflaschen, Benzinkanister, Fässer, Rohre, Profile <sup>360</sup>	Fasern, Leitungen, Bauteile	Lebensmittelverpackungen, kurzlebige Produkte, bioabbaubare Produkte wie Müllbeutel etc.	Lebensmittelverpackungen, medizinischer Bereich wie. Z.B. Nahtmaterial oder Implantate	je nach Compoundierung im Fahrzeugbau, Fahrradhelme, Textilien

Informationen über biobasierte Kunststoffe können zudem der Biopolymerdatenbank unter <http://www.materialdatacenter.com/mb/> entnommen werden. Die Datenbank wurde in Zusammenarbeit des Instituts für Biopolymere und Bioverbundwerkstoffe (IfBB) der Hochschule Hannover, des Verbands European Bioplastics und des Softwareentwicklers M-Base Engineering + Software GmbH entwickelt und vom Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) mit der Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger gefördert. Sie ermöglicht es interessierten Anwendern, in kürzester Zeit auf aktuelle Daten zugreifen zu können.

Eine Methode der Zertifizierung biobasierter Kunststoffe ist auf Basis des biobasierten Kohlenstoff-Anteils. Der Nachweis erfolgt über den Gehalt an <sup>14</sup>C-Kohlenstoff (Radiokarbonmethode). Eine entsprechende Zertifizierung in Deutschland nimmt das Unternehmen DIN CERTCO vor. Von diesem zertifizierte Kunststoffe bzw. Kunststoffprodukte dürfen das Prüfsiegel aus Abbildung 37 tragen.

Abbildung 37: Zertifikat für biobasierte Kunststoffe mit einer Gültigkeit von 5 Jahren<sup>362</sup>.

361 vgl. FNR; Biopolymernetzwerk: Biobasierte Polyolefine unter: <http://biopolymernetzwerk.fnr.de/biobasierte-werkstoffe/werkstoffe/biobasierte-polyolefine/>. Online am 20.12.2013

362 vgl. DIN CERTO Gesellschaft für Konformitätsbewertung mbH (Hg.): Biobasierte Produkte – für mehr Nachhaltigkeit – DIN CERTCO.

## Marktdaten

Abbildung 38 zeigt die Anteile einzelner biobasierter Kunststoffe an der Gesamtproduktionskapazität für Biokunststoffe<sup>363</sup> von ca. 1,3 Mio. t im Jahr 2012. Ihr Anteil lag damit bei weniger als 1% gemessen an der Produktion der konventionellen Kunststoffe<sup>364</sup> von ca. 235 Mio. t im Jahr 2011.<sup>365</sup> Die Bedeutung der Biokunststoffe hat zwar in den letzten Jahren zugenommen<sup>366</sup>, insgesamt besetzen die Biokunststoffe zurzeit aber einen Nischenmarkt.

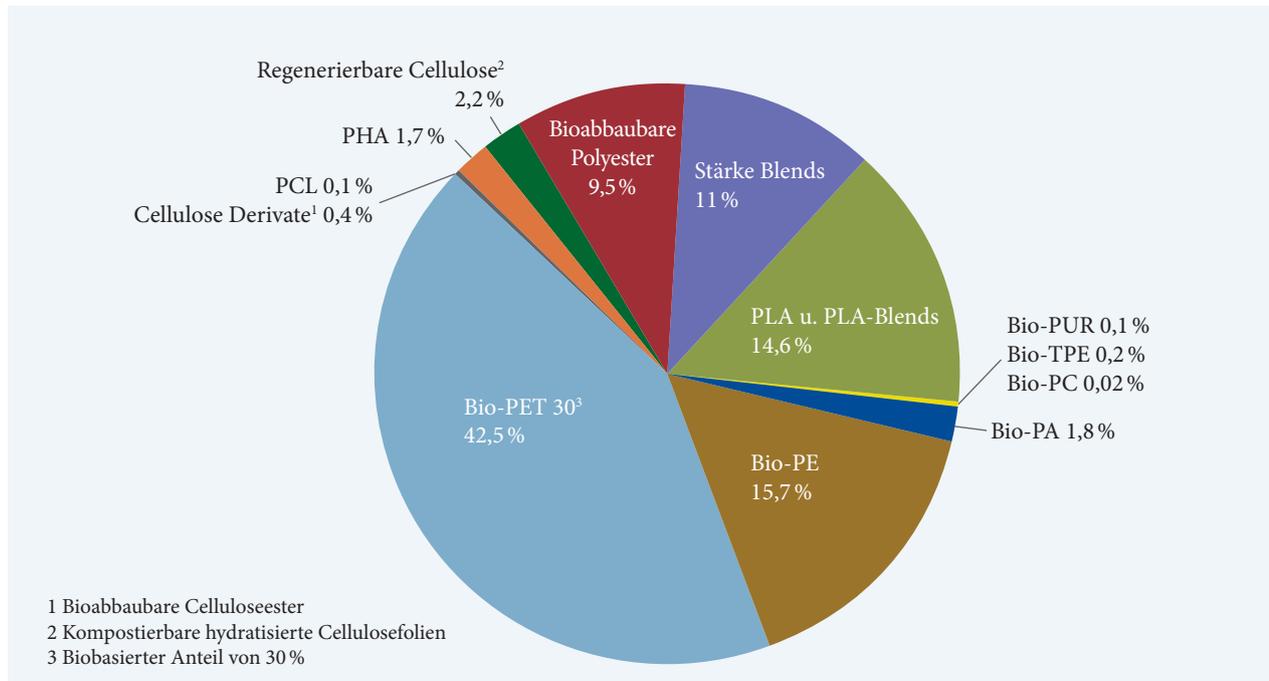


Abbildung 38: Anteil der unterschiedlichen Materialien an Biopolymer-Produktion, 2012<sup>367</sup>

Folgendes gilt es für Abbildung 38 zu beachten:

- Thermoplastische Stärke (TPS) ist trotz ihrer hohen Bedeutung als biobasierter Kunststoff nicht gesondert aufgeführt, sondern in den Stärke-Blends enthalten.
- Der Begriff des biobasierten Kunststoffs ist nicht eindeutig definiert, d.h. es gibt keine Vorgabe, ab welchem prozentualen biobasiertem Anteil ein Kunststoff als biobasiert gilt. Ist kein weiterer Wert angegeben, muss von einer 100%igen Biobasiertheit ausgegangen werden. Ein weiteres Beispiel sind die Stärke-Blends, die nur zu einem Teil aus TPS bestehen, während die beigemischten Kunststoffkomponenten zumeist petrochemischen Ursprungs sind.<sup>368</sup> Darüber hinaus ist zu

363 Zu beachten ist, dass die Abbildung entsprechend der Definition des „Biokunststoff“-Begriffs neben biobasierten Kunststoffen auch solche aufweist, die petrochemischer Natur sind und durch ihre biologische Abbaubarkeit der Gruppe der Biokunststoffe angehören.

364 Gemeint sind Kunststoffe im engeren Sinne, also Standard- und technische Kunststoffe sowie PUR-Elastomere.

365 vgl. PlasticsEurope (Hg.): Plastics – the Facts 2012 – An analysis of European plastics production, demand and waste data for 2011. (2012).

366 vgl. Lackiertechnik in Deutschland: DFO Tagung Kunststofflackierung 2013 unter: <http://www.dfo.info/de/dfo-ev/kompetenz-ziele/tagungen/tagungsdetails.html?idtagung=8> (2013). Online am 20.12.2013.

367 modifiziert nach IfBB Hochschule Hannover: Material share of biopolymer production capacity unter: <http://ifbb.wp.hs-hannover.de/downloads/content/Statistics/Market%20statistics/Production%20capacities/By%20regions/2012/Material%20share%20of%20biopolymer%20production%20capacity%20sorted%20by%20region%202012.png> (2013). Online am 06.01.2014.

368 Evonik Industries AG; Häger, Harald: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Werkstoffe“ der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2013).

berücksichtigen, dass es bis auf wenige Ausnahmen<sup>369</sup> keine biobasierten Additive gibt. Der Bio-Anteil eines Biopolymers muss also gesondert betrachtet werden.

- c) In der Grafik wird nicht explizit zwischen beständigen und biologisch abbaubaren Kunststoffen unterschieden; dies lässt sich zumeist nur indirekt über die chemischen Eigenschaften der jeweiligen Kunststoffsorten ermitteln.

Innerhalb der Biokunststoffe besitzt das Bio-PET mit 42,5% den größten Anteil. Weitere wichtige biobasierte Kunststoffsorten sind Bio-PE mit 15,7%, PLA sowie entsprechende Blends mit einem Marktanteil von 14,6%, Stärke-Blends mit 11% und biologisch abbaubare Polyester mit einem Anteil von 9,5%. Alle sonstigen Biokunststoffe besitzen nur Marktanteile von 2% oder weniger. Auffallend ist, dass mit Bio-PE (15,7%) und Bio-PET (42,5%) mehr als die Hälfte der biobasierten Kunststoffe zu den Drop-ins zählen, also als Substitut für petrochemische Kunststoffe verwendet werden. Demgegenüber haben die modifizierten Biopolymere mit Stärke Blends und Celluloseacetat nur einen Kapazitätsanteil von gut 11%. Die biotechnologisch hergestellten Polymere wie PHA sowie PLA und PLA-Blends nahmen 2012 mit einem Anteil von gut 15% eine ebenfalls eher kleine Rolle ein.

Abbildung 39 zeigt die Marktentwicklung (Produktionskapazitäten) von Biokunststoffen zwischen 2010 und 2012 und unterscheidet dabei entsprechend der Rohstoffbasis und der Abbaubarkeit der Biokunststoffe in beständig/biobasiert, bioabbaubar/biobasiert und bioabbaubar/petrobasiert.

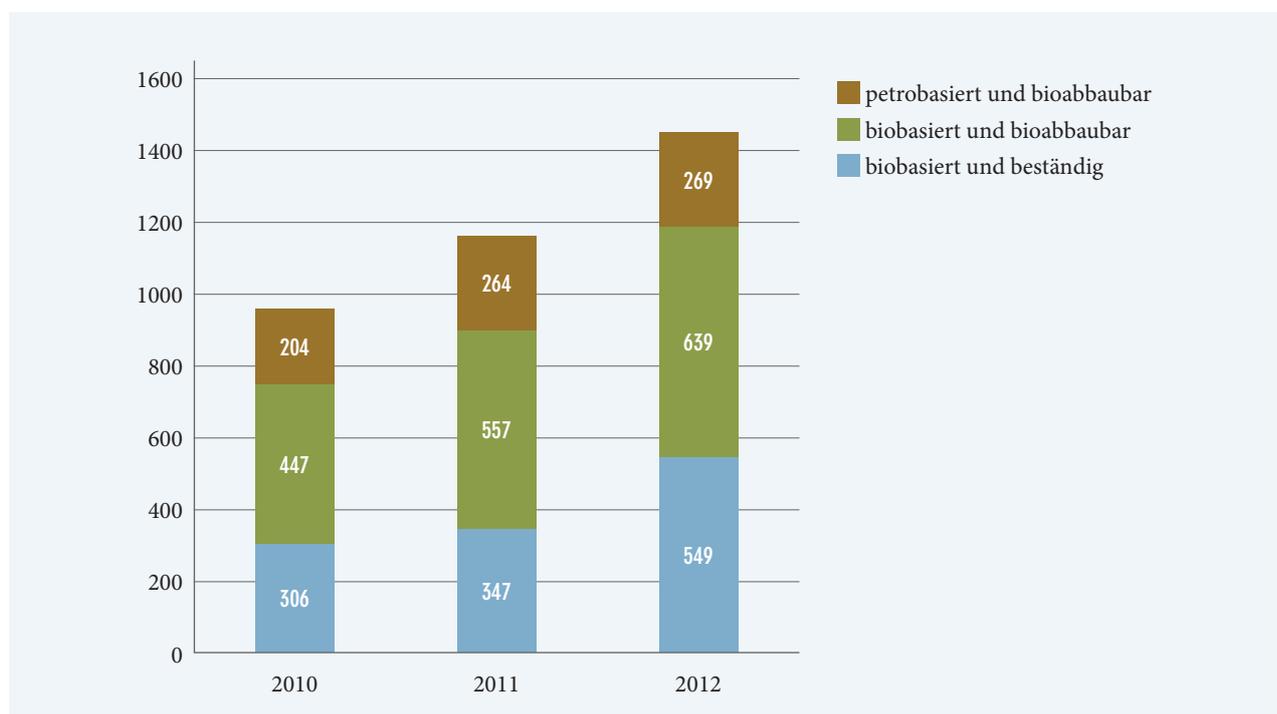


Abbildung 39: Weltweite Produktionskapazitäten von biobasierten Kunststoffen<sup>370</sup>

Insgesamt sind die Marktkapazitäten von Biokunststoffen (im Diagramm hellgrau und dunkelgrau gekennzeichnet) in diesen zwei Jahren von ca. 750.000 t auf ca. 1,2 Mio. t gestiegen. Diese Darstellungsweise zeigt, dass der Marktanteil biobasierter abbaubarer Kunststoffe vom Jahr 2011 auf das Jahr 2012 weniger stark gestiegen ist als der Anteil biobasierter beständiger Kunststoffe.

369 vgl. Emery Oleochemicals: Products/Plastic Additives – Products, Edenol, Loxiol unter: [http://www.emeryoleo.com/plastic\\_additives.php](http://www.emeryoleo.com/plastic_additives.php). Online am 06.01.2014.

370 modifiziert nach Grimm, Vera; Eickenbusch, Heinz: VDI Zentrum Ressourceneffizienz (Hg.): Rohstoffquelle Biomasse – Stand und Perspektiven, (2012b).

Die Produktionskapazitäten für biobasierte Kunststoffe befanden sich 2012 bei fast 40% sowie 30% in Asien und Südamerika und damit überwiegend außerhalb Europas (hier 17%)<sup>371</sup>. Gründe hierfür sind in der besseren und preiswerten Verfügbarkeit der Rohstoffe zu sehen<sup>372</sup>. In Europa findet in den meisten Fällen nur die Weiterverarbeitung statt.

Die nachfolgende Aufstellung gibt eine Übersicht über mittelständische Firmen in Nordrhein-Westfalen, die sich auf die Entwicklung, Produktion und Verarbeitung biobasierter Kunststoffe spezialisiert haben:

**BIOTEC, Emmerich:** Die Firma BIOTEC ist einer der Weltmarktführer in der Produktion biobasierter und bioabbaubarer Kunststoffe. In Frankreich ist das Unternehmen Marktführer in der Produktion kompostierbarer Beutel und Tüten; auch in anderen Ländern hat das Unternehmen eine Spitzenposition inne.

**FkuR, Willich:** FkuR verarbeitet biobasierte und kompostierbare Kunststoffe auf Basis von Polymilchsäure. FkuR hat in mehreren Märkten eine Spitzenposition in der Vermarktung kompostierbarer Folien; in Europa ist es ein exklusiver Vertriebspartner für biobasiertes Polyethylen.

**Victorgroup, Frechen:** Victorgroup ist im deutschsprachigen Raum Marktführer in der Verarbeitung von biobasierten, kompostierbaren Kunststoff zu Kunststofftüten. Dieser Produktionsschritt der Verarbeitung von Granulat zu Tüten wird in der Regel in Asien durchgeführt. Victorgroup hat sich darauf spezialisiert, kompostierbares Granulat zu verarbeiten<sup>373</sup>.

In keinem anderen Bundesland Deutschlands gibt es eine solche Dichte an Marktführern in der Produktion und Verarbeitung von Biokunststoffen wie in Nordrhein-Westfalen. So nimmt NRW hierin auch auf europäischer Ebene eine der oder gar die Spitzenposition(en) ein.<sup>374</sup>

### Entwicklungsstand

Bei der Betrachtung des Entwicklungsstandes der biobasierten Kunststoffe ist erneut zwischen den Drop-ins und den Spezialanwendungen zu unterscheiden. Für Drop-ins bestehen hinsichtlich ihrer Verarbeitung aufgrund gleicher Eigenschaften zu ihren petrochemischen Pendanten keine generellen Unterschiede, so dass bestehende Verarbeitungsanlagen verwendet werden können<sup>375</sup>. Anders sieht dies oftmals bei biobasierten Kunststoffen mit anderer chemischer Struktur und damit mit anderen Materialeigenschaften aus. Hier ist bspw. eine geringere thermische Beständigkeit zu nennen, infolgedessen muss die Maschinengeschwindigkeit erhöht werden, um eine schnellere Verarbeitung zu ermöglichen<sup>376</sup>. Die Verarbeitung auf bestehenden Maschinen kann durch geschicktes Blenden oder Compoundieren erzielt werden. Die eingesetzten Additive sind fast ausschließlich petrochemischen Ursprungs<sup>377</sup>.

371 vgl. IfBB Hochschule Hannover: Material share of biopolymer production capacity unter: <http://ifbb.wp.hs-hannover.de/downloads/content/Statistics/Market%20statistics/Production%20capacities/By%20regions/2012/Material%20share%20of%20biopolymer%20production%20capacity%20sorted%20by%20region%202012.png> (2013). Online am 06.01.2014.

372 vgl. Evonik Industries AG; Häger, Harald: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Werkstoffe“ der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2013)

373 vgl. BASF; Hamprecht, Jens: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Werkstoffe“ der Enquete Kommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2013).

374 vgl. ebd.

375 vgl. PlasticsEurope Deutschland; Baunemann, Rüdiger: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Werkstoffe“ der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2013).

376 Dr. Rainer Dahmann (RWTH Aachen): Landtag NRW (Hg.): Enquetekommission II Protokoll 6. Sitzung (nichtöffentlich). (2013).

377 Dr. Harald Häger (Evonik Industries AG): ebd.

Als Drop-in wird biobasiertes Ethylen etc. zurzeit immer dann verwendet, wenn die Biobasiertheit vom Kunden gewünscht ist. Ein weiteres Beispiel für ein als Drop-in verwendetes Monomer ist biobasierte Amino-Laurinsäure<sup>378</sup>. Diese wird ebenfalls bei der Herstellung von Polyamiden eingesetzt, kann aber das erdölbasierte (butadien-basierte) Laurinlactam gleichwertig ersetzen. Endprodukt ist ein identisches Polyamid 12 (PA 12). In den Eigenschaften unterscheiden sich Drop-in-Lösungen nicht von ihren petrochemischen Alternativen und werden auch entsprechend dieser Eigenschaften eingesetzt, sind aber dem Marktdruck der petrochemisch hergestellten Kunststoffe ausgesetzt. So ist z.B. der Preis für Bioethanol durch die Verwendung von Bioethanol als Kraftstoff eng an den Ölpreis gekoppelt. Biobasierte Kunststoffe im Bereich der Standardkunststoffe sind oftmals Polyester, die im Vergleich zu Polyolefinen anfälliger gegen Hydrolyse (Abbau) sind und einen deutlichen Dichtenachteil von etwa 20% aufweisen<sup>379</sup>.

Die Preise von biobasierten Kunststoffen liegen generell im Schnitt um den Faktor 3-5<sup>380</sup> höher, wodurch die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber den konventionellen petrochemischen Kunststoffen eingeschränkt ist. Dies gilt in besonderem Maße, da die betrachteten biobasierten Kunststoffe entsprechend ihrer Eigenschaften und Anwendungen zumeist mit den Standardkunststoffen konkurrieren<sup>381</sup>, die aufgrund ihrer produzierten Mengen von Skaleneffekten profitieren. Dieser Mehrpreis muss i.d.R. durch einen Mehrwert der Werkstoffeigenschaften/des Produktes kompensiert werden.<sup>382</sup> Es stellt sich also die Frage, in welchen Bereichen die biobasierten Kunststoffe aufgrund ihrer anderen chemischen Struktur und den entsprechenden Eigenschaften mit den petrochemischen konkurrieren können, sich also der Mehrpreis lohnt. Ein Teilbereich ist zurzeit derjenige der bioabbaubaren Kunststoffe. Dieser wird eingehend in Kapitel II.2.3.1 beschrieben. PLA und seine Mischungen sind bspw. seit Jahren als Spezialpolymer im medizinischen Bereich etabliert. In zunehmendem Maße entwickelt sich PLA auch als Faserstoff z.B. im Automobilsektor<sup>383</sup> sowie als Verpackungsmaterial<sup>384</sup>.

Auch bei Anwendungen, bei denen biobasierte Kunststoffe Eigenschaftsprofile besitzen, die petrochemisch nur schwer einstellbar sind, ist ein Mehrpreis gerechtfertigt. Dies umfasst den Bereich der technischen Kunststoffe und Hochleistungskunststoffe. Dies kann zum einen eine verstärkte Wasseraufnahme wie z.B. von TPS und CA sein, aber auch die Barriereigenschaften vieler biobasierter Kunststoffe. Dies kann sowohl gewünscht als auch unerwünscht sein. In letzterem Fall kann ein Blend mit anderen Kunststoffen sowie einer Compoundierung bspw. mit wasserabweisenden Additiven Abhilfe schaffen. Polyamide auf Rizinusölbasis sind bspw. feuchtigkeitsunempfindlicher und zeigen eine verbesserte Hydrolyse und Chemikalienbeständigkeit.<sup>385</sup> Dazu zählt unter anderem das Produkt VESTAMID® Terra (Evonik). Die Einsatzbereiche liegen im höherwertigen Bereich der Elektronik, im Sportbereich, bei Hygiene und Kosmetika sowie im Automobilbereich bspw. als

---

378 vgl. Evonik Industries AG; Plastics-News: Evonik: Pilotanlage für biobasierte? Amino-Laurinsäure als alternativer Rohstoff für PA 12 (31.07.2013).

379 vgl. Evonik Industries AG; Häger, Harald: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Werkstoffe“ der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2013), Antwort zu Frage 3.

380 vgl. Umweltbundesamt (UBA) (Hg.): Biologisch abbaubare Kunststoffe. (2009).

381 Evonik Industries AG; Häger, Harald: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Werkstoffe“ der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2013).

382 vgl. Umweltbundesamt (UBA) (Hg.): Biologisch abbaubare Kunststoffe. (2009).

383 vgl. BASF; Hamprecht, Jens: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Werkstoffe“ der Enquete Kommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2013).

384 vgl. Umweltbundesamt (UBA) (Hg.): Biologisch abbaubare Kunststoffe. (2009).

385 vgl. Kuttkat, Bernhard; Otto, Claudia: Biobasierte Kunststoffe werden immer bedeutender (17.10.2012).

Motorabdeckung<sup>386</sup>. Die zurzeit noch weniger verbreiteten Bio-Polyphthalamide (BIO-PPA, aromatische Polyamide) sind aufgrund ihrer hohen Dichte bei geringem Gewicht für den Einsatz als Bauteil interessant<sup>387</sup>. Technische Cellulosefasern wie z.B. Cordenka® Rayon werden als Verstärkung für Autoreifen verwendet, da sie extrem hitzestabil sind und sich so auch bei längeren Fahrten nicht verformen<sup>388</sup>.

Die Compoundierung biobasierter Hochleistungspolymere mit Standardkunststoffen (petrobasiert oder biobasiert) führt zu weiteren Hochleistungspolymeren, die interessante Eigenschaften besitzen. Hier stehen die biobasierten Compounds in Konkurrenz zu petrobasierten. Die Entwicklung ganz neuer Werkstoffe ist zeitlich (mindestens 10 Jahre<sup>389</sup>) und finanziell sehr aufwändig. Aus diesem Grund ist die Zahl der neu entwickelten biobasierten Werkstoffe sehr klein und war nur in den Fällen erfolgreich, in denen, wie im Beispiel der Bio-PET-Flasche, Entwickler und Endanwender zusammenarbeiten und gemeinsam das finanzielle Risiko tragen.<sup>390</sup>

### Flächennutzung

Bei der Verwendung von biobasiertem Material für die Kunststoffproduktion stellt sich auch die Frage nach der Verfügbarkeit der benötigten Anbauflächen. Zudem ist die sich ergebene Konkurrenz zwischen Nahrungsmittel- und Energiepflanzenanbau zu beachten. Abbildung 40 zeigt die globalen landwirtschaftlichen Nutzungsflächen.

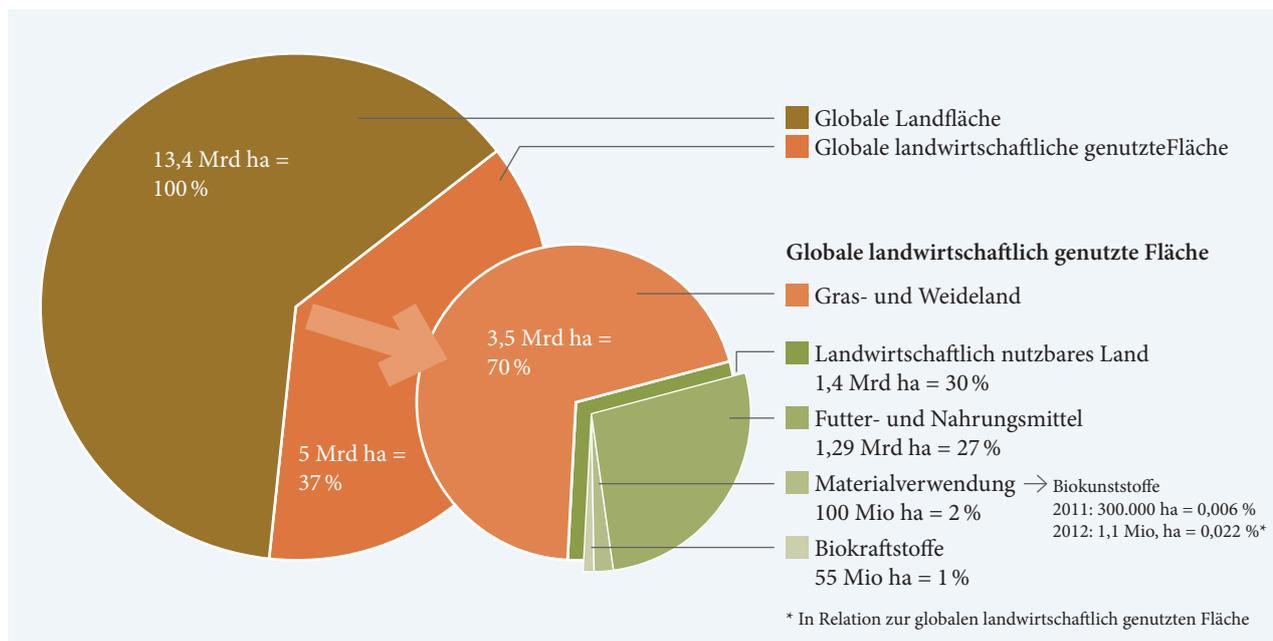


Abbildung 40: Flächennutzung für biobasierte Kunststoffe<sup>391</sup>

386 vgl. Evonik Industries AG: VESTAMID® – Eine Evolutionsgeschichte der Hochleistungspolyamide unter: <http://www.vestamid.de/product/vestamid/de/Produkte-Dienstleistungen/VESTAMID-Terra/technische-eigenschaften/Pages/default.aspx>. Online am 20.12.2013.

387 vgl. Ter Plastics Polymer Group: Lösungen/Metallersatz unter: <http://www.terhell.de/de/loesungen/metallersatz.php>. Online am 09.01.2014.

388 vgl. CORDENKA GmbH (Hg.): Fahren auf Rayon. (2013).

389 vgl. Evonik Industries AG; Häger, Harald: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Werkstoffe“ der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2013).

390 vgl. ebd.

391 vgl. European Bioplastics (Hg.): European Bioplastics publishes data on land-use for bioplastics. (2013).

Diese sind unterteilt in Grasland, Ackerland, Land zur Produktion von Nahrung und Futtermitteln, Ackerfläche zum Anbau von Pflanzen zur stofflichen Verwertung sowie Flächen, die zum Anbau von Material zur Biokraftstoffherstellung dienen. Biobasierte Kunststoffe machten mit 300.000 ha im Jahr 2011 einen Anteil an der stofflichen Verwertung von 0,006% der gesamten bewirtschaftbaren Fläche aus. Dies entspricht der Fläche Luxemburgs. Für die Flächennutzung wird angenommen, dass für alle Gruppen von Biopolymeren eine Steigerung der genutzten Fläche von 300.000 ha (0,006%) auf 1.1 Millionen ha (0,022%) im Jahre 2016 zu erwarten ist. Dies entspricht ungefähr einem Drittel der Fläche von Nordrhein-Westfalen.

Bei den Betrachtungen zur Flächennutzung ist auch die jeweilige Ausbeute der eingesetzten Biomasse zu berücksichtigen. Dies hängt unter anderem vom Energiegehalt und dem damit verbundenen Kohlenhydratertrag der verwendeten Nutzpflanzen ab (s. auch Abbildung 41).

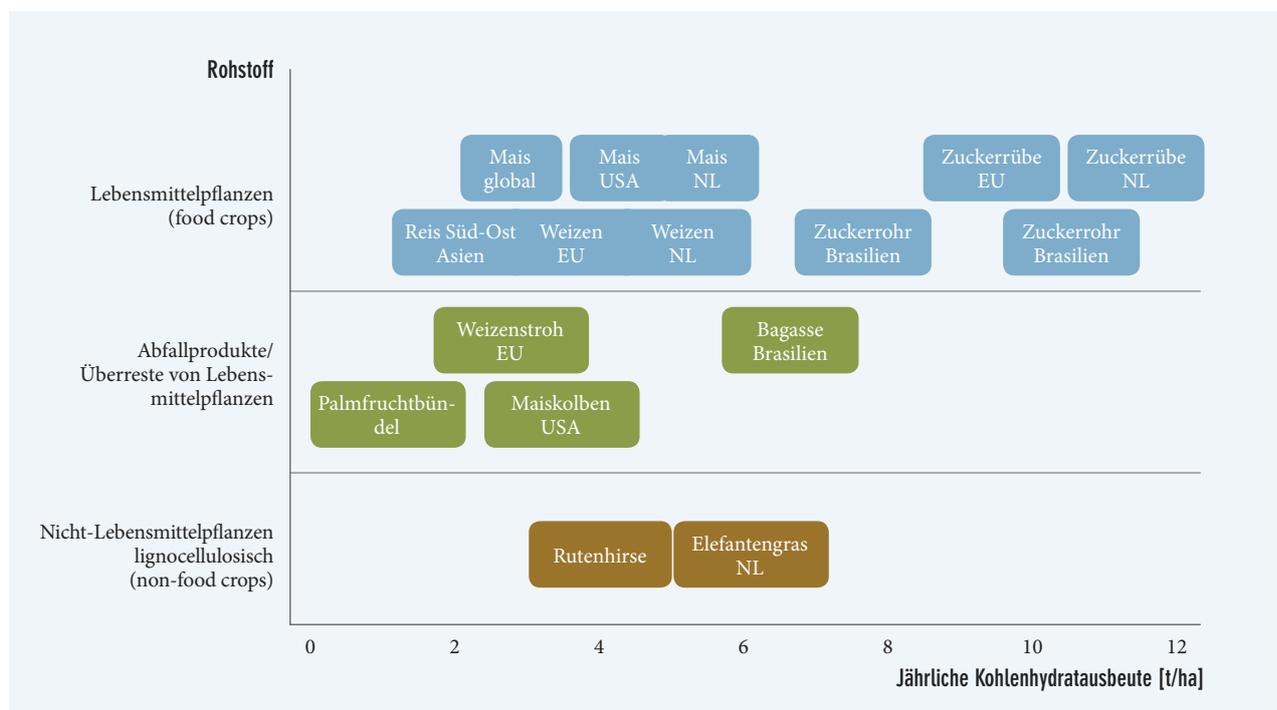


Abbildung 41: Durchschnittlicher Ertrag an Kohlenhydraten für verschiedene Nutzpflanzen<sup>392</sup>

Am Beispiel der Bio-PE-Produktion der Firma Braskem soll im Folgenden der Flächenbedarf zur Herstellung biobasierter Kunststoffe verdeutlicht werden: Pro Hektar Anbaufläche können 82,5 t Zuckerrohr geerntet werden, aus denen 7.200 l Ethanol hergestellt werden. Hieraus lassen sich wiederum 3 t Bio-PE erzeugen.<sup>393</sup> Für eine Jahresproduktion von 200.000 t Bio-PE werden 460 Mio. l Bioethanol benötigt. Dies entspricht fast 2% der brasilianischen Ethanol-Jahresproduktion (1,04 Mrd. l/ 820 Mio. t). Hierfür ist eine Zuckerrohranbaufläche von ca. 65.000 ha erforderlich, was 0,02% der gesamten Ackerfläche von Brasilien (329 Mio. ha) entspricht.<sup>394</sup>

392 vgl. Carus, Michael; Dammer, Lara: nova-Institut GmbH (Hg.): Food or non-food: Which agricultural feedstocks are best for industrial uses? (2013).

393 vgl. Jansen, Marco: Braskem S.A. (Hg.): Green PE: conventional performance from a sustainable source. (2012).

394 vgl. ebd.

## II.2.3 Betrachtungen zur Nutzung nach Ende des Produktlebens

### II.2.3.1 Biologisch abbaubare Kunststoffe

Die in § 6 Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) festgelegte fünfstufige Abfallhierarchie sieht folgende Priorisierung zur Nutzung eines Produktes nach dessen Produktleben vor: Abfallvermeidung vor Wiederverwertung, gefolgt von einem werkstofflichen bzw. rohstofflichen Recycling sowie der Verwertung (thermisch oder Kompostierung). Die letzte in Betracht zu ziehende Option stellt die Beseitigung dar. Der vorliegende Bericht fokussiert auf das Recycling sowie die Verwertung.

Der Abbau eines Werkstoffs in der Umwelt kann sowohl rein chemisch-physikalisch als auch durch biologische Aktivitäten erfolgen. Beim sogenannten abiotischen Abbau werden die Polymerketten durch chemisch-physikalische Einflüsse wie UV-Strahlung, Sauerstoffeinwirkung (Oxidation) oder Wärme gespalten, so dass es zu einem Zerfall in kürzere Ketten und Bruchstücke kommt. Beim biologischen Abbau dagegen erfolgt der Kettenabbau durch Mikroorganismen, die diese zu den natürlich vorkommenden Stoffwechselprodukten Biomasse, Methan, CO<sub>2</sub>, Wasser und Mineralien verstoffwechseln. Dieser Vorgang wird auch als Mineralisierung bezeichnet. Ein Werkstoff wird als biologisch abbaubar bezeichnet, wenn er auf diese Weise theoretisch zu 100% mineralisiert werden kann. Der tatsächliche Abbaugrad und die Dauer ist von folgenden Faktoren abhängig, die nicht in allen natürlichen Umgebungen vorherrschen (z.B. Salzwasser): a) von einer ausreichenden Menge Mikroorganismen, die biochemisch in der Lage sind, den Kunststoff zu verstoffwechseln; b) von der chemischen Struktur des Kunststoffs (z.B. Kettenlänge und Verzweigungsgrad der Polymerketten, Kristallinität, Hydrophilie sowie Angriffspunkte für den biologischen Abbau (insbesondere C-O- und C-N-Bindungen); c) von der chemischen und physikalischen Struktur des finalen Kunststoffprodukts (z.B. nicht abbaubare, toxische bzw. hemmende Additive, zugängliche Oberfläche) sowie d) die abiotischen Umgebungsbedingungen (Sauerstoffgehalt, Feuchtigkeit, pH-Wert), die sowohl den rein chemisch-physikalischen Zerfall der Polymerketten, als auch die mikrobielle Aktivität bestimmen. Dieser mikrobielle Abbau erfolgt in Abhängigkeit von den vorherrschenden Bedingungen sowie des betrachteten Werkstoffs. Der Begriff der biologischen Abbaubarkeit impliziert daher keinen Zeitraum, wird aber im allgemeinen Sprachgebrauch zur Unterscheidung von beständigen Kunststoffen zumeist für einen Abbau innerhalb von einigen Tagen bis zu einem Jahr verwendet. Die Abbaubarkeit stellt eine Werkstoffeigenschaft dar, die unabhängig von der Rohstoffbasis ist (s. Abbildung 36<sup>395</sup>). Das heißt, ein biologisch abbaubarer Kunststoff kann sowohl biobasiert als auch petrochemisch basiert sein. Biologisch abbaubare Kunststoffe lassen sich somit in vier Gruppen unterteilen:

- a) abbaubare natürliche (Bio)Polymere wie Cellulose und Stärke,
- b) abbaubare (chemisch) modifizierte natürliche Polymere, z.B. Stärke-Blends, Celluloseacetat,
- c) abbaubare synthetische Polymere aus natürlichen Monomeren oder Polymeren (z.B. Polybutylensuccinat (PBS) und
- d) abbaubare synthetische Polymere wie Polybutylenadipat-Terephthalat (PBAT).

Handelt es sich bei der biologischen Abbaubarkeit um eine Werkstoffeigenschaft, ist die Kompostierbarkeit eine Produkteigenschaft. Als kompostierbar gilt nach EN 13432<sup>396</sup> ein Kunststoffprodukt, das innerhalb von 2 Wochen unter genauestens definierten Bedingungen (u.a. Temperatur, Luftfeuchte, Sauerstoffgehalt) zu 90% in Fragmente unter 2 mm zerfällt, ohne dabei die Fruchtbarkeit des Bodens

395 vgl. European Bioplastics (Hg.): Was sind Biokunststoffe? Begriffe, Werkstofftypen und Technologien – eine Einführung. (2012)

396 vgl. DIN CERTO: DIN EN 13432 „Anforderungen an die Verwendung von Verpackungen durch Kompostierung und biologischen Abbau“. unter: <http://www.dincertco.de/de/kompostierbarkeitszeichen.html>. Online am 07.01.2014.

zu beeinträchtigen und eine bestimmte Schwermetallkonzentration zu überschreiten<sup>397</sup>. Dies bedeutet, dass ein biologisch abbaubarer Kunststoff (nahezu ausschließlich) aus bioabbaubaren Polymeren und Additiven bestehen muss (EN 13432 lässt Spuren nicht abbaubarer Substanzen zu)<sup>398</sup>. Nach den Anforderungen von EN 13432 zertifizierte Produkte können mit dem Kompostierbarkeitszeichen „Keimling“<sup>399</sup> oder „DIN-geprüft industriell kompostierbar“<sup>400</sup> ausgezeichnet werden. Die Zertifizierung wird in Deutschland durch die Zertifizierungsgesellschaft DIN CERTCO durchgeführt und garantiert einen störungsfreien Betrieb der Kompostieranlagen. Die biologische Abbaubarkeit stellt somit ein notwendiges, aber nicht hinreichendes Kriterium der Kompostierbarkeit dar und ist nicht direkt mit ihr gleichzusetzen. Gleichzeitig ist zu beachten, dass eine Zertifizierung der Kompostierbarkeit keine generelle Eignung zur Kompostierung auf dem heimischen Kompost impliziert, da die dortigen Bedingungen von denen der EN 13432 abweichen.

In diesem Bericht wird der Begriff der biologischen Abbaubarkeit im Sinne eines Abbaus innerhalb eines Zeitraums von bis zu einem Jahr verstanden. Der Begriff der Kompostierbarkeit wird nur dann verwendet, wenn es sich um Produkte mit entsprechender Zertifizierung nach EN 13432 handelt. Im Zweifel wird deshalb der Begriff der biologischen Abbaubarkeit verwendet, der dann eine potenzielle Kompostierbarkeit impliziert.

Wie oben bereits erwähnt, kann – neben dem aeroben biologischen Abbau wie etwa bei der Kompostierung – ein Werkstoff auch unter sauerstoffarmen Bedingungen (anaerob) durch andere Mikroorganismen zu ähnlichen Stoffwechselprodukten abgebaut werden. Man spricht hier von Vergärung (Bsp. Biogasproduktion). In diesem Zusammenhang sind weiterhin die Begriffe oxo-abbaubar und photo-abbaubar abzugrenzen. Entsprechende Kunststoffe (Polyolefine PE und PP) enthalten bestimmte Additive (meist Metallionen (Kobalt, Mangan, Eisen, Zink)), die dem Kunststoff zugemischt werden und die Oxidation bzw. den Kettenabbau besonders unter Wärme, Luft, Sauerstoff (oxo-abbaubar) oder UV-Strahlung (photo-abbaubar) beschleunigen. Es handelt sich hierbei also um einen Zerfall des Polymers und nicht um einen biologischen Abbau. Hinsichtlich der biologischen Abbaubarkeit ist zu beachten, dass diese sich allgemein auf die Verstoffwechslung durch terrestrische Mikroorganismen (z.B. Weißfäulepilze) bezieht. Auch in marinen Systemen kann generell ein biologischer Abbau der Kunststoffe stattfinden. Durch die unterschiedlichen Bedingungen in marinen und terrestrischen Systemen (z.B. höherer Salzgehalt) sowie das Vorkommen anderer Mikroorganismen, können Erfahrungen zur Kompostierung nicht auf marine Systeme übertragen werden. Zum Abbau fähige Mikroorganismen sind nicht überall oder in ausreichender Populationsgröße vorhanden, so dass der Abbau eines kompostierbarer oder biologisch abbaubaren Kunststoffes im Meer in der Regel deutlich mehr Zeit in Anspruch nimmt als an Land.<sup>401</sup> 2012 betrug die Produktionskapazität für biologisch abbaubare Kunststoffe nach Angaben des IfBB (vgl. Abbildung 39) ca. 500.000 t<sup>402</sup>. Die berücksichtigten Kunststoffe können mit den spezifischen Produktionskapazitäten Tabelle 16 entnommen werden. Diese hatten 2011 ein ungefähres Marktvolumen von 1,8 Mrd. Euro<sup>403</sup>. Ein Vergleich mit einer im Juli 2013 erschienenen Studie des nova-Instituts zeigt auch

397 vgl. ebd.

398 vgl. Bonten, Christian; Rieger Bernhard: k-online.de (Hg.): Biokunststoffe- DIN EN 13432.

399 vgl. DIN CERTCO: DIN EN 13432 „Anforderungen an die Verwendung von Verpackungen durch Kompostierung und biologischen Abbau“. unter: <http://www.dincertco.de/de/kompostierbarkeitszeichen.html>. Online am 07.01.2014

400 vgl. ebd.

401 vgl. Eubeler, Jan P.: Universität Bremen; BASF SE (Hg.): Biodegradation of Synthetic Polymers in the Aquatic Environment. (2010).

402 vgl. IfBB Hochschule Hannover: Global biopolymer market size sorted by material grade unter: <http://ifbb.wp.hs-hannover.de/downloads/content/Statistics/Market%20statistics/Market%20share/By%20groups%20of%20bioplastics/Global%20biopolymer%20market%20size%20sorted%20by%20material%20grade.png> (2013). Online am 07.01.2014.

403 vgl. ebd.

für die biologisch abbaubaren Kunststoffe Unterschiede zu den Erhebungen des IfBB. Denn laut nova-Institut betrug deren Produktionskapazität 2012 fast 1,6 Mio. t pro Jahr<sup>404</sup>. Die Unterschiede sind einerseits in der Auswahl der betrachteten Kunststoffe sowie in unterschiedlich erfassten Mengen begründet (vgl. Tabelle 16). Die biologisch abbaubaren Kunststoffe stellen nach beiden Studien einen äußerst geringen Anteil am globalen Kunststoffmarkt (ohne Klebstoffe, Beschichtungen und Fasern) von 235 Mio. t<sup>405</sup> dar (13,9% an Biokunststoffen<sup>406</sup>, die je nach Erhebung einen Anteil von max. 2% am Gesamtkunststoffmarkt besitzen).

Tabelle 16: Vergleich der Erhebungen zu den globalen Produktionskapazitäten biologisch abbaubarer Kunststoffe 2012, eigene Darstellung<sup>407,408</sup>

	Datenlage	
	IfBB	nova-Institut
Celluloseacetat (CA)	-	835.000 t/a
Cellulose und Derivate	34.000 t/a	-
PBS und PBAT	122.000 t/a	175.000 t/a
PCL	1.250 t/a	-
PHAs	21.750 t/a	30.000 t/a
PLA	186.000 t/a	190.000 t/a
Stärke-Blends	140.000 t/a	335.000 t/a
<b>Summe</b>	<b>505.000 t/a</b>	<b>1.565.000 t/a</b>

Zu den biologisch abbaubaren Kunststoffen auf nachwachsender Rohstoffbasis (Biopolymere) zählen bspw. Stärke und Cellulose sowie ein Teil ihrer Derivate. Biotechnologisch lassen sich mit Hilfe von Mikroorganismen auf Zucker- oder Stärkebasis die biologisch abbaubaren Kunststoffe PLA sowie die Polyhydroxyfettsäuren PHB und Polyhydroxyvalerat (PHV) herstellen. Als Beispiel für einen abbaubaren Kunststoff, der synthetisch aus natürlichen Monomeren hergestellt wird, sei hier PBS genannt. Dieses wird durch Copolymerisation des Stoffwechsellzwischenprodukts Bernsteinsäureester oder Salze (Succinat) mit Butandiol (kann biotechnologisch auf Basis nachwachsender Rohstoffe sowie synthetisch auf Erdölbasis gewonnen werden) erzeugt. Zu den petrochemischen Kunststoffen, die biologisch abbaubar sind, zählen die synthetischen Copolyester Polybutylen(adipat-terephthalat) (PBAT) sowie der Polyester Polycaprolacton (PCL)<sup>409</sup>. Ein kommerzielles Beispiel ist der synthetische Copolyester Ecoflex®, der von der Firma BASF als Blend-Komponente für kompostierbare Kunststoffprodukte entwickelt wurde<sup>410</sup>. Dies ist ein Copolyester auf Basis der aliphatischen Adipin-

404 vgl. nova-Institut GmbH (Hg.): Bio-based Polymers in the World Capacities, Production and Applications: Status Quo and Trends towards 2020 – Market study. (2013).

405 vgl. PlasticsEurope (Hg.): Plastics – the Facts 2012 – An analysis of European plastics production, demand and waste data for 2011. (2012).

406 vgl. IfBB Hochschule Hannover: Material share of biopolymer production capacity unter: <http://ifbb.wp.hs-hannover.de/downloads/content/Statistics/Market%20statistics/Production%20capacities/By%20groups%20of%20bioplastics/2012/Material%20share%20of%20biopolymer%20production%20capacity%20sorted%20by%20material%20grade%202012.png> (2013). Online am 07.01.2014.

407 vgl. IfBB Hochschule Hannover: Global biopolymer market size sorted by material grade unter: <http://ifbb.wp.hs-hannover.de/downloads/content/Statistics/Market%20statistics/Market%20share/By%20groups%20of%20bioplastics/Global%20biopolymer%20market%20size%20sorted%20by%20material%20grade.png> (2013). Online am 07.01.2014.

408 vgl. nova-Institut GmbH (Hg.): Bio-based Polymers in the World Capacities, Production and Applications: Status Quo and Trends towards 2020 – Market study. (2013).

409 vgl. Umweltbundesamt (UBA) (Hg.): Biologisch abbaubare Kunststoffe. (2009).

410 vgl. BASF (Hg.): The certified compostable polymer ecoflex®. (2012).

säure mit der aromatischen Terephthalsäure. Inzwischen wird auch ein entsprechendes PLA-Blend unter dem Handelsnamen Ecovio® vertrieben<sup>411</sup>.

Generell erfolgt der Abbau der Kunststoffe in zwei Schritten, nämlich durch enzymatische oder chemische Hydrolyse der Polymerketten in niedermolekulare Bruchstücke, die dann von Mikroorganismen aufgenommen und verstoffwechselt werden. Die Abbaubarkeit der Biopolymere wie Stärke und Cellulose ergibt sich durch ihren natürlichen Ursprung, wo sich zahlreiche Mikroorganismen auf deren Verstoffwechslung spezialisiert haben. Die Abbaubarkeit biotechnologisch hergestellter Kunststoffe wie PLA, PHB und PHV ist ebenfalls damit zu begründen, dass sie Stoffwechselprodukte von Mikroorganismen sind, die die für den Abbau notwendige genetische Ausstattung aufweisen. Die Abbaubarkeit der petrochemischen Kunststoffe wird durch entsprechende Angriffspunkte (C-O- und C-N-Verbindungen) sowie eine geringere Kristallinität als die ihrer nicht-abbaubaren Verwandten vermittelt, an denen mikrobielle Enzyme ansetzen können. Die Gruppe der synthetisch erzeugten Polymere aus biobasierten Monomeren wie PBS baut im Wesentlichen auf dem natürlichen Ursprung dieser Monomere sowie entsprechender Enzymangriffspunkte in der Polymerkette auf. Die Abbaubarkeit kann jedoch durch eine chemische Modifikation verändert werden oder sogar ganz verloren gehen. Beispiele hierfür sind die thermoplastische Stärke oder Celluloseacetat. Stärke und Cellulose lassen sich erst nach einer chemischen Modifikation thermoplastisch, also als Schmelze, verarbeiten<sup>412</sup>. Die so hergestellten Derivate haben das chemische Potenzial abgebaut zu werden. Dieser Abbau gelingt aber schlechter. Bei Polyester nimmt die Abbaubarkeit durch eine zunehmende Kristallinität ab, während sich ihre mechanischen Eigenschaften verbessern<sup>413</sup>. Einen ähnlichen Effekt hat in vielen Fällen eine Compoundierung mit Copolymeren oder Additiven, die verbesserte mechanische Eigenschaften zum Ziel hat (Beispiel thermoplastische Stärke)<sup>414</sup>.

Haupteinsatzgebiete biologisch abbaubarer Kunststoffe sind Verpackungen mit aktuell ca. 220.000 t pro Jahr<sup>415</sup>. Weitere Anwendungen – mit allerdings sehr kleinen Produktionsmengen – stellen Gartenbau-, Agrar- und Cateringprodukte sowie technische Anwendungen dar. Anwendungsbeispiele für den Verpackungssektor sind Tragetaschen, Verpackungsfolien, (Bio-)Müllbeutel und Verpackungschips auf Maisstärke-Basis. Daneben gibt es zahlreiche biologisch abbaubare Verpackungen für Lebensmittel und Kosmetika wie etwa Schalen für Gemüse, Obst und Fleisch sowie Joghurtbecher aus PLA. Biologisch abbaubare Cateringprodukte bieten die Möglichkeit, die Verpackung nach ihrer (einmaligen) Benutzung mitsamt den Essensresten zu entsorgen. Dies scheint insbesondere für Großveranstaltungen von Vorteil. Typische biologisch abbaubare Produkte im Garten- und Landwirtschaftsbetrieb sind Mulchfolien zur Unkrautbekämpfung, die nach Nutzung untergepflügt werden können, Pflanz- und Anzuchtöpfe, Pflanzenklammern. In diesem Fall bietet die biologische Abbaubarkeit den zusätzlichen Produktvorteil, dass sich der Arbeitsaufwand minimiert, da Mulchfolien, Töpfe und Klammern nicht mehr gesondert entsorgt werden müssen bzw. zusammen mit den Pflanzenresten untergepflügt werden können. Weitere Beispiel sind Friedhofslichter, Urnen und Golfabschlagshalter. Ein weiteres Einsatzgebiet biologisch abbaubarer Kunststoffe ist die Medizin, wo Nahtmaterialien, Schrauben und Kurzzeitimplantate aus PLA und PCL als sehr hochwertige Kunststoffprodukte Verwendung finden. Da diese Materialien nach der Nutzungsphase vom Körper abgebaut und resorbiert werden, sind andere operative Eingriffe zur Entfernung überflüssig. Der

411 vgl. BASF (Hg.): ecovio® – Bioabbaubarer Kunststoff auf Basis nachwachsender Rohstoffe. (2012).

412 vgl. ebd.

413 vgl. ebd.

414 vgl. ebd.

415 vgl. IfBB Hochschule Hannover: Global biopolymer production capacity unter: <http://ifbb.wp.hs-hannover.de/downloads/content/Statistics/Market%20statistics/Production%20capacities/By%20fields%20of%20application/Global%20biopolymer%20production%20capacity%20sorted%20by%20market%20segment%202011.png> (2013). Online am 07.01.2014.

Hygienebereich stellt ein zusätzliches Anwendungsfeld dieser Kunststoffgruppe mit Windelfolien, Damenbinden, Inkontinenzunterlagen und Einmalhandschuhen als Wegwerfprodukte mit kurzer Lebensdauer dar. In Asien ist darüber hinaus auch ein zunehmender Einsatz im technischen Bereich etwa als Handy- oder PC-Gehäuse zu verzeichnen.<sup>416</sup> Ecovio® wird ebenfalls zu kompostierbaren Biomülltüten oder Tragetaschen, Mulchfolien, Schrumpffolien z.B. zur Verpackung von Getränkeflaschen und Schaumverpackungen für Lebensmittel verarbeitet. Eine weitere Anwendung stellt die Beschichtung von Papier zur Herstellung von kompostierbarem Einweggeschirr und –getränkebechern dar.<sup>417</sup>

Großangelegte Studien in den Städten Bad Dürkheim und Berlin haben gezeigt, dass der Einsatz von kompostierbaren Müllbeuteln zur Sammlung von Bioabfällen aufgrund der durch deren Einsatz verbesserten Hygiene die entsprechenden Erfassungsquoten erhöhen<sup>418</sup>. In der novellierten Bioabfallverordnung (BioAbfV) vom 23. April 2012 wurden biologisch abbaubare Werkstoffe/Kunststoffe aus überwiegend nachwachsenden Rohstoffen mit den Abfallschlüsselnummern 02 01 04 Kunststoffabfälle (ohne Verpackungen) und 20 01 39 Kunststoffe neu als Bioabfälle in Anhang 1 Nr. 1 BioAbfV aufgenommen. Eine Verwertung im Rahmen der Bioabfallverordnung – und damit über die Biotonne – wurde damit erstmals ermöglicht. Zur Verwendung als Bioabfälle sind allerdings nur Produkte zulässig, die mit der Norm DIN EN 13432 „Verpackung – Anforderungen an die Verwertung von Verpackungen durch Kompostierung und biologischen Abbau – Prüfschema und Bewertungskriterien für die Einstufung von Verpackungen“ bzw. der Norm DIN EN 14995 „Kunststoffe – Bewertung der Kompostierbarkeit – Prüfschema und Spezifikationen“ zertifiziert wurden<sup>419</sup>. Insgesamt werden biologisch abbaubare Kunststoffe dann eingesetzt, wenn der zügige Abbau vorteilhaft ist bzw. wenn die biologische Abbaubarkeit einen Mehrwert darstellt.

### Entwicklungsstand

Die biologische Abbaubarkeit wird, wie bereits beschrieben, in erster Linie durch die Molekülstruktur vermittelt. Entsprechend unterscheiden sich biologisch abbaubare Kunststoffe hierin von der Mehrheit der konventionellen Kunststoffe, da ihre Polymere z.B. geringere Kristallinität und/oder einen höheren Anteil von aliphatischen O- und N-Atomen aufweisen, die die Abbaubarkeit vermitteln. Hiervon werden auch andere Eigenschaften beeinflusst. So weisen biologisch abbaubare Kunststoffe oft eine geringere mechanische Festigkeit, eine geringere Temperaturstabilität und höhere Hydrolyseempfindlichkeit auf, die den Anwendungsbereich einschränken können. Auch die fehlende oder geringe Thermoplastizität der genannten Biopolymere ist nachteilig für die Verarbeitung, weshalb die Eigenschaften durch Compoundierung anwendungsgerecht eingestellt werden müssen. Auch das Verarbeitungsfenster bei der Compoundierung und der Verarbeitung unterscheidet sich meist von den konventionellen Kunststoffen. Deshalb müssen die Compoundierungs- und Verarbeitungsmaschinen spezifisch ausgelegt werden, was ggf. einen höheren Aufwand erfordert. Entsprechende Additive für die Compoundierung müssen – insbesondere für kompostierbare Kunststoffe – ebenfalls diese Eigenschaft aufweisen. Hier steht bislang nur ein eingeschränktes Portfolio zur Verfügung.

Generell besteht also für die biologisch abbaubaren Kunststoffe ein ähnlicher Forschungsbedarf wie bei den biobasierten, nämlich die Erweiterung des Eigenschaftsspektrums, u.a. um auch neue Markt-

416 vgl. Umweltbundesamt (UBA) (Hg.): Biologisch abbaubare Kunststoffe. (2009).

417 vgl. BASF (Hg.): ecovio® – Bioabbaubarer Kunststoff auf Basis nachwachsender Rohstoffe. (2012).

418 vgl. BASF; Hamprecht, Jens: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Werkstoffe“ der Enquete Kommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2013).

419 vgl. Verband kommunaler Unternehmen e.V. (Hg.): Informationspapier des VKU zu biologisch abbaubaren Kunststoffen.

segmente zu erobern. Insbesondere bei Verpackungen stellen die nicht ausreichend ausgeprägten Barriereigenschaften z.B. von PLA gegenüber Gasen und Flüssigkeiten ggf. eine Hürde dar<sup>420</sup>.

### II.2.3.2 Recycling

Das nachfolgende Kapitel beschäftigt sich mit der Betrachtung des Recyclings von Werkstoffen. Beschrieben werden die aktuellen technisch möglichen Wege und deren Umsetzung in Deutschland und Europa. Ausführungen zur Kompostierbarkeit sind in Kapitel II.2.3.1 zu finden.

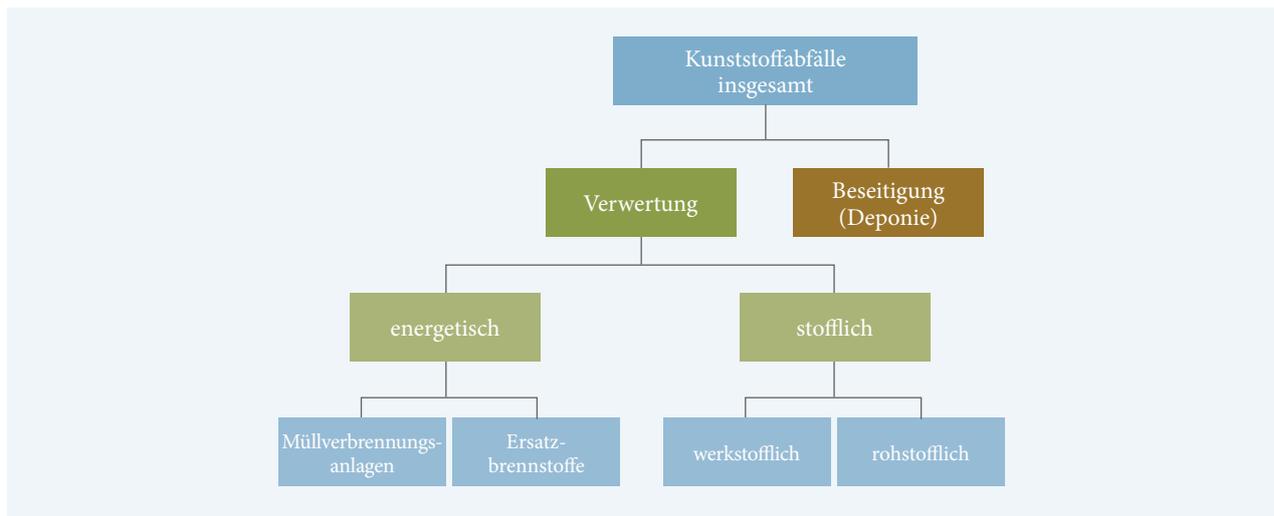


Abbildung 42: Nachnutzungspfade von Werkstoffen nach ihrem Produktleben<sup>421</sup>

Bei der Betrachtung der Nutzung von Werkstoffen nach ihrem Produktleben sind die in Abbildung 42 gezeigten Begrifflichkeiten zu unterscheiden. Als Entsorgung wird die Verwertung und Beseitigung von Abfällen verstanden. Dabei umfasst erstere sowohl die energetische Verwertung, d.h. die Verbrennung zur Rückgewinnung der in den Abfällen enthaltenen Energie, die stoffliche Verwertung, auch als Recycling bezeichnet. Die stoffliche Verwertung bzw. das Recycling lässt sich in das werkstoffliche und rohstoffliche Recycling unterteilen, die im Weiteren noch detaillierter erläutert werden. Bei der Beseitigung wird ein Abfall deponiert oder aber ohne Energierückgewinnung verbrannt. Beim werkstofflichen Recycling bleiben der Kunststoff als solcher und damit die Polymere (Makromoleküle), aus denen er besteht, erhalten. Sortierte Kunststoffe werden in der Regel zu Regranulaten verarbeitet. Dies bedeutet, dass die Kunststoffprodukte zerkleinert und/oder eingeschmolzen und zu Kunststoffgranulaten verarbeitet werden, welche anschließend erneut zur Produktherstellung eingesetzt werden können<sup>422</sup>. Reine Thermoplaste lassen sich, einmal zu einem Werkstück geformt, wieder einschmelzen und zu einem neuen Produkt formen. Werkstoffliches Recycling wird deshalb fast ausschließlich dort eingesetzt, wo große Mengen eines sortenreinen Materials zur Verfügung stehen. Für sortenreine Kunststoffe, die als Reste eines Produktionsweges anfallen (sog. pre-consumer waste), wird die werkstoffliche Verwertung erfolgreich durchgeführt. Auch bei sortenreinen Kunststoffen, bei denen ein Rücknahmesystem besteht (z.B. PET) wird es angewandt. Die Sortenreinheit ist nicht nur hinsichtlich der Kunststoffsorte zu verstehen, sondern auch bezogen auf die zu verarbeitende Kunststoffformmasse, die weitere Kunststoffsorten bzw. Additive enthält.

420 vgl. DBG; DECHEMA; DGM; GDCh; VCI (Hg.): Positionspapier Chemie als ein Innovationstreiber in der Materialforschung. (2012).

421 PlasticsEurope Deutschland; Baunemann, Rüdiger: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Werkstoffe“ der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2013), Antwort auf Frage 2, modifiziert.

422 vgl. Mannheimer Schulen: Recycling und Verwertung von Kunststoffen unter: <http://www.mannheimer-schulen.de/lilo/2005-2006/chemie/dat/verwertung.html> (2005 – 2006). Online am 06.01.2014.

Entsprechend können andere Zusammensetzungen beim werkstofflichen Recycling Probleme bereiten und ggf. eine energetische Verwertung sinnvoller machen.<sup>423</sup>

Rohstoffliches Recycling wird dort angestrebt, wo z.B. durch Verschmutzung, Vermischung oder Materialverschleiß eine rein werkstoffliche Trennung nicht mehr möglich ist. Hierunter wird eine Spaltung der Polymerketten unter Einwirkung von z.B. Wärme verstanden. Die entstehenden Monomere oder Gase können dann zur Herstellung neuer Kunststoffe oder anderweitig eingesetzt werden. Folgende rohstoffliche Verfahren können für Recycling von Altkunststoffen angewandt werden: Vergasen, thermische Verwertung, Cracking und Hydrierung. Vergasung, Cracking und Hydrierung gehören zu petrochemischen Verfahren, die die Prozesse der Petrochemie, z.B. Aufbereitung von Erdöl durch Destillation und Cracken, zur Aufspaltung von Altkunststoffpolymeren nutzen. Bei der Verwertung im Hochofen werden die Reduktionseigenschaften von aus Altkunststoffen erzeugtem Synthesegas genutzt.<sup>424</sup> Bei der thermischen Verwertung werden die Makromoleküle verbrannt und die entstehende Energie als Dampf oder Strom gebraucht (energetische Verwertung).

Mitentscheidend für die Wahl des Verwertungsverfahrens sind auch die Heizwerte der einzelnen Werkstoffe. Der Energieeinsatz für ein werkstoffliches Recycling ist dem der thermischen Verwertung gegenüberzustellen. Kunststoffe haben vergleichsweise hohe Heizwerte. Die Heizwerte ausgewählter Werkstoffe sind in Tabelle 17 gezeigt.

Tabelle 17: Heizwerte ausgewählter Werkstoffe<sup>425</sup>

Stoff	Heizwert [kJ/kg]
Polystyrol	46.000
Polyethylen	46.000
Polyvinylchlorid	18.900
Holz	16.000
Heizöl	44.000
Papier	16.800

Zu beachten ist, dass auch für die energetische Verwertung eine vorherige Aufbereitung zur Erzielung von Gleichmäßigkeit, höherer Schüttdichte und Handhabbarkeit notwendig ist.

Da dieses Kapitel hauptsächlich Ausführungen zum stofflichen Recycling beinhaltet, werden zum Verständnis hier noch die Begriffe Vornutzungs- und Nachnutzungsabfälle (pre-consumer/post-consumer waste) sowie Downcycling beschrieben. Unter pre-consumer waste (Vornutzungsabfälle) werden Stoffströme verstanden, die den Endkunden nicht erreichen und schon innerhalb der Wertschöpfungskette entstehen. Sie entstehen aus prozessbedingten Produktionsabfällen und werden unmittelbar nach ihrer Entstehung wieder dem Produktionsprozess für Neuteile oder Verpackungen zugeführt, da sie einen wertvollen Rohstoff darstellen. Post-consumer waste (Nachnutzungsabfälle) sind Abfälle, die nach dem Produktleben beim/durch den Endverbraucher entstehen. Downcycling bezeichnet den Prozess der Verwendung von Abfällen für Produkte von verringerter Qualität. Die Neigung eines Polymers bei der Wiederverarbeitung zu degradieren, hängt ab vom gewählten

423 vgl. Evonik Industries AG; Häger, Harald: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Werkstoffe“ der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2013).

424 PAKUFOL Folienprodukte GmbH: Kunststoffverwertung unter: <http://www.pakufol.de/pakufol/das-unternehmen/kunststoffverwertung.html>. Online am 20.12.2013.

425 Mannheimer Schulen: Recycling und Verwertung von Kunststoffen unter: <http://www.mannheimer-schulen.de/lilo/2005-2006/chemie/dat/verwertung.html> (2005 – 2006). Online am 06.01.2014.

Aufbereitungsverfahren, vom jeweiligen Grundpolymertyp sowie dem Gehalt an Additiven, die den thermisch-oxidativen Abbau der Molekülketten bei der Verarbeitung stark herabsetzen können<sup>426</sup>.

Um Kunststoffe, die als post-consumer waste anfallen, einer stofflichen Verwertung zuführen zu können, müssen die Kunststoffe entsprechend ihrer Sorten getrennt werden. Dies geschieht in den Recyclinganlagen vollautomatisiert mit Hilfe von Infrarotspektroskopie und basiert bspw. auf den Dichteunterschieden der einzelnen Materialien.

Als Kennzeichnung der einzelnen Werkstoffe wurde das allgemeine Recyclingzeichen (s. Abbildung 43) eingeführt. Es besteht aus drei (im Allgemeinen grünen) Pfeilen, die den Verwertungskreislauf widerspiegeln sollen und einer Nummer, die das Material kennzeichnet. So steht z.B. die Ziffer 01 für PET und die Ziffer 05 für PP. Tabelle 18 (s. Anhang) zeigt die wichtigsten Recyclingnummern für Kunststoffe sowie eine Übersicht zu Verwendung und Recyclefähigkeit.



Abbildung 43: Allgemeines Recycling-Symbol

Die Erfassung von post-consumer-Kunststoffabfällen erfolgt in Deutschland zumeist über die sogenannte Gelbe Tonne und die Restmülltonne. In ersterer werden Verpackungen gesammelt. Die über diesen Weg zu sammelnden Verpackungen sind mit dem Symbol des Grünen Punktes (Abbildung 44) gekennzeichnet. Für diese besteht nämlich nach der Verpackungsverordnung eine Rücknahmepflicht durch den Inverkehrbringer. Dieser hat die Abholung/Erfassung und Verwertung an die Grüne Punkt – Duales System Deutschland GmbH (DSD)<sup>427</sup> als Betreiberin des verbreitetsten deutschen Mülltrennungssystems übertragen und hierfür eine entsprechende Lizenzgebühr zu entrichten. Alle weiteren Kunststoffabfälle sind derzeit über die Restmülltonne zu entsorgen. Dies bedeutet, dass der erste Schritt der Erfassung und Trennung von post-consumer-Kunststoffabfällen in den Haushalten der Endverbraucher mit deren Hilfe stattfindet. In der Industrie existieren separate Rücknahmesysteme für Industrieverpackungen wie z.B. Kunststoffsäcke, Kanister, Fässer, Folien, BigBags sowie Intermediate Bulk Container (IBC).



Abbildung 44: Der Grüne Punkt<sup>428</sup>, Duales System Deutschland

426 Günther, Edeltraud: Stichwort: Downcycling unter: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/126551/downcycling-v6.html>. Online am 06.01.2014.

427 Duales System Deutschland GmbH: Porträt – Der Grüne Punkt unter: <http://www.gruener-punkt.de/corporate/unternehmen/portraet.html>. Online am 07.01.2014.

428 Duales System Deutschland GmbH: Der Grüne Punkt – The company logo unter: <http://www.dsd-holding.de/en/communication/picture-database/news/article/the-company-logo-as-a-file.html> (2010). Online am 06.01.2014.

Da bislang lediglich Verpackungen mit dem grünen Punkt über dieses System entsorgt werden konnten, sieht das neue Kreislaufwirtschaftsgesetz vor, dass zukünftig die Wertstoffe getrennt erfasst werden. Hiermit soll eine bessere Erfassung und Nutzung von Kunststoffabfällen sowie anderer Wertstoffe erzielt werden. Abbildung 45 stellt das Gesamtkunststoffabfallaufkommen in Europa der Menge an erfassten Kunststoffabfällen und den jeweiligen Nachnutzungswegen in Europa im Zeitraum 2006 bis 2011 gegenüber. Als Nachnutzungswege sind hier Deponierung, thermische Verwertung (Energierückgewinnung) sowie Recycling als stoffliche Verwertung aufgeführt.

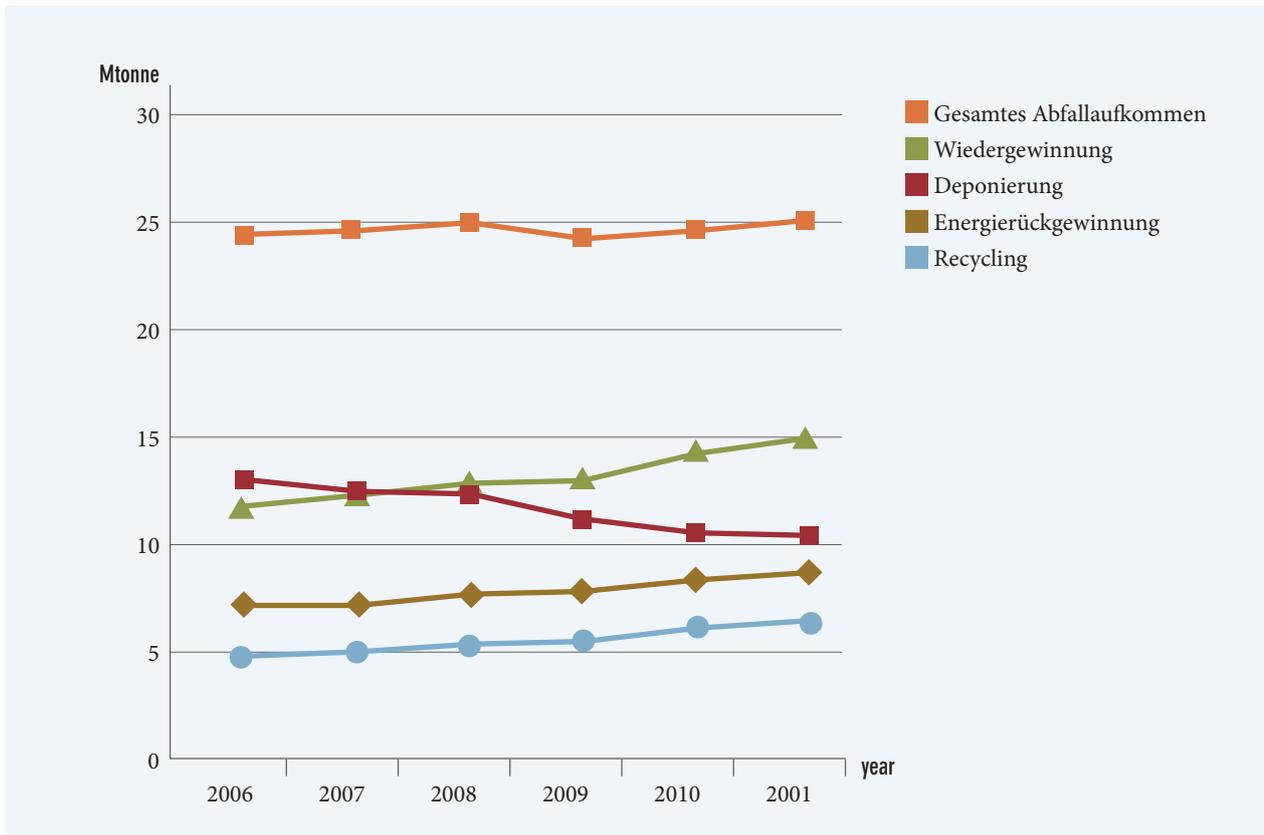


Abbildung 45: Gesamtkunststoffabfälle in Europa – Recycling und Wiedergewinnung 2006-2011<sup>429</sup>

Das Gesamtabfallaufkommen hat sich im betrachteten Zeitraum kaum verändert und lag bei ca. 25 Mio. t pro Jahr. Demgegenüber hat sich jedoch die Menge an erfassten Kunststoffabfällen um etwa 25% von ca. 12 Mio. t im Jahr 2006 auf 15 Mio. t im Jahr 2011 erhöht. Gleichzeitig ging die Menge an deponierten Abfällen von ca. 14 Mio. t auf 10 Mio. t deutlich zurück. Stattdessen wurden die erfassten Kunststoffabfälle thermisch verwertet oder recycelt.

Der diesem Bericht zu Grunde liegende Antrag nimmt auf die Meeresvermüllung durch Kunststoffprodukte Bezug. Studien zeigen zum Beispiel, dass der Hauptanteil der an den Stränden des Nordostatlantiks gefundenen Fremdstoffe Kunststoffverpackungen sind. Kunststoffe gelangen hauptsächlich (durchschnittlich zu 80%) über den Landweg in die Meere<sup>430</sup>. Derartige Einträge können durch geeignetes Abfallmanagement und Konsumentenverhalten verringert werden, sofern diese Maßnahmen dort ergriffen werden, wo der Müll anfällt.

429 Entnommen aus: PlasticsEurope (Hg.): Plastics – the Facts 2012 – An analysis of European plastics production, demand and waste data for 2011. (2012).

430 vgl. ebd.

Das Produktdesign wird vom Cradle to Cradle-Konzept („Von der Wiege zur Wiege“) in den Mittelpunkt gestellt. Wie im Nährstoffzyklus der Natur wird hier eine zyklische Form der Ressourcennutzung angestrebt, bei der letztlich Abfälle, die nicht von jemand anders genutzt werden können, minimiert werden. Das Cradle to Cradle-Konzept wird als Profilierung in der Ansiedlungspolitik zum Beispiel von der niederländischen Stadt Venlo an der Grenze zu NRW genutzt. Im Produktmarkt wurde folgendes Logo etabliert (s. Abbildung 46):



Abbildung 46: cradle to cradle-Symbol <sup>431</sup>

### Abfallmanagement und Recyclingquoten

Von den in Deutschland 2011 entstandenen Kunststoffabfällen (insgesamt 5,45 Mio. t) wurden 99% verwertet (5,38 Mio. t) und lediglich 1% deponiert. Von den 5,38 Mio. t verwerteten Kunststoffabfällen wurde der überwiegende Teil zur Energiegewinnung thermisch verwertet (56% bezogen auf Gesamtabfallaufkommen, d.h. 3,03 Mio. t). Die restlichen 2,35 Mio. t wurden stofflich verwertet. Hiervon wiederum wurden 2,30 Mio. t werkstofflich recycelt, während 0,05 Mio. t. (entspricht 1% des Gesamtabfallaufkommens) rohstofflich verwertet wurden<sup>432 433</sup>.

Im europäischen Vergleich gehört Deutschland zu den Ländern mit den höchsten Erfassungs- und Recyclingquoten, wie Abbildung 47 für das Jahr 2011 zeigt.

431 Braungart, Michael; McDonough, William: Einfach intelligent produzieren. Berliner Taschenbuch Verlag (2008). ISBN 9783833301834.

432 Vgl. PlasticsEurope Deutschland; Baunemann, Rüdiger: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Werkstoffe“ der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2013).

433 C. Lindner Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH: PlasticsEurope (Hg.): Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2011 – Kurzfassung. (2012).

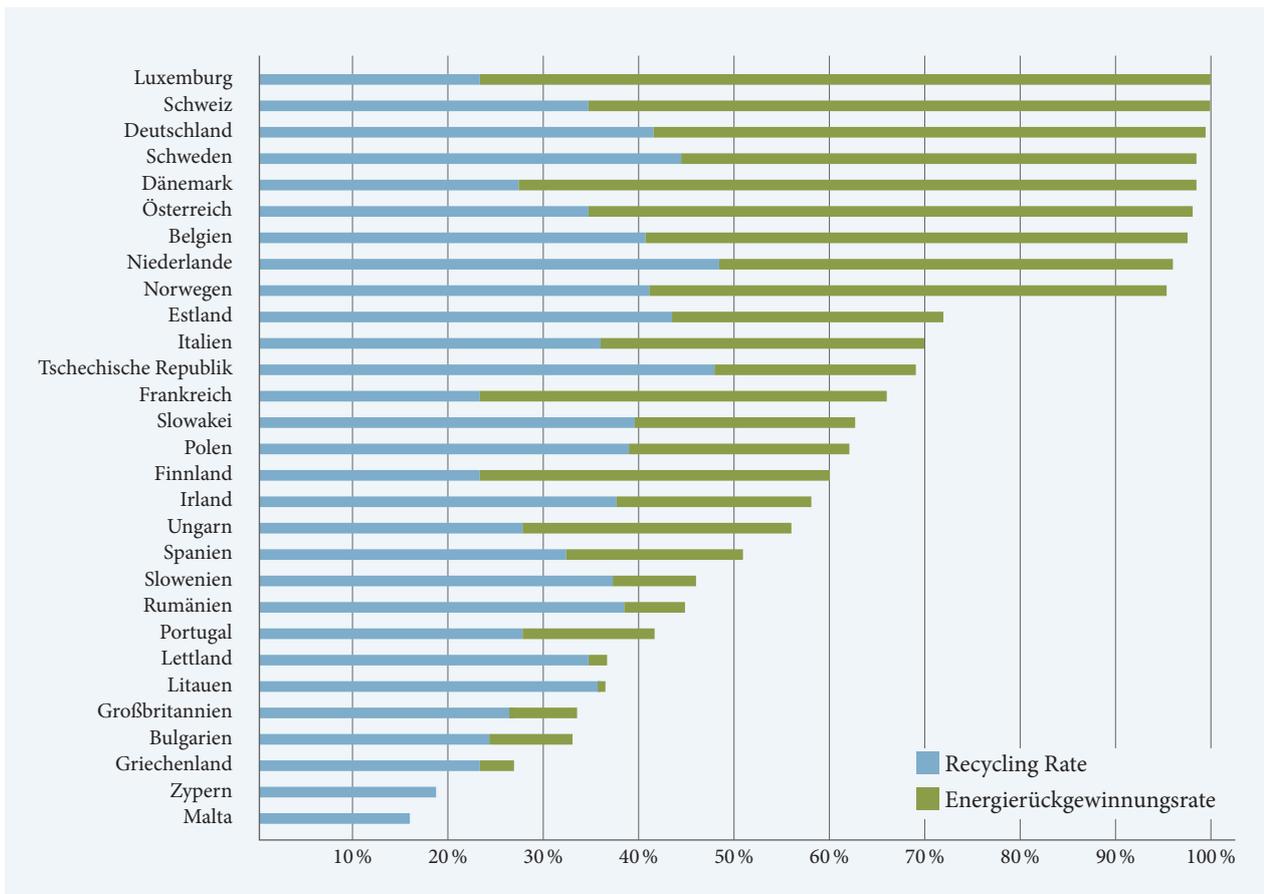


Abbildung 47: Europäische Erfassungsquoten für Verpackungen im Jahr 2011<sup>434</sup>

### Stand der Technik

Die Sortiertechniken sind in Deutschland sehr hoch entwickelt (automatisiert) und werden deshalb auch exportiert<sup>435</sup>.

### Recycling von Biokunststoffen

Biobasierte Kunststoffe, die als Drop-in dieselben Materialeigenschaften besitzen, werden gemeinsam mit den konventionellen Kunststoffen in den Sortieranlagen abgetrennt und können so gemeinsam mit diesen prinzipiell derselben stofflichen Verwertung zugeführt werden. Biobasierte Kunststoffe, die andere Materialeigenschaften besitzen, werden, sofern sie andere Trenneigenschaften wie bspw. eine andere Dichte aufweisen, in den bestehenden Sortieranlagen aussortiert. Da es in der Regel aufgrund ihrer geringen Mengen keine eigenständigen Verwertungswege gibt, werden sie der thermischen Verwertung zugeführt. Ansonsten besteht die Möglichkeit, dass sie bei gleichen Trenneigenschaften in einen der Stoffströme für konventionelle Kunststoffe gelangen und diesen „vermischen“. Die dadurch entstehende Problematik lässt sich am Beispiel des PLA verdeutlichen, dass gemeinsam mit PET abgetrennt wird. Da PLA mit 180°C eine geringere Schmelztemperatur aufweist als PET mit 230°C, führt diese Vermischung der Stoffströme ab einem bestimmten PLA-Anteil zu einer Veränderung der Schmelztemperatur von PET-Rezyklaten, an die die Verarbeitung angepasst werden muss. Dies ist jedoch kein (ausschließliches) Problem biobasierter Kunststoffe, sondern gilt in gleicher Weise auch für petrochemische Kunststoffsorten, deren Stoffströme sich auf-

434 PlasticsEurope (Hg.): Plastics – the Facts 2012 – An analysis of European plastics production, demand and waste data for 2011. (2012).

435 Dr. Rüdiger Baunemann (PlasticsEurope Deutschland): Landtag NRW (Hg.): Enquetekommission II Protokoll 6. Sitzung (nichtöffentlich). (2013).

grund gleicher oder ähnlicher Trenneigenschaften vermischen. Die Vergangenheit hat jedoch auch gezeigt, dass ab einer bestimmten Marktdurchdringung eines (neuen) Kunststoffes die Sortiertechniken angepasst werden<sup>436</sup> müssen, da ab einem Beimischungsanteil von ca. 10% ansonsten eine Veränderung der Recyclatqualität zu erwarten ist. Zuletzt ist auch noch mal die Kompostierung zu betrachten, die thermodynamisch einer sogenannten kalten Verbrennung entspricht. Dies bedeutet, dass beim Kunststoffabbau durch Kompostierung keine nutzbare (thermische) Energie entsteht. Gleichzeitig wird jedoch die gleiche Menge an CO<sub>2</sub> bezogen auf ein Kilogramm Kunststoff freigesetzt wie bei der thermischen Verwertung.

## II.2.4 Annahmen

### II.2.4.1 Relevante Megatrends

#### Demografische Entwicklung

Die prognostizierten demografischen Entwicklungen in Europa und weltweit sind für die Kunststoffproduktion weltweit deshalb relevant, weil mehr Menschen mehr konsumieren werden. Hieraus folgt ein entsprechend erhöhter Bedarf an Kunststoffprodukten und damit eine mengenmäßige Ausweitung der Kunststoffproduktion (insbesondere im Bereich der Standardkunststoffe) weltweit. Für die chemische Industrie in Deutschland bzw. NRW ist dies insbesondere auf Grund der aktuell hohen Exportquote relevant.

Im Zusammenhang mit diesem Megatrend hat auch der prognostizierte Fachkräftemangel in Deutschland für die chemische Industrie in NRW Relevanz. Durch das hohe Know-how-Niveau in NRW, ist die chemische Industrie auf gut ausgebildete und hochqualifizierte Arbeitskräfte angewiesen, die in Folge des demografischen Wandels knapp werden können.

#### Neue Konsummuster

In engem Zusammenhang mit der oben beschriebenen demografischen Entwicklung steht die Entwicklung neuer Konsummuster. Es ist davon auszugehen, dass sich Konsumausgaben und -präferenzen verschieben werden. Aufgrund der verstärkten Partizipation am Wohlstand werden insbesondere in den Entwicklungs- und Schwellenländern immer mehr Kunststoffprodukte konsumiert werden. Dementsprechend wird davon ausgegangen, dass sich auch die Märkte nach und nach dorthin verlagern werden. Dies gilt in besonderem Maße für die petrochemischen Standardkunststoffe. NRW kann die in diesen Entwicklungen liegenden Chancen nutzen, indem es Materialinnovationen (insbesondere Funktionskunststoffe) und allgemein Forschung und Entwicklung weiter vorantreibt um seinen Technologievorsprung zu wahren.

In den heutigen Industrieländern wird sich voraussichtlich der Trend fortsetzen, qualitativ hochwertige und nachhaltig produzierte Waren zu konsumieren. Dieser Wunsch resultiert aus einem steigenden Umweltbewusstsein insbesondere in den Industrienationen und in ganz besonderem Maße in Deutschland. Kaufentscheidungen werden zukünftig also stärker von Nachhaltigkeit abhängen. Auch in Schwellenländern wird eine Zunahme an bewusstem Konsum erwartet. Aus diesem Grund werden neue Absatzmärkte für biobasierte Kunststoffe erwartet (vgl. Marktprognosen).

Eine Besonderheit beim Recycling könnte sich dadurch ergeben, dass aufgrund der Zunahme an Verbrauchsgütern infolge des ansteigenden Konsums in den Schwellenländern auch ein erhöhter

---

436 vgl. BASF; Hamprecht, Jens: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Werkstoffe“ der Enquete Kommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2013).

Recyclingbedarf aufgrund von Ressourcenknappheit entsteht. Durch den erhöhten Konsum wird sich voraussichtlich auch die Menge an recyclefähigen Gütern erhöhen.

### Umbrüche bei Energie und Ressourcen

Aus den oben beschriebenen Veränderungen – bedingt durch die demografischen Entwicklung und neue Konsummuster – ergeben sich zwangsläufig steigende Energie- und Ressourcenverbräuche. Es ist zudem davon auszugehen, dass sich die strategischen Ressourcen, welche unter Umständen von besonderer Bedeutung für die Entwicklung neuer Materialien sind, weiter verknappen werden (vgl. Kapitel II.1), weshalb mit steigenden Produktionskosten zu rechnen ist.

Deutschland hat mit der Entscheidung, seine Energieerzeugung überwiegend auf erneuerbare Energien umzubauen, weltweit einen einzigartigen Weg als Industrienation eingeschlagen, der das Land langfristig unabhängiger von fossilen Ressourcen machen kann. Wie jeder grundlegende Umbau erfordert auch die Energiewende erhebliche Investitionen (z.B. in neue Erzeugungs- und Speicheranlagen sowie neue Stromnetze), welche die Stromkosten für die Verbraucher (sowohl Industrie und Gewerbe als auch Private) im weltweiten Vergleich während der Umbauphase zunächst deutlich erhöhen werden. In 2012 beliefen sich die unmittelbaren Kosten der Energiewende auf knapp 24 Mrd. Euro<sup>437</sup>. Dies führt gerade für die verhältnismäßig energieintensive Kunststoffproduktion zu einem Wettbewerbsnachteil z.B. im Vergleich zu Produktionsanlagen in den USA. Es besteht somit die Gefahr, dass insbesondere die Herstellung von Grundchemikalien als Basis der Kunststoffherstellung in Weltregionen mit geringeren Rohstoff- und Energiepreisen abwandern. Hierdurch würde die heute eng verzahnte Wertschöpfungskette innerhalb der deutschen und nordrhein-westfälischen Kunststoffbranche zerreißen. Dies hätte massive Auswirkungen insbesondere auf die Innovationskraft der Branche, die maßgeblich von dieser engen Verzahnung innerhalb der Branche über die verschiedenen Wertschöpfungsstufen sowie mit den vielfältig in NRW angesiedelten Forschungseinrichtungen basiert und einen entsprechenden Wettbewerbsvorteil bedeutet. Andererseits liegt in Wachstumsmärkten auch ein für NRW nutzbares Potenzial: Im Bereich der Energietechnik (Windräder) z.B. hat Deutschland die Technologieführerschaft inne, da es diese Technik als erstes Land vorangetrieben hat. Hierin liegt wiederum ein Exportpotenzial, sofern (wie im Rohstoffkapitel beschrieben) andere Weltregionen im Bereich der Erneuerbaren Energien nachziehen.

Eine weitere Entwicklung dieses Megatrends geht Richtung vermehrtem Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen für die Kunststoffproduktion. Als Konsequenz aus dem oben beschriebenen Trend zu nachhaltigem Konsum ist mit einem Produktionsanstieg biobasierter Kunststoffe zu rechnen.

### Klimawandel und Umweltbelastung

Der Einsatz von Erdöl für die Produktion von Kunststoffen führt letztlich zur Freisetzung des gebundenen Kohlenstoffs in Form von CO<sub>2</sub>. Da der Kohlenstoff aus unterirdischen Lagerstätten stammt, ist hiermit ein Anstieg der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration verbunden, welche als ursächlich für die Erderwärmung angesehen wird. Wie oben bereits dargelegt, werden derzeit lediglich 4-6% des verarbeiteten Erdöls zu Kunststoffen verarbeitet. Die Beiträge von Kunststoffprodukten an den CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland sind damit heute anteilmäßig und absolut gesehen gering. Durch den prognostizierten Umstieg der Energieerzeugung auf Erneuerbare Energien und Mobilität wird voraussichtlich in Zukunft zwar nicht der absolute, wohl aber der relative CO<sub>2</sub>-Anteil steigen. Dies ist auch dadurch begründet, dass CO<sub>2</sub>-Emissionen z.B. im Leichtbau, bei der Dämmung und besseren Lagerung verderblicher Lebensmittel durch den Einsatz von Kunststoffen reduziert werden.

---

437 vgl. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW) (Hg.): Erneuerbare Energien und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken (2013). (2013); Jansen, Marco: Braskem S.A. (Hg.): Green PE: conventional performance from a sustainable source. (2012).

Kunststoffe werden zukünftig vermehrt aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden (vgl. Megatrends „Umbrüche in Ressourcen“ und „Neue Konsummuster“), so dass der im Produkt gebundene Kohlenstoff unmittelbar aus der Atmosphäre stammt. Dies stellt gegenüber den petrochemisch basierten Kunststoffen einen Vorteil dar.

Dementsprechend sind in Abhängigkeit von der eingesetzten Rohstoffquelle für die Kunststoffproduktion die CO<sub>2</sub>-Bilanz bzw. die daraus resultierenden Umweltbelastungen im Rahmen eines vergleichenden Life Cycle Assessments zu berücksichtigen. Andererseits wird durch viele moderne (Hochleistungs-) Kunststoffe während ihrer Lebenszeit CO<sub>2</sub> eingespart (z.B. mittels Dämmmaterial, Leichtbau). Die diesbezüglichen Märkte expandieren, womit sich für Nordrhein-Westfalen ein Potenzial für neue und nachhaltige Produkte ergibt.

### Urbanisierung und Mobilität

Den Megatrends Urbanisierung und Mobilität liegen Bedürfnisse zugrunde, die einen Einfluss auf die Zukunftsmärkte von Kunststoffen haben werden. Vor allem Leichtbaumaterialien, Baustoffe wie Dämmmaterial und neuartige Beleuchtungsmaterialien bieten neue Absatzmärkte insbesondere für die nordrhein-westfälische Kunststoffindustrie. Denn hier besteht Bedarf an spezialisierten Werkstofflösungen, für die das hierzu nötige Know-how vorhanden ist.

## II.2.4.2 Auswirkungen der Megatrends auf Werkstoffproduktion

### 1a: Marktprognosen für petrochemisch basierte Kunststoffe

Wie im Ist-Zustand erwähnt, machen die petrochemischen Kunststoffe aktuell mengenmäßig mehr als 95% der gesamten Kunststoffproduktion aus. Dabei spielen Angebot und Nachfrage sowie (globaler) Wettbewerb – ebenso wie in anderen Industrie- und Wirtschaftszweigen – neben den gewünschten Produkteigenschaften eine wesentliche Rolle. Es wird eine Fortsetzung des globalen Wachstums von jährlich 5% als langjähriger Trend angenommen<sup>438</sup>. Bei den Standardkunststoffen wird sogar ein Wachstum von 8% erwartet, wobei dieser Unterschied durch die steigende Nachfrage in Schwellenländern bedingt ist. In den Industrieländern, also auch der EU, werden hingegen technische Kunststoffe und Funktionskunststoffe zunehmende Bedeutung erlangen<sup>439</sup>.

2030 werden die Hauptwachstumsmärkte in den Schwellenländern, vor allem China liegen. Die deutsche Kunststoffbranche wird aber weiterhin ca. 70% Vorleistungen aus dem Inland beziehen. Insgesamt wird für Kunststoff und Gummi zwischen 2011 und 2030 ein verlangsamtes Wachstum von 1,8% (gegenüber 3,4% im Zeitraum 2000–2008) prognostiziert. Dabei wird der Fahrzeugmarkt als ein Wachstumstreiber gesehen, der gerade die deutsche Kunststoffindustrie positiv beeinflussen wird. Das größte Wachstum mit 4,1%<sup>440</sup> wird für die Standardkunststoffe gesehen, das sich jedoch nah an den Märkten in den Schwellenländern vollziehen wird. Aus diesem Grund prognostiziert das Prognos-Institut einen jährlichen Produktionsrückgang für diese Kunststoffe von 0,1% in Deutschland<sup>441,442</sup>. Innerhalb der Chemie verzeichnen laut Prognos-Institut die Spezialkunststoffe mit 4,6% pro Jahr das stärkste Wachstum. Die Produktion der Spezialkunststoffe steht weniger stark im Wettbewerb als die der Standardkunststoffe und setzt zudem ein hohes technologisches Know-how voraus. Aus diesen Gründen kann davon ausgegangen werden, dass diese Produktion auch

438 vgl. Rieger, Bernhard: k-online.de (Hg.): Standard-Kunststoffe.

439 vgl. ebd.

440 vgl. Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Die deutsche chemische Industrie 2030. VCI-Prognos-Studie. (2013), Abb. 22.

441 vgl. ebd., Tabelle 3.

442 vgl. ebd., Abb. 22.

weiterhin in Nordrhein-Westfalen erfolgen wird. Es wird im gesamten Bereich der Spezialchemie ein Wachstum von 2,5% pro Jahr in Deutschland und von 3,4% pro Jahr weltweit bis 2030 vorhergesagt<sup>443</sup>.

Als Wachstumsmärkte wurden in der Anhörung „Werkstoffe“, die im Rahmen der Enquetekommission am 11. Oktober 2013 stattfand, Verpackungen (insbesondere Folien), Automobil (Funktionsintegration, neue Werkstoffe und Leichtbau), Elektronik und Elektrotechnik (Ressourcen- und Energieeffizienz), neue Baudämmstoffe, Medizin (Prothetik und Medizintechnik) sowie Energieerzeugung (Brennstoffzellen und polymere Solarzellen) identifiziert<sup>444</sup>. Diese ergeben sich ebenfalls aus den oben dargelegten Megatrends.

Dem Ziel der Bundesregierung entsprechend soll der Anteil der Erneuerbaren Energien bis 2020 auf 35% der Stromversorgung erhöht werden, wobei die Windenergie voraussichtlich einen erheblichen Anteil haben wird.<sup>445</sup> Die hierbei eingesetzten CFK besitzen entsprechendes Wachstumspotenzial.

#### **1b: Forschungstrends für petrochemisch basierte Kunststoffe**

Schwerpunkte aktueller Entwicklung sind unter anderem eine kostengünstigere Herstellung, verbesserte Verarbeitungstechnologien, die Integration von Nanopartikeln sowie vermehrte LCAs für Kunststoffprodukte. Derzeitige Innovationsfelder sind die Sicherung der Wasser- und Lebensmittelversorgung, Gewichtsreduktion für ressourcenschonendere Mobilität, Senkung des Energiebedarfs bei der Produktion, intelligente Verpackungen und Medizintechnik<sup>446</sup>. Technische Textilien für die industrielle Sparte sorgen für komplexe Produktlösungen, die in branchenübergreifenden Produktionsverbänden verwirklicht werden<sup>447</sup>. Die Entwicklung innovativer textiler Werkstoffe ist sehr forschungsintensiv. Aus diesem Grund ist die textile Forschung auch auf Public Private Partnerships angewiesen. In NRW wurden Kompetenzen für textiltechnische Anwendungen z.B. am Institut für Textiltechnik (ITA) in Aachen entwickelt. Insbesondere werden durch die Kooperation zwischen Textilingenieurwesen und Medizin neue textile Produkte, z.B. für Implantate, entwickelt.

#### **2a: Marktprognosen für biobasierte Kunststoffe**

Abbildung 48 zeigt eine Prognose des nova-Instituts zur Entwicklung der europäischen Produktionskapazitäten für biobasierte Kunststoffe ausgehend von den bestehenden Kapazitäten im Jahr 2011. Basierend auf einer Gesamtkapazität von 0,4 Mio. t im Jahr 2011 wird sich die Menge an biobasierten Kunststoffen laut Prognose bis 2020 auf ca. 1,2 Mio. t verdreifachen. Wichtigster Treiber dieser Entwicklung sind neben biobasiertem PET die Stärke-Blends. Einen weiteren wichtigen Beitrag zur steigenden Bedeutung der biobasierten Kunststoffe trägt PLA bei, dessen Produktionskapazität von aktuell weniger als 100.000 t auf 200.000 t steigen soll. Insgesamt wird ein Trend hin zu beständigen biobasierten Kunststoffen vorhergesagt.

443 vgl. ebd., Abb. 25.

444 vgl. Landtag NRW (Hg.): Enquetekommission II Protokoll 6. Sitzung (nichtöffentlich). (2013), S. 4, 27, 29.

445 vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (Hg.): Hintergrundinformationen zum Ausbau der Erneuerbaren Energien in Deutschland bis 2020. (2011).

446 vgl. Lang, Reinhold; Rieger, Bernhard; Schlarb, Alois: k-online.de (Hg.): Standard-Kunststoffe.

447 vgl. Heymann, Eric: Deutsche Bank AG (Hg.): Textil-/Bekleidungsindustrie: Innovationen und Internationalisierung als Erfolgsfaktoren. (2011).

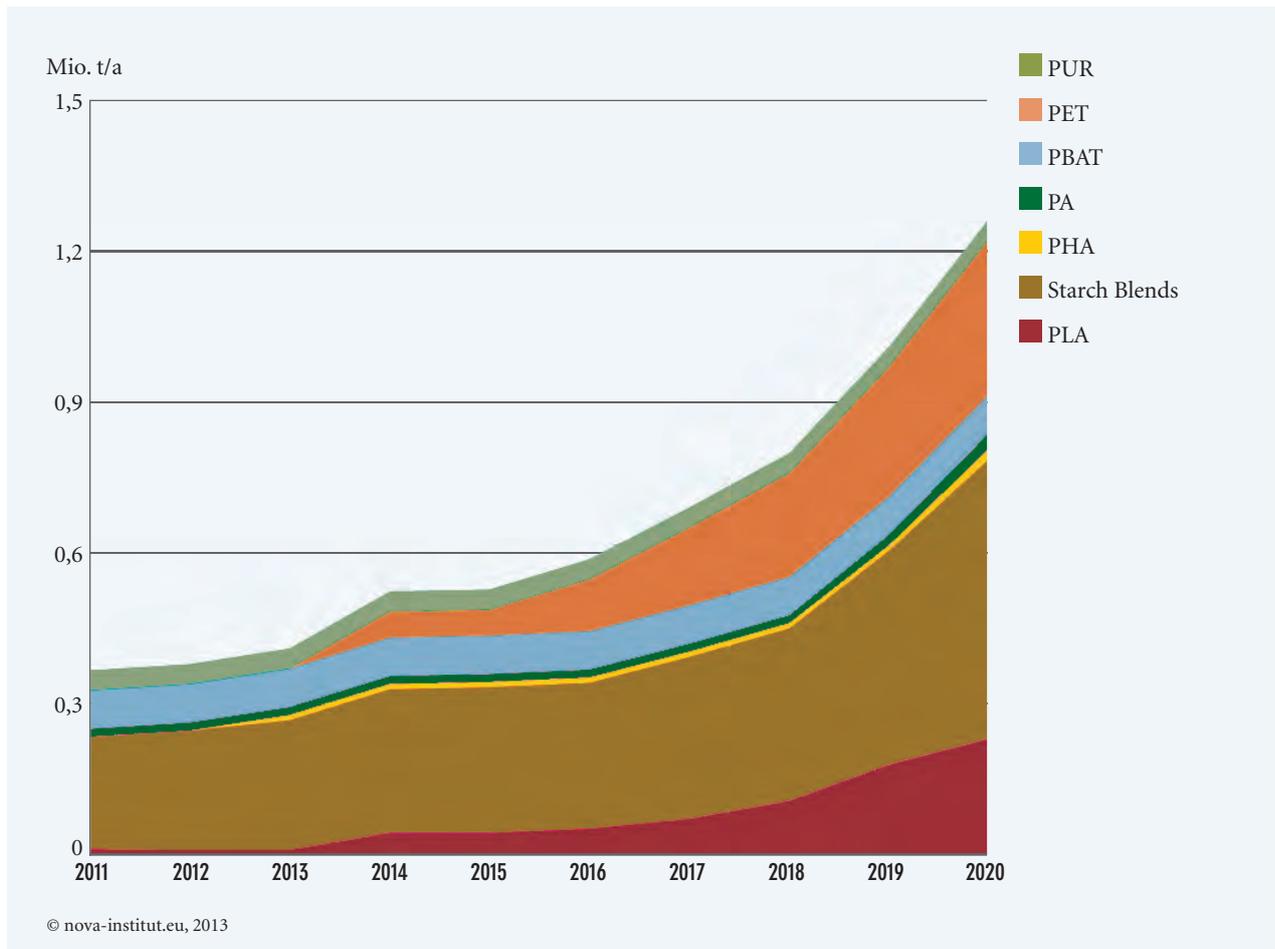


Abbildung 48: Entwicklung der Produktionskapazitäten in Europa zwischen 2011 und 2020 (ohne Celluloseacetat und Duroplaste)<sup>448</sup>

Eine weitere Marktprognose für Biokunststoffe stammt vom IfBB. Die in Abbildung 49 gezeigten Marktprognosen zeigen die Entwicklung der globalen Produktionskapazitäten von Biokunststoffen im (kürzeren) Zeitraum 2010 bis 2016 auf. Hierbei wird nicht, wie bei der oben gezeigten Auswahl aus der nova-Studie, nach Kunststoffsorten, sondern nach den Produkteigenschaften beständig und abbaubar unterschieden.

448 nova-Institut GmbH (Hg.): Bio-based Polymers in the WorldCapacities, Production and Applications: Status Quo and Trends towards 2020 – Market study. (2013).

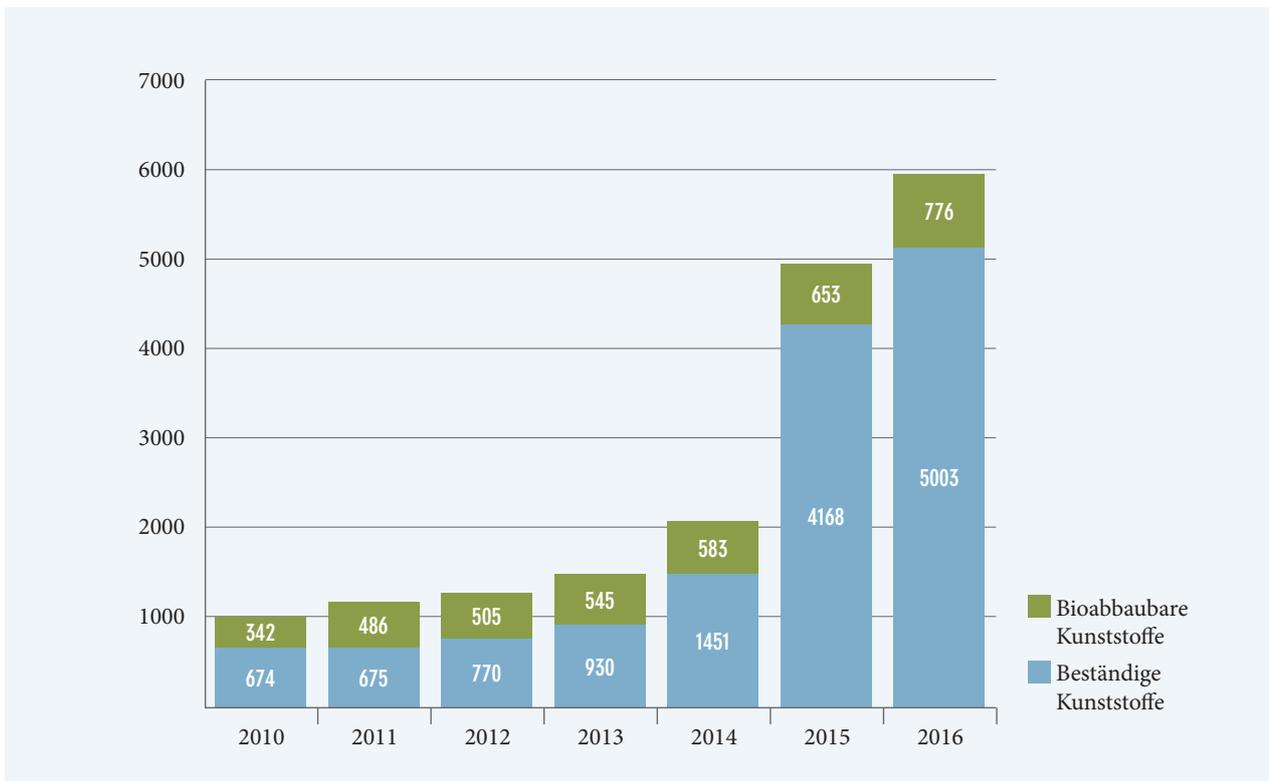


Abbildung 49: Weltweite Biokunststoffproduktionskapazitäten<sup>449</sup>

Bis zum Jahr 2016 wird ein rasanter Anstieg der Biokunststoffe von 1 Mio. t auf fast 5,8 Mio. t prognostiziert. Dies entspricht einer Versechsfachung in einem vergleichsweise kurzen Betrachtungszeitraum<sup>450</sup>. Das IfBB sieht den Markt der beständigen biobasierten Kunststoffe als deutlich stärker wachsenden Markt als den der bioabbaubaren. So soll sich laut Prognose der Anteil von biobasierten langlebigen Kunststoffen von aktuell ca. 770.000 t um ca. 500.000 t im Jahr 2016 erhöhen. Die weitergreifende nova-Studie sieht nach 2016 einen deutlich steigenden Anteil an Kunststoffen mit potenziell bioabbaubaren Anteilen wie PLA und Stärke. Zu berücksichtigen ist auch, inwieweit sich der Markt petrobasierter Kunststoffe weiter entwickeln wird (Daten dazu in Kapitel II.1.2.1, Tabelle 13) und welchen Anteil biobasierte darin einnehmen, ob als Compound oder 100% biobasierter Kunststoff.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass beide Prognosen einen Zuwachs bei den biobasierten Kunststoffen voraussagen. Trotz dieses Zuwachses wird es sich bei diesen Materialien jedoch weiter um einen Nischenmarkt handeln.

## 2b: Forschungstrends für biobasierte Kunststoffe

Abbildung 50 zeigt exemplarisch die nötigen Entwicklungsschritte, Treiber und Hürden für biobasierte Kunststoffe in Konkurrenz zu konventionellen.

449 IfBB Hochschule Hannover: Global biopolymer production capacity unter: <http://ifbb.wp.hs-hannover.de/downloads/content/Statistics/Market%20statistics/Production%20capacities/Global%20biopolymer%20production%20capacity.png> (2013). Online am 07.01.2014.

450 Dies schließt petrochemische, bioabbaubare Kunststoffe ein.

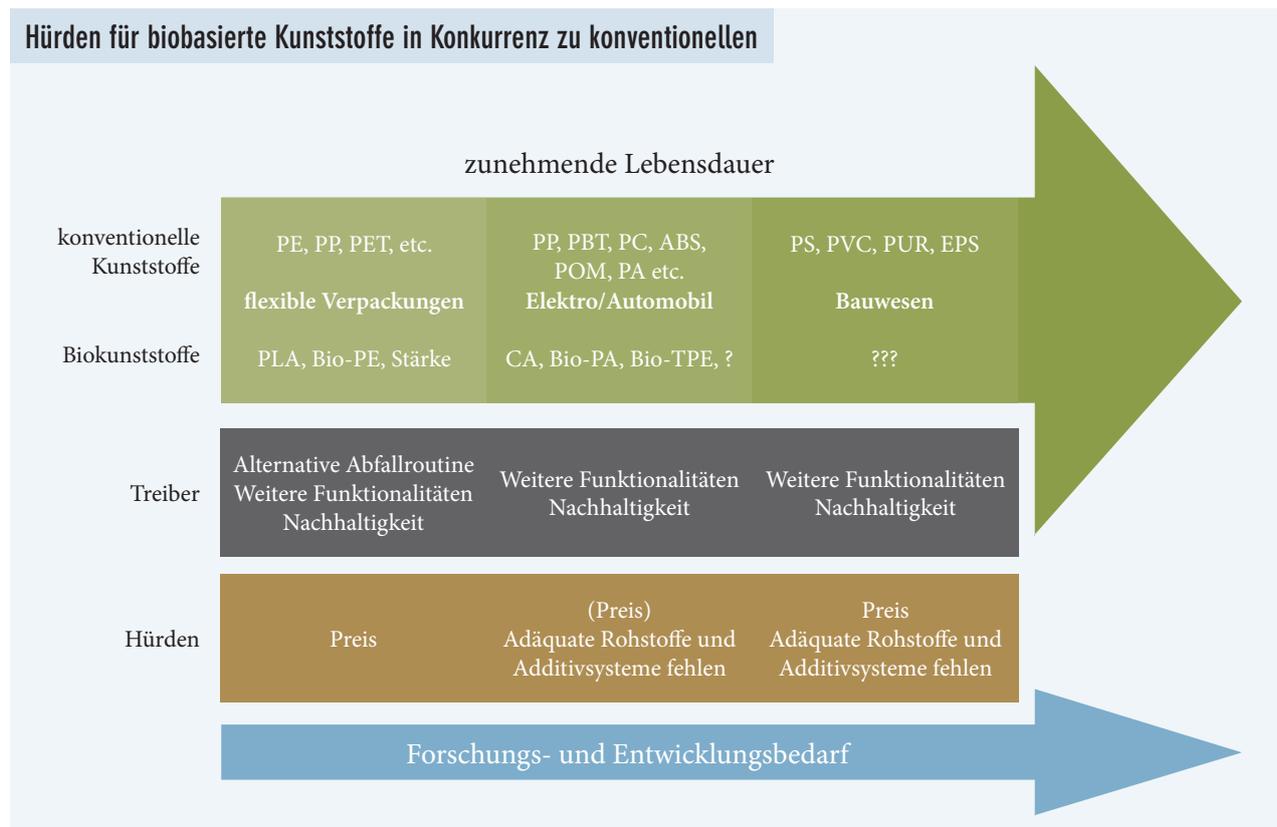


Abbildung 50: Forschungs- und Entwicklungsbedarf bei biobasierten Kunststoffen<sup>451</sup>

Darüber hinaus gilt es die Verarbeitungseigenschaften der biobasierten Kunststoffe durch Blenden und Compoundierung so einzustellen, dass sie auf bestehenden Maschinen verarbeitet und damit in bestehende Wertschöpfungsketten integriert werden können (vgl. Ist-Zustand biobasierte Kunststoffe). Da die Verarbeitung oftmals in kleinen und mittelständischen Betrieben mit kleinen oder gar keinen spezialisierten Entwicklungsabteilungen erfolgt, bestehen hier besondere Herausforderungen<sup>452</sup>. Für biobasierte Kunststoffe wie CA und Bio-PA, die in langlebigeren technischen Anwendungen wie Elektronik und Automobilbau eingesetzt werden, ist die preisliche Wettbewerbsfähigkeit zwar auch nicht gegeben, aber weniger relevant. Hier steht die Erschließung adäquater Rohstoffe sowie die Entwicklung geeigneter Additivsysteme – insbesondere auf nachwachsender Rohstoffbasis – im Vordergrund. Weiteres Entwicklungspotenzial bietet das Bauwesen, wofür neue biobasierte Werkstoffe zu entwickeln sind. Auch hierfür gilt es geeignete Rohstoffquellen und Additivsysteme zu finden bzw. zu entwickeln.<sup>453</sup>

Der generelle Forschungsbedarf ergibt sich aus den vom Markt gewünschten Eigenschaftsprofilen an Kunststoffe. Deshalb muss auch beim Forschungsbedarf zwischen der Entwicklung weiterer Drop-in-Kunststoffe und der Entwicklung neuartiger Hochleistungskomponenten unterschieden werden. Bei den petrochemisch hergestellten Standardkunststoffen findet eine fortlaufende Weiterentwicklung statt. Daraus ergibt sich auch eine Notwendigkeit der weiteren Optimierung der Herstellungs- und Verarbeitungseigenschaften der biobasierten Polymere. Bei der Entwicklung technischer und Hochleistungskunststoffe bringen biobasierte Materialien Eigenschaften mit, die

451 vgl. Michels, Carmen: FKUR Kunststoff GmbH (Hg.): Aus der Natur in den Alltag – Anwendungen und Potentiale für Biokunststoffe. (2011).

452 Dr. Rainer Dahmann (RWTH Aachen): Landtag NRW (Hg.): Enquetekommission II Protokoll 6. Sitzung (nichtöffentlich). (2013).

453 Michels, Carmen: FKUR Kunststoff GmbH (Hg.): Aus der Natur in den Alltag – Anwendungen und Potentiale für Biokunststoffe. (2011).

denen petrobasierter Rohstoffe überlegen sein können. Hier ist bspw. die Entwicklung leichter Kunststoffbauteile für langlebige Anwendungen wie im Automobilbau<sup>454</sup> zu nennen. Nichtsdestotrotz ist ein erhöhter Forschungsaufwand nötig, um diese Materialien nutzbar zu machen und dieses Potenzial auszuschöpfen. Dazu zählt neben der Entwicklung geeigneter Compoundierung auch die (biotechnologische) Herstellung dieser Polymere. Mit dem Ziel der zunehmenden Biobasiertheit aller Komponenten zeigt auch das Feld der biobasierten Additive und Füllstoffe ein hohes Potenzial, die diese Eigenschaften begünstigen. Zudem müssen ggfs. neue Recyclingverfahren für ganz neuartige Kunststoffe entwickelt werden, da sie sich in ihren Eigenschaften von denen petrochemisch erzeugter Kunststoffe unterscheiden<sup>455</sup>. Daneben gilt es weitere nachwachsende Rohstoffquellen für die Herstellung biobasierter Kunststoffe zu erschließen<sup>456</sup> (vgl. hierzu auch Kapitel II.1.1.4).

### 3a: Marktprognosen für bioabbaubare Kunststoffe

Entsprechend der Marktprognosen des IfBB (vgl. Abbildung 49) werden die Produktionskapazitäten der erfassten biologisch abbaubaren Kunststoffe bis 2016 auf 750.000 t pro Jahr<sup>457</sup> zunehmen und der entsprechende Marktwert auf ca. 2,4 Mrd. Euro<sup>458</sup> steigen. Allerdings wird nach Ansicht des IfBB der Marktanteil der biologisch abbaubaren Kunststoffe am Gesamtmarkt der Biokunststoffe (13,7 Mrd. Euro) bis 2016 auf 11,4%<sup>459</sup> abnehmen (2012 Marktanteil 13,9% von 1,3 Mio. t pro Jahr Biokunststoffe<sup>460</sup>). Dieser Rückgang gilt insbesondere für den Verpackungsbereich. Die Studie des nova-Instituts erstreckt sich auf einen längeren Prognosezeitraum bis 2020. Sie sagt eine Vervierfachung der Produktion von PLA und PHA voraus, wobei die größten Investitionen in Südamerika und Asien getätigt werden (aufgrund besserer Rohstoffverfügbarkeiten und wirtschaftlich günstiger Rahmenbedingungen). Weiterhin wird davon ausgegangen, dass die heute petrochemisch hergestellten Kunststoffe PBS und PBAT bis 2020 zu 80% bzw. 50% aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden.<sup>461</sup> Insgesamt ist anzunehmen, dass der Markt der Biokunststoffe, der bislang stark durch die biologisch abbaubaren Kunststoffe getrieben wurde, in Zukunft stärker durch beständige biobasierte Kunststoffe dominiert wird und damit die Bedeutung der biologisch abbaubaren Kunststoffe abnimmt. Damit finden biologisch abbaubare Kunststoffe auch in Zukunft nur in Nischenmärkten Anwendung. Diese bestehen dort, wo die biologische Abbaubarkeit einen Zusatznutzen verspricht, wie etwa in der Landwirtschaft und im Gartenbau, wo durch den Einsatz Zeit und Kosten gespart werden können oder bei der Erschließung alternativer Entsorgungsrouten durch den Einsatz von abbaubaren Mülltüten oder von Hygienefolien z.B. für Windeln. Sinnvoll erscheint auch der

454 vgl. BASF; Hamprecht, Jens: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Werkstoffe“ der Enquete Kommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2013).

455 Grimm, Vera; Eickenbusch, Heinz: VDI Zentrum Ressourceneffizienz (Hg.): Rohstoffquelle Biomasse – Stand und Perspektiven, (2012b).

456 vgl. BASF; Hamprecht, Jens: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Werkstoffe“ der Enquete Kommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2013).

457 IfBB Hochschule Hannover: Material share of biopolymer production capacity unter: <http://ifbb.wp.hs-hannover.de/downloads/content/Statistics/Market%20statistics/Production%20capacities/By%20groups%20of%20bioplastics/2012/Material%20share%20of%20biopolymer%20production%20capacity%20sorted%20by%20material%20grade%202012.png> (2013). Online am 07.01.2014.

458 IfBB Hochschule Hannover: Global biopolymer production capacity unter: <http://ifbb.wp.hs-hannover.de/downloads/content/Statistics/Market%20statistics/Market%20share/By%20fields%20of%20application/Global%20biopolymer%20market%20size%20sorted%20by%20market%20segment%202016.png> (2013). Online am 07.01.2014.

459 IfBB Hochschule Hannover: Material share of biopolymer production capacity unter: <http://ifbb.wp.hs-hannover.de/downloads/content/Statistics/Market%20statistics/Production%20capacities/By%20groups%20of%20bioplastics/2012/Material%20share%20of%20biopolymer%20production%20capacity%20sorted%20by%20material%20grade%202012.png> (2013). Online am 07.01.2014.

460 IfBB Hochschule Hannover: Material share of biopolymer production capacity unter: <http://ifbb.wp.hs-hannover.de/downloads/content/Statistics/Market%20statistics/Production%20capacities/By%20regions/2012/Material%20share%20of%20biopolymer%20production%20capacity%20sorted%20by%20region%202012.png> (2013). Online am 06.01.2014.

461 nova-Institut GmbH (Hg.): Bio-based Polymers in the World Capacities, Production and Applications: Status Quo and Trends towards 2020 – Market study. (2013).

Einsatz als resorbierbares Material, so dass operative Eingriffe zur Entfernung überflüssig werden. Zur Preisentwicklung können keine Angaben gemacht werden. Es ist aber wahrscheinlich, dass biologisch abbaubare Kunststoffe, insbesondere die biobasierten, bei vergleichbaren Eigenschaften zu höheren Preisen verkauft werden müssen als Standardkunststoffe. Die Prognos-Studie macht keine Angaben über die Marktentwicklung dieser Kunststoffgruppe.

Insgesamt wird die Bedeutung der biologisch abbaubaren Kunststoffe vermutlich in allen Bereichen außer bei Einwegverpackungen und im landwirtschaftlichen Bereich (für Folien, Pflanztöpfe etc.) abnehmen.

### 3b: Forschungstrends für bioabbaubare Kunststoffe

Bioabbaubare Kunststoffe sind – wie oben beschrieben – besonders im Verpackungsbereich für Lebensmittel sinnvoll. In diesem Bereich besteht noch Forschungsbedarf, um Einwegverpackungen mit verbesserten Schutzfunktionen (Stichwort Permeation) – vergleichbar mit denen der konventionellen Kunststoffe – herstellen zu können<sup>462</sup>. Hierunter fällt auch der Forschungsbedarf, Verpackungen, welchen Lebensmittelreste anhaften, bioabbaubar zu gestalten<sup>463</sup>. Des Weiteren ist die schnellere Kompostierbarkeit eine zu entwickelnde Eigenschaft, da so kürzere Kompostierzyklen in industriellen Kompostieranlagen ermöglicht werden könnten<sup>464</sup>.

### 4a: Marktprognosen zum Recycling

Kunststoffabfälle werden in Deutschland – wie oben bereits beschrieben – durch die Abfallwirtschaft nahezu vollständig verwertet, wobei derzeit die energetische Verwertung den größten Anteil hat. Der Anteil der stofflichen Verwertung wird voraussichtlich in Zukunft erhöht werden aufgrund der in § 14 KrWG zur Förderung des Recyclings und der sonstigen stofflichen Verwertung eingeführten Recyclingquoten von mindestens 65 Gewichtsprozent bei Siedlungsabfällen, die spätestens ab 2020 einzuhalten sind.

Derzeit nutzen bereits ca. 25% der Bundesbürger die erweiterte Wertstoffeffassung (z.B. Wertstofftonne) – mit steigender Tendenz. Das Ziel einer zunehmenden Rückführung von Kunststoffen kann also bereits unter den jetzt geltenden Rahmenbedingungen erreicht werden, wenn nun die Kommunen und private Entsorger miteinander kooperieren.<sup>465</sup> Politisch sind eine weitere Erhöhung der Recyclingquoten sowie der Wettbewerb und die Produktverantwortung als Eckpunkte der Kreislaufwirtschaft im Koalitionsvertrag der neuen Bundesregierung verankert.<sup>466</sup> Dem Recyclingmarkt wird weiterhin Optimierungspotenzial zugesprochen, welches aber abhängig von politischer Rahmgebung ist.<sup>467</sup>

Die Deutsche Gesellschaft für Kreislaufwirtschaft und Rohstoffe mbH (DKR) sieht Absatzchancen für Regranulate im osteuropäischen Markt (z.B. Russland)<sup>468</sup>. Generell schätzt die Verpackungsbran-

462 vgl. BASF; Hamprecht, Jens: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Werkstoffe“ der Enquete Kommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2013).

463 vgl. Landtag NRW (Hg.): Enquetekommission II Protokoll 6. Sitzung (nichtöffentlich). (2013), S. 21.

464 vgl. BASF; Hamprecht, Jens: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Werkstoffe“ der Enquete Kommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2013), Antwort auf Frage 13.

465 vgl. ALBA Group: Koalitionsvertrag: Kein großer Wurf für Recyclingbranche unter: [http://www.recyclingnews.info/Politik\\_und\\_Recht/Recyclingbranche\\_im\\_Koalitionsvertrag](http://www.recyclingnews.info/Politik_und_Recht/Recyclingbranche_im_Koalitionsvertrag) (2013). Online am 05.03.2014.

466 vgl. ebd..

467 Heyde, Michael; Gerke, Gilian; Mühle Sarah: Werkstoffliche Verwertung von Verpackungskunststoffen aus der Getrenntsammlung. In: Müll und Abfall, 01/2010, S. 32–37.

468 vgl. Recyclingportal.eu: Regranulate für Russland: DKR sieht Absatzchancen im osteuropäischen Markt unter: <http://www.recyclingportal.eu/artikel/32154.shtml> (2014). Online am 05.03.2014.

che laut einer Umfrage ihre Produktionsaussichten positiv ein.<sup>469</sup> Wie auch in anderen Branchen ist die „Kostenreduzierung nach wie vor ein Innovationskatalysator und wird von der Wiederverwertbarkeit von Materialien und der Verwendung recycelter Rohstoffe getragen sowie von der Anwendbarkeit und Funktionalität von Verpackungen.“<sup>470</sup>

#### 4b: Forschungstrends im Bereich Recycling

Die Forschungsaktivitäten im Bereich Recycling sind zum einen im Bereich Maschinenbau/Verfahrenstechnik zur Verbesserung der Sortiertechniken bzw. der Weiterentwicklung der Techniken für die Sortierung neuartiger Kunststoffe zu finden. Zum anderen wird in der Materialentwicklung (z.B. design for disassembly, eco-design bzw. Mischen, Compoundieren etc. von Recyklaten zur Fertigung neuer Materialien) geforscht. Die beiden genannten Bereiche sind eng miteinander verknüpft. In Bezug auf die chemische Industrie sind beide interessant, jedoch teilweise nur mittelbar von dieser beeinflusst. Im Bereich Verpackungen stellt die EU bspw. Forschungsgelder zur Verfügung, um chemisch/verfahrenstechnisch zu prüfen, welche Behandlung ein Polymer erfahren muss, um in sein Monomer zurückgeführt zu werden, unter der Prämisse, dass das erhaltende Material zur Verpackung von Lebensmitteln genutzt werden kann.<sup>471</sup>

Die Hochschule für Angewandte Wissenschaften Ostfalia in Wolfenbüttel forscht derzeit an allen einzelnen Stufen des Stoffkreislaufes. Dies beinhaltet Demontage, Aufbereiten, Lagern der Zwischenprodukte sowie die Herstellung neuer Werkstoffe, wie exemplarisch in Abbildung 51 gezeigt.

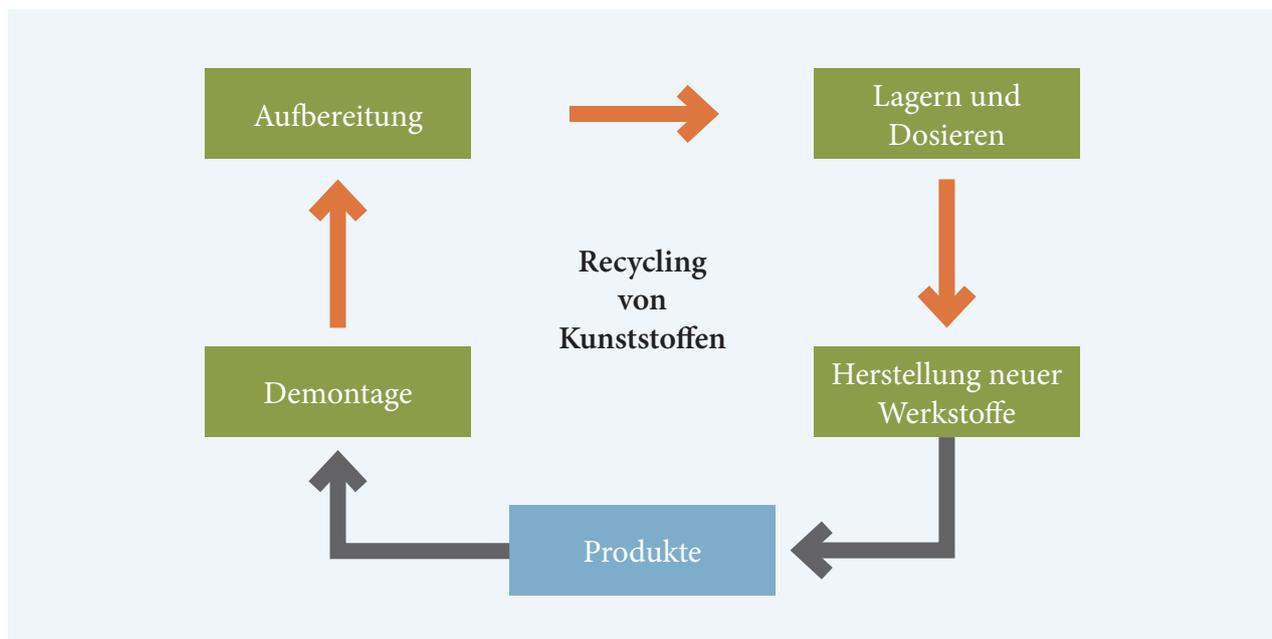


Abbildung 51: Hauptbereiche beim Kunststoffrecycling<sup>472</sup>

Möglichkeiten bestehen z.B. im Bereich der Demontage und werden als „design for disassembly“ bezeichnet. Dieser Ansatz beschreibt die Entwicklung neuer Materialien bzw. Bauweisen zum gezielten Recycling.

469 vgl. Recyclingportal.eu: Umfrage: Verpackungsbranche schätzt Produktionsaussichten positiv ein unter: <http://www.recyclingportal.eu/artikel/32035.shtml> (2014). Online am 05.03.2014.

470 vgl. ebd.

471 vgl. Extricom GmbH Blach Extruder & Components: EU stellt Forschungsmittel für Kunststoff-Recycling zur Verfügung unter: [http://www.extricom.de/index.php?option=com\\_content&view=article&id=100:eu-stellt-forschungsmittel-fuer-kunststoff-recycling&Itemid=95&lang=de](http://www.extricom.de/index.php?option=com_content&view=article&id=100:eu-stellt-forschungsmittel-fuer-kunststoff-recycling&Itemid=95&lang=de) (2013). Online am 05.03.2014.

472 Die Präsidentin der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften (Hg.): Forschungsschwerpunkt Kunststoffrecycling.

Bei den petrochemisch basierten Kunststoffen ist die Erhöhung des Rezyklatanteils ein wichtiges Forschungsziel<sup>473</sup>. Ein Hindernis hierbei sind die in Kunststoff-Compounds enthaltenen Zuschlagstoffe<sup>474</sup>. Grund hierfür ist der hohe technische und energetische Aufwand, der für die Trennung der einzelnen enthaltenen Stoffe notwendig ist.

## II.2.5 Optionen

### II.2.5.1 Materialbezogene Optionen

Diese materialbezogenen Optionen knüpfen an die Ergebnisse des Kapitels II.1 (Ist-Zustand Rohstoffe) an. Entsprechend der dort vorhergesagten zukünftigen Diversifizierung der Rohstoffbasis in der chemischen Industrie in NRW werden in diesem Kapitel deren Auswirkungen auf die Werkstoffe und daraus abgeleiteten Produkte hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit bewertet. Bei den im Folgenden beschriebenen materialbezogenen Optionen soll somit nicht mehr die Nachhaltigkeit des eingesetzten Rohstoffs, sondern vielmehr die rohstoffabhängigen Material- und Produkteigenschaften im Mittelpunkt stehen.

#### **Option B.1a: Fortentwicklung der Materialeigenschaften bei gleichbleibender Rohstoffbasis (weiterhin Hauptnutzung Erdöl)**

Die Rohstoffbasis für Kunststoffe, welche in NRW produziert werden, ist im vorliegenden Szenario auch in Zukunft (kurz-, mittel- und langfristig) hauptsächlich Erdöl. Eine Weiterentwicklung der Material- und Produkteigenschaften zielt auch auf eine verbesserte Nachhaltigkeit ab.

#### **Beschreibung**

Wie im Ist-Zustand beschrieben, werden Kunststoffe zurzeit zu einem ganz überwiegenden Teil petrochemisch hergestellt. Option B.1a beschreibt damit eine im Wesentlichen unveränderte Fortsetzung der Nutzung der derzeitigen Rohstoffbasis sowie eine ständige Weiterentwicklung der Werkstoffe (und ihrer Eigenschaften).

#### **Begründung**

Die Nutzung des derzeitigen Rohstoffmixes für die Kunststoffproduktion ist profitabel. Bestehende Wertschöpfungsketten können erhalten bleiben. Eine veränderte Rohstoffnutzung hat eine Änderung von Produktionsprozessen zur Folge. Diese in großindustriellem Maßstab zu verändern, ist mit vielerlei Hürden verbunden. Diese sind z.B. technologische Voraussetzungen, rechtliche Rahmenbedingungen, Forschungsbedarf, Investitionskosten oder Fachkräftebedarfe. Aus diesem Grund ist die Fortsetzung der Produktion von Kunststoffen auf vorwiegend petrochemischer Basis mit geringeren Risiken verbunden und damit naheliegend. Auch im bestehenden Rahmen – also der vorwiegend petrochemisch basierten Produktion von Kunststoffen – werden Technologien und Werkstoffe ständig fortentwickelt und Innovationen realisiert. Eine Umstellung auf andere Rohstoffe wäre zunächst nicht zwingend erforderlich.

Die Versorgungssicherheit mit Erdöl für die petrochemisch basierte Kunststoffproduktion ist zukünftig voraussichtlich gegeben. Derzeit werden nur ca. 5% des insgesamt eingesetzten Erdöls stofflich zur Polymerproduktion genutzt. Da es sich hierbei – im Vergleich zur energetischen Nutzung (Verbrennung für Mobilität, Heizwärme) – um eine höherwertigere Nutzung handelt, wird davon ausgegangen, dass Erdöl für die stoffliche Nutzung durch die chemische Industrie auch mittel- bis langfristig zur Verfügung stehen wird.

473 vgl. BASF; Hamprecht, Jens: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Werkstoffe“ der Enquete Kommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2013), Antwort auf Frage 9.

474 vgl. Evonik Industries AG; Häger, Harald: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Werkstoffe“ der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2013), Antwort auf Frage 2.

## Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte

### Ökologie

#### *Ressourcenschonung*

Eine weitere Herstellung von petrochemisch basierten Kunststoffen ist mit weiterem Erdölverbrauch verbunden. Das recycelte Material findet derzeit meist Anwendung in niedrigeren Wertschöpfungsstufen; eine Ressourcenschonung erfolgt damit zunächst nicht. Durch weitere Effizienzsteigerungen könnten in Zukunft jedoch die gleichen Mengen an Werkstoffen aus weniger Erdöl hergestellt werden. Dies ist bedeutend, weil Erdöl in Zukunft voraussichtlich knapper und damit teurer werden wird. Mittelbare Einsparmöglichkeiten ergeben sich zudem aus Innovationen in der Materialforschung (z.B. durch verbesserte Dämmstoffe oder Leichtbau).

#### *Carbon Footprint*

Durch die stoffliche Nutzung von Erdöl wird im Gegensatz zur Verbrennung für die Energiegewinnung (Stromerzeugung und Mobilität) – zumindest vorübergehend – der enthaltene Kohlenstoff gebunden. Die entsprechenden Werkstoffe und Produkte stellen eine CO<sub>2</sub>-Senke dar, die bei der sofortigen Verbrennung des Erdöls (energetische Nutzung) nicht gegeben wäre. Am Ende ihrer Lebensdauer werden zurzeit die meisten Kunststoffe – unter Nutzung der in ihnen enthaltenen Energie – verbrannt, wodurch CO<sub>2</sub> freigesetzt wird. Der Kohlenstoff für petrochemisch basierte Kunststoffe entstammt unterirdischen Kohlenstofflagern. Der dort ursprünglich gebundene Kohlenstoff gelangt auf diese Weise als klimaaktives CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre. Durch die unveränderte Weiternutzung von Erdöl als Rohstoff für Kunststoffe erfolgt diesbezüglich keine Einsparung. Eine CO<sub>2</sub>-Einsparung gegenüber der heutigen Situation kann jedoch dann erreicht werden, wenn Erdöl effizienter zur Herstellung von Werkstoffen eingesetzt wird.

Bei der CO<sub>2</sub>-Bilanzierung sind alle CO<sub>2</sub>-Emissionen zu berücksichtigen, die bei der Rohstoffgewinnung, -aufarbeitung und Herstellung entstehen. Bei der Ermittlung des Carbon Footprint sind deshalb – durch ein LCA – alle im Laufe des gesamten Produktlebens entstandenen und eingesparten Emissionen einzubeziehen (vgl. Infoblock zu Lebenszyklusanalysen, Kapitel II.2.4). Der Carbon Footprint ist für jeden einzelnen Werkstoff/jedes einzelne Produkt über LCA bestimmbar. Eine pauschale Aussage darüber, welcher Rohstoff bei der Kunststoffproduktion gegenüber einem anderen unter CO<sub>2</sub>-Aspekten vorteilhaft ist, ist nicht möglich.

#### *Emissionsminderung*

Durch die weitere hauptsächliche Nutzung von Erdöl für die Herstellung von Kunststoffen ergeben sich gleichbleibende Emissionen. Dies bezieht sich sowohl auf den Eintrag durch sachgemäßen Gebrauch (z.B. Mikropartikel in Kosmetika) als auch durch unsachgemäße Entsorgung.

### Ökonomie

#### *Innovation*

Die Produktion von Kunststoffen auf petrochemischer Basis entspricht dem derzeitigen Stand der Technik und ist die vorherrschende Art, Kunststoffe wirtschaftlich herzustellen. Dies belegt die aktuell hohe Durchdringung petrochemisch basierter Werkstoffe in verschiedensten Anwendungsbereichen. Um diese aufrecht zu erhalten, sind ständige Innovationen für verbesserte Material- und Produkteigenschaften sowie effizientere Herstellungs- und Weiterverarbeitungstechnologien notwendig.

Die oben beschriebenen Innovationen finden fortlaufend statt und haben zu einem nicht geringen Maße ihren Ursprung in NRW, da hier eine enge Verzahnung von Grundlagen- und Anwendungsforschung über die verschiedenen Glieder der Wertschöpfungsketten hinweg besteht. Diesen Vor-

sprung kann NRW bei der Entwicklung und Produktion von hochwertigen Funktionswerkstoffen nutzen und weiter ausbauen. Beispiele für das Innovationspotenzial der chemischen Materialforschung sind Organische Leuchtdioden, Leichtbaumaterialien, polymerbasierte Verbundwerkstoffe, selbstheilende Materialien im Korrosionsschutz für Windräder oder noch kleinere Superkondensatoren<sup>475</sup>. Nordrhein-Westfalen hat zurzeit in vielen Bereichen einen Technologievorsprung. Diesen gilt es zu sichern. Grundlage für weitere Produktinnovationen und eine ökonomische Entwicklungsperspektive insgesamt bietet die hohe Dichte an Universitäten und Forschungseinrichtungen des Hochtechnologiestandorts Nordrhein-Westfalen.

### *Wettbewerbsfähigkeit*

Wenn Kunststoffe in NRW weiterhin hauptsächlich aus Erdöl hergestellt werden, können die derzeit eingesetzten Verfahren und Technologien weiter genutzt werden. Die chemische Industrie in NRW verfügt aktuell über intakte Wertschöpfungsketten und eine starke räumliche Nähe zwischen den verschiedenen Akteuren. Dies bedeutet einen wesentlichen Wettbewerbsvorteil. Hierdurch bedingt kann die petrochemisch basierte Kunststoffproduktion in NRW aktuell wirtschaftlich betrieben und Innovationen realisiert werden. Allerdings ist davon auszugehen, dass Schwellenländer wie China und Brasilien im Bereich der Basischemikalien weiter aufholen werden<sup>476</sup>, so dass vor allem im Bereich der Massenkunststoffe von einer Verlagerung der Produktionskapazitäten in diese Weltregionen ausgegangen werden kann, was wirtschaftliche Nachteile für die chemische Industrie in NRW zur Folge hätte. Zudem sind die Folgen geopolitischer Entwicklungen und des Schiefergasbooms in den USA nicht absehbar. Dort konnten bis vor kurzem die Basischemikalien zur Kunststoffherstellung deutlich günstiger hergestellt werden als in Deutschland. Dies betrifft insbesondere die Standardkunststoffe (z.B. PVC). Denn durch die Abwanderung würde die Gefahr entstehen, dass auch Wissen und Forschungsinvestitionen für NRW verloren gehen. Um dies zu verhindern, müssen Forschung und Innovation auf die Märkte abzielen, welche die Megatrends der Zukunft (vgl. Annahmen Mobilität, Demografischer Wandel, etc.) bedienen. Der NRW-Leitmarkt „Neue Werkstoffe“ adressiert diese neuen Märkte<sup>477</sup>.

Die Wirtschaftlichkeit der petrochemisch basierten Kunststoffproduktion hängt zudem wesentlich vom Ölpreis ab. Da der Erdölbedarf in den kommenden Jahren zunehmen wird, wird mit einem Preisanstieg gerechnet. Die Beibehaltung aktueller Technologien setzt voraus, dass ausreichende Mengen an Erdöl zu wettbewerbsfähigen Preisen in NRW zur Verfügung stehen. Die Wirtschaftlichkeit der Prozesse zur Erzeugung petrochemischer Werkstoffe und die Innovation mittels Investition in die Entwicklung und Produktion neuer hochwertiger (Funktions-) Werkstoffe in NRW sind entscheidend. Nur dann sind Investitionen in Anlagenkapazitäten, Forschung und Arbeitsplätze möglich.

Es ist aber zu beachten, dass die USA mit ihrer Strategie zur Nutzung von Schiefergas versuchen eine Unabhängigkeit bezüglich der ehemals für ihre Volkswirtschaft lebenswichtigen Ölversorgung aus dem Nahen Osten aufzubauen. Es ist unklar, ob die EU künftig bereit sein wird, ihre Versorgungsinteressen vergleichbar der Vereinigten Staaten zu sichern. Übertragen auf die Situation in Deutschland kann es aus geostrategischen Gründen für die chemische Industrie in Deutschland jedoch Sinn machen, die stoffliche Nutzung des hiesigen Kohlenwasserstoff-Trägers Braunkohle als heimische Alternative zum importierten Öl in den Blick zu nehmen.

475 vgl. DBG; DECHEMA; DGM; GDCh; VCI (Hg.): Positionspapier Chemie als ein Innovationstreiber in der Materialforschung. (2012), S. 8 f.

476 vgl. Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Die deutsche chemische Industrie 2030 Kurzfassung der VCI-Prognosestudie. (2012), S. 12 f.

477 vgl. Clustersekretariat des Landes Nordrhein-Westfalen: Neue Werkstoffe – ExzellenzNRW unter: <http://www.exzellenz.nrw.de/leitmaerkte/neue-werkstoffe/>. Online am 19.02.2014.

## Soziales

### *Beschäftigung und Bildung*

Durch den Erhalt von Produktion, bestehenden Wertschöpfungsketten und Forschung in NRW können bestehende Arbeitsplätze gesichert und erhalten werden. Ein entsprechender Ausbau des Innovationspotenzials im Bereich der hochwertigen Funktionswerkstoffe würde die Schaffung neuer, qualitativ hochwertiger Arbeitsplätze in den Bereichen Forschung, Entwicklung und Produktion ermöglichen. Der Einfluss auf die Beschäftigung ist abhängig davon, ob Innovation und Produktion von Zukunftsprodukten vor Ort gelingt. Petrobasierte Kunststoffe sind sowohl hinsichtlich Kosten und Innovationspotenziale wettbewerbsfähig und bieten daher auch künftig Chancen für den Erhalt von Produktion und gut bezahlter Arbeitsplätze. Durch den zu erwartenden Druck auf einfachere Kunststoffe wird sich eine stärkere Entwicklung hin zu hochwertigeren Kunststoffen ergeben (s. Prognos-Studie). Dies bedeutet tendenziell höhere Anforderungen an Aus- und Weiterbildung. Durch die bestehende enge Verzahnung mit der Ausbildung können Innovationen durch qualifizierte Fachkräfte umgesetzt werden. Die Herstellung komplexerer Produkte kann mittels Stärkung von Aus- und Weiterbildung umgesetzt werden.

### *Lebensqualität*

Durch die Verfügbarkeit von weiterhin günstigen Konsumgütern – in Form von Massenkunststoffen – kann ein Beitrag zum Wohlstand (sowohl in Industrie- als auch Schwellenländern) geleistet werden.

### *Sicherung der Finanzierung staatlicher Gemeinaufgaben*

Durch den Erhalt des wirtschaftlich starken Kunststoffsektors in NRW können generierte Steueraufkommen durch den Staat z.B. für Infrastruktur oder Bildung genutzt werden.

## **Option B.1b: Umstellung der derzeitigen Polymerwerkstoffproduktpalette auf ausschließlich biobasierte Rohstoffbasis**

Eine weitere Option stellt eine vollständige Ausweitung der bereits heute zu einem kleinen Teil genutzten nachwachsenden Rohstoffe sowie die Nutzung anderer Rohstoffbasen wie CO<sub>2</sub> dar. Damit bedeutet Option B.1b einen sukzessiven Rohstoffwandel weg von Erdöl als aktueller Rohstoffbasis hin zu alternativen Rohstoffbasen.

### **Beschreibung**

Wie im Unterkapitel biobasierte Kunststoffe dargestellt, gibt es derzeit Bestrebungen, Kunststoffe nicht mehr aus Erdöl herzustellen, sondern aus nachwachsenden und alternativen Rohstoffen. Bei dieser Option geht es daher um den vollständigen Wandel der Rohstoffbasis. Der Marktanteil biobasierter Kunststoffe ist zurzeit noch sehr gering. Im Laufe der letzten Jahre hat dieser jedoch stetig zugenommen. Ein solcher beschriebener Rohstoffwandel hat Werkstoffe mit ähnlichen bzw. identischen Eigenschaften (Drop-ins) sowie auch neuen Eigenschaften zur Folge.

### **Begründung**

Eine Verteuerung fossiler Rohstoffe wird angenommen (vgl. Ist-Zustand Rohstoffkapitel). Dies wird unter anderem von einer zunehmenden Weltbevölkerung angetrieben. Dies führt zu einer Verteuerung der Ressourcen. Ein Technologievorsprung gegenüber anderen Ländern hilft, sich andere Rohstoffquellen frühzeitig zu erschließen und somit eine Rohstoffautarkie herbeizuführen. Eine weitere Begründung zur Beschäftigung mit dieser Option ist die postulierte CO<sub>2</sub>-Einsparung bei der Verwendung nachwachsender Rohstoffe oder CO<sub>2</sub> als Rohstoff. Ein weiterer Grund ist eine steigende Nachfrage von Abnehmerindustrien nach biobasierten Materialien, die ihren Grund in einer stärkeren Gewichtung biobasierter Materialien durch den Käufer, vor allem in Deutschland und zum Teil auch der übrigen EU hat.

## Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte

### Ökologie

#### *Ressourcenschonung*

Eine Ausweitung der stofflichen Nutzung von Biomasse und alternativer Rohstoffe führt zu einer Schonung der Ressource Öl, sofern diese dann nicht anderweitig genutzt wird. Die Ressource Biomasse bzw. alternative Rohstoffe wird bei dieser Option in höherem Maße durch die chemische Industrie stofflich genutzt. Dementsprechend steht die so genutzte Landfläche nicht für die Futter- bzw. Nahrungsmittelproduktion zur Verfügung.

Der Energiebedarf, welcher für den Einsatz von Biomasse zur stofflichen Nutzung durch die chemische Industrie benötigt wird, kann auf Grund des höheren Wasseranteils von Biomasse (gegenüber Erdöl) höher sein. Aufgrund des niedrigeren Kohlenstoffgehalts müssen größere Rohstoffmengen transportiert und verarbeitet werden. Ebenso erfordert die Abtrennung und Aufreinigung von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre oder aus Abgasen viel Energie. Auch die Aktivierung des Moleküls zur Einbindung in den Werkstoff ist mit einem hohen Energiebedarf verbunden (vgl. Rohstoff-Kapitel). Vor- oder Nachteile biobasierter Kunststoffe gegenüber anderen Rohstoffen hängen daher vom Einzelfall ab. Eine generalisierende Aussage ist nicht möglich.

#### *Carbon Footprint*

Der in Biomasse gebundene Kohlenstoff stammt unmittelbar aus der Atmosphäre. Damit ist der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen zur Kunststoffproduktion CO<sub>2</sub>-neutral in Bezug auf den im Produkt gebundenen Kohlenstoff. Auch für Produkte aus Biomasse müssen LCAs vorgenommen werden, um den CO<sub>2</sub>-Ausstoß einzubeziehen, der aus Produktion, Transport, Aufbereitung und Verarbeitung der Biomasse entsteht, was die CO<sub>2</sub>-Neutralität der Biomasse selbst aufheben kann.

Durch den Einsatz von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre oder aus Abgasen als Rohstoff für Kunststoffe ergibt sich eine positive CO<sub>2</sub>-Bilanz für den im Produkt gebundenen Kohlenstoff. In einem LCA sind diese Einsparungen jenen CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüberzustellen, die bei der Abtrennung und Aufreinigung sowie bei der Einbindung in den Werkstoff entstehen.

#### *Biodiversität/Flächennutzung*

Die zunehmende Verwendung von Biomasse hat eventuell Einfluss auf die Biodiversität, weil mehr Flächen zum Anbau benötigt werden. Dies ist je nach verwendeter Biomasse zu überprüfen. Durch Ertragssteigerungen kann der Mehrbedarf an Flächen ggf. ausgeglichen werden.

### Ökonomie

#### *Innovation*

Zurzeit werden weniger als 5% der Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt. Technologien sind teilweise bis zur Marktreife vorangeschritten (vgl. Kapitel II.2.2.2). Die Entwicklung neuer biobasierter Kunststoffe birgt zudem ein großes Potenzial für neue (Funktions-)Materialien. Allerdings ist die technische Machbarkeit der Herstellung von hochwertigen Kunststoffen aus nachwachsenden Rohstoffen derzeit noch eingeschränkt. Durch intensive Forschung und Entwicklung wird dies voraussichtlich mittelfristig realisierbar sein. Hierzu sind große Investitionen in Anlagen und Prozessforschung notwendig. Dies wiederum kann die Wirtschaftlichkeit der heute laufenden Prozesse, Anlagen und Infrastruktur beeinträchtigen.

Gesellschaftlich ist die Akzeptanz biobasierter Kunststoffe hoch, solange die Tank-Teller-Konkurrenz nicht zu ethischen Konflikten führt.

### *Wettbewerbsfähigkeit*

Es ist generell schwierig, ein neues Produkt in bestehenden Märkten zu etablieren, weil z.B. Anpassungen von Verarbeitungsmaschinen notwendig sind; für die Biokunststoffe wird diese Markterschließung zusätzlich durch den Kostennachteil erschwert. Aktuell sind die Preise für biobasierte Kunststoffe in der Regel nicht konkurrenzfähig, was die Wirtschaftlichkeit beeinträchtigt (s. Kapitel II.2.2.2). Die stoffliche Nutzung nachwachsender und alternativer Rohstoffe wird in NRW bereits beforscht und auch durchgeführt. „Neue Materialien“ sind Leitmarkt in NRW, wobei Biopolymere hierbei nur einen sehr geringen Anteil ausmachen. Eine umfassende Umstellung auf biobasierte Kunststoffe würde den Umbau der bestehenden Wertschöpfungsketten erforderlich machen. Dieser Umbau würde große Investitionen in Forschung und Infrastruktur für neue Prozesse und Anlagen notwendig machen. Dies ließe sich nur im Bereich hochwertiger Kunststoffe, die vergleichsweise teuer verkauft werden können, wirtschaftlich realisieren. Denn auch in diesem Bereich würden die biobasierten Produkte in direkter Konkurrenz mit den petrochemisch basierten Kunststoffen stehen, welche ebenfalls auf Grund innovativer neuer Materialeigenschaften neue Märkte zu erschließen versuchen.

Im Hinblick auf die Versorgungssicherheit ist bei dieser Option vorrangig der steigende Bedarf (verglichen mit heute) an nachwachsenden Rohstoffen zu berücksichtigen. Die Menge der zu substituierenden Kunststoffe hängt in Zukunft von der Menge an verfügbaren Rohstoffen, deren Preisen und den zu erzielenden Produkteigenschaften, Konsumgewohnheiten sowie vom Technologiefortschritt ab. Ein steigender Bedarf an nachwachsenden Rohstoffen für die stoffliche Nutzung durch die chemische Industrie kann in NRW nicht durch Eigenanbau gedeckt werden. Da bei Massenkunststoffen die Gewinnmargen über den Rohstoffpreis definiert werden, hätte die Umstellung auf nachwachsende Rohstoffe (die derzeit teurer sind) eine Abwanderung der Basischemie und damit das Zerreißen bestehender Wertschöpfungsketten zur Folge. Hingegen ist das Potenzial für nachwachsende Rohstoffe in anderen Weltregionen (z.B. Brasilien in Bezug auf Zuckerrohr) größer, was die vermehrte Ansiedelung von Basischemie dort belegt.

Der Import von nachwachsenden Rohstoffen (mit Ausnahme von Ölfrüchten) für die stoffliche Nutzung ist derzeit nicht wirtschaftlich, da fossile Rohstoffe günstiger sind. Auch ist der Transport von Biomasse auf Grund des höheren Wassergehalts aufwendiger (da größere Massen bei geringerem Energiegehalt transportiert werden müssen). Denkbar ist daher eher der Import von Zwischenprodukten für die Produktion von technischen oder Hochleistungskunststoffen, wodurch die Spezialchemie in NRW gehalten werden könnte.

### **Soziales**

#### *Beschäftigung und Bildung*

Um innovative Materialien zu fördern, müsste die Materialforschung in der Aus- und Weiterbildung gestärkt werden. Durch den Aufbau neuer Strukturen (biotechnologischer Prozesse und Anlagen) kann ggf. der Wegfall vorhandener Strukturen ausgeglichen und Beschäftigung gesichert werden.

Des Weiteren beinhaltet diese Option den Aspekt, dass ggf. Technologien Verwendung finden, die zurzeit keine Akzeptanz in der Gesellschaft haben (wie z.B. grüne Biotechnologie). Jedoch können sich auf Grund von neuen Technologien/Prozessen auch potenziell neue Geschäftsfelder eröffnen („Windows of Opportunity“). Veränderte Produkteigenschaften können sowohl vorteilhaft als auch nachteilig sein. Nur Produkte deren Eigenschaften sich aufgrund der Veränderung der Rohstoffbasis positiv ändern, werden am Markt und bei den Verbrauchern Bestand haben.

### *Lebensqualität*

Eine Änderung der Lebensumstände (durch die Verwendung anderer oder anders hergestellter Produkte) kann auch eine Änderung der Lebensqualität hervorrufen. Unter Aspekte, die bei einer Bewertung berücksichtigt werden sollten, sind z.B. die Änderung der Arbeitsplatzsituation in der Öl- und Biomasseindustrie. Auch kann die „gefühlte“ Lebensqualität sich durch die Änderung der Produkte ändern, wenn z.B. biobasierte Produkte gewünscht sind.

## **Option B.1c: Vermehrtes rohstoffliches Recycling zur Ausweitung der Nutzung von Sekundärrohstoffquellen (Rezyklaten)**

### **Beschreibung**

Diese Option beschreibt das vermehrte rohstoffliche Recycling von Kunststoffabfällen, d.h. eine thermische Depolymerisation von polymeren Werkstoffen zu ihren Grundbausteinen (Monomeren) bzw. der Pyrolyse polymerer Werkstoffe zu Synthesegas (vgl. auch Recycling Ist-Zustand)<sup>478</sup>. Diese Option sieht einen ausgeweiteten Einsatz der daraus resultierenden Rezyklate als Sekundärrohstoffe vor.

### **Begründung**

Diese Option zielt auf eine kreislaufwirtschaftliche Nutzung des in polymeren Werkstoffen gebundenen Kohlenstoffs ab. Rohstoffliches Recycling wird hier auch für Werkstoffe angewendet, bei denen z.B. durch Verschmutzung, Vermischung oder Materialverschleiß eine rein werkstoffliche Trennung nicht mehr möglich ist (vgl. Recycling Ist-Zustand). Wie im Ist-Zustand beschrieben, wird aktuell nur 1% der Kunststoffabfälle in Deutschland rohstofflich verwertet. Die Möglichkeit einer Ausweitung des rohstofflichen Recyclings soll deshalb in dieser Option untersucht und anschließend hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit bewertet werden.

Eine solche Schließung von Stoffkreisläufen würde zunehmend auf eine sich verändernde, nachhaltigkeitsorientierte Konsumentennachfrage, wie sie von Teilen der Bevölkerung gewünscht wird, reagieren.

### **Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte**

#### **Ökologie**

##### *Ressourcenschonung*

Die kreislaufwirtschaftliche Nutzung des im Werkstoff gebundenen Kohlenstoffs führt zu einer Schonung primärer Rohstoffe (unabhängig ihrer Quelle), was die Versorgungssicherheit mit Rohstoffen, gerade in einem rohstoffimportabhängigen Land wie Deutschland, verbessert, da an ihrer statt die Rezyklate als Sekundärrohstoffe eingesetzt werden. Weiterhin kann Energie zur Rohstoffgewinnung eingespart werden. Bei einer derzeitigen Quote des rohstofflichen Recyclings von 1% ist das aktuelle Potenzial zur Rohstoffversorgung stark begrenzt. Dieser Einsparung steht der energetische Aufwand für die Sammellogistik sowie für den Abbau der polymeren Werkstoffe gegenüber. Insbesondere die Pyrolyse zu Synthesegas ist aufgrund der hohen erforderlichen Temperaturen sehr energieintensiv. Der Energiebedarf ist höher als bei der thermischen Verwertung oder etwa der Synthesegaserzeugung aus Erdgas.

---

<sup>478</sup> Depolymerisation ist auf wenige Kunststoffklassen beschränkt. Diese Methode des rohstofflichen Recyclings ist z.B. bei Polyester, Polyamiden oder Plexiglas (Polymethylmethacrylat) anwendbar. Die Pyrolyse zu Synthesegas kann prinzipiell auf jede Kunststoffsorte angewandt werden, allerdings sind sehr hohe Temperaturen (ca. 1200 °C) erforderlich. Definition nach: <http://de.wikipedia.org/wiki/Depolymerisation>.

### *Carbon Footprint*

Analog zum oben Geschriebenen stehen Einsparungen in den CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Gewinnung primärer Rohstoffe den CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber, die sich aus dem Energieverbrauch zum thermischen Abbau polymerer Werkstoffe ergeben. Der Carbon Footprint für die rohstoffliche Verwertung ist dann größer als bei der thermischen Verwertung, wenn die dafür genutzte Energie nicht aus CO<sub>2</sub>-armen Energieträgern kommt.

### *Emissionsminderung*

Durch konsequente kreislaufwirtschaftliche Nutzung gelangen Kunststoffabfälle nicht in die Umwelt.

### *Biodiversität/Flächennutzung*

Eine vermehrte Rezyklierung von biogenen Kunststoffen kann eine verminderte Anbauflächennutzung zur Folge haben.

## **Ökonomie**

### *Innovation*

Das Potenzial und die Akzeptanz zur stofflichen Wiederverwertung sind in Deutschland hoch. Kunststoffabfälle werden hier im Vergleich zu anderen Ländern, auch innerhalb der EU, bereits in größerem Maßstab gesammelt und verwertet. Allerdings ist der Anteil des rohstofflichen Recyclings mit 1% sehr gering, was auf die Beschränkung der thermischen Depolymerisation auf bestimmte Kunststoffklassen sowie einen hohen energetischen Aufwand bei der Pyrolyse zu Synthesegas zurückzuführen ist. Technologisch ist das rohstoffliche Recycling (sowohl thermische Depolymerisation als auch Pyrolyse zu Synthesegas) möglich. Eine weitere Entwicklung der Technologien insbesondere hinsichtlich ihrer Energieeffizienz ist notwendig.

### *Wettbewerbsfähigkeit*

Die Anforderungen an die Qualität der Kunststoffabfälle (Sortenreinheit, Verschmutzungen, Alterung) sind beim rohstofflichen Recycling generell geringer als beim werkstofflichen Recycling. Es gibt keine bzw. kaum Einschränkungen hinsichtlich der Einsatzmöglichkeiten von Rezyklaten aus rohstofflichem Recycling, da Synthesegas und die entsprechenden Monomere bereits in den bestehenden Wertschöpfungsketten Einsatz finden. Die aus ihnen hergestellten Werkstoffe sind deshalb auch in ihren Materialeigenschaften mit denen aus primären Rohstoffen vergleichbar. Sie sind damit ohne Einschränkung als chemischer Rohstoff einsetzbar. Da beim rohstofflichen Recycling der Trennung eine geringere Bedeutung zukommt als beim werkstofflichen Recycling, werden geringere Ansprüche an die Sammelsysteme und Trenntechnologien gestellt. Diese Aspekte wirken sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit der Nutzung von Rezyklaten aus dem rohstofflichen Recycling als Sekundärrohstoff aus. Allerdings wird ihr wirtschaftlicher Einsatz durch den hohen Energiebedarf beim thermischen Abbau stark eingeschränkt. Die verfügbaren Mengen, die Preise, die Nachfragesituation und die Qualität der Rezyklate bestimmen insgesamt über den Erfolg ihres Einsatzes.

Heute und in Zukunft besteht ein hohes Aufkommen von Kunststoffabfällen in NRW, die für ein rohstoffliches Recycling genutzt werden könnten. Die benötigte Infrastruktur für Logistik (Sammlung, Trennung) und Anlagen sind in Deutschland und NRW prinzipiell vorhanden, müsste aber bei einer Ausweitung des rohstofflichen Recyclings ausgebaut werden. Dies erfordert – ebenso wie die oben beschriebene notwendige Forschung – entsprechende Investitionen.

## Soziales

### *Beschäftigung*

Ein Ausbau der Recyclingindustrie könnte insgesamt zu mehr Beschäftigung führen. Die Qualität dieser Beschäftigung ist allerdings höchstwahrscheinlich eher im niedrigqualifizierten Bereich zu finden. Darüber hinaus ergibt sich ein weiteres Wertschöpfungspotenzial im Bereich des Exportes von fertigen Anlagen und Sammelsystemen. Entsprechend qualifizierte Arbeitskräfte stehen am Standort NRW ausreichend zur Verfügung.

### *Bildung*

Die kreislaufwirtschaftliche Nutzung setzt voraus, dass die entsprechenden Abfälle einem geeigneten Sammelsystem zugeführt werden. In den meisten Fällen erfolgt dies durch den Verbraucher. Dieser muss über das entsprechende Wissen verfügen. Da einer Trennung weniger Bedeutung beikommt als im Falle des werkstofflichen Recyclings, ist bei den Verbrauchern weniger Wissen für eine erfolgreiche Wiederverwertung erforderlich als beim werkstofflichen Recycling. Dennoch ist das Wissen über die Unterschiede zwischen rohstofflichem und werkstofflichen Recycling z.B. für die Ausbildung wichtig. Sammelsysteme können nur wirtschaftlich sein bei entweder sehr preiswerten Arbeitskräften oder einem großen Einsatz von Technik. Bildungsbedarf entsteht dabei eher im Maschinenbau und nicht im Recyclingbereich.

## II.2.5.2 Verwertungsbezogene Optionen

Diese Optionen sollen Möglichkeiten aufzeigen, Materialien am Ende der Lebenszeit von Produkten im Stoffkreislauf zu halten (z.B. durch Recycling) bzw. der Vermüllungsproblematik (entsprechend des Antrags) zu begegnen. Letzteres kann neben dem Recycling auch durch eine thermische Verwertung oder eine (biologische) Abbaubarkeit erzielt werden.

### **Option B.2a: Ausweitung der Verwendung von (biologisch) abbaubaren Kunststoffen für kurzlebige Produkte**

#### **Beschreibung**

Diese Option stellt ein Szenario dar, in dem der Anwendungsbereich von (biologisch) abbaubaren Werkstoffen über den aktuellen hinaus – vor allem auf Verpackungen – erweitert wird. Diese Werkstoffe können dabei, wie oben dargelegt, sowohl biobasiert als auch petrobasiert sein.

#### **Begründung**

Der diesem Bericht zu Grunde liegende Antrag adressiert die durch Kunststoffe hervorgerufene Meeresmüllproblematik. Über 50% der dortigen Kunststoffabfälle sind Verpackungen. Diese haben in der Regel eine kurze Nutzungsdauer, bestehen aber aus langlebigen Materialien.

#### **Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte**

### **Ökologie**

#### *Ressourcenschonung*

(Biologisch) Abbaubare Werkstoffe werden in Wasser und CO<sub>2</sub> zersetzt, ohne dass der im Material gebundene Kohlenstoff oder die enthaltene Energie genutzt werden. Es findet eine Rückführung in die Biosphäre (CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre) statt. Im Vergleich zur stofflichen bzw. thermischen Verwertung ergibt sich ggf. für die (biologische) Abbaubarkeit eine negative Bilanz für die Ressourcenschonung und damit ökologisch kein Vorteil.

#### *Carbon Footprint*

Wie bereits oben beschrieben, wird bei der Kompostierung CO<sub>2</sub> ohne vorherigen energetischen Nutzen in die Atmosphäre freigesetzt (sog. kalte Verbrennung). Dies kann dann sinnvoll sein, wenn

die Abbaubarkeit für das Produkt an sich vorteilhaft ist: Die Verpackung des Biomülls in einer bi-abbaubaren Tüte bedeutet dann einen ökologischen Nutzen (welcher ggf. den CO<sub>2</sub>-Eintrag in die Atmosphäre rechtfertigt/aufwiegt), wenn zum einen die Sammlung und Nutzung von Biomasse erleichtert wird. Zum anderen müssen Kunststoff und Biomasse bei einer Vermischung nicht mehr mit entsprechendem Aufwand voneinander getrennt werden. Weitere anwendungsbezogene Beispiele, bei denen die Abbaubarkeit diesen ökologischen Nutzen hat und damit eine Kompostierung gegenüber einer stofflichen oder thermischen Verwertung vorteilhaft ist, sind Catering-Produkte, Pflanztöpfe, -klammern oder Mulchfolien.

### *Emissionsminderung*

Die Abbaubarkeit ist eine Möglichkeit, dem negativen Effekt der Landschafts- bzw. Meeresvermüllung zu begegnen. Allerdings besteht auch die Gefahr eines ökologisch nachteiligen, fehlgeleiteten Post-Konsumverhaltens, wenn das Wissen um die (biologische) Abbaubarkeit den sorglosen Umgang der Konsumenten mit dem Produkt am Ende der Nutzungsdauer und damit das Litteringproblem<sup>479</sup> begünstigt.

Im Kunststoff eventuell enthaltene Schadstoffe können (z.B. im Fall von Mulchfolien oder Pflanztöpfen) in den Boden gelangen bzw. den in Kompostieranlagen entstehenden Humus belasten. Durch die Zertifizierung des betreffenden Werkstoffs nach EN 13432 wird die in ihm enthaltene Schwermetallkonzentrationen auf ein unschädliches Maß begrenzt (vgl. Ist-Zustand Biologisch abbaubare Kunststoffe)<sup>480</sup>.

## **Ökonomie**

### *Wettbewerbsfähigkeit*

Bei einer Vermischung von Stoffströmen aus Biomasse und Kunststoffen (vgl. oben genanntes Beispiel: Kompostierung von Speiseresten in biologisch abbaubarer Tüte) müssen diese dank des biologisch abbaubaren Kunststoffs nicht mehr (technisch und energetisch) aufwendig getrennt werden, was die Wirtschaftlichkeit der Kompostierung erhöht. Der Mehrpreis für biologisch abbaubare Kunststoffe kann unter diesen Umständen für die oben beschriebenen Anwendungsfelder kompensiert und eine Wettbewerbsfähigkeit mit konventionellen Kunststoffen hergestellt werden. Dieser Vorteil besteht allerdings nur in Nischenmärkten. In Anwendungen, in denen kein ökonomischer Vorteil durch die Abbaubarkeit entsteht, wird eine Etablierung am Markt schwierig bleiben.

Zur Realisierung dieser Option müsste in die Infrastruktur investiert, d.h. vermehrt Kompostieranlagen gebaut werden, um die zunehmenden Mengen an (biologisch) abbaubaren Werkstoffen aufzunehmen.

Die Fähigkeit zur biologischen Abbaubarkeit eines Produktes muss – neben den gewünschten Produkteigenschaften – durch verstärkte Forschung weiterentwickelt werden, sofern diese Produkteigenschaft vermehrt gewünscht wird. Sie darf den, für den (sicheren) Gebrauch notwendigen anderen Produkteigenschaften nicht entgegenlaufen.

## **Soziales**

### *Bildung*

Der mündige, aufgeklärte Konsument muss die Produkteigenschaft „biologisch abbaubar“ beurteilen und einschätzen können. Es muss weiterhin eine Sammlung der entsprechenden Kunststoffe erfolgen, da der Abbauprozess nur unter bestimmten – in Kompostieranlagen herrschenden – Be-

479 Vermüllungsproblematik.

480 Die Emission von Nanopartikeln muss bei der biologischen Abbaubarkeit weitestgehend ausgeschlossen sein.

dingungen schnell und zuverlässig abläuft. Darüber hinaus bestehen neue Anforderungen an die Aus- und Weiterbildung hinsichtlich der Werkstoffentwicklung für den vermehrten Einsatz biologisch abbaubarer Kunststoffe (z.B. keine Beeinflussung anderer Werkstoffeigenschaften durch die Abbaubarkeit).

#### *Beschäftigung*

Der Bereich der Kunststoffverpackungen hat einen großen Marktanteil. Die Umstellung auf biologisch abbaubare Produkte zieht auch eine Umstellung in der Produktion nach sich. Im Bereich Sammlung und Verwertung (Kompostieranlagen) ergeben sich beschäftigungsbezogen keine Änderungen, da Verpackungen bereits heute gesondert behandelt werden.

### **Option B.2b: Vermehrte energetische Verwertung von Polymerabfällen**

#### **Beschreibung**

Kunststoffe können in Müllverbrennungsanlagen verbrannt und damit thermisch verwertet werden (vgl. oben Ist-Zustand Recycling). Es wird damit die in den Materialien enthaltene Energie genutzt, um Wärme z.B. für Industrieprozesse oder als Fernwärme zu gewinnen.

#### **Begründung**

Die thermische Verwertung stellt die einfachste und häufigste Verwertungsform von (post-consumer) Kunststoffabfällen in Deutschland dar (vgl. Ist-Zustand Recycling: in 2011 wurden 56% der Kunststoffabfälle (aufgrund der vorhandenen Kapazitäten) in Deutschland verbrannt).

#### **Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte**

#### **Ökologie**

##### *Ressourcenschonung*

Durch thermische Verwertung von Kunststoffen wird der Primärrohstoff Erdöl bei der Energiegewinnung substituiert bzw. kaskadenartig genutzt, sofern es nicht abgeschieden und weiterverwendet wird. Der im fossilen, nachwachsenden oder alternativen Primärrohstoff enthaltene Kohlenstoff wird kaskadenartig genutzt, was einen ökologischen Vorteil darstellt: Zunächst stoffliche Nutzung (mit Funktion einer CO<sub>2</sub>-Senke), dann energetische Nutzung der im Kunststoff enthaltenen Energie. Zusätzlich kann das bei der Verbrennung entstehende CO<sub>2</sub> wiederum – nach Abscheidung – stofflich genutzt werden.

##### *Emissionsminderung*

Durch konsequentes Einsammeln und ausschließlich thermischer Verwertung kann Littering vermieden werden.

#### **Ökonomie**

##### *Wettbewerbsfähigkeit*

Der Energieaufwand für die thermische Verwertung ist geringer als bei der stofflichen Verwertung (vgl. Option zur werkstofflichen Verwertung). Zudem bestehen keine Anforderungen an die Sortenreinheit bzw. die Qualität des Kunststoffs. Diese Aspekte sowie die Möglichkeit der Abwärme- und stofflichen Nutzung des CO<sub>2</sub> aus den entstehenden Abgasen erhöhen die Wirtschaftlichkeit des Prozesses der thermischen Verwertung, welche bereits heute gegeben ist. Einschränkend wirken derzeit die Überkapazitäten an Müllverbrennungsanlagen in Deutschland. Bei einer thermischen Verwertung von Kunststoffabfällen stehen diese allerdings nicht mehr als Rohstoffquelle für die chemische Industrie zur Verfügung. Durch eine Abtrennung des entstehenden CO<sub>2</sub> könnte der enthaltene Kohlenstoff jedoch im Kreislauf gehalten werden.

## Soziales

### *Beschäftigung*

Die thermische Verwertung von Kunststoffen wird bereits heute praktiziert. Durch die weitere Nutzung dieser Verwertungsform werden vorhandene Arbeitsplätze im Logistik- und Verwertungsbereich (Müllverbrennungsanlagen (MVA)) erhalten.

## Option B.2c: Ausweitung des werkstofflichen Recyclings

### **Beschreibung**

Diese Option beschreibt die Ausweitung des werkstofflichen Recyclings von polymeren Werkstoffen. Dies bedeutet, dass langlebige Werkstoffe zukünftig in noch stärkerem Maße nach ihrem Produktleben (post-consumer-Abfälle) gesammelt, getrennt und zu Rezyklaten aufgearbeitet werden, um als Rohstoff für neue Produkte zu dienen. Die daraus hergestellten Produkte sollen bezogen auf das Ausgangsprodukt eine vergleichbare oder höhere Wertschöpfung bieten. Die Nutzung von Werkstoffabfällen, die bei der Produktion und Weiterverarbeitung in der Industrie anfallen (pre-consumer-Abfälle), werden bereits mit sehr hoher Effizienz in den Produktionskreislauf zurückgeführt und stehen damit nicht im Fokus der vorliegenden Betrachtungen.

### **Begründung**

Im Jahr 2011 wurden 43% aller Kunststoffabfälle in Deutschland werkstofflich recycelt. Dies ermöglicht die in den Produkten gebundenen Rohstoffe wieder verfügbar zu machen und Stoffkreisläufe zu schließen. Insbesondere für Massenkunststoffe wie PE, PP, PET und PVC bestehen etablierte Recyclingsysteme mit hohen Wiederverwertungsquoten (vgl. Ist-Zustand Recycling). Eine Ausweitung dieser Vorgehensweise erscheint damit naheliegend. Die gewonnenen Rezyklate finden aktuell zumeist Wiederverwendung in Anwendungen mit einer niedrigeren Wertschöpfung als der des Ausgangsprodukts. Über einen Einsatz in höherwertigen Anwendungen könnte somit ein Mehrwert erzielt werden.

### **Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte**

## Ökologie

### *Ressourcenschonung*

Eine vermehrte werkstoffliche Nutzung von Werkstoffabfällen hat eine Ressourcenschonung zur Folge, wenn für die Herstellung neuer Produkte weniger primäre Rohstoffe und Energie eingesetzt werden. Energie wird beim werkstofflichen Recycling für die Sammlung, Trennung und Aufbereitung der Abfälle zu Rezyklaten benötigt. Aufgrund der Komplexität der Werkstoffe, die sich aus dem vielfältigen Anforderungsprofil ergibt (vgl. Ist-Zustand), ist insbesondere die Auftrennung mit einem hohen Energiebedarf verbunden.

### *Carbon Footprint*

Durch die kreislaufwirtschaftliche Nutzung des in den Produkten gebundenen Kohlenstoffs verringern sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Vergleich zur thermischen Verwertung. Dieser Einsparung stehen Emissionen aus dem Energiebedarf gegenüber, der für die Sammlung, Trennung und Aufarbeitung der Werkstoffabfälle notwendig ist. Zudem werden andere fossile Rohstoffe zur Energiegewinnung genutzt, die bisher substituiert wurden.

### *Emissionsminderung*

Durch die kreislaufwirtschaftliche Nutzung gelangen Kunststoffabfälle nicht in die Umwelt.

### *Biodiversität/Flächennutzung*

Eine vermehrte Rezyklierung von biobasierten Kunststoffen kann eine verminderte Anbauflächen-nutzung zur Folge haben.

### **Ökonomie**

#### *Innovation*

Das Potenzial und die Akzeptanz zur stofflichen Wiederverwertung sind in Deutschland hoch. Kunststoffabfälle werden hier bereits im Vergleich zu anderen Ländern in größerem Maßstab gesammelt und verwertet. Industrielle Abfallströme werden in Deutschland mit einer hohen Effizienz gesammelt und zurückgeführt (vgl. Ist-Zustand Recycling). Die Qualität von Rezyklaten aus post-consumer-Abfällen hingegen ist (zurzeit) nicht ausreichend, um sie ohne Einschränkung als chemischen Rohstoff einsetzen zu können.

Die Weiterentwicklung von Sortieranlagen/Trennverfahren ist Voraussetzung dafür, weitere einzelne Kunststoffsorten der Wiederverwendung zugänglich zu machen. Bei der Weiterentwicklung entsprechender Technologien spielen eine verbesserte Energieeffizienz sowie eine effektive Materialtrennung die entscheidende Rolle. Denn breitere Produktpaletten und dabei insbesondere neue Verbundmaterialien sowie Verunreinigungen (typisch für post-consumer-Abfällen) erschweren die sortenreine Trennung der in ihnen enthaltenen Ausgangsstoffe. Dies limitiert die Qualität der resultierenden Rezyklate und damit auch ihre Einsatzmöglichkeiten. Neben technologischen Beschränkungen, die den Einsatz von Rezyklaten für höherwertige Anwendungen begrenzen, spielt auch die Alterung der Werkstoffe eine Rolle. Additive können helfen, die ursprünglichen Materialeigenschaften wieder herzustellen.

#### *Wettbewerbsfähigkeit*

Durch die Nutzung von Rezyklaten kann der Einsatz von Primärrohstoffen gesenkt werden, was die Versorgungssicherheit mit Rohstoffen verbessern und damit die Importabhängigkeit senken würde. In Deutschland (vgl. Ist-Zustand Recycling) und Nordrhein-Westfalen stehen Kunststoffabfälle in großen Mengen zur Verfügung. Im Gegensatz zum rohstofflichen Recycling ist das werkstoffliche Recycling prinzipiell nicht auf bestimmte Kunststoffsorten beschränkt (wenn ausreichende Mengen und entsprechende Trenn- und Aufarbeitungstechnologien zur Verfügung stehen).

Um die Versorgung mit Sekundärrohstoffen aus dem werkstofflichen Recycling zu gewährleisten, ist eine entsprechende Infrastruktur und Logistik notwendig. Diese Infrastruktur zur Sammlung von Kunststoffabfällen ist in Deutschland und Nordrhein-Westfalen gegeben, müsste aber zum Zwecke des umfassenden Recyclings ausgebaut werden.

Die Wirtschaftlichkeit einer vermehrten Nutzung von Rezyklaten aus dem werkstofflichen Recycling als Sekundärrohstoffe ist abhängig von der Verfügbarkeit, der Wertschöpfungsstufe der späteren Anwendung sowie den Anstrengungen, die unternommen werden müssen, um die Werkstoffe der Verwertung zuzuführen. Hier wirkt sich in besonderer Weise der Antagonismus zwischen möglichst hoher Qualität des Rezyklats und dem damit verbundenen Energiebedarf und Arbeitsaufwand zur Sammlung und Trennung aus. Je reiner die Fraktion sein soll, umso höher ist der dafür benötigte Energiebedarf. Entsprechend höher sind dafür auch die Qualität des resultierenden Rezyklats und die Wertschöpfung des Produkts.

Die Markterschließung ist vor allem von der Qualität des Rezyklats abhängig. Neue Märkte lassen sich nur über eine Verbesserung der Rezyklatqualität erschließen.

## Soziales

### *Beschäftigung*

Der Ausbau der Recyclingindustrie könnte insgesamt zu mehr Beschäftigung führen. Dabei handelt es sich aber voraussichtlich eher um Tätigkeiten, für die geringere Qualifikationen als in den bestehenden chemischen Wertschöpfungsketten benötigt werden. Die zu erzielende Wertschöpfung dürfte daher vergleichsweise gering sein. Das Beschäftigungspotenzial besteht beim Recycling eher im Bereich Maschinenbau als in der Chemie. Darüber hinaus ergibt sich ein weiteres Wertschöpfungspotenzial im Bereich des Exportes von fertigen Anlagen und Sammelsystemen.

### *Bildung*

Neben der Eigenschaft des Produktes spielt auch der Umgang des Konsumenten mit dem Produkt an dessen Lebensende eine Rolle. Die Verbesserung der Qualität der Sammlungen ist gekoppelt an die Bereitschaft der Verbraucherinnen und Verbraucher, die Produkte den entsprechenden Sammelsystemen zuzuführen. Dies wiederum setzt Wissen über die entsprechenden Zusammenhänge voraus.

## II.2.6 Bewertung der Werkstoffoptionen

### II.2.6.1 Materialbezogene Optionen

#### **Option B.1a: Fortentwicklung der Materialeigenschaften bei gleichbleibender Rohstoffbasis (weiterhin Hauptnutzung Erdöl)**

Die Rohstoffbasis wird sich mittel- bis langfristig verändern (vgl. Rohstoff-Option A.1). Für die in NRW hergestellten Werkstoffe wird dieser Wandel aber langsam verlaufen, da zunächst meist Drop-in-Lösungen auf Basis alternativer Rohstoffe umgesetzt werden können.

Ökologisch wird sich mittel- bis langfristig wenig ändern. Die alternativen Rohstoffe werden weiterhin nur einen kleinen aber zunehmenden Mengenanteil haben.

Ökonomisch bleibt NRW kurz- bis mittelfristig wettbewerbsfähig, es sei denn geopolitische Entwicklungen verteuern die fossilen Rohstoffe unverhältnismäßig. Langfristig besteht das Risiko, dass NRW im Wettbewerb um die Rohstoffe Erdöl, Erdgas und nachwachsende Rohstoffe verliert. Im Markt wird es eine zunehmende Nachfrage nach Produkten aus erneuerbaren Rohstoffen geben. Eine langfristige Wettbewerbsfähigkeit ist dann gegeben, wenn anspruchsvolle Polymeranwendungen für z.B. Automobilbau, Luftfahrt, Elektro- und Elektronikindustrie in NRW entwickelt und produziert werden. Hier bietet sich eine Chance, so lange diese wirtschaftlich in NRW herzustellen sind.

Im globalen Wettbewerb kann es in NRW zu einem Verlust von Arbeitsplätzen kommen, wenn die Produktion von Massenkunststoffen beispielsweise in Regionen mit größerer Nähe und Verfügbarkeit von Erdöl/-gas verschoben wird. Andererseits können durch innovative Weiterentwicklung von Kunststoffen mit besseren technischen Eigenschaften und weniger Ressourcenverbrauch auch neue Arbeitsplätze entstehen. Entscheidend wird sein, wie die Wertschöpfungsketten hochwertiger Produkte (wie z.B. anspruchsvolle Polymeranwendungen für Automobilbau, Luftfahrt, Elektro- und Elektronikindustrie) in NRW erhalten bleiben und damit zu einem hohen Bedarf hochwertiger Werkstoffe führen.

#### **Option B.1b: Umstellung der derzeitigen Polymerwerkstoffproduktpalette auf ausschließlich biobasierte Rohstoffbasis**

Insgesamt werden biobasierte Kunststoffe positiv bewertet, allerdings in der Breite erst mittel bis langfristig wirtschaftlich.

Ökologisch ist der geringere CO<sub>2</sub>-Ausstoß leicht positiv zu werten, negativ kann sich die Intensivierung der Landwirtschaft auswirken. Es besteht die Gefahr des „Greenwashings“<sup>481</sup>, weil Biobasiertheit von den Kunden stärker als Produktmerkmal gewünscht wird, sich der hohe Bearbeitungsaufwand und der Flächenbedarf zur Produktion von Biopolymeren eher negativ auf die Ökobilanz auswirken. Zudem besteht aber eine direkte Konkurrenz zur subventionierten energetischen Nutzung (z.B. EEG). Kunststoffe sind bei der Nutzung des Erdöls der größte Material-Stoffstrom. Daher wäre eine entsprechend große Menge an nachwachsenden Rohstoffen und damit entsprechende Anbauflächen zur Substitution des Erdöls erforderlich.

Ökonomisch haben sich spezifische Nischenprodukte bereits durchgesetzt. Weitere Drop-in-Lösungen stehen kurzfristig zur Verfügung. Neue Wertschöpfungsketten erfordern Forschungs- und Entwicklungsaufwand und Investitionen, die eher mittel- bis langfristig wirtschaftlich werden. Im Markt ist eine hohe Akzeptanz gegeben, soweit die Kosten nicht deutlich über den nicht-biobasierten Kunststoffen liegen.

Sozial ist keine Veränderung zu erwarten, da neue Arbeitsplätze alte ersetzen, soweit die Wertschöpfungskette in NRW bleibt. Hier ist eine Unterscheidung vorzunehmen von Arbeitsplätzen in der Rohstoffherstellung und in der nachgelagerten Wertschöpfungskette. Keine Veränderung ist in der verarbeitenden Industrie zu erwarten. In der Produktion biobasierter Werkstoffe könnten zusätzlich Arbeitsplätze (z.B. in Bioraffinerien) entstehen.

#### **Option B.1c: Vermehrtes rohstoffliches Recycling zur Ausweitung der Nutzung von Sekundärrohstoffquellen (Rezyklaten)**

Ökologisch und ökonomisch nur dort sinnvoll, wo der energetische und logistische Aufwand den Nutzen nicht übersteigt.

Das sind allerdings nur Nischen, da nur wenige Kunststoffe chemisch oder thermisch in ihre Ausgangsstoffe zurückgeführt werden können. Eine weitere Hürde stellt der energetische Aufwand dar.

Ökonomisch ist das rohstoffliche Recycling in Nischen sinnvoll, weitere Verfahrensentwicklungen sind erforderlich. Frühere Bemühungen in NRW waren bisher nicht erfolgreich. Über technische Hürden hinaus gibt es auch wirtschaftliche Hindernisse.

Sozial könnten neue Arbeitsplätze in der Logistik und den rohstofflichen Recyclinganlagen entstehen.

### **II.2.6.2 Verwertungsbezogene Optionen**

#### **Option B.2a: Ausweitung der Verwendung von (biologisch) abbaubaren Kunststoffen für kurzlebige Produkte**

Insgesamt für spezifische Anwendungsfelder geeignet.

Die Kompostierung erfordert spezielle Bedingungen. Die Recyclingfähigkeit ist eingeschränkt.

Ökologisch sind biologisch abbaubare Kunststoffe vor allem in Produkten vorteilhaft, die nur für kurzfristigen Gebrauch gedacht sind, z.B. bei einem Teil der Verpackungstoffe, um der Vermüllung vorzubeugen. Die Abbaubarkeit kann in der Kreislaufwirtschaft zu Nachteilen führen, weil z.

---

481 Der Begriff Greenwashing bezeichnet den Versuch von Unternehmen, durch Marketing- und PR-Maßnahmen ein „grünes Image“ zu erlangen, ohne allerdings entsprechende Maßnahmen im Rahmen der Wertschöpfung zu implementieren. Bezog sich der Begriff ursprünglich auf eine suggerierte Umweltfreundlichkeit, findet dieser mittlerweile auch für suggerierte Unternehmensverantwortung Verwendung. Quelle: Lin-Hi, Nick: Stichwort: Greenwashing unter: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/91119/greenwashing-v7.html>.

B. durch Vermischung die Hydrolyse-Stabilität für die langlebigen Güter aus Kunststoffe geschwächt werden könnte. Bei der Kompostierung geht der Energieinhalt verloren.

Ökonomisch erfordern biologisch abbaubare Kunststoffe in der Regel mehr Aufwand, und teilweise den Aufbau neuer Wertschöpfungsketten. Sie eröffnen aber auch neue Märkte, bzw. substituieren bestehende Märkte.

In wie weit dabei neue Arbeitsplätze entstehen ist offen. Es kommt eher zu einer Verschiebung innerhalb der Kunststoffindustrie.

### **Option B.2b: Vermehrte energetische Verwertung von Polymerabfällen**

Insgesamt positiv bewertet; die werkstoffliche ist der thermischen Verwertung vorzuziehen, wenn diese nach den unter Option B.2c dargestellten Kriterien nachhaltig ist.

Ökologisch bedeutet thermische Verwertung, dass die Energie in Stoffen, die nicht mehr sinnvoll werkstofflich zu nutzen sind, gewonnen wird und nicht wie bei der Verrottung ungenutzt bleibt. Der Logistik-Aufwand ist niedriger als bei der werkstofflichen Verwertung. Die Abfallmenge wird reduziert. Die Verbrennungsgase aus der thermischen Verwertung z.B. als Synthesegas sollten stofflich genutzt werden (vgl. Option B.3b).

Ökonomisch ist die thermische Verwertung oft kostengünstiger als die werkstoffliche Verwertung. Im Kunststoff gebundene (metallische) Wertstoffe können unter Umständen zurückgewonnen werden.

Die thermische Verwertung von Kunststoffen erfolgt in bereits bestehenden Energiegewinnungs- oder Abfallverbrennungsanlagen. Daher ist mit zusätzlichen Arbeitsplätzen nicht zu rechnen. Auch die bestehenden Logistikketten werden dafür genutzt.

### **Option B.2c: Ausweitung des werkstofflichen Recyclings**

Insgesamt wird diese Option positiv bewertet, insbesondere bei sortenreinen Stoffströmen. Werkstoffliches Recycling ist die beste Nachnutzung von Werkstoffen. Dies trifft auf Werkstoffe wie Glas und Metalle ebenso zu wie auf Kunststoffe. Der entscheidende Vorteil ist, dass die bei der Herstellung aufgewendete Energie weitgehend erhalten bleibt.

Ökologisch wird durch werkstoffliches Recycling der CO<sub>2</sub>-Ausstoß verringert, soweit der logistische und technische Aufwand diesen Vorteil nicht aufhebt. Hier ist zu erforschen, inwieweit diese Aufwände reduziert werden können und welche Maßnahmen dazu zur Verfügung stehen.

Ökonomisch ist das werkstoffliche Recycling für sortenreine Stoffströme etabliert, für Mischströme gibt es inzwischen ausgefeilte Sortierverfahren. Soweit eine sortenreine Erfassung oder Trennung nicht möglich ist, sollte die thermische Verwertung erfolgen. Dies wird sich wahrscheinlich auch mittel- und langfristig nicht ändern. Eine Ausweitung des werkstofflichen Recyclings kann durch ein gezieltes Produktdesign und die weitere Verbesserung der Aufbereitungslogistik erfolgen.

Das werkstoffliche Recycling kann im Einzelfall zur Schaffung neuer Arbeitsplätze führen. Im Allgemeinen wird es aber nicht zur Schaffung neuer Arbeitsplätze führen, da Sammlung, Sortierung und Logistik bereits seit vielen Jahren etabliert sind und die Verarbeitung in bestehenden Produktionsanlagen erfolgt.

## Anhang

Tabelle 18: Recyclingnummern für Kunststoffe

Recyclingnummer	Kürzel	Name des Werkstoffs	Verwendung des Polymers zu	Recyclingfähigkeit <sup>481</sup>
	PET oder PETE	Polyethylenterephthalat	Polyesterfasern, Folien, Softdrink-Flaschen, Lebensmittelverpackungen	Kann bis zu 8 mal recycelt werden, ca. 60% werden zu Fleece-textilien recycelt, der Rest zu Folien und Flaschen
	PE-HD	High-Density Polyethylen	Plastikflaschen, Plastiktaschen, Abfalleimer, Plastikrohre, Kunstholz	Lässt sich 4-5 mal recyceln, dann lässt die Molekülkettenlänge nach, PE wird in vielen Ländern nicht recycelt, Nachfrage nach PE-Recyclat steigt
	PVC	Polyvinylchlorid	Fensterrahmen, Rohre und Flaschen (für Chemikalien, Klebstoffe, ...)	Hart-PVC wird durch ein Deutschlandweites Rücknahmesystem der PVC-verarbeitenden Industrie geregelt, eine Einarbeitung von bis zu 70% Recyclat sind technisch möglich
	PE-LD	Low-Density Polyethylen	Plastiktaschen, Eimer, Seifenspendflaschen, Plastiktuben	Siehe PP-HD; Recyclingprozess von PE erzeugt 70% weniger CO <sub>2</sub> als die Herstellung von neuem PE
	PP	Polypropylen	Stoßfänger, Innenraumverkleidungen, Industriefasern, Lebensmittelverpackungen	Beim Einschmelzen entsteht eine Mischung der Eigenschaften verschiedener PP-Typen, das Recyclat ist damit minderwertig. PP wird daher noch selten recycelt.
	PS	Polystyrol	Spielzeug, Blumentöpfe, Videokassetten, CD-Hüllen, Aschenbecher, Koffer, Schaumpolystyrol, Lebensmittelverpackungen	Ein PS-Recycling ist möglich aber noch selten. PS kann durch Erhitzen in das Ausgangsmaterial Styrol umgesetzt werden
	O (OTHER)	Andere Kunststoffe wie Acrylglas, Polycarbonat, Nylon, ABS, Fiberglas und Polylactide (PLA)		Acrylglasrecycling ist ohne Verluste machbar <sup>482</sup> Polycarbonat ist sehr gut recycelfähig, es können z.B. neue CDs oder DVDs hergestellt werden

Die Nummern 90 bis 92 kennzeichnen Verbundwerkstoffe aus Kunststoff und Metall.

482 COPLARE Coastal Plastics Recycling (Hg.): Kunststoff-Kompendium. (2011).

483 Evonik Industries AG (Hg.): Plexiglas: Ökologisch arbeiten. (2011).

# Inhalt Kapitel III

<b>III.</b>	<b>VERFAHREN</b> .....	167
	<b>Gesamteinleitung für alle Verfahrenskapitel</b> .....	167
<b>III.1</b>	<b>Intensivierte chemische Verfahren</b> .....	168
III.1.1	Prozessintensivierung.....	168
III.1.1.1	Neue Prozessfenster (Novel Process Windows) .....	170
III.1.1.2	Katalyse .....	171
III.1.1.3	Maßgeschneiderte Lösungsmittel.....	175
III.1.1.4	Innovative Energieeinträge .....	177
III.1.1.5	Mikroreaktionstechnik.....	177
III.1.1.6	Flow Chemistry .....	182
III.1.2	Prozessentwicklung und Prozessintegration.....	184
III.1.2.1	Die 50%-Idee .....	184
III.1.2.2	Technologiekonzepte.....	185
III.1.3	Annahmen .....	191
III.1.3.1	Allgemeiner Bedarf an Prozessintensivierungsmaßnahmen.....	191
III.1.3.2	Relevanz für NRW .....	191
III.1.3.3	Forschungsbedarf und Ausblick .....	192
III.1.4	Optionen.....	192
Option C.1:	Intensivierung bestehender Produktionsprozesse .....	192
Option C.2:	Verwendung von modularer Produktion (Future Factories).....	194
III.1.5	Bewertung.....	195
Option C.1:	Intensivierung bestehender Produktionsprozesse .....	195
Option C.2:	Verwendung von modularer Produktion (Future Factories).....	197
	Katalyse .....	198
<b>III.2</b>	<b>Verfahren der Kohlechemie</b> .....	199
III.2.1	Ist-Zustand.....	199
III.2.2	Option D.1: Verfahren der Kohlechemie .....	202
III.2.3	Bewertung Option D.1: Verfahren der Kohlechemie.....	205
<b>III.3</b>	<b>Biotechnologische Verfahren</b> .....	207
III.3.1	Einleitung.....	207
III.3.1.1	Begriffsbestimmungen .....	207
III.3.1.2	Charakteristika der Biokatalyse .....	208
III.3.2	Bedeutung der Biotechnologie .....	209
III.3.2.1	Marktstruktur .....	209
III.3.2.2	Relevanz für NRW.....	209
III.3.2.3	Umsatz und FuE-Ausgaben .....	210
III.3.3	Beispiele biotechnologischer Produktion .....	211
III.3.3.1	Geschichte.....	211
III.3.3.2	Biotechnologie im Alltag.....	213
III.3.3.3	Zitronensäureherstellung.....	213
III.3.3.4	Aminosäureproduktion .....	213
III.3.3.5	Antibiotikaherstellung .....	214
III.3.3.6	Biopolymere .....	215

III.3.3.7	Vitaminherstellung.....	215
III.3.3.8	Synthese sekundärer Pflanzenstoffe .....	216
III.3.4	Potenzial biotechnologischer Verfahren zur Nutzung alternativer Rohstoffe .....	217
III.3.4.1	Nutzung nachwachsender Rohstoffe 1. Generation .....	217
III.3.4.2	Nutzung nachwachsender Rohstoffe 2. Generation .....	218
III.3.4.3	Nutzung von CO <sub>2</sub> und Synthesegas.....	219
III.3.5	Annahmen .....	220
III.3.5.1	Marktpotenziale.....	220
III.3.5.2	Forschungsbedarf .....	221
III.3.6	Option E.1: Vermehrter Einsatz biotechnologischer Verfahren in der chemischen Industrie .....	221
III.3.7	Bewertung Option E.1: Vermehrter Einsatz biotechnologischer Verfahren.....	223
<b>III.4</b>	<b>Bioraffinerien .....</b>	<b>225</b>
III.4.1	Einleitung.....	225
III.4.2	Definition und Konzept .....	225
III.4.2.1	Definition Bioraffinerie.....	225
III.4.2.2	Bioraffinerie-Konzept.....	226
III.4.3	Funktionsprinzip.....	227
III.4.3.1	Rohstoffe für Bioraffinerien.....	228
III.4.3.2	Verfahren.....	230
III.4.3.3	Produkte.....	231
III.4.3.4	Plattformchemikalien.....	232
III.4.4	Entwicklungsstand der wichtigsten Bioraffinerie-Konzepte.....	235
III.4.4.1	Realisierung von Bioraffinerien .....	235
III.4.4.2	Aktuell aussichtsreichste Konzepte.....	236
III.4.4.3	Entwicklungsstand .....	238
III.4.4.4	Anwendungsbeispiele.....	240
III.4.4.5	Bioraffinerie-Entwicklung in NRW.....	241
III.4.5	Annahmen .....	242
III.4.5.1	Marktpotenzial einzelner Bioraffineriekonzepte .....	242
III.4.5.2	Forschungsbedarf .....	244
III.4.6	Option F.1: Technologiekonzept Bioraffinerie allgemein.....	245
III.4.7	Bewertung Option F.1: Technologiekonzept Bioraffinerie allgemein.....	250
<b>III.5</b>	<b>Verfahren der biomimetischen Chemie.....</b>	<b>253</b>
III.5.1	Einleitung.....	253
III.5.2	Nutzung biologischer Katalysemechanismen zur Herstellung ausgewählter Grundchemikalien.....	253
III.5.2.1	Biomimetisch-chemische Wasserspaltung .....	254
III.5.2.2	Biomimetisch-chemische Stickstofffixierung .....	257
III.5.3	Bioinspirierte Materialien und Wirkstoffe.....	258
III.5.3.1	Grundlagen bioinspirierter Materialien .....	258
III.5.3.2	Grundlagen bioinspirierter Wirkstoffe .....	260
III.5.4	Annahmen .....	260
III.5.4.1	Relevante Megatrends .....	260
III.5.4.2	Annahmen zur Wasserspaltung.....	261
III.5.4.3	Annahmen zur Stickstofffixierung .....	263
III.5.4.4	Annahmen zu bioinspirierten Materialien .....	263
III.5.5	Optionen.....	264

Option G.1:	Biomimetisch-chemische Wasserspaltung vs. elektrochemischer und katalytisch-chemischer Wasserspaltung .....	264
Option G.2:	Biomimetisch-chemische Stickstofffixierung vs. Haber-Bosch-Verfahren und Züchtung von Nutzpflanzen mit den Eigenschaften der Leguminosen .....	266
Option G.3:	Entwicklung von biologisch inspirierten Materialien als Ersatz von derzeit genutzten technischen Materialien und neuartigen Werkstoffen .....	268
III.5.6	Bewertung .....	269
Option G.1:	Biomimetische Chemie .....	269
Option G.2:	Biomimetische Chemie zur Entwicklung effizienter Katalysatoren für die Wasserstoff- und Ammoniakherstellung.....	269
Option G.3:	Bioinspirierte Materialien .....	269



## III. Verfahren

### Gesamteinleitung für alle Verfahrenskapitel

Die chemische Industrie sieht sich Herausforderungen in Bezug auf die Energie- und Rohstoffversorgung sowie einer veränderten Marktsituation ausgesetzt. Innovativen Verfahren kommt bei der Bewältigung dieser Herausforderungen eine Schlüsselrolle zu. Sie haben maßgeblichen Einfluss darauf, ob die chemische Industrie in Nordrhein-Westfalen auch zukünftig global wettbewerbsfähig sein wird.

Der prognostizierte Rohstoffwandel führt langfristig zu einer Diversifizierung der Rohstoffbasis in der chemischen Industrie. Zukünftige Verfahren in der chemischen Industrie müssen diesen Änderungen Rechnung tragen. So besteht bei einem vermehrten Erdgaseinsatz die Herausforderung, Alternativen für  $C_4$ - und  $C_6$ -Ausgangsstoffe zur Herstellung von Basischemikalien zu finden, da diese Fraktionen nur in geringen Anteilen im Erdgas vorhanden sind. Für den vermehrten Einsatz von Kohle fehlt es bislang an in Deutschland wirtschaftlich nutzbaren Verfahren. Eine besondere Herausforderung stellt darüber hinaus der vermehrte Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen und – auf längere Sicht – Kohlendioxid dar, die sich in ihrer Zusammensetzung von der jetzigen Naphtha-basierten Rohstoffbasis deutlich unterscheiden und damit neue, darauf angepasste Verfahren erfordern.

Neben den beschriebenen Umbrüchen stellt eine veränderte Marktsituation die chemische Industrie vor große Herausforderungen. So werden von den Kunden zunehmend maßgeschneiderte Lösungen gefordert, was zu einem sehr diversen Markt mit – im Vergleich zu heute – oftmals kleineren Produktmargen führt. Heutige Produktions- und Anlagenkonzepte sind jedoch, um von Skaleneffekten profitieren zu können, auf große Produktmargen ausgelegt und können dieser Veränderung kaum gerecht werden. Darüber hinaus wird der Markt volatil. Es werden immer schneller neue Produkte am Markt verlangt, regionale Absatzmärkte entwickeln sich unterschiedlich dynamisch und stehen im globalen Wettbewerb. Heutige Produktionsanlagen sind für einen Betrieb an einem Standort über mehrere Dekaden konzipiert. Hinzu kommt, dass ein Anbieter immer schneller ein neues Produkt auf dem Markt etablieren muss, weil Innovationszyklen kürzer werden.

Auf dem globalen Markt profitieren Chemieregionen mit günstigen Energie-, Rohstoff- und Personalkosten sowie den schnellsten Verfahren zur Anlagengenehmigung und -inbetriebnahme (Time-to-Market). Um die Wettbewerbsfähigkeit der nordrhein-westfälischen chemischen Industrie zu sichern, bedarf es daher innovativer Prozesse und Produkte, um diesen Kostennachteil kompensieren zu können.

In den nachfolgenden Unterkapiteln wird deshalb betrachtet, inwieweit intensivierete chemische, biotechnologische Verfahren sowie die biomimetische Chemie und das Technologiekonzept der Bio-raffinerien Potenzial zum Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen besitzen.

## III.1 Intensivierte chemische Verfahren

### III.1.1 Prozessintensivierung

Im folgenden Kapitel wird die Intensivierung chemischer Verfahren beschrieben, die, wie nachfolgend erklärt, von der seit Jahrzehnten in der Industrie praktizierten Prozessoptimierung zu unterscheiden ist.

Prozessintensivierung wurde 1993 von Ramshaw<sup>484,485,486</sup> an der Universität Newcastle wissenschaftlich postuliert, nach einer Dekade an entsprechenden Industrieanstrengungen als Industrieingenieur bei Imperial Chemical Industries (ICI) in den 80er Jahren. Grundidee war die Produktivität so zu steigern, dass die Anlagengröße zusammenschrumpft. Diese Ideen wurden lange Zeit allein im kleinen Expertenkreis untersucht, bis mit einem erneuten Schub von Stankiewicz<sup>487,488</sup> bei der DSM und später als Professor in Delft ein weites Interesse für Prozessintensivierung stimuliert wurde. Diese Entwicklung profitierte auch von der positiven Erwartung, die in die Mikroreaktionstechnik gesetzt wurde. Heute gibt es mehrere Prozessintensivierungs-Roadmaps und eigene Public-Private-Partnership-Plattformen („Prozessintensivierung Network“), die sich dem Thema widmen.

Dabei geht die Definition der Prozessintensivierung heute über die Verkleinerung der Anlagengröße hinaus. Nach der Definition der Europäischen Roadmap für Prozessintensivierung bedeutet Prozessintensivierung nämlich „eine Zusammenstellung radikal innovativer Prinzipien für Apparate und Prozesse, welche hinsichtlich der Effizienz von Prozessen (Prozessketten), Kapital und Betriebskosten, Qualität, Abfall, Prozesssicherheit etc.“ eine signifikante Verbesserung mit sich bringen kann (vgl. Senter Novem<sup>489</sup>, 2007). Ziel von Prozessintensivierung ist neben Effizienzsteigerungen und Reduktionen des Material- und Energieeinsatzes auch die Verbindung von mehreren Prozessschritten zu einem einzigen Schritt, also Prozessintegration.<sup>490</sup> Damit bedeutet die Prozessintensivierung eine radikale Veränderung in der chemischen Verfahrenstechnik, also einen Paradigmenwechsel der Konzepte für Apparate und Prozesse. Die Prozessintensivierung unterscheidet sich von der seit Jahrzehnten betriebenen Prozessoptimierung, die vor allem auf Simulation und Modellierung beruht und darum weniger (teure) Experimente braucht. Dagegen baut die Prozessintensivierung durch die neue Wissensbasis und eingesetzten Apparate vermehrt auf Experimente. Aufgrund dieses grundlegend neuen Ansatzes werden die intensivierten chemischen Verfahren hier betrachtet.

Um einen Prozess in seiner Gesamtheit zu intensivieren, ergeben sich viele Ansatzpunkte. Dazu gehören unter anderem die verwendeten chemischen, physikalischen und verfahrenstechnischen Methoden, die von Grund auf analysiert und in einigen Fällen neu entwickelt werden müssen. Als Resultat einer solchen konzeptionellen „*Ab Initio*-Analyse“ lassen sich die elementaren Prozessin-

484 vgl. H. Cheng\*, K. Scott, C. Ramshaw: Application of process intensification: To oxygen electro-reduction ELECTROCHEM'98 (1998). Online am 14.10.2014.

485 vgl. Ramshaw, Colin: Process Intensification and Green Chemistry – Green Chemistry. In: Green Chemistry (1999), 1, S. G15-G17.

486 vgl. Raey, David; Ramshaw, Colin; Harvey, Adam: Process intensification—engineering for efficiency, sustainability and flexibility. In: Green Processing and Synthesis (2012), 1,.

487 vgl. Stankiewicz, Andrzej I.; Moulijn, Jacob A.: Process Intensification Transforming Chemical Engineering. In: Process Engineering Progress (2000), S. 22–34.

488 vgl. Stankiewicz, Andrzej: Reactive separations for process intensification: an industrial perspective. In: Chemical Engineering and Processing: Process Intensification (2003), 3, S. 137–144.

489 Behörde des niederländischen Wirtschaftsministeriums.

490 vgl. Brunner, Christoph; Muster, Bettina; Schnitzer, Hans: Prozessintensivierung unter: [http://www.aee.at/aee/index.php?option=com\\_content&view=article&id=32&Itemid=113#autor\\_1](http://www.aee.at/aee/index.php?option=com_content&view=article&id=32&Itemid=113#autor_1) (2011). Online am 07.07.2014.

intensivierungsmaßnahmen in folgende Kategorien unterteilen<sup>491</sup>: Miniaturisierung, Hybridisierung, Strukturierung, Dynamisierung, Integration und Rationalisierung sowie neuartige Lösungsmittel und unkonventioneller Energieeintrag.

Das volle Potenzial kann nur ausgeschöpft werden, sofern die unterschiedlichen Kategorien intelligent miteinander kombiniert werden. Abbildung 52 zeigt die sich aus einem solchen Mix und den genannten Prinzipien ableitenden wichtigsten Verfahrenswege sowie die zugehörigen Apparate.<sup>492</sup>

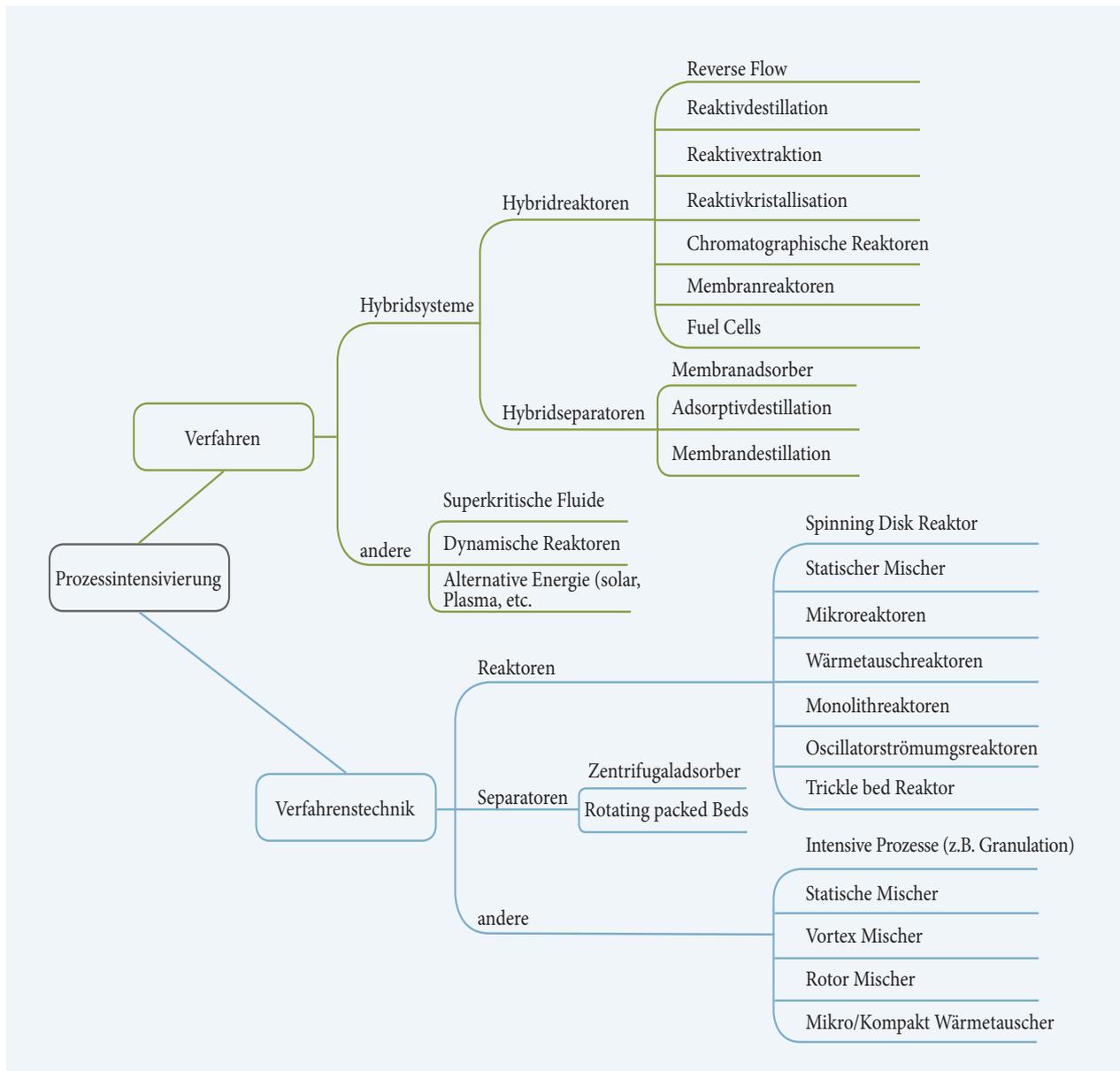


Abbildung 52: Übersicht über Verfahren und Verfahrensapparate der Prozessintensivierung<sup>493</sup>

491 Bazzanella, A.: PROCESSNET (Hg.): Prozessintensivierung – Eine Standortbestimmung. (2008).

492 Jiménez-González; Constable, David: Green Chemistry and Engineering: A Practical Design Approach. John Wiley & Sons (2011). ISBN 978-0-470170-87-8.

493 Verändert nach: ebd.

### III.1.1.1 Neue Prozessfenster (Novel Process Windows)

Der Begriff der Novel Process Windows (NPW) wurde 2009 geprägt<sup>494,495,496</sup> und beschreibt neue Prozessbedingungen (breitere Druck- und Temperaturbereiche, hohe Konzentration, smarte Lösungsmittel, Katalysator, ...) zur Aktivierung chemischer Reaktionen, die mit konventionellen Betriebsbedingungen nicht zu erreichen sind. Sie werden mit neuen Apparaten wie z.B. Mikroreaktoren ermöglicht. Allen neuen Prozessfenstern ist eine massive Verkürzung der Reaktions- und Prozesszeiten eigen – typischerweise von Stunden zu wenigen Minuten oder noch schneller (d.h. mit einem Faktor 100-1000 schneller).<sup>497,498,499,500,501</sup>

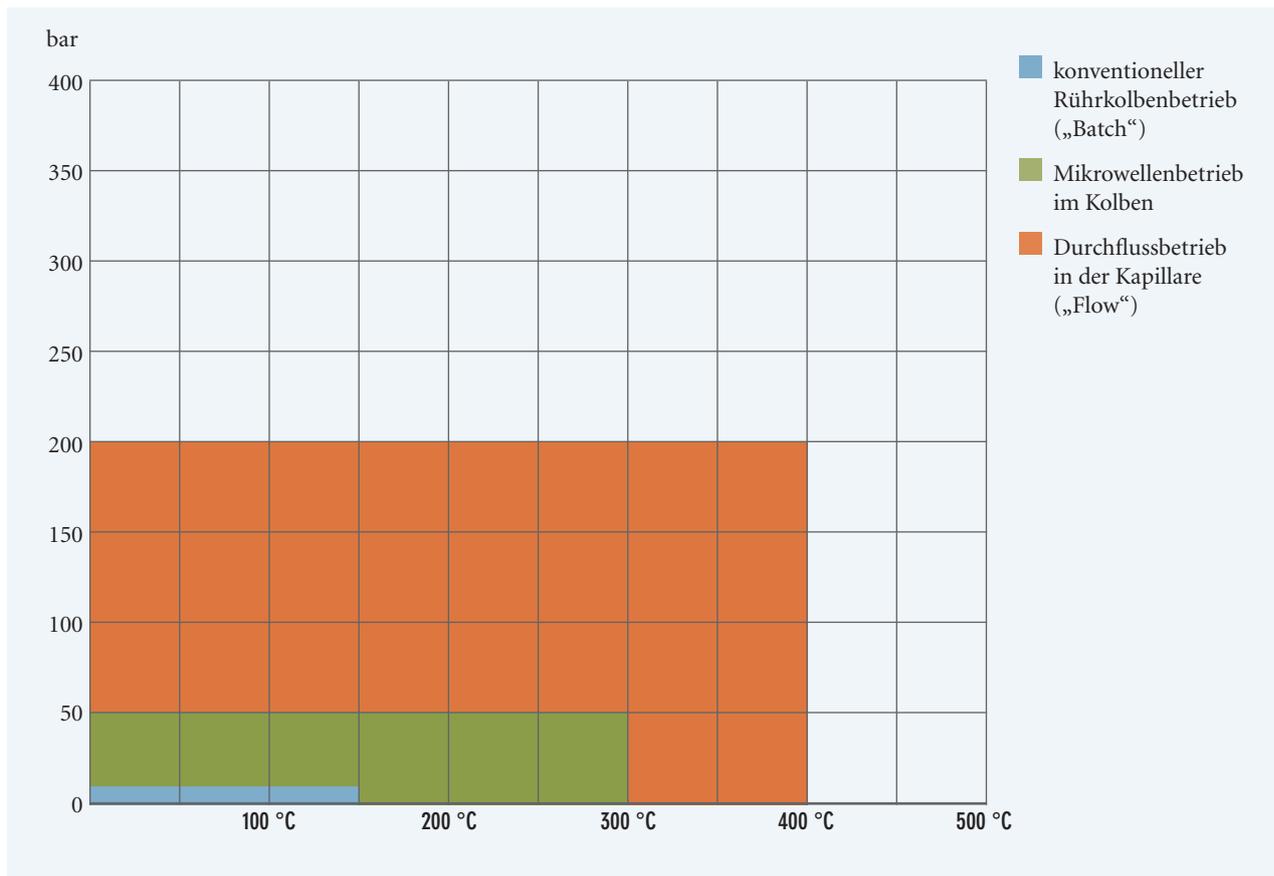


Abbildung 53: Übersicht der Erweiterung des Nutzungsbereichs von Prozessbedingungen (Druck, Temperatur) durch Prozessintensierungsmaßnahmen (wie z.B. Prozessierung im laminaren Bereich)<sup>502</sup>

494 vgl. Hessel, Volker: Novel Process Windows – Gates to Maximizing Process Intensification via Flow Chemistry. In: Chemical Engineering & Technology (2009), 11, S. 1641.

495 vgl. Hessel, Volker; Kralisch, Dana; Kockmann, Norbert; Noël, Timothy; Wang, Qi: Novel Process Windows for Enabling, Accelerating, and Uplifting Flow Chemistry. In: ChemSusChem (2013), 5, S. 746–789.

496 vgl. Hessel, Volker; Lob, Patrick; Lowe, Holger: Development of Microstructured Reactors to Enable Organic Synthesis Rather than Subduing Chemistry. In: Current Organic Chemistry (2005), 8, S. 765–787.

497 vgl. Hessel, Volker; Kralisch, Dana; Kockmann, Norbert: Novel Process Windows. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2014). ISBN 978-3-527-32858-1.

498 vgl. T. Razzaq, C. O. Kappe: Continuous Flow Organic Synthesis under High-Temperature/Pressure Conditions. In: Chemistry – An Asian Journal (2010), 6, S. 1274–1289.

499 vgl. Illg, Tobias; Löb, Patrick; Hessel, Volker: Flow chemistry using milli- and microstructured reactors – From conventional to novel process windows. In: Bioorganic & Medicinal Chemistry (2010), 11, S. 3707–3719.

500 vgl. Hessel, Volker; Cortese, B.; Croon, M.H.J.M. de: Novel process windows – Concept, proposition and evaluation methodology, and intensified superheated processing. In: Chemical Engineering Science (2011), 7, S. 1426–1448.

501 vgl. Razzaq, T.; Glasnov, T. N.; Kappe, C. O.: Accessing Novel Process Windows in a High-Temperature/Pressure Capillary Flow Reactor. In: Chemical Engineering & Technology (2009), 11, S. 1702–1716.

502 vgl. ebd.

Diese hohen Reaktionsgeschwindigkeiten erfordern unkonventionelle und harsche Prozessbedingungen zur Aktivierung von Prozessen durch stark erhöhten Druck (100-1000 bar), stark erhöhte Temperatur (150-400°C für eine Flüssigphasenreaktion im überhitzten Zustand), lösungsmittelfreie Reaktionsmedien (der Reaktand ist sein eigenes Lösungsmittel) oder mit modernen, nicht-thermischen Aktivierungsmodi (photokatalytisch, auch mit sichtbarem Licht, Niedertemperatur-Plasma, Mikrowelle, Ultraschall). Dies öffnet auch Zugang zu Bereichen, die mit konventioneller Technik aufgrund von sicherheitstechnischen Bedenken nicht zugänglich sind. Es wird eine Sicherheit möglich, welche nahe an dem Ideal der inhärenten Sicherheit liegt. Zudem bietet die kleine, kompakte Bauweise der Prozessintensivierungsreaktoren die Möglichkeit, Reaktionsräume so ineinander zu verschachteln (kompartimentieren), wie es die Zelle mit ihren Organellen in der Natur tut. Damit öffnen sich Möglichkeiten einer ganzheitlichen, integrierten Prozessierung in einem Kreislaufsystem. Dies alles hat einen signifikanten Einfluss auf die Prozessleistung.<sup>503</sup> Die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) hat den Begriff der neuen Prozessfenster früh als zu förderndes Thema aufgegriffen und ein Forschungscluster zu diesem Thema ins Leben gerufen.<sup>504,505</sup>

Die EU hat dieses Forschungsgebiet mit ihrer höchsten Forschungszuwendung ausgezeichnet – dem European Research Council (ERC) Advanced Grant mit 2,5 Mio. Euro.<sup>506</sup>

### III.1.1.2 Katalyse

Katalyse bezeichnet die Beschleunigung einer chemischen Reaktion mittels eines Stoffes (Katalysator), der im Endprodukt nicht enthalten ist und unverändert aus der Reaktion hervorgeht.<sup>507</sup>

Man unterscheidet grundsätzlich zwei Arten von Katalyse: Liegen Katalysator und die Edukte bei einer chemischen Reaktion in derselben Phase vor, so spricht man von homogener Katalyse. Bei der heterogenen Katalyse<sup>508</sup> liegen der Katalysator und die reagierenden Stoffe einer chemischen Reaktion in unterschiedlichen Phasen, z.B. als Gas und Feststoff oder als nicht mischbare Flüssigkeiten, vor. Zu den Vorteilen der heterogenen Katalyse gehört die einfache Abtrennung von Katalysator und Produkt. Zu den Vorteilen der homogenen Katalyse gehört die hohe Aktivität, da keine Transportbarrieren (Phasengrenzen) für die Moleküle bestehen. Die Vor- und Nachteile beider Katalysearten (hauptsächlich in Flüssigphasen) sind in Tabelle 19 vergleichend zusammengefasst. Der Bereich der Gasphasen ist ausgeklammert. Der Bereich der Biokatalyse wird im Kapitel Biotechnologie noch eingehender beschrieben.

---

503 vgl. ebd.

504 vgl. Deutsche Bundesstiftung Umwelt: DBU-Forschungscluster „Novel Process Windows“ unter: <https://www.dbu.de/1561.html>. Online am 07.08.2014.

505 vgl. Hempel, Maximilian: Funding activities by the German Federal Environmental Foundation (Deutsche Bundesstiftung Umwelt) in the field of sustainable chemistry. In: Green Processing and Synthesis (2012), 3.

506 Hessel, Volker: Novel Process Windows- Boosted Micro Process Technology unter: <http://erc.europa.eu/projects-and-results/erc-funded-projects/hessel?retain-filters=1> (2011). Online am 03.03.2015

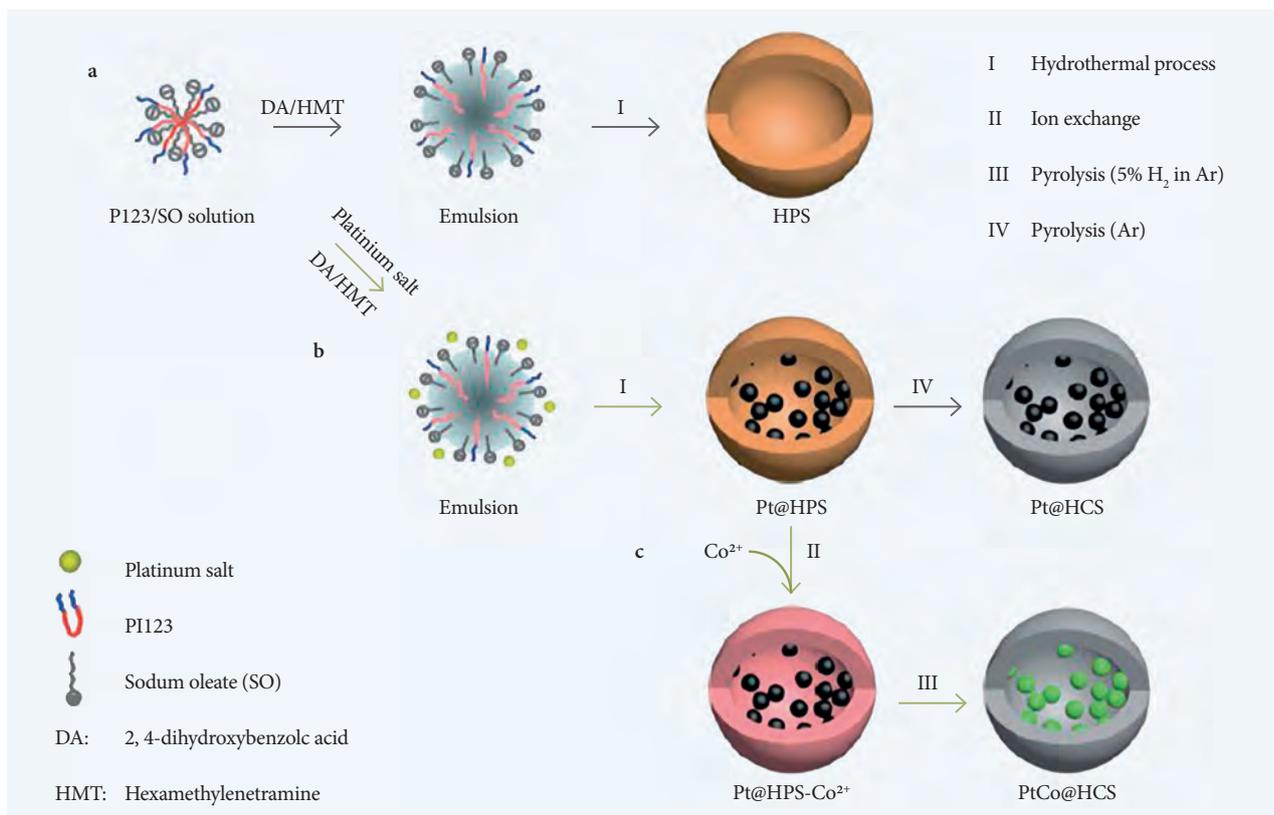
507 vgl. Schlee, D.; Kleber, H.-P. (Hg.): Wörterbücher der Biologie Teil 1 & Teil 2. Gustav Fischer Verlag (1991). ISBN 3-334-00328-0, S. 562, Band I.

508 vgl. Ross, Julian: Heterogeneous Catalysis, 1st Edition. Elsevier Science (2011). ISBN 978-0-080956-84-8.

Tabelle 19: Vor- und Nachteile von homogener und heterogener Katalyse<sup>509</sup>

	homogen	heterogen
<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• milde Reaktionsbedingungen</li> <li>• hohe Aktivität und Selektivität</li> <li>• effizienter Wärmetransport</li> <li>• kontinuierliche Prozessführung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• einfache Synthese</li> <li>• einfache Abtrennung von Katalysator und Produkt</li> <li>• kontinuierliche Prozessführung</li> </ul>
<b>Nachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• beschwerliche Abtrennung und Recycling des Katalysators</li> <li>• teilw. hohe Kosten für den Katalysator</li> <li>• aufwändige Synthese der Katalysatoren und ihrer Liganden.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wärmetransportprobleme</li> <li>• niedrige Aktivität und/oder Selektivität</li> <li>• im Fall von Inaktivität, kompletter oder teilweiser Anlagenstopp (da Teil des Reaktors)</li> </ul>

Ein wesentliches Innovationsmerkmal moderner Katalysatoren ist ihre maßgeschneiderte (oft hierarchische) Struktur. In Abbildung 54 ist schematisch der systematische Aufbau verschiedener Katalysatoren mit Hilfe desselben modernen, innovativen Konzepts gezeigt, das nicht nur die Zusammensetzung des Katalysators festlegt, sondern auch seine spätere Form und interne Struktur aus einer „Urform“ aufbaut (solche Katalysatoren sind heute noch eher im Labor zu finden). Zusammensetzung, Form und Struktur bestimmen – in Kombination – wesentlich die Leistungsfähigkeit eines Katalysators. Heute ist es so möglich Katalysatoren präzise maßzuschneidern, wie es vor 10-20 Jahren noch nicht möglich war.<sup>510</sup>

Abbildung 54: Systematischer Aufbau verschiedener Katalysatorformen<sup>511</sup>

509 ergänzt nach: Sheldon, R. A.; Arends, Isabella; Hanefeld, Ulf (Hg.): Green Chemistry and Catalysis: Biocatalysis and Organic Chemistry. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2007). ISBN 978-3-527-30715-9.

510 mündliche Mitteilung Prof. Dr. Volker Hessel vom 02.09.2014.

511 vgl. Wang, Guang-Hui; Hilgert, Jakob; Richter, Felix Herrmann; Wang, Feng; Bongard, Hans-Josef; Spliethoff, Bernd; Weidenthaler, Claudia; Schüth, Ferdi: Platinum-cobalt bimetallic nanoparticles in hollow carbon nanospheres for hydrogenolysis of 5-hydroxymethylfurfural. In: Nature Materials (2014), 3, S. 293–300.

## Relevanz der Katalyse

Katalysatoren und katalytische Prozesse sind das Herzstück der Stoffumwandlung, da sie Prozesse beschleunigen, energieeffizienter machen und die Ausbeuten steigern.<sup>512</sup> Es handelt sich eine Schlüsseltechnologie für die gesamte chemische Technik und viele angrenzende Gebiete. Die wirtschaftliche Bedeutung der Katalyse nimmt stetig zu. Während katalytische Verfahren einen Anteil von 80% aller chemischen Prozesse ausmachen, sind es bereits 90% aller neu entwickelten Verfahren. Hiervon wiederum sind ca. 10-15% homogen katalytisch.<sup>513</sup> Durch ihre große Möglichkeit, Kosten und Produktivität signifikant zu optimieren, kommt der (heterogenen) Katalyse eine enorme Bedeutung zu. Viele Herausforderungen jedoch sind zum heutigen Zeitpunkt noch ungelöst und bieten Potenzial für weitere Effizienzsteigerungen in der chemischen Industrie in den kommenden Jahren<sup>514,515,516,517</sup>. Eine Abbildung eines neuen Prozesses in bestehenden Anlagen hat daher eine vergleichsweise höhere Realisierungschance, da sowohl das technische als auch das finanzielle Risiko minimiert werden. Auch hierbei spielt die Katalyse als Schlüsseltechnologie eine zentrale Rolle, die u.U. ein Prozessdesign ermöglichen kann, welches in einer Drop-in-Lösung mündet.<sup>518</sup>

Katalytische Prozesse hatten 2013 einen Marktwert von ca. 50 Mrd. Euro in Deutschland (ca. 11 Mrd. Euro in NRW); dies entspricht einem Anteil von 80% an der Wirtschaftsleistung der deutschen chemischen Industrie.<sup>519</sup> Einige wichtige heterogen katalysierte Reaktionen aus Petro- und Bulkchemie sind in Tabelle 20 aufgeführt.

---

512 Perrey, Karen et al.: Landtag NRW (Hg.): Gutachten „Innovationsleistungsfähigkeit der chemischen Industrie in NRW – Katalyse“ für die Enquete-Kommission II des Landtags von Nordrhein-Westfalen. (2014), S. 9.

513 ebd., S. 25.

514 vgl. Schüth, Ferdi: Heterogene Katalyse. Schlüsseltechnologie der chemischen Industrie. In: Chemie in unserer Zeit (2006), 2, S. 92–103.

515 vgl. Schüth, Ferdi: Controlled nanostructures for applications in catalysis. In: Physical Chemistry Chemical Physics (2011), 7, S. 2447.

516 vgl. Beller, Matthias; Centi, Gabriele: Catalysis and Sustainable Development: The Marriage for Innovation. In: ChemSusChem (2009), 6, S. 459–460.

517 vgl. Centi, Gabriele; van Santen, Rutger A.: Catalysis for Renewables: From Feedstock to Energy Production. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2008). ISBN 978-3-527-62112-5.

518 Perrey, Karen et al.: Landtag NRW (Hg.): Gutachten „Innovationsleistungsfähigkeit der chemischen Industrie in NRW – Katalyse“ für die Enquete-Kommission II des Landtags von Nordrhein-Westfalen. (2014), S. 11.

519 ebd., S. 25.

Tabelle 20: Heterogen katalysierte Reaktionen<sup>520</sup>

Reaktion	Katalysator	Bemerkungen
Katalytisches Cracken	Saure Zeolithe, meist vom Y-Typ	-
Hydrotreating	Co-Mo/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Ni-Mo/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Entfernt Schwefel, Stickstoff und Metall aus fossilen Brennstoffen
Hydroformulierung/Oxosynthese	Metallorganische Co- und Rh-Verbindungen	Herstellung aliphatischer Aldehyde
Reformierung	Pt/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Verbessert Kraftstoff-Qualität
Claus-Prozess	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxidation von H <sub>2</sub> S zu elementarem Schwefel. Dient zur Entschwefelung von Erdöl, Erdgas etc.
Dampfreformierung von Kohlenwasserstoffen	Ni/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Dient zur Herstellung von Synthesegas, meist ausgehend von CH <sub>4</sub> . Auch andere Träger genutzt
Fischer-Tropsch	Fe oder Co	Dient zur Herstellung höherer Kohlenwasserstoffe und synthetischem Benzin aus Synthesegas
Methanolsynthese	Cu/ZnO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ausgehend vom Synthesegas, mit geringeren Mengen CO <sub>2</sub>
Ammoniaksynthese	Fe	Neue Anlagen teils mit Ru-Katalysatoren
Ammoniakoxidation	Pt-Netze	Erzeugt NO als erste Stufe der Salpetersäure
Schwefelsäuresynthese	Alkalioid-V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /SiO <sub>2</sub>	-
Autoabgasreinigung	Pt und andere Edelmetalle auf Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Washcoat	Washcoat aufgebracht auf keramischen Monolith
Stickoxidreduktion in Kraftwerken mit NH <sub>3</sub> (SCR= selective catalytic reduction)	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> auf TiO <sub>2</sub>	Auf keramischen Monolithen. Auch andere Katalysatoren bekannt
Ethenoxidsynthese	Ag/α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-
Acrolein-Synthese	Bismutmolybdat	-
Fetthydrierung	Ni, geträgert oder Raney-Ni	Margarineherstellung
Ethylbenzol durch Alkylierung von Benzol	Saure Katalysatoren, wie Zeolithe, BF <sub>3</sub> /γ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , geträgerte H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Auch homogene sauer katalysierte Prozesse bekannt
Ethylbenzol-Dehydrierung	Fe-Oxide, mit Kaliumverbindungen promotiert	Wichtigster Prozess zur Styrolherstellung

Aufgrund der enormen Bedeutung der Katalyse hat die Enquetekommission zudem ein Gutachten zur Innovationsfähigkeit der chemischen Industrie mit Schwerpunkt Katalyse in Auftrag gegeben. Dieses Gutachten stellt fest, dass die Katalyse in NRW eine historisch wichtige Bedeutung hat. So haben Katalyseverfahren mit weltweit großer Bedeutung wie das Haber-Bosch-Verfahren ihren Ursprung in NRW<sup>521</sup>. Die heutige Katalyse-Forschungslandschaft ist durch zahlreiche regionale Kompetenzzentren geprägt, die vielfach internationale Spitzenpositionen einnehmen.<sup>522</sup> Weiteres Charakteristikum ist die interdisziplinäre Breite<sup>523</sup> sowohl in der Grundlagen- als auch der angewandten

520 Ergänzt nach: ebd..

521 Perrey, Karen et al.: Landtag NRW (Hg.): Gutachten „Innovationsleistungsfähigkeit der chemischen Industrie in NRW – Katalyse“ für die Enquete-Kommission II des Landtags von Nordrhein-Westfalen. (2014), S. 26.

522 ebd., S. 18-19.

523 ebd., S. 24.

Forschung, die sich einerseits aus der Nähe zu den vielfältigen Produktionsanlagen<sup>524</sup> aber auch zu wichtigen Abnehmerindustrien in NRW<sup>525</sup> ergibt.

Nach dem Gutachten werden die wissenschaftlichen Herausforderungen der Katalyse in der nächsten Dekade folgende Meilensteine umfassen:

- (1) Verständnis von Katalysatoren auf atomarer bzw. molekularer Ebene  
Nur durch Kontrolle und Verständnis der chemischen Teilreaktionen, die an den aktiven Zentren der Katalysatoren ablaufen, können Beschränkungen der Reaktivität verstanden und dadurch bestehende Reaktionssysteme verbessert werden.
- (2) Multifunktionale Katalysatoren  
Die Entwicklung von Katalysatoren, die mehrere aktive Zentren aufweisen, um mehrere Reaktionsschritte in Einem zu ermöglichen, ist gerade auf dem Gebiet der Katalyse essenziell. Vor allem an den Schnittstellen zwischen den Disziplinen Chemie und Biologie sind Innovationen möglich.
- (3) Rationales Design von Katalysatoren  
Die Idealvorstellung eines Chemikers ist das rationale Design eines Katalysators für eine durchzuführende Reaktion. Die Minimierung experimentellen Aufwandes zur Optimierung von Reaktionsparametern und Katalysatoren durch das molekulare Verständnis von Reaktivitäten ist hier das Ziel.
- (4) Neue katalytische Reaktivitäten  
Gerade angesichts des Wandels der chemischen Rohstoffbasis hin zu regenerativen Kohlenstoffquellen ist die Entdeckung neuer, bislang unbekannter Bindungsknüpfungsmethoden oder Bindungsspaltungen essentiell zur Erschließung dieser Ressourcen.<sup>526</sup>

### III.1.1.3 Maßgeschneiderte Lösungsmittel

Neben der Verwendung von spezifischen Katalysatoren bietet der gezielte Einsatz von maßgeschneiderten Lösemitteln (Designer Solvents) eine weitere Möglichkeit Prozesse grundlegend zu intensivieren. Durch den Einsatz intensivierter Prozessapparate ist es möglich, Lösungsmittel einzusetzen, die bisher keine Verwendung finden konnten. So können beispielsweise ionische Fluide<sup>527</sup> durch ihre revolutionäre Eigenschaften wie hohe elektrische Leitfähigkeit oder hohe Temperaturstabilität für eine große Zahl von chemischen Reaktionen eingesetzt werden. Diese stark eutektischen Lösungsmittel bestehen aus Salzschnmelzen und haben Schmelzpunkte nahe der Raumtemperatur. Sie sind nicht flüchtig und schwer entflammbar.

Dies sind Eigenschaften, die klassische Lösemittel in diesen Temperaturbereichen nicht aufweisen. Häufig enthält diese Klasse von Lösemitteln toxische Komponenten.

Als sogenannte green solvents (grüne Lösungsmittel) werden hingegen solche Lösemittel bezeichnet, die ökologisch vorteilhaftere Eigenschaften als konventionelle Lösungsmittel besitzen. Die che-

524 ebd., S. 20.

525 ebd., S. 27.

526 vgl. ebd.

527 vgl. KJEMI: "Designer Solvents" Is World's Top Chemistry Paper unter: <http://www.kjemi.com/artikkel/1932/designer-solvents-is-worlds-top-chemistry-paper/> (2014). Online am 08.08.2014.

mische Industrie hat seit etwa 20 Jahren große Fortschritte bei der Substitution riskanter Lösungsmittel durch weniger riskante gemacht und auch hier die Kreislaufquote erhöht.<sup>528,529,530</sup>

Bekanntes Beispiel ist der Sildenafil-Citrat-Prozess der Pharmafirma Pfizer. Für den Pharmawirkstoff wurden früher ca. 1.300 l Lösungsmittel pro kg Wirkstoff benötigt<sup>531</sup> mit einem Anteil an Dichlormethan von mehr als 70%. Heute sind es lediglich noch ca. 7 l/kg und chlorierte Lösungsmittel wurden durch biologisch leicht abbaubare Alkohole und Ester ersetzt (vgl. Abbildung 55).

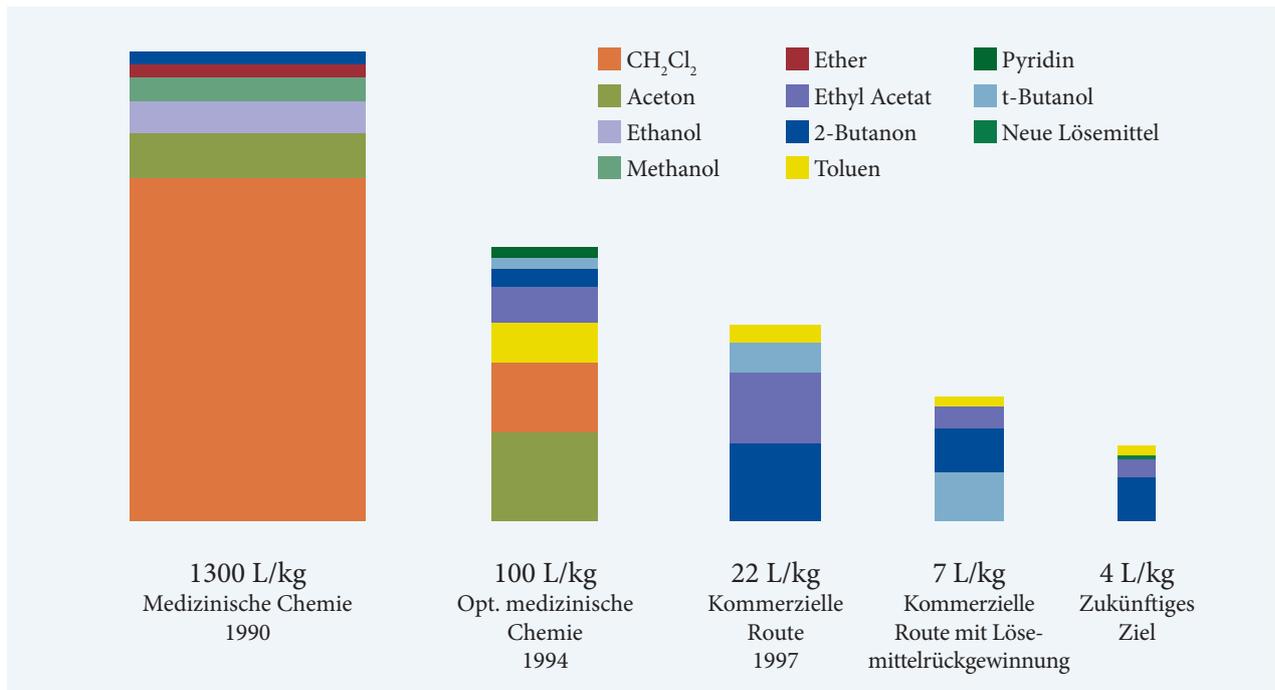


Abbildung 55: Reduzierung des Lösemittelverbrauchs beim Sildenafil-Citrat-Prozess durch Prozessintensivierungsmaßnahmen<sup>532, 533</sup>

Zusätzliches Potenzial zur Reduzierung der notwendigen Lösungsmittelmengen ergibt sich durch den Einsatz von neuartigen Lösungsmitteln (z.B. CO<sub>2</sub>) in ihrem superkritischen Aggregatzustand. In diesem Zustand verfügen Lösemittel über andere Eigenschaften als unter Normbedingungen, welche zwischen den Eigenschaften von Gas und Flüssigkeit liegen. Eine Kontrolle dieses Zustandes ist nur durch den Einsatz spezieller hochdrucktolerierender Apparate möglich, aber insgesamt unproblematisch realisierbar.

528 vgl. Fischmeister, Cedric; Doucet, Henri: Greener solvents for ruthenium and palladium-catalysed aromatic C–H bond functionalisation. In: Green Chemistry (2011), 4, S. 741.

529 vgl. Savage, Phillip E.; Rebaz, Natalie A.: Water Under Extreme Conditions for Green Chemistry – Handbook of Green Chemistry (2010). ISBN 978-3-527688-63-0.

530 vgl. Reinhardt, Denise; Ilgen, Florian; Kralisch, Dana; König, Burkhard; Kreisel, Günter: Evaluating the greenness of alternative reaction media. In: Green Chemistry (2008), 11, S. 1170.

531 vgl. Knaep, Fons de; Braish, Tamim; Gadamasetti, Kumar: Process Chemistry in the Pharmaceutical Industry – Emerging Trends in Process Chemistry. CRC Press (2007). ISBN 978-0-8493-9051-7.

532 vgl. Dunn, P. J.; Galvin, S.; Hettenbach, K.: The importance of Green Chemistry in Process Research and Development unter: [http://www.rsc.org/images/greenchem\\_tcm18-212395.gif](http://www.rsc.org/images/greenchem_tcm18-212395.gif) (2004). Online am 26.08.2014, S. 43-48.

533 vgl. Knaep, Fons de; Braish, Tamim; Gadamasetti, Kumar: Process Chemistry in the Pharmaceutical Industry – Emerging Trends in Process Chemistry. CRC Press (2007). ISBN 978-0-8493-9051-7.

### III.1.1.4 Innovative Energieeinträge

Ebenso gehört der Einsatz alternativer Energieformen zur Prozessintensivierung. Es ist möglich, hierbei die benötigte Energie in Form von z.B. Mikrowellen<sup>534,535,536</sup> dem Prozess zuzuführen. Auch Ultraschall<sup>537,538,539</sup>, Lichtenergie oder der Einsatz von Plasma<sup>540,541,542</sup> sind hier möglich. Durch den Einsatz dieser Energieformen sind Reaktionen möglich, die auf herkömmliche Weise bislang nicht realisiert werden konnten und somit ein bisher nicht gegebenes breites Einsatzspektrum ermöglichen. Zudem ergibt sich ein Energieeinsparpotenzial.

Auf der verfahrenstechnischen Seite gibt es ebenfalls Ansätze, durch spezielle Techniken den Lösungsmiteleininsatz weiter zu verringern. Zu nennen wäre exemplarisch hier unter anderem die sogenannte ball mill (Kugelmühle).<sup>543</sup> Dabei wird ein althergebrachtes mechanisches Verfahren im Miniaturmaßstab verwendet, um entgegen der bisherigen Anwendung nicht Produkte zu zerkleinern, sondern mit Hilfe der Kugeloberfläche und Rotation Lösemittel effektiver im Reaktionsraum zu verteilen. Dieses Verfahren befindet sich aktuell im Versuchsstadium und ein großindustrieller Einsatzzeitpunkt ist aktuell nicht abzusehen.<sup>544</sup>

### III.1.1.5 Mikroreaktionstechnik

Auf dem Feld der Mikroreaktionstechnik wird seit etwa 20 Jahren geforscht und entwickelt. Deutschland war hier Vorreiter, sieht sich aber zunehmend internationaler Konkurrenz ausgesetzt. In den letzten Jahren haben immer mehr Entwicklungen aus diesem Bereich Einzug in industrielle Anwendungsfelder und somit ebenfalls in die chemische Industrie erhalten. Unter Mikroreaktionstechnik werden die Techniken zusammengefasst, welche auf der Verwendung von miniaturisierten Bausteinen/Anlagenteilen beruhen.

Ein wichtiges Charakteristikum der Mikroreaktionstechnik ist die kontinuierliche Fahrweise bei sehr kurzen Verweilzeiten (Sekunden, Minuten) und kleinen Volumina (1-10 ml) im Gegensatz zu konventionellen Aufbauten, welche zumeist im Batch-Verfahren und bei sehr langen Betriebszeiten

534 vgl. Kappe, C. Oliver: Controlled Microwave Heating in Modern Organic Synthesis. In: Angewandte Chemie International Edition (2004), 46, S. 6250–6284.

535 vgl. de la Hoz, A.; Loupy, André: Microwaves in Organic Synthesis. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2012). ISBN 978-3-527-33116-1.

536 vgl. de la Hoz, Antonio; Diaz-Ortiz, Angel; Moreno, Andres: Microwaves in organic synthesis. Thermal and non-thermal microwave effects. In: Chemical Society Reviews (2005), 2, S. 164.

537 vgl. Kenneth S. Suslick, David A. Hammerton, Raymond E. Cline: Sonochemical hot spot. In: J. Am. Chem. Soc., (1986), 18, S. 5641–5642.

538 vgl. Flint, E. B.; Suslick, K. S.: The Temperature of Cavitation. In: Science (1991), 5026, S. 1397–1399.

539 vgl. Cravotto, Giancarlo; Cintas, Pedro: Harnessing mechanochemical effects with ultrasound-induced reactions. In: Chemical Science (2012), 2, S. 295.

540 vgl. Chen, Hsin Liang; Lee, How Ming et al.: Review of plasma catalysis on hydrocarbon reforming for hydrogen production—Interaction, integration, and prospects. In: Applied Catalysis B: Environmental (2008), 1-2, S. 1–9.

541 vgl. Parvulescu, Vasile I.; Magureanu, Monica; Lukes, Petr: Plasma Chemistry and Catalysis in Gases and Liquids. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2013). ISBN 978-3-527649-54-9.

542 vgl. E C Neyts; A Bogaerts: Understanding plasma catalysis through modelling and simulation—a review. In: J. Phys. D: Appl. Phys (2014), 47, S. 1–18.

543 vgl. Flores-Zamora, M. I.; Martinez-Pérez, C. A.; Garcia-Guaderrama, M.; Estrada-Guel, I.; Espinosa-Magana, F.; Martinez-Sánchez, R.: Comparative study of Al-Ni-Mo alloys obtained by mechanical alloying in different ball mills. In: REVIEWS ON ADVANCED MATERIALS SCIENCE (2008), 18, S. 301–304.

544 vgl. ebd.

(Stunden) und großen Volumina (mehrere  $\text{m}^3 = 1.000 \text{ l}$ ) laufen.<sup>545,546,547,548</sup> Die Edukte werden hierbei dem Mikroreaktor als Herzstück kontinuierlich zugeführt. Dort gelangen diese durch feine Kanäle aufeinander und werden durch eine spezielle Kanalführung gemischt. Ergänzt bzw. unterstützt werden diese Mischungsvorgänge durch gezielte Temperierung in den meist nachfolgenden Reaktionsstufen.

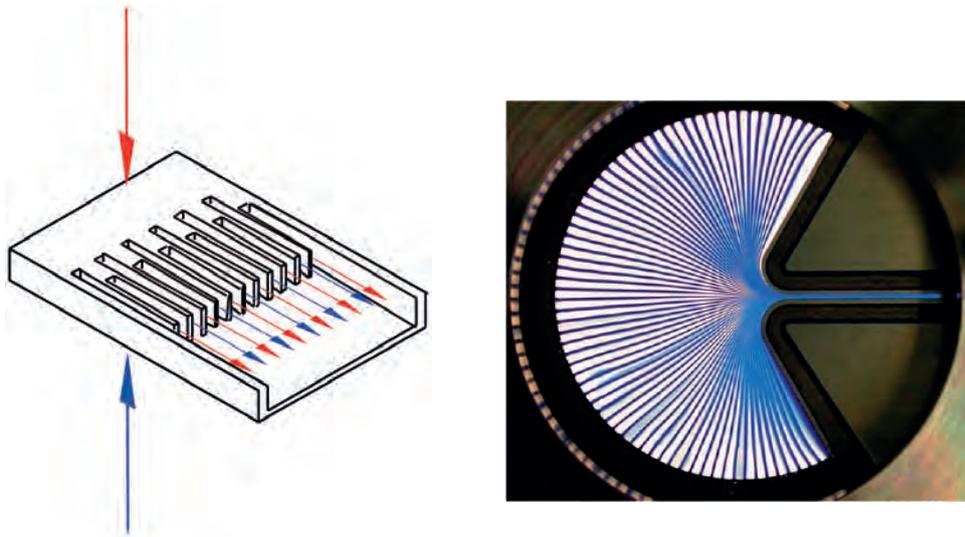


Abbildung 56: Exemplarische Darstellung Mikroreaktionstechnik<sup>549,550</sup>

Im Gegensatz zu den konventionellen Batch-Verfahren wird hierbei äußerst schnell (Millisekunden bis 0,1 Sekunde) eine Mischung der Edukte erreicht, die durch Rühren/Mischen in Kesseln (mehrere Sekunden bis Minuten) nicht zu erreichen ist. Denn die feinen Kanäle ergeben ein sehr günstiges Oberflächen-Volumen-Verhältnis, so dass sich ebenso die anfallende Reaktionswärme schnell abführen lässt, wodurch stark exotherme Reaktionen erst durchführbar bzw. kontrollierbar sind. Die spezifische Austauschfläche in Mikroreaktoren beträgt typischerweise  $10.000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . In großen Rührkessel werden dagegen nur  $10 \text{ m}^2/\text{m}^3$  oder weniger erreicht.

Auch für großtechnische kontinuierliche Verfahren bietet die Mikroreaktionstechnik Vorteile. Diese bestehen darin, dass man bereits im Labormaßstab auch großtechnisch umsetzbare Prozesse entwickeln kann. Da es sich bei der Mikroreaktionstechnik zudem um ein geschlossenes System handelt, kann auch leicht mit Druck gearbeitet werden, was ein weiteres Prozessfenster eröffnet. Die geschlos-

545 vgl. Ehrfeld, Wolfgang; Hessel, Volker; Löwe, Holger: *Microreactors – New Technology for Modern Chemistry*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2000). ISBN 3-527-29590-9.

546 vgl. Hessel, Volker, Hardt, Steffen; Löwe, Holger: *Chemical Micro Process Engineering: Fundamentals, Modelling and Reactions – Front Matter*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; FRG (2004). ISBN 978-3-527307-41-8.

547 vgl. Hessel, Volker; Löwe, Holger; Müller, Andreas et al: *Chemical Micro Process Engineering: Processing and Plants*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2005). ISBN 978-3-527-30998-6.

548 vgl. V. Hessel, A. Renken, J.C. Schouten, and J.-I. Yoshida: *Micro Process Engineering, Vol.1: Fundamentals, Operations and Catalysts*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2009). ISBN 978-3-527-31550-5.

549 Linkes Bild: Löb, Patrick; Pennemann, Helmut; Hessel, Volker: *g/l-Dispersion in interdigital micromixers with different mixing chamber geometries*. In: *Chemical Engineering Journal* (2004), 1-3, S. 75–85.

550 Rechtes Bild: Hessel, Volker; Löwe, Holger; Schönfeld, Friedhelm: *Micromixers—a review on passive and active mixing principles*. In: *Chemical Engineering Science* (2005), 8-9, S. 2479–2501.

sene Bauweise, die kleinen Volumina und die oben genannten guten Vermischungen und Kühlmöglichkeiten lassen einen Mikroreaktor dem Ideal einer inhärenten Sicherheit nahekommen. Weitere Chancen des Mikroreaktors in der chemischen Industrie liegen darin, „Fenster“ im Scale-Up<sup>551</sup> von interessanten Verfahren zu öffnen, die vorher aus sicherheitstechnischen Gründen verschlossen waren. Damit ist eine viel effizientere und zuverlässigere Prozessentwicklung möglich und die Vielzahl der abgebrochenen, anfänglich viel versprechenden Entwicklungen kann reduziert werden. Der gute Stofftransport ist ein weiterer Vorteil der bereits erwähnten feinen Kanäle. Er lässt eine sehr schnelle Mischung zu und vermeidet damit (gerade bei Mehrphasenreaktionen) die übliche Überschussdosierung eines Reagenz. Die Produktion wird hierdurch deutlich effizienter. Folgereaktionen werden unterdrückt und die Selektivität (Rohstoffeffizienz) wird höher.

Leider neigen eben diese feinen Kanäle im Laufe des Produktionslebens auch zu Verstopfungen und können den Prozess stoppen. Eine besonders gezielte Auswahl hochwertiger Materialien und des Designs, sowie auch die Wahl der richtigen Peripherie sind deshalb essentiell. Alle Zu- und Ableitungen, Pumpen und Düsen müssen nahezu konstant und ohne Schwankungen arbeiten, um das optimale Ergebnis zu garantieren. Dies macht die Prozesskontrolle gegebenenfalls aufwendig. Zeitgleich müssen alle Oberflächen und Dichtungen mit den Edukten sowie Produkten verträglich sein. Dies gilt natürlich auch für Rührreaktoren, aber ein Mikroreaktor setzt sich typischerweise aus mehr Komponenten und Materialien zusammen, mit denen das Reaktionsmedium in Berührung kommt.

#### Technologischer Hintergrund der Mikroreaktionstechnik

Die Mikroelektronik hat die weltweite Datenarchivierung und –verarbeitung sowie die gesamte Kommunikation in den 80er und 90er Jahren verändert. Eine anfänglich kleine Seitenentwicklung der Mikroelektronik war die Mikrostrukturtechnik, die auch durch die Neuorientierung ehemaliger Kernforschungseinrichtungen Ende der 70er Jahre stark vorangetrieben wurde. In den 80er Jahren entstand – nach der Entwicklung der grundlegenden Mikrostrukturverfahren – die Mikrosystemtechnik (Mechatronik, Microelectromechanical Systems (MEMS) etc.). MEMS-Produkte sind aus der heutigen Technik nicht mehr wegzudenken, wie der Beschleunigungssensor für den Airbag im Auto oder der Tintenstrahldrucker; jedoch werden sie oftmals nicht als solche wahrgenommen, da MEMS-Produkte oft versteckt mit anderen Technologien integriert sind. Deutschland war schnell in der MEMS-Technologie führend und ist das bis heute noch.

Nachdem mechanische und elektronische Produkte erfolgreich mit MEMS-Technologie entwickelt wurden,<sup>552,553</sup> lag es nahe, sich auch der Fluidik zuzuwenden.<sup>554</sup> Dies entspricht der Miniaturisierung chemischer (und biologischer) Prozess- und Analysetechnik mit Flüssigkeiten oder Gasen. Motiviert durch eine industriell getriebene Entwicklung, ein ganzes Labor auf kleinem Format abzubilden<sup>555</sup>

551 maßstabsgerechte Vergrößerung.

552 vgl. Madou, Marc J.: Fundamentals of Microfabrication: The Science of Miniaturization, Second Edition. CRC Press (2002). ISBN 978-0-849308-26-0.

553 vgl. Kaajakari, Ville: Practical MEMS: Design of microsystems, accelerometers, gyroscopes, RF MEMS, optical MEMS, and microfluidic systems. Small Gear Publishing (2009). ISBN 978-0-982299-10-4.

554 vgl. Ziaie B, Baldi A, Lei M, Gu Y, Siegel RA.: Hard and soft micromachining for BioMEMS: review of techniques and examples of applications in microfluidics and drug delivery. In: Advanced Drug Delivery Reviews (2004), 2, S. 145–172.

555 vgl. Oosterbroek, Edwin; van den Berg, A.: Lab-on-a-Chip, 1st Edition: Miniaturized Systems for (Bio)Chemical Analysis and Synthesis. Elsevier Science (2003). ISBN 978-0-444511-00-3.

wurden überall auf der Welt massiv sogenannte Lab-on-the-Chips<sup>556,557,558</sup> (ursprünglich: Micro Total Analysis Systems ( $\mu$ TAS)) entwickelt und die Mikrofluidik war geboren.

Bis heute stellt die Mikrofluidik eines der wichtigsten disziplinübergreifenden Forschungsthemen dar, mit einer Bedeutung vergleichbar der der Nanotechnologie. Hauptanwendungen sind die biochemische Analytik (z.B. DNA-Amplifikation = Polymerase Chain Reaction (PCR)), die medizinische Analytik (z.B. Glukose-Sensor und HIV Monitoring), die Umweltanalytik (z.B. Pestizide oder TNT in Böden) und die industrielle Analytik (z.B. Wassergehalt von Schmierölen).

Es lag nahe, die neu gewonnenen mikrofluidischen Möglichkeiten nicht nur auf die Analyse der Chemie, sondern auch zur Synthese anzuwenden. Fünf Jahre lang fand eine quasi isolierte, strategische und teilweise staatlich motivierte Entwicklung am Kernforschungszentrum (KfK; Karlsruhe/D) und dem Pacific Northwest National Laboratory (Richland/USA) statt (1989-1994). Der Einstieg des Instituts für Mikrotechnik Mainz (IMM) zusammen mit anderen Forschungseinrichtungen führte 1995 zum Beginn einer starken, internationalen Zuwendung zur Mikroreaktionstechnik, wie man die Chemiesynthese in mikrofluidischen Einheiten zunächst nannte. Von Anfang an waren die DECHEMA und die American Institution of Chemical Engineers (AIChE) Plattform für den Austausch interessierter Wissenschaftler. Eine eigene Wissenschaftsgemeinde und ein neues Wissensgebiet entstanden.<sup>559</sup>

### Vorteile der Mikroreaktionstechnik

Einer 10 Jahre alten Studie der Firma Lonza zufolge eignete sich Mikroreaktionstechnik für 21% ihrer damals aktuellen 86 Kampagnen, allesamt *in Batch* hergestellte Produkte. Man schloss damals ganze Reaktionsklassen wie Gas-Flüssigphasen-Reaktionen aus, weil man aufwendige Mikroreaktorprozessierungen für noch nicht industrietauglich gehalten hat. Mittlerweile laufen jedoch bei Lonza Gas-/Flüssig-Synthesereaktionen in Mikroreaktoren. Zudem ist es heute Stand des Wissens, die Chemie so zu aktivieren, dass sie einfach besser zum schnellen Mikroreaktor passt. So passend modifiziert und durch mitwachsende Steuerungstechnik, werden heute eigentlich alle bekannten modernen Synthesen in Mikroreaktoren durchgeführt. Produktionsanlagen in Mikroreaktionstechnik-Bauweise eignen sich hauptsächlich für eine Produktion im Bereich von 1–1000 t pro Jahr, was sie sowohl für den Bereich der Pharmasynthese als auch der Fein-/Spezialchemie interessant macht.

Neben den oben beschriebenen Effizienzvorzügen bietet die Mikroreaktionstechnik auch weitere Vorteile in der bereits genannten Produktionssicherheit. Durch die sehr geringen Mengen im aktiven Produktionsprozess kann es im Fall einer Leckage nur zu einem begrenzten Austritt der Chemikalien kommen, die gut kontrolliert werden können. Auch durch die geringe Baugröße lassen sich mit mittlerem Aufwand weitere Schutzmaßnahmen ergreifen. Die kompakte Bauweise bietet zudem Vorteile bei beengten Platzverhältnissen in Chemieparcs, in Laboren oder bei Produzenten, da Anlagen in Mikroreaktionstechnik-Bauweise nur einen Bruchteil des Platzes der Fläche von konventionellen Chemieanlagen benötigen. Bei ansteigendem Bedarf lassen sich zudem auf kleiner Fläche mehrere Anlagen parallel betreiben und die Produktionsmengen so durch den modularen Anlagenaufbau einfach vervielfachen.

556 vgl. Auroux, Pierre-Alain; Iossifidis, Dimitri; Reyes, Darwin R.; Manz, Andreas: Micro Total Analysis Systems. 2. Analytical Standard Operations and Applications. In: Analytical Chemistry (2002), 12, S. 2637–2652.

557 vgl. Reyes, Darwin R.; Iossifidis, Dimitri; Auroux, Pierre-Alain; Manz, Andreas: Micro Total Analysis Systems. 1. Introduction, Theory, and Technology. In: Analytical Chemistry (2002), 12, S. 2623–2636.

558 vgl. Vilkner, Torsten; Janasek, Dirk; Manz, Andreas: Micro Total Analysis Systems. Recent Developments. In: Analytical Chemistry (2004), 12, S. 3373–3386.

559 vgl. Hessel, Volker; Löwe, H.: Mikroverfahrenstechnik: Komponenten – Anlagenkonzeption – Anwenderakzeptanz – Teil 1. In: Chem Ingenieur Technik (2002), 2, S. 17–30.

Aus den genannten Primärvorteilen der Technologie wie inhärenter Sicherheit, hohem Oberflächen/Volumen-Verhältnis und hoher Kontrollierbarkeit entwickeln sich beim Einsatz Sekundärvorteile wie z.B. eine höhere Produktivität, eine bessere Selektivität und eine einfachere Reproduzierbarkeit. Hierdurch folgen dann Tertiärvorteile wie ein geringerer Anfall von Abfall, eine höhere Ressourceneffizienz sowie höhere Sicherheit und Umweltfreundlichkeit und zuletzt eine erhöhte Wirtschaftlichkeit.

Durch den geringen Platzbedarf und die Modulbauweise sind in den letzten Jahren neue Geschäftsfelder entstanden, welche im Bereich Technologiekonzepte im weiteren Verlauf dieses Kapitels beschrieben werden.

### Industrielle Umsetzung der Mikroreaktionstechnik und Firmengründungen

Von Anfang an war die Mikroreaktionstechnik von großem Industrieinteresse begleitet. BASF und DuPont waren die Industriepioniere der ersten Stunde und fokussierten auf bulkchemische Anwendungen. Früh (1999) wurde bei Merck in Darmstadt die weltweit erste Produktion (Vitamin-H-Baustein) etabliert. Nach ersten Enttäuschungen, vor allem aus dem den Durchsatz betreffenden Scale-Mismatch<sup>560</sup> zwischen Bulkchemie und Mikroreaktionstechnik brachten vor allem Pharmafirmen die Technologie entscheidend voran. Hier sind eigentlich alle Pharmafirmen weltweit zu nennen (Bayer, GSK, DSM, Pfizer, Bristol Meyer Squibb, Eli Lilly, Johnson & Johnson, Astra Zeneca, Sanofi, Novartis etc.). Meilensteine sind (1) die Errichtung einer Produktionsanlage für 2.300 kg pro Stunde bei DSM am Standort Linz (Österreich); (2) die Vergabe der Top 1-Priorität für Konti-Verfahren im 10 Punkte-Strategiekatalog des industriegeführten American Chemical Society (ACS)-Roundtable 2010; (3) 100-Mio-Contract Research MIT-Novartis für die Tablette aus der Kontianlage und (4) die Übernahme der IMM<sup>561</sup>-Ausgründung Ehrfeld-Mikrotechnik durch Bayer (Technology Services) 2004 (Mikroreaktor-Firma besteht bis heute). Heute sind etwa 100 Pilot- und Produktionsanwendungen bekannt, wobei die wahre Zahl sicher um einen Faktor 2-4 höher liegt, da die meisten Mikroreaktor-Industrie-Anlagen nicht publiziert werden.<sup>562</sup>

Das industrielle Interesse stimulierte ein schnelles Wachstum an Mikroreaktorfirmen weltweit. Erneut konnte Deutschland eine führende Rolle einnehmen und hat diese bis heute inne. Allerdings besteht heute eine starke europäische Konkurrenz vor allem in UK und den Niederlanden. International bedienen Mikroreaktorfirmen in Japan, China und Indien den Weltmarkt. Ein wichtiger Entwicklungsschritt mikroreaktor-basierter Pilotanlagen waren von dem japanischen Industrieministerium METI<sup>563</sup> finanzierte Forschungsprojekte zwischen 2000 und 2008. Als Resultat konnten 2005 acht Pilotanlagen präsentiert werden. So begleitete die beteiligte Industrie jeweils mit einem Mitarbeiter die akademische Forschung und Entwicklung vor Ort (z.B. Idemitsu Kosan für Polymerisation, Fuji für Nanopartikelpigmente).

Auf deutscher Ebene unterstützten von 2006 bis 2009 BMBF und der Verein deutscher Ingenieure (VDI) ein ähnliches produktionsorientiertes Cluster. Die EU folgte anschließend mit dem IMPULSE-Projekt, das als Flaggschiff für die spätere, noch massivere Förderung für die Future Factories diente.

China veröffentlichte erstmals 2005 eine Mikroreaktorproduktion (pharmataugliches Nitroglycerin als Herzinfarktmittel, Xi'an). Das Dalian Research Institute of Chemical Physics (China) präsentierte

560 Größenordnungsschwierigkeiten.

561 IMM: Institut für Mikrotechnik Mainz GmbH.

562 vgl. Wirth, Thomas: Microreactors in Organic Synthesis and Catalysis. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. ISBN 978-3-527-31869-8.

563 METI – Ministry of Economy, Trade and Industry.

ebenfalls mehrere Industrieproduktionen, die sich allesamt mit anorganischer Grundstoffchemie z.B. für Düngemittel (Nitrate, Phosphate) befassen. Indien hat daraufhin mit seiner IndusMagic-Initiative nachgezogen.<sup>564</sup>

Die US-amerikanische Firma Corning hat einige Industrieapplikationen in der jüngsten Zeit ermöglicht und diese in Vorträgen beschrieben<sup>565,566</sup>, während die britische Firma Heatric vor allem Wärmeüberträger in MW-Dimensionen mit tausenden Mikro- oder Millikanälen baut. Einsatzgebiete sind vorzugsweise dort, wo Kompaktheit ein Muss ist, z.B. auf Bohrinseln und schwimmenden Chemieanlagen auf Schiffen, die Offshore-Erdgas in Basischemikalien (Methanol) umsetzen.<sup>567</sup> Weitere Erfolgsgeschichten finden sich auf den Internetseiten vieler Hersteller (bspw. Syrris<sup>568,569</sup>, ThalesNano<sup>570,571</sup>, FutureChemistry<sup>572,573</sup>, Chemtrix<sup>574,575</sup>).

### III.1.1.6 Flow Chemistry

Um 2005 hat sich die Flow Chemistry entwickelt. In der Flow Chemistry wird eine chemische Reaktion kontinuierlich anstatt batch-weise gefahren. Flow Chemistry ist im Grunde ein Milliversion der Conti-Technologie, die seit den 50er Jahren bestens etabliert ist, um im großen Maßstab in der Petrochemie Grundstoffe herzustellen.<sup>576,577,578,579</sup> Kurz gesagt, werden bei dieser Technologie Stoffströme durch Pumpen in kleinsten Röhren (Kapillaren) geleitet und bei Vereinigung der beiden Röhren ein Kontakt der Flüssigkeiten hergestellt. Eine weitere, oft meterlange Röhre stellt die Reaktionsstrecke dar. Dort kommt es dann zur chemischen Reaktion. Anstelle von Röhren können auch z.B. kleine Festbetten, also Packungen von relativ einheitlichen Grundkörpern, die eine poröse Matrix für den Flüssigkeitstransport erzeugen, oder dedizierte Mikromischer, Mikrowärmeübertrager oder Mikroseparator für Spezialaufgaben eingesetzt werden. Für die Abtrennung stehen schon heute kleine Mikroextraktoren, Mikrodestillationsanlagen und vor allem Festbettabsorber (für das Abfangen von Reagenzien nach der Reaktion; Scavenging) bereit. Flow Chemistry im Labormaßstab

- 
- 564 vgl. CSIR-National Chemical Laboratory: Indus Magic – Innovate, Develop & Up Scale Modular, Agile Intensified & Continuous Processes & Plants unter: <http://www.indusmagic.org>. Online am 09.10.2014.
- 565 vgl. Corning Incorporated (Hg.): Corning Micro-Reaction Technology. (2014).
- 566 vgl. Corning Incorporated: Corning Microreactor technology brings new market to Corning unter: [http://www.corning.com/news\\_center/corning\\_stories/microreactors.aspx](http://www.corning.com/news_center/corning_stories/microreactors.aspx) (2014). Online am 09.10.2014.
- 567 vgl. Heatric (Hg.): Compact diffusion-bonded heat exchangers – The future of heat transfer engineering.
- 568 vgl. Syrris: Syrris – Flow reactors, microreactors and productivity tools for R&D Chemists unter: <http://syrris.com/>. Online am 09.10.2014.
- 569 vgl. Syrris: Scaling Up – Flow Chemistry unter: <http://syrris.com/applications/flow-chemistry/scaling-up>. Online am 09.10.2014.
- 570 vgl. ThalesNano Nanotechnology Inc: Nanotechnology unter: <http://thalesnano.com/>. Online am 09.10.2014.
- 571 vgl. ThalesNano Nanotechnology Inc: Nanotechnology – References unter: <http://thalesnano.com/references>. Online am 09.10.2014.
- 572 vgl. FutureChemistry Holding BV: FutureChemistry – Smart, safe and clean chemistry unter: <http://www.futurechemistry.com/applications.html>. Online am 09.10.2014.
- 573 vgl. FutureChemistry Holding BV: FutureChemistry – Scientific Publications unter: <http://www.futurechemistry.com/scientific-publications.html>. Online am 09.10.2014.
- 574 vgl. Chemtrix BV Headquarters: Flow Chemistry unter: <http://www.chemtrix.com/downloads>. Online am 09.10.2014.
- 575 vgl. Chemtrix BV Headquarters: Flow Chemistry unter: <http://www.chemtrix.com/applications>. Online am 09.10.2014.
- 576 vgl. Wiles, Charlotte; Watts, Paul: Micro Reaction Technology in Organic Synthesis. CRC Press (2011). ISBN 978-1-439824-71-9.
- 577 vgl. Fukuyama, Takahide; Rahman, Md Taifur; Baxendale, Ian R. et al.: Organic Chemistry in Microreactors. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2008). ISBN 978-3-527318-69-8.
- 578 vgl. Amii, Hideki; Nagaki, Aiichiro; Yoshida, Jun-ichi: Flow microreactor synthesis in organo-fluorine chemistry. In: Beilstein Journal of Organic Chemistry (2013), S. 2793–2802.
- 579 vgl. Seeberger, P. H.; Blume, T.: New Avenues to Efficient Chemical Synthesis. Springer (2007). ISBN 978-3-540-70848-3.

findet seit 10 Jahren zunehmend Anwendung.<sup>580</sup> Dort werden zeitweise auch Mikroreaktoren eingesetzt, welche im Unterkapitel III.1.1.5 Mikroreaktoren näher betrachtet werden.

Der Bereich der Flow Chemistry bietet einige Vorteile<sup>581</sup>. So ist es möglich, die Reaktionstemperatur weit über den Siedepunkt des Lösemittels zu führen, da das Volumen der Apparatur meist klein ist und eine Druckbeaufschlagung<sup>582</sup> einfach ist. Teure und gefährliche Hochsieder können so durch weniger gefährliche Niedersieder im Hochsiedebereich ersetzt werden. Die Durchmischung kann innerhalb von Millisekunden erreicht werden. Damit ist die Reaktion um einen Faktor 1.000-10.000 schneller als im konventionellen Rührkessel. Durch das große Oberfläche/Volumen-Verhältnis wird der Wärmetransfer intensiviert. Dadurch können endotherme und exotherme Reaktionen kontrolliert werden (konventionell: 10-100 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, ‚mikro‘: 10.000 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>). Der Temperaturgradient kann zudem sehr steil sein, was eine effiziente Kontrolle über die Reaktionszeit erlaubt. Die Anlagensicherheit wird erhöht, da die Volumina klein sind und teilweise intrinsische Sicherheit gegeben ist. Die thermisch wirksame Masse wird von der Anlage dominiert und thermisches Durchgehen wird unwahrscheinlich. Per se sind die kleineren Reaktionsvolumina ein Sicherheitszugewinn. Flussreaktionen können mit viel geringerem Aufwand automatisiert werden. Dies erlaubt es, Experimente zu planen, die nicht beaufsichtigt werden müssen. Dies ist besonders für das Screening (ganzer Molekülbibliotheken) oder die haargenaue Analysen wie in der Kinetik wichtig.

### Industrielle Umsetzung der Flow Chemistry

Eine Vielzahl von Firmen bietet heutzutage vollautomatisierte Flow-Synthesepattformen an (Thales-Nano, Uniqsys, ATM, Syrris, Chemtrix, FutureChemistry, Vaourtec etc.). Flow Chemistry hat massiv dazu beigetragen, dass mittels chemischer Aktivierung in neuen Betriebsfenstern (NPW) eine Reaktionsbeschleunigung erreicht wurde, sodass quasi alle modernen chemischen Synthesen *in Flow* betrieben werden können, d.h. auf einer Zeitskala von wenigen bis ca. 30 Minuten. Momentan sind fast alle großen Chemiefirmen in der Mikroreaktionstechnik und Flow Chemistry aktiv, darunter einige mit spezialisierten Teams (z.B. Bayer, Eli Lilly, DSM, Sigma-Aldrich, Novartis).

### Industrielle Pilot- und Produktions-Prozesse mittels Mikroreaktionstechnik und Flow Chemistry

Im Folgenden werden einige bereits erfolgreich angewandte Beispiele aus Forschung und Industrie präsentiert, um die Bedeutung der Mikroreaktionstechnik und der Flow Chemistry zu erläutern.

Tabelle 21 zeigt beispielhaft einige bereits erfolgreich implementierte Prozesse. Insgesamt wurden bislang mehr als 100 industrielle Prozesse auf Basis der Flow Chemistry und Mikroreaktionstechnik etabliert.

580 vgl. Kirschning, Andreas: Chemistry in flow systems. In: Beilstein Journal of Organic Chemistry (2009); Kirschning, Andreas: Chemistry in flow systems II. In: Beilstein Journal of Organic Chemistry (2011), S. 1046–1047.

581 Ergänzt zu: Pashkova, Aneta; Greiner, Lasse: Towards Small-Scale Continuous Chemical Production: Technology Gaps and Challenges. In: Chemie Ingenieur Technik (2011), S. 1337–1342.

582 Erhöhung des Druckes in der Apparatur.

Tabelle 21: Beispielhafte Prozesse, die bereits industriell Anwendung finden, eigene Darstellung

Prozess	Produkt/Menge	Firma
BuLi-Addition an Keton	Vitamin-H-Intermediat	Merck
Ritter-Reaktion	N-Alkylamide	DSM
Nitrierung von Phenol	Nicht bekannt: Pharmawirkstoffe	Lonza/DSM
Nitrierung von Aromaten	Naproxen, Arthritis-Mittel	DSM/NiOx
Oxidation von Alkoholen zu Ketonen mit Sauerstoff (Ex-Bereich)	Nicht bekannt: Pharmawirkstoffe	Eli Lilly
Ozonisierung	Steroide (Pharma, Onkologie)	Lonza, Bayer-Schering
Newman-Kwart-Umlagerung	Pharmaprodukt	Johnson & Johnson
Fluorierung von Aliphaten und Aromaten mit elementarem Fluor genannt werden (Direktsynthese)	Fluorspezialpolymere (und mehr)	Asahi Glass (mit Durham Uni).
Fluorierung mit $^{18}\text{F}$ zu schwach radioaktiven Substanzen	Radiotracer-Markierung von Tumorerkrankungen	Siemens

## III.1.2 Prozessentwicklung und Prozessintegration

### III.1.2.1 Die 50%-Idee

Für eine Verkürzung der Zeitspanne bis zur Markteinführung spielt die sogenannte 50%-Idee eine wichtige Rolle. Sie beschreibt Ansätze, wie durch einen Paradigmenwechsel mit Methoden, Technologien und Arbeitsweisen die Projektzeit vom Produkt zur Produktionsanlage halbiert werden kann.<sup>583</sup> Im Jahr 2009 wurden dazu auf dem Tutzing Symposium 7 Thesen aufgestellt:

- Sei schnell, denn der Markt wartet nicht.
- Denke und plane in Modulen<sup>584</sup> und Standardlösungen<sup>585</sup>.
- Nutze wiederverwendbare Modelle<sup>586</sup> für Prozesse, Informationen und Arbeitsabläufe.
- Kenne Deinen Einfluss auf Wirtschaftlichkeit und Risiko des Projektes.
- Vermeide Perfektionismus, denn eine Punktlandung kostet Zeit und Geld<sup>587</sup>.
- Vertraue Deinem Kunden/Lieferanten.
- Bringe Kontinuität ins Projekt, von der Entwicklung bis zur Inbetriebnahme.

Es ist z.B. für innovative Produkte wichtig, möglichst schnell mit einer neuen Entwicklung an den Markt zu kommen. So erstreckt sich zwischen Markteinführung eines neuen Produktes und dessen erfolgreicher Kommerzialisierung oft das sogenannte Tal des Todes (valley of death), in dem die kumulierten Verluste sehr groß sind. Dieses ist in Abbildung 57 gezeigt. Prozessintensivierung bietet hier Lösungsansätze, dieses Tal schneller zu durchschreiten. Konkret bedeutet dies einen schnelleren Entwicklungsweg (weniger Kosten, d.h. das Tal ist flacher) und einen schnelleren Marktein-

583 vgl. Schüth, Ferdi: PROCESSNET (Hg.): DIE 50% IDEE – Vom Produkt zur Produktionsanlage in der halben Zeit. (2009).

584 vgl. Brodhagen, Andreas; Grünwald, Marcus; Kleiner, Matthias; Lier, Stefan: Erhöhung der Wirtschaftlichkeit durch beschleunigte Produkt- und Prozessentwicklung mit Hilfe modularer und skalierbarer Apparate. In: Chemie Ingenieur Technik (2012), 5, S. 624–632.

585 vgl. Bramsiepe, C.; Schembecker, G.: Modular process design advantage in terms of planning process that enables laboratory to production with small effort. In: Chemie Ingenieur Technik (2012), 5, S. 581–587.

586 vgl. Hady, Łukasz; Wozny, Günter: Multikriterielle Aspekte der Modularisierung bei der Planung verfahrenstechnischer Anlagen. In: Chemie Ingenieur Technik (2012), 5, S. 597–614.

587 vgl. Rottke, Johannes; Grote, Florian; Fröhlich, Holger; Köster, Dirk; Strube, Jochen: Efficient Engineering by Modularization into Package Units. In: Chemie Ingenieur Technik (2012), S. 885–891.

stieg (früherer und größerer Payback<sup>588</sup>, d.h. das Tal ist schmaler). Beispiele sind im weiteren Verlauf dieses Kapitels aufgeführt.

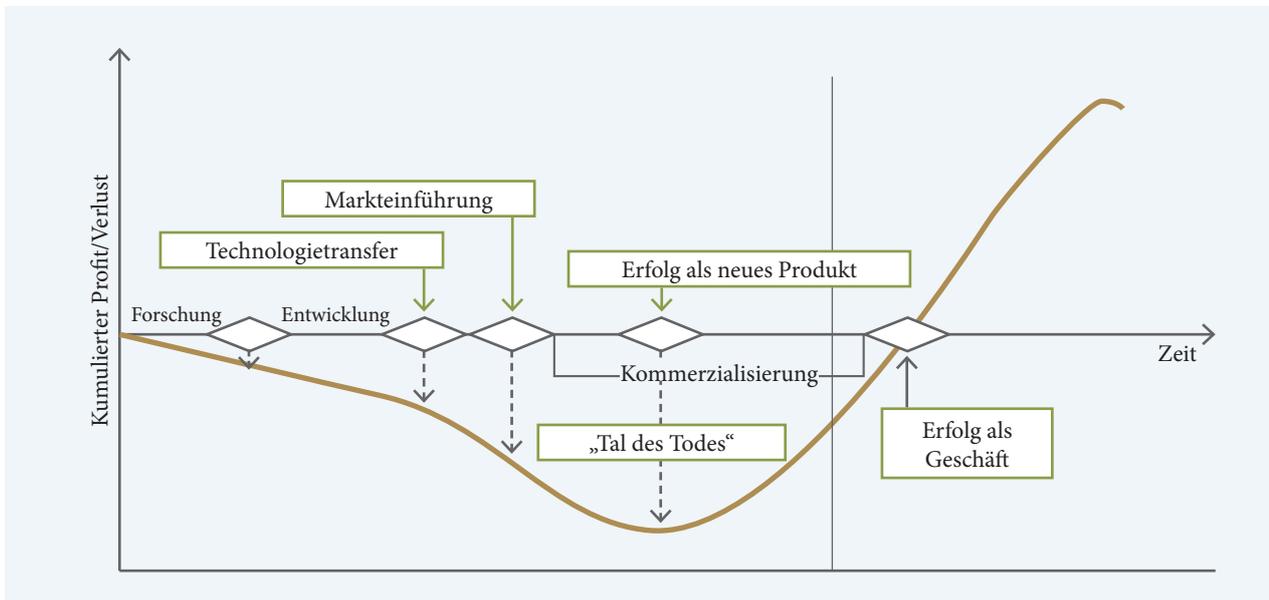


Abbildung 57: „Tal des Todes“<sup>589</sup>

Die Entwicklung chemischer Verfahren hat in den letzten gut 100 Jahren große Fortschritte gemacht. Die Verfahrensweise, wie produziert wird, ist aber in vielen Fällen konzeptionell den Anfängen in der chemischen Industrie noch sehr ähnlich (Rührkessel/Batch). Diese Prozesse sind stark optimiert und laufen meist mit der optimalen Auslastung. Auch die Stoff- und Wärmeintegration ist durch die Verbundstruktur an den Chemiestandorten bereits sehr gut. Letzteres allerdings nur bei den Prozessen, die kontinuierlich geführt werden. Eine Wärmeintegration im Batch-Rührkessel findet kaum statt. Obwohl nahezu perfekt optimiert, hat die Batch-Technologie zudem intrinsische Nachteile aufgrund der ihr zugrunde liegenden großen, trägen Volumina. Dies betrifft so zentrale Aspekte wie die Reaktionszeiten (resultiert in Produktivität), die Kontrolle von Prozessgrößen (resultiert in Selektivität), die Betriebssicherheit (resultiert in Kapitalkosten) und die Flexibilität bei Chargenwechsel (resultiert in Auslastung und Fähigkeit zur Marktausrichtung).

Die Intensivierung von chemischen Verfahren und die flexible Kapazitätsanpassung in der Mikroreaktionstechnik (z.B. durch Parallelisierung) kann aus oben genannten Gründen die Energie- und Rohstoffeffizienz noch weiter erhöhen. Dies ist sowohl für großvolumige Bulkchemikalien und auch Feinchemikalien wichtig. Maßgeschneiderte Produkte (vgl. Rohstoffkapitel) der Spezial- und Lohnherstellungs-Pharmaindustrie müssen dagegen den Markt vor allem schnell erreichen.

### III.1.2.2 Technologiekonzepte

#### Future Factories – Fabriken der Zukunft

Prozessintensivierung und die darauf aufbauenden sogenannten Future Factories haben durch die EU-Förderung im 7. Rahmenprogramm und gegenwärtig durch das SPIRE-Programm im Rahmen von HORIZON.2020 einen starken Schub erhalten. Prozessintensivierung vereinigt sich hier, wie

588 Rückzahlung.

589 Verändert nach: Zwilling, Martin: Grafik Valley of Death unter: <http://blogs-images.forbes.com/martinzwilling/files/2013/02/valley-of-death.jpg> (2013). Online am 07.07.2014, bzw. Originalpaper: Osawa, Yoshitaka; Miyazaki, Kumiko: An empirical analysis of the valley of death: Large scale R&D project performance in a Japanese diversified company. In: Asian Journal of Technology Innovation (2006), 2, S. 93–116.

bereits gesagt, mit moderner Katalysatorforschung, Mikroreaktionstechnik/Flow Chemistry, Prozessintegration und moderner Modellierung („in silico“) zu modernen Produktionsplattformen der chemischen Industrie, die sich zumeist durch Modularisierung hierarchisch aufbauen.

Die die EU beratende High Level Group (on competitiveness of the European chemicals industry) stellte schon 2009 in ihrem Abschlussbericht mit dem Titel „European Chemical Industry, Enabler of a Sustainable Future, European Communities“ folgendes fest:

„In den nächsten 20 Jahren werden diese Prozesse substantielle Veränderungen durchlaufen. Dies erfolgt aufgrund des intelligenten Designs der synthetischen Route selbst, der Mikroprozessertechnologie, Integration und Intensivierung von Prozessen kombiniert mit neuen Katalysatorkonzepten und der Entwicklung von *in silico* Technologien“.<sup>590</sup>

Man braucht also alles zugleich und damit holistisch eingebettet – Mikroreaktoren, Katalysatoren, Synthesechemie, Prozessintegration und modernste Simulationstechniken.

Solche Containeranlagen sind im Betrieb z.B. bei Bayer (INVITE, Leverkusen)<sup>591</sup>, Evonik (Marl, Rheinfelden, Hanau)<sup>592</sup> und der BASF (Ludwigshafen). Die Container verkörpern den alten Wunsch einer verteilten Produktion. Diese ist nicht nur für die Chemie sondern auch für die Biobased Economy (Biofuels) geeignet (Farm Factory). Anfänglich sprach die EU gerne von ihren Future Factories; Lonza präsentierte vor kurzem die Factory of Tomorrow<sup>593, 594</sup>.

Dieser Begriff gilt aber mittlerweile für die gesamte europäische Industrieproduktion und wird gerne sinnbildlich für die entsprechende EU-Förderung so unterschiedlicher Industrien wie Textilien, Stahlerzeugung und Computerindustrie gebraucht. Für die Chemie spricht man nunmehr eher vom Future Chemical Manufacturing. Bei den Fabriken der Zukunft werden im Folgenden zwei unterschiedliche parallel entwickelte Ansätze vorgestellt.

Zum einen F<sup>3</sup>-Factory – fast•flexible•future<sup>595</sup> und zum anderen der „EvoTrainer“. Beide wurden in zwei großen (F<sup>3</sup>-FACTORY und COPIRIDE) und mehreren Satellit-Projekten (PILLS, SYNFLOW, POLYCAT) zwischen Akademia und Industrie mit Unterstützung des 7. Rahmenprogramms der EU entwickelt.

---

590 High Level Group on the Competitiveness of the European Chemicals Industry (Hg.): Report of the Ad Hoc Group on Research, Innovation and Human Resources. (2009).

591 vgl. Krasberg, Nicolai; Hohmann, Lukas; Bieringer, Thomas; Bramsiepe, Christian; Kockmann, Norbert: Selection of Technical Reactor Equipment for Modular, Continuous Small-Scale Plants. In: Processes (2014), 1, S. 265–292.

592 vgl. Gürsel, Iris Vural; Hessel, Volker; Wang, Qi; Noël, Timothy; Lang, Jürgen: Window of opportunity – potential of increase in profitability using modular compact plants and micro-reactor based flow processing. In: Green Processing and Synthesis (2012), 4.

593 vgl. Lonza Group Ltd.: Factory of Tomorrow (08.02.2012).

594 vgl. ebd.

595 vgl. Bieringer, T.; Buchholz, S.; Kockmann, N.: Future Production Concepts in the Chemical Industry: Modular – Small-Scale – Continuous. In: Chemical Engineering & Technology (2013), 6, S. 900–910.

### F<sup>3</sup>-Factory

F<sup>3</sup>-Factory<sup>596</sup> war ein mit 18 Mio. Euro von der EU gefördertes Forschungsprojekt (7. Rahmenprogramm der EU), um die europäische chemische Industrie in ihrer Vorreiterrolle zu stärken (2009-2013). Ziel war die Entwicklung schnellerer und flexiblerer Produktionsmethoden. Insgesamt (d.h. zusammen mit den Eigenmitteln) hatte das Projekt einen Etat von 30 Mio. Euro.<sup>597</sup>

Der Fokus lag dabei immer auf der Herstellung einer modularen Fabrik (Future Factory). Zum einen sollten modulare chemische Produktionssysteme geschaffen werden, die universell und flexibel in der chemischen Industrie eingesetzt werden können. Dazu sollte die Einführung gemeinsamer Methoden, Strategien und Definitionen von Standards vorwettbewerblich von der Prozessindustrie zusammen entwickelt werden. Zum anderen sollte ein holistisches Prozessdesign geschaffen werden, welches Prozessintensivierungskonzepte und innovative Entscheidungswerkzeuge liefert. So sollten auch neue Rohstoffe oder alternative Energien eingesetzt werden, die normalerweise 70-80% der Kosten ausmachen.

Dazu wurde zunächst die „backbone plant“, also das Rückgrat der Anlage, als modulare kontinuierliche Anlage in Leverkusen entworfen. Diese steht in der außeruniversitären Forschungseinrichtung INVITE GmbH<sup>598</sup>, einem Joint Venture der Bayer Technology Services GmbH und der Technischen Universität Dortmund. Des Weiteren wurden Prozessequipment und Verfahrensoptionen standardisiert. Dazu war die Entwicklung neuer Methoden nötig. Am Ende des Projektes wurden die Fähigkeiten der F<sup>3</sup>-Factory anhand von sieben Fallbeispielen demonstriert. Abbildung 58 zeigt den schematischen Aufbau des Containers.

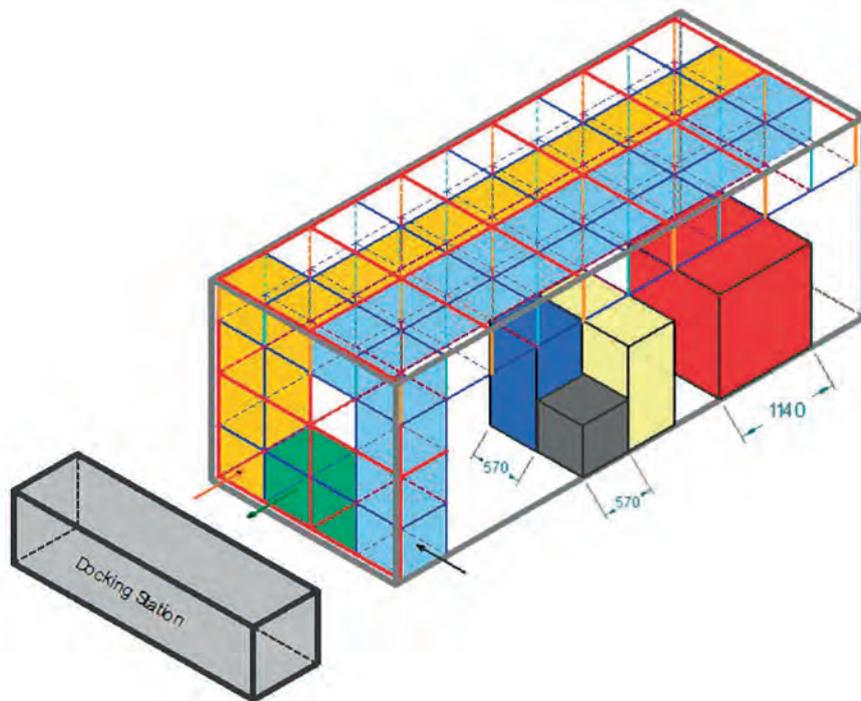


Abbildung 58: schematischer Aufbau des F<sup>3</sup>-Containers<sup>599</sup>

596 vgl. Ferlin, Patrick; Schwede, Christian: Bayer Technology Services GmbH (Hg.): F<sup>3</sup> Factory – Fast, flexible, modular production technology provides platform for future European growth. (2013).

597 vgl. ebd.

598 vgl. INVITE GmbH: Forschungszentrum INVITE – Einladung in die Zukunft unter: [http://www.invite-research.com/fileadmin/user\\_upload/dokumente/DE\\_Einladung-in-die-Zukunft.pdf](http://www.invite-research.com/fileadmin/user_upload/dokumente/DE_Einladung-in-die-Zukunft.pdf) (2012). Online am 07.07.2014.

599 vgl. Ferlin, Patrick; Schwede, Christian: Bayer Technology Services GmbH (Hg.): (2013).

Die Grundidee des F<sup>3</sup>-Containers besteht im modularen Aufbau und der dadurch gegebenen Flexibilität. Die Grundfläche des F<sup>3</sup>-Containers lässt sich in viele gleich große Quadranten unterteilen. Die einzubauenden Module entsprechen in ihrer Stellfläche einem oder mehreren Quadranten. Die so geschaffene Modularität erlaubt es, die technische Ausstattung des Containers spezifisch an die jeweiligen Anforderungen anzupassen und im Fall von Austausch oder Wartung einzelne Module redundant vorzuhalten und zeitsparend zu ersetzen.

So ausgestattete Container können solitär oder bei Bedarf parallel ortsungebunden die Produktion aufnehmen. Sie benötigen hierzu eine Einbindung in das Energie- und Rohstoffnetz. Dies wird durch den Anschluss an eine sogenannte Docking Station gewährleistet. Ebenso wie die technische Ausstattung der Module im Inneren des Containers ist auch die Docking Station standardisiert und kann somit jeden beliebigen F<sup>3</sup>-Container aufnehmen (vgl. Abbildung 59).



Abbildung 59: F<sup>3</sup>-Container<sup>600</sup>

Ein derart aufgebautes System ermöglicht eine schnelle Aufnahme der Produktion durch Verkürzung der Genehmigungszeiten, da die Module an sich beim Aufbau einer neuen Produktion bereits zugelassen sind und lediglich neu kombiniert werden.

### COPIRIDE – EvoTrainer

Auch der EvoTrainer ist aus einem durch die Europäische Union geförderten Projekt entstanden. Unter dem Namen COPIRIDE (Combining Process Intensification-driven Manufacture of Microstructured Reactors and Process Design regarding to Industrial Dimensions and Environment) wurde im Team von 16 Vertretern aus Industrieunternehmen, Forschung und Lehre an einem zukunftsfähigen Konzept für eine flexible und modulare Chemieproduktion am Standort Europa geforscht (Fördersumme: 11 Mio. Euro; 7. Rahmenprogramm der EU; 2009-2013; Projektvolumen: 17 Mio. Euro).<sup>601</sup> Ein Ergebnis aus dieser Forschungsinitiative ist der EvoTrainer, eine kabinettartig, standardisiert aufgebaute Produktionsanlage, die in einen Überseecontainer verbaut ist.

600 vgl. ebd.

601 vgl. ebd..



Abbildung 60: Bilder des EvoTrainers<sup>602</sup>

Die Besonderheit dieses Containers ist die Standardisierung der Prozesskontroll- und -sicherheitstechnik. Jeder Container stellt – anders als die F<sup>3</sup>-Container – eine eigene autarke Fabrik dar, die keine Docking Station braucht und an variablen Orten betrieben werden kann. Die Reaktor- und Separationsmodule sind nicht Teil des EvoTrainers. Er ist eine Produktionsplattform, in der eben diese Module austauschbar sind. Er arbeitet mit für den Zweck spezialisierten Modulen (dedizierte Anlage), während der F<sup>3</sup>-Container mit modularen Bausteinen arbeitet, die für eine Vielzahl von Prozessen Anwendung finden soll (Mehrzweckanlage). So ist es möglich, unterschiedliche Produktionen in einem solchen standardisierten Container unterzubringen und bei Bedarf auszutauschen.

Hauptzweck dieser Anlagen ist auch hier, neue Produkte schnell und relativ risikoarm auf den Markt zu bringen, um so Europa bzw. den hier ansässigen Unternehmen Wettbewerbsvorteile gegenüber den schnell wachsenden weltweiten Märkten zu verschaffen.

Voranehend wurde bereits auf das Tal des Todes und Time-to-Market eingegangen. Der EvoTrainer bietet Unternehmen den Vorteil, die Produktion aus dem Labormaßstab ohne Umwege in einen Pilotmaßstab zu übertragen. Die Anlage kann in kürzester Zeit vor Ort den Betrieb aufnehmen und somit das Produkt herstellen, bis ggf. eine spätere Großanlage errichtet ist. Durch parallele Schaltung mehrerer EvoTrainer ist zudem eine Aufstockung der Produktionsmengen problemlos möglich.

Die mittlerweile vierte Generation des EvoTrainers ist viel mehr als eine simple Produktionsanlage im Container; er verfügt über eine eigene Belüftung, Absaugung, Stromversorgung, Löscheinrichtung und vieles mehr. Die Wände sind – anders als bei normalen Containern – aufwändig verarbeitet, damit sie den chemischen Produktionsregelungen und dem Explosionsschutz gerecht werden. Hierdurch eignet er sich auch besonders für den autarken Einsatz am Abnahmeort der Produkte und einen unkomplizierten Transport.

602 Bilder mit freundlicher Genehmigung durch Jürgen Lang, Evonik Industries AG.

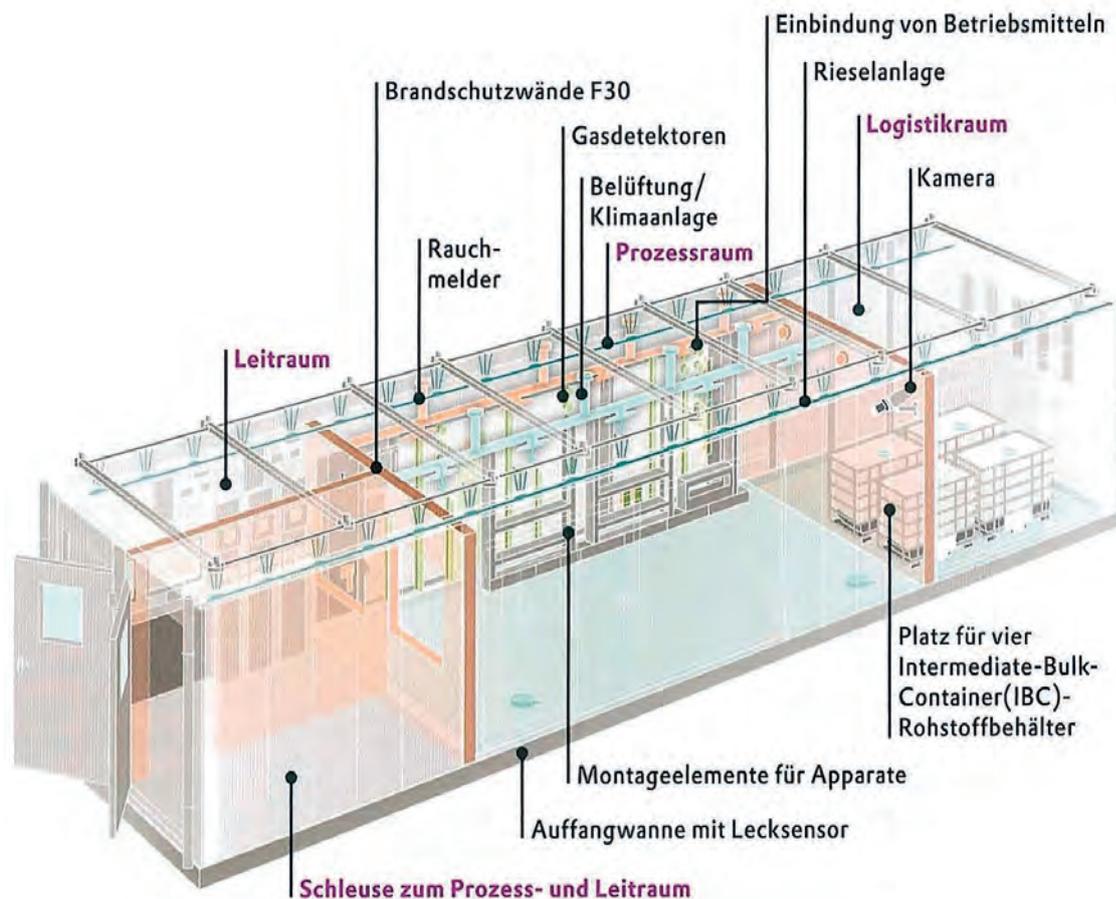


Abbildung 61: EvoTrainer schematisch<sup>603</sup>

Sollte sich die Produktion eines bestimmten Produktes als nicht rentabel erweisen oder der EvoTrainer durch die nachfolgende Großanlage abgelöst sein, lassen sich einzelne Einbauten zurückbauen und durch andere ersetzen, so dass der kostengünstige Einsatz für weitere bzw. neue Produktionen möglich sind. Durch diese Modularität und die schnelle Produktionsaufnahme ist der EvoTrainer aus unternehmerischer Sicht sehr interessant, da die Einstiegskosten für ein neues Produkt gering, die Time-to-Market kurz und das finanzielle Risiko überschaubar sind. Es ist zu hoffen, dass hierdurch mehr Innovationen den Weg in die Produktion finden und deutsche bzw. europäische Unternehmen ihre Position stärken können.

Mittlerweile wurde im EU-Projekt POLYCAT eine GMP-Version<sup>604</sup> des EvoTrainers für eine Sanofi-Pharmaproduktion (asymmetrische Hydrierung) entwickelt, die die entsprechenden Einrichtungen für eine Reinraumproduktion beinhaltet. Kennzeichnend sind Absaugeinrichtungen für eine eingebaute Reinraumzelle, eine Prozessboxventilation und Spezialzugangstüren, wie sie für einen Reinraum typisch sind.

603 Evonik Industries AG: Der EvoTrainer unter: <http://www.aerosil.com/sites/dc/Downloadcenter/Evonik/Global/de/Magazine/elements/elements-37.pdf> (2012). Online am 28.10.2014.

604 GMP = Good manufacturing practice = Richtlinie zur Qualitätssicherung.

## Zusammenfassung

COPIRIDE und F<sup>3</sup>-Factory werden von der Europäischen Union als Erfolgsgeschichten für die chemische Industrie gewertet. So wird den beiden Projekten das Potenzial zugesprochen, die chemische Industrie mit einem dringend notwendigen Wettbewerbsschub zu versorgen.<sup>605</sup> Die Kommission bezeichnet die Ergebnisse als fesselnde Möglichkeiten den Time-to-Market auf bis zu 50% zu verkürzen und die Investitions- und Betriebskosten um 20% bzw. 40% zu reduzieren. Dies kann die Effizienz verschiedener Prozessschritte um mehrere Größenordnungen verbessern.<sup>606</sup>

## III.1.3 Annahmen

### III.1.3.1 Allgemeiner Bedarf an Prozessintensivierungsmaßnahmen

Durch die angenommene Ressourcenknappheit steigt der Bedarf an Technologien, die in der Lage sind, mit Ressourcen effizient umzugehen. Gleichzeitig wird nach Technologien verlangt werden, die mit einer diversifizierten Rohstoffbasis umzugehen vermögen. Prozessintensivierung kann hier einen Wertbeitrag zum Gelingen dieser Umstellung leisten. Unterstrichen wird diese Entwicklung durch die Verlagerung der Bulkchemie in Regionen mit günstigen Rohstoffen.

Gerade aus diesem Grund in Verbindung mit zunehmendem internationalem Wettbewerb wird es für Deutschland bzw. NRW in Zukunft von großer Bedeutung sein, zum einen wirtschaftliche Produktionsverfahren zu entwickeln und andererseits im Wettbewerb neuester Technologie die Technologieführerschaft zu verteidigen. Dies schließt den Wandel weg von Basischemikalien – hin zu Spezialitäten ein.

Im Folgenden wird auf die Erwartungen in Bezug auf die Relevanz für NRW und den daraus vermutlich resultierenden Forschungsbedarf eingegangen.

### III.1.3.2 Relevanz für NRW

Nordrhein-Westfalen zeichnet sich durch seine große Dichte an chemischer und pharmazeutischer Industrie aus, welche durch eine gewachsene Verbundstruktur intelligent miteinander vernetzt ist.

Durch die Anwendung der Prozessintensivierung eröffnet sich ein größeres Spektrum an chemischen Synthesemöglichkeiten und Prozesstechniken. Diese bieten insbesondere für das Finden innovativer Wirkstoffe bzw. Spezialchemikalien neue Möglichkeiten. Existenziell ist dieses z.B. für Spezialchemie mit Hochleistungsmaterialien. In NRW ansässige Firmen wie Evonik oder Bayer betreiben daher seit Jahren intensive Forschung auf diesem Thema und haben dafür eigene Projekthäuser und Forschungseinrichtungen installiert.

Hinzu kommen zahlreiche Firmen, die im Bereich Anlagenbau, Automatisierung (z.B. ThyssenKrupp-Uhde) und Prozessleittechnik beheimatet sind, welche die Chemiefirmen in der Entwicklung neuer Verfahren und Anlagen unterstützen. Die gesamte Wertschöpfungskette wird somit abgebildet. Auch im Wissensverbund bestehen langjährige Partnerschaften zwischen Industrie und Lehre. Zu nennen sind hier vor allem die RWTH Aachen und die TU Dortmund, die in der Prozessintensivierung und Mikroreaktortechnik aktiv sind.

605 vgl. European Commission: Modular, flexible, sustainable: the future of chemical manufacturing unter: <http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/news/modular-flexible-sustainable-future-chemical-manufacturing> (2014). Online am 10.10.2014.

606 vgl. edie newsroom: Future chemical plants could halve environmental footprint of processes unter: <http://www.edie.net/news/6/Future-chemical-plants-could-halve-environmental-footprint-of-processes/25669/> (2013). Online am 09.10.2014.

### III.1.3.3 Forschungsbedarf und Ausblick

Wie oben bereits erwähnt, ist es trotz der bestehenden Initiativen von entscheidender Bedeutung, mit der Forschung am Puls der Zeit zu bleiben. Wie im Ist-Zustand beschrieben, sind solitäre Plug-in-Verfahren bereits weit entwickelt, wenngleich hier noch viele Forschungsanstrengungen nötig sind. Die Entwicklung an sich ist für viele NRW-Chemieprozesse relevant. Der Mehrfach-Plug-in-Ansatz hingegen braucht noch vielfältige Forschungsanstrengungen und steht erst am Anfang. Die hierfür notwendige Entwicklung von Separationseinheiten ist aktuell von der TU Dortmund und Bayer begonnen worden. Ergebnisse in diesem Bereich können insbesondere für den Pharmabereich und spezielle Chemieprozesse in NRW relevant sein, um so der Konkurrenz von z.B. MIT-Novartis entgegen zu halten. Diese Integration solcher mehrfach verschalteter Einheiten ist von der EU als Zukunftsthema erkannt und wird durch Forschungsprogramme wie SPIRE-5 unterstützt.

Neuartige Ende-zu-Ende-Konzepte sind weitestgehend im Konzeptstadium und bestehen bislang aus theoretischen Betrachtungen, die zukünftig auf eine Umsetzung warten. Alternativen bspw. zum Haber-Bosch-Verfahren mit Niedertemperatur-Plasmaanlagen werden von Evonik im EU-MA-PSYN-Projekt erforscht. Das genaue Potenzial ist noch nicht absehbar, wird jedoch bei erfolgreicher Umsetzung als sehr hoch eingeschätzt.

Alle hier genannten Anstrengungen zielen auf Systemverbesserungen in Gesamtprozessen ab. Diese sind durch große und langwierige firmen- und institutsübergreifende Aktivitäten zu erreichen. Diese großen Schritte bedürfen jedoch Forschungsanstrengungen in Details.

Zum Beispiel ist eine verstärkte Automatisierung zur Vereinfachung des Scale-up mit einer integrierten Diagnostik-Analytik zur besseren Kontrolle des Prozesses und einhergehender Intensivierung und Konti-Fahrweise der nachgelagerten Aufarbeitung (Downstream processing) nötig. Dieses führt bei punktueller Betrachtung bereits zu positiven Effekten; in holistischer Systemsicht werden weitere Potenziale ausgeschöpft.

In NRW an den chemischen Instituten wird trotz der hohen Wichtigkeit des Themas zurzeit wenig Flow Chemistry betrieben. Nur die Gruppe Leitner an der RWTH Aachen ist hier aktuell aktiv. Weitere Forschungsinitiativen sind aufgrund der Wichtigkeit wünschenswert. Dies beschreiben auch Baxendale et al. in ihrer Veröffentlichung von 2013: „Der komplette Werkzeugkasten Flow Chemistry“ stellt noch einen Traum für Chemiker dar, der signifikant notwendige Prozess zur Entwicklung wurde jedoch angestoßen.“<sup>607</sup>

## III.1.4 Optionen

### Option C.1: Intensivierung bestehender Produktionsprozesse

#### Beschreibung

Zur Intensivierung bestehender Produktionsschritte gibt es verschiedene und vielfältige Herangehensweisen. Schon mit vergleichbar minimaler Änderung kann viel erreicht werden, wie die zahlreichen Beispiele für den Austausch eines konventionellen Reaktors gegen einen Mikroreaktor zeigen (sogenanntes Drop-in-Konzept oder Retrofit). Die Wirkungen betreffen alle für chemische Prozesse relevanten ökologischen und ökonomischen Größen, vom Ersatz einzelner Komponenten über den Austausch mehrerer Prozessschritte durch kontinuierliche intensivierte Verfahren (Mehrfach-Drop-in), bis hin zur Komplettänderung, den so genannten Ende-zu-Ende-Konzepten, die eine grund-

607 vgl. Baxendale, Ian R.; Brocken, Laurens; Mallia, Carl J.: Flow chemistry approaches directed at improving chemical synthesis. In: Green Processing and Synthesis (2013), 3.

legend andere (und nicht nur bessere) Verfahrenstechnik erlauben. Die Kompaktheit der intensivierten Module erlaubt eine Integration von Prozesseinheiten ineinander, ähnlich wie bei einem Mikroprozessor und letztlich auch hin zur Kompartimentierung in der Zelle. Dies sollte mit einer vergleichbaren Leistungssteigerung einhergehen. Mit den Mehrfach-Plug-in- und den Ende-zu-Ende-Techniken werden insbesondere Direktsynthesen oder Multistufenverfahren untersucht<sup>608</sup>. Ziel ist hier letztlich, einen Teil einer vernetzten Produktion in einer Einheit (System) durchzuführen und so in einem Schritt oder einer Kaskade von Schritten komplexe Moleküle effizient und schnell herzustellen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Prozessintensivierung tiefgreifende Wirkung haben kann, Chemie besser und anders zu machen. Zeitgleich bietet die Maßstabsvergrößerung durch Parallelisieren identischer Prozesseinheiten einen schnellen Entwicklungsweg aus dem Labor zur Produktion. Die Anwendung solcher Technologien im ortsunabhängigen Technologiekonzept wird in Option C.2 näher betrachtet.

### **Begründung**

Wie in den Annahmen beschrieben, sieht sich die Chemie neuen Herausforderungen gegenübergestellt. Deshalb wird es in Zukunft von steigender Bedeutung sein, mit Ressourcen effizient umzugehen und durch wirtschaftliche Produktionsverfahren den Standort NRW innovativ und wettbewerbsfähig zu halten und dadurch nachhaltig zu sichern. Ein schneller Markteintritt ist vielfach essentiell. Die Intensivierung chemischer Verfahren bietet hierzu eine Möglichkeit.

### **Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte**

#### **Ökologie**

##### *Ressourcenschonung und Emissionsminderung*

Wie bereits im Ist-Teil beschrieben, lassen sich durch den Einsatz intensivierter chemischer Verfahren die Edukte sowie der Einsatz von Lösungsmitteln effizienter steuern. Hierdurch wird der Anfall von Schadstoffen reduziert, Rohstoffbasen werden geschont und Wertstoffe mit maximaler Effizienz weiter verarbeitet.

#### **Ökonomie**

Alle im Ist-Zustand genannten Potenziale können massive Einsparungen (30% und mehr) in den operativen Kosten (OPEX) (Rohstoffe, Abfallbeseitigung, Arbeitskosten und Energie) nach sich ziehen. Oft stehen diesen Einsparungen höhere Kapitalkosten (CAPEX) gegenüber. Dies trifft besonders bei kostengünstigen Kleinanlagen der Spezialchemie und Pharmazie zu. Für größere Produktionen hingegen können auch die CAPEX-Kosten der Prozessintensivierung bzw. Mikroreaktionstechnik niedriger ausfallen, da die Folgewirkungen des Reaktortausches massiver ins Gewicht fallen und so die CAPEX-Kosten insgesamt höher ausfallen.

Die im Ist-Zustand genannten Anforderungen an die Mikroreaktionstechnik sind zur heutigen Zeit noch eine Einstiegshürde für ihren breiten Einsatz. Die Technologie ist anfänglich kostenintensiv – durch die teurere, zusätzliche Laborausstattung und noch mehr durch die langen Vorarbeiten, um damit vertraut zu werden (Umrüst- und Umstellungskosten). Deshalb beschränkt sich der Einsatz von Mikroreaktionstechnik derzeit vorrangig auf den Bereich der hochpreisigen bzw. hochwertigen Spezialchemikalien und Pharmaka.

---

608 Direktsynthese: komplexes Molekül in einem Schritt anstelle vieler (bisher); Mehrstufensynthese: komplexes Molekül in vielen Schritten in einer Anlagen anstelle von noch viel mehr Schritten in vielen Anlagen (bisher).

### *Innovation und Wettbewerbsfähigkeit*

Durch den gezielten Einsatz von Prozessintensivierung bieten sich der in NRW ansässigen chemischen Industrie vielfältige Möglichkeiten der Sicherung und Ausbau von Wettbewerbsvorteilen.

### **Soziales**

#### *Beschäftigung*

Eine Sicherung bestehender Arbeitsplätze kann durch eine verbesserte Wettbewerbssituation erreicht werden. Heimische Anlagen können so profitabel bleiben und im Wettbewerb bestehen. Selbst der Neubau von Anlagen außerhalb Deutschlands und NRWs (z.B. in Nahost und China) kann durch die Vorfertigung und Vorentwicklung in NRW beheimateter Firmen begleitet werden. Indirekt profitiert die chemische Industrie in NRW hierdurch noch vom starken Wachstum dieser Regionen.

Insgesamt ist ein Zuwachs an systemimmanenter Sicherheit zu erwarten, obwohl bestehende Produktionsanlagen (u.a. da geschlossene Systeme) schon jetzt als sehr sicher einzustufen sind, wie die Unfallstatistiken belegen. Der Einsatz bestimmter gefährlicher Stoffe und resultierender Reaktionen wird durch die neuen Technologien überhaupt erst möglich, sodass mehr chemische Prozesse sicher betrieben werden können.

#### *Bildung*

Für einen gezielten und zukünftig flächendeckenden Einsatz von Prozessintensivierung sind auch weiterhin weitere Forschungsanstrengungen notwendig. Zudem erfordert die Mikroreaktionstechnik eine die Technologie- und Wissenschaft grenzüberschreitende, spezielle Expertise, die Absolventen typischer Studiengänge kaum mitbringen. Zusätzliche Entwicklungen sind oft erforderlich für eine solche ganz neuartige Technik.

Eine Herausforderung des Einsatzes von Mikroreaktoren ist zudem die generelle Einstellung gegenüber einer neuen Technologie, besonders da diese stark disziplinübergreifend und wissensbasiert agiert. Eine spezielle Ausbildung und Kompetenzen werden deshalb ebenso vorausgesetzt, wie die Bereitschaft die Technologie auch anzuwenden und in interdisziplinären Teams zu arbeiten. Damit ist die Akzeptanz der Technologie auch von der Generation des Anwenders abhängig, da jüngere Ingenieure und Chemiker vermehrt auch in dieser Technologie ausgebildet werden.

## **Option C.2: Verwendung von modularer Produktion (Future Factories)**

### **Beschreibung**

Durch die Modularisierung und Mobilisierung chemischer Produktion durch die Intensivierung chemischer Prozesse erwartet man allgemein, sowohl die Vorlaufzeit zur Marktreife (Time-to-Market) zu verkürzen, als auch durch Autarkie der Anlage dezentral oder direkt am Absatzmarkt zu produzieren.

### **Begründung**

Durch den absehbaren Wandel in der weltweiten Produktionslandschaft bieten Future Factories (FF) die Möglichkeit, sich schnell und effizient an die Bedürfnisse des Marktes anzupassen. Dieses bietet in einem sich schnell verändernden Marktumfeld optimale Voraussetzungen für eine nachhaltige Sicherung der Produktion insbesondere für kleinmargige, aber sehr teure Spezialchemikalien in NRW.

## Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte

### Ökologie

#### *Ressourcenschonung und Emissionsminderung*

Die modulare Produktion ermöglicht eine ressourcen- und energieeffizientere Produktion. Durch die Möglichkeit dezentral direkt am Absatzort zu produzieren, lassen sich logistische Aufwendungen in der Prozesskette minimieren. Emissionen durch Weitertransport der Produkte bzw. Edukte lassen sich so verringern. Im Falle einer Produktionsänderung lassen sich die Grundbausteine der Future Factories wiederverwenden, was zu deutlichen Einsparungen an Energie und Materialeinsatz führen kann.

### Ökonomie

#### *Wettbewerbsfähigkeit und Innovation*

Durch vorgefertigte und zugelassene Module verkürzen Future Factories die Zeit vom Labor zum Markt erheblich. Der so gewonnene zeitliche Vorsprung kann entscheidend für den Erfolg am Markt sein. Viele Ideen oder innovative Produktionskonzepte gelangen nicht zum kommerziellen Einsatz und werden aufgrund hoher wirtschaftlicher Einstiegshürden bereits im Labormaßstab verworfen. Durch das geringere Einstiegskapitalrisiko und die Wiederverwertbarkeit großer Teile der Future Factories können so auch innovative Ansätze erprobt und einfacher zur kommerziellen Anwendung gebracht werden. Ein Zusammenbau vor Ort (oft fern ab von NRW) wird auf das Notwendigste reduziert. Die Anlagen werden vor Verschiffung in weiten Teilen schon vormontiert und profitieren von einer Kleinserienfertigung.

### Soziales

#### *Beschäftigung*

Durch einen verstärkten Einsatz der Future Factories ist es denkbar, dass es im Bereich des Anlagenbaus zur Schaffung neuer Arbeitsplätze kommen kann. Im Betrieb der Anlagen ist durch eine hohe Automatisierung eher mit keinem bis geringem Zuwachs an Arbeitsplätzen zu rechnen. Der Bau modularer Anlagen hat Chancen, hier in NRW und Deutschland vor Ort zu bleiben. Durch Verschiffung und den schnellen Zusammenbau weltweit können neue Arbeitsplätze geschaffen werden.

#### *Bildung*

Für einen gezielten und zukünftig flächendeckenden Einsatz von Prozessintensivierung sind auch weiterhin weitere Forschungsanstrengungen erforderlich. Diese erfordern ein hohes Maß an Ausbildung und Prozessverständnis. Die in diesem Kapitel vorgestellten Verfahren folgen im besonderen Maß den Megatrends Konvergenz der Technologien und Wissensbasierte Gesellschaft. Damit ziehen sie auch neue Trainingsmaßnahmen (interdisziplinäre Teams) und insgesamt ein quasi neues Wissen mit sich – gekennzeichnet durch Systemkomplexität. Ein konsequenter Ansatz kann hier jahrelang einen weltweiten Vorsprung bedeuten.

## III.1.5 Bewertung

### **Option C.1: Intensivierung bestehender Produktionsprozesse**

Prozessintensivierung bezeichnet eine radikale Neugestaltung sowohl der Herstellungsprozesse als auch der verwendeten Anlagen und Hilfsmittel, um eine Reaktion unter idealen Bedingungen ablaufen zu lassen. Die Prozessintensivierung identifiziert dazu experimentell die idealen Reaktionsbedingungen und realisiert diese durch ein entsprechendes neues Reaktordesign. Hierzu nutzt sie die Mikroreaktionstechnik als verfahrenstechnisch-apparativen Ansatz sowie die Flow Chemistry

aus dem Bereich der Synthesechemie. Auf diese Weise wird die kontinuierliche Betriebsweise<sup>609</sup>, die Stand der Technik bei einfachen, großskaligen Prozessen ist, auf einen kleineren Maßstab und komplexere Herstellprozesse übertragbar.

Weitere wichtige Bausteine der Prozessintensivierung stellen innovative Katalysatoren, die Nutzung alternativer Arten der Energieeinbringung (z.B. Mikrowellen und Plasma) und die Prozessintegration dar. Letztere versucht, möglichst viele Prozessfunktionen (z.B. verschiedene Syntheseschritte und die Aufreinigung) auf möglichst kleinem Raum parallel ablaufen zu lassen.

### Ökologie

Eine bessere Kontrolle des Reaktionsablaufs ermöglicht einen effizienteren Ressourceneinsatz, weil die Bildung von Nebenprodukten und die Einsatzmenge an Rohstoffen und Betriebsmitteln (z.B. Lösungsmitteln und Katalysatoren) minimiert werden können. Die Prozessintensivierung stellt somit eine Schlüsseltechnologie im Hinblick auf Ressourcen- und Energieeffizienz dar.

### Ökonomie

Die Prozessintensivierung kann dazu beitragen, bestehende Standortnachteile wie hohe Energie- und Rohstoffkosten zumindest teilweise zu kompensieren und so die Wettbewerbsfähigkeit der chemischen Industrie in NRW zu stärken. Dies gilt in besonderem Maße für die Fein- und Spezialchemie sowie die pharmazeutische Industrie, Chemiesparten mit hoher und wachsender Bedeutung für NRW. Die Übertragung der kontinuierlichen Fahrweise stellt jedoch für mehrstufige Prozesse, wie sie gerade in der Spezialchemie und pharmazeutischen Herstellung typisch sind, eine große technische Herausforderung dar. Dabei stehen prozessintensivierte Anlagen oft in Konkurrenz zu bestehenden, stark optimierten und abgeschriebenen Anlagen. Es ist zu erwarten, dass die Prozessintensivierung zuerst bei Neuanlagen Anwendung finden wird. Für einen Einsatz kleinskaliger Conti-Verfahren im technischen Maßstab müssen zudem noch standardisierte und robuste Apparate entwickelt werden. Gelingt es in kleinskaligen Conti-Verfahren auch Feststoffe zu handhaben, erweitert sich das Potenzial der Prozessintensivierung erheblich. Eine Hürde für die Verbreitung prozessintensivierter Technologie ist, dass diese sowie ihre technischen und ökologischen Vorteile in der chemischen Industrie und dem Anlagenbau noch zu wenig bekannt sind.

### Soziales

Durch eine verbesserte Wettbewerbsfähigkeit wichtiger Chemiesparten in NRW können hochqualifizierte und gut bezahlte Arbeitsplätze gesichert werden.

### Zusammenfassung

Die Prozessintensivierung eröffnet neue Prozessfenster und sollte für die Beurteilung alter Prozesse eine maßgebliche Rolle spielen. So können durch eine ganzheitliche Neubetrachtung etablierter chemischer Verfahren Effizienzpotenziale bestehender Prozessrouten nutzbar gemacht werden. Die Prozessintensivierung stellt damit eine Schlüsseltechnologie im Hinblick auf Ressourcen- und Energieeffizienz dar, die besonderes Potenzial für die Fein- und Spezialchemie Industrie in NRW besitzt. NRW bietet zudem für die Weiterentwicklung der Prozessintensivierung sehr gute Bedingungen.

---

609 Herstellungsprozesse, bei denen Materialströme eine Produktionsanlage auf dem Weg von den Startmaterialien zum Produkt kontinuierlich durchlaufen.

### **Option C.2: Verwendung von modularer Produktion (Future Factories)**

Die Vernetzung intensivierter Module zu einer systemischen Produktionseinheit, in der Herstellungsprozesse in Containergröße ablaufen können, erschließt nicht nur die für die Prozessintensivierung genannten Effizienzpotenziale, sondern verschafft auch ein hohes Maß an Flexibilität hinsichtlich Produkt und Produktionsort.

Future Factories ermöglichen eine schnelle Anpassung an volatile Märkte, Rohstoffverfügbarkeit und Kundenwünsche. Die Produktion kann mit geringem Aufwand den zur Verfügung stehenden Einsatzstoffen und der sich ändernden Marktnachfrage angepasst werden. Future Factories eignen sich deshalb besonders für die Nutzung dezentral anfallender Rohstoffe (z.B. Agrarbiomasse oder Reststoffe) und dezentraler Energiequellen. Future Factories besitzen die nötige hohe Flexibilität bezüglich Produktionskapazität und Ausstattung, um neue Märkte z.B. durch die Herstellung von Produktmustern oder die Erprobung neuer Prozessideen schnell adressieren zu können. Besonderes Potenzial bieten sie für die Herstellung von Produkten für hochpreisige Nischenmärkte z.B. in der Spezialchemie und Pharmaindustrie mit vergleichsweise kleinen Produktionsmengen und häufig wechselndem Produktportfolio. Zudem ermöglicht die Verschaltung einzelner Container eine einfache Anpassung der Produktionskapazität mit wachsenden Absatzmöglichkeiten. Auf diese Weise verkürzt sich die Entwicklungszeit bis zur Marktreife. Die breitere Umsetzung in die industrielle Anwendung stellt für die derzeitige Innovation jedoch noch eine Hürde dar.

#### **Ökologie**

Future Factories erlauben eine ressourcen- und energieeffiziente Produktion.

#### **Ökonomie**

Sie weisen gegenüber konventionellen Anlagenkonzepten vielfach ökonomische Vorteile wie geringere Ressourcen-, Logistik- und Investitionskosten auf. Im Einzelfall kann die Produktion in Future Factories jedoch einen höheren Personalbedarf mit sich bringen, da die Anlage auf ein spezifisches Produkt ausgelegt wird und die Anlagenfahrer ggf. nicht gleichzeitig mehrere Anlagen steuern können.

Future Factories ermöglichen eine schnelle und flexible Anpassung an sich ändernde Bedingungen wie ein volatiles Marktumfeld, eine variierende Rohstoffverfügbarkeit oder spezielle Kundenwünsche. Auf diese Weise können neue Märkte adressiert werden, die durch konventionelle Technologien nicht oder nur mit größerem Aufwand besetzt werden können. Die hohe Anpassungsfähigkeit an sich ändernde Bedingungen stellt somit einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil dar. Eine schnellere Markterschließung ist für die chemische Industrie in NRW zudem von besonderer Bedeutung, denn NRW ist aufgrund hoher Energie-, Rohstoff- und Personalkosten stärker als andere Chemieregionen auf Innovationen zur Sicherung seiner Wettbewerbsfähigkeit angewiesen.

#### **Soziales**

Das Technologiekonzept der Future Factories besitzt besonderes Potenzial für Chemiesparten mit hoher und vor allem wachsender Bedeutung für NRW. Es erfordert ein hohes Maß an interdisziplinärer Ausbildung und Prozessverständnis. Dabei kommt der Weiterbildung von Mitarbeitern eine besondere Bedeutung zu.

#### **Zusammenfassung**

Future Factories ermöglichen eine schnelle und flexible Anpassung an sich ändernde Bedingungen, die in besonderem Maße die Wettbewerbsfähigkeit der chemischen Industrie in NRW stärkt. Dies gilt vor allem für die Beschleunigung des Innovationsprozesses durch einen schnelleren Markteintritt und eine flexiblere Anpassung an die Marktnachfrage.

Darüber hinaus bieten Future Factories im Hinblick auf wichtige Fragestellungen des Technologiekonzepts der Bioraffinerien (vgl. Option F.1) relevante Lösungsansätze z.B. zur Nutzung dezentral anfallender Rohstoffströme und deren Überführung in Intermediate, die sich einfacher zur Weiterverarbeitung und Integration in die chemische Wertschöpfungskette transportieren lassen.

NRW bietet aufgrund seiner einmaligen Forschungslandschaft und Kompetenzen in den erforderlichen Disziplinen einen idealen Standort für die Entwicklung und Verbreitung des Technologiekonzepts der Future Factories. Die benötigte Aus- und Weiterbildung sollte dabei einen Schwerpunkt bilden.

### **Katalyse**

Die Katalyse stellt eine Schlüsseltechnologie der chemischen Industrie dar. Die Bedeutung von Katalysatoren wird weiter wachsen. Vor dem Hintergrund einer Diversifizierung der Rohstoffbasis (insbesondere Nutzung nachwachsender Rohstoffe und CO<sub>2</sub>) und der Energiewende (Power to Gas/ Chemicals-Konzepte) werden maßgeschneiderte Katalysatoren mit höherer Robustheit benötigt, die eine höhere Selektivität besitzen und neue Reaktionswege öffnen. Ein Beispiel sind multifunktionelle Katalysatoren, die es ermöglichen, mehrere Reaktionsstufen in einem Schritt durchzuführen. Im Hinblick auf die Nutzung nachwachsender Rohstoffe sind maßgeschneiderte Katalysatoren gesucht, die die Betriebsfenster chemischer und biokatalytischer Prozesse stärker überlappen lassen, den spezifischen Energiebedarf reduzieren und nebenproduktarme Synthese mit hoher Wertproduktausbeute ermöglichen. Entsprechende Katalysatoren müssen die molekulare Diversität nachwachsender Rohstoffe glätten und deren Überführung in Zwischenprodukte ermöglichen, die in die chemische Wertschöpfungskette integriert werden können. Eine wichtige Rolle wird darüber hinaus das Recycling teurer Katalysatoren sowie die Entwicklung besser verfügbarer Katalysatormaterialien, z.B. Nichtedelmetallkatalysatoren, spielen. Damit Katalysatoren unter idealen Reaktionsbedingungen ihr Potenzial entfalten können, ist das Zusammenspiel mit der Verfahrenstechnik essentiell.

## III.2 Verfahren der Kohlechemie

### III.2.1 Ist-Zustand

Im Rohstoffkapitel ist die stoffliche Nutzung der Kohle beschrieben, die heute in Deutschland fast ausschließlich energetisch verwendet wird. Für die stoffliche Nutzung sind zwei Verfahren bekannt: die direkte Kohleverflüssigung (Abbildung 62) und das indirekte Verfahren der Vergasung und der nachfolgenden Umwandlung in verschiedene Produkte (Abbildung 63).

Das Verfahren zur direkten Kohleverflüssigung ist das Bergius-Pier-Verfahren (Abbildung 62), bei dem unter Druck von 190-350 bar und Temperaturen von 400-500°C die Kohle hydriert wird. Die Struktur der Kohle wird durch den Wasserstoff dabei soweit aufgebrochen, dass „direkt“ flüssige und gasförmige Kohlenwasserstoffe entstehen. Es wird ein energetischer Wirkungsgrad von ca. 58% angenommen.<sup>610</sup>

Das Verfahren wurde in Deutschland in großem Umfang in den 1930er und 1940er Jahren und in der DDR angewendet. Die gewonnenen Kohlenwasserstoffe mussten in Raffinerieprozessen zu Kraftstoffen aufbereitet werden. Später wurde die direkte Kohleverflüssigung in der BRD in den Jahren 1981-87 in der Kohle/Öl-Anlage Bottrop (RAG/VEBA) betrieben. Die Kapazität dieser Anlage betrug 73.000 t/a, der Betriebszweck bestand vorrangig im Erhalt des technologischen Wissens über diese ursprünglich in Deutschland entwickelte Technologie.

Aktuell wird die direkte Kohleverflüssigung in China eingesetzt. Dort ist eine Anlage mit einer Kapazität von 1,1 Mio. t/a in Shenhua in Betrieb.<sup>611</sup>

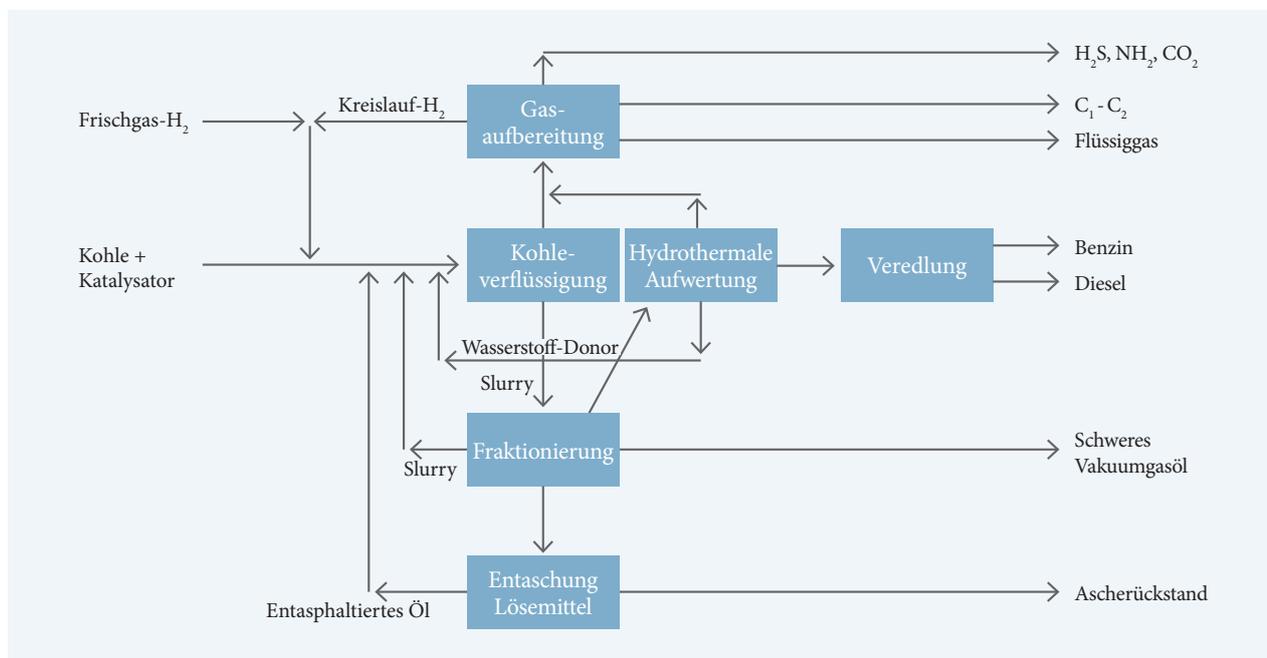


Abbildung 62: Verfahrensschema der direkten Kohleverflüssigung<sup>612</sup>

610 Meyer, Bernd et al.: Landtag NRW (Hg.): Gutachten „Stoffliche Nutzung von Braunkohle“ für die Enquete-Kommission II des Landtags von Nordrhein-Westfalen. (2014), S. 17f.

611 Bai, Jim; Aizhu, Chen: China Shenhua coal-to-liquids project profitable -exec unter: <http://www.reuters.com/article/2011/09/08/shenhua-oil-coal-idUSL3E7K732020110908> (2011). Online am 27.01.2015.

612 Entnommen aus: Meyer, Bernd et al.: Landtag NRW (Hg.): Gutachten „Stoffliche Nutzung von Braunkohle“ für die Enquete-Kommission II des Landtags von Nordrhein-Westfalen. (2014), S. 43.

Bei indirekten Verfahren der Vergasung und nachfolgenden Umwandlung in Produkte existieren 2 Routen (Abbildung 63), die sich verschiedener Syntheseverfahren bedienen, um neben Kraftstoffen auch Basischemikalien zu liefern, welche wiederum zu vielen unterschiedlichen Endprodukten weiterverarbeitet werden (u.a. Farben, Lacke, Kunststoffe, Düngemittel). Nach der Erzeugung eines Roh-Synthesegases (v. a. Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid) erfolgt eine Konditionierung, das heißt eine Aufreinigung und eine Einstellung des Wasserstoff-Kohlenmonoxid-Verhältnisses im Synthesegas, nach den Anforderungen der Zielprodukte und deren Synthese.

Die erste Syntheseroute, nach der vorgelagerten Kohlevergasung, ist das Fischer-Tropsch-Verfahren. Beim Fischer-Tropsch-Verfahren werden aus dem Synthesegas unter Einsatz eines Eisen- oder Kobaltkatalysators Kohlenwasserstoffe unterschiedlicher Kettenlänge hergestellt. Beim Fischer-Tropsch-Verfahren entsteht immer eine Palette an Produkten z. B. Liquid Petroleum Gas (LPG), Naphtha (Rohbenzin), Benzin, Diesel, Kerosin und Hartparaffine (Wachse)<sup>613</sup>. Über die Wahl der Reaktionsbedingungen und des eingesetzten Katalysators lässt sich dabei steuern, welches Produkt bei der Synthese als Hauptprodukt anfällt. Größere Erzeugungsanlagen existieren in Südafrika, China, Katar und Malaysia. In den USA ist eine Großanlage (SASOL) in der Planungsphase.

Eine zweite Syntheseroute führt über Methanol. Hierbei wird aus dem Synthesegas in einem ersten Schritt an einem Kupfer/Zinkkatalysator Methanol hergestellt, welches als Ausgangsstoff für die Synthese von Benzin über das MTG-Verfahren (Methanol to Gasoline) oder Olefinen (Ethylen/Propylen) über das MTO-Verfahren (Methanol to Olefins) dient. Die Verfahren sind ursprünglich von Exxon-Mobile und UOP (Universal Oil Products) entwickelt worden. In jüngster Zeit werden MTO/MTG-Prozesse auch von chinesischen Anbietern – teilweise in Entwicklungspartnerschaften mit westlichen Technologiefirmen angeboten (Sinopec, Lurgi, Total)<sup>614</sup>.

Die Synthesegaschemie ist weltweit etabliert. Es wird ein energetischer Wirkungsgrad von 45 bis 50% angenommen<sup>615</sup>. Weltweit sind eine Vielzahl von Vergasungsverfahren im Einsatz: Festbettvergasung, Wirbelschichtvergasung und Flugstromvergasung<sup>616</sup>. In NRW wurden neben der Staubdruckvergasung nach dem Flugstromverfahren Erfahrungen mit der Wirbelschichtvergasung nach dem Hochtemperatur-Winkler-Verfahren (HTW) gesammelt<sup>617</sup>. Die Kapazität der damaligen HTW-Anlage in Berrenrath, betrieben von RWE von 1986 bis 1997, lag bei 140 MW (thermische Leistung – im Folgenden als MWth). Heute gängige Vergaserkapazitäten bei Flugstromvergasern liegen bei 500 MWth, wobei Vergaserdesigns bis zu 1.200 MWth angeboten werden. Der Einsatz heute üblicher Vergaser wäre im Bereich der rheinischen Braunkohle noch zu demonstrieren, wobei ein technischer Realisierungszeitraum von fünf bis sieben Jahren einzukalkulieren wäre sowie 2 bis 3 weitere Jahre für standortbezogene Untersuchungen<sup>618</sup>. „Die wichtigsten Produkte aus dem erzeugten Synthesegas

613 Steynberg, André; Dry, Mark: Fischer-Tropsch Technology. Elsevier Science (2004). ISBN 978-0-080472-79-9.

614 Cohen, Yann; Karev, Adi; South, Jeremy; Tuo, Lavi: Deloitte (Hg.): China Coal to olefin (CTO/MTO) – Exploring for the new El Dorado. (2012).

615 Meyer, Bernd et al.: Landtag NRW (Hg.): Gutachten „Stoffliche Nutzung von Braunkohle“ für die Enquete-Kommission II des Landtags von Nordrhein-Westfalen. (2014), S. 16f.

616 ebd., S. 47.

617 Landtag NRW (Hg.): Enquetekommission II Protokoll 20. Sitzung (nichtöffentlich). (2015).

618 Meyer, Bernd et al.: Landtag NRW (Hg.): Gutachten „Stoffliche Nutzung von Braunkohle“ für die Enquete-Kommission II des Landtags von Nordrhein-Westfalen. (2014), S. 88.

sind neben Chemikalien (Ammoniak, Harnstoff, Wasserstoff, Methanol und seine Folgeprodukte), Kraftstoffe und synthetisches Erdgas<sup>619,620</sup>.

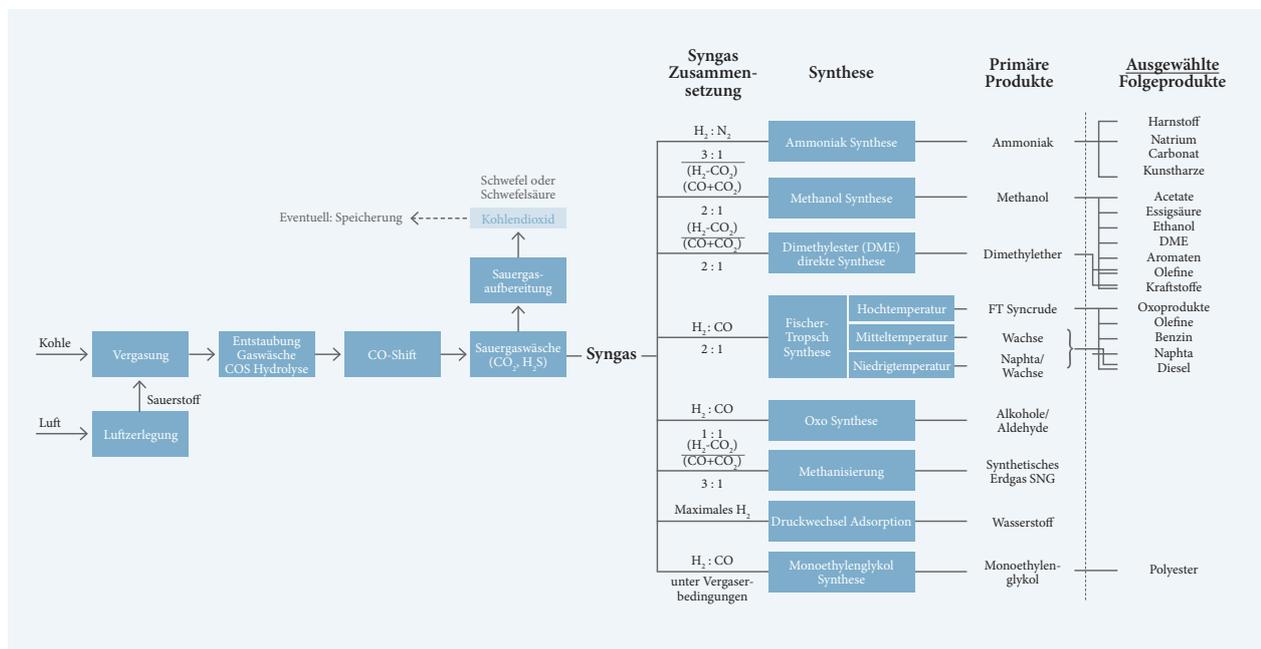


Abbildung 63: Verfahrensschema der indirekten Kohleverflüssigung über Vergasung<sup>621</sup>

Geopolitisch ist zu beachten, dass China zum weltweiten Führer im Bereich der Kohlechemie geworden ist und diese offenbar bei einem Rohölpreis von etwa 70 Euro/bbl und einem Kohlepreis von ~50 Euro/t (Steinkohle China) wirtschaftlich betreibt.<sup>622</sup>

Die Rohstoffpreise im rheinischen Revier liegen aktuell bei 10-20 Euro/t Braunkohle. Berücksichtigt man den unterschiedlichen Kohlenstoffgehalt von Stein- und Braunkohle, so ergibt sich ein bereinigter Preis von 20-40 Euro/t Steinkohle. Unter diesen Voraussetzungen ist die heimische Braunkohle im Vergleich mit China auch hier konkurrenzfähig.<sup>623</sup>

Während die Vereinigten Staaten von Amerika eine Wiedergeburt ihrer chemischen Industrie mit Hilfe des Schiefergases erfahren, hat China Großanlagen auf der Basis von Kohle aufgebaut, die das Land reichlich hat<sup>624</sup>. Zu beachten ist, dass die Biomassemitnutzung bei Synthesegasproduktion prinzipiell offen ist. Der Vergasungspfad für eine Braunkohlenutzung ist letztlich technologisch die gleiche Option, die auch für die Biomasseperspektive gewählt werden kann. Es ist folglich auch in

619 Die chemische Nutzung von Synthesegas bietet mehrere Verfahrenswege hin zu Grundchemikalien. Dabei kann Braunkohle als Kohlenstofflieferant genutzt werden, aber auch zahlreiche Abfallstoffe aus der chemischen Produktion, Kunststoffabfälle u.ä.. Ein solches Verfahren wurde z.B. Ende der 90er Jahre in der Lausitz in der „Schwarzen Pumpe“ entwickelt und genutzt. Zielprodukt sollte Methanol sein. Aus wirtschaftlichen Gründen ist die Anlage stillgelegt worden.

620 ebd., S. 59.

621 Entnommen aus: ebd., S. 46.

622 Entnommen aus: ebd., S. 46.

623 Emele, Lukas: (Hg.): Entwicklung der Strompreise im Verhältnis zur Kaufkraft und Abhängigkeit der Strompreise von den Primärenergiekosten im Untersuchungszeitraum 1950 bis heute. (2009).

624 Tremblay, Jean-Francois: China’s Feedstock Revolution. In: Chemical & Engineering News (2014), S. 18–19, S. 19.

der Betrachtung der Endlichkeit von Braunkohlelagerstätten keine Technologieeinbahnstraße<sup>625</sup>. Anzumerken ist, dass die Produktion von Treibstoffen aus Kohle einen höheren CO<sub>2</sub>-Footprint aufweist, als die Erzeugung dieser Produkte aus Erdöl oder Erdgas. Treten bei der Treibstoffproduktion aus Erdöl und Erdgas die CO<sub>2</sub>-Emissionen hauptsächlich bei der Förderung und bei der Weiterverarbeitung in der Raffinerie auf, so erfolgt die CO<sub>2</sub>-Erzeugung bei Coal to Liquid-Verfahren (CtL) größtenteils innerhalb des Prozesses. Zwar fällt dabei mehr CO<sub>2</sub> an. Dieses lässt sich aber gut und hochkonzentriert abtrennen und steht dann als hochreiner CO<sub>2</sub>-Strom zur Verfügung. Perspektivisch könnte der CO<sub>2</sub>-Footprint der CTL-Routen über verschiedene weiter unten beschriebene Wege (Option D.1) weiter gesenkt werden.

### III.2.2 Option D.1: Verfahren der Kohlechemie

#### Beschreibung

Bei der Etablierung von Verfahren zur stofflichen Nutzung der Braunkohle ist zu beachten, dass Synergien durch die gemeinsame Infrastrukturnutzung bestehender Kraftwerks- und Chemiestandorte möglich werden. Gegebenenfalls müssen hierfür Infrastrukturen zur Vernetzung der Anlagen ausgebaut werden. Eine gemeinsame Nutzung von Prozessabgasen und -abwässern, von Prozessmedien (Dampf, Wasser, Prozessgase etc.), von Hilfsmedien (Inertgase, Druckluft etc.), von Wärme und Kälte bietet sich an<sup>626</sup>. „Im Ergebnis wird eine Reduktion der Gesamtinvestitionskosten von bis zu 20% erwartet.“ Möglich ist zudem eine konstante Abnahme von Energien für den Vergasungsstrang und somit eine Vergleichmäßigung des Lastbetriebes des Kraftwerkes.<sup>627</sup>

#### Begründung

Weitere Perspektiven eröffnet die Mitverwertung von Biomasse und Abfallstoffen, da sie die CO<sub>2</sub>-Emissionen mindern kann. Mithilfe der Einkoppelung von, aus erneuerbaren Energien hergestelltem Wasserstoff, könnte das Abtrennen von CO<sub>2</sub> im CtL-Prozess obsolet werden, bzw. das erzeugte (und ggf. abgetrennte) CO<sub>2</sub> zu Synthesegas umgesetzt werden. Hierbei würden die Produktausbeute pro eingesetzter Tonne Kohle und der Kohlenstoffeinbindungsgrad in die Produkte deutlich ansteigen. Vorbedingung hierfür ist eine deutliche Reduktion der Produktionskosten für Elektrolyseure sowie das Vorhandensein von Überschussstrom aus erneuerbaren Quellen. Der CtL-Prozess könnte den zusätzlich zur Verfügung stehenden Wasserstoff sehr flexibel aufnehmen und den Überschussstrom in chemischer Form im Produkt speichern.<sup>628</sup>

Neben der Produktsynthese ist auch die alternative Umwandlung des Synthesegases bzw. der -abgase für eine energetische Nutzung möglich. In NRW stand dabei ein Anlagenkonzept mit einer Brennstoffvergasung mit integrierter CO<sub>2</sub>-Abtrennung und nachgeschaltetem Gas- und Dampf-Kombi-Verstromungs-Prozess als Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC-CCS) auf der Agenda. Das Bundeswirtschaftsministerium begleitete dies mit Studien und die EU setzte Investitionsanreize, die letztlich aber nicht abgerufen wurden. Ausschlaggebend scheint zu sein, dass neben den bei

625 Mit zu betrachten ist auch die Acetylenchemie (Karbidgechemie), bei der über die Herstellung von Calciumkarbid im Lichtbogenverfahren und Hydrolyse zu Acetylen in Schkopau (Buna-Werke) und in Marl (Chemische Werke Hüls AG) jahrzehntelang PVC und Butadien(kautschuk) hergestellt wurde. Diese Anlagen sind Anfang der 90er Jahre stillgelegt worden. Über die Acetylenroute sind zahlreiche Olefinprodukte zugänglich. Neben den damals hohen Umweltbelastungen war der enorme Stromverbrauch Grund für die Einstellung der Verfahren. Geht man davon aus, dass die Verfahren heute ohne größere Umweltbelastungen durchgeführt werden können und Strom künftig aus erneuerbaren Energien im Überschuss vorhanden ist, könnte dieses Verfahren wieder Sinn machen, insbesondere in örtlicher Nähe zu Lagerstätten, Chemieunternehmen und Kraftwerken.

626 Meyer, Bernd et al.: Landtag NRW (Hg.): Gutachten „Stoffliche Nutzung von Braunkohle“ für die Enquete-Kommission II des Landtags von Nordrhein-Westfalen. (2014), S. 19.

627 ebd., S. 58.

628 ebd., S. 30.

der Verstromung im Vergleich zur konventionellen Erzeugung signifikant höheren Erzeugungskosten die Möglichkeit der CO<sub>2</sub>-Speicherung in Deutschland nicht gegeben war<sup>629,630</sup>.

Auch die Kombination von stofflicher und energetischer Nutzung (Polygeneration), bei der bedarfsgerecht bzw. Marktanreizen folgend zwischen den Produkten gewechselt werden kann, scheint derzeit aufgrund hoher Kapitalkosten und sinkender Börsenstrompreise zunächst nicht wirtschaftlich.

Eine Reduzierung der Komplexität der Anlagenstruktur und damit auch eine Reduzierung der Investitions- und Betriebskosten kann mit einem Annex-Polygenerationskonzept, das die gezielte Nutzung der im Umfeld bestehenden Kraftwerks-, Chemie- und Nebenanlageninfrastruktur zur zentralen Größe macht, verfolgt werden.<sup>631</sup> Zu prüfen wäre, wo der optimale Schnitt in der Prozesskette zwischen Kraftwerk- und Chemiestandort liegt. Hierbei wäre es vorteilhaft, die Prozesskette so zu schneiden, dass leicht zu transportierende Zwischenprodukte (Trockenbraunkohle oder Fischer-Tropsch-Flüssigprodukte) zwischen den Standorten ausgetauscht werden.

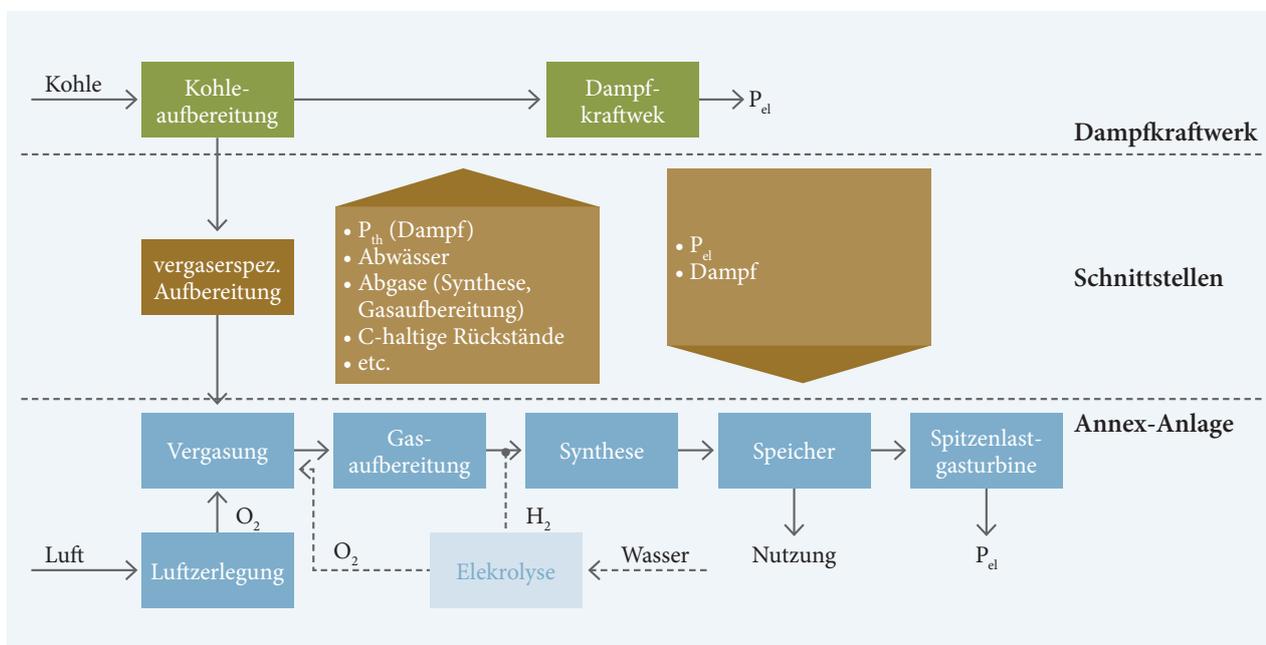


Abbildung 64: Annex-Polygenerationskonzept<sup>632</sup>

Der Einsetzungsantrag der Enquetekommission stellt die Frage: „Welche alternativen Rohstoffe jenseits der nachwachsenden sind noch von Relevanz, inwieweit kann überhaupt Rohstoffautarkie erreicht werden und inwiefern könnte eine „Rückkehr“ zur Kohle als (einheimische) Rohstoffbasis eine (übergangsweise) Teillösung in der Chemie bedeuten?“<sup>633</sup> Hinsichtlich der betrachteten Möglichkeiten der Kohlechemie ist eine kombinierte energetisch-stoffliche Nutzung (Polygeneration) das für den Standort NRW vielversprechendste Verfahren, da sie die bestehende Stromerzeugungsinfrastruktur unterstützen und so dazu beitragen kann, die Bereithaltung energiewirtschaftlich notwendiger Kapazitäten zu sichern. Die beschriebenen Verfahren der Kombination von Kohlever-

629 ebd., S. 53ff.

630 Politisch ist zu beachten, dass bei den IGCC-Projekten auch die Speicherung von CO<sub>2</sub> in Lagerstätten Bestandteil der Konzeption war und insgesamt die Akzeptanz des Konzepts angegriffen hat.

631 ebd., 56ff.

632 Entnommen aus: ebd., S. 57.

633 Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN: Landtag NRW (Hg.): Antrag auf Einrichtung einer Enquete-Kommission zur Zukunft der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen im Hinblick auf nachhaltige Rohstoffbasen, Produkte und Produktionsverfahren. (2012).

flüssigungs- bzw. Vergasungstechnologie und Elektrochemie könnten ein interessantes technisches Angebot schaffen, das einerseits Leistungen für die Energiewirtschaft andererseits auch Leistungen für die chemische Grundstoffversorgung liefert.

### Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte

#### Ökologie

Im Vergleich zu den aktuellen Rohstoffbasen Erdöl, Erdgas und nachwachsenden Stoffen sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei einer stofflichen Nutzung der Kohle mindestens doppelt so hoch. Über eine Einbindung von regenerativ gewonnenem H<sub>2</sub>, können sie jedoch reduziert werden (vgl. IST-Zustand). Eine ökologisch nicht nachteilige und ökonomisch sinnvolle rohstoffliche Nutzung von Kohle würde zudem die Versorgungsbasis der chemischen Industrie, die im weltweiten Wettbewerb um günstige Rohstoffe steht, verbreitern. In Bezug auf die bisherige Nutzung der Kohle in der thermischen Energiegewinnung verbessert eine stoffliche Nutzung in der chemischen Industrie die Klimabilanz deutlich: „Bei der Erzeugung von Basischemikalien über Methanol oder die Erzeugung von Kraftstoffen werden etwa 40% des mit der Kohle eingebrachten Kohlenstoffs im Syntheseprodukt gebunden.“<sup>634</sup> Langfristig ist auch die Nutzung nachwachsender Rohstoffe eröffnet. „Die Zumischung von Biomassen und kohlenstoffhaltigen Sekundärrohstoffen zur Einsatzkohle für die Co-Vergasung ist mit Anteilen bis 30% ohne größeren technischen Aufwand möglich.“<sup>635</sup>

#### Ökonomie

Verfahren der Kohlechemie können ein interessanter Pfad nicht nur zur Gewinnung von Chemierohstoffen, sondern auch ein Beitrag zum Gelingen der Energiewende sein. Wenn es durch den Ausbau der erneuerbaren Energie im Zuge der Energiewende zeitweise Stromüberangebote geben sollte, so könnten diese elektrochemisch genutzt werden. Reaktive Stoffe wie Wasserstoff können zur Herstellung von Rohstoffen auf Kohlebasis genutzt werden. In dem Moment, wo sich daraus Vorteile für die Kohlenutzung (gegenüber Öl oder Gas) ergeben, kann Kohle wieder zu einem Chemierohstoff werden.<sup>636</sup> Elektrochemisch hergestellte flüssige Stoffe sind kostengünstig lagerfähig, stehen in Zeiten geringer Strommengen der chemischen Industrie als Energiereserve zur Verfügung und können damit auch zum Abfangen von Stromspitzen dienen (Lastmanagement/DSM). Zudem sind volkswirtschaftlich positive Effekte durch die Verringerung der Importnotwendigkeit von Rohöl und Erdgas festzustellen. Allerdings ist erst bei einem hohen EE-Ausbaugrad mit wesentlichen Überschussstrommengen zu rechnen, deren Nutzung dann mit anderen Verfahren im Wettbewerb stehen wird.

#### Soziales

Bei der Etablierung einer Anlage für synthese-gasbasierte Kohlechemie in der Produktionsdimension ab einer Mio. t pro Jahr sind mindestens 300 zusätzliche Arbeitsplätze direkt in der Anlage zu erwarten.<sup>637</sup> Darüber hinaus werden zusätzliche vor- und nachgelagerte Arbeitsplätze mit dem Faktor

634 Meyer, Bernd et al.: Landtag NRW (Hg.): Gutachten „Stoffliche Nutzung von Braunkohle“ für die Enquete-Kommission II des Landtags von Nordrhein-Westfalen. (2014), S. 79.

635 ebd., S. 66.

636 Pflug, Kai: Renaissance einer alten Technologie – Pro und Kontra Kohlechemie – die Zukunft in China trotz zahlreicher Herausforderungen. In: CHEManager (2014), 17, S. 6: „Und wenn auch die genauen Angaben variieren, stimmen doch die meisten Quellen überein, dass Kohle-zu-Öl-Anlagen bei Ölpreisen über 100 USD pro Barrel profitabel sein sollten. Nach Angaben von Zhang Yuzhou, Vice President von Shenhua, ist die Kohleverflüssigung seines Unternehmens ab einem Ölpreis von 85 USD pro Barrel profitabel. Dies liegt deutlich unter dem durchschnittlichen Ölpreisniveau von etwa 110 USD pro Barrel in den Jahren 2012 und 2013.“

637 Pardemann, Robert: TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERGAKADEMIE FREIBERG (Hg.): Stoff-Kraft-Kopplung in kohle-basierten Polygenerationenkonzepten(bisher unveröffentlicht). (2013)

2,1 induziert und die bestehenden Wertschöpfungsketten neu gesichert.<sup>638</sup> Im Wesentlichen handelt es sich hierbei um die Anlagen zur Kohlevergasung/-umsetzung. Für die nachfolgenden Wertschöpfungsstufen wäre eine Kohlenutzung neutral, da diese weiter bestehen blieben. Gesellschaftlich ist zu beachten, dass es eine negative Voreinstellung zum Energieträger Kohle gibt, so dass eine Nutzung als Kohlenstoffträger intensive Wissensvermittlung und Kommunikation mit der Gesellschaft erfordert.

### III.2.3 Bewertung Option D.1: Verfahren der Kohlechemie

Diese Option sieht eine Anwendung von Synthesegasrouten zur stofflichen Nutzung heimischer Braunkohle in den genehmigten Abbaufeldern vor<sup>639</sup>. Dies könnte in einem integrierten Chemie-Kraftwerksstandort erfolgen, dessen Produktportfolio Grundchemikalien wie Olefine, Wasserstoff, Methanol und Ammoniak sowie Energie in Form von Strom, Wärme und Dampf sein könnte. Reaktive Verbindungen wie Wasserstoff könnten dabei sowohl stofflich als auch energetisch z.B. als Langzeitspeicher genutzt werden. In dieser Option werden auch die Auswirkungen einer Mitverwertung von Biomasse und Abfallstoffen sowie die Einkopplung von Wasserstoff (aus mit EE-Strom betriebenen Wasserelektrolysen) auf die Nachhaltigkeit untersucht.

#### Ökologie

Losgelöst von der hier im Bericht zu behandelnden Frage verbessert die stoffliche Nutzung von Braunkohle gegenüber der aktuellen thermischen Energiegewinnung die Klimabilanz, da ca. 40% des Kohlenstoffs bei der Erzeugung von Basischemikalien oder Kraftstoffen im Produkt gebunden werden. Im Vergleich zu Erdöl als aktuellen Hauptrohstoff der chemischen Industrie weist die stoffliche Braunkohlenutzung allerdings mindestens zweimal höhere CO<sub>2</sub>-Emissionen auf. Ökologisch eröffnet die Zumischung von Biomasse und Abfallstoffen im Rohstoffstrom neue Perspektiven, da sie die CO<sub>2</sub>-Bilanz verbessern kann.

#### Ökonomie

Die heimischen Braunkohlevorkommen könnten rein mengenmäßig eine Substitution der heutigen Rohstoffe aller chemischen Wertschöpfungsketten ermöglichen. Damit ist die Braunkohle der einzige heimische Rohstoff, der den gesamten Rohstoffbedarf der chemischen Industrie (für die stoffliche Nutzung) decken könnte. Sie könnte damit die Versorgungsbasis der chemischen Industrie verbreitern und die Importabhängigkeit im Vergleich zur aktuellen Rohstoffbasis mit Naphtha und Erdgas verringern (vgl. Optionenbewertung „Rohstoffe“). Aktuelle Synthesegastechnologien, die in der Energiewirtschaft eingesetzt werden, müssten für eine stoffliche Nutzung weiterentwickelt werden.

Die stoffliche Braunkohlenutzung ist mit ökonomischen Hürden wie z.B. mangelnder technologischer Erfahrung in Deutschland, hohen Investitionskosten, derzeit niedrigen Erdgas- und Erdölpreisen, hohen Reinigungskosten, Akzeptanzproblemen und einem möglichen Kostenanstieg für CO<sub>2</sub>-Zertifikate verbunden.

Ein integrierter Chemie/Energie-Standort bietet Synergien durch eine gemeinsame Infrastrukturnutzung, die wirtschaftliche Vorteile mit sich bringt. Der Ausbau bestehender Kraftwerksstandorte ist jedoch mit hohen Investitionen verbunden. Ein integrierter Standort ermöglicht ein breites Produktportfolio aus Grundchemikalien und Energie. Im Hinblick auf die Herausforderungen der Energiewende kann dies interessante strategische Möglichkeiten bieten, da z.B. Wasserstoff oder

638 Buttermann, Hans Georg; Freund, Florian; Hillebrand, Elmar: EEFA – Energy Environment Forecast Analysis GmbH & Co. KG (Hg.): Bedeutung der rheinischen Braunkohle – sektorale und regionale Beschäftigungs- und Produktionseffekte. (2010).

639 Die Landesregierung hat am 09. April 2014 erklärt, dass sie im Abbaufeld Garzweiler II auf die Umsiedlung des Ortsteils Erkelenz-Holzweiler, des Hauerhofs und des Guts Dackweiler im Rahmen einer Leitentscheidung verzichten möchte.

Methanol in Zeiten geringer Strommengen der chemischen Industrie als Energiereserve sowie andererseits zum Abfangen von Stromspitzen dienen kann (Lastmanagement/DSM).

Eine in einer Anlage kombinierte stoffliche und energetische Produktnutzung (Integrated Gasification Combined Cycle-IGCC) erhöht die Anlagenkomplexität und die Kapitalkosten jedoch erheblich, so dass entsprechende Anlagenkonzepte aktuell nicht wirtschaftlich sind. Konzepte, die stärker die Anknüpfung an bestehende Prozessschritte nutzen wollen (Annex-Konzepte), könnten Investitionsbedarfe senken und die Bereithaltung energiewirtschaftlich notwendiger Kapazitäten (Must-Run) mittelfristig wirtschaftlicher machen. Die Einkopplung von regenerativ erzeugtem Wasserstoff würde die Produktausbeute pro eingesetzter Tonne Kohle deutlich steigern. Ökonomische Hürde hierfür ist die fehlende Wirtschaftlichkeit der entsprechenden Wasserelektrolyseure (vgl. Optionbewertung „Energieumsätze“). Zudem ist erst bei einem hohen EE-Ausbaugrad mit wesentlichen Überschussstrommengen zu rechnen, deren Nutzung dann mit anderen Verfahren, wie z.B. Synthesegas, Mobilität und Speichertechnologie im Wettbewerb stehen wird.

### Soziales

Eine Anwendung von Kohletechnologien zur stofflichen Nutzung heimischer Braunkohle an integrierten Chemie-Kraftwerksstandorten kann zum Erhalt von Arbeitsplätzen in der Rohstoffgewinnung beitragen. Für die chemische Industrie ist eher mit neutralen Auswirkungen auf die Beschäftigung zu rechnen.

### Zusammenfassung

Verfahren der Kohlechemie sind zur Gewinnung von Grundchemikalien interessant. So bietet der Anlagen- und Prozessverbund für eine energetische und stoffliche Nutzung an einem integrierten Chemie-Energie-Standort Effizienzpotenziale und kann so helfen, intrinsische Nachteile der Kohleverfahren wie erhöhte Emissionen und eine fehlende Wirtschaftlichkeit teilweise zu kompensieren. Neben ganzheitlichen neuen Anlagekonzepten (IGCC) können an bestehende Prozessschritte anknüpfende Konzepte (Annex) verfolgt werden. Dafür sind allerdings ökologische und ökonomische Hürden zu überwinden. So verbessert die stoffliche Braunkohlenutzung zwar die Klimabilanz verglichen mit der energetischen Nutzung, jedoch ergeben sich für die stoffliche Nutzung im Vergleich mit der aktuellen Rohstoffbasis der chemischen Industrie höhere CO<sub>2</sub>-Emissionen. Insofern kommt der Verbesserung der CO<sub>2</sub>-Bilanz z.B. durch Zumischung von Biomasse und Abfallströmen in den Rohstoffstrom oder der Schließung des Stoffkreislaufs durch eine CO<sub>2</sub>-Nutzung bei der Technologieentwicklung eine Bedeutung zu. Letztere hängt von der Wasserstoff-Verfügbarkeit ab.

Ökonomische Hürden stellen auch die Kosten durch CO<sub>2</sub>-Zertifikate sowie die Komplexität der beschriebenen Anlagenkonzepte dar, die langfristig ökologische und ökonomische Vorteile bieten würden. Entsprechend werden integrierte Chemie/Energie-Standorte erst langfristig realisiert werden können.

Eine stoffliche Braunkohlenutzung verbreitert die Versorgungsbasis der chemischen Industrie und verringert die Importabhängigkeit. Zudem stützt sie einen für NRW wichtigen Industriesektor, der eine große (oftmals indirekte) Bedeutung für die chemische Industrie besitzt. Dies gilt insbesondere für eine sichere Energieversorgung zu wettbewerbsfähigen Preisen. Darüber hinaus sind viele Innovationskonzepte wie die stoffliche CO<sub>2</sub>-Nutzung und Power to Gas direkt oder indirekt von der Energiewirtschaft abhängig.

## III.3 Biotechnologische Verfahren

### III.3.1 Einleitung

Ein zentrales Thema der Enquetekommission sind zukünftige Verfahren der chemischen Industrie. Ihnen kommt eine Schlüsselrolle für die Nutzung alternativer Rohstoffe sowie als effiziente Syntheseverfahren und Produktionen zu. Darüber hinaus haben die angewandten Verfahren maßgeblichen Einfluss auf das zukünftige Produktportfolio der Chemie. Unter den zukünftigen Verfahren wird die Biotechnologie als Schlüsseltechnologie für die Entwicklung neuer oder effizienterer Prozesse zur Herstellung von chemischen Verbindungen und zur Nutzung alternativer Rohstoffe eingeordnet, deren Potenzial in diesem Kapitel betrachtet werden soll.

#### III.3.1.1 Begriffsbestimmungen

Laut der OECD ist „Biotechnologie die Anwendung von Wissenschaft und Technik auf lebende Organismen, Teile von ihnen, ihre Produkte oder Modelle von ihnen zwecks Veränderung von lebender oder nichtlebender Materie zur Erweiterung des Wissensstandes, zur Herstellung von Gütern und zur Bereitstellung von Dienstleistungen.“<sup>640</sup> Sie ist demnach eine interdisziplinäre Wissenschaft und beschäftigt sich mit der Nutzung von Enzymen, Zellen und ganzen Organismen und deren technischer Anwendung. „Die Biokatalyse weist einen stark branchenübergreifenden Charakter auf.“<sup>641</sup>

Um die einzelnen Teilaspekte der Biotechnologie besser unterscheiden zu können, haben sich folgende Farbcodes etabliert: Von weißer Biotechnologie spricht man, wenn es um die biotechnologische Herstellung von Plattformchemikalien und Feinchemikalien geht z.B. Bestandteile von Waschmitteln. Grüne Biotechnologie bezeichnet den Einsatz biotechnologischer Verfahren in der Landwirtschaft. Dazu gehören gentechnisch veränderte Pflanzen wie z.B. *Arabidopsis* oder die transgene Kartoffel. Es werden bspw. Pflanzen gezüchtet, die resistent gegen Schädlinge sind und so eine höhere Ausbeute liefern. Von roter Biotechnologie spricht man bei Anwendungen im pharmazeutisch-therapeutischen Bereich wie z.B. bei diagnostischen Testsystemen auf Antikörperbasis etc.

Als blaue Biotechnologie wird im Allgemeinen die Meeresbiotechnologie bezeichnet. Diese Technologie birgt noch ein großes ungehobenes Potenzial. Heutzutage ist lediglich ca. 1% der Meeresmikroorganismen kultivierbar. Zusätzliche interessante Biotechnologiefarben sind die graue bzw. braune Biotechnologie, die auch als Umweltbiotechnologie (Bioremediation) bezeichnet wird. Von schwarzer Biotechnologie spricht man bei der Herstellung von Biowaffen. Der eher selten verwendete Begriff der gelben Biotechnologie wird häufig mit der Lebensmittelbiotechnologie in Verbindung gebracht. Hier gibt es auch Überschneidungen zur grünen Biotechnologie.<sup>642,643</sup> Teilweise spricht man bei gelber Biotechnologie aber auch von Insektenbiotechnologie.<sup>644</sup>

640 vgl. OECD: Biotechnology policies – Statistical Definition of Biotechnology unter: <http://www.oecd.org/sti/biotech/statistical-definitionofbiotechnology.htm> (2005). Online am 15.05.2014.

641 Perrey, Karen et al.: Landtag NRW (Hg.): Gutachten „Innovationsleistungsfähigkeit der chemischen Industrie in NRW – Katalyse“ für die Enquete-Kommission II des Landtags von Nordrhein-Westfalen. (2014).

642 vgl. BIOACOM AG; biotechnologie.de: Was ist Biotechnologie? unter: <https://www.biotechnologie.de/BIO/Navigation/DE/Hintergrund/basiswissen.html>. Online am 01.07.2014.

643 vgl. Sahn, Hermann; Antranikian, Garabed; Stahmann, Klaus-Peter; Takors, Ralf: Industrielle Mikrobiologie. Springer-Verlag (2013). ISBN 978-3-827430-39-7.

644 Landtag NRW (Hg.): Enquetekommission II Protokoll 17. Sitzung (nichtöffentlich) Anhörung „Biotechnologische Verfahren“. (2014).

Der vorliegende Bericht fokussiert sich auf die weiße und rote Biotechnologie, weil insbesondere diese Relevanz für die chemische Industrie haben. Die weiße Biotechnologie bietet ein breites Methodenspektrum zur Herstellung von Fein- und Grundchemikalien und hat darüber hinaus ein großes Potenzial, zur Nutzung alternativer Rohstoffe beizutragen. Beides wird im Folgenden ausgeführt.

Weißer und roter Biotechnologie bedienen sich biokatalytischer Verfahren. Katalyse bezeichnet die Änderung des Reaktionsverlaufs (Kinetik) durch einen Katalysator. Dieser senkt die für den Ablauf der Reaktion notwendige Aktivierungsenergie. Dabei wird der Katalysator selbst nicht verbraucht. Die Biokatalyse bezeichnet entsprechend die Beschleunigung einer (bio)chemischen Reaktion durch Enzyme oder ganze Zellen als biologische Katalysatoren. Enzyme bestehen aus Proteinen (Eiweißen). Einige Enzyme benötigen zudem sogenannte Cofaktoren (z.B. Metalle), die an das Enzym gebunden sein müssen, um dessen Aktivität zu entfalten. Die Biotransformation<sup>645</sup> ist eine der Schlüsselfunktionen von Organismen und dient zum Aufbau (Biosynthese) oder Abbau von Biomasse unter Bildung von Metaboliten (Stoffwechselprodukten). Zudem trägt sie zur Entgiftung toxischer oder xenobiotischer (in der belebten Natur nicht vorkommender) Stoffe bei. Die Einzelschritte werden von Enzymen katalysiert. In der Biotechnologie versteht man unter Biotransformation meist Biokatalyse, d.h. die Umwandlung natürlicher oder synthetischer Vorstufen in Produkte mit wertvollen Eigenschaften.

### III.3.1. Charakteristika der Biokatalyse

Die Biokatalyse zeichnet sich vor allem durch die hohe Selektivität<sup>646</sup> der Reaktion aus. Unter Selektivität im chemischen Sinne wird – bei mehreren möglichen Reaktionsprodukten – die Bevorzugung einer bestimmten Reaktion verstanden. Ein weiteres Charakteristikum der Biokatalyse sind die niedrigen Reaktionstemperaturen vor allem im Bereich von 20°C-45°C sowie die Umsetzung bei Umgebungsdruck. Die Kombination dieser Eigenschaften ermöglicht die Herstellung von Produkten, die chemisch nicht, nur mit sehr hohem Aufwand oder hohen Risiken hergestellt werden können.

Biokatalysatoren sind im Allgemeinen leicht zu entsorgen oder sogar biologisch abbaubar. Ein wichtiger Aspekt, der sich als Vorteil oder als Nachteil auswirken kann, ist, dass die meisten der biokatalysierten Reaktionen in Wasser stattfinden. Dies führt zwar zur Reduzierung der Menge an organischen Lösungsmitteln, die Aufarbeitung wird aber oft sehr aufwendig, da Wasser eine hohe Verdampfungsenthalpie (notwendige Energie um Wasser zu verdampfen) hat und die erhaltenen Produkte meist hochverdünnt vorliegen. Die Aufarbeitung macht deshalb bis zu 80% der Produktionskosten aus. Entsprechend ihres Ursprungs basieren die Ausgangsstoffe biokatalytischer Reaktionen zumeist auf nachwachsenden Rohstoffen. Die Selektivität und Möglichkeit der Verarbeitung nachwachsender Rohstoffe der Biokatalyse eröffnen für die Verfahren der chemischen Industrie ganz neue Prozessfenster. „Unabhängig von diesen Problemen stellen enzymatische Systeme eine wertvolle Inspiration und Motivation bei der Entwicklung effizienter künstlicher Katalysatoren dar“<sup>647</sup> (s. Kapitel III.5).

645 Die Begriffe Biokatalyse, Biokonversion und Biotransformation werden oft synonym verwendet. „Die Terminologie einer biokatalytischen Umsetzung als Fermentation, Biotransformation oder Enzymkatalyse ist fließend. Alle Verfahren können auf einem einzigen oder einer Folge mehrerer enzymatischer Schritte beruhen“.

646 Selektivität: Die von Biokatalysatoren erreichbare Selektivität erstreckt sich über verschiedene Arten der Selektivität. Dazu gehören die Chemoselektivität (eine von mehreren möglichen Transformationen wird bevorzugt), Regioselektivität (eine bestimmte Region des Moleküls wird bevorzugt), Stereoselektivität / Diastereoselektivität (bei racemischen Edukten wird bevorzugt ein Produkt gebildet) sowie die Enantioselektivität (aus prochiralen Edukten entsteht selektiv ein bestimmtes Produkt).

647 Limberg, Christian: Landtag NRW (Hg.): Gutachten „Biomimetische Chemie“ für die Enquete-Kommission II des Landtags von Nordrhein-Westfalen. (2014).

Bei Biokatalysatoren wird unterschieden zwischen ganzen Zellen und isolierten Enzymen. Der Vorteil von ganzen Zellen ist ihre Robustheit. So kann bspw. der verwendete Cofaktor vom in der Zelle vorhandenen Enzym in der Zelle regeneriert werden. Auch zeigen ganze Zellen meist eine hohe Aktivität und sind leichter zu handhaben. Nachteile dieser Ganzzellkatalyse liegen in der hohen Produktion an Biomasse und den oft niedrigen einzusetzenden Substratkonzentrationen. Auch sind viele Zellen instabil bei sehr hohen Temperaturen oder sehr niedrigen pH-Werten.

Die Vorteile isolierter Enzyme liegen in ihrer sehr hohen Selektivität und ihrer einfachen Verwendung. Sie können mit höheren Substratkonzentrationen verwendet werden und sind teilweise leicht aufzureinigen bzw. vom Produkt zu trennen. Ein Recycling notwendiger Cofaktoren ist bei isolierten Enzymen nicht so einfach möglich, außerdem sind sie ebenfalls temperatur- und pH-Wert-empfindlich.<sup>648</sup>

### III.3.2 Bedeutung der Biotechnologie

#### III.3.2.1 Marktstruktur

Tabelle 22 zeigt eine Übersicht zur Unternehmenslandschaft der Biotechnologiebranche in Deutschland. Aufgeführt sind neben dedizierten Biotechnologiefirmen (Unternehmen, die sich hauptsächlich mit Biotechnologie beschäftigen) auch solche, die Biotechnologie lediglich aktiv anwenden. Die Zahlen beider Arten von Firmen und auch die Anzahl der beschäftigten Mitarbeiter sind seit 2008 kontinuierlich gestiegen.

Tabelle 22: Eckdaten der Biotechbranche in Deutschland<sup>649</sup>

Eckdaten der Unternehmenslandschaft	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Anzahl dedizierter Biotechnologieunternehmen	496	501	531	538	552	565	570
Anzahl sonstiger biotechnologisch aktiver Unternehmen	91	92	114	125	126	128	130
Mitarbeiter (dedizierte Biotechnologieunternehmen)	14.360	14.450	14.950	15.480	16.300	17.430	16.950
Mitarbeiter (sonstige biotechnologisch aktive Unternehmen)	15.210	15.520	16.650	17.000	17.570	17.760	18.450
Umsatz* (dedizierte Biotechnologieunternehmen)	2,01 Mrd.	2,19 Mrd.	2,18 Mrd.	2,37 Mrd.	2,62 Mrd.	2,90 Mrd.	2,86 Mrd.
FuE Aufwendungen (dedizierte Biotechnologieunternehmen)	1,05 Mrd.	1,06 Mrd.	1,05 Mrd.	1,02 Mrd.	975 Mio.	934 Mio.	899 Mio.

\*Alle Angaben in Euro

#### III.3.2.2 Relevanz für NRW

NRW gehört neben Bayern und Baden-Württemberg zu den drei wichtigsten Bundesländern für die Biotechnologie. Bayern ist mit über 100 Biotechnologieunternehmen der wichtigste Biotechnologiestandort in Deutschland. Während in Bayern und Baden-Württemberg vor allem rote Biotechnologie vorherrscht, ist NRW stark in weißer Biotechnologie (Infos s. auch BIO.NRW). Die Anzahl

648 vgl. Jiménez-González; Constable, David: Green Chemistry and Engineering: A Practical Design Approach. John Wiley & Sons (2011). ISBN 978-0-470170-87-8.

649 BIOCOM AG; biotechnologie.de (Hg.): Die deutsche Biotechnologie-Branche 2014 – Daten & Fakten. (2014).

an dedizierten Biotechunternehmen ist in NRW in den letzten Jahren kontinuierlich angestiegen. Bayern und Baden-Württemberg verbleiben konstant auf einem noch höheren Niveau.<sup>650</sup>

Auch die Politik in NRW hat die Bioökonomie als wichtigen Pfeiler in ihre Innovationsstrategie aufgenommen. Das Cluster BIO.NRW<sup>651</sup>, welches im Auftrag des Ministeriums für Innovation, Wissenschaft und Forschung (MIWF) tätig ist, führt Akteure aus Unternehmen und Forschung im Bereich Biotechnologie zusammen. Auch das Cluster Industrielle Biotechnologie (CLIB2021)<sup>652</sup> findet bundesweit Beachtung. Des Weiteren wurden durch das Cluster Exzellenz.NRW Leitmärkte<sup>653</sup> definiert und der Anteil NRWs an der bundesweiten Bioökonomiestrategie ausgelotet.<sup>654</sup>

### III.3.2.3 Umsatz und FuE-Ausgaben

Die Bedeutung der unterschiedlichen Biotechnologiesparten wird in Abbildung 65 deutlich. So hat sich im Bereich der weißen und roten Biotechnologie in den Jahren 2008 bis 2012 der Umsatz vervierfacht, während er bspw. im Bereich der Agrarbiotechnologie nahezu konstant geblieben ist.

2012 lag der Forschungsaufwand bei 25 bis 30% vom Umsatz. Dies ist verglichen mit üblichen Zahlen in der Chemie recht hoch (ca. 1 bis 15% je nach Geschäftsgebiet). Die FuE-Aufwendungen liegen demnach auf einem hohem Niveau bezogen auf den Umsatz und sind im Betrachtungszeitraum ungefähr konstant geblieben.

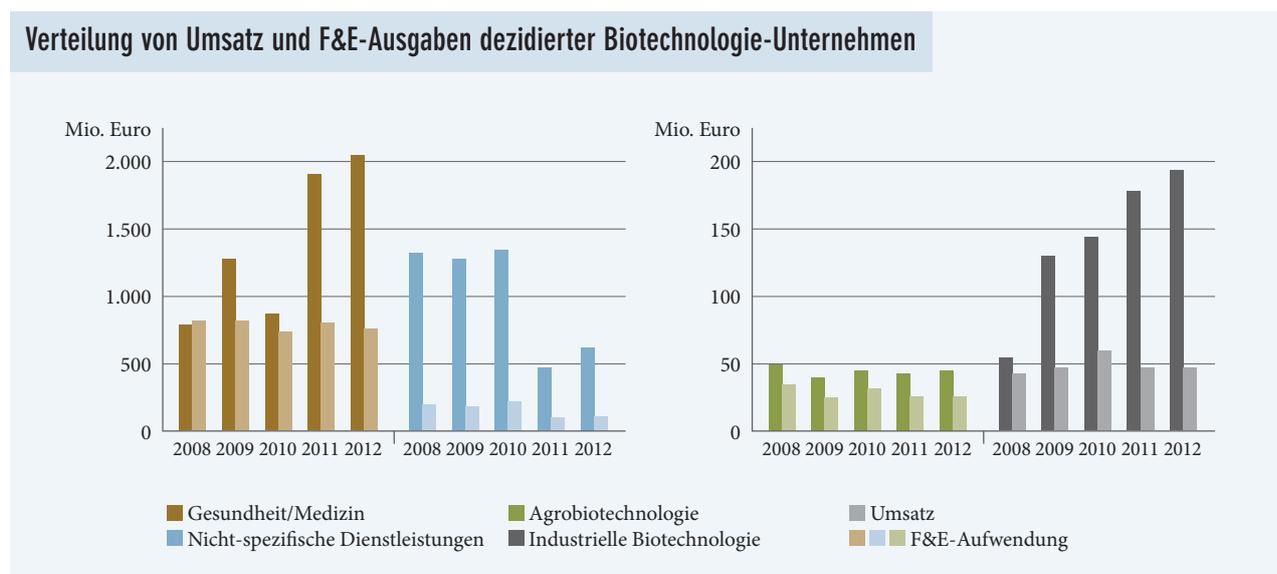


Abbildung 65: Verteilung von Umsatz und FuE-Ausgaben dedizierter Biotechnologieunternehmen<sup>655</sup>

Die in Abbildung 65 gezeigten Umsatzsteigerungen verdeutlichen, dass die biotechnologisch hergestellten Produkte im Bereich Gesundheit/Medizin sowie im Bereich der Industriellen Biotechnologie zunehmend gefragt sind, allerdings immer noch einen eher kleinen Anteil am Gesamtumsatz der Branche ausmachen. Aktuell liegt der Anteil biotechnologischer Produkte am Chemieumsatz bei ca. 10%.

650 ebd.

651 BIO.NRW: Das Cluster BIO.NRW unter: <http://www.bio.nrw.de/>. Online am 20.10.2014.

652 CLIB2021 – Cluster Industrielle Biotechnologie e.V. (Hg.): CLIB2021 – Biotech. (2013/2014).

653 vgl. ExzellenzNRW: Die großen gesellschaftlichen Herausforderungen unserer Zeit und die Leitmärkte der Zukunft unter: <http://www.exzellenz.nrw.de/leitmaerkte/>. Online am 20.10.2014.

654 vgl. Ministerium für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen: Bioökonomie in NRW unter: <http://www.wissenschaft.nrw.de/forschung/fortschritt-nrw/grosse-gesellschaftliche-herausforderungen-bewaeltigen/multitalent-biotechnologie/biooekonomie-in-nrw/>. Online am 20.10.2014.

655 BIOCOM AG; biotechnologie.de (Hg.): Die deutsche Biotechnologie-Branche 2013 – Daten & Fakten. (2013).

Die Bedeutung der Biotechnologie als Verfahrensgeber und Stofflieferant der chemischen Industrie steigt stetig. Zahlreiche Studien<sup>656,657</sup>, Roadmaps<sup>658,659</sup>, Diskussionspapiere<sup>660</sup> und ausgelobte Forschungsprogramme sowie Clusterstrukturen aus den letzten Jahren beschäftigen sich mit dem Potenzial der Biotechnologie und ihrer Bedeutung für die biobasierte Wirtschaft.<sup>661,662,663,664</sup> Eine Studie zur weißen Biotechnologie des Fraunhofer ISI wird zurzeit hierzu durchgeführt. Dort sollen u.a. der aktuelle Wissens- und Diskussionsstand zu wissenschaftlich-technischen, ökonomischen sowie Markt- und nachfrageseitigen Aspekten dokumentiert werden.<sup>665</sup>

### III.3.3 Beispiele biotechnologischer Produktion

Im weiteren Verlauf wird anhand von industriell wichtigen Produkten die Relevanz biotechnologischer Verfahren in der chemischen und pharmazeutischen Industrie dargelegt. Denn „in der organischen Synthese spielt die Biokatalyse eine zunehmend wichtige Rolle.“<sup>666</sup> Es wird auf das Potenzial der Biotechnologie sowohl bei der Herstellung von Grundchemikalien als auch zur Herstellung von Feinchemikalien eingegangen.

#### III.3.3.1 Geschichte

Biotechnologie ist keine neue Erfindung. Vorläufer der heutigen Technologie sind durch Funde aus der Zeit tausende Jahre vor Christi Geburt belegt. Die Ursprünge entwickelten sich zunächst aus der Herstellung und Aufbewahrung von Lebensmitteln. So gehört Brotbacken mit Hefeteig, die Weiterverarbeitung von Obstsaften zur Weinherstellung, die Käseherstellung sowie das Bierbrauen zu den ältesten bekanntesten Prozessen der Biotechnologie. Diese fanden zunächst ohne Kenntnis der ablaufenden mikrobiellen Prozesse statt und wurden über die Jahre lediglich hinsichtlich der Ausbeute optimiert.

Wichtige Meilensteine in der Entwicklung der modernen Biotechnologie sind die Untersuchungen durch Louis Pasteur Ende des 19. Jahrhunderts, die maßgeblich zur Entwicklung von Steriltechniken geführt haben, sowie die zufällige Entdeckung des Penicillins durch Alexander Fleming 1928. Die industrielle Biotechnologie hat ihre Anfänge Mitte des 20. Jahrhunderts, als Antibiotika, Aminosäuren und organische Säuren erstmals im großen Maßstab mikrobiell hergestellt wurden. Einen wei-

656 Pflaum, Hartmut et al.: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI); Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits-, und Energietechnik (UMSICHT) (Hg.): Potenzialstudie „Anwendungspotenziale der Bioverfahrenstechnik (weiße Biotechnologie) in Nordrhein-Westfalen“ - Abschlussbericht – Ziel, Inhalt und Ergebnisse der Studie. (2008).

657 BIOCOM AG; biotechnologie.de (Hg.): Die deutsche Biotechnologie-Branche 2014 – Daten & Fakten. (2014).

658 Beispielsweise: Capgemini Consulting; Ministerium für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen (MIWF) (Hg.): Roadmap zur Errichtung einer Knowledge-Based Bio-Economy – Nordrhein-Westfalen auf dem Weg in die Umsetzung. (2010).

659 Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR); Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV); Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU); Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (Hg.): Roadmap Bioraffinerien im Rahmen der Aktionspläne der Bundesregierung zur stofflichen und energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe. (2012b).

660 Bühler, Bruno; Hollmann, Frank; Junker, Björn et al.: Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (DECHEMA) (Hg.): Diskussionspapier: Biotechnologie der Schlüssel zur Bioökonomie. (2014).

661 Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Hg.): Nationale Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030 – Unser Weg zu einer bio-basierten Wirtschaft. (2010).

662 Flaschel, E.: Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (DECHEMA) (Hg.): Positionspapier: Weiße Biotechnologie: Chancen für Deutschland. (2004).

663 Wydra, Sven: Weiße Biotechnologie – Stand und Perspektiven der industriellen Biotechnologie für nachhaltiges Wirtschaften unter: <https://www.tab-beim-bundestag.de/de/untersuchungen/uI0023.html> (2010 – 2013). Online am 02.07.2014.

664 Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Hg.): Weiße Biotechnologie – Chancen für eine bio-basierte Wirtschaft. (2012).

665 Persönliches Telefonat mit Sven Wydra, 10.06.2014.

666 Perrey, Karen et al.: Landtag NRW (Hg.): Gutachten „Innovationsleistungsfähigkeit der chemischen Industrie in NRW – Katalyse“ für die Enquete-Kommission II des Landtags von Nordrhein-Westfalen. (2014).

teren Meilenstein stellt die Entwicklung gentechnischer Methoden seit den 1980er Jahren dar. Diese ermöglicht die gezielte genetische Anpassung der eingesetzten Organismen für den industriellen Einsatz.<sup>667</sup> Wildtypstämme sind optimal an ihren Lebensraum angepasst, nicht aber für den industriellen Einsatz zur Herstellung wertvoller Produkte. Mithilfe der genetischen Modifizierung lassen sich bspw. Stoffwechselwege soweit modifizieren, dass das gewünschte Produkt in ausreichend großer Menge vorliegt. Diese wissensbasierte und gezielte Anwendung macht die Gentechnik hier zu einem wertvollen Instrument.

Die heutzutage wirtschaftlich bedeutendsten Produkte der weißen Biotechnologie sind in Tabelle 23 dargestellt.

Tabelle 23: Produkte der weißen Biotechnologie, die im Tonnenmaßstab hergestellt werden<sup>668</sup>

Produkt	Weltjahresproduktion (t/a)	Anwendung
<b>Säuren</b>		
Zitronensäure	1.000.000	Lebensmittel, Waschmittel
Essigsäure	190.000	Lebensmittel
Gluconsäure	100.000	Lebensmittel, Textil, Metall
Itaconsäure	15.000	Kunststoff, Papier, Klebstoff
L-Apfelsäure	100	Säuerungsmittel
<b>Aminosäuren</b>		
L-Glutamat	2.500.000	Geschmacksverstärker
L-Lysin	1.500.000	Futtermittelzusatz
L-Threonin	230.000	Futtermittelzusatz
L-Methionin	600.000	Futtermittelzusatz
L-Phenylalanin	80.000	Aspartam, Medizin
L-Tryptophan	50.000	Ernährung, Futtermittel
L-Arginin	10.000	Medizin, Kosmetik
L-Valin	5.000	Infusionslösungen
<b>Lösungsmittel</b>		
Bioethanol	18.500.000	Energieträger, Lösungsmittel
<b>Antibiotika</b>		
Penicilline	45.000	Medizin
Cephalosporine	30.000	Medizin
Tetracycline	5.000	Medizin
<b>Biopolymere</b>		
Polymilchsäure	140.000	Verpackung
Xanthan	40.000	Erdölförderung, Lebensmittel
Dextran(-derivate)	2.600	Blutersatzstoff
<b>Vitamine</b>		
Ascorbinsäure (Vitamin C)	100.000	Pharma, Lebensmittel
L-Sorbose	50.000	Pharma, Lebensmittel
Riboflavin (B2)	30.000	Wirkstoff, Futterzusatz
<b>Kohlenhydrate</b>		
Glucose*	20.000.000	Flüssigzucker
High Fructose Syrup*	8.000.000	Getränke, Ernährung
Fructooligosaccharide*	10.500	Präbiotikum
Cyclodextrine*	5.000	Kosmetik, Pharma, Lebensmittel

(\*enzymatisch hergestellt)

667 vgl. Sahn, Hermann; Antranikian, Garabed; Stahmann, Klaus-Peter; Takors, Ralf: Industrielle Mikrobiologie. Springer-Verlag (2013). ISBN 978-3-827430-39-7.

668 Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Hg.): Weiße Biotechnologie – Chancen für eine bio-basierte Wirtschaft. (2012).

Im Folgenden wird das Potenzial biotechnologischer Verfahren anhand von Beispielen einzelner Stoffgruppen näher erläutert. Die Verfahren unterscheiden sich unter anderem nach den Produktmengen. Biotechnologische Verfahren werden insbesondere dort eingesetzt, wo die chemischen Verfahren aufwändiger wären.

### III.3.3.2 Biotechnologie im Alltag

Ein Beispiel für ein biotechnologisch hergestelltes Produkt, welches im Alltag biotechnologisch (biokatalytisch) wirkt, sind Waschmittelenzyme. Diese werden den anderen Waschmittelkomponenten zugesetzt, um biokatalytisch Flecken zu entfernen, welche bei niedrigen Temperaturen und pH-Werten sonst nicht zu entfernen wären. Tabelle 24 zeigt eine Übersicht von häufig verwendeten Waschmittelenzymen und ihren Wirkweisen.

Tabelle 24: Enzyme, die in Waschmitteln verwendet werden<sup>669</sup>

Enzym	Relevante Verschmutzung
Proteasen	Blut, Milch, Kakao, Gras, Ei
Amylasen	Saucen, Stärke
Cellulasen	Partikulärer Schmutz, Pigmente, Staub, Kosmetik
Lipasen	Hautfett (Hemdkragen), fettbasierter Lippenstift
Mannanasen	Guarkernmehl-enthaltende Lebensmittel: Dressing, Eiscreme
Pectinasen	Pectinhaltige Lebensmittel: Konfitüre, Früchte

Zur Herstellung dieser Enzyme werden vor allem Mikroorganismen verwendet, die die Enzyme ins Nährmedium extrahieren, da dies die spätere Abtrennung von der Biomasse und damit die Aufarbeitung erleichtert.<sup>670</sup>

### III.3.3.3 Zitronensäureherstellung

Die Herstellung von Zitronensäure ist ein Beispiel für einen etablierten biotechnologischen Prozess mit hoher Mengenbedeutung (vgl. Tabelle 23). Zitronensäure wird vor allem in der Getränke- und Lebensmittelindustrie als Geschmacks- oder Konservierungsmittel eingesetzt. Weitere Anwendung findet sie in der Pharmaindustrie als Komplexbildner oder in Waschmitteln als Wasserenthärter. Die Herstellung erfolgt seit Mitte des 20. Jahrhunderts mit dem Pilz *Aspergillus niger* in Flüssigkulturen. So werden hohe Ausbeuten von bis zu 140 g/l erreicht.<sup>671</sup> Die biotechnologische Herstellung hat das frühere Extraktionsverfahren aus Zitrusfrüchten vollständig ersetzt, da dieses nur geringe Ausbeuten bei hohem Aufwand ermöglichte. Daneben garantiert die biotechnologische Prozessroute eine gleichbleibende Produktqualität.

### III.3.3.4 Aminosäureproduktion

Die biotechnologische Herstellung von Aminosäuren ist ein Beispiel für einen bereits sehr gut etablierten Prozess der Ganzzellkatalyse zur Herstellung von Feinchemikalien. Historisch wurde mit der Aminosäureproduktion die Ära der industriellen Biotechnologie eingeläutet. Das Beispiel verdeutlicht welche Selektivitätsvorteile biotechnologische Verfahren im Gegensatz zu klassisch-chemischen haben können.

669 vgl. Sahn, Hermann; Antranikian, Garabed; Stahmann, Klaus-Peter; Takors, Ralf: Industrielle Mikrobiologie. Springer-Verlag (2013). ISBN 978-3-827430-39-7.

670 vgl. ebd.

671 vgl. ebd.

Aminosäuren sind die Grundbausteine für Proteine und damit lebensnotwendig. Nur einige der Aminosäuren können vom (menschlichen) Organismus selber gebildet werden. Die anderen müssen über die Nahrung zugeführt werden. Herausragende wirtschaftliche Bedeutung haben Aminosäuren deshalb in der Futtermittel- und Nahrungsmittelindustrie, da sie eine Effizienz der Futtermittelverwertung steigern sowie die Kosten und Stickstoffausscheidungen reduzieren.<sup>672</sup> Ein Aminosäuremolekül kann abhängig von der räumlichen Orientierung ihrer Aminogruppe in der L- und D-Form vorliegen. Dabei können die D-Aminosäuren in der Regel von Zellen nicht verwertet werden oder wirken sogar toxisch. Bei der chemischen Synthese entstehen die L- und D-Form in gleicher Weise, so dass die D-Form katalytisch in die L-Form überführt oder aufwendig entfernt werden muss. Aus diesem Grund werden die meisten Aminosäuren heutzutage biotechnologisch hergestellt.

Die mengenmäßig bedeutendsten Aminosäuren sind L-Methionin und L-Lysin in der Futtermittelindustrie sowie L-Glutamat als Geschmacksverstärker für die Nahrungsmittelindustrie.

Methionin hingegen wird überwiegend chemisch als Gemisch der D- und L-Form (Racemat) hergestellt, da der Körper bei dieser Aminosäure beide Formen verwenden kann und die chemische Herstellung der biotechnologischen aufgrund der hohen Mengen (Skaleneffekte) wirtschaftlich überlegen ist. Der Marktführer in diesem Bereich ist Evonik<sup>673</sup>. Evonik hat erst vor wenigen Jahren eine weitere Anlage zur Herstellung von DL-Methionin in Singapur eröffnet und den Bereich noch ausgebaut.<sup>674</sup>

Als Geschmacksverstärker für die Nahrungsmittelindustrie wird L-Glutamat in großen Mengen hergestellt (siehe auch Tabelle 23). Dazu werden vor allem die Bakterienstämme *Corynebacterium glutamicum* und *Escherichia coli* verwendet.

Die Biosynthese von Aminosäuren umfasst mehrere enzymatische Schritte. Hier ist der Einsatz von Ganzzellkatalysatoren wie *C. glutamicum* deshalb vorteilhaft, da diese den gesamten nötigen Stoffwechselweg besitzen und leicht vermehrt werden können. Eine Enzymkatalyse hingegen wäre in diesem Fall mit mehreren Syntheschritten mit großem apparativen Aufwand und hohen Verlusten von einem in den nächsten Schritt verbunden. Durch gezielte Mutation konnten diese Produktionsstämme hin zu einer Überproduktion der jeweiligen Aminosäure optimiert werden. Dies setzt Kenntnisse der jeweiligen molekularen Mechanismen voraus, da zellinterne Regulationsmechanismen, die eine Überproduktion im Normalfall verhindern würden, überwunden werden müssen.<sup>675</sup>

### III.3.3.5 Antibiotikaherstellung

Die Antibiotikaherstellung ist ein Beispiel für Enzymkatalysen zur Herstellung von Feinchemikalien. Es handelt sich dabei um ein seit langem etabliertes Verfahren.

Antibiotika haben im Ursprungsorganismus keine essentiellen Funktionen und werden als Sekundärstoffe bezeichnet. Die meisten dieser Wirkstoffe weisen eine sehr komplexe Struktur auf und können so auf chemischem Weg gar nicht oder nur mit einem sehr hohen Aufwand synthetisiert werden. Deshalb werden sie zumeist biotechnologisch hergestellt.<sup>676</sup> Das bekannteste Beispiel für ein Antibiotikum ist wohl Penicillin, welches per Zufall im Jahre 1928 von Alexander Fleming entdeckt wur-

672 vgl. ebd.

673 Evonik Industries: Evonik plant neue Methioninanlage in Singapur (20.10.2010).

674 ebd.

675 vgl. Sahn, Hermann; Antranikian, Garabed; Stahmann, Klaus-Peter; Takors, Ralf: Industrielle Mikrobiologie. Springer-Verlag (2013). ISBN 978-3-827430-39-7.

676 vgl. ebd.

de. Allerdings sind heute zahlreiche bakterielle Krankheitserreger resistent gegen das ursprüngliche Penicillinmolekül. Durch eine Modifikation der Molekülstruktur kann die Resistenz umgegangen und damit die antibiotische Wirksamkeit wiederhergestellt werden. Hierfür wird z.B. das Enzym Penicillinacylase (auch Penicillinamidase, Penicillinamidohydrolase) eingesetzt, das von verschiedenen Mikroorganismen gebildet wird und die Abspaltung des Acylrestes von Penicillin katalysiert. Die gebildete 6-Aminopenicillansäure ist Ausgangssubstrat für die Synthese einer Vielzahl halbsynthetischer -Lactamantibiotika (zeigen in ihrer Struktur alle einen viergliedrigen sogenannten Lactamring auf).<sup>677</sup> Eine Vielzahl hochwirksamer Antibiotika kann so auf Basis eines Grundelements hergestellt werden.

### III.3.3.6 Biopolymere

Polyhydroxyalkanoate (PHA) kommen als intrazelluläre Speicherstoffe in vielen Bakterien in unlöslicher Form vor. Sie haben eine steigende industrielle Bedeutung als Ausgangsstoffe für biologisch abbaubare Materialien (vgl. Werkstoffkapitel). Bei der biotechnologischen PHA-Herstellung handelt es sich um einen innovativen aber bereits im industriellen Maßstab vorhandenen Ansatz zur Herstellung von Grundchemikalien. Die Autoren des Lehrbuchs „Industrielle Biotechnologie“ gehen von einer Bedeutungssteigerung der Biopolymere aus. Sie erwarten zudem eine weitere Verzahnung von biotechnologischen und chemischen Prozessen in diesem Bereich. Außerdem sehen sie ein Potenzial zur Ausbeutesteigerung bei der Verwendung zellfreier (enzymatischer) Systeme.<sup>678</sup>

PHA wird zurzeit überwiegend durch biotechnologisch optimierte Bakterien hergestellt. Unter optimalen Bedingungen können die Polymere 95% des Trockengewichts bilden.<sup>679</sup> Andere biotechnologische Ansätze werden zurzeit entwickelt. Dazu gehört die Nutzung von Treibhausgasen (z.B. CO<sub>2</sub>) als Rohstoff durch die gezielte Kombination verschiedener Organismenarten, bei denen das Stoffwechselprodukt der ersten Art den Nährstoff der zweiten bildet. Eine weitere Möglichkeit ist die Herstellung in transgenen Pflanzen. Dort gibt es vielversprechende Ansätze. Von der industriellen Produktion ist diese Art der Herstellung aber noch weit entfernt<sup>680</sup>. Eine weitere neue Strategie beinhaltet die Nutzung von Mikroalgen im Bioreaktor. Hierbei wird eine Konkurrenzsituation um Ackerfläche vermieden. Erste Versuche zur Herstellung von PHAs ergaben bis zu 10% des Zell Trockengewichts.<sup>681</sup>

### III.3.3.7 Vitaminherstellung

Ein sehr gutes Beispiel für eine Ganzzellkatalyse zur Herstellung von Feinchemikalien und die Ablösung eines langjährig etablierten chemischen Prozesses durch ein biotechnologisches Verfahren ist die Herstellung von Vitamin B<sub>2</sub> (Riboflavin). Erfolgte die Herstellung früher in einem vierschriftigen<sup>682</sup> Syntheseprozess, ist heute lediglich noch ein Fermentationsschritt notwendig. Hierfür wurden zwei unabhängige biotechnologische Verfahren mit unterschiedlichen Mikroorganismen entwickelt.<sup>683</sup> Ein Vergleich des chemischen Verfahrens mit den beiden biotechnologischen Verfahren zeigt, dass die biotechnologischen Verfahren insgesamt 75% weniger fossile Rohstoffe benötigen als das konventionelle Verfahren. Die Gesamtemissionen in Luft (-50%) und Wasser (-66%) sind eben-

677 Lexikon der Chemie: Penicillinacylase unter: <http://www.spektrum.de/lexikon/chemie/penicillinacylase/6779> (1998). Online am 02.07.2014.

678 vgl. Sahn, Hermann; Antranikian, Garabed; Stahmann, Klaus-Peter; Takors, Ralf: Industrielle Mikrobiologie. Springer-Verlag (2013). ISBN 978-3-827430-39-7.

679 vgl. Freudendahl, Diana; Langner, Ramona; Kohlhoff, Jürgen; Reschke, Stefan: Biokunststoffe aus Polyhydroxyalkanoaten. In: Werkstoffe in der Fertigung (2013).

680 vgl. Neubauer, Katja: Universität Rostock (Hg.): Isolierung eines Biopolymers aus gentechnisch veränderten Pflanzen. (2009).

681 vgl. ebd.

682 vgl. K.-P. Stahmann á J. L. Revuelta á H. Seulberger: Three biotechnical processes using *Ashbya gossypii*, *Candida famata*, or *Bacillus subtilis* compete with chemical riboflavin production. In: Applied Microbiology and Biotechnology (2000), 53, S. 509–516.

683 vgl. Sahn, Hermann; Antranikian, Garabed; Stahmann, Klaus-Peter; Takors, Ralf: Industrielle Mikrobiologie. Springer Spektrum (2013). ISBN 978-3-8274-3039-7.

falls deutlich geringer. Der Wasserverbrauch ist allerdings doppelt so hoch. Die Herstellungskosten haben sich halbiert.<sup>684</sup>

### III.3.3.8 Synthese sekundärer Pflanzenstoffe

Das folgende Beispiel der biotechnologischen Artemisinin-Herstellung zeigt im Gegensatz zu den bisherigen etablierten einen sehr innovativen biotechnologischen Prozess mit einem hohen wirtschaftlichen Potenzial des Artemisinin als pharmazeutischer Wirkstoff gegen Malaria.

Sekundäre Pflanzenstoffe (Sekundärmetaboliten) werden von Pflanzen in ihrem Stoffwechsel synthetisiert. Sie werden nur in speziellen Zelltypen hergestellt und grenzen sich von primären Pflanzenstoffen dadurch ab, dass sie für die Pflanze nicht lebensnotwendig sind. Artemisinin ist ein wichtiger sekundärer Pflanzenstoff, der zur Bekämpfung von Malaria eingesetzt wird. In der Natur kommt er im einjährigen Beifuß (*Artemisia annua*) vor. Die Gewinnung erfolgt durch Lösungsmittlextraktion und anschließender Umkristallisation. Der Gehalt in der Pflanze ist sehr gering, weshalb die Versorgung mit Artemisinin pflanzlichen Ursprungs sehr begrenzt ist, was zu Engpässen und Preissteigerungen führt.<sup>685</sup> Auf biotechnologischem Wege kann Artemisinin seit Anfang 2014 ebenfalls hergestellt werden. Dies ist deutlich einfacher und kostengünstiger und somit ein Meilenstein im Bereich der Malariamedizin. Die Arbeitsgruppe um Jay Kiesling an der Universität von Berkeley in den USA arbeitet an einer Biosynthese in *Saccharomyces cerevisiae* (Bierhefe).<sup>686</sup> Der deutsche Chemiker Peter Seeberger und sein Kollege François Lévesque am Max-Planck-Institut für Kolloidforschung in Potsdam stellten im Januar 2012 ebenfalls ein neues einfaches Verfahren zur Gewinnung von Artemisinin aus Artemisininsäure vor.<sup>687</sup> Diese Vorstufe lässt sich entweder in größeren Mengen aus Beifuß gewinnen oder ebenfalls biotechnologisch in Hefen herstellen.<sup>688</sup> Dieser Prozess zeigt ähnlich wie Zitronensäure die Vorteile der Biotechnologie gegenüber der ursprünglichen Extraktion aus pflanzlichen Rohstoffen, da größere Produktmengen in einem definierten Prozess und damit kostengünstiger zugänglich werden.

Die aufgeführten Beispiele für industrielle Biokatalyseverfahren, seien sie ganzzellkatalysiert oder enzymkatalysiert, geben einen Überblick über die vielfältigen Anwendungsbereiche dieser Technologie. Die Anwendungsbreite der molekularbiologischen Methoden wird laufend durch weitere Biokatalysatoren oder das Verständnis von Regulationswegen erweitert. Die chemische Industrie hat die Bedeutung dieser Technologie längst erkannt und ist sich des Potenzials als ökonomisch konkurrenzfähige Technologie bewusst. Biotechnologische Verfahren finden generell immer dort Anwendung, wo sie dem chemischen Verfahren überlegen sind (bspw. durch geringeren Aufwand, höhere Selektivität etc.). Der früher bestehende Konflikt Biologie versus Chemie gehört in den meisten Unternehmen inzwischen der Vergangenheit an und stellt keinen Widerspruch mehr dar<sup>689</sup>. Dies spiegelt sich auch in der biotechnologischen Marktstruktur Deutschlands wider (vgl. Kapitelabschnitt Marktstruktur).

684 vgl. ebd.

685 vgl. Paddon, C. J.; Westfall, P. J.; Pitera, D. J.; Benjamin, K.; Fisher, K.; McPhee, D.; Leavell, M. D.; Tai, A.; Main, A.; Eng, D.; Polichuk, D. R.; Teoh, K. H.; Reed, D. W.; Treynor, T.; Lenihan, J.; Jiang, H.; Fleck, M.; Bajad, S.; Dang, G.; Dengrove, D.; Diola, D.; Dorin, G.; Ellens, K. W.; Fickes, S.; Galazzo, J.; Gaucher, S. P.; Geistlinger, T.; Henry, R.; Hepp, M.; Horning, T.; Iqbal, T.; Kizer, L.; Lieu, B.; Melis, D.; Moss, N.; Regentin, R.; Secrest, S.; Tsuruta, H.; Vazquez, R.; Westblade, L. F.; Xu, L.; Yu, M.; Zhang, Y.; Zhao, L.; Lievense, J.; Covello, P. S.; Keasling, J. D.; Reiling, K. K.; Renninger, N. S.; Newman, J. D.: High-level semi-synthetic production of the potent antimalarial artemisinin. In: Nature (2013), 7446, S. 528–532.

686 vgl. ebd.

687 vgl. Lévesque, François; Seeberger, Peter H.: Kontinuierliche Synthese des Malariawirkstoffs Artemisinin. In: Angewandte Chemie (2012), 7, S. 1738–1741.

688 vgl. ebd.

689 Syldatk, Christoph; Hauer, Bernhard; May, Oliver: Biokatalyse in der chemischen IndustrieVAAM-Fachgruppe Biotransformationen. In: Biospektrum, 2.01.

### III.3.4 Potenzial biotechnologischer Verfahren zur Nutzung alternativer Rohstoffe

Im Folgenden wird das Potenzial biotechnologischer Verfahren im Hinblick auf die Nutzung neuartiger Rohstoffbasen beleuchtet.

Wie im Rohstoffkapitel bereits beschrieben, wird es zu einer Diversifizierung der Rohstoffbasis kommen. Das im Kapitel Bioraffinerien beschriebene Technologiekonzept ist eine Option auf diesen Wandel zu reagieren. Neben klassischen chemischen und verfahrenstechnischen Methoden, Biomasse aufzuschließen, kommen auch biotechnologische Verfahren zum Einsatz. Diese können nach den verwendeten Rohstoffen aufgegliedert werden. Dies geschieht analog der im Rohstoffkapitel dargelegten Systematik.

#### Biotechnologische Routen

Zur biotechnologischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe wird die Stoffwechselleistung von Mikroorganismen genutzt. Einer der am effektivsten nutzbaren Ausgangsstoffe ist der Zucker Glucose, der aktuell fast ausschließlich aus nachwachsenden Rohstoffen 1. Generation gewonnen wird. Bei allen anderen Rohstoffquellen (z.B. 2. und 3. Generation) müssen die enthaltenen Zucker zu Glucosederivaten umgewandelt werden. Diese Stoffwechselwege (z.B. für Synthesegas) sind im Vergleich zur direkten Verwendung von Glucose langsamer. Man spricht z.B. bei Anaerobiern vom sogenannten reversen Citratzyklus. Diese Wege sind aufwändiger als die direkte Nutzung von Glucose, welche bereits sehr gut erforscht ist.

#### III.3.4.1 Nutzung nachwachsender Rohstoffe 1. Generation

Wie im Rohstoffkapitel bereits beschrieben, zählen Feldfrüchte wie Zuckerrüben, Weizen, Mais, oder Raps, aus denen Zucker, Stärke, pflanzliche Öle etc. gewonnen werden können, zu den Rohstoffen der ersten Generation. Diese sind aktuell der wichtigste Rohstoff für biotechnologische Verfahren und werden in nahezu allen kommerziellen biotechnologischen Prozessen genutzt. Eine ihrer wichtigsten Gemeinsamkeiten ist es, dass sie auch als Lebensmittel verwendet werden können und so eine anderweitige Verwendung in einen Nutzungskonflikt führen kann.

Die Nutzung nachwachsender Rohstoffe 1. Generation bezeichnet die direkte Fermentation auf Basis zucker- bzw. stärkehaltiger und ölhaltiger Substrate. Als solche werden für aktuelle biotechnologische Prozessrouten Stärke, verschiedene Zucker sowie Fette und Öle eingesetzt, die aus Energiepflanzen gewonnen werden (vgl. Rohstoffkapitel) und von Enzymen und Zellen leicht umgesetzt bzw. verstoffwechselt werden können, da sie deren natürliches Substrat darstellen.

Glucose wird durch die enzymatische Spaltung von Saccharose sowie aus Mais- oder Kartoffelstärke hergestellt und ist mit einer Weltjahresproduktion von 20 Mio. t das wichtigste Zuckersubstrat. Die zur Spaltung eingesetzten Enzyme sind Amylasen, die in der Lage sind Stärke zu spalten. Sie werden meist in rekombinanten *Bacillus*-Stämmen produziert, aber auch Pilze wie *Aspergillus* kommen zum Einsatz.<sup>690</sup> Allerdings wird für die meisten industriellen Prozesse keine reine Glucose verwendet, sondern Abfallstoffe wie bspw. Melasse.

Daraus können dann Plattformchemikalien hergestellt werden, die in die chemische Wertschöpfungskette analog zu den heutigen petrochemischen Grundchemikalien eingespeist werden. Aus diesen Plattformchemikalien lässt sich eine Vielzahl interessanter Produkte fertigen. Die Fermentation

---

690 vgl. Sahn, Hermann; Antranikian, Garabed; Stahmann, Klaus-Peter; Takors, Ralf: Industrielle Mikrobiologie. Springer-Verlag (2013). ISBN 978-3-827430-39-7.

lässt sich am Beispiel des innovativen biotechnologischen Produkts Succinat skizzieren. Für Succinat wird eine steigende Bedeutung prognostiziert.

### Bernsteinsäure (Succinat)

Bernsteinsäure kann fermentativ mit rekombinanten *Escherichia coli* (*E. coli*)- oder *Saccharomyces cerevisiae*-Stämmen aus Glucose hergestellt werden. Bernsteinsäure ist ein natürlich vorkommender Metabolit im zentralen Stoffwechsel dieser Mikroorganismen. Verwendung findet die Bio-Bernsteinsäure in Kunststoffen wie Polyamiden und Polyestern.<sup>691</sup> Bei der Herstellung mit *E. coli* findet ein zweistufiger Fermentationsschritt statt. Zunächst wird unter Luftzufuhr das Wachstum der Mikroorganismen initiiert und anschließend unter Luftabschluss die Bernsteinsäure produziert. Dies ermöglicht den Erhalt hoher Zelldichten und hoher Produktivität, da das Produkt Bernsteinsäure seine eigene Produktion ansonsten hemmt. Bei der Herstellung mit Hilfe der Hefe *Saccharomyces cerevisiae* werden wenige Nebenprodukte wie Ethanol oder Glycerin gebildet. Auch die Aufarbeitung wird als Vorteil für die Hefe genannt. Beide Verfahren haben mit ca. 100 g/l eine für biotechnologische Verfahren hohe Ausbeute.<sup>692</sup>

*E. coli* wird seit Jahrzehnten als der meist eingesetzte Organismus der Biotechnologen für die rekombinante Herstellung natürlich vorkommender Stoffwechselprodukte genutzt und ist sehr gut erforscht. Die Technologiereife solcher direkten Fermentationen ist demnach sehr hoch und einige Verfahren sind kommerziell etabliert.

### III.3.4.2 Nutzung nachwachsender Rohstoffe 2. Generation

Analog zu der im Rohstofftext beschriebenen Klassifizierung basieren nachwachsende Rohstoffe 2. Generation auf Lignocellulose, die das Grundgerüst vieler Pflanzen darstellen. Wichtigster Vertreter dieser Stoffklasse ist Holz (vgl. ebenfalls Rohstoffkapitel). Kennzeichnend für diese Art der Nutzung ist die integrierte Fermentation.

Holzige Substanz besteht neben Cellulose und Hemicellulose zu einem nicht unerheblichen Teil aus Lignin. Lignin fällt als Abfallstoff bei der Holzverarbeitung und vor allem bei der Zellstoffherstellung an und wird zurzeit hauptsächlich als Ersatzbrennstoff<sup>693</sup> genutzt.

Kennzeichnend für die biotechnologischen Verfahren ist es, dass sie in der Lage sein können, auch solche (aufgrund ihrer Molekülstruktur und ihrer starken Verbundenheit zu anderen Stoffen) schwer zugänglichen Stoffe zu einer anderen stofflichen Nutzung zu führen. So kann bspw. durch enzymatische Hydrolyse der Abtrennungsgrad des Lignins aus der Cellulose bei der Zellstoffherstellung erhöht werden.<sup>694</sup> Auch ist es denkbar, Lignin biokatalytisch in chemisch schwer synthetisierbare Einheiten zu spalten<sup>695</sup>. Diese Ansätze haben allerdings eins gemein: Sie befinden sich noch im Entwicklungsstadium. Im BMELV<sup>696</sup> geförderten Projekt „Lignocellulose-Bioraffinerie“<sup>697</sup> werden chemische und biotechnologische Fragestellungen ganzheitlich betrachtet und z.B. die biotechnologische Nutzung der durch chemische Hydrolyse erhaltenen Zuckerfraktionen getestet. Hauptziel war

691 vgl. ebd.

692 vgl. ebd.

693 vgl. Bornscheuer, Uwe; Buchholz, Klaus; Seibel, Jürgen: Enzymatic Degradation of (Ligno)cellulose. In: Angewandte Chemie International Edition (2014), 41, S. 10876–10893.

694 vgl. Tipkötter, Nils: Optimierung und Scale-up der enzymatischen Hydrolyse inkl. Ligninabbau. In: CIT (2014), 9, S. 1514–1520.

695 vgl. ebd..

696 Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.

697 vgl. DECHEMA – Gesellschaft f. chemische Technik und Biotechnologie e.V.: Lignocellulose Bioraffinerie – Schlüsselkomponenten für biobasierte Produkte unter: <http://lignocellulose-bioraffinerie.de/>. Online am 07.10.2014.

neben der Errichtung einer Pilotanlage im chemisch-biotechnologischen Prozesszentrum (CBP)<sup>698</sup> am Standort des Chemieparks Leuna die Entwicklung neuer Prozessketten für biobasierte Produkte aus Lignin und den oben genannten Zuckerfraktionen.

### III.3.4.3 Nutzung von CO<sub>2</sub> und Synthesegas

Die Nutzung von Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) als Rohstoff ist chemisch mit großen Herausforderungen verbunden, da er thermodynamisch schwer zur Reaktion gebracht werden kann und dazu ein sehr hoher Energieeinsatz nötig ist. CO<sub>2</sub> liegt allerdings in großen Mengen als Industrieabgas vor und wird zudem durch Abgaben belegt.

Synthesegas bezeichnet industriell hergestellte Gasgemische, die hauptsächlich Kohlenstoffmonoxid (CO) und Wasserstoff (H<sub>2</sub>) in variierenden Verhältnissen enthalten. Synthesegas kann zudem aus Agrar- und Kunststoffabfällen erzeugt werden und fällt als Industrieabgas z.B. bei der Stahlproduktion an. Der Vorteil von Synthesegas liegt darin, dass viele kohlenstoffhaltige Stoffe daraus synthetisiert werden könnten.

Eine biotechnologische Nutzung industrieller Abgase bzw. von Synthesegas oder CO<sub>2</sub>-Strömen ist ein interessanter Ansatz zur Verwertung. Vorreiter auf dem Gebiet der CO<sub>2</sub>-Direktnutzung ist das neuseeländische Unternehmen LanzaTech. Dort werden durch direkte Fermentation mit Clostridien Plattformchemikalien wie Butanol oder Ethanol hergestellt. Dies ist auf der Basis ungereinigter Abgase aus der Stahlindustrie (z.B. Baosteel, China) möglich.<sup>699</sup>

In NRW ist der Essener Konzern Evonik im Rahmen eines vom BMELV geförderten Projektes erstmalig in der Lage gewesen, reine 2-Hydroxy-Isobuttersäure (2-HIBS) aus Synthesegas unter industriellen Bedingungen zu erzeugen. 2-HIBS ist ein wichtiges Vorprodukt, aus dem bspw. Plexiglas® hergestellt wird. Bis zur Marktreife wird es wohl noch einige Jahre dauern.

Als erste Fördermaßnahme der neuen Nationalen Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030 startete das BMBF im April 2011 die Innovationsinitiative industrielle Biotechnologie. Strategische Allianzen unter Führung der Wirtschaft sollen das Potenzial der industriellen Biotechnologie für den Klima- und Ressourcenschutz heben. Durch Substitution petrochemischer Produkte durch biotechnologische Verfahren kann der Energieeinsatz verringert und auf nachwachsende Rohstoffe umgestellt werden. Das BMBF beabsichtigt, für die Innovationsinitiative industrielle Biotechnologie bis zu 100 Mio. Euro über fünf bis zehn Jahre bereitzustellen.<sup>700</sup>

Ein weiterer interessanter Ansatz zur Gasnutzung ist die Elektrobiotechnologie. Im Rahmen der ProcessNet Tagung 2014 in Aachen<sup>701</sup> stellte Prof. Dr. Miriam Agler-Rosenbaum ein Konzept vor, bei dem Mikroorganismen durch Sonneneinstrahlung CO<sub>2</sub> (anaerob) bspw. in Acetat umwandeln. Der Biofilm interagiert mit der Anode einer Elektrolysezelle. Dieses noch recht junge Forschungsgebiet hat in den letzten Jahren stark an Fahrt aufgenommen und nutzt im Allgemeinen ungewöhnliche Mikroorganismen, deren Genetik noch schwer zugänglich ist. Eine Übertragung in besser zugängliche Wirtorganismen wird angestrebt.

698 vgl. Fraunhofer Institut CBP: Projekte Pilotanlage chemisch-biotechnologischen Prozesszentrum (CBP) unter: <http://www.cbp.fraunhofer.de/de/projekte.html>. Online am 07.10.2014.

699 vgl. Industrielle Biotechnologie Bayern Netzwerk GmbH: CO<sub>2</sub> als Rohstoff unter: <http://www.ibbnetzwerk-gmbh.com/de/industrielle-biotechnologie/>. Online am 07.10.2014.

700 Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): Richtlinien zur Förderung im Rahmen der „Innovationsinitiative industrielle Biotechnologie“ unter: <http://www.bmbf.de/de/16331.php> (2011 – 2015). Online am 07.10.2014.

701 DECHEMA; VDI-GVC: ProcessNet – ProcessNet-Jahrestagung & 31. DECHEMA-Jahrestagung der Biotechnologen 2014 unter: [http://processnet.de/jt2014-proc\\_page-3706.html](http://processnet.de/jt2014-proc_page-3706.html) (2014). Online am 07.10.2014.

### III.3.5 Annahmen

Wie bereits im Rohstoffkapitel formuliert, erwartet die chemische Industrie eine Diversifizierung der Rohstoffe. So prognostiziert die Prognos-Studie eine Verdopplung des gegenwärtigen Anteils nachwachsender Rohstoffe an der Rohstoffbasis der chemischen Industrie. „Die industrielle Biotechnologie bildet (...) die Brücke zwischen der stofflichen Erschließung nachwachsender Rohstoffe und dem Markt für hochwertige chemische Produkte und Feinchemikalien. Dazu zählen auch innovative neue Produkte, z.B. eine Vielfalt biologisch abbaubarer Kunststoffe, Schmier- und Lösemittel.“<sup>702</sup>

#### III.3.5.1 Marktpotenziale

Laut der OECD-Prognose „The Bioeconomy to 2030“<sup>703</sup> soll die industrielle Biotechnologie zukünftig 39% der gesamten Bruttowertschöpfung von Biotechnologieunternehmen betragen und dies obwohl zurzeit nur ca. 2% der gesamten FuE-Investitionen dieser Unternehmen in den Bereich industrielle Biotechnologie fließen.<sup>704</sup> Für eine zukünftige biobasierte Wirtschaft (Bioökonomie) müssen die Methoden und Technologien der industriellen Biotechnologie unter Berücksichtigung von ökologischen und ökonomischen Faktoren konsequent weiterentwickelt und in bestehende Produktionsverfahren integriert werden.<sup>705</sup>

Eine Analyse aus dem Jahr 2008 für den US-Markt prognostiziert ausgehend vom Jahr 2010 eine Steigerung der Anteile biotechnologischer Produkte am Chemieumsatz von ca. 10% auf ca. 25% im Jahr 2025. Eine EU-Studie kommt zu einem vergleichbaren Ergebnis, wonach der weltweite Anteil biobasierter Chemikalien von 3–4% (2010) auf 7–17% mit einem Marktwert von 175–420 Mrd. Euro steigen wird.

Wie in Abbildung 65 gezeigt, finden biotechnologische Verfahren heute wie auch zukünftig vor allem in der Fein- und Spezialchemie Anwendung. Der Marktanteil biobasierte Grundchemikalien bleibt danach zwar vergleichsweise gering, weist aber die größte Dynamik auf.<sup>706</sup>

Tabelle 25: Marktentwicklung biotechnologischer Verfahren in der Chemie bis 2025 für den US-Markt (Datenstand 2008)<sup>707</sup>

Chemiesektor	2010	2025
Grundchemikalien	1-2 %	6-10 %
Spezialchemikalien	20-25 %	45-50 %
Feinchemikalien	20-25 %	45-50 %
Polymere	5-10 %	10-20 %

702 Bühler, Bruno; Hollmann, Frank; Junker, Björn et al.: Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (DECHEMA) (Hg.): Diskussionspapier: Biotechnologie der Schlüssel zur Bioökonomie. (2014), S. 54.

703 Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (Hg.): The Bioeconomy to 2030 – Main Findings and Policy Conclusions. (2009).

704 vgl. Industrielle Biotechnologie Bayern Netzwerk GmbH: Empfehlungen für eine verbesserte Investitionslage und Förderpraxis in Deutschland unter: <http://www.ibbnetzwerk-gmbh.com/de/industrielle-biotechnologie/industrielle-biotechnologie-und-politik/was-noetig-ist-weiterer-massnahmenbedarf/>. Online am 07.10.2014.

705 Bühler, Bruno; Hollmann, Frank; Junker, Björn et al.: Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (DECHEMA) (Hg.): Diskussionspapier: Biotechnologie der Schlüssel zur Bioökonomie. (2014), S. 95.

706 vgl. United States Department of Agriculture (Hg.): U.S. Biobased Products Market Potential and Projections Through 2025. (2008).

707 vgl. Biotechnology Industry Organization (BIO) (Hg.): Biobased Chemicals and Products A new driver of U.S. economic development and green jobs. (2010), nach Ergebnissen aus United States Department of Agriculture (Hg.): U.S. Biobased Products Market Potential and Projections Through 2025. (2008).

Nach Kenntnisstand der Enquetekommission liegen keine aktuellen Prognosen zur Marktentwicklung der weißen Biotechnologie in Deutschland vor. Entsprechende Daten sind nach Abschluss der oben genannten ISI-Studie<sup>708</sup> zu entnehmen.

### III.3.5.2 Forschungsbedarf

Das Potenzial biotechnologischer Verfahren kann durch Forschung in den Bereichen maßgeschneiderter Enzyme und Mikroorganismen, Bemühungen um Effizienzsteigerung biotechnologischer Prozesse alternativer Rohstoffe sowie neuartiger Reaktor- und Verfahrenskonzepte gehoben werden.

- Enzyme sind Grundvoraussetzung für eine effiziente Umwandlung nachwachsender Rohstoffe. Sie werden in Zukunft maßgeschneidert an die jeweiligen Prozessbedingungen optimal angepasst werden. Neue wissenschaftliche Erkenntnisse über den Zellmetabolismus, der Enzymstruktur und Enzymsynthese ermöglichen das Maßschneidern von Biokatalysatoren.
- Mikroorganismen werden bereits heute im großtechnischen Maßstab für die biotechnologische Produktion eingesetzt. Modernste molekulare Methoden werden in Zukunft dazu dienen, immer leistungsfähigere Stämme für eine effektive Nutzung von Substraten aus nachwachsenden Rohstoffen zu entwickeln und gleichzeitig ein breiteres Produktspektrum biotechnologisch zugänglich zu machen.
- Die Effizienz eines Großteils biologisch darstellbarer Stoffumsatzprozesse für die Umsetzung vielversprechender alternativer Rohstoffe wie z.B. Holz, die für die chemische Industrie relevant sein können, ist derzeit nicht gegeben (vgl. Rohstoffkapitel). Für die Etablierung neuer biotechnologischer Verfahren gilt es Erfahrungswerte zu schaffen; dies gelingt am zielführendsten interdisziplinär in Zusammenarbeit von Verfahrenstechniker, Mikrobiologen, Chemikern usw. Die Interdisziplinarität ist in der Regel mit hohem finanziellem und organisatorischem Aufwand verbunden.
- Neuartige Reaktor- und Verfahrenskonzepte wie z.B. Biofilmreaktoren, eine durch Miniaturisierung und Parallelisierung beschleunigte Prozessentwicklung und die integrierte interdisziplinäre Entwicklung von Biokatalysatoren, Reaktionstechnik und Produktaufarbeitung werden maßgeblich zum Erfolg biotechnologischer Konzepte in der Bioökonomie beitragen (vgl. Kapitel III.1 Intensivierte chemische Verfahren). Innovative Verfahrenskonzepte wie z.B. auch elektrochemische Verfahren stellen einen weiteren Forschungsbedarf in der Biotechnologie dar. „Insbesondere die Schnittstelle aus Elektrochemie und biologischen Redoxsystemen muss weiter untersucht und verstanden werden. Die Elektrobiotechnologie hat das Potenzial, das Problem der Speicherung regenerativer erzeugter elektrischer Energie zu lösen, z.B. indem mittels mikrobieller Elektrosynthesen Energieträger hergestellt werden.“<sup>709</sup>

### III.3.6 Option E.1: Vermehrter Einsatz biotechnologischer Verfahren in der chemischen Industrie

#### Beschreibung

Diese Option beschreibt die Umstellung weiterer Prozesse auf biotechnologische Verfahren wie z.B. Ganzzell- oder Enzymkatalyseverfahren.

#### Begründung

Die erfolgreiche Verwendung von Ganzzell- und Enzymkatalyseverfahren in der chemischen Industrie spricht für eine Ausweitung. Zudem wird sich die Rohstoffbasis der Edukte zur Herstellung chemischer Produkte zunehmend ändern (vgl. Annahmen). Mikroorganismen sind in der Lage eine

708 vgl. Wydra, Sven: Weiße Biotechnologie – Stand und Perspektiven der industriellen Biotechnologie für nachhaltiges Wirtschaften unter: <https://www.tab-beim-bundestag.de/de/untersuchungen/ui0023.html> (2010 – 2013). Online am 02.07.2014.

709 Bühler, Bruno; Hollmann, Frank; Junker, Björn et al.: Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (DECHEMA) (Hg.): Diskussionspapier: Biotechnologie der Schlüssel zur Bioökonomie. (2014), S. 63.

Vielzahl von Rohstoffen zu verwerten. Mit dem Einsatz von Ganzzell- und Enzymkatalysen lassen sich komplexe chemisch-katalysierte durch biokatalytische Reaktionen in der Zelle ersetzen.

Beispiele zeigen, dass biotechnologische Verfahren bereits in verschiedenen Bereichen der chemischen Industrie erfolgreich eingesetzt werden. Zielprodukte sind vor allem chemische Verbindungen, die sich mittels konventioneller chemischer Verfahren nur schwer, mit großem Aufwand oder gar nicht herstellen lassen. Dies gilt vor allem dann, wenn Stoffwechselwege in Ganzzellbiokatalysatoren oder die hohe Selektivität insbesondere von Enzymkatalysen genutzt werden können. Neben den bereits umgesetzten Verfahren kann hier weiteres Potenzial für die Anwendung der industriellen Biotechnologie bestehen, insbesondere durch immer genauere Kenntnisse über die zellulären Funktionen und deren Wechselwirkungen. Darüber hinaus liegt Potenzial bei der Nutzung alternativer, insbesondere nachwachsender Rohstoffe, da diese auch in ursprünglichen Lebensräumen Substrate der Biokatalysatoren sind. Sie eröffnen damit effiziente Wege zur Nutzung dieser Rohstoffgruppe.

Biotechnologische Verfahren werden zunehmend in bestehende Prozesse integriert bzw. biotechnologische Schritte als Reaktionsstufen in den Prozess eingebaut. Dazu werden Verfahren, die zurzeit chemisch ablaufen, sukzessive ausgetauscht.

### **Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte**

#### **Ökologie**

##### *Ressourcenschonung*

Durch die Umstellung auf Ganzzell- oder Enzymkatalyseverfahren ist es möglich, komplexe Produkte ggf. auf nicht fossiler Rohstoffbasis herzustellen.

Eine Ausweitung der stofflichen Nutzung von Biomasse und alternativer Rohstoffe führt zu einer Schonung der Ressource Erdöl (vgl. Kapitel Rohstoffe).

Eine gezielte Substitution einzelner Verfahrensschritte in einer Wertschöpfungskette kann auch im Hinblick auf die Ressourcenschonung ausgelegt sein. Somit kann eine Integration biotechnologischer Verfahren eine Reduktion der gesamten genutzten Ressourcen zur Folge haben.

##### *Emissionsminderung*

Die Verwendung von Ganzzell- oder Enzymkatalyseverfahren kann zu einer Verringerung der Emissionen führen. Das ist jedoch im Einzelfall anhand einer Lebenszyklusanalyse zu prüfen.

#### **Ökonomie**

##### *Innovation*

Im Bereich der Biokatalyse verfügt NRW über einen großen Erfahrungsvorsprung. So wird bspw. Lysin seit 25 Jahren biotechnologisch hergestellt. Durch die erfolgreiche Weiterentwicklung von Mikroorganismen und Biokatalysatoren ist es möglich, komplexe chemische Umsetzungen biokatalytisch zu betreiben. Auch ist es ggf. sinnvoll, nicht den gesamten Prozess biokatalytisch zu gestalten bzw. ist es technisch nicht ohne weiteres möglich. Darüber hinaus muss gewährleistet werden, dass die biotechnologisch nutzbare Fraktion der Biomasse in einen lagerfähigen Zustand überführt werden muss, um eine kontinuierliche Versorgung der Produktionsanlagen unabhängig von Vegetationsphasen zu gewährleisten.<sup>710</sup>

---

710 vgl. ebd., S. 56.

Die Umsetzung von Laborverfahren in den technischen Maßstab erfolgt über Pilotanlagen. Dieses Upscaling ist jedoch mit hohen Investitionskosten verbunden.

Für die Weiterentwicklung der Biokatalyse müssen die nötigen Kompetenzen dabei an einem Standort vereint (Metabolic Engineering, Computational Modeling, Bioverfahrenstechnik, Verfahrenstechnik) vorliegen und durch Dependancen der chemischen Industrie ergänzt werden können.<sup>711</sup>

#### *Wettbewerbsfähigkeit*

Eine Ausweitung der Anwendung von Ganzzell- oder Enzymkatalysen kann einen Wettbewerbsvorteil nach sich ziehen. Das Verfahren selbst steht meist im Wettbewerb zu bereits bestehenden Verfahren (falls nicht ein ganz neues Produkt geschaffen werden soll). Dies muss neben den technischen Möglichkeiten ökonomisch überzeugen. Das ist im Einzelfall zu prüfen.

Durch die Verwendung neuer Technologien können sich neue Geschäftsfelder („windows of opportunities“) eröffnen. Bereits bestehende Wertschöpfungsketten können durch den Einsatz biotechnologischer Verfahrensschritte optimiert werden.

Technologisch werden biotechnologische Verfahren vor allem dort eingesetzt, wo sie Syntheserouten vereinfachen, wie am Beispiel Vitamin B2 gezeigt oder durch die Selektivität der Reaktionen Nebenprodukte reduziert werden können (s. Aminosäuren L- und D-Form). Sie laufen oftmals bei milderen Bedingungen ab, aber haben im Vergleich zu chemischen Verfahren geringe Produktkonzentration, deren Aufarbeitung aus wässrigen Medien thermodynamisch aufwändig ist. Biokatalysatoren haben oftmals geringere Umsatzzahlen als chemische Katalysatoren.

Die Biokatalyse setzt heutzutage häufig nachwachsende Rohstoffe (z.B. Biomasse) ein. Um die industrielle Umsetzung der Biokatalyse zu gewährleisten müssen diese Rohstoffe auch in geeigneten Mengen zu wettbewerbsfähigen Preisen zur Verfügung stehen. Dabei müssen Technologien und Methoden, die die Rohstoffverfügbarkeit verbessern, objektiv bewertet werden dürfen.<sup>712</sup>

#### **Soziales**

Der Einsatz neuer Technologien setzt die entsprechende Ausbildung dafür voraus. Deshalb müsste die Biotechnologie in der Aus- und Weiterbildung gestärkt werden. Durch den Aufbau neuer Strukturen (biotechnologischer Prozesse und Anlagen) kann ggf. der Wegfall vorhandener Strukturen ausgeglichen und Beschäftigung gesichert werden.

#### *Bildung und Lebensqualität*

Die Lebensqualität in Bezug auf Verfügbarkeit von Produkten kann durch den Einsatz von Biotechnologie erhalten bleiben, da die ggf. durch Rohstoffengpässe entstehenden Lücken geschlossen werden können.

### **III.3.7 Bewertung Option E.1: Vermehrter Einsatz biotechnologischer Verfahren**

#### **Ökologie**

Biokatalysatoren und damit die industrielle Biotechnologie erlauben die Nutzung alternativer Rohstoffe wie Biomasse, CO<sub>2</sub> und Synthesegas sowie die Herstellung komplexer Verbindungen mit hoher Selektivität. Durch die hohe Selektivität können eingesetzte Rohstoffe effizienter genutzt und

711 Perrey, Karen et al.: Landtag NRW (Hg.): Gutachten „Innovationsleistungsfähigkeit der chemischen Industrie in NRW – Katalyse“ für die Enquete-Kommission II des Landtags von Nordrhein-Westfalen. (2014), S. 22.

712 ebd., S. 22.

damit Abfallströme und Emissionen vermindert werden. Die Arbeit bei Normaldruck und nahe Raumtemperatur stellt nicht per se einen ökologischen Vorteil dar. Biotechnologische Prozesse erfordern, da sie zumeist Wasser als Reaktionsmedium nutzen, oftmals einen hohen Aufwand zur Produktabtrennung und Aufreinigung der wässrigen Reaktionsmedien. Die ökologische Nachhaltigkeit muss deshalb im Einzelfall überprüft werden.

### Ökonomie

Biotechnologische Prozesse haben sich dort etabliert, wo sie Syntheserouten vereinfachen oder Produkte (insbesondere für funktionalisierte Moleküle) durch Nutzung der natürlichen Strukturen und Syntheseleistungen zugänglich werden. Hierdurch können sie zur verbesserten Wirtschaftlichkeit einer betrachteten Prozessroute beitragen. Darüber hinaus können sie Lösungsansätze zur Nutzung alternativer Rohstoffe eröffnen und so zur zukünftigen Wettbewerbsfähigkeit der chemischen Industrie beisteuern.

Um das beschriebene Potenzial der industriellen Biotechnologie ausschöpfen zu können, bedarf es robuster maßgeschneiderter Biokatalysatoren und neuer Reaktor- und Verfahrenskonzepte, die auf die Bedürfnisse von Bioprozessen spezifisch zugeschnitten sind. Hierzu stellt die traditionell enge Vernetzung der Biotechnologie-FuE auf universitärer und industrieller Ebene in NRW sowie die Verfügbarkeit qualifizierter Mitarbeiter einen wichtigen Vorteil dar. Cluster wie CLIB2021 mit internationaler Sichtbarkeit und Vernetzung von Mitgliedern aus KMU, Großunternehmen und Wissenschaft übernehmen hier eine wichtige Treiberfunktion. Hinderlich für die Weiterentwicklung und Markterschließung biotechnologischer Verfahren ist die teilweise fehlende Akzeptanz.

### Soziales

Biotechnologische Verfahren können bestehende Arbeitsplätze in NRW sichern. Dies gilt insbesondere für die Spezialchemie und pharmazeutische Industrie sowie generell im FuE-Bereich.

Die Verbreitung biotechnologischer Verfahren erfordert ein hohes Maß an Interdisziplinarität in der Aus- und Weiterbildung. Dabei sollte den Kommunikationskompetenzen ein besonderes Augenmerk gelten, da eine für die breite Gesellschaft verständliche Darstellung von Chancen und Risiken biotechnologischer Verfahren elementar zu deren Akzeptanz beiträgt.

### Zusammenfassung

Biotechnologische Verfahren können auf eine große Vielfalt von Rohstoffen und Zwischenprodukte angewendet werden. Bei biogenen Stoffen sind biotechnologische Verfahren besonders geeignet. Dazu zählen die Nutzung von biologischen Sekundärrohstoffen und die Aufspaltung von Lignocellulose zu Zwischenprodukten. Die Förderung der Biotechnologie stärkt die Wettbewerbsfähigkeit von Chemiesparten mit besonderer Relevanz für NRW. Die industrielle Biotechnologie bietet darüber hinaus wichtige Lösungsansätze für zukünftige Herausforderungen im Kontext Energie- und Rohstoffumbrüche. Sie findet dort Anwendung, wo sie den chemisch-synthetischen Verfahren überlegen ist. Über die bereits existierenden Verfahren hinaus besteht weiteres Potenzial für die Anwendung der industriellen Biotechnologie, wenn es gelingt, niedrige Raum-Zeit-Ausbeuten und geringe Produktkonzentrationen durch maßgeschneiderte Biokatalysatoren und ein optimiertes Prozessdesign zu verbessern. Hierfür bedarf es der verstärkten Vernetzung von Akteuren z.B. in Clustern, um erfolgsversprechende Entwicklungsthemen mit besonderer Relevanz für NRW zu identifizieren und voranzutreiben und so innovative Produkte zur industriellen Reife zu bringen.

## III.4 Bioraffinerien

### III.4.1 Einleitung

Der im Rohstoffkapitel skizzierte Rohstoffwandel hin zu erneuerbaren Kohlenstoffquellen (insbesondere Biomasse) erfordert eine Anpassung der verfahrenstechnischen Methoden der Stoffumwandlung und wird zudem die Entwicklung neuer Produkte zur Folge haben – mit weitreichenden Folgen für die chemische Wertschöpfungskette. Die Herausforderungen an neue Verfahren sind besonders hoch, weil die heutigen petrochemischen Prozessrouten stark optimiert sind und damit die Möglichkeit zur effizienten Herstellung vielfältigster chemischer Verbindungen bieten. Dieses Kapitel zeigt auf, welchen Beitrag das Technologiekonzept der Bioraffinerie bei der Bewältigung der prognostizierten Veränderungen leisten und zur Integration nachwachsender Rohstoffe in die chemische Wertschöpfungskette beitragen kann. Dabei ist zu beachten, dass sich die chemische Industrie – wie bereits heute in der Petrochemie – in erster Linie nicht als Betreiber von Bioraffinerien sieht, sondern vielmehr als Abnehmer, der die Produkte der Bioraffinerie veredelt.<sup>713</sup>

Bei der Entwicklung und Etablierung von Bioraffinerien bestehen derzeit insbesondere folgende Herausforderungen:

- Die sich von petrobasierten Rohstoffen unterscheidenden Rohstoffeigenschaften, stellen neue Anforderungen an die entsprechenden Verfahren der Stoffumwandlung.
- Ein dezentralerer Rohstoffanfall, ein niedrigerer Energiegehalt (aufgrund eines höheren Anteils an Stickstoff- und Sauerstoffatomen) und ein höherer Wassergehalt erfordern neue Logistik- und Aufarbeitungskonzepte.
- Aus der unterschiedlichen Rohstoffbasis ergibt sich eine andere Produktverteilung, wobei es sich um bereits existierende, aber auch neue Produkte handeln kann. Kurz- bis mittelfristig ist es sinnvoll, die biobasierten Produkte weit möglichst in die bestehenden chemischen Wertschöpfungsketten zu integrieren bzw. diese darauf abzustimmen. Langfristig ist auch der Aufbau neuer Wertschöpfungsketten zugeschnitten auf die spezifischen Eigenschaften nachwachsender Rohstoffe denkbar.
- Die neuen Prozessrouten für nachwachsende Rohstoffe stehen in Konkurrenz zu den etablierten, effizienten und abgeschriebenen Prozessrouten auf Erdölbasis.

### III.4.2 Definition und Konzept

#### III.4.2.1 Definition Bioraffinerie

Die im vorliegenden Bericht verwendete Definition beruht auf dem Entwurf der VDI-Richtlinie 6310 (VDI 6310) „Klassifikation und Gütekriterien von Bioraffinerien“<sup>714</sup>, die zum Zeitpunkt der Berichtserstellung das aktuellste Dokument war, sowie der „Roadmap Bioraffinerien“<sup>715</sup> der Bundesregierung, auf der die VDI-Richtlinie 6310 basiert. Eine Bioraffinerie ist demnach der Versuch,

713 Deutsche Industrievereinigung Biotechnologie (Hg.): Statusbericht zu möglichen Potenzialen von Bioraffinerien für die Bereitstellung von Rohstoffen in Industrie und Forschung – Zusammenfassung. (2011), S. 3.

714 Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hg.): VDI-6310 Blatt 1 Entwurf Klassifikation und Gütekriterien von Bioraffinerien. (2014).

715 Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR); Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV); Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU); Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (Hg.): Roadmap Bioraffinerien im Rahmen der Aktionspläne der Bundesregierung zur stofflichen und energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe. (2012b).

die Konzepte der Erdölraffinerie und der Verbundproduktion der (heutigen) chemischen Industrie zur Nutzung von Erdöl auf Biomasse als Rohstoffbasis zu übertragen<sup>716</sup>. Eine Bioraffinerie ist in VDI 6310 definiert als „ein integratives Gesamtkonzept für die Konversion<sup>717</sup> von nachwachsenden Rohstoffen zu Chemikalien, Werkstoffen, Brenn- und Kraftstoffen sowie gegebenenfalls zur Erzeugung von Energie (zur Eigennutzung und/oder Auskopplung) als Beitrag zum nachhaltigen Wirtschaften unter möglichst vollständiger Ausnutzung der Biomasse“<sup>718</sup>.

Da CO<sub>2</sub> in Nordrhein-Westfalen ein Potenzial als sekundäre Rohstoffquelle (Abgasströme aus Nachbarindustrien wie z.B. Stahlindustrie und Energieerzeugung) hat und dieses sich über biotechnologische Verfahren konvertieren lässt, wird CO<sub>2</sub> als weiterer potenzieller Rohstoff einer Bioraffinerie betrachtet, auch wenn es aus nicht biogenen Quellen stammt. Dabei kann der zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung erforderliche Wasserstoff sowohl aus biogenen als auch nicht-biogenen Quellen kommen.

### III.4.2.2 Bioraffinerie-Konzept

Die Bioraffinerie ist ein komplexes Produktionssystem, in dem in der Regel Biomasse über Zwischenprodukte und mindestens zwei Konversions- bzw. Veredelungsschritte (Refination) zu Produkten und Energie verarbeitet wird. Dabei wird die möglichst vollständige Verwendung aller Rohstoffkomponenten angestrebt.<sup>719</sup> Abbildung 66 zeigt das Technologiekonzept Bioraffinerie im Überblick.

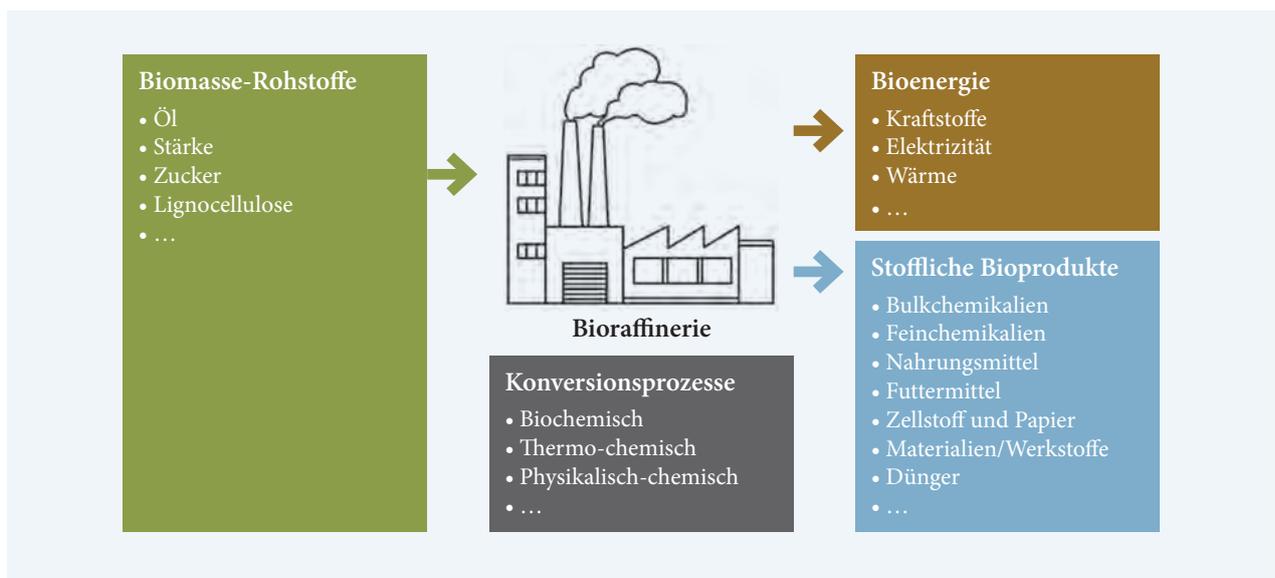


Abbildung 66: Konzept der Bioraffinerie im Überblick<sup>720</sup>

Wichtige Aspekte bzw. Ziele des Technologiekonzeptes Bioraffinerie sind damit

- die Erschließung neuer, regenerativer Rohstoffquellen sowie bisher nicht oder nicht vollständig genutzter Stoffströme,

716 vgl. Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hg.): VDI-6310 Blatt 1 EntwurfKlassifikation und Gütekriterien von Bioraffinerien. (2014), S. 2 f.

717 Konversion: Umwandlung; entsprechend Definition ebd., S. 5: allgemein für physikalische, chemische, biochemische oder thermochemische Umwandlung eines oder mehrerer Ausgangsstoffe (zumeist vorbehandelter Rohstoffe) zu einem oder mehreren Produkten

718 Zitiert aus ebd., S. 2.

719 ebd., S. 3 f.

720 Abb. nach Jungmeier, Gerfried: Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH (Hg.): Facts & Figures of Producing Biofuels in Biorefineries – Current Status and Future Perspectives. (2013).

- eine möglichst vollständige Nutzung aller Biomassebestandteile sowie deren kombinierte stoffliche und energetische Nutzung (kombinierte Koppel- und Kaskadennutzung),
- die Entwicklung innovativer Konversions- und Veredlungstechnologien.<sup>721</sup>

Das Technologiekonzept Bioraffinerie verfolgt das Ziel, mit Hilfe einer ganzheitlichen Betrachtung aller Prozesse und Verfahren über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg Möglichkeiten der Prozessintegration und -intensivierung (in Analogie zu intensivierten Verfahren) zu identifizieren. Hierdurch sollen eine möglichst optimale Nutzung der Ressource Biomasse, industrieller Abgase und regenerativen Stroms erreicht sowie wettbewerbsfähige Prozessrouten und Bioraffinerieprodukte etabliert werden, um nachwachsende Rohstoffe erfolgreich in die chemische Wertschöpfungskette integrieren zu können.

Eine Bioraffinerie stellt damit ein integratives, multifunktionelles Gesamtkonzept dar, das Biomasse als vielfältige Rohstoffquelle für die nachhaltige Erzeugung eines Spektrums unterschiedlicher Zwischenprodukte und Produkte (Chemikalien, Werkstoffe, Bioenergie inklusive Biokraftstoffe) unter möglichst vollständiger Verwendung aller Rohstoffkomponenten nutzt. Als Koppelprodukte können ggf. zusätzlich Nahrungs- und Futtermittel anfallen.<sup>722</sup> In einer Bioraffinerie werden biogene Rohstoffe fraktioniert, raffiniert und veredelt.

### III.4.3 Funktionsprinzip

In der Bioraffinerie wird der Rohstoff (Biomasse bzw. CO<sub>2</sub>) in der sogenannten Primärraffination<sup>723</sup> zunächst vorbehandelt (konditioniert) und aufgeschlossen (Komponentenabtrennung). Die hierbei entstehenden Biomassekomponenten wie bspw. Zucker, Öle, Cellulose und Stärke werden auch als Plattform<sup>724</sup> bezeichnet. Sie bilden die Ausgangskomponente für die sogenannte Sekundärraffination<sup>725</sup>, in der die Plattform zu (Zwischen-)Produkten konvertiert bzw. veredelt wird. Hierbei ist zwischen Haupt-, Neben- und Koppelprodukt zu unterscheiden. Als Hauptprodukt wird im Gegensatz zum Nebenprodukt das Produkt bezeichnet, dessen Herstellung das Hauptziel des Herstellungsverfahrens ist<sup>726</sup>. Als Koppelprodukte werden zwei oder mehrere in einem gleichen Produktionsgang zwangsläufig und gleichzeitig anfallende Produkte bezeichnet.<sup>727</sup> Dabei kann es sich um Haupt- und Nebenprodukte handeln. Die Produkte, welche die Bioraffinerie verlassen, können entweder stofflich (z.B. in der chemischen Industrie) oder energetisch verwertet werden (vgl. Abbildung 66). Neben der chemischen Industrie finden Bioraffinerieprodukte u.a. auch Einsatz in der Nahrungsmittel-, Futtermittel-, Werkstoff-, Papier- und Kunststoffindustrie. Das Funktionsprinzip der Bioraffinerie ist aus Abbildung 67 ersichtlich.

721 Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hg.): VDI-6310 Blatt 1 EntwurfKlassifikation und Gütekriterien von Bioraffinerien. (2014), S. 2.

722 ebd., S. 4.

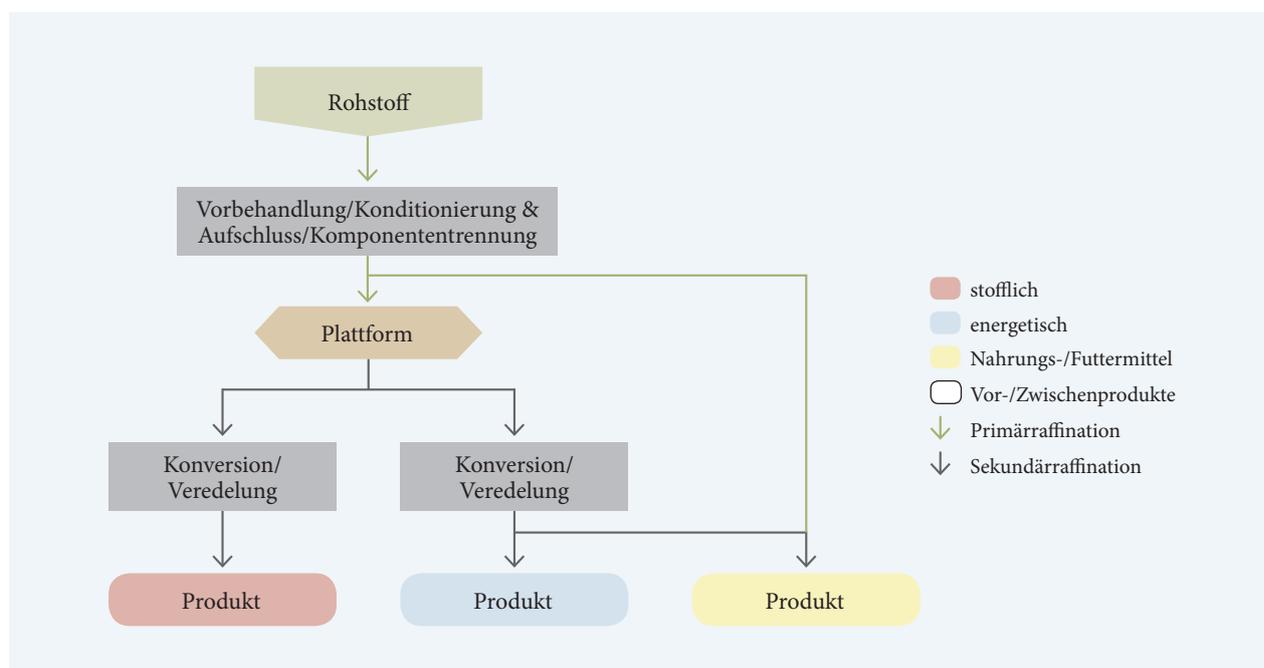
723 Entsprechend Definition ebd., S. 5: Verfahrenstechnische Schritte, die vom biogenen Rohstoff bis zur Plattform führen, also Vorbehandlungs-, Aufschluss- und Trennprozesse.

724 Entsprechend Definition ebd., S. 5: In der Primärraffination erzeugte Biomassekomponenten, die die Basis der nachfolgenden Sekundärraffination bilden, Beispiele: Zucker, Öle, Lignin

725 Entsprechend Definition ebd., S. 5: Nach der Primärraffination folgende Konversions- und Veredelungsschritte, die von der Plattform zu den Zwischen- und Endprodukten führen.

726 ebd., S. 5.

727 ebd., S. 5.

Abbildung 67: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips einer Bioraffinerie<sup>728</sup>

### III.4.3.1 Rohstoffe für Bioraffinerien

Nachwachsende Rohstoffe unterscheiden sich, wie in Tabelle 26 gegenübergestellt, wesentlich von der aktuellen fossilen Rohstoffbasis.

Tabelle 26: Unterschiede zwischen fossilen organischen und nachwachsenden Rohstoffen, eigene Darstellung

Fossile Rohstoffe (insbes. Erdöl)	Nachwachsende Rohstoffe
Zentraler Anfall	Dezentraler Anfall
Hohe Transportwürdigkeit aufgrund hoher Energiedichte	Geringe Transportwürdigkeit aufgrund hohen Wassergehalts und niedriger Energiedichte
Relativ einheitliche Zusammensetzung	Sehr diverse Zusammensetzung
Hoher Kohlenstoff- u. Wasserstoffanteil, wenig Sauerstoff, unpolar und hydrophob	Hoher Heteroatomanteil, hochoxidierte und sehr polare Moleküle
Geringer Funktionalisierungsgrad	Hoch funktionalisierte Moleküle

Die Andersartigkeit der nachwachsenden Rohstoffe stellt das Technologiekonzept Bioraffinerie vor verschiedene Herausforderungen, um für die Industrie brauchbare Chemikalien bereitstellen zu können. Eine Übertragbarkeit der Funktionsprinzipien einer Erdölraffinerie auf die Bioraffinerie ist damit nur begrenzt möglich.

Aktuell finden in Bioraffinerien vor allem nachwachsende Rohstoffe, die leicht zugängliche Kohlenhydrate oder Fettsäuren (Energiepflanzen) enthalten, Einsatz. Allerdings werden diese Rohstoffe zumeist auch für Nahrungs- und Futtermittel eingesetzt, wodurch eine potenzielle Konkurrenzsituation entsteht. Darüber hinaus werden nur bestimmte Komponenten der Pflanze genutzt. Im Sinne einer nachhaltigen und ressourceneffizienten Nutzung ist die Verwendung der Ganzpflanze sowie

728 Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR); Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV); Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU); Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (Hg.): Roadmap Bioraffinerien im Rahmen der Aktionspläne der Bundesregierung zur stofflichen und energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe. (2012b), S. 26.

die Verbreiterung der Rohstoffbasis z.B. durch Nutzung von Reststoffströmen und Lignocellulose-Biomasse (2. Generation) angestrebt.

Hinsichtlich der von der chemischen Industrie benötigten Rohstoffmengen und deren Herkunft gilt: „Die chemische Industrie in Deutschland setzt ca. 2,7 Mio. t<sup>729</sup> nachwachsende Rohstoffe stofflich ein (entspricht ca. 13%<sup>730</sup> des stofflichen Einsatzes an organischen Rohstoffen). Der durchschnittliche Importanteil liegt bei 65%<sup>731</sup>, das heißt, nur etwa ein Drittel der stofflich genutzten Biomasse wird aus heimischer Produktion bereitgestellt. Bei Pflanzenölen, Wachsen und Harzen oder Chemiezellstoff liegt die Importquote sogar bei 70% bis 100%<sup>732</sup>. Dies bedeutet im Umkehrschluss: Nicht nur bei fossilen Rohstoffen oder Metallen, sondern auch bei Biomasse ist die deutsche Wirtschaft auf einen global funktionierenden Handel und eine optimierte Lieferkette angewiesen.“<sup>733</sup>

### Regionale Rohstoffverfügbarkeit in Nordrhein-Westfalen zur Realisierung von Bioraffinerien

Nordrhein-Westfalen hat eine beachtliche landwirtschaftliche Produktion (fast 4 Mio. t Zuckerrüben und eine entsprechende Menge Getreide zur Stärkegewinnung). Rohstoffe, die regional nicht produziert werden (z.B. verschiedene Ölpflanzen), können auf Grund der sehr guten Infrastruktur (Stichwort Rheinschiene) angeliefert werden; eine einheimische Produktion ist hierfür nicht zwingend notwendig.<sup>734</sup>

### Agrarbiomasse

2010 wurden nach Angaben der nordrhein-westfälischen Landwirtschaftskammer 1,46 Mio. ha landwirtschaftlich bewirtschaftet, davon 3,6% mittels ökologischer Landwirtschaft. 1,05 Mio. ha dieser Fläche wurden für den Ackerbau genutzt, davon 52% zum Anbau von Getreide (Weizen, Gerste, Mais), 3% für Kartoffeln, 5% für Zuckerrüben und weitere 19% für den Gras- u. Maisanbau als Futtermittel. Durch die zunehmende Viehhaltung und Biogasproduktion verschiebt sich die Ackerlandnutzung weg vom Nahrungsmittelanbau.<sup>735</sup> Aus Tabelle 27 sind verschiedene für Bioraffinerien in Nordrhein-Westfalen aus der Landwirtschaft verfügbare Rohstoffmengen (Agrarbiomasse und Reststoffströme) mit Preisen ersichtlich.

729 Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hg.): VDI-6310 Blatt 1 Entwurfsklassifikation und Gütekriterien von Bioraffinerien. (2014), 22.

730 ebd., 22.

731 ebd., 22.

732 ebd., 22.

733 ebd., 22.

734 vgl. DECHEMA; Wagemann, Kurt: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Biotechnologische Verfahren“ der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2014), S. 5 sowie Dr. Kurt Wagemann (DECHEMA): Landtag NRW (Hg.): Enquetekommission II Protokoll 17. Sitzung (nichtöffentlich) Anhörung „Biotechnologische Verfahren“. (2014), S. 22 f.

735 Rehse, Hans Peter; Schmitz, Sibylle: Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (Hg.): Zahlen zur Landwirtschaft in Nordrhein-Westfalen 2012. (2012), S. 15-17.

Tabelle 27: Verfügbarkeit landwirtschaftlicher Rohstoffe für Bioraffinerien in Nordrhein-Westfalen (regionale Gewinnung)<sup>736</sup>

Rohstoff	Verfügbarkeit / Menge	Preis
Stroh	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Strohertrag: 4,8 t/ha</li> <li>• <b>Erntereste (max. nutzbar): 1.848.258 t Stroh</b> → 1.589.525 t TM<sup>735</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nährstoffkosten: 25 Euro/t</li> <li>• Bergungskosten: 14 Euro/t</li> <li>• Transportkosten: 5 Euro/t</li> <li>• Gesamtkosten: 44 Euro/t (215 Euro/ha)</li> <li>• <b>Gesamtkosten (max. nutzbar): ca. 51 Euro/t TM</b></li> </ul>
Gülle (Mast- schweine)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gesamtmenge NRW: 6.265.549 m<sup>3</sup></li> <li>• <b>Mastschweinegülle</b> → 313.277 t TM</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nährstoffkosten: 10,50 Euro/m<sup>3</sup></li> <li>• Lagerkosten: 1,50 Euro/m<sup>3</sup></li> <li>• Transportkosten: 4,90 Euro/m<sup>3</sup></li> <li>• Gesamtkosten: 16,90 Euro/m<sup>3</sup></li> <li>• <b>Gesamtkosten: 338 Euro/t TM</b></li> </ul>
Mais	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ertrag: 165 dt TM/ha</li> <li>• Gesamtfläche: 159.586 ha</li> <li>• <b>Gesamtertrag NRW: 2.633.169 t TM</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produktionskosten: 1.648 Euro/ha</li> <li>• <b>Gesamtkosten: ca. 100 Euro/t TM</b></li> </ul>
Grünland	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ertrag: 120 dt TM/ha</li> <li>• Gesamtfläche: 396.792 ha</li> <li>• <b>Gesamtertrag NRW: 4.761.504 t TM</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produktionskosten: 1.700 Euro/ha</li> <li>• <b>Gesamtkosten: ca. 142 Euro/t TM</b></li> </ul>

### Biogene Abfälle

2011 wurden in Nordrhein-Westfalen 1,9 Mio. t biogene Abfälle aus Privathaushalten gesammelt, davon wurden 1,2 Mio. t über die sogenannte Biotonne erfasst<sup>738</sup>. Dazu kamen noch 148.000 t Altholz<sup>739</sup>. Die Bio- und Grünabfälle machen bezogen auf das Gewicht 44% der getrennt erfassten Wertstoffe von 4,3 Mio. t aus<sup>740</sup>.

### III.4.3.2 Verfahren

Die Nutzung nachwachsender Rohstoffe hat folgenden Einfluss auf die anzuwendenden Verfahren (vgl. Tabelle 28).

Tabelle 28: Generelle Unterschiede zwischen petrochemischen und bio-basierten Verfahren, eigene Darstellung

Petrochemische Verfahren	Biobasierte Verfahren
Überwiegend Gasphasenreaktionen, Organische Lösungsmittel als Reaktionsmedium, oft bei hohen Temperaturen	Flüssigphasenreaktionen, Wasser als Reaktionsmedium, bei moderaten Temperaturen
Heiße Trennverfahren (z.B. Destillation)	Kalte Trennverfahren (z.B. Membranen)
Funktionalisierung der Moleküle (Oxidationen)	Defunktionalisierung der Moleküle (Reduktionen)

Für die Verarbeitung und Veredlung von nachwachsenden Rohstoffen sind zumeist die auf erdölba-sierte Rohstoffe optimierten Verfahren nicht geeignet. Die unterschiedliche molekulare Zusammen-setzung von nachwachsenden Rohstoffen (oft sehr hoher Sauerstoffanteil) erfordert darauf ausge-richtete Verfahren (z.B. Reduktionen anstelle von Oxidationen).

736 Daten aus: Ministerium für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen (MIWF) (Hg.): Ent-stehungs- bzw. Produktionskosten ausgewählter landwirtschaftlicher Produkte sowie Potentiale zur stofflichen Verwertung in Bioraffinerien in NRW. Diskussionsgrundlage für Follow-up-Gespräch Landwirtschaft/Chemie/Energie am 29.1.2013; Daten-quellen: Landwirtschaftskammer NRW und Forschungsnetzwerk NRW-Agrar. (2013).

737 TM: Trockenmasse.

738 Reppold, Vera: Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz (MKULNV) (Hg.): Ab-fallbilanz Nordrhein-Westfalen für Siedlungsabfälle 2010/2011. (2011), S.27, Tab. 9 sowie S. 46.

739 ebd., S.42, Tab. 15.

740 ebd., S.42, Tab. 15.

Generell sind zwei Strategien zum Rohstoffaufschluss zur Gewinnung von Plattformen erkennbar:

1. das Herunterbrechen der molekularen Strukturen auf C1-Primärprodukte (Synthesegas oder Methan) durch Vergasung, die eine einfache Einspeisung in bestehende Wertschöpfungsketten ermöglicht;
2. möglichst eine Beibehaltung natürlicher molekularer Strukturen, wobei diese Strategie komplexere Verarbeitungsprozesse erfordert.

In Bioraffinerien kommt zur Konversion eine Vielzahl an Technologien und Verfahren zum Einsatz, die für eine Bioraffinerie zu speziellen Anlagenkonzepten integriert werden müssen<sup>741</sup>. Hierbei gibt es vier Hauptgruppen von Verfahren zur integrierten Bereitstellung, Konditionierung und Konversion von Biomasse:

1. Physikalische (inkl. mechanische) Verfahren: Diese führen zu einer Änderung der Stoffeigenschaften z.B. durch Zerkleinern, Trocknen und Erwärmen. Zu den physikalischen Verfahren zählen auch solche zur Trennung und Förderung.
2. Chemische Verfahren dienen der Stoffumwandlung. Hierzu zählen (zumeist katalysatorvermittelte) Oxidationen, Polymerisationen und Hydrolysen.
3. Biotechnologische Verfahren dienen ebenfalls der Stoffumwandlung. Typische biotechnologische Verfahren sind Fermentationen wie enzymatisch katalysierte Umsetzungen<sup>742</sup>.
4. Thermochemische Verfahren:  
**Vergasung:** Thermochemische Aufspaltung und Neuordnung bestehender chemischer Verbindungen in Sauerstoffatmosphäre, Produkte gasförmig;  
**Pyrolyse:** Thermochemische Spaltung bei 200-900°C unter Sauerstoffausschluss, Produkte gasförmig, fest, flüssig;  
**Thermolyse:** Thermische Spaltung zu definierten Produkten im Gegensatz zur Pyrolyse: Hydrothermale Verfahren durch heißes Wasser oder Dampf<sup>743</sup>.

### III.4.3.3 Produkte

Mögliche Bioraffinerieprodukte sind Nahrungs- und Futtermittel, Chemikalien (Bulk- und Feinchemikalien), Materialien/Werkstoffe sowie Energieträger z.B. in Form von Kraftstoffen oder zur Strom- und Wärmeerzeugung<sup>744</sup> (vgl. Abbildung 66). Dabei können Bioraffinerieprodukte innerhalb der Wertschöpfungskette sowohl Endprodukte sein als auch Zwischenprodukte<sup>745</sup>, die erst in weiteren Produktionsschritten zum Endprodukt veredelt werden. Neben der chemischen Industrie finden Bioraffinerieprodukte dementsprechend auch Einsatz z.B. in der Lebensmittel-, Papier- und Kunststoffindustrie.

Aktuell ist die stoffliche Nutzung auf relativ wenige Produktgruppen, vor allem Biokraftstoffe und einige Chemikalien, fokussiert. Im Sinne der VDI 6310-Definition wird daher eine Verbreiterung

741 vgl. Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hg.): VDI-6310 Blatt 1 EntwurfKlassifikation und Gütekriterien von Bioraffinerien. (2014), S. 8 und 10.

742 Entsprechend Definition ebd., S. 5: Prozesse, bei denen unter Nutzung des aeroben (mit Sauerstoffnutzung) oder anaeroben (ohne Sauerstoffnutzung) Stoffwechsel von Mikroorganismen (Bakterien, Pilze, Hefen), mit Enzymen, mit pflanzlichen oder tierischen Zellkulturen definierte Produkte entstehen

743 ebd., S. 9 f.

744 Entsprechend Bioraffinerie-Definition IEA Bioenergy Task 42, vgl. de Jong, Ed et al.: IEA Bioenergy (Hg.): Bio-based Chemicals – Valued Added Products from Biorefineries.

745 Entsprechend Definition Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hg.): VDI-6310 Blatt 1 EntwurfKlassifikation und Gütekriterien von Bioraffinerien. (2014), S. 6: Produkt, das im Zuge eines mehrstufigen Produktionsprozesses entsteht und deren Produktionsprozess noch nicht beendet ist.

und Anpassung der Produktpalette von Bioraffinerien zur besseren Anknüpfung an chemische Wertschöpfungsketten (Drop-in) angestrebt. Bioraffinerieprodukte sollten stärker an Eigenschaften der nachwachsenden Rohstoffe angepasst sein und die natürlichen Molekülstrukturen besser nutzen. Hierzu müssen neue Produktstammbäume aufgebaut und Einsatzgebiete für diese neuen Produkte mit neuen Eigenschaften identifiziert werden<sup>746</sup>.

#### III.4.3.4 Plattformchemikalien

Neben Endprodukten wie Kraftstoffen, Kunststoffen o.ä. werden vielfach auch Grundstoffchemikalien, sogenannte Plattformchemikalien<sup>747</sup>, Produkte der Bioraffinerie sein. Plattformchemikalien können analog zu den Basischemikalien der petrochemischen Wertschöpfungskette die Basis für neue biobasierte Produktstammbäume sein. Damit kommt den Plattformchemikalien eine Schlüsselrolle für die Integration von Bioraffinerieprodukten in die industrielle Wertschöpfungskette zu. Verschiedene Studien haben sich bereits der Identifikation geeigneter biobasierter Plattformchemikalien gewidmet<sup>748,749,750,751,752</sup>. Für den Aufbau neuer biobasierter Wertschöpfungsketten hat das US Department of Energy (DOE) 2004 und 2010 aus über 300 Verbindungen, die aus Stärke, Cellulose und Hemicellulosen hergestellt werden können, die in Tabelle 29 aufgeführten Kandidaten ausgewählt.

---

746 de Jong, Ed et al.: IEA Bioenergy (Hg.): Bio-based Chemicals – Valued Added Products from Biorefineries.

747 Während petrochemische Grundstoffchemikalien zumeist als Basischemikalien bezeichnet werden, hat sich für diese in biobasierten Wertschöpfungsketten der Begriff der „Plattformchemikalien“ durchgesetzt.

748 United States Department of Agriculture (Hg.): U.S. Biobased Products Market Potential and Projections Through 2025. (2008).

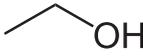
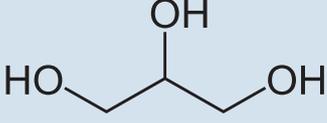
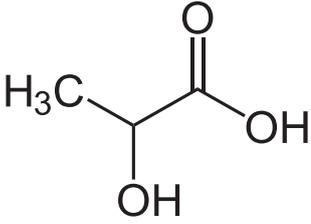
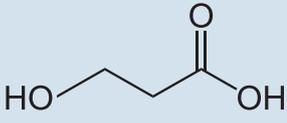
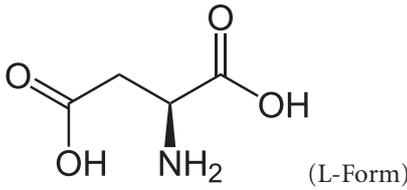
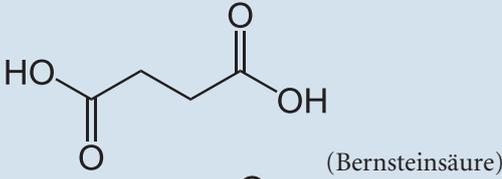
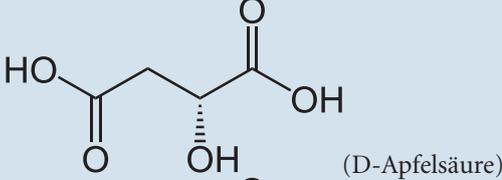
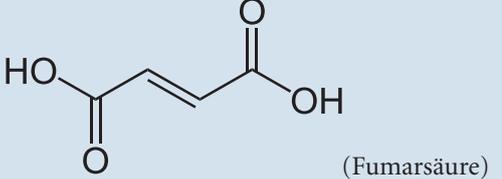
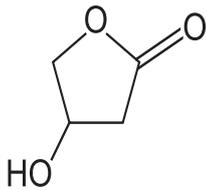
749 Patel, Martin; Crank, Manuela; Dornburg, Veronika; Hermann, Barbara; et al.: Utrecht University (Hg.): Medium and Long-term Opportunities and Risks of the Biotechnological Production of Bulk Chemicals from Renewable Resources. (2006).

750 Pacific Northwest National Laboratory (PNNL); National Renewable Energy Laboratory (NREL) (Hg.): Top Value Added Chemicals from Biomass – Volume I – Results of Screening for Potential Candidates from Sugars and Synthesis Gas. (2004).

751 Nexant ChemSystems: NNFCC (Hg.): Biochemical opportunities in the United Kingdom NNFCC Project No. 08-008. (2008).

752 Bozell, Joseph J.; Petersen, Gene R.: Technology development for the production of biobased products from biorefinery carbohydrates—the US Department of Energy’s “Top 10” revisited. In: Green Chemistry (2010), 4, S. 539–554.

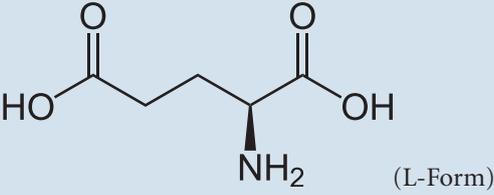
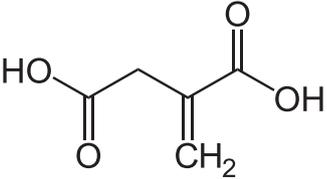
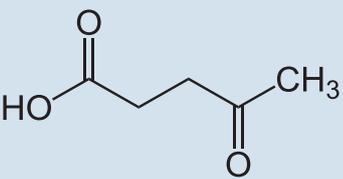
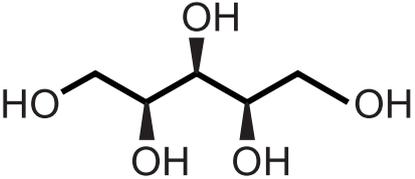
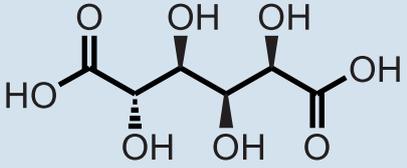
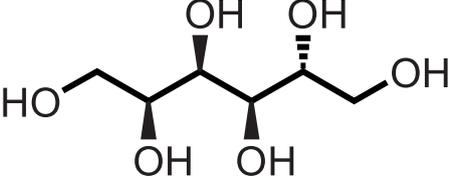
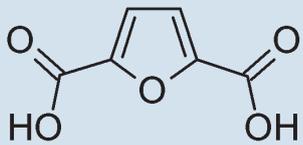
Tabelle 29: Top-Kandidaten für zuckerbasierte<sup>753</sup> Plattformchemikalien<sup>754,755</sup>

Anzahl C-Atome	Plattformchemikalie	Strukturformel
2	Ethanol	
3	Glycerin	
	Milchsäure (2-Hydroxypropionsäure)	
	3-Hydroxypropionsäure	
4	Asparaginsäure	 (L-Form)
	1,4-Dicarbonsäuren: Bernsteinsäure, Apfelsäure u. Fumar- säure	 (Bernsteinsäure)  (D-Apfelsäure)  (Fumarsäure)
	3-Hydroxybutyrolacton	

753 Stärke, Cellulose u. Hemicellulose.

754 Pacific Northwest National Laboratory (PNNL); National Renewable Energy Laboratory (NREL) (Hg.): Top Value Added Chemicals from Biomass – Volume I – Results of Screening for Potential Candidates from Sugars and Synthesis Gas. (2004).

755 ebd..

Anzahl C-Atome	Plattformchemikalie	Strukturformel
5	Glutaminsäure	 (L-Form)
	Itakonsäure	
	Levulinsäure	
	Xylitol	
6	Glucarsäure	
	Sorbitol	
	2,5-Furandicarbonsäure	

Entsprechend Tabelle 29 sind die Topkandidaten für biobasierte Plattformchemikalien gekennzeichnet durch a) eine Kettenlänge von C2 bis C6, womit eine Analogie zu petrochemischen Basischemikalien besteht; b) zwei oder mehr funktionale Gruppen (mit Ausnahme Ethanol), die vielfältige Konversionsmöglichkeiten zu Verbindungen mit höherer Wertschöpfung erlauben; c) die Existenz bereits mehrerer kommerzieller biologischer und chemischer Verfahrensrouten zur Herstellung<sup>756</sup>.

756 Weitere untersuchte Kriterien Rohstoffkosten, Prozesskosten, Komplexität der Herstellroute, Verkaufswert, Marktpotential und mögliche Anwendungen ( Pacific Northwest National Laboratory (PNNL); National Renewable Energy Laboratory (NREL) (Hg.): Top Value Added Chemicals from Biomass – Volume I – Results of Screening for Potential Candidates from Sugars and Synthesis Gas. (2004)).

Die VDI-Übersichtsstudie „Biomasse – Rohstoff der Zukunft für die chemische Industrie“<sup>757</sup> enthält Datenblätter zu insgesamt 26 Plattformchemikalien-Kandidaten aus den oben genannten Untersuchungen des DOE<sup>758,759</sup> sowie aus dem vergleichbaren europäischen BREW<sup>760</sup>-Projekt<sup>761</sup>. Die Datenblätter geben Informationen zu den Hauptanwendungen, dem Marktvolumen (aktuell und Potenzial in Zukunft), den Herstellungsmethoden (konventionell und biobasiert), biobasierten Vorstufen sowie zur Wachstumsdynamik. Inzwischen gibt es auch Untersuchungen zu potenziellen Plattformchemikalien ausgehend von Lignin<sup>762</sup>.

### III.4.4 Entwicklungsstand der wichtigsten Bioraffinerie-Konzepte

#### III.4.4.1 Realisierung von Bioraffinerien

Bioraffinerien, die einen Rohstoff zur Herstellung einiger weniger Produkte nutzen (Phase I-Bioraffinerien, z.B. reine Stärke- und Ethanolfabriken, und Phase II-Bioraffinerien)<sup>763</sup>, sind bereits am Markt etabliert<sup>764</sup>. Diese entstehen zurzeit in den meisten Fällen durch Erweiterung bestehender Biomasseverarbeitungsanlagen zu Bioraffinerien (sog. Bottom-up-Ansatz<sup>765</sup>). Zweck dieser Erweiterung ist dabei die Diversifizierung von Produktpalette und einsetzbaren Rohstoffen. Neu ausgelegte und errichtete Bioraffinerien mit hoher Prozessintegration (sog. Top-down-Ansatz<sup>766</sup>, Phase III-Bioraffinerien) sind noch nicht Stand der Technik, es gibt lediglich Pilotanlagen.<sup>767</sup> Aus Abbildung 68 sind in Deutschland realisierte Pilot- und Demonstrationsanlagen ersichtlich.

757 Grimm, Vera; Braun, Matthias; Teichert, Olav, Zweck, Axel: Zukünftige Technologien Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH (Hg.): Übersichtsstudie: Biomasse – Rohstoff der Zukunft für die chemische Industrie. (2011), S. 38 ff.

758 Pacific Northwest National Laboratory (PNNL); National Renewable Energy Laboratory (NREL) (Hg.): Top Value Added Chemicals from Biomass – Volume I – Results of Screening for Potential Candidates from Sugars and Synthesis Gas. (2004).

759 ebd.

760 BREW ist ein Projekt, das unter dem GROWTH-Programm der EU-Kommission (GD Forschung) durchgeführt wurde. Das Projektteam bestand aus akademischen Einrichtungen und Industriepartnern verschiedener EU-Länder. BREW ermittelte mittel- und langfristige Chancen und Risiken der biotechnologischen Produktion von Bulk-Chemikalien aus biobasierten Rohstoffen. Quelle: Europäische Kommission (Hg.): Medium and Long-term Opportunities and Risks of the Biotechnological Production of Bulk Chemicals from Renewable Resources – The Potential of White Biotechnology (The BREW Project). (2006).

761 Patel, Martin; Crank, Manuela; Dornburg, Veronika; Hermann, Barbara; et al.: Utrecht University (Hg.): Medium and Long-term Opportunities and Risks of the Biotechnological Production of Bulk Chemicals from Renewable Resources. (2006).

762 Holladay, J. E.; Bozell, Joseph J.; White, J. F.; Johnson, D.: (Hg.): Top Value-Added Chemicals from Biomass Volume II—Results of Screening for Potential Candidates from Biorefinery Lignin. (2007).

763 Unterscheidung entsprechend Integrationsgrad in Phase I-Bioraffinerie: Verarbeitung eines Rohstoffs über ein Verfahren zu einem (Haupt-)Produkt, Phase II Bioraffinerien gehen auch von einem Rohstoff aus, der aber über mehrere Prozesse zu verschiedenen Produkten und Energie verarbeitet werden. Phase III Bioraffinerien können eine Vielzahl von Rohstoffen über verschiedene Verfahren zu multiplen Produkten umsetzen.

764 Deutsche Industrievereinigung Biotechnologie (Hg.): Statusbericht zu möglichen Potenzialen von Bioraffinerien für die Bereitstellung von Rohstoffen in Industrie und Forschung – Zusammenfassung. (2011), S. 4.

765 Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hg.): VDI-6310 Blatt 1 EntwurfKlassifikation und Gütekriterien von Bioraffinerien. (2014), S. 15.

766 ebd., S. 15.

767 ebd., S. 10.

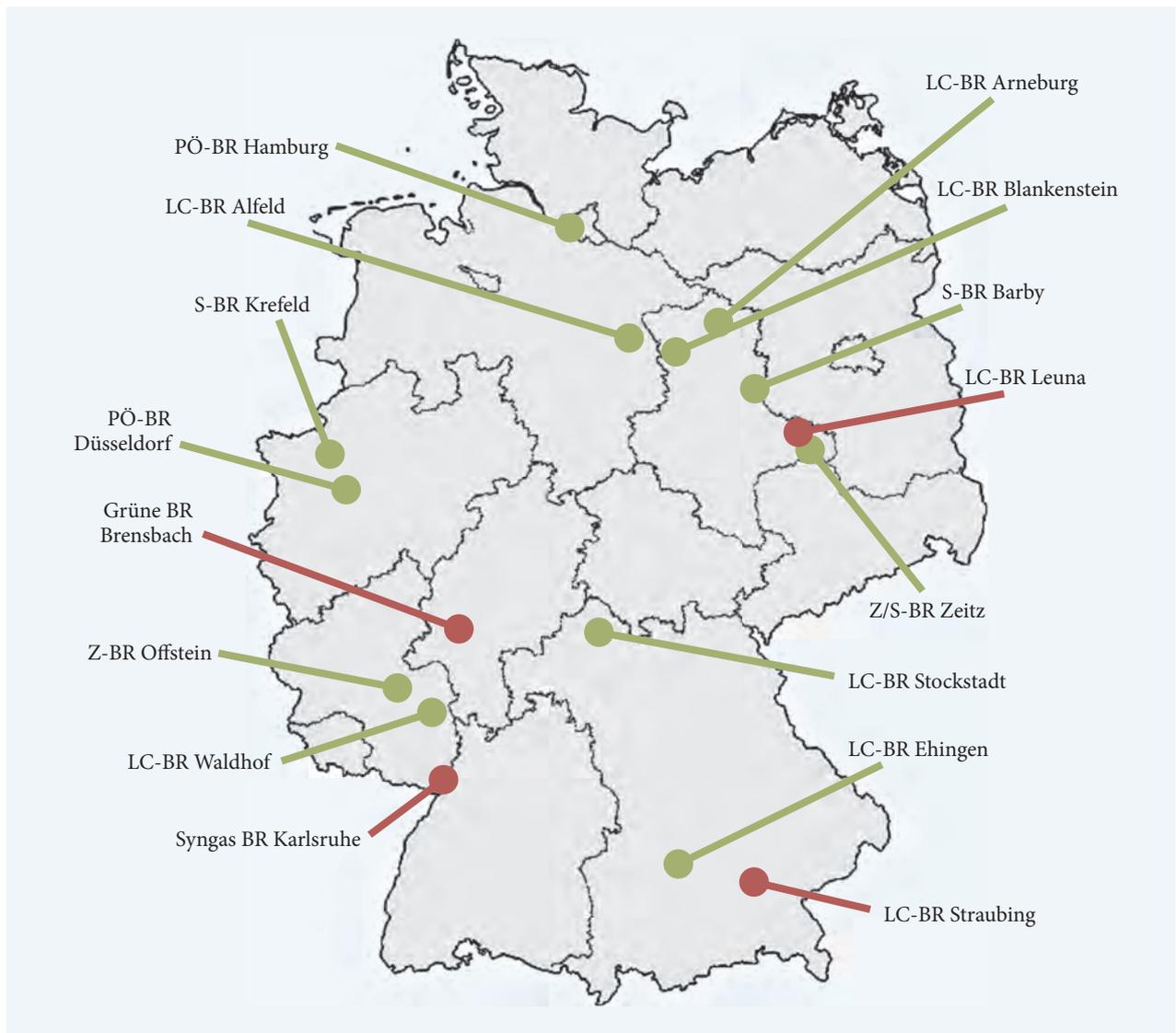


Abbildung 68: Landkarte mit realisierten Pilot- und Demonstrationsanlagen (Top-Down-Ansatz rot; Bottom-up-Ansatz grün)<sup>768,769</sup>

#### III.4.4.2 Aktuell aussichtsreichste Konzepte

Die aktuell aussichtsreichsten Bioraffinerie-Konzepte mit den dort verwendeten Rohstoffen, Verfahren der Primärraffination und möglichen Produkten werden in Tabelle 30 beschrieben.

768 vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR): Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV); Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU); Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (Hg.): Roadmap Bioraffinerien im Rahmen der Aktionspläne der Bundesregierung zur stofflichen und energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe. (2012a), S. 83 ff. sowie Anwendungsbeispiele Bioraffinerien dieses Kapitels.

769 Legende: BR = Bioraffinerie, LC = Lignocellulose, PÖ = Pflanzenöl, S = Stärke, Z = Zucker.

Tabelle 30: Aktuell aussichtsreichste Bioraffineriekonzepte<sup>770</sup>

Konzept	Rohstoff	Primärraffination	Produkte und ihre Anwendungsgebiete
Zucker-Bioraffinerie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zuckerrohr</li> <li>• Zuckerrübe (in Deutschland)</li> </ul>	Saftgewinnung, Saftreinigung, Saft eindickung und Kristallisation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dicksaft: Weiterverarbeitung zu Kristallzucker oder Substrat für Fermentation</li> <li>• Kristallzucker: Substrat für Fermentation, Ausgangsstoff für chemische Umwandlung</li> <li>• Koppelprodukte: Melasse (Fermentationssubstrat), Schnitzel (Futtermittel)</li> </ul>
Stärke-Bioraffinerie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Getreide</li> <li>• Kartoffeln</li> </ul>	Zerkleinern, Quellen, Stärkeabtrennung, Reinigung und Trocknen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Native Stärke: Direkte Weiterverarbeitung, Umsetzung zu Stärke-modifikaten und Stärkeverzuckerungsprodukten</li> <li>• Stärkemodifikate: für Papier-, Chemie-, Nahrungsmittelindustrie</li> <li>• Verzuckerungsprodukte (z.B. Glucose): Fermentationssubstrat, Ausgangsstoff für chemische Umwandlung</li> <li>• Koppelprodukte: Proteinfraktion (Futter-, Bindemittel) u. Fasern (Futtermittel)</li> </ul>
Pflanzenöl-Bioraffinerie	Ölpflanzen und -saaten (Raps, Soja, Baumwolle, Sonnenblumen, Ölpalmen, Oliven)	Reinigung, Zerkleinerung, Auspressen (kalt und warm) bzw. Extrahieren (selten auch Zentrifugieren)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pflanzenöl (energetische Nutzung): Erzeugung von Strom und Wärme (z.B. in Blockheizkraftwerken, Umesterung zur Nutzung als Kraftstoff (Biodiesel))</li> <li>• Pflanzenöl (stoffliche Nutzung): Direkt im chemisch-technischen Bereich (z.B. als Lösungsmittel), Spaltung zu Fettsäuren (Ausgangsstoff für Kosmetika, Tenside, Lacke, Farben) und Glycerin (Fermentationsrohstoff, Pharmaglycerin)</li> <li>• Koppelprodukte: Futtermittel</li> </ul>
Ligno-cellulose-Bioraffinerie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ein- und mehrjährige Gräser</li> <li>• agrarische Reststoffe (Stroh, Bagasse)</li> <li>• Holz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zerkleinern, Mahlen</li> <li>• physikalisch-chemischer Aufschluss</li> <li>• Fraktionierung in Cellulose, Hemicellulose und Lignin</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cellulose &amp; Hemicellulose: als Fermentationssubstrat, Papier- oder Chemiezellstoff</li> <li>• Lignin: Direkte Nutzung (z.B. der Lignosulfonate) als Werkstoff und zur Energiegewinnung, zukünftig auch als Aromatenquelle (z.B. Phenole)</li> </ul>
Grüne Bioraffinerie	Feuchte Biomassen (Gräser und Getreide) in grüner oder siliierter Form	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reinigen und Zerkleinern</li> <li>• Abtrennung der flüssigen Bestandteile durch Pressung</li> <li>• Fraktionierung in Presssaft und Presskuchen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• in der Regel Kopplung mit Biogasanlage (Presssaft und Presskuchen als Co-Substrat, Kopplung der Wasser- und Wärmeströme)</li> <li>• Presssaft: Verwertung in Biogasanlage, Abtrennung Inhaltsstoffe (z.B. Milchsäure, Aminosäuren, Proteine) als Fermentationsrohstoff</li> <li>• Presskuchen: Futtermittel, Rohmaterial für faserbasierte Produkte (Dämmstoffe, Cellulosefasern, faserverstärkte Kunststoffe), Fermentationsrohstoff</li> </ul>
Synthesegas-Bioraffinerie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ein- und mehrjährige Gräser</li> <li>• agrarische Rohstoffe</li> <li>• Holz und holzartige Biomasse</li> <li>• biogene Reststoffe (Altpapier, Lignin)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biomassevorbehandlung und -trocknung</li> <li>• thermische Spaltung zu flüssigen und gasförmigen Kohlenwasserstoffen und Synthesegas</li> <li>• Nachbehandlung bzw. Reinigung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kohlenmonoxid und Wasserstoff: Synthese zu chemischen Zwischenprodukten (z.B. Methanol, Dimethylether, Kohlenwasserstoffe), Kraftstoffen (sog. Biomass-to-liquid-Kraftstoffe), Synthetic Natural Gas (SNG) oder chemischen Produkten</li> <li>• weitere mögliche Nutzungen: Fermentative Umsetzung zu Alkoholen, direkte energetische Nutzung (Strom- / Wärme-gewinnung), Motorenkraftstoff, Herstellung von Wasserstoff mittels Wassergas-Shift-Reaktion</li> </ul>
Algenlipid-Bioraffinerie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mikroalgen</li> </ul>	Aufarbeitung und Abtrennung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• bislang kommerzielle Nutzung nur von einzelnen Komponenten der Algenbiomasse (hohe Wertschöpfung bei kleinen Tonnagen)<sup>769</sup></li> </ul>

770 Gesamte Tabelle: Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hg.): VDI-6310 Blatt 1 Entwurfklassifikation und Gütekriterien von Bioraffinerien. (2014), S. 10-14.

771 Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR): Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV); Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU); Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (Hg.): Roadmap Bioraffinerien im Rahmen der Aktionspläne der Bundesregierung zur stofflichen und energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe. (2012a), S. 86.

### Potenzial der biotechnologischen CO<sub>2</sub>-Nutzung in Bioraffinerien

In Nordrhein-Westfalen könnte – aufgrund der vorhandenen Nachbarindustrien (Energie, Stahl, Aluminium, Zement u.a.) – zudem ein auf CO<sub>2</sub> basiertes Bioraffinerie-Konzept erfolgversprechend sein. Wie oben bereits beschrieben, ist CO<sub>2</sub> nach der in VDI 6310 vorgenommenen Definition kein Rohstoff von Bioraffinerien, da er nicht notwendigerweise biogen ist. Eine CO<sub>2</sub>-Nutzung ist jedoch vielfach über ähnliche bzw. gleiche Konversionsverfahren, insbesondere biotechnologische Verfahren möglich.

So betreibt die neuseeländische Firma Lanzatech in China eine Pilotanlage (Kapazität 400.000 l/a), in der CO und CO<sub>2</sub> direkt aus dem Abgas eines Stahlwerks von Mikroorganismen in Ethanol umgewandelt wird<sup>772</sup>. Das Produktspektrum der verwendeten Mikroorganismen umfasst auch andere C2- bis C5-Plattformchemikalien wie Essigsäure, 2,3-Butandiol, Bernsteinsäure und Isoprene. Darüber hinaus sind die Organismen in der Lage unterschiedlichste Gasströme zu verwerten. Die biotechnologische CO<sub>2</sub>-Konversion eröffnet damit die Möglichkeit, einen weiteren Reststoffstrom nutzbar zu machen und diesen über eine biotechnologische Konversion zu einer vielfältigen Produktpalette umzuwandeln, was den Zielen einer integrierten Bioraffinerie Rechnung trägt.

Die aktuell verfügbaren industriellen CO<sub>2</sub>-Ströme sind aus Tabelle 31 ersichtlich.

Tabelle 31: Industrielle CO<sub>2</sub>-Ströme in Deutschland heute<sup>775</sup>

<b>Biogenes CO<sub>2</sub></b>	~1,2 Mio t
Bioethanolproduktion	~1 Mio. t (2008) <sup>772</sup>
Biogasanlagen <sup>773</sup>	0,2 Mio t (2011)
<b>Industrieprozesse</b>	<b>54 Mio. t (2010)<sup>774</sup></b>
Zement, Kalkstein	17,2 Mio. t
Glas, Keramik	1,1 Mio. t
Ammoniak, Methanol	8,7 Mio. t
Sodaasche, Karbid, Ruß	1,7 Mio. t
Katalysatorenabbrand	3,0 Mio. t
Umwandlungsverluste	3,8 Mio. t
Eisen/Stahl	18,2 Mio. t
Aluminium (primär)	0,6 Mio. t

#### III.4.4.3 Entwicklungsstand

Abbildung 69 zeigt einen Überblick über den Entwicklungsstand (Mai 2012) der verschiedenen vorgestellten Bioraffineriekonzepte.

772 LanzaTech: Technical Overview unter: <http://www.lanzatech.com/innovation/technical-overview/> (2014) und LanzaTech Inc. (Hg.): LanzaTech. (2014).

773 Hermann, Hauke; Emele, Lukas; Loreck, Charlotte: Öko-Institut e.V. (Hg.): Prüfung der klimapolitischen Konsistenz und der Kosten von Methanisierungsstrategien. (2014), S. 15-20.

774 ebd., S. 15

775 unter Annahme, dass nur 50% des in Biogasanlagen entstehenden CO<sub>2</sub>s verfügbar sind

776 ebd., S. 19.

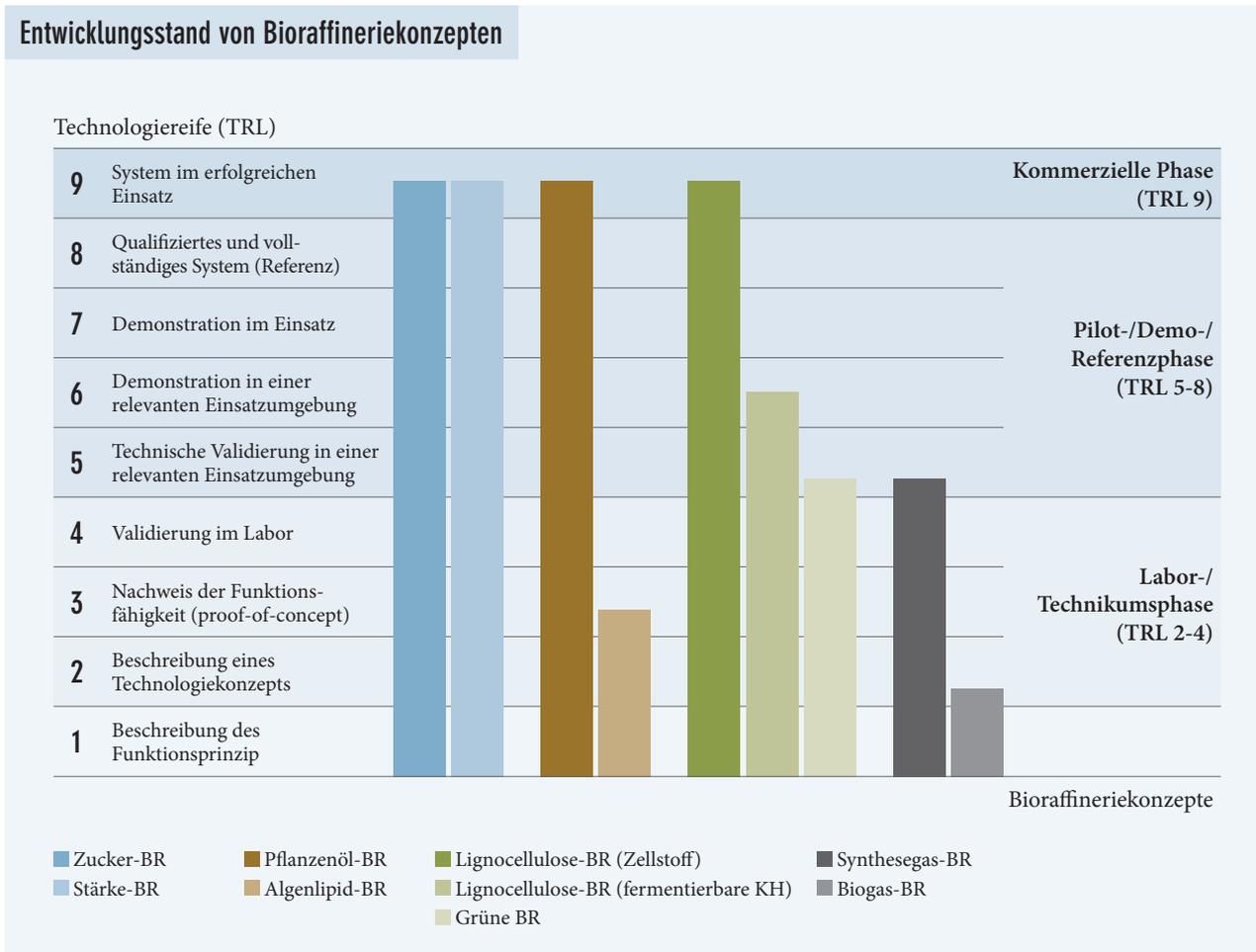


Abbildung 69: Entwicklungsstand von Bioraffineriekonzepten<sup>777</sup>

Tabelle 32 erläutert den jeweiligen Entwicklungsstand der einzelnen Bioraffinerie-Konzepte (s. hierzu auch die Anwendungsbeispiele im Anschluss).

<sup>777</sup> Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR); Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV); Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU); Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (Hg.): Roadmap Bioraffinerien im Rahmen der Aktionspläne der Bundesregierung zur stofflichen und energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe. (2012a), S. 82.

Tabelle 32: Details zum Entwicklungsstand der einzelnen Bioaffinerie-Konzepte<sup>778</sup>

Konzept	Entwicklungsstand
Zucker/Stärke-Bioaffinerie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Technologie ausgereift und in Deutschland etabliert</li> <li>• Anlagen am Markt i.d.R. keine Bioaffinerien</li> </ul>
Pflanzenöl-Bioaffinerie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• stoffliche und energetische Nutzung seit längerem etabliert</li> <li>• neu: Chemisch-technische Konversion zur Verwendung in der Oleochemie</li> <li>• Integration in einem Bioaffineriekonzept sinnvoll (z.B. am Standort Düsseldorf realisiert<sup>777</sup>)</li> </ul>
Algenlipid-BR	<ul style="list-style-type: none"> <li>• derzeit noch nicht wirtschaftlich realisierbar</li> </ul>
Lignocellulose-Bioaffinerie	<p><b>LC-BR zur Zellstoffherstellung:</b> Stand der Technik</p> <p><b>LC-BR zur Herstellung fermentierbarer Kohlenhydrate:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• bereits Mitte 20. Jahrhunderts realisiert, technisch noch nicht ausgereift genug</li> <li>• Lignocellulose-Aufschluss noch nicht für Hydrolyse zu fermentierbaren Kohlenhydrate optimiert</li> <li>• enorme Fortschritte der industriellen Biotechnologie in den letzten Jahren</li> </ul>
Grüne Bioaffinerie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• bislang nur in Teilkomponenten untersucht und nicht als integriertes Gesamtkonzept umgesetzt</li> <li>• wirtschaftlicher Betrieb (derzeit) nur in Verbindung mit Biogasanlage möglich</li> </ul>
Synthesegas-Bioaffinerie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• derzeit noch nicht im kommerziellen Maßstab realisiert</li> </ul>

#### III.4.4.4 Anwendungsbeispiele

In Deutschland werden vor allem die Etablierung von Zucker-/Stärke-Bioaffinerien, Lignocellulose-Bioaffinerien, Grüne Bioaffinerien und Synthesegas-Bioaffinerien in den Regionen Baden-Württemberg, Bayern, Brandenburg, Hessen und Sachsen-Anhalt vorangetrieben<sup>780</sup>. Neben den im Folgenden vorgestellten Beispielen sind die Synthesegas-Bioaffinerie auf Stroh-Basis des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) sowie die Grüne Bioaffinerie auf Basis von Gras der Firma biopos in Selbelang (Sachsen-Anhalt) von besonderer Bedeutung für die Bioaffinerie-Entwicklung in Deutschland.

##### Clariant Sunliquid® – Lignocellulose-Bioaffinerie auf Stroh-Basis

Sunliquid® ist ein biotechnologisches Verfahren, bei dem aus agrarischen Reststoffen (z.B. Getreide- oder Maisstroh) unter Einsatz von modifizierten Enzymen Bioethanol der 2. Generation (sog. Cellulose-Ethanol) hergestellt wird. Die im Juli 2012 in Betrieb genommene, vom BMBF geförderte Demonstrationsanlage ist ein Beispiel für den Top-down Ansatz. Sie hat eine jährliche Kapazität von etwa 4.500 t Weizenstroh, um bis zu 1.000 t pro Jahr Cellulose-Ethanol herzustellen. Der Rohstoff wird vorwiegend aus der Region um Straubing bezogen, da der Standort mit dem dortigen Donauhafen logistisch günstig gelegen ist.<sup>781</sup>

##### Lignocellulose-Bioaffinerie Leuna

Die Pilotanlage der Lignocellulose-Bioaffinerie Leuna wurde im Oktober 2012 eröffnet und ist Teil eines vom BMELV geförderten Verbundprojekts. Mit dem Vorhaben verfolgte Ziele sind u.a. die Weiterentwicklung des sogenannten Organosolv-Verfahrens zur vollständigen stofflichen Nutzung aller Komponenten der Lignocellulose (Koppelnutzung) und die Gewinnung von biobasierten Pro-

778 vgl. ebd., S. 83 ff.

779 vgl. hierzu auch Dr. Kurt Wagemann (DECHEMA): Landtag NRW (Hg.): Enquetekommission II Protokoll 17. Sitzung (nicht-öffentlich) Anhörung „Biotechnologische Verfahren“. (2014), S. 22

780 Grimm, Vera; Eickenbusch, Heinz: VDI Zentrum Ressourceneffizienz (Hg.): Rohstoffquelle Biomasse – Stand und Perspektiven. (2012a).

781 Clariant SE: Clariant startet Biokraftstoff der Zukunft (20.07.2012), S. 1f.

dukten auf Cellulose-, Hemicellulose- und Ligninbasis. Zudem soll kurzfristig eine kommerzielle Nutzung erreicht werden.<sup>782</sup>

#### Grüne Bioraffinerie der Biowert GmbH

Die Biowert GmbH betreibt kommerziell eine Grüne Bioraffinerie, in der Wiesengras zu Ökostrom sowie Kunststoff bzw. Granulat (Naturfaser-Verbundwerkstoff für Spritzguss und Extrusion), Dämmstoffen und Düngemittel verarbeitet wird. Der Rohstoff wird von Landwirten aus der Umgebung (Region Odenwald) angeliefert. Die Biowert GmbH verfolgt den Cradle to Cradle-Ansatz, bei welchem die Rohstoffe in einem Kreislaufverfahren möglichst vollständig stofflich und energetisch verwertet werden, so dass keine Abwässer oder Abfälle erzeugt und Ressourcen geringstmöglich verbraucht werden.<sup>783</sup>

#### III.4.4.5 Bioraffinerie-Entwicklung in NRW

Bioraffinerien sind ein Schwerpunkt der „Bioökonomie NRW“ des MIWF NRW.<sup>784</sup> In Nordrhein-Westfalen gibt es folgende Bioraffinerie-Forschungszentren:

- Fraunhofer-Institut Umsicht (Oberhausen): Forschung zum Einsatz von Grünschnitt und Lebensmittelresten<sup>785</sup>
- Forschungszentrum Jülich: Nutzung von Mikroalgen bei der Herstellung von Kerosin<sup>786</sup>
- RWTH Aachen: NPG<sup>2</sup> (in Errichtung, geplante Fertigstellung Ende 2015)<sup>787</sup>
- NRW Strategieprojekt BioSC (Bioeconomy Science Center): Schaffung von strukturellen, wissenschaftlichen und technologischen Grundlagen zur Entwicklung von explorativen und disziplinübergreifenden Forschungsthemen für eine nachhaltige Bioökonomie<sup>788</sup>
- BIG-C (Bio Innovation Growth mega Cluster): Kooperation zwischen Flandern, den Niederlanden und Nordrhein-Westfalen, die als regionaler Impulsgeber für Bioraffinerien Synergien zwischen den verschiedenen Programmen unter Horizon2020 herstellen und die Bioökonomie-Aktivitäten in den drei genannten Regionen synchronisieren. Ziel ist es, ein Megacenter als internationalen Vorreiter für eine biobasierte Wirtschaft und einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft zu schaffen.<sup>789</sup>

Darüber hinaus identifiziert das Regionale Innovationsnetzwerk Modellregion für eine innovative und nachhaltige Stoffstromnutzung mit den Kernpartnern CLIB2021, Deutsche Gesellschaft für Ab-

---

782 WirtschaftsWoche Green: Rohstoffe: Bioraffinerien machen Abfall zu Erdöl-Ersatz unter: <http://green.wiwo.de/rohstoffe-bioraffinerien-machen-abfall-zu-erdoel-ersatz/> (2013). Online am 23.07.2014; DECHEMA; Fraunhofer IGB; InfraLeuna GmbH (Hg.): Verbundvorhaben Lignocellulose-Bioraffinerie (Phase 2) – Aufschluss lignocellulosehaltiger Rohstoffe und vollständige stoffliche Nutzung der Komponenten. (2010), S. 6.

783 Biowert Industrie GmbH: BIEWERT – bio based industry unter: <http://www.biowert.de/company>. Online am 23.07.2014; Riehmer, Steffen; Gass, Michael: Biowert Industrie GmbH (Hg.): Die grüne Bioraffinerie Brensbach – Merkmale nach VDI 6310-1 und nachhaltige Kreislaufwirtschaft. (2014), S. 6 f., 13.

784 vgl. Ministerium für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen: Bioökonomie in NRW unter: <http://www.wissenschaft.nrw.de/forschung/fortschritt-nrw/grosse-gesellschaftliche-herausforderungen-bewaeltigen/multitalent-biotechnologie/biooekonomie-in-nrw/>. Online am 08.09.2014.

785 vgl. ebd.

786 vgl. ebd.

787 vgl. RWTH Aachen: Bioraffinerie NGP2 unter: <http://www.avt.rwth-aachen.de/AVT/index.php?id=945>. Online am 08.09.2014.

788 vgl. Bioeconomy Science Center: Strategische Entwicklung einer Forschungsinfrastruktur zur Bioökonomie in NRW unter: [http://www.biosc.de/strategieprojekt\\_biosc](http://www.biosc.de/strategieprojekt_biosc). Online am 08.09.2014.

789 vgl. Cluster Industrielle Biotechnologie e.V.: CLIB2021 und FISCH unterzeichnen LOI zur strategischen Zusammenarbeit / BIG-C Konzept vorgestellt (07.04.2014).

fallwirtschaft und EnergieAgentur.NRW potenzielle Reststoffströme zur stofflichen Verwertung z.B. in Bioraffinerien.<sup>790</sup>

### III.4.5 Annahmen

#### III.4.5.1 Marktpotenzial einzelner Bioraffineriekonzepte

Die Entwicklung wirtschaftlich attraktiver Konversionswege ist die Voraussetzung für die Steigerung des Anteils nachwachsender Rohstoffe in der chemischen Industrie. Hierzu notwendig sind effiziente Verfahren idealerweise mit geringerem Prozessaufwand, höherer Produktivität und Selektivität sowie guter Abtrennbarkeit zur einfachen Aufreinigung der Produkte. Außerdem muss die Rohstoffversorgung unter Berücksichtigung von Nutzungskonkurrenzen langfristig gesichert sein.<sup>791</sup> Bioraffinerien können den Einsatz nachwachsender Rohstoffe fördern, da sie – ebenso wie seit Jahrzehnten in der Chemieproduktion praktiziert – eine Verbundproduktion mit den entsprechenden Vorteilen anstreben<sup>792</sup>. Der Nutzung von Non-food-Biomasse (insbesondere Holz) und Reststoffströmen wird eine wichtige Bedeutung zukommen. Hierbei stellt insbesondere die Verwertung von Lignin eine besondere Herausforderung dar. Laut Prof. Wagemann „[...] kommt der Entwicklung von Lignocellulose-Bioraffinerien die größte Bedeutung zu. Eine wichtige Alternative stellen Synthesegas-Bioraffinerien dar, die auf die gleichen Rückstände zugreifen und bei denen das Synthesegas sowohl chemisch als auch biotechnologisch genutzt werden kann.“<sup>793</sup> Langfristig werden sich voraussichtlich Produktionssysteme durchsetzen, die verschiedene Produktklassen – Kraftstoffe, Energie und Chemierohstoffe – parallel (ggf. mit Koppelprodukten wie Nahrungs- und Futtermitteln) erzeugen können. Insgesamt ist eine Lebenszyklusbetrachtung zur Bewertung der Güte von Bioraffinerien erforderlich<sup>794</sup>.

In Tabelle 33 wird das Marktpotenzial der einzelnen Bioraffinerie-Konzepte nach Einschätzung der Roadmap Bioraffinerien aufgezeigt.

---

790 vgl. Ministerium für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen: Regionale Innovationsnetzwerke in NRW unter: <http://www.wissenschaft.nrw.de/forschung/fortschritt-nrw/globale-herausforderungen-lokal-meistern/regionale-innovationsnetzwerke-in-nrw/>. Online am 08.09.2014.

791 DECHEMA; Wagemann, Kurt: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Biotechnologische Verfahren“ der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2014), S. 6.

792 Dr. Kurt Wagemann (DECHEMA): Landtag NRW (Hg.): Enquetekommission II Protokoll 17. Sitzung (nichtöffentlich) Anhörung „Biotechnologische Verfahren“. (2014), S. 20.

793 Zitiert aus DECHEMA; Wagemann, Kurt: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Biotechnologische Verfahren“ der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2014), S. 6.

794 Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hg.): VDI-6310 Blatt 1 EntwurfKlassifikation und Gütekriterien von Bioraffinerien. (2014), S. 2f.

Tabelle 33: Marktpotenzial der einzelnen Bioraffineriekonzepte<sup>795</sup>

Bioraffinerie-konzept	Potenzial (Annahmen)
Zucker/Stärke-Bioraffinerie	<ul style="list-style-type: none"> <li>durch Forschungsaktivitäten (z.B. bei biotechnologischer Konversion) weitere Verwertungsfelder erschließbar</li> <li>bis 2030 Wandlung der meisten deutschen Zucker-/Stärkeindustrie zu Zucker- und Stärkebioraffinerien</li> <li>Entwicklung integrierter Standorten in Zeitz (Zucker-Bioraffinerie) und in Krefeld (Stärke-Bioraffinerie)</li> </ul>
Pflanzenöl-Bioraffinerie	<ul style="list-style-type: none"> <li>Entwicklung integrierter Konzepte mit mehrheitlich langkettigen Fettsäuren</li> <li>bis 2030 differenzierte Entwicklung: Integrierte Konzepte einerseits, standörtlich getrennte Nutzungspfade der Biomasse andererseits</li> </ul>
Algenlipid-Bioraffinerie	<ul style="list-style-type: none"> <li>Herausforderung hauptsächlich in grundlagen- und anwendungsorientierter Forschung, langfristiger Horizont</li> <li>bis 2030 verbesserte Technologiereife einschließlich Validierung und Demonstration, umfangreiche Erfahrungen aus stofflich-getriebenen Anlagen</li> </ul>
Lignocellulose-Bioraffinerie (zur Zellstoffherstellung)	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>LC-BR zur Zellstoffherstellung:</b> Höhere Wertschöpfung aus der Schwarzlauge und Verwertung der Nebenprodukte; bis 2030 Wandel vieler Standorte zu diversifiziertem Produktspektrum</li> <li><b>LC-BR zur Herstellung fermentierbarer Kohlenhydrate:</b> kostengünstiger Aufschluss und höhere Wertschöpfung bei Sekundärraffination notwendig; bis 2030 verbesserte Technologiereife</li> </ul>
Grüne Bioraffinerie	<ul style="list-style-type: none"> <li>künftige Entwicklung schwierig einzuschätzen, da Konzept in verschiedenen Varianten umsetzbar und Herausforderung der wirtschaftlichen Umsetzung</li> <li>2030 umfangreiche Erfahrungen aus Umsetzung der Grünen Bioraffinerie in Brensbach</li> </ul>
Synthesegas-Bioraffinerie	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bis 2030 Errichtung von Anlagen, dabei entweder Konzentration auf Erzeugung von Strom und Wärme <b>oder</b> Erzeugung von Biomass to Liquid-Kraftstoffen bzw. Chemikalien (keine Bioraffinerien)</li> <li>erst nach Lösung grundlegender Herausforderungen Entwicklung integrierter Konzepte möglich, daher bis 2030 nur wenige Anlagen mit umfangreicher stofflicher und energetischer Produktvielfalt</li> </ul>

Hinsichtlich des Marktpotenzials von Plattformchemikalien ist festzustellen, dass die Märkte die entsprechenden „Grundchemikalien, die mit hohen Tonnagen und sehr geringen Margen produziert werden, wenig Spielraum für Neuentwicklungen oder Kostensteigerungen [lassen]. Allerdings wird ein starker Anstieg der Investitionen in den Biomasse-Markt von 28,2 Mrd. US-Dollar (2010) auf 33,7 Mrd. US-Dollar (2015) erwartet. Der Markt für biobasierte Chemikalien verspricht ebenfalls hohe Wachstumsraten. Nach einer aktuellen Studie kann mit einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von 22% gerechnet werden. Damit könnte der weltweite Markt von 2,5 Mrd. US-Dollar (2010) auf 6,8 Mrd. US-Dollar in 2015 anwachsen.“<sup>796</sup>

### Zukünftige Verfügbarkeit von CO<sub>2</sub> in Nordrhein-Westfalen

Für ein auf CO<sub>2</sub> als Rohstoffbasis beruhendes Bioraffinerie-Konzept wären 2030 voraussichtlich die aus Tabelle 34 ersichtlichen CO<sub>2</sub>-Mengen in Deutschland aus Industrie- bzw. biotechnischen Prozessen verfügbar, unabhängig davon, welche Mengen dann aus Kraftwerken noch zur Verfügung stehen werden.

<sup>795</sup> vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR): Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV); Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU); Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (Hg.): Roadmap Bioraffinerien im Rahmen der Aktionspläne der Bundesregierung zur stofflichen und energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe. (2012a), S. 83 ff.

<sup>796</sup> Grimm, Vera; Eickenbusch, Heinz: VDI Zentrum Ressourceneffizienz (Hg.): Rohstoffquelle Biomasse – Stand und Perspektiven. (2012a), S. 9.

Tabelle 34: Voraussichtlich verfügbare industrielle CO<sub>2</sub>-Ströme in Deutschland in 2030<sup>797</sup>

	2030
<b>Biogenes CO<sub>2</sub></b>	<b>7,6 Mio. t</b>
Bioethanol-Produktion	~1 Mio. t
Biogasanlagen <sup>798</sup>	6,6 Mio. t
<b>Industrieprozesse<sup>799</sup></b>	<b>37 Mio. t</b>
Zement, Kalkstein	13,8 Mio. t
Glas, Keramik	1,1 Mio. t
Ammoniak, Methanol	6,6 Mio. t
Sodaasche, Karbid, Ruß	1,4 Mio. t
Katalysatorenabbrand	1,2 Mio. t
Umwandlungsverluste	1,5 Mio. t
Eisen/Stahl	4,4 Mio. t
Aluminium (primär)	0,6 Mio. t

Durch die Klimaschutzziele wird CO<sub>2</sub>-Fixierung oder Nutzung eine zunehmende Rolle spielen, wenn 2050 nur noch 2 Mio. t CO<sub>2</sub> der bisherigen 37 Mio. t aus Industrieprozessen emittiert werden dürfen.<sup>800</sup>

### III.4.5.2 Forschungsbedarf

Entsprechend der Roadmap Bioraffinerien gibt es folgenden Forschungsbedarf bei Bioraffinerien:

- gesamte Entwicklungskette von der Grundlagenforschung über die Prozess-, Technologie- und Produktentwicklung in Bioraffinerien,
- Förderung von Demonstrations- und Pilotprojekten im Rahmen der Verbundforschung oder Innovationsallianzen der Industrie mit der Wissenschaft zur Entwicklung von Produktionstechnologien,
- Forschungsförderung in der Land- und Forstwirtschaft zum Ausbau der notwendigen Verzahnung von Biomasseproduzenten und –abnehmern,
- Förderung von Forschung und Entwicklung in der Pflanzenzucht für den verstärkten stofflichen Einsatz von Biomasse in Deutschland durch moderne Pflanzenzüchtung und Pflanzenproduktion, einschließlich der Pflanzenbiotechnologie (z.B. zur Züchtung optimierter Rohstoffpflanzen zur Steigerung des Biomassertrags und zur Optimierung der Inhaltsstoffe)<sup>801</sup>.

Des Weiteren besteht entsprechend der obigen Ausführungen (vgl. Ist-Zustand) Forschungsbedarf in den nachfolgend aufgeführten Bereichen:

- modulareres Anlagendesign, um dem dezentraleren Anfall von nachwachsenden Rohstoffen sowie deren höheren Diversität (saisonaler Anfall, stärker Mix) gerecht werden zu können,

797 Hermann, Hauke; Emele, Lukas; Loreck, Charlotte: Öko-Institut e.V. (Hg.): Prüfung der klimapolitischen Konsistenz und der Kosten von Methanisierungsstrategien. (2014).

798 unter Annahme, dass nur 50 % des in Biogasanlagen entstehenden CO<sub>2</sub>s verfügbar sind.

799 Abschätzungen für Jahr 2030 entsprechend Klimaschutzszenario mit Emissionsminderung von 90 % bis 2050 (bezogen auf Emissionen in 2010).

800 ebd., S.19.

801 vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR): Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV); Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU); Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (Hg.): Roadmap Bioraffinerien im Rahmen der Aktionspläne der Bundesregierung zur stofflichen und energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe. (2012a), S. 95 f.

- effizientere Verfahren zum Rohstoffaufschluss und zur -verarbeitung (Verständnis über Aufschluss und Umwandlung von Biomasse, Weiterentwicklung technischer Verfahren zur Verarbeitung von Rohstoffen im Bereich Verfahrenstechnik und Logistik),
- Prozessentwicklung, -intensivierung, -integration (Verbindung von chemischen und biotechnologischen Prozessen),
- deutliche Erhöhung der Raum-Zeit-Ausbeuten und Nutzungsgrad der eingesetzten Biomasse,
- Entwicklung neuer Produkte, die sich an der natürlichen Molekülstruktur orientieren, sowie die Identifikation geeigneter Anwendungsbereiche,
- Verifizierung einer ökologischen und ökonomischen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen (z.B. Lebenszyklusanalyse, techno-ökonomische Bewertung).

### III.4.6 Option F.1: Technologiekonzept Bioraffinerie allgemein

#### Beschreibung

Diese Option beschreibt das allgemeine Potenzial des Bioraffinerie-Konzepts und soll für die anschließende Bewertung eine Einschätzung ermöglichen, ob Bioraffinerien in Nordrhein-Westfalen unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeitskriterien in Zukunft als Ergänzung der Erdölraffinerie dienen können.

#### Begründung

Die Integration nachwachsender Rohstoffe in chemische Wertschöpfungsketten erfordert eine Anpassung der angewandten Verfahren sowie den Aufbau einer neuen Infrastruktur. Die Bioraffinerie ist ein möglicher Weg zur Bewältigung der in diesem Zusammenhang bestehenden Herausforderungen (vgl. Kapiteleinleitung).

Nordrhein-Westfalen als potenzieller Standort für Bioraffinerien zeichnet sich dabei durch eine hohe Dichte von Unternehmen der Nahrungsmittelindustrie z.B. Ölmühlen, Ölverarbeitung, Stärke- und Zuckerraffinerien aus, die einen Ausbau zu Bioraffinerien nach dem Bottom-up-Prinzip erlauben. Darüber hinaus existieren mehrere Chemieparks sowie weitere große Chemiestandorte, die eine Integration der Bioraffinerie oder ihrer Produkte in die chemische Wertschöpfungskette ermöglichen.

Neben der chemischen Industrie sind auch die Kunststoff- und Papierindustrie potenzielle Abnehmer von Bioraffinerieprodukten. Wie bereits beschrieben, weist Nordrhein-Westfalen eine geeignete Infrastruktur für die notwendige Logistik von Bioraffinerien auf. Diese ermöglicht den Transport sowohl heimischer als auch importierter Rohstoffe. Für die heimische Rohstoffproduktion stehen, wie beschrieben, große landwirtschaftliche Flächen zur Verfügung. Aufgrund der dichten Besiedlung Nordrhein-Westfalens ist jedoch das genaue Zusatzpotenzial zu ermitteln. Dieses Rohstoffpotenzial für eine Bioraffinerie in NRW kann jedoch erheblich erhöht werden, wenn industrielle Gasströme einbezogen werden. Eine zusätzlich für NRW attraktive Erweiterung des Fokus ist die Vergasung kommunaler Abfälle, wie sie in vielen anderen Ländern schon praktiziert wird. Für die (Weiter-) Entwicklung von Bioraffinerien stellt die derzeit gute Wissenschaftslandschaft Nordrhein-Westfalens einen weiteren Standortvorteil dar.

#### Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte

##### Ökologie

###### *Ressourceneffizienz und Biodiversität/Landnutzung*

Mittels Bioraffinerien könnten fossile Rohstoffe, insbesondere Erdöl, durch nachwachsende Rohstoffe und ggf. CO<sub>2</sub> substituiert werden. Das Bioraffinerie-Konzept strebt zudem eine kombinierte Koppel- und Kaskadennutzung von Rohstoffen sowie eine Nutzung von Reststoffströmen an, was

ebenfalls ressourcenschonend ist. Allerdings sind eine intensivierete Land- und Forstwirtschaft mit den im Kapitel II.1 beschriebenen ökologischen Nachteilen (z.B. Landnutzung, Wasserverbrauch) verbunden. Insgesamt steht der Nachweis der ökologischen Vorteilhaftigkeit im Vergleich zu bestehenden (petrochemischen) Verfahren allerdings noch aus bzw. ist jeweils im Einzelfall zu erbringen.

Beim Vergleich der im Ist-Zustand beschriebenen Prozessmöglichkeiten zur Nutzung nachwachsender Rohstoffe lässt sich tendenziell festhalten, dass das Herunterbrechen auf C1-Bausteine durch Vergasung im Hinblick auf die Kohlenstoff- und Energieeffizienz nicht sinnvoll ist. Daher ist es Ziel, natürliche molekulare Strukturen möglichst beizubehalten, wobei diese Strategie wiederum komplexere Verarbeitungsprozesse im Vergleich zu konventionellen Verfahren erfordert.

#### *Carbon Footprint*

Durch die Substitution von fossilen mit nachwachsenden Rohstoffen könnten CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart werden. Aufgrund des höheren Volumens von Biomasse im Vergleich zu Erdöl bei gleichzeitig geringerer Energiedichte ist der Transport von Biomasse mit einem vergleichsweise höheren CO<sub>2</sub>-Ausstoß und entsprechend höheren Kosten verbunden. Dieser Nachteil vergrößert sich beim Biomasseimport aus dem Ausland bzw. Regionen außerhalb Nordrhein-Westfalens weiter. Intensive Landwirtschaft kann ebenfalls einen negativen CO<sub>2</sub>-Beitrag bedeuten. Auch hier gilt es, die Vorteilhaftigkeit der Bioraffinerien im Einzelfall zu prüfen.

#### **Ökonomie**

Die Effizienz aktueller petrochemischer Verfahren basiert auf dem engen Stoff- und Energieverbund sowie auf der Nutzung gemeinsamer Infrastruktur, die insbesondere in Chemieparcs stark ausgeprägt ist. Ein Wechsel der Rohstoffbasis erfordert deshalb einen weitreichenden Umbau dieser komplexen Verbundstrukturen.<sup>802</sup> Gleiches gilt für nachgeschaltete Abnehmer von (Zwischen-) Produkten. Dieser Aufwand ist bei Drop-ins (vgl. Werkstoffkapitel) geringer als bei völlig neuartig konzipierten Produkten. Bioraffinerieprodukte stehen zudem in unmittelbarer Konkurrenz zu erdölbasierten Produkten hinsichtlich Qualitätsanforderungen, Preis, Wirtschaftlichkeit, Rohstoffverfügbarkeit und Produkteigenschaften. Bezüglich der Anwendungsbereiche besteht eine Konkurrenz um Rohstoffe und Absatzmärkte (Preis, Menge) mit Treibstoffen und Energieerzeugung sowie dem Lebensmittel- und Futtermittelsektor. Dabei ist zu beachten, dass die chemische Industrie neben der Nahrungsmittelindustrie die höchste Wertschöpfung generieren kann.

Hinsichtlich des technischen Substitutionspotenzials gilt es Folgendes zu beachten: Theoretisch können sämtliche bestehenden chemischen Produkte über C1-Bausteine bzw. C2-C6-Basischemikalien aus Biomasse hergestellt werden. Eine große Herausforderung bleibt die Herstellung von biobasierten Aromaten (vgl. Rohstoffkapitel).

#### *Forschungsintensität*

Wissen und Erfahrung bezüglich integrativer Bioraffinerie-Konzepte sind derzeit noch gering. In Deutschland sind Pilot- bzw. Demonstrationsanlagen für integrative Konzepte (Phase III-Bioraffinerien) vereinzelt bereits vorhanden. Eine kommerzielle Produktion (z.B. Biowert GmbH) findet bislang nur mit kleinen Kapazitäten statt.

Wie bereits oben beschrieben, unterscheiden sich nachwachsende Rohstoffe wesentlich von den derzeit hauptsächlich genutzten fossilen Rohstoffen. Hieraus ergeben sich vielfältige Herausforderungen für die anzuwendenden Verfahren zum Rohstoffaufschluss, zur Herstellung der Plattformchemikalien sowie zur

---

802 GDCh; DECHEMA; DGMK; VCI (Hg.): Positionspapier: Rohstoffbasis im Wandel. (2010), S. 33-34.

weiteren Veredlung. Hierzu bestehen in Deutschland sowie auch international intensivste Forschungsanstrengungen. Einen besonderen Schwerpunkt bildet dabei die stoffliche Lignocellulose-Nutzung.

#### *Wettbewerbsfähigkeit*

Nachwachsende Rohstoffe werden bereits heute dort erfolgreich in der Spezial- und Feinchemikalien- sowie pharmazeutischen Industrie mit wirtschaftlichem Erfolg eingesetzt, wo sie vereinfachte Verfahren und die Herstellung von Produkten ermöglichen, die auf konventionellem Wege nicht zugänglich wären.

Es ist davon auszugehen, dass sich die Produktpalette auf Basis nachwachsender Rohstoffe ausweiten wird, wo die natürliche Molekülstruktur genutzt und damit neue und innovative Eigenschaften erschlossen werden können. Der Markterfolg für biobasierte Wertschöpfungsketten wird wesentlich davon abhängen, ob es gelingt, die eingesetzten Rohstoffe möglichst vollständig zu nutzen und die entstehenden Nebenprodukte ebenfalls einer Wertschöpfung zuführen zu können. Produkte mit neuen Eigenschaften bieten gegenüber Drop-in-Lösungen gewisse Vorteile für die Markterschließung, da sie nicht direkt mit preisgünstigeren petrochemischen Produkten konkurrieren und idealerweise ein verbessertes Eigenschaftsprofil besitzen. Dies gilt in besonderer Weise für Produkte mit hoher Wertschöpfung, auch wenn die entsprechenden Märkte kleiner sind. Drop-in-Lösungen dagegen sind (aktuell) zumeist gegenüber erdölbasierten Produkten nicht wettbewerbsfähig. Zudem wird dieses Potenzial durch die verfügbaren Rohstoffmengen begrenzt. Daher ist voraussichtlich nur die Substitution von Teilmengen insbesondere im Bereich der Grundchemikalien realisierbar.

#### *Auswirkungen auf Wertschöpfungsketten und Infrastruktur*

Wie oben bereits beschrieben, ist eine Integration von Drop-in-Produkten aus Bioraffinerien in die chemische Wertschöpfungskette vergleichsweise einfacher. Allerdings bestehen in jedem Fall Herausforderungen hinsichtlich Logistik, Rohstoffaufarbeitung und der Herstellung von Plattformchemikalien. Langfristig wird der Aufbau neuer biobasierter Wertschöpfungsketten mit fortlaufender technologischer Weiterentwicklung und hohem Investitionsaufwand möglich sein. Im Zuge dessen werden (neue) Kooperationen entlang der Wertschöpfungsketten zwischen den Industriezweigen Chemie, Forst-, Land- und Energiewirtschaft erforderlich sein.

Die Logistikkette von Rohstoffen (Erzeuger) über die Raffinerie bis zum Chemiepark ist neu aufzubauen, insbesondere wenn der Rohstoffaufschluss/die Erstverarbeitung in einer Bioraffinerie dezentral erfolgt. Befindet sich die Bioraffinerie zentral in einem Chemiepark, müssen die Rohstoffe unter Umständen längere Transportwege überwinden (vgl. nachfolgenden Abschnitt Versorgungssicherheit). Aktuell ist noch nicht ersichtlich, ob die Aufarbeitung der Rohstoffe sinnvollerweise am Rohstoffproduktionsort oder am Ort der späteren Veredlung stattfindet. Die Betreiberfrage für Bioraffinerien ist derzeit noch unklar, die chemische Industrie ist in der Wertschöpfungskette Abnehmer der Produkte, ähnlich wie bei der Erdölraffinerie.

#### *Versorgungssicherheit*

Auf Grund der hohen Besiedlungsdichte Nordrhein-Westfalens stehen (weitere) Acker- und Forstflächen zur Produktion von Biomasse für Bioraffinerien nur begrenzt zur Verfügung. Die biogenen Rohstoffe für Bioraffinerien stehen zudem in einer Nutzungskonkurrenz mit Nahrungs- und Futtermitteln einerseits und Biokraftstoffen andererseits. Deshalb ist davon auszugehen, dass nachwachsende Rohstoffe nicht in ausreichender Menge zur Verfügung stehen werden. Damit kann die Etablierung von Bioraffinerien eine Abhängigkeit von Rohstoffimporten bedeuten. Darüber hinaus ist eine ganzjährige kontinuierliche Versorgung der Bioraffinerien mit biogenen Rohstoffen – mit Ausnahme von Holz und CO<sub>2</sub> – aus heimischen Rohstoffquellen nicht möglich (maximal zwei bis drei Ernten pro Jahr). Für das Bioraffinerie-Konzept stellt die Lagerung biogener Rohstoffe eine

weitere Herausforderung dar, da nachwachsende Rohstoffe eine schlechtere Lagerfähigkeit als fossile Rohstoffe aufweisen. Zudem sind nachwachsende Rohstoffe hinsichtlich der verfügbaren Mengen und Qualität als Naturprodukt (Möglichkeit von Missernten, Sturmschäden, Dürren etc.) ständigen Schwankungen unterlegen, was die industrielle Verarbeitung in einer Bioraffinerie erschwert.

Eine Analyse des Wissenschaftsministerium hat ergeben, dass in Nordrhein-Westfalen in der Region um Marl (Ruhrgebiet) eine ausreichende Menge an Stroh für eine Demonstrationsanlage mit ca. 15.000 t Produkt (Polymere aus Biomasse) vorhanden ist (Mengenbedarf hierfür: 75.000 t Stroh). Der für die Weiterverarbeitung benötigte Wasserstoff könnte vom dortigen Chemiepark zur Verfügung gestellt werden. Alternative Rohstoffe wie Miscanthus, Zuckerrüben oder Gülle wären ebenfalls denkbar, besitzen jedoch entscheidende Nachteile, weshalb Stroh als Biomasse für eine solche Anlage favorisiert wird.<sup>803</sup>

### *Akzeptanz*

Die prinzipielle Akzeptanz des Bioraffineriekonzeptes wird voraussichtlich groß sein, da „Bio“ im Trend ist. Sie wird allerdings dort in Frage gestellt, wo die Tank-Teller-Diskussion geführt werden muss. Dies gilt weniger für Non-Food-Biomasse bzw. Abfall- und Reststoffe. Grundsätzlich ist ein breiter gesellschaftlicher Dialog erforderlich.

### **Soziales**

#### *Beschäftigung*

Durch Aufbau und Betrieb von Bioraffinerien können neue Arbeitsplätze entstehen (teilweise durch Verlagerungen von Beschäftigungsverhältnissen in Erdölraffinerien). Die Vergrößerung der land- und forstwirtschaftlichen Flächen in Nordrhein-Westfalen würde unter Umständen zu (geringfügig) mehr Arbeitsplätzen führen.

#### *Bildung*

Die sehr komplexen Fragestellungen im Hinblick auf die Entwicklung nachhaltiger Bioraffineriekonzepte lassen sich nur interdisziplinär beantworten. Dementsprechend besteht Anpassungsbedarf bei den Lerninhalten in der Aus- und Weiterbildung von Verfahrenstechnikern, Biotechnologen und Chemikern. Darüber ist das Wissen von Ökonomen, Logistikern u.a. erforderlich.

Sofern der Aufbau von Bioraffinerien in Nordrhein-Westfalen generell als sinnvoll erachtet wird (vgl. Option I. Technologiekonzept allgemein), gilt es, die in den Unteroptionen 1a) bis 1f) genannten Bioraffineriekonzepte auf ihr spezifisches Potenzial hin zu überprüfen.

Option 1a) Aufbau und Einsatz: Zucker- und Stärke-Bioraffinerie

Option 1b) Aufbau und Einsatz: Pflanzenöl-Bioraffinerie

Option 1c) Aufbau und Einsatz: Lignocellulose-Bioraffinerie

Option 1d) Aufbau und Einsatz: Grüne Bioraffinerie

Option 1e) Aufbau und Einsatz: Algen-Bioraffinerie

Option 1f) Aufbau und Einsatz: Synthesegas-Bioraffinerie (Potenzial CO<sub>2</sub>-Nutzung).

Zur Erleichterung der Bewertung sind in Tabelle 35 die jeweiligen Herausforderungen bei der Etablierung der einzelnen Bioraffineriekonzepte aufgezeigt:

---

803 vgl. Ministerium für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen (MIWF) (Hg.): Kosten und Potentiale zum Einsatz von Biomasse in Bioraffinerien zur Herstellung von Biopolymeren am Beispiel von Stroh. Diskussionsgrundlage für Follow-up-Gespräch Landwirtschaft/Chemie/Energie am 29.1.2013; Datenquellen: Landwirtschaftskammer NRW und Forschungsnetzwerk BRW-Agrar. (2013), S.1.

Tabelle 35: Herausforderungen bei Etablierung der einzelnen Bioraffineriekonzepte<sup>804</sup>

Unteroption	Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken des Konzepts
1a) Zucker- und Stärke-Bioraffinerie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Stärken:</b> Strukturen bereits aufgebaut, Wissen/Erfahrung sowie deutsche und europäisch aufgestellte Industrie vorhanden, starke FuE bei biotechnologischer Konversion von Kohlenhydraten; Rohstoffe in Deutschland, Europa und global vorhanden; Möglichkeiten zur Erzeugung von Überschüssen in Deutschland bei Zuckerrübe und Weizen vorhanden</li> <li>• <b>Schwächen:</b> Produktdiversifizierung noch nicht ausreichend, Veredelung zu verbessern, integrierte Produktion biobasierter Produkte ausbaufähig, Verknüpfung mit chemischer Industrie unterentwickelt, Akzeptanz (Tank-Teller-Diskussion), Anbau von Zuckerpflanzen in Deutschland nicht wettbewerbsfähig</li> <li>• <b>Chancen:</b> Weiterentwicklung via Bottom-up-Szenario; zusätzliche Wertschöpfung durch Integration; Realisierung von Synergieeffekten durch gekoppelte Prozesse</li> <li>• <b>Risiken:</b> deutsche Zucker-/Stärkeindustrie global schwach positioniert, Konkurrenz durch global agierende agroindustrielle Firmen, die vorwärts oder Chemieunternehmen, die rückwärts integriert sind</li> </ul>
1b) Pflanzenöl-Bioraffinerie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Stärken:</b> Rückgriff auf bestehende Strukturen der Pflanzenölproduktion und -verarbeitung möglich, Koppelnutzung der Presskuchen als Futtermittel</li> <li>• <b>Schwächen:</b> Rohstoffe für kurzkettige Fettsäuren in Deutschland und Europa nicht verfügbar (nur in sub-/tropischen Ländern)</li> <li>• <b>Chancen:</b> Weiterentwicklung bestehender Standorte</li> <li>• <b>Risiken:</b> Verlagerung der Herstellung von oleochemischen Zwischenprodukten in außereuropäische, rohstoffarme Länder, Rohstoffverknappung durch zunehmenden Bedarf an Pflanzenölen für Nahrungsmittel bzw. subventionierter Bioenergieherstellung</li> </ul>
1c) Algenlipid-Bioraffinerie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Stärken:</b> FuE in Deutschland stark</li> <li>• <b>Schwächen:</b> klimatische Voraussetzungen in Deutschland nicht optimal; Produktentwicklung und -veredelung unterentwickelt</li> <li>• <b>Chancen:</b> Erschließung neuer Biomassequellen, Wertschöpfung durch Produkte mit neuen Funktionalitäten und Nutzungsoptionen</li> <li>• <b>Risiken:</b> Bei Mikroalgenkultivierung geografischer Nachteil für Deutschland gegenüber anderen globalen Standorten, starke FuE außerhalb Deutschlands, noch hoher Forschungsbedarf</li> </ul>
1d) Lignocellulose-Bioraffinerie	<p><b>Zellstoffherstellung:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Stärken:</b> gut entwickelte Zellstoffindustrie; innovative Chemie- und Biotechnologieunternehmen etabliert; Rohstoffe in Deutschland, Europa und global prinzipiell verfügbar; nicht genutztes Potenzial land- und forstwirtschaftlicher Reststoffe vorhanden</li> <li>• <b>Schwächen:</b> Konkurrenzsituation bei der Nutzung von (einheimischem) Waldholz; Synthesegas-Bioraffinerie hat gleichen Rohstoff; Verknüpfung mit Wertschöpfungskette der chemischen Industrie unterentwickelt</li> <li>• <b>Chancen:</b> Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit und Weiterentwicklung bestehender Standorte der Zellstoffindustrie durch Diversifizierung; neue Produkte über Bottom-up-Szenario; Neue Wachstumsmärkte über Top-down-Szenario; Exportmöglichkeiten deutscher Technologien und Anlagen</li> <li>• <b>Risiken:</b> Konkurrierende Nutzungsoptionen für Lignocellulose</li> </ul> <p><b>Zur Herstellung fermentierbarer Kohlenhydrate:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Stärken:</b> Starke FuE in Deutschland und Erfahrung zu chemischer und biotechnologischer Konversion von Kohlehydraten und deren Weiterveredelung</li> <li>• <b>Schwächen:</b> hoher FuE-Bedarf für Primär- und Sekundärraffination bei vielen Varianten</li> <li>• <b>Chancen:</b> Erschließung einer neuen Quelle für fermentierbare Kohlenhydrate, Potenzial zur Nutzung lignocellulosischer Reststoffe</li> <li>• <b>Risiken:</b> Konkurrierende Nutzungsoptionen für Lignocellulose</li> </ul>

804 vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR): Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV); Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU); Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (Hg.): Roadmap Bioraffinerien im Rahmen der Aktionspläne der Bundesregierung zur stofflichen und energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe. (2012a), S. 83 ff.

Unteroption	Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken des Konzepts
1e) Grüne Bioraffinerie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Stärken:</b> weltweit führende Forschung im Bereich Biogaserzeugung</li> <li>• <b>Schwächen:</b> nur an Standorten und Regionen realisierbar, die über bisher nicht-bewirtschaftetes Grünland verfügen; wirtschaftlicher Betrieb derzeit nur in Verbindung mit einer Biogasanlage</li> <li>• <b>Chancen:</b> Weiterentwicklung bestehender Anlagen durch Diversifizierung über Bottom-up-Szenario; Technologieexport</li> <li>• <b>Risiken:</b> alternative biogene Zugangsmöglichkeiten zu Produkten und damit kein Markt für Bioraffinerien</li> </ul>
1f) Synthesegas- (Bio-)Raffinerie (inkl. CO <sub>2</sub> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Stärken:</b> starke FuE in Deutschland, Rohstoffe zur Vergasung in Deutschland, Europa und global prinzipiell verfügbar</li> <li>• <b>Schwächen:</b> hoher Rohstoffbedarf in Folge großer Anlagen, Konkurrenzsituation bei Nutzung von (heimischem) Waldholz, gleiche Rohstoffbasis wie Lignocellulose-Bioraffinerie, Integration einzelner Elemente und Validierung im Zusammenwirken noch nicht ausgereift, Biotechnologische Konversion von Synthesegas bislang unterentwickelt</li> <li>• <b>Chancen:</b> nahezu vollständige Nutzung der Biomasse, hohe Produktvielfalt, Entwicklung neuer Industrien über Top-down-Szenario, Exportmöglichkeiten für deutsche Technologien und Anlagen, einfacher und globaler Zugang zur Wertschöpfungskette der chemischen Industrie möglich, alternative Kohlenstoffquelle für Fermentationen</li> <li>• <b>Risiken:</b> konkurrierende Nutzungsoptionen für lignocellulosische Biomasse; starke, kompetitive Forschung im Ausland</li> </ul>

### III.4.7 Bewertung Option F.1: Technologiekonzept Bioraffinerie allgemein

#### Ökologie

Mittels Bioraffinerien können alternative Rohstoffquellen<sup>805</sup> zur Verbundproduktion von Chemikalien, Werkstoffen, Brenn- und Kraftstoffen sowie zur Erzeugung von Energie genutzt werden. Sie stellen damit eine Möglichkeit für den Aufbau einer biobasierten Wirtschaft dar. Werden heute vor allem nachwachsende Rohstoffe mit leicht zugänglichen Kohlenstoffverbindungen, wie z.B. Kohlenhydrate in Getreide oder Mais, eingesetzt, wo eine Konkurrenz zur Nahrungsmittel- und Futtermittelproduktion besteht, wird zunehmend die Nutzung von non-food-Biomasse und Reststoffströmen sowie eine möglichst vollständige Verwendung der Biomasse angestrebt. Bioraffinerien haben damit das Potenzial regionale Stoffkreisläufe zu schließen. Bioraffineriekonzepte werden vor allem dann kritisch beurteilt, wenn deren Rohstoffbasis auf nachwachsenden Rohstoffen beruht, die in großen Monokulturen angebaut werden.

#### Ökonomie

Die chemische Industrie wird vor allem Abnehmer von Bioraffinerieprodukten sein und sie nicht selbst herstellen. Ihre erfolgreiche Integration in die entsprechenden chemischen Wertschöpfungsketten setzt angepasste wettbewerbsfähige Prozessrouten sowie eine geeignete Produktpalette voraus. Die aktuelle Produktpalette von Bioraffinerien ist noch eingeschränkt, was vor allem an der fehlenden wirtschaftlichen Wettbewerbsfähigkeit gegenüber etablierten petrochemischen Rohstoffen liegt. Der dezentralere Rohstoffanfall sowie der deutlich niedrigere Energie- und höhere Wassergehalt nachwachsender Rohstoffe stellen hierbei weitere ökonomische Hürden dar. Der künftige Markterfolg von Bioraffinerieprodukten wird deshalb wesentlich davon abhängen, ob es gelingt, die eingesetzten Rohstoffe möglichst vollständig zu nutzen und die entstehenden Koppelprodukte ebenfalls einer Wertschöpfung zuzuführen. Dabei besteht eine Konkurrenz bei biobasierten Chemikalien und Werkstoffen um Rohstoffe und Absatzmärkte mit der Treibstoff- und Energieerzeugung sowie dem Lebensmittel- und Futtermittelsektor. Mittelfristig wird sich die Produktpalette an Drop-in-Lösungen für eine vereinfachte Integration in bestehende Wertschöpfungsketten ori-

805 Im Rahmen dieses Berichtes wurde neben dem Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen auch eine CO<sub>2</sub>- und Synthesegas-Nutzung in Bioraffinerien betrachtet.

entieren. Langfristig werden sich zunehmend neue Wertschöpfungsketten durchsetzen, die der natürlichen Struktur und den Eigenschaften nachwachsender Rohstoffe stärker Rechnung tragen. Die wettbewerbsfähige Produktion von Grundchemikalien stellt dabei eine besondere ökonomische Herausforderung dar. Ihnen kommt jedoch eine essentielle Schlüsselrolle für den Aufbau biobasierter Wertschöpfungsketten zu.

Aufgrund der sehr breiten chemischen Zusammensetzung nachwachsender Rohstoffe mit hochfunktionalisierten Molekülen ist eine grundlegende Anpassung der Verarbeitungsverfahren notwendig. Dies gilt auch für eine mögliche CO<sub>2</sub>-Nutzung in Bioraffinerien. Großer Forschungsbedarf besteht vor allem hinsichtlich einer bestmöglichen Abstimmung der Teilprozesse.

Die Versorgungssicherheit mit Rohstoffen gleichbleibender Qualität spielt für die Etablierung von Bioraffinerien eine zentrale Rolle, da die Rohstoffbasis bei einer klassischen Anlagenkonzeption auf mehrere Jahrzehnte gesichert sein muss. Bei einem breiten Ausbau von Bioraffinerien ist wegen der begrenzten lokalen Verfügbarkeit von Rohstoffen eine hohe Importabhängigkeit zu erwarten. Dabei ermöglicht die vorhandene Infrastruktur es prinzipiell, Rohstoffe und Zwischenprodukte aus anderen (Welt-)Regionen zu beziehen. Weiterhin ist zu beachten, dass viele nachwachsende Rohstoffe oder ihre Reststoffe nur saisonal anfallen und somit große Lagerkapazitäten zur Bevorratung erfordern oder in erntezeitabhängigen Kampagnen verarbeitet werden müssen. Die Bevorratung wird zusätzlich dadurch erschwert, dass viele nachwachsende Rohstoffe nur eingeschränkt lagerfähig sind. Der dezentrale Anfall nachwachsender Rohstoffe und entsprechender Reststoffströme erfordert darüber hinaus neue Logistikkonzepte z.B. einer dezentralen Rohstoffaufarbeitung zu leichter transportierbaren Fraktionen (z.B. Stärke), die zur Weiterverarbeitung in die eigentliche Bioraffinerie gebracht werden.

Weiterhin ist zu beachten, dass die mittel- bis langfristige Verfügbarkeit entsprechender Gasströme von der Entwicklung der jeweiligen Emissionsprozesse in NRW abhängig ist (vgl. Kapitel II.1).

Generell besitzen Lignocellulose- und Synthesegas-Bioraffinerien die größte strategische Bedeutung. Im Hinblick auf das Standortprofil NRW gilt dies hier in erster Linie für die Synthesegas-Bioraffinerie. Als NRW-Standort einer Lignocellulose-Bioraffinerie auf Basis einheimischer Rohstoffe käme nach bisherigem Wissenstand nur Marl in Frage. Die (Co-)Verwertung von CO<sub>2</sub> sollte in das Technologiekonzept mit einbezogen werden.

### **Soziales**

Insgesamt ist durch den Aufbau von Bioraffinerien in NRW mit einer Verlagerung von Beschäftigungsverhältnissen aus Erdölraffinerien zu rechnen.

Zur Realisierung sind (neue) Kooperationen entlang der Wertschöpfungsketten zwischen den Industriezweigen Chemie, Forst-, Land- und Energiewirtschaft erforderlich. Die sehr komplexen Fragestellungen für die Entwicklung nachhaltiger Bioraffineriekonzepte lassen sich nur interdisziplinär beantworten. Dementsprechend besteht Anpassungsbedarf bei den Lerninhalten in der Aus- und Weiterbildung.

### **Zusammenfassung**

Die Integration nachwachsender Rohstoffe in chemische Wertschöpfungsketten erfordert eine Anpassung der angewandten Verfahren sowie den Aufbau einer neuen Infrastruktur. Bioraffinerien bieten hier die Chance die entsprechenden Herausforderungen zu bewältigen. Die erfolgreiche Umsetzung des Technologiekonzepts stellt damit einen wichtigen Baustein für den Aufbau einer wissensbasierten Bioökonomie dar. In diesem Zusammenhang sind Demonstrations- und Pilotprojekte

essentiell. Deutschland hat im internationalen Vergleich eine sehr gute Wettbewerbsposition hinsichtlich der Technologieentwicklung, da hier der Fokus stärker auf der Gewinnung von Chemikalien und weniger auf Biokraftstoffen liegt.

Bioraffinerien in NRW sollten zur Nutzung von non-food-Biomasse sowie die Schließung regionaler Stoffkreisläufe beitragen. Als Rohstoffe eignen sich standortbedingt insbesondere agrarische bzw. forstwirtschaftliche und industrielle Reststoffströme nachwachsender Rohstoffe sowie CO<sub>2</sub>-haltige und Synthesegas-Abgasströme (aus Großindustrien). Die existierende Infrastruktur in den NRW-Chemieparks bzw. an anderen großen Chemiestandorten bieten gute Voraussetzungen für die Integration der Bioraffinerie-Demonstrationsanlage und ihrer Produkte. Zudem sind in NRW weitere potenzielle Abnehmerindustrien wie die Kunststoff- oder Papierindustrie angesiedelt.

Eine Kombination mit dem Technologiekonzept der Future Factories könnte mittel- bis langfristig helfen, Bioraffinerien auf die Standortbedürfnisse in NRW (z.B. dezentral anfallende Rohstoffströme) besser anpassen zu können. Hierzu kann auf ein starkes und enges Netz von Akteuren der industriellen Biotechnologie und der Prozessintensivierung zurückgegriffen werden.

## III.5 Verfahren der biomimetischen Chemie

### III.5.1 Einleitung

Entsprechend des Antrags zur Einrichtung einer Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen soll das Potenzial der biomimetischen Chemie anhand folgender Fragestellungen untersucht werden:

- Welche Stoff- und Produktzyklen und -kreisläufe geraten nach der derzeitigen Chemieproduktion mit natürlichen (lebendigen) Zyklen, Dauern und Kreisläufen in Widerspruch?
- Welche natürlichen und biologischen Prozesse bei der Stoff- und Energieumwandlung (z.B. künstliche Photosynthese, enzymatische Reaktionen, bakterielle Umwandlungsprozesse etc.) sind wegen ihrer Naturverträglichkeit zukünftig verstärkt zu erforschen und anzuwenden?
- Welche Rolle nehmen biomimetische Verfahren in der Chemie zukünftig bei der Energiewende hin zu erneuerbaren Energien und Annäherung an die Normaltemperatur-, Niederdruck-, sonnengetriebenen Prozessen der Natur ein?
- Welche volkswirtschaftlichen und sozialen Chancen und Risiken liegen in der Strategie der biomimetischen Chemie?

#### Begriffsbestimmungen

- Der Begriff Biomimetik ist bedeutungsgleich mit Bionik – einer Wortkombination aus Biologie und Technik. Durch die Orientierung an Funktionen, Strukturen und Organisationsprinzipien von Organismen bzw. Organismensystemen, die in der Jahrmilliarden dauernden Evolution optimiert wurden, können Quellen für die Erforschung und Entwicklung von technischen Systemen erschlossen werden.<sup>806</sup> Die Natur dient als Blaupause für technische Anwendungen.
- Biomimetische Chemie ist im Speziellen die Übertragung von natürlichen Funktionsmechanismen in künstliche Strukturen auf molekularer Ebene. Im hier dargestellten Zusammenhang versucht die biomimetische Chemie somit, biochemische Verfahrensschritte der Natur für die synthetische Chemie unter Nutzung von nichtnatürlichen zellulären Komponenten (z.B. nachgebildetes aktives Zentrum eines Enzyms) nachzuahmen. Die Forschung in diesem Bereich beruht damit auf dem Konzept der biochemischen Organisation. Als Beispiele für mögliche technische Anwendungen der biomimetischen Chemie werden die Wasserspaltung in der Photosynthese zur Herstellung von Wasserstoff oder von Grundchemikalien sowie das Potenzial biomimetischer Katalysatoren zur Ammoniakherstellung betrachtet.
- Von bioinspirierter Chemie kann gesprochen werden, wenn die Übereinstimmung der molekularen Struktur im Vergleich zum natürlichen Vorbild minimal ist, aber die Funktion gewährleistet bleibt. Die natürliche Chemie dient so als Ideengeber, nicht aber als zu kopierende Blaupause. Als Beispiel soll auf das Potenzial bioinspirierter Materialien eingegangen werden.

### III.5.2 Nutzung biologischer Katalysemechanismen zur Herstellung ausgewählter Grundchemikalien

#### Nachahmung von Biokatalysatoren

In konventionellen chemischen Synthesen kommen sehr häufig Katalysatoren zum Einsatz, die teilweise aus teuren Edel- und Übergangsmetallen bestehen. Biomimetisch-chemische Forschung untersucht die Rolle von Metallionen in biologischen Systemen und versucht Wege aufzuzeigen, chemische Reaktionen mithilfe der Nachahmung der Funktion von katalytisch wirksamen Biomo-

806 Springer Gabler Verlag: Stichwort Bionik unter: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/1344/bionik-v7.html>.

lekülen (Enzymen), deren aktive Zentren oftmals Metallkomplexe aus z.B. Eisen, Mangan, Zink, Kobalt, Magnesium oder Molybdän enthalten, zu ergründen.<sup>807</sup>

Wie bereits im Biotechnologie-Kapitel beschrieben, schaffen es Enzyme mit hoher Effizienz und Selektivität auch sehr stabile Moleküle wie  $H_2O$ ,  $CO_2$  oder  $N_2$  zu aktivieren und für die Produktion von chemischen Verbindungen wie Wasserstoff, Zucker oder Ammoniak nutzbar zu machen.

Aktuelle biomimetisch-chemische Forschung versucht Enzyme als Vorbilder zur Synthese von künstlichen, niedermolekularen Analoga zu nutzen, die ähnlich aktive Zentren aufweisen und eine annähernd vergleichbare Reaktivität besitzen. Dabei unterscheidet man zwischen biomimetischer Chemie, in der ein aktives Zentrum naturgetreu nachgebildet wird, und bioinspirierter Chemie, bei der die strukturelle Übereinstimmung mitunter nur minimal ist, aber die Funktion gewährleistet wird.<sup>808</sup>

Im Gegensatz zu den meisten konventionellen chemisch-katalytischen Verfahren laufen enzymgestützte Stoffumsätze unter (Normal-)Umgebungsbedingungen (ca. 15-40°C). Diese biokatalytischen Verfahren werden im Kapitel Biotechnologie beschrieben.

Enzyme besitzen ein aktives Zentrum, das die katalytische Aktivität bestimmt. Es besteht häufig aus Metallatomen. Dieses aktive Zentrum ist von einer schützenden Proteinhülle umgeben. Das aktive Zentrum kann Moleküle in einen reaktionsfähigeren Zustand überführen, wobei die für die Reaktion notwendige Aktivierungsenergie herabgesenkt wird. Die Proteinhülle dient als Schutz für das aktive Zentrum. Sie beeinflusst außerdem die Selektivität und reguliert die Reaktionsgeschwindigkeit.<sup>809</sup> Die biomimetische Katalyseforschung versucht die biochemischen Katalysemechanismen zu verstehen, um biomimetisch-chemische Analoga zu entwickeln. Ein Schwerpunkt der Forschungsaktivitäten ist die Synthese neuer anorganischer Komplexverbindungen.<sup>810</sup>

### Beispiele möglicher technischer Anwendungen

Als Beispiel für mögliche technische Anwendungen der biomimetischen Chemie wird die Wasserspaltung in der Photosynthese zur Herstellung von Wasserstoff oder von Grundchemikalien betrachtet (vgl. Biomimetisch-chemische Wasserspaltung). Hierzu werden zunächst kurz die Wirkungsmechanismen der Katalysatorenenzyme im Photosystem II (PS II) zur Wasserspaltung beschrieben.

Darüber hinaus wird die Funktion des Enzyms Nitrogenase als mögliche Blaupause für ein alternatives technisches Verfahren zur Stickstofffixierung beschrieben (vgl. biomimetisch-chemische Stickstofffixierung). Das konkrete Potenzial zur technischen Anwendung dieser Mechanismen wird in Option 1 für die Wasserstoffproduktion und in Option 2 zur Ammoniakproduktion untersucht.

### III.5.2.1 Biomimetisch-chemische Wasserspaltung

#### Grundlagen

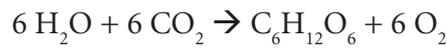
In der Natur wandeln Pflanzen im Zuge der Photosynthese – angetrieben von Sonnenlicht – Kohlendioxid und Wasser in chemische Energieträger, nämlich Kohlenhydrate um. Diese Kohlenhydrate werden in komplexen Reaktionsketten erzeugt. Die Gesamtreaktion der Photosynthese wird vereinfacht dargestellt.

807 Lu, Yi: Biosynthetic Inorganic Chemistry. In: Angewandte Chemie International Edition (2006), 34, S. 5588–5601.

808 vgl. Limberg, Christian: Landtag NRW (Hg.): Gutachten „Biomimetische Chemie“ für die Enquete-Kommission II des Landtags von Nordrhein-Westfalen. (2014), S. 1.

809 ebd., S. 1.

810 ebd.



In der Photosynthese ist das Photosystem II für die Wasserspaltung zuständig. Es entzieht dem Wasser nach Lichtanregung vier Elektronen.<sup>811</sup> Das aktive Zentrum aus einem Mangan-Calcium-Cluster ( $\text{Mn}_4\text{O}_5\text{Ca}$ ) wirkt dabei nicht nur als Katalysator sondern auch als Ladungsakkumulator.<sup>812</sup> Das Potenzial des Photosynthesystems reicht aus, um aus  $\text{CO}_2$  höherwertige chemische Verbindungen direkt mittels Sonnenlicht zu produzieren.<sup>813</sup> Im Zusammenspiel mit den Photosystemen (PS I + II) (nachgelagertes Reaktionssystem) werden enzymatisch Hydridionen auf  $\text{CO}_2$  übertragen und so zur Produktion energiereicher organischer Verbindungen wie zum Beispiel Zucker genutzt<sup>814,815</sup> (Abbildung 70).

Die Wasserspaltung findet lokal unter starken Reaktionsbedingungen statt, die das Enzym beschädigen. In Photosynthese betreibenden Organismen gewährleistet jedoch ein Reparaturzyklus die weitere Funktion des Enzyms.

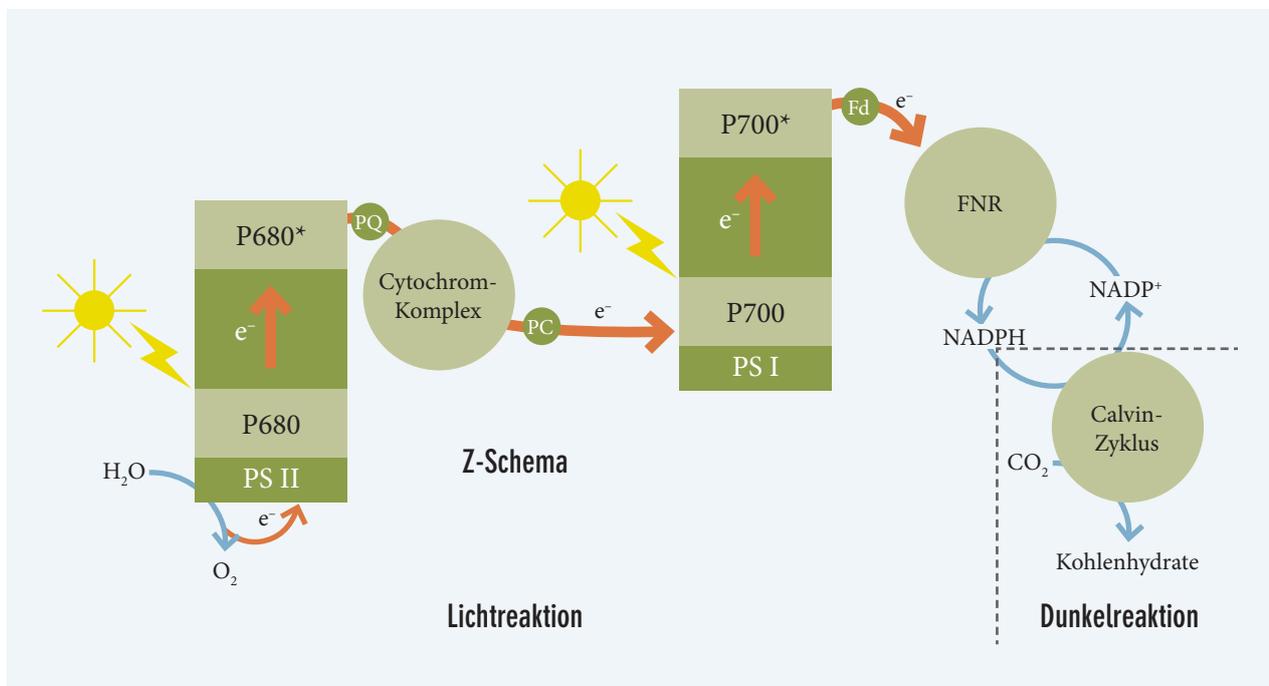


Abbildung 70: Ein vereinfachtes Schema der natürlichen Photosynthese in grünen Pflanzen. Durch Licht angeregte Elektronen werden über eine Reihe von Elektronentransferketten (sowohl im PS II als auch in PS I) schließlich zur Reduktion des Koenzyms  $\text{NADP}^+$  verwendet. Das so entstehende  $\text{NADPH}$  wird anschließend verwendet, um aus  $\text{CO}_2$ -Kohlenhydrate zu produzieren.<sup>816</sup>

Ziel der biomimetischen Chemie ist die Erforschung eines künstlichen Photosyntheseverfahrens. Die Wasserspaltung ist der erste Schritt der Photosynthese. Ein ihr nachgeahmter Prozess ermöglicht eine sonnenlichtgetriebene Wasserstoffproduktion mittels Wasserspaltung. Im Folgeprozess können dann aus Wasserstoff und Kohlendioxid Methanol und Folgeprodukte hergestellt werden. Ein ent-

811 Lubitz, Wolfgang; Cox, Nicholas: Wie Pflanzen Wasser spalten. In: Spektrum der Wissenschaft (2013), S. 34–43, S. 36.

812 ebd., S. 36.

813 Bensaid, Samir; Centi, Gabriele; Garrone, Edoardo; Perathoner, Siglinda; Saracco, Guido: Towards Artificial Leaves for Solar Hydrogen and Fuels from Carbon Dioxide. In: ChemSusChem (2012), 3, S. 500–521.

814 Cox, Nicholas; Pantazis, Dimitrios A.; Neese, Frank; Lubitz, Wolfgang: Biological Water Oxidation. In: Accounts of Chemical Research (2013), 7, S. 1588–1596.

815 ebd., S. 34.

816 Limberg, Christian: Landtag NRW (Hg.): Gutachten „Biomimetische Chemie“ für die Enquete-Kommission II des Landtags von Nordrhein-Westfalen. (2014), S. 2.

sprechender biomimetischer Prozess müsste die Ladungstrennung bei der Wasserspaltung im PS II sowie die Übertragung der freigesetzten Elektronen und Protonen im PS I gewährleisten. Denkbar ist dabei die Erzeugung von Wasserstoff durch den direkten Transfer der Elektronen auf die freigesetzten Protonen oder aber die Erzeugung von chemischen Energieträgern wie Methanol durch Übertragung von Elektronen und Protonen auf  $\text{CO}_2$ .

### Forschungsstand anderer Wege der Wasserstoffproduktion

Bisher nicht kommerzielle Verfahren zur Wasserstoffherstellung sind die thermische und die photokatalytische Wasserspaltung. Bei beiden Verfahren wird die Nutzung von Sonnenenergie für den Prozess verfolgt und es werden Katalysatoren untersucht, deren Wirkung als aktive metallische Zentren von Enzymen bei der Photosynthese der Pflanzen und Bakterien entdeckt wurden.

Technisch wird Wasser zur Gewinnung von Wasserstoff durch Reaktion mit Kohle, Erdgas, Kohlenwasserstoffen, Kohlenmonoxid oder in untergeordnetem Maß durch Elektrolyse gespalten. Der weit überwiegende Teil des Wasserstoffs wird durch Dampfreformierung von Erdgas gewonnen. Der größte Teil des Wasserstoffs wird zur Herstellung von Ammoniak aus Luftstickstoff verwendet.

Eine Alternative zur Dampfreformierung stellt die thermische Dissoziation des Wassers durch Sonnenenergie dar. Die thermische Dissoziation von Wasser ist in Solaröfen oberhalb von  $1.700^\circ\text{C}$  technisch möglich. Dabei werden die Spaltprodukte Wasserstoff und Sauerstoff mittels keramischer Membranen getrennt<sup>817</sup>. Folgende thermische Verfahren zur Wasserstoffherstellung sind in der Entwicklung:

- Schwefelsäure-Iod-Prozess – in einem Kreisprozess werden Wasserstoff mittels Jod und Sauerstoff durch Schwefeldioxid abgefangen, anschließend werden die Ursprungsverbindungen zurück erhalten – auch dieser Prozess kann mit konzentrierter Sonnenenergie ablaufen.
- Thermokatalytische Wasserspaltung an Metalloxiden – Metalloxide spalten bei sehr hohen Temperaturen unter Metallbildung Sauerstoff ab, bei niedrigeren Temperaturen reagiert Wasserdampf unter Wasserstoffabspaltung mit dem Metall zu Metalloxid. Bei höheren Temperaturen wird der gebundene Sauerstoff freigesetzt und das Metalloxid für die Wasserspaltung regeneriert. Die dafür erforderliche thermische Energie kann aus konzentrierter Sonnenstrahlung gewonnen werden. Dieses Verfahren wird auch als katalytische Festbettreaktion beschrieben<sup>818</sup>.

### Forschungsstand der biomimetischen (photokatalytischen) Wasserspaltung

Bei der photokatalytischen Wasserspaltung wird Wasser durch Lichteinstrahlung an einem Katalysator gespalten. Als Katalysatoren werden Metalloxide verwendet. Ein Ansatz zur effizienten photokatalytischen Wasserspaltung (als künstliches Blatt) sowie der Stand der Technik von Photoelektroden wurden kürzlich in *Nature Communications* beschrieben<sup>819</sup>. Der Mechanismus der photokatalytischen Wasserstoffbildung an metalldotierten Halbleitern wird diskutiert.<sup>820</sup> Die technische photokatalytische Wasserspaltung ist schätzungsweise nicht in den nächsten 20 Jahren realisierbar.<sup>821</sup>

817 Chemie.de: Wasserstoffherstellung.

818 DE102005017216A1 19.10.2006 (Patentidentifikationsnummer).

819 Abdi, Fatwa F.; Han, Lihao; Smets, Arno H. M et al.: Efficient solar water splitting by enhanced charge separation in a bismuth vanadate-silicon tandem photoelectrode. In: *Nature Communications* (2013), 2195,

820 Jacoby, Mitch: Rethinking Photocatalysis. In: *Chemical Engineering & Technology* (2014), 21, S. 11.

821 Max-Planck-Institut für chemische Energiekonversion; Wieghardt, Karl: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung "Verfahren der biomimetischen Chemie" der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2014).

Eine komplette künstliche Photosynthese wird von anderen Forschungsgruppen verfolgt. So entwickelte eine Abteilung bei Panasonic ein Verfahren, bei dem aus Wasser und Kohlendioxid an einem Nitridhalbleiter bei Bestrahlung Ameisensäure und andere organische Verbindungen erhalten wurden. Die Lichtausbeute wird bei diesem Verfahren mit 0,2% angegeben. Dies liegt in der gleichen Größenordnung, die Pflanzen bei der Photosynthese erreichen<sup>822</sup>, aber noch weit entfernt von einer Ausbeute, die für eine technische Anwendung notwendig ist.

Ein effizientes künstliches photokatalytisches System dieser Art ist bislang noch nicht bekannt. Man kann jedoch auch aus Wasser generierte Elektronen nutzen, um damit Wasserstoff zu produzieren, was vergleichsweise leicht umzusetzen ist. Ein Ansatz zur zukünftigen Gewinnung von Wasserstoff als Energieträger und Synthesechemikalie besteht in der lichtgetriebenen Spaltung von Wasser zu Sauerstoff und Wasserstoff. Erste Erfolge zur Stabilisierung einer künstlichen Katalysestruktur konnten bereits erzielt werden.<sup>823</sup>

### III.5.2.2 Biomimetisch-chemische Stickstofffixierung

#### Grundlagen

Stickstoff ist als Baustein in Proteinen (Eiweiß) und der Erbsubstanz (Nucleinsäuren) für Lebewesen essenziell. Elementarer Stickstoff ist mit 78% Hauptbestandteil der Luft. Das Stickstoffmolekül ist sehr stabil und kann nur durch hohen Energieeintrag gespalten und umgesetzt werden. Technisch wird heute das Verfahren nach Haber-Bosch eingesetzt, mit dessen Hilfe aus Stickstoff und Wasserstoff unter einem Druck von 250 – 350 Atmosphären, Temperaturen von 450 – 550°C und Einsatz von Eisenoxid-Katalysatoren Ammoniak hergestellt wird. Die Bildung von Ammoniak aus Wasserstoff und Stickstoff ist eine exotherme Reaktion. Die Energie für die Spaltung des Stickstoffs liefert hier der Wasserstoff.<sup>824</sup>

In der Natur können nur wenige Mikroorganismen z.B. Knöllchenbakterien an den Wurzeln von Leguminosen<sup>825</sup> den Luftstickstoff stofflich umsetzen. Diese Organismen nutzen das Enzym Nitrogenase zur Stickstoffspaltung. Das aktive Zentrum der Nitrogenase besteht aus den Elementen Eisen und Molybdän.<sup>826</sup> Die Proteinhülle ist, wie die des Photosystems II, sehr komplex. Sie besteht aus 2.000 Aminosäuren.<sup>827</sup> Im Gegensatz zu den Reaktionsbedingungen des heute dominierenden Haber-Bosch-Verfahrens erfolgt die Umsetzung bei Umgebungstemperaturen. Die Spaltung des Stickstoffmoleküls erfordert aber im biologischen Verfahren eine vergleichbar hohe Energie, die durch Umsatz von 16 Molekülen Adenosintriphosphat (ATP) eingebracht wird.<sup>828</sup> Sowohl der technische als auch der biologische Prozess der Umwandlung des gasförmigen Stickstoffs in Ammoniak wird als Stickstofffixierung bezeichnet.

822 DigInfo TV: Artificial Photosynthesis System as efficient as plants and can reduce CO2 levels unter: <http://www.diginfo.tv/v/12-0223-r-en.php> (2013). Online am 19.12.2014.

823 Kanan, Matthew W.; Nocera, Daniel G. \*: In Situ Formation of an Oxygen-Evolving Catalyst in Neutral Water Containing Phosphate and Co<sup>2+</sup>. In: Science (2008), 321, S. 1072–1075.

824 Wikipedia: Haber-Bosch-Verfahren unter: <http://de.wikipedia.org/wiki/Haber-Bosch-Verfahren>. Online am 12.01.2015 ; Schneider K., Müller, A: Die biologische Stickstoff-Fixierung: Dem Geheimnis eines lebensnotwendigen Prozesses auf der Spur unter: [http://www.uni-bielefeld.de/presse/fomag/S\\_43\\_49.pdf](http://www.uni-bielefeld.de/presse/fomag/S_43_49.pdf) (1999). Online am 06.01.2015.

825 Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH: Knöllchenbakterien unter: <http://www.spektrum.de/lexikon/biologie/knoellchenbakterien/36459> (1999). Online am 02.03.2015.

826 Reiher, Markus: Von der Natur lernen: Theorie der Stickstoff-Fixierung unter milden Bedingungen. In: Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (2007), 3, S. 55–62.

827 Schneider K., Müller, A: Die biologische Stickstoff-Fixierung: Dem Geheimnis eines lebensnotwendigen Prozesses auf der Spur unter: [http://www.uni-bielefeld.de/presse/fomag/S\\_43\\_49.pdf](http://www.uni-bielefeld.de/presse/fomag/S_43_49.pdf) (1999). Online am 06.01.2015.

828 Limberg, Christian: Landtag NRW (Hg.): Gutachten „Biomimetische Chemie“ für die Enquete-Kommission II des Landtags von Nordrhein-Westfalen. (2014), S. 13.

## Forschungsstand

Ein weiteres technisches Verfahren, das jedoch derzeit noch nicht angewandt wird, ist die elektrolytische Ammoniaksynthese, bei der Wasser in Gegenwart von Stickstoff elektrolysiert wird<sup>829</sup>.

Der Schlüssel für eine Ammoniaksynthese, bei der kein CO<sub>2</sub> in der Produktionskette entsteht, ist die Herstellung von Wasserstoff mit der Energie aus erneuerbaren Quellen. Biomimetische Chemie kann für die Wasserstoffgewinnung (s. Abschnitt Biomimetisch-chemische Wasserspaltung) und für die Katalyse der Spaltung der Stickstoffbindung herangezogen werden. Bei der Spaltung der Stickstoffbindung mithilfe biomimetisch-chemischer Katalysatoren wird in einem zu entwickelnden technischen Verfahren ein niedrigeres Temperaturniveau als bei dem Haber-Bosch-Verfahren angestrebt.

Neben der biomimetisch-chemischen Stickstofffixierung werden die Mechanismen der biologischen Fixierung durch die Symbiose von Pflanzen und Bakterien erforscht. Ziel dieser Untersuchungen ist die Züchtung von Nutzpflanzen, die ihren eigenen Stickstoffdünger erzeugen (grüne Biotechnologie). Einige Nutzpflanzen benötigen keine Stickstoffdüngung, z.B. Leguminosen, von denen die Sojabohne die größte wirtschaftliche Bedeutung hat. Diese biologische Alternative zur CO<sub>2</sub>-freien Produktion von Stickstoffdünger wird hier nicht tiefergehend betrachtet, jedoch bei den Optionen berücksichtigt.

## III.5.3 Bioinspirierte Materialien und Wirkstoffe

### III.5.3.1 Grundlagen bioinspirierter Materialien

Biologisch inspirierte Materialien orientieren sich an Holz, Baumwolle und anderen Faserpflanzen, Bernstein, Knochen, Zähnen, Elfenbein, Muskeln, Seide, Haaren, Sehnen, Insektenpanzern, Perlmutter etc.<sup>830,831</sup> Interdisziplinär wird versucht, die Struktur und Funktion natürlicher Materialien zu entschlüsseln, um mit diesem Wissen Werkstoffe und technische Systeme zu verbessern.<sup>832</sup>

In der Vergangenheit führte dies bereits erfolgreich zur Produktion von synthetischen Werkstoffen wie Bakelit, Polyamid, Polyamidfasern (Ersatz für Seide), Kunststoffe und Fasern aus Baumwolle, Kunststoffen und Fasern aus Polyestern, Synthesekautschuk (Polybutadien) als Ersatz für natürlichen Polyisoprenlatex. Diese synthetischen Werkstoffe wurden als Ersatz für natürlich vorkommende Stoffe hergestellt. Ihre Gebrauchseigenschaften übertreffen häufig die der natürlichen Vorbilder. Natürliche Werkstoffe wie z.B. Baumwolle oder Naturkautschuk wurden durch chemische Verfahren wie z.B. der Vulkanisation von Kautschuk den technischen Erfordernissen angepasst.

Beispiele für die Nachahmung natürlicher Formen bei der Konstruktion von technischen Produkten sind<sup>833</sup>:

829 Ioannis Garagounis, Vasileios Kyriakou, Aglaia Skodra, Eirini Vasileiou and Michael Stoukides: Electrochemical synthesis of ammonia in solid electrolyte cells. In: *Frontiers in Energy Research* (2014).

830 Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V. (DGM) (Hg.): *Bio-inspired Materials* International School and Conference on Biological Materials Science 18-21 March 2014. (2014).

831 SynBioTA – Innovations- und Technikanalyse der Synthetischen Biologie: Biomaterialien unter: <http://www.tecdesign.uni-bremen.de/typo3/index.php?id=673>.

832 Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V. (DGM) (Hg.): *Bio-inspired Materials* International School and Conference on Biological Materials Science 18-21 March 2014. (2014), S 3.

833 Plant Biomechanics Group Freiburg, Kompetenznetz Biomimetik: Bionik-Vitrine ausgestellt in der Zoologischen Schausammlung des Instituts für Biologie unter: <http://www.bionik-vitrine.de/index.html> (2014).

- Winglets am Flugzeugflügel<sup>834</sup> verhindern die Tragflächenrandwirbel und sparen dadurch Treibstoff.
- Haihautnachbildung ist die Form einer gerillten Oberfläche von umströmten Gegenständen, z.B. Schiffen, die dadurch einen geringeren Strömungswiderstand haben.
- Oberflächengestaltung durch Beschichtung mit einem porösen und mit Flüssigkeit getränktem Material<sup>835</sup> sowie Beschichtungsmittel mit Lotuseffekt, z.B. für Fassadenanstriche und Dachziegel<sup>836,837</sup>.

Spinnenseide ist das Vorbild für reißfeste Fasern. Sie besteht aus Polypeptiden, ist physiologisch gut verträglich und biologisch abbaubar. Es gibt bereits erste Anwendungen von Spinnenseide in der Medizin. Allerdings werden dafür die natürlichen Spinnfäden von „gemolkenen“ Spinnen verwendet<sup>838</sup>. Die biotechnologische Herstellung von Spinnenseide gelingt mit genmodifizierten *Escherichia coli*-Bakterien<sup>839</sup> und aus genmodifizierten Zellkulturen von Hamstern und Kühen.<sup>840</sup> Zum Verspinnen der biotechnologisch hergestellten Spinnenseidenproteine wird ein Elektrospinnverfahren angewandt. Dabei wird in einem starken elektrischen Feld ein dünner Strahl aus der Polymerlösung erzeugt und zu einem Faden getrocknet.<sup>841</sup> Die Fasern werden zu Filtern oder medizinischen Vliesen verarbeitet.

Der Unterschied zwischen der Biosphäre und der technischen Sphäre liegt darin, dass in der Biosphäre eine deutlich geringere Vielfalt von Ausgangsstoffen zur Verfügung steht: Proteine, Lipide, Kohlenhydrate, Terpene und deren Derivate. Diese Stoffe bestehen aus nicht seltenen Elementen und sind häufig auch biologisch abbaubar. Unterschiedliche Stoffeigenschaften der in der belebten Natur begrenzten Stoffauswahl werden durch unterschiedlichen Multiskalenaufbau<sup>842</sup> hervorgerufen. Unter Multiskalenaufbau wird das Zusammenspiel der unterschiedlich ausgebildeten Strukturen von Materialien auf atomarer, Nano-, Mikro-, Meso-, und Makroebene verstanden. Auf diese Weise können z.B. optische, adhäsive, hydrophobe, mechanische Stoffeigenschaften beeinflusst werden.<sup>843</sup> Aufgrund des Multiskalenaufbaus können sogar gegensätzliche Eigenschaften in einem Material kombiniert werden. Bei der Beforschung von Insektenpanzern zum Beispiel wird versucht zu entschlüsseln, wie die Eigenschaften Schlagfestigkeit und Flexibilität verwirklicht werden.<sup>844</sup> Dies macht Biomaterialien und bioinspirierte Materialien für technische Anwendungen interessant.<sup>845</sup> Das Potenzial bioinspirierter Materialien wird in Option G.3 beurteilt.

834 Rechenberg, Ingo: Vorbild Vogelflug: Evolution aerodynamischer Tricks am Vogelflügel unter: [www.bionik.tu-berlin.de](http://www.bionik.tu-berlin.de) (2013). Online am 05.01.2015.

835 Wong, Tak-Sing: Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity. In: *Nature* (2011), 477, S. 443–447.

836 wissen.de: Der Lotus-Effekt unter: <http://www.wissen.de/der-lotus-effekt>.

837 SPIEGEL ONLINE: Selbstreinigende Materialien: Blütenrein dank Lotus-Effekt unter: <http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/selbstreinigende-materialien-bluetenrein-dank-lotus-effekt-a-640664.html> (2009).

838 Bild der Wissenschaft online: Nerven am seidenen Faden unter: [http://www.bild-der-wissenschaft.de/bdw/bdwlive/heftarchiv/index2.php/function.include?object\\_id=33592271](http://www.bild-der-wissenschaft.de/bdw/bdwlive/heftarchiv/index2.php/function.include?object_id=33592271) (2014).

839 AMSilk GmbH: Presseberichte der Fa. AMSilk (März 2014).

840 Bild der Wissenschaft online: Künstliche Spinnenseide hergestellt unter: [http://www.wissenschaft.de/archiv/-/journal\\_content/56/12054/1178816/K%C3%BCnstliche-Spinnenseide-hergestellt/](http://www.wissenschaft.de/archiv/-/journal_content/56/12054/1178816/K%C3%BCnstliche-Spinnenseide-hergestellt/) (2002).

841 MM MaschinenMarkt: Multifunktionale Spinnenseide – ein vielversprechender Werkstoff unter: [http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/produktion/kunststoffverarbeitung\\_gummiverarbeitung/articles/449694/index3.html](http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/produktion/kunststoffverarbeitung_gummiverarbeitung/articles/449694/index3.html) (2014).

842 Fratzl, Peter; Weinkamer, Richard: Nature's hierarchical materials. In: *Progress in Materials Science* (2007), 52, S. 1263–1334.

843 Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung; Fratzl; Peter: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Verfahren der biomimetischen Chemie“ der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2014), S. 3.

844 Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V. (DGM) (Hg.): Bio-inspired Materials International School and Conference on Biological Materials Science 18-21 March 2014. (2014), S. 12.

845 Kluge, Jonathan A.; Rabotyagova, Olena; Leisk, Gary G.; Kaplan, David L.: Spider silks and their applications. In: *Trends in Biotechnology* (2008), 5, S. 244–251.

### III.5.3.2 Grundlagen bioinspirierter Wirkstoffe

Die Nachahmung natürlicher Strukturen beschränkt sich nicht auf Biokatalysatoren. Auch bei der Arzneimittelforschung und –herstellung sind natürliche Strukturen mit bekannter physiologischer Wirkung Vorbild für die synthetischen Produkte.<sup>846</sup> Viele Arzneimittel wie Penicillin (als Stoffwechselprodukt von Schimmelpilzen)<sup>847</sup> oder Salicylsäure (Weidenrindenextrakt) wurden als Naturstoffe entdeckt, synthetisiert<sup>848</sup>, in ihrer Struktur modifiziert und dadurch zu besser verträglichen Wirkstoffen verändert, z.B. Acetylsalicylsäure und Gruppen von Antibiotika. Mit dem Erkennen der physiologisch wirksamen Strukturen gelang auch die Synthese von Wirkstoffen, z.B. das Stilböstrol, das wie das natürliche Sexualhormon Östradiol wirkt.<sup>849</sup>

## III.5.4 Annahmen

### III.5.4.1 Relevante Megatrends

Die folgenden Annahmen ermöglichen die Abschätzung der zukünftigen Entwicklung von biometisch-chemischen Verfahren in der pharmazeutischen oder chemischen Industrie und das Potenzial der nach biologischen Vorbildern zu entwickelnden Materialien und Apparate. Dabei werden die wesentlichen Zukunftsentwicklungen und deren Auswirkungen auf Verfahren, Materialien und Apparate betrachtet. Die relevanten Megatrends dafür sind:

- Demografische Entwicklung
- Umbrüche bei Energie und Ressourcen
- Klimawandel und Umweltbelastung
- Urbanisierung und neue Mobilitätsmuster
- neue Konsummuster
- Konvergenz von Technologien
- Business Ökosystem.

Die Megatrends sind bereits in der Berichtseinleitung beschrieben. Die Auswirkungen der Megatrends werden zunächst für die Gewinnung von zukünftig wichtigen Energieträgern wie Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen und den Bedarf von Stickstoffdünger für eine wachsende konsumorientierte Bevölkerung dargestellt.

Die Megatrends lassen erwarten, dass es bei Berücksichtigung von Effizienzgewinnen insgesamt zu einer Steigerung des Energieverbrauchs kommt, wie im Teil IV. Energieumsätze beschrieben. Die Bedeutung des Wasserstoffs für den zunehmenden Energie- und Rohstoffbedarf aus erneuerbaren Quellen ist in den Kapiteln IV. Energieumsätze und II. Rohstoffsituation beschrieben. Für die Ernährung der wachsenden Bevölkerung und den zunehmenden Einsatz nachwachsender Rohstoffe ist der steigende Bedarf an Düngemitteln, insbesondere von Stickstoffdünger zu berücksichtigen. Durch die Konvergenz von Technologien wird die Bedeutung der bioinspirierten Materialien und Apparate wie vorstehend dargestellt zunehmen. Die technologischen Änderungen zu biomimetischen Verfahren werden jedoch über einen sehr langen Zeitraum laufen und nach den Einschätzungen der Experten frühestens in 20 Jahren eine gewisse Bedeutung haben<sup>850</sup>.

846 Wikipedia: Arzneistoff unter: <http://de.wikipedia.org/wiki/Arzneistoff>.

847 DocCheck Flexikon: Penicillin unter: <http://flexikon.doccheck.com/de/Penicillin>.

848 Pharmazeutische Zeitung online: Weidenrindenextrakt: unter: <http://www.pharmazeutische-zeitung.de/index.php?id=2666> (2007); Wikipedia: Acetylsalicylsäure unter: <http://de.wikipedia.org/wiki/Acetylsalicyls%C3%A4ure>.

849 Universal Lexikon: Stilböstrol unter: [http://universal\\_lexikon.deacademic.com/149137/Stilb%C3%B6strol](http://universal_lexikon.deacademic.com/149137/Stilb%C3%B6strol).

850 Max-Planck-Institut für chemische Energiekonversion; Wieghardt, Karl: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung "Verfahren der biomimetischen Chemie" der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2014).

### III.5.4.2 Annahmen zur Wasserspaltung

Die Spaltung von Wasser zu Wasserstoff und Sauerstoff durch kohlenstofffreie Energie aus Wasserkraft, Wind und Sonne ist technisch möglich und wird durch die zu erwartende Verbilligung des Stroms aus erneuerbaren Quellen und des großtechnischen Einsatzes von Solaranlagen zukünftig auch in einem weitaus größeren kommerziellen Maßstab als heute möglich sein.<sup>851</sup>

Sonnenenergie erreicht die Erde mit einer Leistung von 120.000 TW.<sup>852</sup> 250 TW wird von Photosynthese-betreibenden Lebewesen zur Produktion von Stoffen überwiegend aus Wasser und Kohlendioxid genutzt. Die in Biomasse gebundene Photosyntheseleistung kann folglich nicht genutzt werden, um den Energiebedarf der Menschheit zu decken.<sup>853</sup> Die direkte Nutzung eines kleinen Bruchteils der solaren Strahlung (120.000 TW Leistung) würde jedoch ausreichen, um die Menschheit nachhaltig mit Energie und damit der rohstofflichen Nutzung von energiearmen Ausgangsprodukten zu versorgen.

Mögliche Endprodukte sind neben Wasserstoff Methanol, Ameisensäure und Ammoniak.<sup>854</sup> Voraussetzung dafür ist allerdings die Nutzung einer ausreichend verfügbaren Fläche zum Auffangen der Sonnenenergie. Die verfügbaren Flächen dafür konkurrieren mit landwirtschaftlicher Nutzung, Siedlungen, Industrieanlagen, Infrastruktur und Photovoltaik- sowie Thermosolar-Anlagen. Ausreichend Freiflächen existieren aber in weit entfernten Wüstengebieten. Hier fehlt es jedoch an Wasser, das für eine Nutzung zur Spaltung über weite Strecken transportiert und aufbereitet werden müsste.

#### Forschungsbedarf

Konzepte für künstliche Photosynthese beruhen auf lichtgetriebenen gekoppelten Redoxreaktionen. Die Komplexität des biologischen Prozesses, an denen sich die künstliche Photosynthese orientiert, ist so hoch, dass eine Nachahmung detailliert unmöglich erscheint.<sup>855</sup> Die technische Kombination eines rationalen Designs der Photosysteme I und II könnte quasi ein künstliches Blatt ermöglichen, das die Synthese von Kohlenwasserstoffen aus CO<sub>2</sub>, Wasser und Sonnenlicht ermöglicht.<sup>856</sup> Die Erfindung des künstlichen Blattes könnte eine Lösung der Nachhaltigkeitsprobleme des derzeitigen Umgangs von (Energie-)Rohstoffen möglich erscheinen lassen.<sup>857</sup> Neue Erkenntnisse der biologischen Wasserspaltung sind essenziell, um diese für ein rationales Design neuer wasserspaltender Katalysatoren nutzbar zu machen.<sup>858</sup>

Insbesondere in den letzten Jahren konnte ein detailliertes, molekulares Verständnis der photosynthetischen Strukturen und Mechanismen entwickelt werden, das prinzipiell erlaubt, bestimmte Aspekte der biologischen Prozesse nachzuahmen, um solare Brennstoffe und Chemikalien zu produzieren. Es ist anzunehmen, dass die Entwicklung weiter fortschreitet.<sup>859</sup> Wesentliche Fragen sind noch ungeklärt: So ist zwar bekannt, wo sich die Wassermoleküle an den aktiven Zentren des Pro-

851 Bode, Sven; Groscurth, Helmuth-M.: arrhenius Institut für Energie- und Klimapolitik (Hg.): Die künftigen Kosten der Stromerzeugung. (2014).

852 Kurz, Philipp; Wiechen, Mathias: Biomimetische Oxide für die Wasseroxidation. In: Nachrichten aus der Chemie (2012), 1, S. 24–28.

853 Schlögl, Robert: Chemical Energy Storage: “The solar refinery”. Walter de Gruyter GmbH & Co.KG (2012). ISBN 978-3-110264-07-4.

854 ebd..

855 ebd..

856 ebd., S. 43.

857 ebd..

858 ebd..

859 Limberg, Christian: Landtag NRW (Hg.): Gutachten „Biomimetische Chemie“ für die Enquete-Kommission II des Landtags von Nordrhein-Westfalen. (2014), S. 14.

teins anheften, aber nicht welches aktive Zentrum für den Elektronentransfer verantwortlich ist.<sup>860</sup> Weiterer Forschungsbedarf ergibt sich durch die komplizierten, synthetisch anspruchsvollen Liganden<sup>861</sup>. Erkenntnisse über den Aufbau und Funktion der Enzymkomponenten sind nötig, um etwaige wasserspaltende Katalysatoren maßzuschneidern (rationales Design).

Es ist bisher noch nicht gelungen, einen Katalysator zu entwickeln, der Wasser mithilfe sichtbaren Lichts zu spalten vermag.<sup>862</sup> Jedoch wurde von aktiven Zentren, die nicht aus Mangan bestehen und Wasser mithilfe reaktiver Chemikalien oder Strom spalten können, berichtet.<sup>863,864</sup>

Solare Brennstoffe als Produkte der biomimetischen Wasserspaltung könnten als Ausgangsstoff für weitere chemische Synthesen dienen. Die lichtgetriebene CO<sub>2</sub>-Reduktion ist im Vergleich zur solaren Wasserstoffproduktion eine noch größere Herausforderung.<sup>865</sup>

Die Konstruktion eines künstlichen Blattes müsste neben der Grundlagenforschung auch folgende Konstruktionsaspekte in den Blick nehmen:<sup>866</sup>

- einen Photokatalysator, der die Wasserspaltung unter der energetischen Anregung sichtbaren Lichts mehrerer Wellenlängen vermittelt und eine schnelle Aufnahme von Elektronen ermöglicht, damit diese schnell an die Kathodenseite transportiert werden;
- eine Kathode, die aktive Zentren zur Reaktion von Protonen und Elektronen zu H<sub>2</sub> ermöglicht;
- eine Sammlungs- und Abfuhrvorrichtung der Zielmoleküle;
- die Nutzung von häufig vorkommenden, nicht edlen Metallen;
- langlebige Strukturen;
- Forschung in Membran- und Sensortechnologie.

Tatsächlich existieren bereits Lichtabsorber, Membranen und Katalysatoren, die vielleicht individuell effizient, stabil und skalierbar sind, aber nicht nach Belieben miteinander kombiniert werden können, um eine funktionstüchtige Zelle zu ergeben, denn die Bedingungen, unter denen die einzelnen Komponenten optimal arbeiten variieren. Grundlagenforschung zu den unterschiedlichsten Materialien, deren Funktionen auch unter den unterschiedlichsten Bedingungen getestet werden sollten, so dass am Ende eine möglichst große Auswahl für Materialkombinationen zur Verfügung steht, erscheint daher essenziell, um weitere Fortschritte zu machen. Auch die Entwicklung von transparenten Katalysatoren erscheint wünschenswert. Lichtabsorbiermaterialien sollten im wässrigen und auch unter sauren Bedingungen stabil sein. Die Erweiterung um Licht absorbierende Materialien ist ein wichtiges Ziel für die Zukunft.<sup>867</sup>

860 ebd., S. 42.

861 Atom oder Molekül, das an ein zentrales Ion gebunden ist.

862 Lubitz, Wolfgang; Reijerse, Edward J.; Messinger, Johannes: Solar water-splitting into H<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>: design principles of photosystem II and hydrogenases. In: *Energy & Environmental Science* (2008), 1, S. 15–31.

863 Alstrum-Acevedo, James H.; Brennaman, M. Kyle; Meyer, Thomas J.: Chemical Approaches to Artificial Photosynthesis. 2. In: *Inorganic Chemistry* (2005), 20, S. 6802–6827.

864 Liu, Feng; Concepcion, Javier J.; Jurss, Jonah W.; Cardolaccia, Thomas; Templeton, Joseph L.; Meyer, Thomas J.: Mechanisms of water oxidation from the blue dimer to photosystem II unter: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18330966> (2008). Online am 13.01.2015.

865 Limberg, Christian: Landtag NRW (Hg.): Gutachten „Biomimetische Chemie“ für die Enquete-Kommission II des Landtags von Nordrhein-Westfalen. (2014), S. 10.

866 ebd..

867 McKone, James R.; Lewis, Nathan S.; Gray, Harry B.: Will Solar-Driven Water-Splitting Devices See the Light of Day? In: *Chemistry of Materials* (2014), 1, S. 407–414.

### III.5.4.2 Annahmen zur Stickstofffixierung

Der Bedarf an Stickstoffdüngern zur Erzeugung von Lebensmitteln und Rohstoffen aus erneuerbaren Quellen wird durch den globalen Bevölkerungsanstieg und den zunehmenden Wohlstand weiterhin steigen. Ob es eines Tages zu einem Austausch der derzeitigen Stickstoffdüngerproduktion durch die biomimetisch-chemische Stickstofffixierung kommen wird, hängt von weiteren Forschungsergebnissen und deren technischer Anwendbarkeit ab. Im Labormaßstab konnte bereits die Reaktion von Stickstoff mit Wasserstoff unter relativ milden Reaktionsbedingungen dargestellt werden.<sup>868</sup>

Die Stickstoffdüngung kann jedoch durch vermehrten Anbau von Pflanzen, die in Symbiose mit Bakterien Stickstoff aus der Luft binden, wesentlich verringert werden. Eine bedeutende Energie- und Futterpflanze mit diesen Eigenschaften ist die Sojabohne. Sojakulturen benötigen keine Stickstoffdüngung. Bereits angewandte Methoden zur Vermeidung oder Verringerung der Stickstoffdüngung sind die Gründüngung mit Zwischenfrucht-Leguminosen und Neuzüchtungen von Pflanzen, die den Stickstoffdünger besser verwerten. Eine Vermeidung der Stickstoffdüngung wäre auch durch Neuzüchtungen von Nutzpflanzen mit den stickstofffixierenden Eigenschaften der Leguminosen möglich, an denen gearbeitet wird.<sup>869</sup>

#### Forschungsbedarf

Das Wissen über den Prozess der biomimetisch-chemischen Stickstofffixierung ist begrenzt. Probleme bestehen bereits bei der theoretischen quantenchemischen Entschlüsselung der Thermodynamik und Kinetik der biologischen Stickstofffixierung. Mögliche Randbedingungen einer Stickstofffixierung mit künstlichen Katalysatoren unter milden Bedingungen sind nicht bekannt.<sup>870</sup>

### III.5.4.3 Annahmen zu bioinspirierten Materialien

Wie unter III.5.3.3 Bioinspirierte Materialien und Wirkstoffe beschrieben, waren natürlich vorkommende Stoffe und Materialien sowie natürliche Prozesse in der Vergangenheit bereits Vorbilder für technische Entwicklungen. Durch intensivierete Forschung konnte das naturwissenschaftliche Verständnis für die natürlichen Vorgänge weiter verbessert und verfeinert werden, was die Bioinspiration weiter beflügelt.

#### Forschungsbedarf

Organisationsstrukturen auf der Atom-, Mikro-, Nano-, Meso- und Makroebene sind zu entschlüsseln und ihr Zusammenspiel zur Funktionalisierung von Materialien muss weiter beforscht werden.<sup>871</sup> Für eine technische Umsetzung bioinspirierter Materialien muss starke Grundlagenforschung in innovationsgetriebener Kooperation mit der Industrie betrieben werden.<sup>872</sup>

868 Holthausen, Max: Ammoniaksynthese unter milden Bedingungen (22.06.2011).

869 bioSicherheit.de: Pflanzenzüchtung und Gentechnik für bessere Stickstoffnutzung: Weniger Dünger, mehr Ertrag unter: <http://www.biosicherheit.de/fokus/1413.stickstoffnutzung-gentechnik.html> (2012).

870 ebd..

871 Ball, Philip: Natural order. In: Nature (2007), 6, S. 719.

872 Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung; Fratzl; Peter: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung "Verfahren der biomimetischen Chemie" der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2014), S. 3.

### III.5.5 Optionen

#### Option G.1: Biomimetisch-chemische Wasserstoffspaltung vs. elektro-chemischer und katalytisch-thermischer Wasserspaltung

##### Beschreibung

Pflanzen nutzen Tageslicht zur Photosynthese. In Laborapparaten kann Sonnenlicht in Nachahmung der Photosynthese zur Spaltung von Wasser genutzt und dabei entstehender Wasserstoff verwendet werden.

##### Begründung

Die biologische Wasserspaltung ist aus drei Gründen für eine Entwicklung entsprechender biomimetisch-chemischer Analogkatalysatoren interessant. Erstens erzeugt sie das Syntheseprodukt Wasserstoff, das für eine Vielzahl stofflicher und energetischer Zwecke angewandt werden kann. Zweitens wird als Ausgangsstoff Wasser verwendet, das ausreichend zur Verfügung steht. Drittens wird die biochemische (Vorbild-)Reaktion durch Sonnenlicht angetrieben<sup>873</sup> – einer regenerativen und in menschlichen Zeitdimensionen unerschöpflichen Energiequelle. Die Natur beherrscht diesen Mechanismus als Teil der Photosynthese, die von Pflanzen, Algen und Cyanobakterien betrieben wird, um die Energie des Sonnenlichts in chemischen Verbindungen zu speichern.

Die biomimetisch-chemische Wasserspaltung in der Form des künstlichen Blattes ist Gegenstand von Forschungsarbeiten und existiert derzeit nur als Laborverfahren und Idee für eine kommerzielle Anwendung.

##### Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte

##### Ökologie

Der Einsatz des Sonnenlichts zur Produktion von Wasserstoff und/oder Methan würde eine entsprechende Substitution dieser Verbindung aus fossilen Ressourcen bedeuten, was mit einer Ressourcenschonung und einer Verminderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen einhergeht. Mit Wasser und CO<sub>2</sub> als Grundstoffe für chemische Synthesen wäre eine kreislaufwirtschaftliche Stoffnutzung möglich. Das biomimetische Verfahren müsste allerdings eine bessere oder zumindest vergleichbare Ökobilanz aufweisen als die vorstehend beschriebenen ausgereifteren Verfahren. Ob dies der Fall ist, kann beim aktuellen Entwicklungsstand noch nicht abgeschätzt werden.

##### Ökonomie

###### *Innovation*

Katalysatoren senken die Aktivierungsenergie und ermöglichen dadurch den Ablauf von thermodynamisch möglichen Reaktionen mit einem geringeren Energieeintrag (in der Regel bei niedrigerer Temperatur). Der Innovationscharakter der photolytischen Wasserspaltung liegt darin, dass die Enzyme als Katalysatoren die Aktivierungsenergie senken und die Reaktion bei Umgebungstemperatur ablaufen kann sowie die Nutzung der Sonnenenergie für den Stoffumsatz (der Wasserspaltung). Damit wird die Energie des Sonnenlichts direkt in kleine Speichermoleküle transferiert.<sup>874</sup>

Die Effizienz des Lichteinfangs und der Ladungstrennung der Photosynthese liegt bei nahezu 100%. Verluste, beispielsweise aufgrund von Stoffwechsel und der Verwendung von intermediären Ener-

---

873 ebd.

874 Freie Universität Berlin: Biomimetische Wasserstoffproduktion unter: <http://www.physik.fu-berlin.de/einrichtungen/ag/ag-heberle/projekte/bioelektrochemie/index.html>.

gieträgern, reduzieren die Gesamteffizienz danach jedoch auf wenige Prozent<sup>875</sup>, so dass hier großer Forschungsbedarf besteht. Neuere technische Lösungen erreichen einen Licht-zu-Wasserstoff-Wirkungsgrad von 12,3%, wobei Katalysatoren aus leicht und preiswert verfügbaren Metallen eingesetzt werden.<sup>876</sup>

Tabelle 36: Fakten zur Effektivität und Effizienz der Sonnenenergienutzung (max. rel. genutzte Sonneneinstrahlung)

Grüne Pflanzen <sup>875</sup>	0,8%
Metalloxid-Photoanode <sup>876</sup>	4,9%
Photovoltaik <sup>877</sup>	24%
Konzentrator-Photovoltaik <sup>878</sup>	41%

Eine große Herausforderung stellt die mangelnde Stabilität aktueller bioinspirierter Katalysatoren zur Wasserspaltung dar, weil bei der Wasserspaltung eine so reaktive Sauerstoffspezies produziert wird, die sauerstoffempfindliches Katalysator- und Elektrodenmaterial zu zerstören vermag.<sup>881</sup> Natürliche Enzymkomplexe weisen hierfür Selbstreparaturmechanismen auf, die allerdings schwer nachgeahmt werden können.

Eine größer dimensionierte energetische Nutzung von Wasserstoff steht eventuell dem Problem des Platinmangels gegenüber. Die Wasserelektrolyseure (KOH als Elektrolyt) haben heute jedoch Elektroden aus Nickel-(Anode) und Stahl-(Kathode) Gewebe.<sup>882</sup> Für die Brennstoffzelle wird Platin bisher häufig eingesetzt. Katalysatorsysteme für Brennstoffzellen mit Legierungen sind beschrieben.<sup>883</sup> Eine technische Nutzung biomimetisch-chemischer Verfahren ist frühestens in 20 Jahren möglich.<sup>884</sup> Die gesellschaftliche Akzeptanz von sonnengetriebenen chemischen Synthesen mit CO<sub>2</sub> und Wasser als Grundstoff scheint gegeben zu sein.

### Wettbewerbsfähigkeit

Wenn sich Wasser mittels der Energie des Sonnenlichts technisch in Sauerstoff und Wasserstoff spalten lässt, können neue Wege der stofflichen Nutzung von energiearmen Ausgangsstoffen zur chemischen Synthese gegangen werden. Bisher ist aber noch kein Verfahren bekannt, das die Anforderungen an Wirkungsgrad, Umsatzraten, Stabilität, Skalierbarkeit und Kosten erfüllt.<sup>885</sup> Bereits erste Versuche zum wirtschaftlichen Betrieb eines künstlichen Blattes scheiterten am Preis des eingesetzten Siliziums.

875 Limberg, Christian: Landtag NRW (Hg.): Gutachten „Biomimetische Chemie“ für die Enquete-Kommission II des Landtags von Nordrhein-Westfalen. (2014), S. 2.

876 Luo, J., et al.: Water photolysis at 12.3% efficiency via perovskite photovoltaics and Earth-abundant catalysts. In: Science (2014), 345, S. 1593–1596.

877 Linder, Hermann (Hg.): Biologie – Lehrbuch für die Oberstufe. Schroedel Verlag (1998). ISBN 3-507-10580-2, S. 43.

878 ebd.

879 PV-Tech: SunPower claims new 23.4 percent solar cell efficiency record unter: [http://www.pv-tech.org/news/sunpower\\_claims\\_new\\_234\\_percent\\_solar\\_cell\\_efficiency\\_record](http://www.pv-tech.org/news/sunpower_claims_new_234_percent_solar_cell_efficiency_record) (2008).

880 heise online: Die effizienteste Solarzelle der Welt unter: <http://www.heise.de/newsticker/meldung/Die-effizienteste-Solarzelle-der-Welt-196245.html> (2008).

881 ebd.

882 Hamann, Carl H.; Vielstich, Wolf (Hg.): Elektrochemie. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2005). ISBN 978-3-527-31068-5, S. 460.

883 ebd., S. 539 ff.

884 Max-Planck-Institut für chemische Energiekonversion; Wieghardt, Karl: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Verfahren der biomimetischen Chemie“ der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2014).

885 ebd., S. 34.

Enzymgesteuerte oder -inspirierte Verfahren können unter Umgebungsbedingungen laufen, was Wirtschaftlichkeitsvorteile haben könnte.<sup>886</sup> In der Natur läuft die Wasseroxidation mit hoher Quantenausbeute und damit hoch effizient ab.<sup>887</sup> Die Speicherung in kleinen Molekülen verstetigt die Nutzung der volatil und saisonal unterschiedlich anfallenden Sonnenenergie.

Die Wirtschaftlichkeit der biomimetisch-chemischen Wasserspaltung muss mit der Wasserelektrolyse vergleichbar sein, deren Potenzial ebenfalls in diesem Bericht behandelt wird. Kommerzielle Realisierbarkeit, Kosten und Nutzen biomimetischer Verfahren zur Wasserspaltung sind derzeit nicht abschätzbar. Es besteht Konsens, dass die Kombination von hoher Effizienz mit geringen Kosten die eigentliche Barriere für eine Technologie zur Wasserspaltung darstellt.<sup>888</sup>

Die existierende Labormethode muss noch so weit entwickelt werden, dass sie mit den technisch etablierten und viel weiter ausgereiften Verfahren zur Wasserstoffherstellung wie der Wasserelektrolyse mit Strom aus erneuerbaren und kohlenstofffreien Quellen sowie der thermischen Wasserspaltung in Solaröfen konkurrieren kann.

Ergebnisse neuerer Studien<sup>889</sup> zur technischen und ökonomischen Durchführbarkeit der solaren Wasserspaltung in industriellen Anlagen und Maßstäben räumen bestimmten Zellen Potenzial ein: Wasserstoff, der mit PV-gekoppelten Elektrolysesystemen (erreichte Effizienz: 18%) erzeugt wird, ist aktuell trotz sinkender PV-Preise noch immer nicht wettbewerbsfähig zu Wasserstoff, der mit kohleerzeugter Elektrizität generiert wurde (ca. 3 Euro/kg). Bei weiterem technischen Fortschritt mithilfe von PEC<sup>890</sup>-Wasserspaltung kann – nach Aussage eines von der Kommission in Auftrag gegebenen Gutachtens – Wasserstoff zu Preisen von 1,5 – 3 Euro/kg bereitgestellt werden. Der Schlüssel liegt hierfür in der Materialsynthese und -effizienz. Die ideale Produktionsmethode sollte im großen Maßstab zu bewerkstelligen sein, aber dennoch Kontrolle auf der Nanoskala ermöglichen.<sup>891</sup>

### Soziales

Auf der Basis des aktuellen Technologiegrads der biomimetischen Wasserspaltungen können die Auswirkungen auf die Beschäftigung noch nicht abgeschätzt werden. Es ergeben sich für diese neue Technologie neue Ausbildungsbedarfe.

## Option G.2: Biomimetisch-chemische Stickstofffixierung vs. Haber-Bosch-Verfahren und Züchtung von Nutzpflanzen mit den Eigenschaften der Leguminosen

### Beschreibung

Für die großtechnische Stickstofffixierung in Ammoniak wird seit ca. 100 Jahren das Haber-Bosch-Verfahren eingesetzt. Ausgangsstoffe dafür sind Luftstickstoff und Wasserstoff. Aktuell wird Wasserstoff dafür weit überwiegend im Reformier-Prozess aus Erdgas gewonnen. Die Reaktion des trägen

886 Tuzek, Felix: Wie funktionieren Metallzentren in Proteinen? Von Modellkomplexen zu biomimetischen Reaktionen unter: <http://www.chemie.uni-kiel.de/pages/kielchem/Tuzek.pdf>.

887 Messinger, J., Renger, G: Structural changes in the water-oxidizing complex monitored via the pH dependence of the reduction rate of redox state S1 by hydrazine and hydroxylamine in isolated spinach thylakoids. In: *Biochemistry* (1995), 34, S. 6175–6182.

888 Howes, Laura: Twisting molecules for faster reactions unter: <http://www.rsc.org/chemistryworld/2013/10/twisting-molecules-conformer-faster-reactions> (2013).

889 Pinaud, Blaise A.; Benck, Jesse D.; Seitz, Linsey C.; Forman, Arnold J.; Chen, Zhebo; Deutsch, Todd G.; James, Brian D.; Baum, Kevin N.; Baum, George N.; Ardo, Shane; Wang, Heli; Miller, Eric; Jaramillo, Thomas E.: Technical and economic feasibility of centralized facilities for solar hydrogen production via photocatalysis and photoelectrochemistry. In: *Energy & Environmental Science* (2013), 7, S. 1983.

890 Photoelektrochemisch.

891 Rongé, Jan; Bosserez, Tom; Martel, David; Nervi, Carlo; Boarino, Luca; Taulelle, Francis; Decher, Gero; Bordiga, Silvia; Martens, Johan A.: Monolithic cells for solar fuels. In: *Chem. Soc. Rev.* (2014), 23, S. 7963–7981.

$N_2$ -Moleküls mit dem energiereichen Wasserstoff ist exotherm, erfordert aber eine hohe Aktivierungsenergie, Katalysatoren, Temperaturen von 450 bis 550°C und Drücke um ca. 250 bis 350 bar. Ca. 85% des Ammoniaks wird derzeit zu Mineraldünger verarbeitet, der Rest zu Grundchemikalien wie z.B. Salpetersäure, Hydrazin, Ammoniumnitrat und höher nitrierte organische Verbindungen: wie z.B. Pentaerythrittetranitrat (Nitropenta), Nitroglycerin oder Trinitrotoluol (TNT). Die biomimetische Nachahmung der katalytischen Funktion des Nitrogenase-Enzyms aus symbiotischen Knöllchenbakterien ist ein Ziel von Forschergruppen.

### **Begründung**

Für biomimetisch hergestellte Stickstoffverbindungen würden Verfahren bei Normaldruck und Umgebungstemperatur laufen (sanfte Chemie). Die notwendige Energie wird wie bei der technischen Synthese durch Wasserstoff, der dann ebenfalls biomimetisch produziert wird, eingebracht.

### **Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte**

#### **Ökologie**

Der Energieeintrag der Stickstofffixierung nach Haber-Bosch und in dem biomimetisch-chemischen Verfahren ist aufgrund der thermodynamischen Stabilität des Stickstoffmoleküls groß. Das Haber-Bosch-Verfahren benötigt hohe Drücke und Temperaturen. Biologische Systeme nutzen als Energie hochreaktive chemische Verbindungen. Ob ein biomimetischer Prozess umweltfreundlicher wäre, lässt sich nur durch eine Ökobilanz ermitteln, wenn ein solcher Prozess einsatzreif ist. Das Druck- und Temperaturniveau des Haber-Bosch-Verfahrens tritt bei vielen technischen Prozessen auf und ist technisch sicher beherrschbar. Die Ökobilanz von Hochtemperaturprozessen ist in der Regel günstig durch Energierückgewinnung und Kreislaufführung von energiereichen Stoffströmen.

#### **Ökonomie**

##### *Innovation*

Der Prozess der biomimetisch-chemischen Stickstofffixierung ist besonders schwer zu verstehen.<sup>892</sup> Ob es zu je zu einer technischen Umsetzung kommt, ist unklar.

##### *Wirtschaftlichkeit*

Das technische Verfahren der Stickstofffixierung nach Haber-Bosch ist in einer 100-jährigen Praxis optimiert worden. Die aktuellen Anlagen haben Jahreskapazitäten von 1 Mio. t (Skaleneffekte) und laufen weitgehend automatisch. Die Wirtschaftlichkeit ist im Wesentlichen nur von der Verfügbarkeit und dem Preis des Wasserstoffs abhängig. Eine wirtschaftliche Anwendung einer biomimetisch-chemischen Stickstofffixierung wird als wenig wahrscheinlich angesehen.<sup>893</sup>

#### **Soziales**

Eine Umstellung des Verfahrens hätte in der sozialen Kategorie lediglich Auswirkungen auf die Ausbildung. Ein Arbeitsplatzverlust oder -zugewinn ist nicht zu erwarten.

892 Schneider K., Müller, A: Die biologische Stickstoff-Fixierung: Dem Geheimnis eines lebensnotwendigen Prozesses auf der Spur unter: [http://www.uni-bielefeld.de/presse/fomag/S\\_43\\_49.pdf](http://www.uni-bielefeld.de/presse/fomag/S_43_49.pdf) (1999). Online am 06.01.2015.

893 Limberg, Christian: Landtag NRW (Hg.): Gutachten „Biomimetische Chemie“ für die Enquete-Kommission II des Landtags von Nordrhein-Westfalen. (2014). S. 14.

### Option G.3: Entwicklung von biologisch inspirierten Materialien als Ersatz von derzeit genutzten technischen Materialien und neuartigen Werkstoffen

#### Beschreibung

Bisher sind natürliche Wirkstoffe und Materialien bereits Vorbilder für technische Produkte.

#### Begründung

Neue oder erweiterte Erkenntnisse für die Erfindung bioinspirierter Produkte sind durch Anwendung neuer Forschungsmethoden möglich.

#### Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte

##### Ökologie

Die Natur synthetisiert ihre Materialien unter milden Synthesebedingungen. Eine Umstellung auf bioinspirierte Materialien kann mit einer geringeren Vielfalt an Grundstoffen einhergehen, was die Rezyklierung dieser Materialien vereinfachen kann, wenn sie im Verbund verwendet werden.<sup>894,895</sup> Darüber hinaus sparen selbstreinigende Oberflächen Reinigungsmittel und verringern den Reinigungsaufwand.

##### Ökonomie

###### *Innovation*

Das Innovationspotenzial biologischer Materialien kann als groß betrachtet werden.<sup>896</sup> Neue Synthesewege zur Produktion von bioinspirierten Materialien müssten entwickelt werden. Trotz zunehmendem Verständnis des Aufbaus biologischer Materialien, bleiben die Nachahmung natürlicher Zellprozesse zur Synthese solcher Materialien eine große Herausforderung.<sup>897</sup>

###### *Wettbewerbsfähigkeit*

Bioinspirierte Materialien, wie z.B. Oberflächen mit Lotuseffekt, sind bereits erfolgreich auf dem Markt. Eine Marktreife von weiteren Produkten, vor allem in den Bereichen Oberflächenfunktionalisierung und umsetzungsnahe Anwendungsbeispiele für selbstheilende Materialien, werden erwartet.<sup>898</sup> Der Einsatz von biologisch inspirierten Materialien ist auf absehbare Zeit nur als Ersatz für Massenprodukte denkbar, wenn sie wettbewerbsfähig hergestellt werden.<sup>899</sup>

##### Soziales

Die Herstellung von bioinspirierten Stoffen kann an hohe Anforderungen an Aus- und Weiterbildung geknüpft sein. Der Aufbau neuer Arbeitsplätze könnte aus heutiger Sicht für die Materialproduktion spezialisierter Anwendungen in technische Nischen gelingen, was in der Regel für kleinere Produktionsmengen zutrifft.

894 Anastas, Paul T.; Kirchhoff, Mary M.: Origins, Current Status, and Future Challenges of Green Chemistry †. In: Accounts of Chemical Research (2002), 9, S. 686–694.

895 Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung; Fratzl; Peter: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung "Verfahren der biomimetischen Chemie" der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2014), S. 3.

896 ebd., S. 3.

897 Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V. (DGM) (Hg.): Bio-inspired Materials International School and Conference on Biological Materials Science 18-21 March 2014. (2014), S. 22.

898 Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung; Fratzl; Peter: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung "Verfahren der biomimetischen Chemie" der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2014), S. 6.

899 ebd., S. 3.

### III.5.6 Bewertung

#### Option G.1: Biomimetische Chemie

Neue Analysemethoden wie die hochauflösende Mikroskopie haben dazu beigetragen, biologische Vorgänge auf Nano- und Subnanoebene nachzuvollziehen. Dieses Wissen lässt sich nutzen, um von der Natur inspiriert natürliche Funktionsweisen in technische Lösungen (Produkte und Verfahren) zu übertragen. Es wird das Potenzial bioinspirierter Chemie zur Entwicklung von Katalysatoren und Materialien betrachtet.

#### Option G.2: Biomimetische Chemie zur Entwicklung effizienter Katalysatoren für die Wasserstoff- und Ammoniakherstellung

Die Wasserstoffgewinnung nach dem Vorbild der Photosynthese nimmt die Wasserspaltung im Photosystem II des Photosyntheseapparats von Pflanzen zum Vorbild, um katalytisch aus Wasser mit Hilfe von Sonnenlicht Wasserstoff zu produzieren. Im Labormaßstab existieren erste technische Systeme für die Wasserstoffherstellung. Eine großtechnische Anwendung könnte die aktuelle Wasserstoffgewinnung aus Erdgas mittels Dampfreformierung ersetzen. Der biomimetisch erzeugte Wasserstoff könnte nach dem Vorbild des Photosystems I der Photosynthese z.B. auf  $\text{CO}_2$  übertragen und zu Methanol oder anderen Grundchemikalien umgewandelt werden. Eine Herstellung niedermolekularer Kohlenstoffverbindungen mit Hilfe biomimetischer Katalysatoren ist jedoch nicht bekannt.

Derzeit wird Ammoniak nach dem Haber-Bosch-Verfahren unter sehr harschen Bedingungen erzeugt. Die biomimetische Chemie verfolgt deshalb den Ansatz, nach dem Vorbild der enzymatischen Stickstofffixierung in Pflanzen Luftstickstoff zu spalten und unter Nutzung regenerativ gewonnenen Wasserstoffs (z.B. nach oben beschriebenen Verfahren) in Ammoniak zu überführen. Bislang ist jedoch kein biomimetisches Verfahren bekannt, das Ammoniak (im Labormaßstab) produzieren kann.

#### Option G.3: Bioinspirierte Materialien

Ein weiteres Gebiet ist die Materialentwicklung nach dem Vorbild der natürlichen Materialorganisation. In der Natur ergeben sich aus wenigen Grundbausteinen verschiedenste multifunktionale Materialien, während aktuelle synthetische Materialien aus einer Vielzahl von Grundstoffen bestehen. Das beschriebene Prinzip der Materialorganisation natürlicher Materialien soll zur Entwicklung technischer Materialien genutzt werden.

#### Zusammenfassung

Die biomimetische Chemie besitzt theoretisches Potenzial zur Herstellung niedermolekularer Verbindungen als Grundchemikalien. Allerdings befindet sie sich noch im Stadium der Grundlagenforschung, eine technische Realisierbarkeit ist entsprechend schwierig abzuschätzen und erst mit sehr langem Zeithorizont gegeben. Aktuell besteht noch ein unzureichendes Verhältnis von Effizienz zu Kosten. Von den betrachteten Beispielen ist die Wasserspaltung nach dem Vorbild des Photosystems II zur Wasserstoffherstellung am weitesten entwickelt. Eine Realisierung ist in ca. 20 Jahren möglich. Dagegen sind die  $\text{CO}_2$ -Reduktion nach dem Vorbild des Photosystems I sowie die Stickstofffixierung nach dem Vorbild der Nitrogenase weit weniger entwickelt, das entsprechende Potenzial zur technischen Anwendung ist hier nicht abschätzbar.

Biologische Materialien stellen eine Quelle an möglichen Materialinnovationen dar. Der Ersatz von Massenprodukten durch bioinspirierte Materialien ist mittel- bis langfristig nicht absehbar. Das Potenzial solcher neuartigen Materialien wird in erster Linie für Nischenprodukte gesehen.

Für die technische Anwendung bioinspirierter Katalysatoren und Materialien besteht noch ein großer Bedarf zur Forschung und Weiterentwicklung, die in Kooperation mit der Industrie erfolgen sollte. Dabei ist es essentiell, die jeweiligen Grundprinzipien mit Hilfe der Grundlagenforschung zu verstehen, um entscheiden zu können, wo eine Übertragung der Funktionsprinzipien auf die Katalysator- und Materialentwicklung technisch möglich und nachhaltig sinnvoll ist.

# Inhalt Kapitel IV

IV. ENERGIEUMSÄTZE .....	273
IV.1 Einleitung .....	273
IV.2 Stofflicher Teil/Elektrochemische Verfahren.....	275
IV.2.1 Einführung in die elektrochemischen Verfahren .....	275
IV.2.2 Elektrochemische Verfahren für anorganische Produkte (Elektrolysen) .....	279
IV.2.2.1 Chlor-Alkali-Elektrolyse .....	279
IV.2.2.2 Salzsäure-Elektrolyse.....	286
IV.2.2.3 Wasserelektrolyse .....	287
IV.2.2.4 Elektrochemische Verfahren für kleinmargige, anorganische Produkte .....	291
IV.2.3 Elektrochemische Verfahren zur Herstellung organischer Produkte.....	291
IV.2.4 Sonstige elektrochemische Verfahren .....	294
IV.2.4.1 Schmelzflusselektrolyse zur Herstellung von Aluminium, Magnesium und Alkalimetallen.....	294
IV.2.4.2 Elektrochemische Verfahren der Oberflächenbehandlung und Galvanotechnik ..	296
IV.2.4.3 Elektrochemische Verfahren der Wasseraufbereitung, Abwasserbehandlung.....	297
IV.2.4.4 Lichtbogenverfahren .....	297
IV.3 Energiespeicher .....	299
IV.3.1 Einführung in die Energiespeichersysteme.....	299
IV.3.2 Mechanisch/Kinetische Speicher .....	304
IV.3.3 Wärmespeicher.....	310
IV.3.3.1 Sensible Wärmespeicher .....	311
IV.3.3.2 Latentwärmespeicher .....	312
IV.3.3.3 Thermochemische Energiespeicher.....	313
IV.3.4 Batterien.....	314
IV.3.4.1 Klassische Batterien.....	315
IV.3.4.2 Redox-Flow-Batterien (Flüssigbatterien).....	317
IV.3.4.3 Innovative Batteriekonzepte .....	319
IV.3.5 Power to Gas/Power to Chemicals.....	320
IV.3.5.1 Systemlösung Power to Gas .....	320
IV.3.5.2 Power to Chemicals .....	331
IV.3.6 Potenzial Demand Side Management (DSM)/Supply Side Management (SSM) ..	333
IV.4 Annahmen .....	335
IV.4.1 Relevante Megatrends .....	335
IV.4.2 Auswirkungen der Megatrends auf die Elektrochemie .....	342
IV.4.3 Auswirkungen der Megatrends auf die Energiespeicherarten .....	343
IV.4.3.1 Auswirkungen der Megatrends auf Wärmespeicher .....	343
IV.4.3.2 Auswirkungen der Megatrends auf Batterietechnik.....	344
IV.4.3.3 Auswirkungen der Megatrends auf PtG und PtC.....	345
IV.5 Optionen.....	349
IV.5.1 Ausbau der elektrochemischen und energieintensiven Produktion organischer Produkte.....	350

Option H.1a:	Elektrochemische Produktion (organische Elektrosynthesen) der organischen Grundchemikalien Adipodinitril und Sebacinsäure .....	350
Option H.1b:	Vermehrte Nutzung des Lichtbogenverfahrens .....	351
IV.5.2	Nutzung bestehender Verfahren zum Einsatz volatiler Strommengen .....	351
Option H.2a:	Vermehrte Herstellung von Aluminium in Deutschland .....	352
Option H.2b:	Nutzung der Chlor-Alkali-Elektrolyse (CAE) zur Netzstabilisierung .....	353
Option H.2c:	Vermehrter Betrieb der Wasserelektrolyse .....	354
IV. 5.3	Ausbau chemierelevanter Energiespeicherlösungen.....	354
Option H.3a:	Vermehrte Nutzung von Wärmespeichern zur Energiespeicherung.....	354
Option H.3b:	Vermehrte Nutzung von Batterien zur Energiespeicherung.....	356
Option H.3c:	Vermehrte Nutzung von Power to Gas-Konzepten zur Energiespeicherung .....	358
Option H.3d:	Vermehrte Nutzung von Power to Chemicals-Konzepten zur Energiespeicherung.....	362
<b>IV.6</b>	<b>Bewertung.....</b>	<b>365</b>
IV.6.1	Potenzial des Ausbaus der elektrochemischen und energieintensiven Produktion organischer Produkte .....	365
Option H.1a:	Elektrochemische Produktion (org. Elektrosynthesen) der organischen Grundchemikalien Adipodinitril und Sebacinsäure .....	365
Option H.1b:	Vermehrte Nutzung des Lichtbogenverfahrens .....	366
IV.6.2	Nutzung bestehender Verfahren zum Einsatz volatiler Strommengen .....	367
Option H.2a:	Vermehrte Herstellung von Aluminium in Deutschland .....	367
Option H.2b:	Nutzung der Chlor-Alkali-Elektrolyse (CAE) zur Energiespeicherung .....	367
IV.6.3	Energiespeicher.....	368
Option H.3a:	Vermehrte Nutzung von Wärmespeichern zur Energiespeicherung.....	368
Option H.3b:	Vermehrte Nutzung von Batterien zur Energiespeicherung.....	370
Option H.3c:	Vermehrte Nutzung von Power to Gas-Konzepten zur Energiespeicherung .....	371
Option H.3d:	Vermehrte Nutzung von Power to Chemicals-Konzepten zur Energiespeicherung.....	372

# IV. Energieumsätze

## IV.1 Einleitung

Dieses Kapitel Energieumsätze ist unterteilt in die Unterkapitel Elektrochemie und Energiespeicher. Das Unterkapitel Elektrochemie untersucht die Potenziale einer nachhaltigeren Chemieproduktion in Nordrhein-Westfalen mittels elektrochemischer Verfahren zur Synthese anorganischer Grundchemikalien sowie organischer Verbindungen. Entsprechend dem Antrag zur Einrichtung einer Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie wird in diesem Kapitel analysiert, ob eine Renaissance der Elektrochemie ölbasierte Verfahren ergänzen oder teilweise ersetzen kann und ob der Ersatz der chemischen Verfahren durch elektrochemische mit Effizienz- oder Nachhaltigkeitsvorteilen verbunden ist. Dieser Aspekt soll vor dem Hintergrund der Energiewende mit einem zunehmenden Einsatz von kohlendioxidfrei erzeugtem Strom betrachtet werden.

Da der Strom aus den erneuerbaren Quellen Sonne und Wind wetterbedingt in schwankenden Mengen anfällt, ist zu analysieren, ob die Elektrochemie durch eine angepasste Prozesssteuerung bei den elektrochemischen Verfahren und bei der im Folgekapitel beschriebenen Energiespeicherung einen Beitrag zur Stabilisierung der Stromnetze und zur effizienteren Nutzung des volatil anfallenden Stroms leisten kann und dies auch kommerziell einsetzbar ist. Da dieses Ziel auch durch andere strom-verbrauchende Prozesse in der chemischen Industrie unterstützt werden kann, werden insoweit auch die stromintensiven Produktionsprozesse betrachtet, die im engeren Sinn nicht zur Elektrochemie gerechnet werden wie z.B. Lichtbogenverfahren und elektrisch erzeugte thermische Prozessenergie. Des Weiteren sind der Stand von Wissenschaft und Technik, Innovationspotenziale sowie eventuelle Forschungs- und Ausbildungsdefizite zu ermitteln. Sich daraus ergebene Herausforderungen an die Lehre bei der Chemiker- und Ingenieurausbildung sehen auch die Industriebände und wissenschaftliche Gesellschaften<sup>900</sup>.

Das Unterkapitel Energiespeicher prüft die möglichen Beiträge der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen zur Energiewende. Dazu werden verschiedene Speichertechnologien nicht nur hinsichtlich ihres Potenzials bezüglich Art der Regelleistung, zentraler oder dezentraler Anwendung sowie Möglichkeiten zum Ausbau betrachtet, sondern vor allem die Beiträge der Chemie zu entsprechender Materialentwicklung und -produktion, Technologien, Anlagenbetrieb und Dienstleistungen beleuchtet.

---

900 Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V. (GDCh); Verband der Chemischen Industrie (VCI); Deutsche Bunsen-Gesellschaft (DBG); Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (DECHEMA); Gesellschaft für Korrosionsschutz e.V. (Gf-KORR) (Hg.): Elektrochemie – Herausforderungen an die Lehre in der Chemikerausbildung. (2010).

**Begriffserläuterungen für Elektrochemie:**

**Stromspannung** = elektrische Spannung, erforderliche Energie zur Bewegung von Ladungen im elektrischen Feld, Maßeinheit Volt (V)

**Stromstärke** = transportierte elektrische Ladung pro Querschnitt und Zeit, Maßeinheit Ampere (A)

**Stromdichte** = elektrische Stromstärke pro Querschnitt, Maßeinheit Ampere pro m<sup>2</sup>

**Elektrochemische Zelle** = galvanische Zelle, Gefäß mit in eine Flüssigkeit (Elektrolyt) eingetauchten Elektroden zur Umwandlung von chemische in elektrische Energie oder als Elektrolysezelle zur Zersetzung eines Stoffes durch elektrischen Strom

**Elektrolyt** = in Ionen dissoziierte Flüssigkeit als Lösung oder Schmelze (auch Feststoffe); die Ionen leiten den elektrischen Strom durch Wanderung zwischen zwei Elektroden (Anode und Kathode)

**Elektroden** = in einen Elektrolyten eingetauchte elektrische Leiter (Elektronenleiter)

**Ionen** = durch mindestens ein fehlendes oder ein zusätzliches Elektron eine Ladung tragende Atome oder Moleküle. Ionen leiten durch Wanderung in einem elektrischen Feld Strom.

**Elektronen** = einfach negativ geladene Elementarteilchen. Durch Elektronenwanderung in einem Elektronenleiter wie Metalle wird ein Strom übertragen

**Radikal** = unbeständiges Molekül mit ungepaarten Elektronen

**Elektrochemische Spannungsreihe** = Auflistung der Elemente nach ihren spezifischen Spannungen bezogen auf das Potenzial null (per Definition) der Wasserstoffelektrode an einer inerten Platinelektroden

**Elektrolyse** = durch einen elektrischen Gleichstrom erzwungene Redoxreaktion

**Galvanisches Element** = durch Membran getrenntes Gefäß, in dem Oxidation und Reduktion räumlich getrennt ablaufen und die auszutauschenden Elektronen über einen metallischen Leiter fließen und dadurch einen Stromfluss erzeugen

**Elektrolyt-Leitfähigkeit** = (Ionenleitung) bei Vernachlässigung der Polarisationsspannung an den Elektroden kann die Leitfähigkeit eines Elektrolyten mit dem Ohm'schen Gesetz beschrieben werden: Stromstärke (I) = Spannung (U) / Widerstand (R)

**Oxidation** = Atom, Ion oder Molekül gibt Elektronen in einer chemischen Reaktion ab (Anodenreaktion)

**Reduktion** = Atom, Ion oder Molekül nimmt Elektronen in einer chemischen Reaktion auf (Kathodenreaktion)

**Redoxreaktion** = chemische Reaktion durch Übertragung der Elektronen von einem Reaktionspartner auf den anderen

**Semipermeable Membran** = Trennwand aus Keramik oder Kunststoffen mit definierter Porengröße; durchlässig für kleine Moleküle und undurchlässig für größere; durchlässig für Ladungsträger (Ionenaustauscher-Membran) ungleicher Ladung und undurchlässig für Ionen gleicher Ladung

**Stromverbrauchseinheiten (elektrische Arbeit)** = 1000 Wh = 1 kWh, 1000 kWh = 1 MWh, 1000 MWh = 1 GWh, 1000 GWh = 1 TWh (Kilo, Mega, Giga, Tera)

**(Installierte) Stromleistungseinheiten** = wie vorstehend in W, kW, MW, GW, TW

## IV.2 Stofflicher Teil/Elektrochemische Verfahren

### IV.2.1 Einführung in die elektrochemischen Verfahren

#### Grundlagen

Die Elektrochemie beschreibt chemische Reaktionen<sup>901</sup>, die mit einem Stromfluss verknüpft sind. Diese Prozesse laufen in einem Gefäß mit leitfähigen (Ionenleitung) chemischen Stoffen (Elektrolyt) ab, in das gleichstromführende Elektroden eintauchen. Durch den Fluss von elektrischem Gleichstrom werden Stoffumwandlungen an den Oberflächen der Elektroden induziert. Das Elektron aus dem Stromfluss nimmt somit direkt an der Reaktion teil.

Da elektrochemische Reaktionen Redoxreaktionen sind, kann der elektrische Strom für die Reduktion und Oxidation von Stoffen zur Herstellung von Produkten angewandt werden. Durch die Anwendung der Elektrochemie werden Produkte zugänglich, die mit anderen chemischen Methoden überhaupt nicht oder nur über extrem aufwändige und umständliche Wege herstellbar wären. Beispiele sind metallisches Natrium, Aluminium, Magnesium und die Halogene Chlor und Fluor in elementarer Form. Synthesen organischer Verbindungen sind ebenfalls als elektrochemische Redoxreaktionen möglich. Sie laufen als Reduktionen an der Kathode oder Oxidationen an der Anode ab. Leicht zugänglich sind Verbindungen mit Doppelbindungen (Alkene, Aromaten, Heteroatom-Doppelbindungen).

Die Elektronen wandern beim Anlegen einer elektrischen Spannung in einem Stromkreis zur oder von der Oberfläche der Elektroden. Sie sind das Reagenz (Edukt) für die chemischen Umsetzungen. Die Umsetzung erfolgt an der Phasengrenze (zwischen fester Elektrodenoberfläche und flüssigem Elektrolyten) mit dem Durchtritt elektrischer Ladungen (Elektronen) und dem Transport von Ionen. Durch Abgabe von Elektronen (an der Anode) wird ein Stoff oxidiert, während die Aufnahme von Elektronen (an der Kathode) eine Reduktion des Stoffes ist. Beispiel: Das Natriumion ( $\text{Na}^+$ ) wird durch Aufnahme eines Elektrons zum Natrium (metallisches Natrium ( $\text{Na}$ )) reduziert. Das Chloridion ( $\text{Cl}^-$ ) wird durch Abgabe eines Elektrons an der Anode zum Chloratom oxidiert. Der Gesamtvorgang wird als Redoxreaktion bezeichnet. Eine Schmelze von Natriumchlorid (Kochsalz) liegt in Form der beweglichen Ionen  $\text{Na}^+$  und  $\text{Cl}^-$  vor. Durch den Stromfluss mit Ladungsaustausch wird  $\text{Na}^+$  zum metallischen Natrium reduziert:  $\text{Na}^+ + e^- \rightarrow \text{Na}$  und  $\text{Cl}^-$  zum elementaren Chlor oxidiert:  $2\text{Cl}^- - 2e^- \rightarrow \text{Cl}_2$ . Auch eine Lösung von Natriumchlorid kann durch Anlegen einer elektrischen Spannung zersetzt werden. Die erste Stufe der Zersetzung verläuft wie bei der Salzsäure. Da das entstehende Natrium jedoch sofort mit Wasser reagiert, wird es unter Weiterreaktion zu Natriumhydroxid und Wasserstoff zersetzt. Diese Reaktion wird technisch in der Chlor-Alkali-Elektrolyse zur Herstellung von Natronlauge, Chlor und Wasserstoff genutzt.

Bei der Elektrolyse wird elektrische Energie in das System eingebracht. Der elektrochemische Prozess ist reversibel, d.h. durch Mischung von geeigneten reaktiven Komponenten in einem Gefäß mit Elektroden – einer galvanischen Zelle – kann Strom erzeugt werden. Abbildung 71 zeigt die experimentelle Anordnung einer galvanischen und einer Elektrolyse-Zelle:

901 Hamann, Carl H.; Vielstich, Wolf (Hg.): Elektrochemie. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2005). ISBN 978-3-527-31068-5.

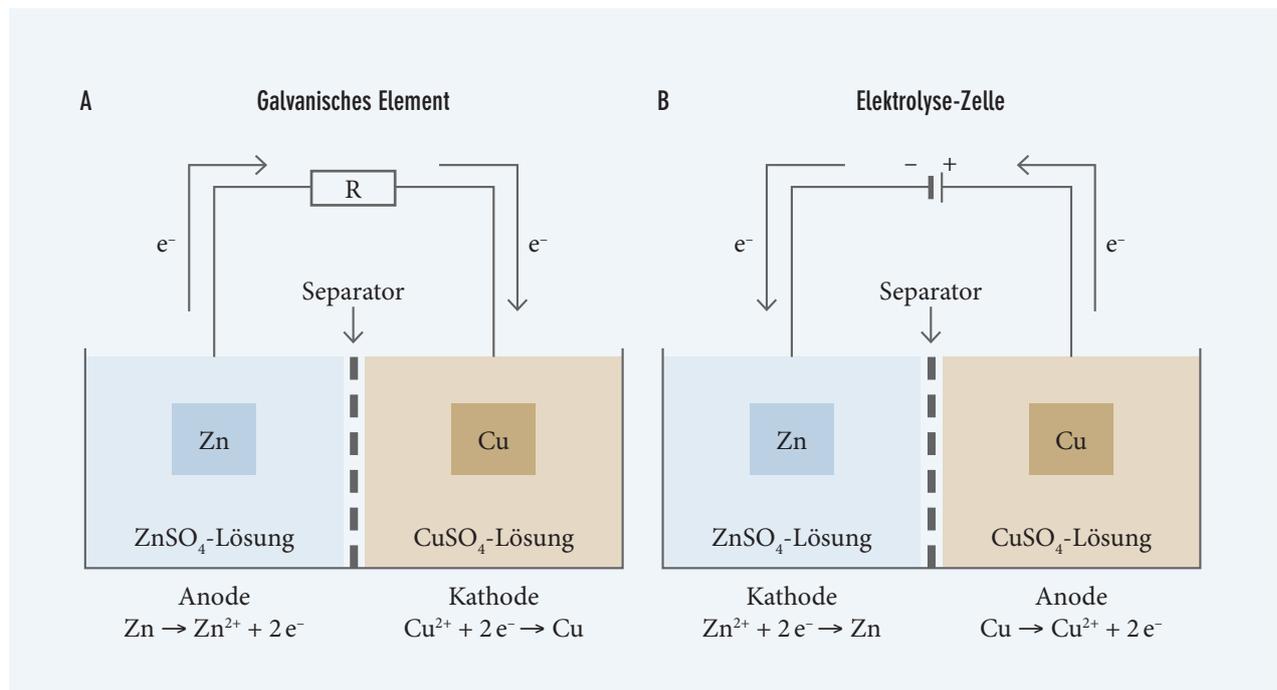


Abbildung 71: Geteilte elektrochemische Zellen A (Galvanische Zelle zur Stromerzeugung als Daniell-Element: Zink-Elektrode in  $\text{ZnSO}_4$ -Lösung und Kupfer-Elektrode in  $\text{CuSO}_4$ -Lösung) und die Elektrolysezelle B, bei der elektrische Energie in das System eingebracht wird<sup>902</sup>

### Galvanische Zellen

Bei der Anordnung der galvanischen Zellen (Abbildung 71 (A)) muss gewährleistet sein, dass die Reaktion der reaktiven Komponenten in einem Elektrolyten durch Aufnahme oder Abgabe von Elektronen nur an den Oberflächen (Grenzfläche) der Elektroden (Anode/Pluspol und Kathode/Minuspol) stattfindet. Dabei fließt in einem Elektronenleiter (z.B. mit den Elektroden verbundenem Kupferdraht) ein elektrischer Strom. Im Elektrolyten fließt der Strom durch Ionenwanderung (Kation zur Kathode und Anion zur Anode). Das Vermischen von reaktiven Komponenten und ihre Reaktion untereinander durch direkten Elektronenaustausch ohne Stromfluss werden durch die Trennung der Komponenten in der galvanischen Zelle erreicht. Als Material zur Trennung können poröse Separatoren oder Ionenaustauschermembranen eingesetzt werden. Die Ionenbewegung im Elektrolyten und damit die Stromleitung zwischen den Elektroden werden durch die poröse Trennwand nicht unterbrochen. Mit Trennwänden versehene Zellen verhindern auch, dass die an der einen Elektrode gebildeten Stoffe an der anderen Elektrode wieder reagieren. Dadurch wird die Verwendung unterschiedlicher Lösungen im Anoden- und Kathodenraum möglich. Galvanische Zellen werden kommerziell als Trockenbatterien oder als Brennstoffzellen (Stromerzeugung aus der Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff) verwendet.

Entladene galvanische Zellen können prinzipiell durch Stromzufuhr von außen wieder aufgeladen werden. Dabei läuft die Reaktion, die den Strom geliefert hat, in umgekehrter Richtung ab. Dieses Prinzip wird bei Akkumulatoren technisch angewandt, von denen das bekannteste Beispiel der Bleiakkumulator im Auto ist (s. IV.3.3 Energiespeicher).

902 Mangold, Klaus-Michael; Janek, Jürgen: Angewandte Elektrochemie: Grundbegriffe der Elektrochemie unter: <http://archiv.aktuelle-wochenschau.de/2006/woche2b/woche2b.html> (2006). Online am 26.02.14.

## Elektrolysen

In der chemischen Industrie werden die Elektrolysen zur Herstellung von Produkten wie Chlor, Wasserstoff und Natronlauge eingesetzt. Dabei werden die erwünschten Reaktionsprodukte an den Elektroden (Anode und Kathode) bzw. im Anoden- und Kathodenraum abgeschieden (s. Produktionsverfahren unten). Die Reaktionen laufen an der Grenzfläche Elektrolyt/Elektrode durch Elektronenaustausch ab (Aufnahme bzw. Abgabe von Elektronen). Dadurch bilden sich aus neutralen Molekülen Radikale (Anionen oder Kationen). Ionen reagieren zu Radikalen ohne Ladung. Die gebildeten Radikale reagieren spontan weiter. Der Reaktionsweg ist dabei abhängig von der Stromdichte, die durch eine charakteristische Potenzialdifferenz für die Redoxreaktion eingestellt wird. Auch die Konzentration der Reaktanten und die Eigenschaften des Lösungsmittels beeinflussen die Reaktionen. Das Lösemittel muss inert sein, damit die gebildeten Radikale nicht mit dem Lösungsmittel reagieren. Da neutrale Moleküle nicht im elektrischen Feld wandern, muss die Strömung gewährleisten, dass die Reaktanten zu den Elektrodenoberflächen gelangen<sup>903</sup>.

Die anzuwendende Stromspannung, die zu einer Zersetzung bzw. zur Abgabe und Aufnahme von Elektronen notwendig ist, ist für jedes Element spezifisch und energieäquivalent zu der physikalischen Bindungsenergie dieser Elemente. Eine Auflistung der Elemente nach ihren spezifischen Spannungen ist die elektrochemische Spannungsreihe. Eine Zersetzung in der Elektrolysezelle findet erst statt, wenn die Stromspannung dafür ausreichend hoch ist. Liegen mehrere unterschiedliche Ionen in dem Elektrolyten vor, reagieren die Ionen spannungsspezifisch. Durch Variation der Stromspannung kann die chemische Reaktion so gesteuert werden, dass die gewünschten Produkte erhalten werden. Eine galvanische Zelle (Beispiel Trockenbatterie) liefert die spezifische Spannung, die der elektrochemischen Spannung der reagierenden Stoffe in der Zelle entspricht.

Weitere wichtige Prozessparameter sind die Stromstärke, die Stromdichte und die Abstände der Elektroden sowie deren Oberfläche und deren spezifische katalytische Wirkung. Der Stromfluss im Elektrolyten ist abhängig von der Entfernung der Elektroden voneinander und von deren Fläche. Je größer die Fläche und je geringer die Abstände sind, desto größer ist der Stromfluss. Diese Zusammenhänge werden im Detail bei den industriell angewandten Elektrolysen und den Elektrosynthesen beschrieben, soweit dies für das Verständnis der dort beschriebenen Vorgänge erforderlich ist.

Redoxreaktionen können auch nicht elektrochemisch ablaufen, z.B. die Zersetzung von Natrium in Wasser unter Bildung von Natronlauge und Wasserstoff. Hier wird Natrium oxidiert und Wasser zu Wasserstoff reduziert. Die Elektronen werden direkt (ohne Stromleitung) zwischen Wasser und Natrium ausgetauscht. Eine Vielzahl anderer chemischer Reaktionen, bei denen Stoffe umgewandelt werden, sind keine Redoxreaktionen und damit elektrochemisch nicht zugänglich. Beispiele sind Substitutionsreaktionen der organischen Chemie wie die Verseifung von Fetten, Veresterungs- und Umesterungsreaktionen.

## Produktionsverfahren

Die elektrochemischen Produktionsprozesse haben gegenüber den chemischen Verfahren folgende Vorteile:

1. Die Energieausbeuten sind bei den elektrochemischen Verfahren besser, da nur die Verluste durch die elektrischen Widerstände im Elektrolyten und Überspannung ausgeglichen werden müssen.
2. Die Selektivität ist sehr hoch: Das gewünschte Produkt fällt in hoher Reinheit an und braucht daher nicht oder mit weniger Aufwand nachbehandelt werden.

903 Holze, Rudolf: Technische Universität Chemnitz (Hg.): Elektrochemische Synthesen und Produktionsverfahren. (2010).

3. Die Steuerungsparameter – Stromstärke und Spannung – für die Reaktion sind leicht zu regeln. Es wird ein hoher Automatisierungsgrad erreicht. Mit Ausnahme der Schmelzelektrolysen laufen die elektrochemischen Prozesse überwiegend bei Normaldruck und -temperatur ab.
4. Da die Elektronen das Oxidations- und Reduktionsmittel sind, fallen keine abreagierten Reagenzien als Abfälle an.
5. Weil die Elektrolysezellen für die Herstellung der chemischen Produkte wegen der physikalisch begrenzten Baugrößen, insbesondere der Elektrodenflächen und –abstände, modular erweitert werden, ist die Skalierung der Prozesse einfacher. Bei Instandhaltungs- und Reparaturarbeiten können einzelne Zellen abgeschaltet werden, während die Produktion in den andern Zellen weiterläuft.

Nachteile elektrochemischer Produktionsprozesse sind:

1. Höhere Investitionskosten ergeben sich wegen der modularen Bauweise von Einzelzellen. Die benötigte Spannung in den Zellen beträgt je nach Reaktion 1–10 V, wirtschaftlich betriebene Gleichrichter liefern aber 100 V. Die höhere Spannung wird durch passende Reihenschaltung der Zellen auf die Betriebsspannung gesenkt. Die Mindestanzahl einer technischen Anlage beträgt aus diesem Grund 10–50 Einzelzellen. Ein weiterer Kostenfaktor bei den Investitionen ist die benötigte Infrastruktur der Stromversorgung mit Gleichstrom.
2. Die Raum-Zeit-Ausbeute ist durch die physikalisch vorgegebene Zellengeometrie ungünstiger als bei den chemischen Verfahren, bei denen die Reaktoren (als Rührkessel oder Rohrreaktor) einfach vergrößert werden. Hier sind jedoch Anpassungen bei der Wärmezufuhr oder der Kühlung und bei Mischeinrichtungen usw. erforderlich. Diese Aufwendungen sind aber weniger kostenintensiv als die Einrichtungen für Bereitstellung des passenden Gleichstroms.

Das entscheidende Kriterium für die Auswahl des Verfahrens – chemisch oder elektrochemisch – ist der Strompreis. Die Stromkosten sind heute höher als die für thermische Prozessenergie in Form von Wasserdampf (aus KWK), Erdgas oder Erdöl. Wenn der Strompreis in Deutschland im Vergleich zum internationalen Wettbewerb höher ist, können die vorne aufgelisteten Vorteile der elektrochemischen Verfahren diesen Nachteil nicht ausgleichen. Bei einer Chlor-Alkali-Elektrolyse in Nordrhein-Westfalen machen die Stromkosten (Stand 2014) 50% der Herstellungskosten der Chemikalien aus (s. Kapitel IV.2.1.1). Ein Vergleich der Stromkosten in wichtigen Industrieländern zeigt, dass die Stromkosten für Industriekunden (ohne Steuern) 2012 nur in Italien, Japan und Spanien noch höher waren als in Deutschland. Die aus der Statistik der Regierung des Vereinigten Königreichs entnommenen Daten (Abbildung 72) zeigen die über verschiedene Industrien gemittelten Strompreise ohne Steuern in ausgewählten Industrieländern mit einer bedeutenden chemischen Produktion weltweit im Juni 2012 in Eurocent pro Kilowattstunde. In den USA gibt es jedoch Standorte, an denen Strom für 1,2 Eurocent verfügbar ist<sup>904</sup>. Prof. Stolten schätzte die Stromkosten in der Anhörung „Elektrochemische Verfahren“ für die Großindustrie auf 6 Eurocent pro Kilowattstunde und berichtet von einem Einzelfall, bei dem die Kosten mit 2 Eurocent pro Kilowattstunde abgerechnet werden<sup>905</sup>.

904 Prof. Dr. Siegfried Waldvogel (Universität Mainz): Landtag NRW (Hg.): Enquetekommission II Protokoll 14. Sitzung (nichtöffentlich) Anhörung „Elektrochemische Verfahren“. (2014), S. 12.

905 Prof. Dr. Detlef Stolten (Forschungszentrum Jülich): ebd., S. 15.

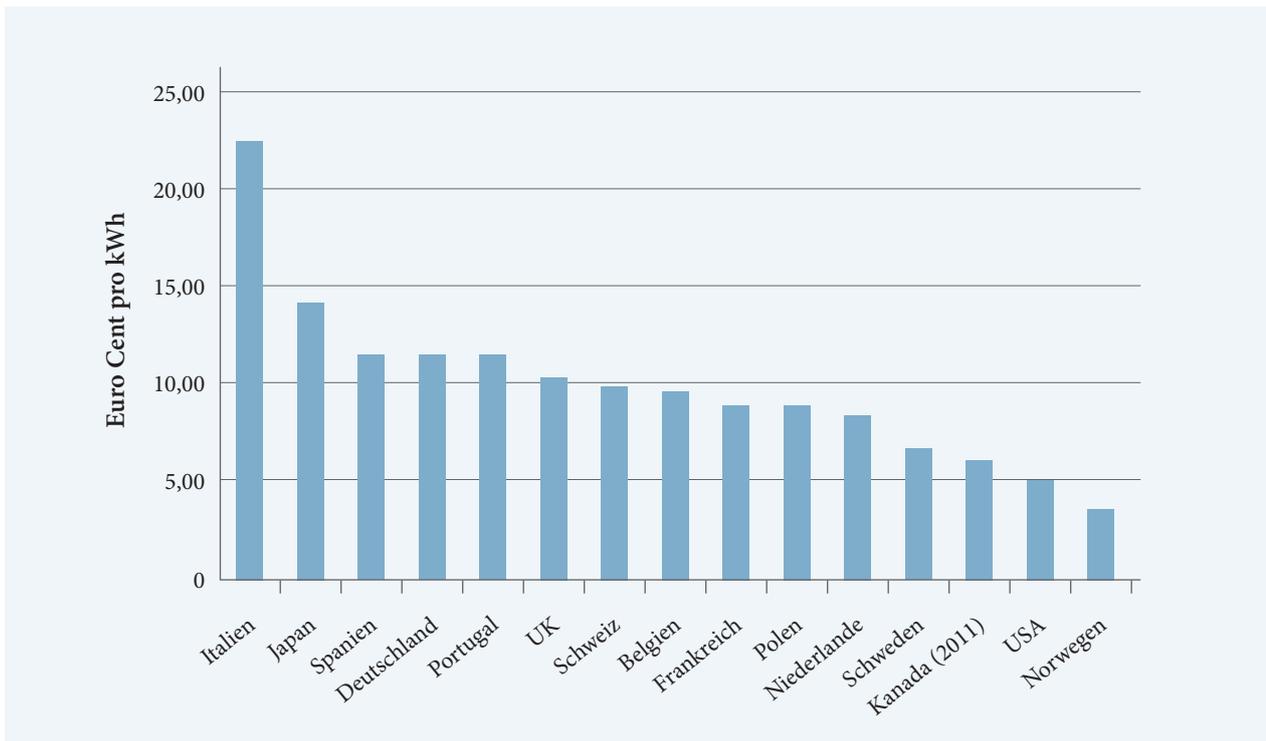


Abbildung 72: Vergleich der über verschiedene Industrien gemittelten Stromkosten ohne Steuern in wichtigen Industrieländern 2012, Basis IEA<sup>906</sup>

Produkte, die nicht transportiert werden können oder deren Transporte aufwändige Risikominde-  
rungsmaßnahmen erfordern, wie z.B. Chlor müssen trotz der ungünstigen Wettbewerbssituation an  
deren Einsatzort hergestellt werden. Hier wirkt sich der Wettbewerbsnachteil evtl. auf die Folgepro-  
dukte aus.

## IV.2.2 Elektrochemische Verfahren für anorganische Produkte (Elektrolysen)

### IV.2.2.1 Chlor-Alkali-Elektrolyse

Chlor gehört ebenso wie Natronlauge, Schwefelsäure, Natriumcarbonat, Ammoniak und Salpeter-  
säure zu den wichtigsten anorganischen Grundchemikalien<sup>907</sup>. Chlor zählt zu den Halogenen und  
ist eines der verbreitetsten Elemente in der Natur. Da Chlor eine hohe Reaktivität besitzt, kommt es  
jedoch in der Natur nicht in elementarer Form vor, sondern ist in seinen Salzen gebunden.

Chlor ist aus der heutigen Chemie nicht wegzudenken. Bis zu 65% aller Produkte sind nach Aus-  
sagen großer Chemieunternehmen direkt oder indirekt vom Chlor abhängig<sup>908</sup>. Chlor wird als en-  
ergiereiches Reaktionsmittel für die Produktion, zum Beispiel in der Polyurethanherstellung, zur  
Desinfektion von Trinkwasser oder als Grundstoff für die PVC (Polyvinylchlorid) Herstellung ein-  
gesetzt.

906 Department of Energy & Climate Change (Hg.): International industrial energy prices. (2013)

907 Schmidt, Volkmar M.: Elektrochemische Verfahrenstechnik: Grundlagen, Reaktionstechnik, Prozessoptimierung. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2003). ISBN 978-3-527299-58-4, S.431.

908 Müller-Eisen, U.: Chlor-Alkali-Elektrolyse, persönliche Mitteilung (2003); Schmidt, Volkmar M.: Elektrochemische Verfahrenstechnik: Grundlagen, Reaktionstechnik, Prozessoptimierung. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2003). ISBN 978-3-527299-58-4, S. 431.

Die europäische Jahresproduktion liegt bei 9,45 Mio. t, wobei etwa 4,3 Mio. t, also rund 43% auf die deutsche Produktion entfallen. Deutschland ist damit der größte Chlorhersteller Europas.<sup>909</sup>

Bereits zum Ende des 19. Jahrhunderts wurden in Deutschland Alkali und Chlor im industriellen Maßstab mithilfe der Chlor-Alkali-Elektrolyse hergestellt. Durch den hohen Aufwand in Bezug zum Transport von flüssigem Chlor und den als Gefahrgut verbundenen Auflagen wird Chlor stets nahe am Verbraucher produziert.

Zu den etablierten Verfahren gehören:

- Diaphragmaverfahren,
- Amalgamverfahren,
- Membranverfahren.

Das Grundprinzip aller Verfahren ist ähnlich und entspricht dem bereits bekannten Aufbau der Elektrolyse. Als Elektrolyt liegt in diesen Verfahren Reinsole, also in Wasser (H<sub>2</sub>O) gelöstes und mehrfach filtriertes Natriumchlorid in höchster Reinheit vor.



Das bei der Elektrolyse entstehende Chlorgas und Wasserstoff bilden in Kombination das hoch-explosive Chlorknallgas (Cl<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>) und müssen somit unbedingt getrennt werden. Ebenso ist eine Abtrennung der Natronlauge (NaOH) wichtig. Diese würde sonst mit Chlor zu Hypochlorit (OCl<sup>-</sup>) und Chlorid (Cl<sup>-</sup>) reagieren.



Diese notwendige Trennung kann auf unterschiedlichen Wegen erreicht werden. Details zu Unterschieden sowie den wirtschaftlichen, technischen und ökologischen Aspekten der drei Verfahren werden im Folgenden näher betrachtet.

Diaphragmaverfahren

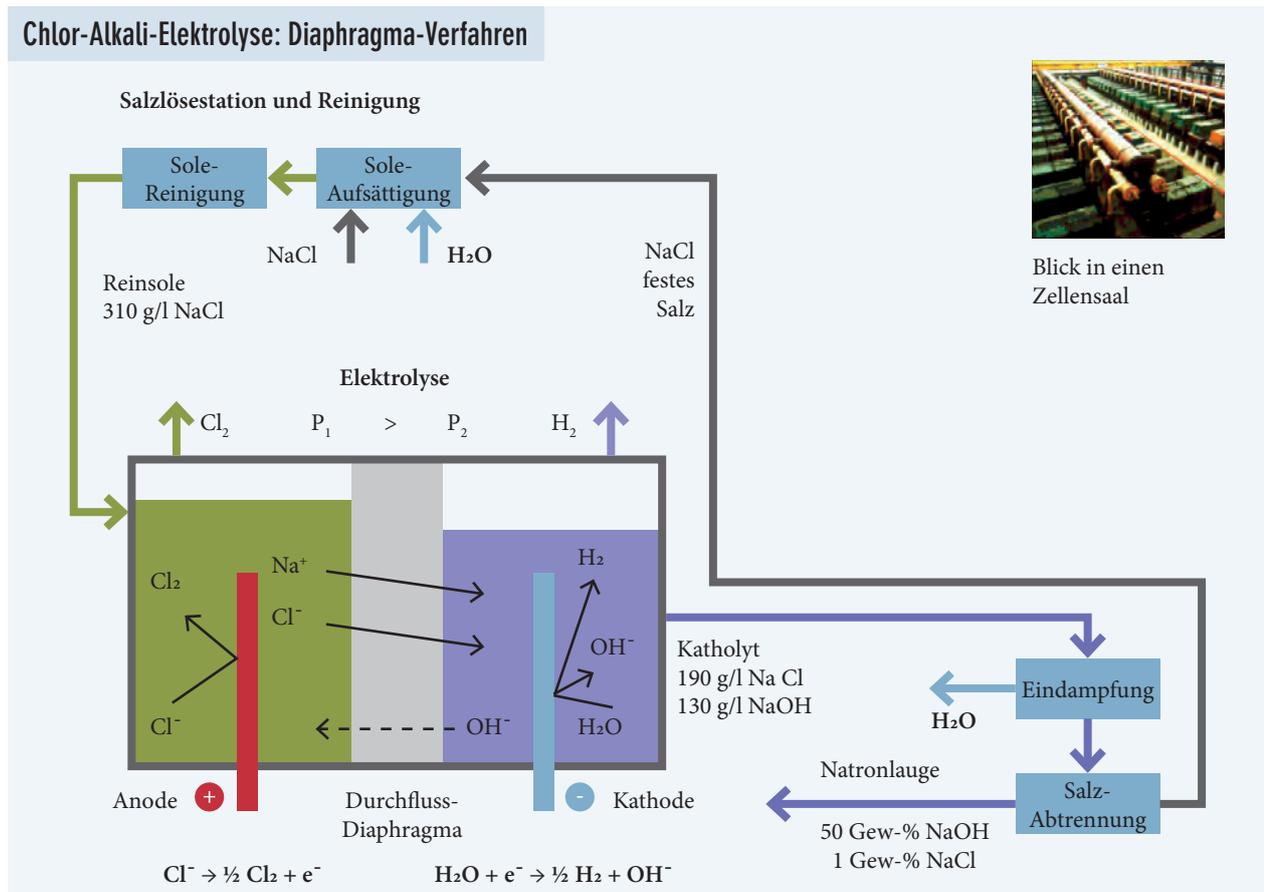


Abbildung 73: Elektrolyseprinzip Diaphragma-Verfahren<sup>910</sup>

Das Diaphragmaverfahren ist das älteste Verfahren der Chlor-Alkali-Elektrolyse. Die erste industriell produzierende Anlage wurde um 1880 in Griesheim bei Frankfurt am Main errichtet. Das namensgebende Diaphragma, welches die entstehenden reaktiven Gase Chlor und Wasserstoff trennt, bestand zu den Pionierzeiten aus Zement. Später wurde dieses durch ein metallisches Lochblech, welches mit Asbestfasern und Teflon überzogen ist, ersetzt und besteht in modernen Anlagen aus Kunststoff. Dieses Diaphragma ist durchlässig für die eingeleitete Reinsole, nicht jedoch für die entstehenden Gase.

Aus der in Deutschland durch Chlor-Alkali-Elektrolyse hergestellten Chlormenge entfallen derzeit 23,6% auf das Diaphragmaverfahren<sup>911</sup>. Asbesthaltige Anlagen sind in Deutschland nahezu nicht mehr vorhanden. Lediglich eine, im geschlossenen System arbeitende Anlage ist derzeit noch in Betrieb. Energetisch betrachtet unterliegen jedoch selbst moderne Diaphragmaverfahren den später in der Betrachtung folgenden Membranverfahren.

Amalgamverfahren

Das Amalgamverfahren ist ebenfalls lange bekannt und eingesetzt. Im Gegensatz zum gerade betrachteten Diaphragmaverfahren wird hierbei die Trennung von Chlor und Wasserstoff bzw. Natronlauge nicht durch einen eingebrachten Separator erreicht. Durch den Einsatz von flüssigem

910 Entnommen aus Jörisen, Jakob: Chlor, Natronlauge und anderes aus Elektrolyseverfahren unter: <http://archiv.aktuelle-wochenschau.de/2006/woche7b/woche7b.html> (2006).

911 Umweltbundesamt (UBA): Chlor-Alkali-Anlagen unter: <http://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industriestruktur/chemische-erzeugnisse-raffinerien/chlor-alkali-anlagen>. Online am 26.02.2015.

Quecksilber (Hg) als Kathode, wird bei diesem Verfahren die Bildung des Wasserstoffs ( $H_2$ ) und der  $OH^-$  Ionen unterbunden.

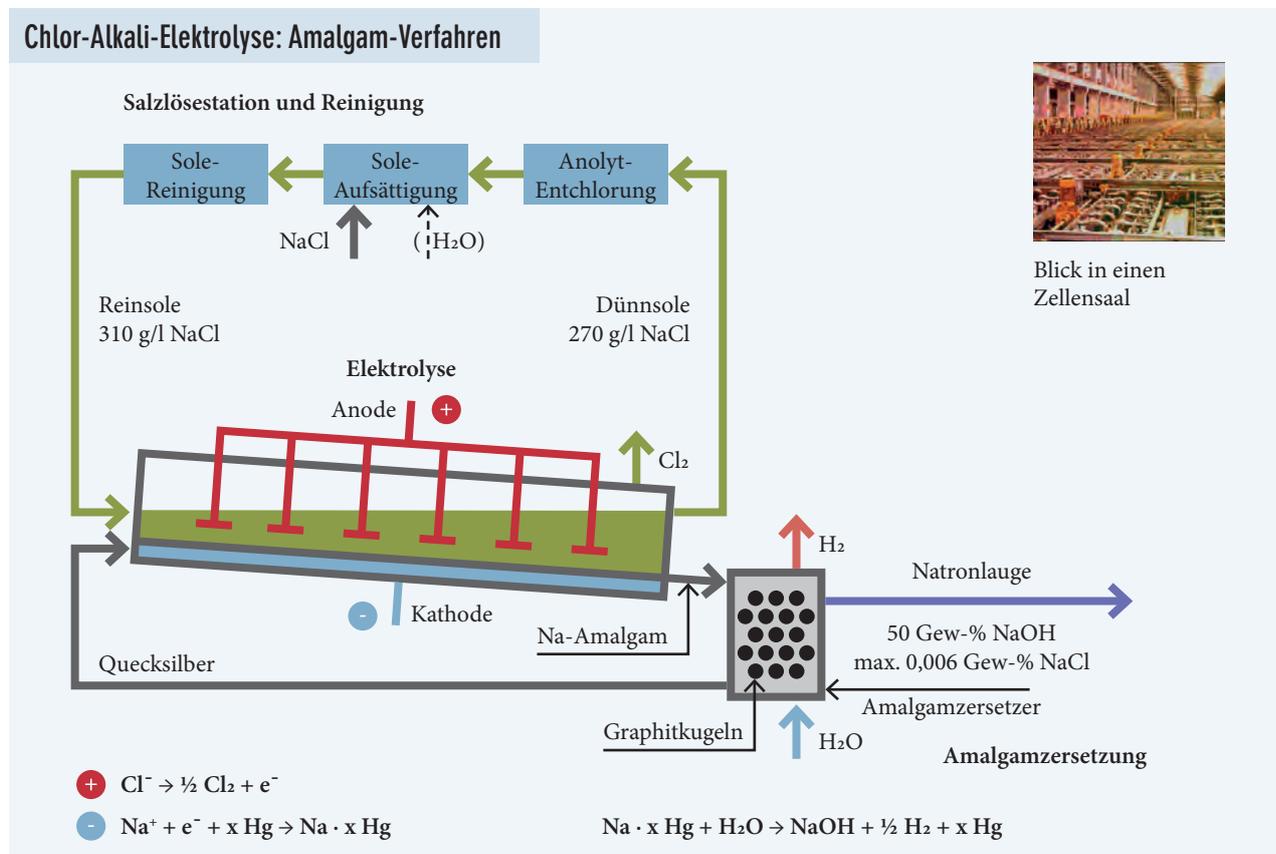


Abbildung 74: Elektrolyseprinzip Amalgam-Verfahren<sup>912</sup>

Quecksilber hat zum einen die Eigenschaft, dass es leitend ist und somit nach Anlegung einer Spannung als Kathode fungieren kann, zum anderen bildet es mit einer Vielzahl von Metallen Legierungen aus, die als Amalgame bezeichnet werden. Beide Eigenschaften macht man sich beim Amalgamverfahren zunutze.

Beim notwendigen Zersetzungsschritt kann Wasser auch durch Alkohole wie Ethanol oder Methanol ersetzt und auf diesem Wege so Alkoholate erzeugt werden. Alternativ zur Zersetzung bietet es sich zudem an, das Amalgam zu destillieren. Auf diesem Weg lassen sich Alkalimetalle für unterschiedlichste Anwendungen herstellen.

Die Herausforderung bei der Verwendung von Quecksilber besteht darin, bedingt durch dessen Giftigkeit, die Emissionen so gering wie möglich zu halten und deshalb in einem geschlossenen Kreislauf zu arbeiten. Dennoch kommen das Chlor und das Washwasser im Amalgamzersetzter u.a. mit giftigem Quecksilber in Kontakt. Eine geringe Kontamination lässt sich somit nicht vermeiden und wird nach Branchenaussage mit  $0,001\text{--}0,01\text{ mg kg}^{-1}$  für das gereinigte Chlor angegeben<sup>913</sup>. Obwohl die Kontamination durch neue Trennverfahren und modernere Zellen in der Vergangenheit stetig nachgelassen hat, ist die Blütezeit der Amalgamanlagen (Mitte der 1980er) vorbei. Betrug damals der auf diese Weise produzierte Anteil am weltweit produzierten Chlor etwa 45%, lag deren Anteil

912 Entnommen aus Jörissen, Jakob: Chlor, Natronlauge und anderes aus Elektrolyseverfahren unter: <http://archiv.aktuelle-wochenschau.de/2006/woche7b/woche7b.html> (2006).

913 Schmidt, Volkmar M.: Elektrochemische Verfahrenstechnik: Grundlagen, Reaktionstechnik, Prozessoptimierung. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2003). ISBN 978-3-527299-58-4, S. 440.

im Jahre 2011 in Deutschland bei gerade 18,2%.<sup>914</sup> Die letzte Anlage in Deutschland wurde 1986 in Betrieb genommen, bestehende Anlagen werden sukzessive gegen das moderne Membranverfahren ausgetauscht, welches im Folgenden näher betrachtet wird. Eine weitgehende Abschaltung des Amalgamverfahrens und Ersatz von Altanlagen durch moderne Membranverfahren ist durch internationale Abkommen beschlossen. Neuanlagen werden in Deutschland nicht mehr gebaut.<sup>915</sup>

**Membranverfahren**

Beim Membranverfahren handelt es sich um das jüngste der drei hier vorgestellten Verfahren zur Chlor-Alkali-Elektrolyse. Hier werden das Zusammentreffen von Chlor und Wasserstoff und die damit verbundene Gefahr der Knallgasreaktion, ähnlich dem Diaphragmaverfahren, mittels eines Separators vermieden.

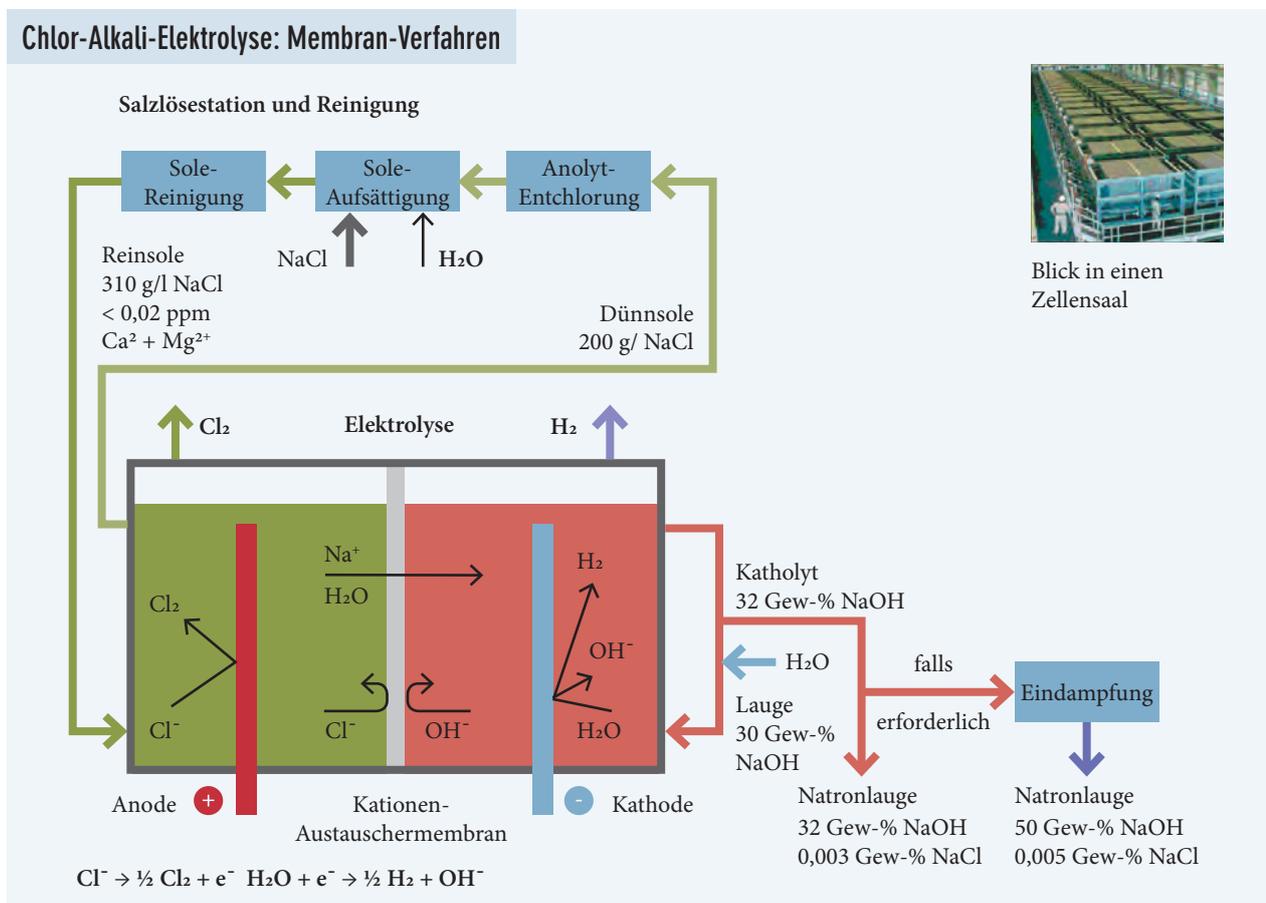


Abbildung 75: Elektrolyseprinzip Membran-Verfahren<sup>916</sup>

Die Zelle selber besteht aus zwei Kammern, die über eine Membran aus Kunststoff voneinander getrennt sind. In den Kammern taucht, wieder wie bereits aus den anderen Verfahren bekannt, ent-

914 ebd., S. 441; Umweltbundesamt (UBA): Chlor-Alkali-Anlagen unter: <http://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaftskonsum/industrieverfahren/chemische-erzeugnisse-raffinerien/chlor-alkali-anlagen>. Online am 26.02.2015.

915 Ahrens, Ralph: Chlorherstellung mit Quecksilber vor dem Aus unter: <http://www.ingenieur.de/Themen/Klima-Umwelt/Chlorherstellung-Quecksilber-Aus> (2011). Online am 17.02.2015; Neubauer, Uta: Abschied vom Quecksilber unter: <http://www.nzz.ch/aktuell/startseite/abschied-vom-quecksilber-1.9909808> (2011). Online am 17.02.2015; Euro Chlor (Hg.): Chlorine Industry Review 2013-2014; Hüthig GmbH; chemietechnik online: EU-Verbot für Amalgam-basierte Chloralkali-Elektrolysen für zu Marktconsolidierungen unter: <http://www.chemietechnik.de/texte/anzeigen/121721/EU-Verbot-fuer-Amalgam-basierte-Chloralkali-Elektrolyse-fuehrt-zu-Marktconsolidierungen/IHS-Amalgam-Verfahren-Chloralkali-Elektrolyse-Quecksilber-EU> (2014). Online am 17.02.2015.

916 Entnommen aus Jörissen, Jakob: Chlor, Natronlauge und anderes aus Elektrolyseverfahren unter: <http://archiv.aktuelle-wochenschau.de/2006/woche7b/woche7b.html> (2006).

weder eine Kathode oder eine Anode in den Elektrolyt ein. Da sich beide Seiten nicht vermischen können, wird dieser auch als Anolyt und Katholyt bezeichnet. Der Katholyt besteht aus 31% Natronlauge (NaOH) und durchströmt die Kammer mit der darin enthaltene Kathode (-), der Anolyt ist die bereits bekannte Reinsole (NaCl) der anderen Verfahren.

### Einsatz von Sauerstoffverzehrkatoden im Membranverfahren

Eine Weiterentwicklung innerhalb der Membranverfahren sind die sogenannten Sauerstoffverzehrkatoden (kurz SVK). Der Nutzen bei der SVK ist die abgesenkte Zellspannung auf  $\sim 2V$  und somit eine Reduzierung der eingesetzten Energie um ein Drittel. Dieses Verfahren ist dann günstig, wenn am Standort kein Wasserstoff gebraucht wird und die Stromkosten hoch sind.<sup>917</sup>

Der Aufbau unter Verwendung der SVK ähnelt dem konventionellen Membranverfahren. Abweichend hierzu wird die spezielle Kathode nun nicht mehr in den Elektrolyt eingetaucht, sondern durch eine Gasdiffusionselektrode ersetzt. An dieser wird dann der Sauerstoff reduziert und die Bildung von Wasserstoff unterbunden. Die folgende Abbildung zeigt anschaulich die Unterschiede.

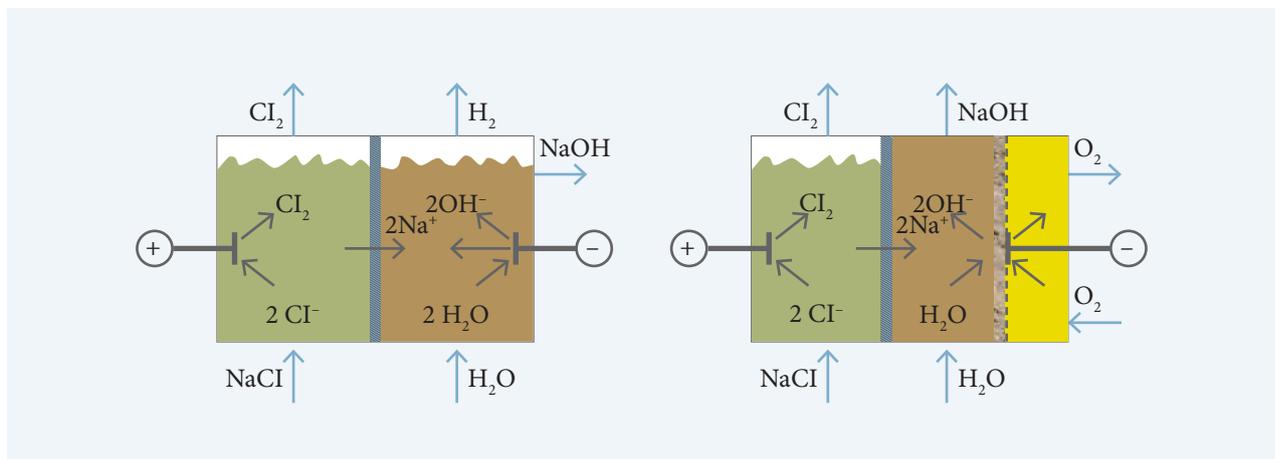


Abbildung 76: Elektrolyseprinzip Membranverfahren (links) versus Verfahren mit SVK (rechts)<sup>918</sup>

Die Entwicklung des Verfahrens der Luftverzehr- bzw. Sauerstoffverzehrkatode wurde bereits in den 1960er Jahre gestartet. Aufgrund ungelöster technischer Probleme, insbesondere nicht ausreichender Standzeiten von Zellenkomponenten, konnte das Verfahren damals nicht in den technischen Maßstab überführt werden. Inzwischen wurden diese Probleme von einem Forschungskonsortium unter Leitung von ThyssenKrupp und Bayer gelöst. Seit 2011 wird das neue energiesparende Verfahren bei Bayer am Standort Krefeld-Uerdingen im technischen Maßstab betrieben.<sup>919</sup>

### Vergleich der Verfahren zur Chlor-Alkali-Elektrolyse

Stellt man die in diesem Kapitel beschriebenen Verfahren zur Chlor-Alkali-Elektrolyse gegenüber, so zeigen sich bedingt durch die spezifischen Unterschiede an der einen oder anderen Stelle Vor- bzw. Nachteile.

917 Bulan, Andreas; Jörissen, Jakob; Jung, Johannes; Kiefer, Randolph; Lochhaas, Helmut; Röttger-Heinz, Jutta; Turek, Thomas; Wagner, Norbert: (Hg.):  $CO_2$ -Reduktion bei der Herstellung chemischer Grundstoffe – Einsatz von Sauerstoffverzehrkatoden bei der Chlorherstellung. (2009).

918 Entnommen aus Bärthel, Timo; Wendenburg, Sonja: Mit Rekordgeschwindigkeit zum menschlichen Genom unter: <http://archiv.aktuelle-wochenschau.de/2013/w31/woche31.html> (2013).

919 CHEMIE.DE Information Service GmbH: Bayer modernisiert Chlor-Produktion in Krefeld-Uerdingen unter: <http://www.chemie.de/news/138193/bayer-modernisiert-chlor-produktion-in-krefeld-uerdingen.html> (2012).

Im Diaphragmaverfahren benötigt man zur Aufkonzentrierung der Natronlauge zusätzliche Energie in Form von Prozessdampf und Wärme, was zu einer eher nachteiligen Situation auf den Gesamtenergieeinsatz führt. Durch die Notwendigkeit der physikalischen Durchströmung der Zelle und des Diaphragmas reagiert der gesamte Prozess recht empfindlich auf mögliche Druckschwankungen und benötigt zum effektiven Betrieb eine relativ lange Anfahrzeit. Letzteres ist, insbesondere im Hinblick der im nächsten Kapitel betrachteten Eignung zum Demand Side Management hinderlich. Vorteilhaft sind bei diesem Verfahren die recht niedrigen Anforderungen an die Solequalität und der zum heutigen Zeitpunkt gültige Verzicht auf schädliche Separatormaterialien.

Mit Blick auf die Verwendung findende Quecksilber kann das Amalgamverfahren hier nicht punkten. Auch wenn moderne Zellenarchitektur und geschlossene Kreisläufe eine Kontamination verringern, bleibt das Problem der Entsorgung und die hohen Aufwendungen zum Umweltschutz. Ebenfalls nachteilig für dieses Verfahren sind die auch hier zum Schutz vor ungewünschten Nebenreaktionen hohen Anforderungen an die Solequalität. Vorteile bieten sich jedoch in der hohen und somit gebrauchsfertigen 50%-Konzentration der Natronlauge, die direkt im Prozess anfällt (hierdurch wird der Energiebedarf deutlich gesenkt), ebenso wie in der Bandbreite der herzustellenden Produkte. Ebenfalls in hoher Reinheit vorliegender Wasserstoff und Chlor, gepaart mit einer gewissen Toleranz an schwankende Prozessauslastung, machen das Verfahren auch zur möglichen Energiespeicherung mittels Power to Gas/Chemicals (vgl. Kapitel IV.3.5) interessant.

Die Membranelektrolyse kann ebenfalls mit einer hohen Qualität an Natronlauge auftrumpfen. Zudem hat sie den geringsten spezifischen Energieverbrauch, welcher durch den Einsatz der SVK noch weiter gesenkt werden kann. Nachteilig wirken sich auch hier die hohen Anforderungen an Reinheit und Qualität der Reinsole aus. Zudem kommen, besonders im Bereich der SVK, noch hohe Kosten der Membranmaterialien, gepaart mit geringeren Laufzeiten (im Vergleich zu den anderen Verfahren), hinzu. Hier ist jedoch noch Forschungs- und Innovationspotenzial vorhanden. Gerade, weil dieses Verfahren durch seine hohe Toleranz gegenüber Lastschwankungen und geringen Anfahrzeiten sowie modularer Zu- und Abschaltbarkeit viele Möglichkeiten im Bereich der Energiespeicherung (vgl. Kapitel IV.3.5) bietet, wird es gerade für die Zukunft mit sich ändernden Rahmenbedingungen interessant werden.

Abbildung 77 zeigt einen Vergleich der Investitions- und Betriebskosten der unterschiedlichen Verfahren in Bezug zum Amalgamverfahren. Das Membranverfahren lässt sich durch den oben gezeigten Einsatz der SVK im Energieverbrauch weiter optimieren. Während sich mit 1 TWh im Membranverfahren 400.000 t Chlor produzieren lassen, reicht die gleiche Menge Strom unter Einsatz der SVK für die Herstellung von 570.000 t Chlor.<sup>920</sup>

---

920 Mündliche Mitteilung Bayer AG, Besuch der EK II in Dormagen 30.04.2014

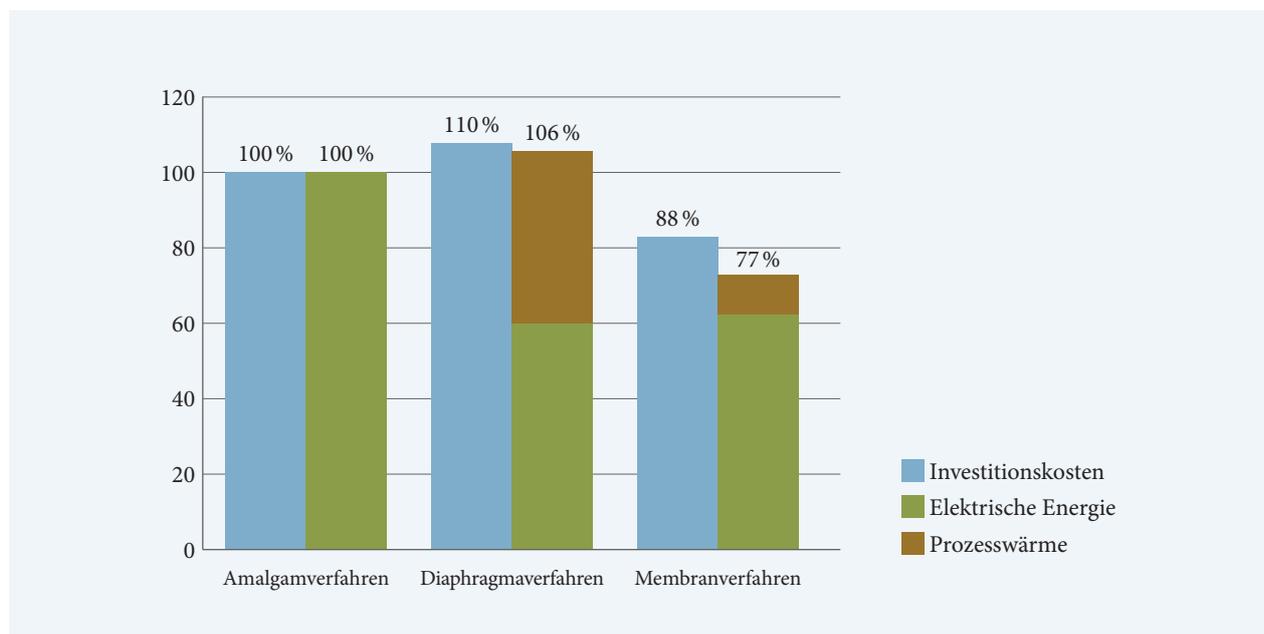
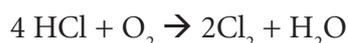


Abbildung 77: Vergleich der verschiedenen Chlor-Alkali-Elektrolyse-Verfahren<sup>921</sup>

#### IV.2.2.2 Salzsäure-Elektrolyse

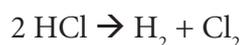
Neben den Verfahren der Chloralkalielektrolyse ist noch das Verfahren der Salzsäure-Elektrolyse zur Chlorgewinnung etabliert. Entstanden ist dieses Verfahren aus der Notwendigkeit, die in der Produktion (z.B. von PVC) als Abfallprodukt anfallende Salzsäure (HCl) zu entsorgen bzw. sinnvoll zu verwerten.

Das mögliche chemische Verfahren wird als Deacon-Verfahren bezeichnet. Hierbei wird die Salzsäure (HCl) mit Hilfe von Sauerstoff (O<sub>2</sub>) an Kupferkatalysatoren zu Chlor und Wasser umgesetzt.



Nachteilig bei diesem Prozess sind das anfallende Wasser und die aufgrund der geringen Kinetik für den Prozess benötigten Temperaturen um 450°C.

Der elektrochemische Weg, also die Elektrolyse der Salzsäure benötigt, bedingt durch die eingesetzte Spannung, lediglich Temperaturen um 90°C. Zudem wird bei ihr kein Wasser als wertloser Reststoff gebildet, sondern es entsteht neben Chlor auch Wasserstoff.



Die Bildung des verwertbaren Wasserstoffs macht die Salzsäure-Elektrolyse auch für die Einbindung in weitreichendere Wertschöpfungsketten interessant. Die durch Salzsäure-Elektrolyse gewonnenen Chlormengen liegen weit unter denen, die mittels Chlor-Alkali-Elektrolyse hergestellt werden.

In Deutschland wird derzeit eine Anlage in Dormagen mit einer Kapazität von 80.000 t/a betrieben. Die dabei eingesetzte Strommenge liegt zwischen 1.400 und 1.500 kWh pro t Chlor. Salzsäure-Elektrolysen mit Gasdiffusionselektroden haben nur noch einen Stromverbrauch von etwa 1.000 kWh je t Chlor. Dieses neue energiesparende Verfahren wurde von den Firmen DeNora und Bayer ent-

921 frei nach: Hamann, Carl H.; Vielstich, Wolf (Hg.): Elektrochemie. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2005). ISBN 978-3-527-31068-5, S. 443.

wickelt. Seit 2003 wird das Verfahren im technischen Maßstab bei Bayer am Standort Brunsbüttel betrieben. Inzwischen wurden weitere Anlagen bei Bayer und bei anderen Firmen errichtet.<sup>922</sup>

#### IV.2.2.3 Wasserelektrolyse

Bei der Wasserelektrolyse, also der elektrolytischen Spaltung von Wasser zu Wasserstoff und Sauerstoff, handelt es sich um eines der ältesten bekannten Verfahren der Elektrolyse. Wasserstoff ist ein wesentlicher Teil der chemischen Wertschöpfungskette (z.B. Ammoniaksynthese). Trotz des hohen Alters des Verfahrens liegt der Anteil des durch Wasserelektrolyse weltweit hergestellten Wasserstoffes heute bei lediglich ca. 2,5 Mio. t pro Jahr. Die durch Erdgasreformierung (Oxidation von Erdöl oder Kohlevergasung) gewonnene Wasserstoffmenge liegt hingegen bei ca. 47,5 Mio. t pro Jahr.<sup>923</sup>

Der Betrieb einer Wasserelektrolyse ist durch den Einsatz von großen Strommengen stark abhängig von den Stromkosten.

Das Grundprinzip der Wasserelektrolyse entspricht dem, der bereits im Verlauf betrachteten Elektrolyseverfahren. Eine vereinfachte Darstellung soll verdeutlichen, welche Prozesse ablaufen, bevor im weiteren die drei wichtigsten Verfahren mit ihren spezifischen Unterschieden in Bezug auf Aufbau, Wirkungsgrad, Standzeit etc. betrachtet werden.

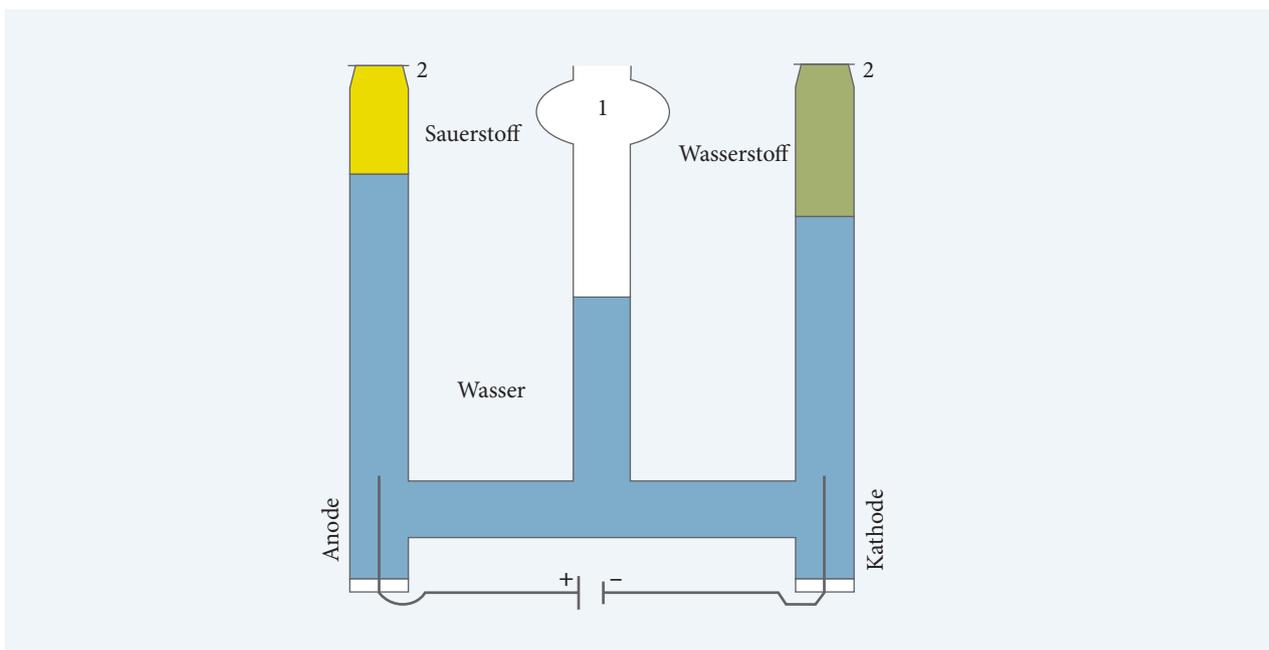


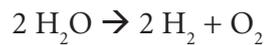
Abbildung 78: Schema der Wasserelektrolyse<sup>924</sup>

In Abbildung 78 ist ein sogenannter Hoffmannscher Apparat zu sehen. Dieser besteht aus einem U-förmig gebogenen Glaskörper, der an den beiden oberen Enden mit einem Ventil verschlossen ist. In den aufsteigenden Ästen des Glaskörpers ist jeweils eine Titanelektrode (Anode/Kathode) eingebracht. Beide Elektroden werden vom Elektrolyt, in diesem Fall Wasser, umspült. Das Elektrolytniveau wird stetig durch einen Vorratsbehälter aufrechterhalten. Nach Anlegen der Spannung an den Elektroden kommt es zur elektrolytischen Spaltung von Wasser.

922 Mündliche Mitteilung Bayer AG, Besuch der EK II in Dormagen 30.04.2014.

923 vgl. Sattler, Christian; Pütter, Hermann: Noch viele offene Fragen. In: Von Brennstoffzellen bis Leuchtdioden (2008), S. 73 ff.

924 Entnommen aus: Thoma, Martin: Zersetzung von Wasser – Elektrolyse: Hoffmannscher Zersetzungsapparat unter: [http://www.martin-thoma.de/chemie/bilder/hoffmannscher\\_zersetzungsapparat.jpg](http://www.martin-thoma.de/chemie/bilder/hoffmannscher_zersetzungsapparat.jpg) (2014).



Die positiven  $\text{H}^+$ -Ionen wandern dabei zur Kathode (-), nehmen dort ein Elektron auf und verbinden sich mit einem weiteren  $\text{H}^+$ -Ion zu Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ), der gasförmig aufsteigt und sich im oberen Bereich des verschlossenen Glaskörpers ansammelt. Die negativ geladenen Hydroxidionen ( $\text{OH}^-$ ) wandern hingegen zur Anode (+) und geben dort Elektronen ab. Die dabei frei werdenden Sauerstoffatome verbinden sich zu Sauerstoffmolekülen und steigen ebenfalls auf. Die frei werdenden Wasserstoffionen reagieren dabei mit weiteren Hydroxidionen und bilden Wassermoleküle.

Diese Darstellung der Wasserelektrolyse ist sehr vereinfacht. Der Wirkungsgrad (ungefähr 65%)<sup>925</sup> aufgrund des Verhältnisses von Elektrodenoberfläche zu Elektrolyt sowie die unzureichende Abtrennung der zwei entstehenden Gase (in Kombination bilden sie das hoch reaktive und gefährliche Knallgas) machen eine Reihe von Anpassungen für die industrielle Anwendung nötig. Hierfür kommen prinzipiell die alkalische Elektrolyse, die Hochtemperaturelektrolyse und die PEM-Elektrolyse in Frage, die im Folgenden detaillierter beschrieben werden.

### Alkalische Elektrolyse

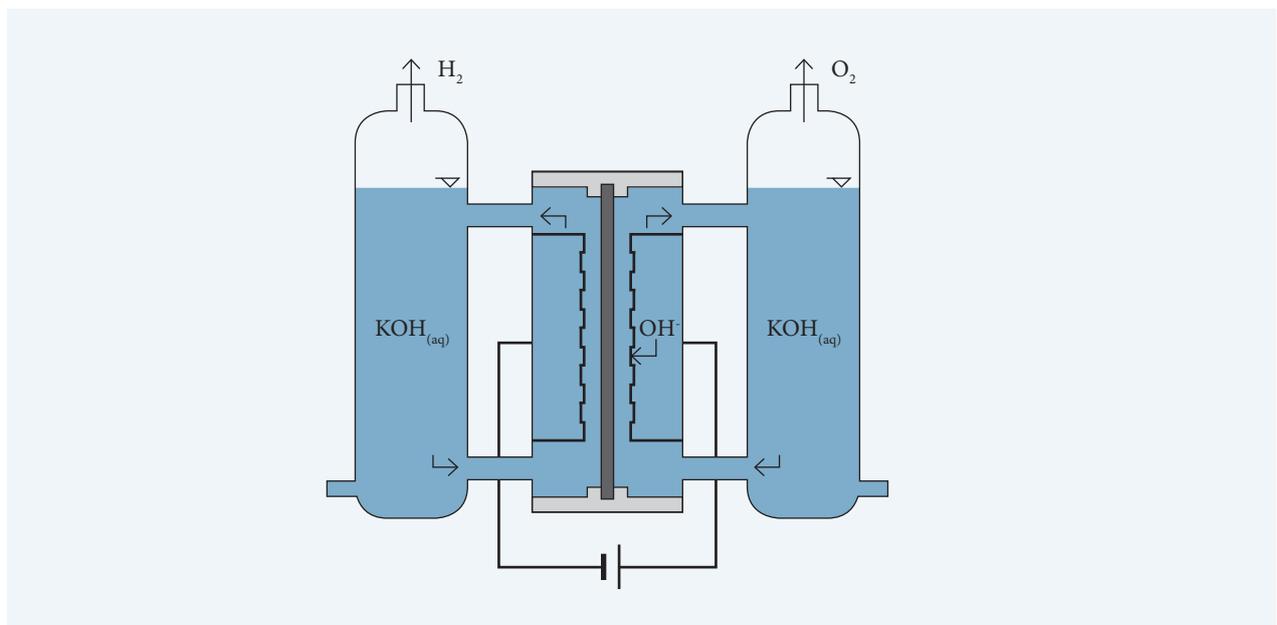


Abbildung 79: Prinzipieller Aufbau einer alkalischen Elektrolysezelle<sup>926</sup>

Bei der alkalischen Elektrolyse ist der Aufbau ähnlich dem soeben beschriebenen Grundprinzips. Zusätzlich erfolgt eine Trennung der beiden Elektrodenbereiche durch ein Diaphragma. Dieses ist semipermeabel und nur durchlässig für Hydroxidionen ( $\text{OH}^-$ ). Die Elektroden selber bestehen aus porösen Blechen um die Oberfläche maximal zu vergrößern und sind sehr nahe am Separator platziert. Als Elektrolyt wird in diesem Verfahren eine Kaliumhydroxidlösung (20-40%) verwendet, die stetig aus angeschlossenen Tanks/Leitungen nachgeliefert wird und so die Elektroden umströmt. Die anfallenden und durch den Separator sicher getrennten Gase Wasserstoff und Sauerstoff werden

925 PROCESSNET (Hg.): Herstellung von Wasserstoff – Elektrolyse. (2013), S. 2.

926 Entnommen aus: Smolinka, Tom; Günther, Martin; Garcke, Jürgen; Fraunhofer ISE; FCBAT (Hg.): NOW Studie „Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien“ Kurzfassung des Abschlussberichts. (2011), S. 10.

aus der Zelle abgesaugt und gesammelt. Die normale Prozesstemperatur dieser Zellen liegt bei 50°C – 80°C bei einer Stromdichte von 200-400 mA pro Quadratzentimeter.<sup>927</sup>

Die Leistung der Elektrolyseure nach dem Wirkprinzip der alkalischen Wasserelektrolyse liegt in Bereichen zwischen 5 kW bis hin zu 3,4 MW pro Modul. Diese Leistung entspricht einer Herstellung von bis zu 760 Nm<sup>3</sup>/h Wasserstoff. Der Wirkungsgrad ist dabei von der zur Herstellung eines Normkubikmeters Wasserstoff benötigten Strommenge abhängig. Diese liegt je nach Ausrichtung der Module bei bis zu 4,5 kWh/Nm<sup>3</sup> (entspricht 50 MWh/t H<sub>2</sub>). Unter zusätzlicher Betrachtung der Verbräuche der angeschlossenen Peripherie, erlangt eine alkalische Wasserelektrolyse einen Wirkungsgrad von 78%.<sup>928</sup>

Ebenfalls von der Zellgeometrie und den verwendeten Materialien abhängig ist die spezifische Lebensdauer der Module, bis diese einer Überholung bzw. eines Austausches bedürfen. Bei relativ niedrigen Systemtemperaturen von rund 80°C wird eine Lebenserwartung von rund 50.000 Betriebsstunden angegeben. Höhere Temperaturen, die bisher unter Laborbedingungen getestet wurden, erhöhen zwar den Wirkungsgrad, verkürzen jedoch gleichzeitig die Betriebsdauer. Hier kann ggf. durch den Einsatz anderer Materialien zur längeren Standzeit verholfen werden.

### Hochtemperaturelektrolyse (HTEL)

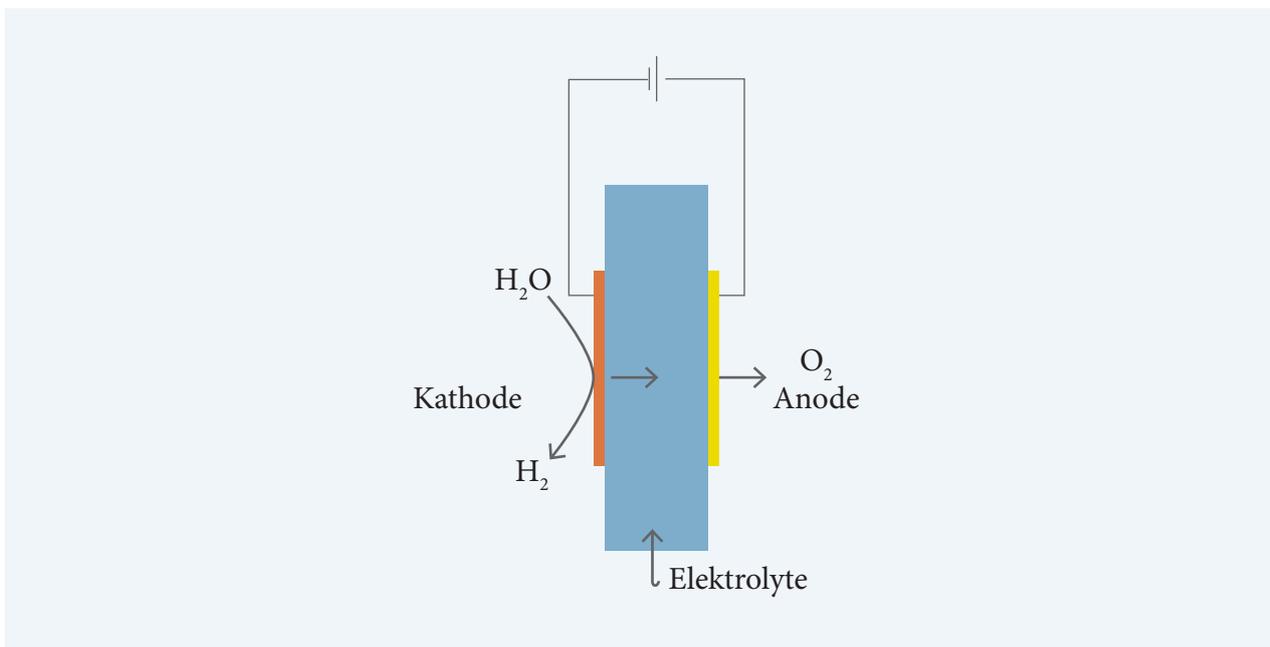


Abbildung 80: Prinzipieller Aufbau einer HTEL-Zelle<sup>929</sup>

Die Hochtemperaturelektrolyse (HTEL) arbeitet nach dem gleichen Prinzip. Auch hier sind die bekannten Elemente Anode, Kathode, Elektrolyt und Membran/Separator enthalten. Ein weiterer Vorteil dieser Anwendung ist die gesteigerte Kinetik durch die höheren Temperaturen.

Durch Temperaturen zwischen 800°C und 1000°C kommt es vermehrt zur endothermen Zersetzung von Wasser. Die nun in höherer Konzentration vorhandenen Ionen können direkt reagieren und

927 ebd.

928 ebd., S. 11.

929 entnommen aus: ebd., S. 16.

müssen nicht zuvor durch zusätzlichen Energieeinsatz getrennt werden. Das Stromeinsparpotenzial liegt hier nach Berechnungen bei etwa 25%.

Der Einsatz dieses Verfahrens ist aktuell noch durch die geringe Standzeit der eingesetzten Materialien begrenzt, bedingt durch die hohen thermischen und chemischen Anforderungen sowie die lange Anfahrzeit des Prozesses.

Da sich die HTEL derzeit noch in der Erprobungsphase befindet, existiert bislang keine kommerzielle Anwendung. Unter Laborbedingungen wurden Leistungen von bis zu 18 kW bei einer Produktion von 5,7 Nm<sup>3</sup>/h realisiert. Zur Lebensdauer können aktuell aufgrund der bisher ausstehenden kommerziellen Nutzung, derzeit nur Vermutungen erstellt werden. Seitens der Anwender ist jedoch eine Standzeit von >40.000 Stunden gefordert.

### PEM-Elektrolyse

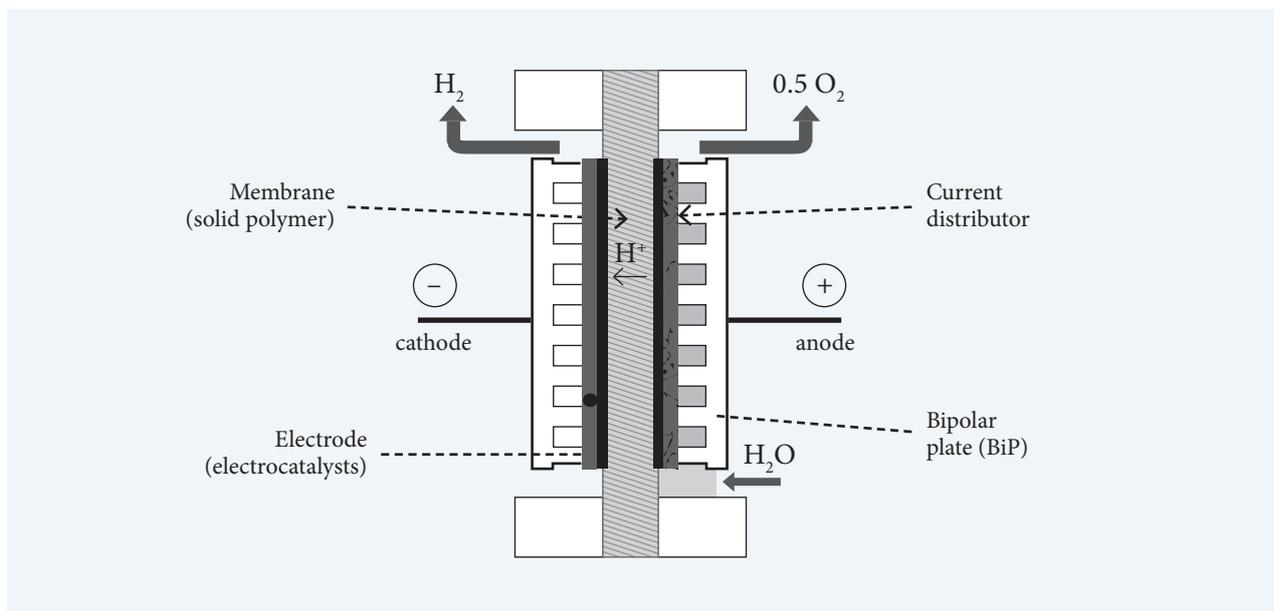


Abbildung 81: Elektrolyseprinzip der Proton-Exchange-Membran<sup>930</sup>

PEM steht für “Proton Exchange Membrane“ und beschreibt sogleich den wichtigsten Baustein dieser Elektrolyse. Diese Membran ist zentral in der Zelle angebracht und trennt den Anoden- und Kathodenbereich voneinander ab. Anders als bei der alkalischen Elektrolyse ist die Trennschicht hier durchlässig für die Protonen. Zudem sind hier die Elektroden direkt auf der Membran aufgebracht. Die auf der Membran befindliche poröse Anode wird nun mit dem Elektrolyten in Kontakt gebracht. Die Protonen wandern durch die Membran und bilden an der Kathode nach Aufnahme von Elektronen molekularen Wasserstoff, der abgesaugt wird. Auf der Anodenseite wird durch die Abgabe von Elektronen der Hydroxidionen molekularer Sauerstoff gebildet, der aufsteigt und ebenfalls entnommen wird.

PEM-Elektrolyseure sind derzeit mit einer Leistung von bis zu 150kW und einer Produktion von bis zu 30 Nm<sup>3</sup>/h im Einsatz. Der spezifische Energieverbrauch der einzelnen Module liegt dabei bis etwa 5 kWh pro produzierten Normkubikmeter Wasserstoff. Ihr Wirkungsgrad liegt unter Einbezug aller Nebenaggregate bei bis zu 75%.<sup>931</sup>

930 Entnommen aus ebd., S. 13.

931 ebd., S. 13.

Große Vorteile der PEM-Elektrolyse bestehen vor allem in ihrem schnellen dynamischen Verhalten. Die elektrische Leistungsaufnahme wird geradezu verzögerungsfrei umgesetzt und auch die Schnellstartfähigkeit durch das schnelle Erreichen der geforderten Betriebstemperatur ist positiv gegenüber anderen Verfahren. Gegenüber der alkalischen Elektrolyse ist zudem die höhere Teillasttoleranz zu nennen. Dieses ermöglicht einen Betrieb im breiten Teillastfenster und erlaubt zudem kurzzeitige Überlastzeiten.

#### IV.2.2.4 Elektrochemische Verfahren für kleinstmögliche, anorganische Produkte

##### Hypochlorit, Chlorat, Perchlorat

Wird die Chloralkalielektrolyse wie unter IV.2.1.1 beschrieben, aber ohne Zellteilung betrieben, erhält man durch Reaktion von Natronlauge mit Chlor Hypochlorit, bei Temperaturen von 80°C entsteht bevorzugt Chlorat. Perchlorat wird durch anodische Oxidation von Chlorat erzeugt. Die elektrochemisch hergestellten anorganischen Produkte werden nur in geringen Mengen produziert und überwiegend als Reagenzien und Hilfsstoffe verwendet (z.B. zur Desinfektion).

##### Peroxidisulfat und Wasserstoffperoxid

Die anodische Oxidation von Schwefelsäure liefert Peroxidischwefelsäure ( $\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_8$ ). Durch Hydrolyse der Peroxidischwefelsäure wird Wasserstoffperoxid ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) gewonnen. Wegen der hohen Strompreise hat dieses Verfahren aber keine kommerzielle Bedeutung mehr.

##### Weitere anorganische Produkte

Weitere elektrochemisch herstellbare anorganische Produkte sind Kaliumpermanganat, Braunstein (Mangandioxid), Chromsäure aus Chromsalzen als Regenerierprozess bei Verwendung von Chromsäure für Oxidationsprozesse und Kupfer-I-Oxid ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), das als Fungizid verwendet wird.

### IV.2.3 Elektrochemische Verfahren zur Herstellung organischer Produkte

Synthesen organischer Verbindungen sind ebenfalls über Elektrolysen als elektrochemische Redoxreaktionen möglich. Sie laufen als Reduktionen an der Kathode oder Oxidationen an der Anode. Leicht zugänglich sind Verbindungen mit Doppelbindungen (Alkene, Aromaten, Heteroatom-Doppelbindungen).

##### Kolbesynthese (z.B. für Sebacinsäure)

Die Kolbe-Elektrolyse<sup>932</sup> wird als „decarboxylierende Kupplung von substituierten Alkylresten in Carbonsäuren an der Anode“<sup>933</sup> beschrieben:  $2 \text{ R-COOH} \rightarrow \text{R-R} + 2 \text{ CO}_2$ . Sie wird technisch zur Synthese der Sebacinsäure aus Monomethyladipat über Dimethylsebacat genutzt<sup>934</sup>. Sebacinsäure (C10-Dicarbonsäure) wird als Monomer neben Hexamethyldiamin zur Herstellung von Polyamid-6,10 und zur Produktion von Weichmachern verwendet. Zudem wird sie technisch auch aus nachwachsenden Rohstoffen auf chemischem Wege hergestellt. Hersteller nach dem elektrochemischen Verfahren ist Asahi Chemical Industry in Japan. BASF soll nur eine Pilotanlage betrieben haben<sup>935</sup>. Der Anteil der elektrochemischen Produktion ist nicht bekannt. Die insgesamt hergestellten Mengen werden im 10.000 Jahrestonnenmaßstab geschätzt.

932 Holze, Rudolf: Technische Universität Chemnitz (Hg.): Elektrochemische Synthesen und Produktionsverfahren. (2010), S. 45.

933 Schaefer, Hans J.: GDCh – aktuelle Wochenschau (Hg.): Nachhaltige Synthese durch Elektrolyse. (2008).

934 Beck, F.; Guthke, H.: Entwicklung neuer Zellen für elektro-organische Synthesen. In: Chemie Ingenieur Technik (1969), 17, S. 943–990.

935 Acid, Sebacic; Pankaj, Dutia: A Techno-Commercial Profile unter: [http://www.chemicalweekly.com/Profiles/sebacic\\_acid.pdf](http://www.chemicalweekly.com/Profiles/sebacic_acid.pdf) (2007). Online am 24.03.2014.

### Monsanto-Verfahren für Adipodinitril

Nach diesem Verfahren wird Adipodinitril durch elektrochemische Hydro-Dimerisierung aus Acrylnitril ( $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CN}$ ) produziert.<sup>936,937,938</sup> Im Kathodenraum der Elektrolysezelle befindet sich Acrylnitril (50%ig) in wässriger Lösung, dem Toluolsulfonsäure-Tetraethylammoniumsalz zugefügt wird. An der Kathodenoberfläche reagiert Acrylnitril durch Abgabe eines Elektrons zum Acrylnitrilradikal-Anion, an das ein Proton ( $\text{H}^+$ ) aus der wässrigen Lösung addiert wird. In Folgeaktionen bildet sich das gewünschte Endprodukt Adipodinitril ( $\text{NC}-(\text{CH}_2)_4-\text{CN}$ ). Die Kathode besteht aus Edelstahlplatten mit Blei oder Kadmium, um eine hohe Wasserstoffüberspannung zu erreichen und Nebenreaktionen zu unterdrücken. Im Anodenraum entwickelt sich Sauerstoff. Die Anode besteht aus Edelstahlplatten, Blei/Silberlegierung oder Graphit. Als Diaphragma wird eine Ionenaustauscher-Membran verwendet, der Abstand von Anoden- und Kathodenplatten beträgt nur 6 mm. Die Elektrolyse läuft mit einer Arbeitsspannung von ca. 4 V oder je nach Elektrodenmaterial 8-15 V und einer Stromdichte von 3.000 A – 10.000 A. Durch eine nicht-gewünschte Nebenreaktion mit Wasser bildet sich Propionitril. Die Stoffausbeute beträgt bei diesem Verfahren 95%, die Stromausbeute 90%, der Energiebedarf 4 kWh pro kg Adipodinitril, die Standzeit der Membranen 2.000 Betriebsstunden. Der Gesamtstrombedarf für die globale Jahresproduktion von 500.000 t liegt dann potenziell bei 2 TWh. In Deutschland wird dieses Verfahren bisher nicht angewendet.

Adipodinitril ist Zwischenprodukt für die Herstellung von Polyamid 66 über Hexamethyldiamin und AH-Salz. Das Produktionsvolumen nach diesem Verfahren wird auf bis zu 500.000 t Adipodinitril pro Jahr geschätzt<sup>939</sup>. Ob das elektrochemische Verfahren noch angewandt wird, ist nicht bekannt.

### Anodische Methoxylierung zur Herstellung aromatischer Aldehyde

Nach dieser Methode werden aromatische Aldehyde aus Toluolderivaten hergestellt. Dabei wird die Methylgruppe elektrochemisch oxidiert. Das im Elektrolyten enthaltene Methanol bildet ein Acetal, das als Schutzgruppe die Weiteroxidation des Aldehyds verhindert.

Zur Herstellung von Zwischenprodukten für Flüssigkristalle wurde p-Alkyloxytoluol (Kresylether) in einem Elektrolyten aus Methanol und Kaliumfluorid durch anodische Oxidation zu p-Alkyloxybenzaldehyddimethylacetal umgesetzt. Die Elektroden bestehen aus Graphit. Die erzielten Ausbeuten werden als gut bezeichnet<sup>940</sup>.

Dieser Reaktionstyp ist auch als anodische Methoxylierung an einem Festkörperelektrolyten beschrieben. Der Festkörperelektrolyt besteht aus einer Kationenaustauschermembran und aus porösen, elektrisch leitfähigen Materialien wie Graphitfilz- oder Kohlefilzplatten oder aus mit Kohlenstoff beschichteten textilen Materialien<sup>941</sup>.

Die BASF benutzt im technischen Maßstab Plattenstapelzellen (s. Abbildung 82) für etwa zehn Prozesse der anodischen Methoxylierung, darunter auch für die Produktion von Anisaldehyd (Aromatisierungsmittel) und tert-Butylbenzaldehyd (Stabilisator, Antioxidans).

936 Holze, Rudolf: Technische Universität Chemnitz (Hg.): Elektrochemische Synthesen und Produktionsverfahren. (2010), S. 37-39.

937 Hamann, Carl H.; Vielstich, Wolf (Hg.): Elektrochemie. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2005). ISBN 978-3-527-31068-5, S. 389 f.

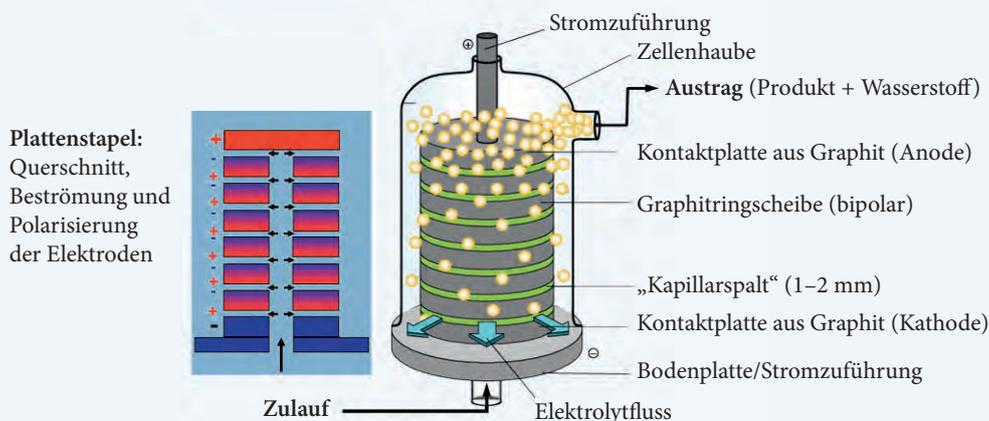
938 ebd., S. 465 ff.

939 Pütter, Hermann: GDCh – aktuelle Wochenschau (Hg.): Industrielle Organische Elektrochemie. (2008).

940 Matschiner, Von H.; Fechtel, U.; Trutschel, R.; Altmann, H.: Darstellung von 4-Alkyloxybenzaldehyddimethylacetalen durch anodische Methoxylierung von 4-Alkyloxytoluolen. In: Liquid Crystals (1989), 4, S. 501–502.

941 DE19827322 A1 (Patentidentifikationsnummer).

## Die Plattenstapelzelle der BASF

Abbildung 82: Produktionselektrolysezelle der BASF als Plattenstapel<sup>942</sup>

Weitere elektrochemisch im technischen Maßstab herstellbare organische Produkte sind:

- Gluconsäure aus Glucose und Dialdehydstärke aus Stärke durch anodische Oxidation<sup>943</sup>,
- mAnilinsulfonsäure aus mNitrobenzolsulfonsäure und Piperidin aus Pyridin durch elektrochemische Hydrierung<sup>944</sup>,
- Hydrochinon aus Benzol<sup>945</sup>,
- Vanillin, Vanillinsäure und 4-Hydroxybenzaldehyd durch die elektrochemische Umwandlung von Lignin<sup>946</sup>,
- Aminophenol aus Nitrophenol durch elektrochemische Reduktion<sup>947</sup>,
- Glyoxylsäure aus Oxalsäure durch elektrochemische Reduktion<sup>948</sup>.

Eine Presseinformation der DECHEMA berichtet vom Start des Forschungsprojekts „Mikrobielle Elektrosynthesen“, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unterstützt wird. Ziel des Projekts ist die Entwicklung von Grundlagen für neue Verfahren zur Nutzung von CO<sub>2</sub> als Rohstoff, um damit Biokraftstoffe und chemische Grundstoffe biochemisch herzustellen<sup>949</sup>.

### Elektrochemische CO<sub>2</sub>-Reduktion

Durch elektrochemische CO<sub>2</sub>-Reduktion können C1-Grundchemikalien produziert werden. In einem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekt zur stofflichen Nutzung von CO<sub>2</sub> wird durch Katalysatorforschung ein effizientes Verfahren zur elektrochemischen

942 Entnommen aus Pütter, Hermann: GDCh – aktuelle Wochenschau (Hg.): Industrielle Organische Elektrochemie. (2008).

943 Hamann, Carl H.; Vielstich, Wolf (Hg.): Elektrochemie. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2005). ISBN 978-3-527-31068-5, S. 466.

944 ebd., S. 466.

945 Fremery, Max; Höver, Hermann; Schwarzlose, Gert: Elektrochemische Benzol-Oxidation, ein nebenproduktfreier Weg zum Hydrochinon. In: Chemie Ingenieur Technik (1974), 15, S. 635–639, S. 635-639.

946 WO1987003014 A1 (1987) (Patentidentifikationsnummer).

947 DE4003004 A1 (1989) (Patentidentifikationsnummer).

948 EP0578946 A2 (1992) (Patentidentifikationsnummer).

949 Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (DECHEMA): Ungewöhnliche Verfahrenskombination könnte CO<sub>2</sub> zum Rohstoff machen (03.07.2013).

Reduktion von CO<sub>2</sub> entwickelt, um die Folgeprodukte wie Methan oder Methanol zu gewinnen<sup>950</sup>. In der Dissertation von Peter Friebe findet man einen Überblick über die bisher bekannten Arbeiten zur elektrochemischen CO<sub>2</sub>-Reduktion.<sup>951</sup> Bisher gibt es jedoch keine elektrochemischen Verfahren mit technischer Bedeutung.

## IV.2.4 Sonstige elektrochemische Verfahren

### IV.2.4.1 Schmelzflusselektrolyse zur Herstellung von Aluminium, Magnesium und Alkalimetallen

#### Prinzip der Schmelzflusselektrolyse

Salze haben im festen Zustand ein starres Ionengitter. Durch das Aufschmelzen wird das Ionengitter aufgelöst und die Salze sind oberhalb ihres Schmelzpunktes vollständig dissoziiert. Die beweglichen Ionen sind gute Leiter, Salzschnmelzen bilden daher starke Elektrolyte. Durch die Schmelzflusselektrolyse werden großtechnisch Aluminium, Magnesium und Natrium hergestellt. Diese Metalle sind durch Elektrolysen in wässrigen Systemen nicht zugänglich, weil die Normalpotenziale dieser „unedlen“ Metalle so niedrig sind, dass an der Kathode nur Wasserstoff gebildet wird. In kleinerem Maßstab werden auch Lithium, Kalium, Beryllium, Bor, Titan, Niob, Tantal und Metalle der seltenen Erden mittels Schmelzflusselektrolyse produziert.<sup>952</sup>

#### Aluminiumproduktion

Die Aluminiumgewinnung ist nach der Chlor-Alkali-Elektrolyse im kommerziellen Maßstab der wichtigste elektrochemische Produktionsprozess. Produktionsanlagen sind modular aus ca. 50 bis 200 in Serie geschaltete Zellen aufgebaut. Die Elektrolysespannung beträgt ungefähr 4,2 V. Die Stromdichten betragen 3.000 A/m<sup>2</sup> an der Kathode und ca. 7.000 A/m<sup>2</sup> an der Anode.<sup>953</sup>

Aluminiumoxid	1,9 t		
Kohle (Anode)	0,5 t	13,5 MWh →	Aluminium 1 t
Kryolith	0,04 t		

Abbildung 83: Ressourcenverbrauch zur Herstellung einer Tonne Aluminium aus Aluminiumoxid

Die Stromkosten dominieren die Herstellungskosten von Aluminium. Der Marktpreis des Aluminiums lag in der Zeit von 2001 bis 2011 weitgehend konstant bei 1.500 Euro pro t mit einem Maximum von 2.000 Euro in 2005/2006 und einem Minimum von 1.000 Euro in 2008.<sup>954</sup> Die Aluminiumelektrolysen lassen sich in Abhängigkeit von wechselnder Stromverfügbarkeit so betreiben, dass der Durchsatz innerhalb von 24 Stunden auf etwa die Hälfte abgesenkt werden kann<sup>955</sup>. Ein komplettes Herunterfahren und sofortiges Wiederanfahren erlaubt der Prozess wegen der Erstarrung der Schmelze bei Abkühlung nicht. Der maximale Beitrag der Aluminiumelektrolysen zur Stabilisierung der Netze, in die fluktuierender Strom eingespeist wird, liegt also zwischen 50 und 100% der Elek-

950 Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH: Elektrochemische CO<sub>2</sub> Reduktion – mit Hochdurchsatz auf der Suche nach neuen Katalysatoren unter: <http://www.mpie.de/index.php?id=4120>. Online am 03.04.2014.

951 Friebe, Peter: (Hg.): Adsorption und Reduktion von Kohlendioxid an Übergangsmetallen. (1998).

952 Hamann, Carl H.; Vielstich, Wolf (Hg.): Elektrochemie. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2005). ISBN 978-3-527-31068-5, S. 453-456.

953 ebd., S. 453 ff.

954 finanzen.net: Aluminiumpreis – Euro unter: <http://www.finanzen.net/rohstoffe/aluminiumpreis/euro> (2014). Online am 03.06.2014.

955 Prof. Dr. Helmut Baltruschat (Universität Bonn); Landtag NRW (Hg.): Enquetekommission II Protokoll 14. Sitzung (nichtöffentlich) Anhörung „Elektrochemische Verfahren“. (2014), S. 17.

trollysekapazität. In Deutschland wären das heute auf ein Betriebsjahr hochgerechnet  $\pm 3,7$  TWh (s. Produktionszahlen unten).

Die weltweite Primäraluminiumproduktion<sup>956</sup> aus Aluminiumoxid mittels Schmelzelektrolyse betrug 2010 41,2 Mio. t. Zusätzlich wurden 8,4 Mio. t Sekundäraluminium (durch Recycling) gewonnen, davon 29% in Europa und 43% in Amerika; in Asien betrug dieser Anteil nur 25%, obwohl hier doppelt so viel Primäraluminium wie in Europa und dreimal so viel wie in Amerika produziert wurden. In Deutschland wurden lediglich gut 0,4 Mio. t (1% der Weltprimärproduktion) hergestellt und dafür ca. 5,4 TWh Strom verbraucht:

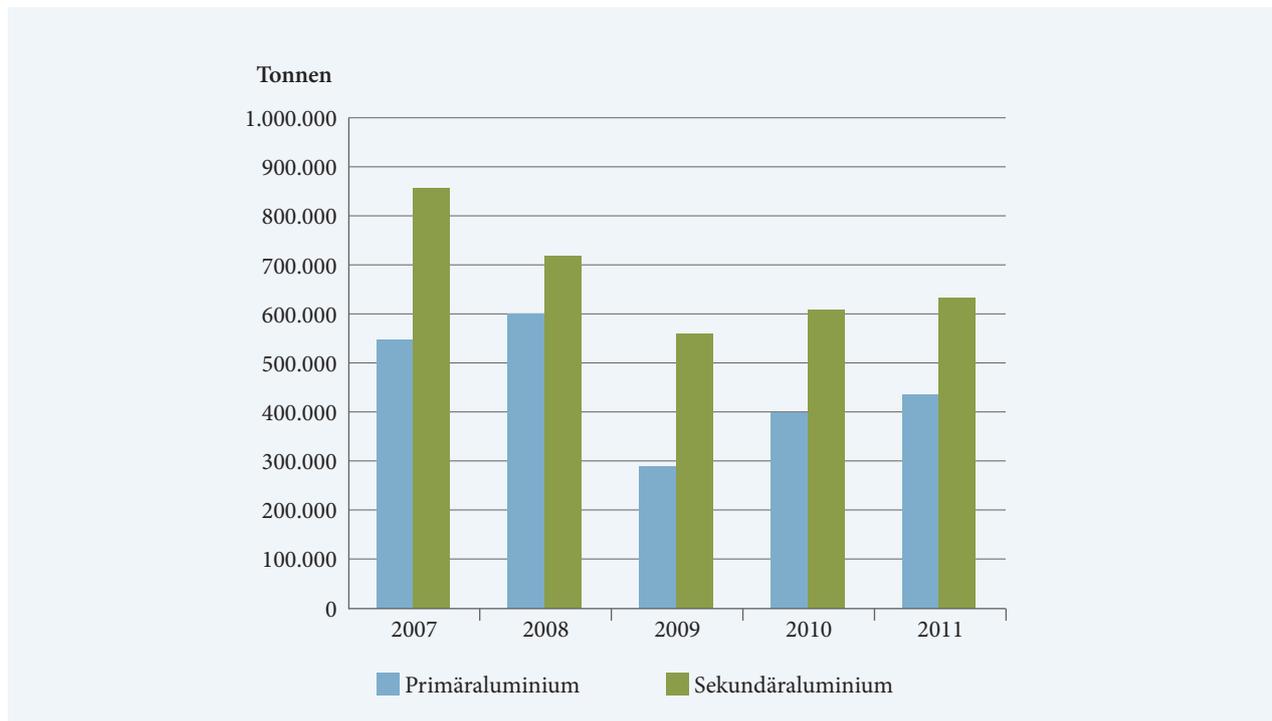


Abbildung 84: Jährliche Produktion von Primär- und Sekundäraluminium in Deutschland<sup>957</sup>

Zusätzlich zu den im Inland hergestellten Mengen betrug der Nettoimport von Primäraluminium 1,57 Mio. t (2011), davon 1,46 Mio. t aus europäischen Ländern, und der von Sekundäraluminium 0,63 Mio. t. Deutschland importiert mehr als die Hälfte seines Bedarfs an Aluminiumrohstoff, jedoch ganz überwiegend aus Europa. Die Handelsbilanz von Aluminiumhalbzeugen ist mit einem Exportüberschuss von knapp 0,2 Mio. t aber fast ausgeglichen.

Aluminiumhalbzeuge werden im Automobil- und Flugzeugsektor, bei Eisenbahnzügen, im Hausbau, Maschinenbau und in weiteren Branchen zu den Endprodukten weiterverarbeitet. Durch das geringe spezifische Gewicht des Aluminiums und seine hohe mechanische Festigkeit ist die Verwendung als Werkstoff für Verkehrsmittel, besonders bei den Flugzeugen, vorteilhaft.

### Schmelzflusselektrolyse weiterer Metalle

Magnesium wird aus der Schmelze (bei 700 – 800°C) von Magnesiumchlorid durch Elektrolyse gewonnen. Wie Magnesium wird Natrium auch aus der Salzschnmelze des Chlorids hergestellt.

956 Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V.: Weltweite Aluminiumproduktion unter: <http://www.aluinfo.de/index.php/produktion-weltweit.html>. Online am 03.03.2014.

957 Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V.: Jährliche Produktion von Primär- und Sekundäraluminium in Deutschland unter: <http://www.aluinfo.de/index.php/produktion.html> (2014). Online am 06.03.2014.

Die technische Herstellung von metallischem Lithium erfolgt, wie bei der Natriumherstellung beschrieben, durch Elektrolyse einer Schmelze von Lithiumchlorid, dem Kaliumchlorid zur Schmelzpunktniedrigung zugemischt wird.

Metallisches Lithium<sup>958</sup> wird zur Herstellung von Feinchemikalien wie Lithiumaluminiumhydrid, Lithiumhydrid, Butyllithium und Lithiumamid eingesetzt sowie zur Entfernung von Stickstoffspuren aus Gasen und zur Entschwefelung in der Metallurgie verwendet.

#### **Metallraffination zur elektrolytischen Kupfer- und Zink-Herstellung**

Die elektrolytische Herstellung von Kupfer gehört ebenso wie die Gewinnung von Zink zu den hydrometallurgischen Prozessen. Als Basis dient in beiden Fällen sulfidisches Erz, aus dem zur Vorbereitung durch Röstung die jeweiligen Oxide herausgelöst werden. Diese werden anschließend mit Hilfe von Schwefelsäure gelaugt. Nach Feinreinigung und Ausfällung des Eisens erfolgt die eigentliche Elektrolyse und damit die Anlagerung des Zinks bzw. Kupfers an der Kathode. Das so gewonnene Zink/Kupfer wird mechanisch von der Kathode entfernt und hat eine Reinheit von 99,99%. 15% des Kupfer- und nahezu 80% des weltweiten Zinkbedarfes werden auf diesem Wege elektrolytisch gewonnen<sup>959</sup>.

#### **IV.2.4.2 Elektrochemische Verfahren der Oberflächenbehandlung und Galvanotechnik**

Neben der oben bereits vorgestellten Raffination von Metallen wird auch deren Weiterverarbeitung und Formung zum Bereich der elektrochemischen Verfahren gezählt. Dieses als Galvanotechnik bezeichnete Teilgebiet wird im Folgenden näher betrachtet.

Zum Bereich der Galvanotechnik werden Verfahren gezählt, bei denen mittels elektrochemischer Prozesse Oberflächen verändert, neue Strukturen geschaffen oder komplette Werkstücke geformt werden. Zu unterteilen ist die Galvanotechnik demnach in die Bereiche Beschichtungstechnik, Galvanoformung und Metallbearbeitung. Die Größe der Werkstücke reicht hier von kleinsten Miniaturisierungen bis hin zu mehreren Quadratmetern Größe.

Durch den Einsatz der verschiedenen elektrochemischen Verfahren werden die behandelten Werkstücke in ihren spezifischen Eigenschaften verändert und/oder verstärkt. Zu diesen Eigenschaften zählen unter anderem:

- Korrosionsschutz/Oberflächenschutz,
- Dekoration,
- Verschleißschutz,
- Erhöhung der Härte (oberflächlich),
- optisches oder thermisches Reflexionsvermögen,
- elektrische Leitfähigkeit,
- leichte Reinigung,
- ölabweisende Eigenschaften,
- thermische Leitfähigkeit,
- magnetische Eigenschaften.

Das Einsatzgebiet der so modifizierten Werkstücke umfasst die technische Anwendung im Bausektor, Anlagenbau, Automobilsektor, Dekoration, Schmuck, Elektronikindustrie, Haushaltswaren etc.

958 Jaskula, Brian W.: U.S. Geological Survey (Hg.): Lithium. (2012), S. 94 ff.

959 Schmidt, Volkmar M.: Elektrochemische Verfahrenstechnik: Grundlagen, Reaktionstechnik, Prozessoptimierung. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2003). ISBN 978-3-527299-58-4, S. 414.

Der Einsatz dieser Verfahren stellt somit einen wichtigen Beitrag innerhalb der Wertschöpfungsketten dar und ist aus der heutigen Industrielandschaft nicht wegzudenken.

Unter das breite Einsatzgebiet fallen die folgenden Verfahren:

- Beschichtungstechnik,
- anodische Oxidation/Eloxal-Verfahren,
- Galvanoformung,
- Metallbearbeitung,
- elektrochemische Metallformung,
- Elektropolieren.

#### IV.2.4.3 Elektrochemische Verfahren der Wasseraufbereitung, Abwasserbehandlung

Durch Überdüngung, Produktionsrückstände oder sonstige Einträge verunreinigtes Wasser kann ein ernstzunehmendes Problem darstellen. Besonders Landstriche und Länder mit geringeren Trinkwasservorkommen haben einen großen Bedarf an adäquater Aufbereitung solcher Wässer. Neben den mechanischen Verfahren der (Fein-)Filtration und den biologischen Verfahren der Aufbereitung bietet die Elektrochemie in Form der Elektrodialyse Möglichkeiten der Reinigung.

#### IV.2.4.4 Lichtbogenverfahren

Ein Lichtbogen bildet sich zwischen zwei Elektroden, wenn die Spannung ausreichend groß ist. Das Leuchten (der Lichtbogen) tritt durch Elektronenstoß-Ionisation des sich zwischen den Elektroden befindlichen Gases auf. Das ionisierte Gas bildet ein Plasma; es ist elektrisch leitfähig. Nach außen ist das Plasma neutral, da es so viele Kationen wie Elektronen enthält. Der Stromtransport im Plasma erfolgt praktisch nur durch die kleinen (schnelleren) Elektronen.

Ein Übersichtsartikel beschreibt die Lichtbogenanwendung für verschiedene Plasmaöfen einschließlich Plasma-Drehrohrofen<sup>960</sup>. Die Plasmaöfen werden für metallurgische Prozesse, der Siliziumherstellung und zur kombinierten Herstellung von Ruß und Wasserstoff aus Kohlenwasserstoffen (Kvaerner-Prozess) eingesetzt. Die Öfen werden mit Gleichstrom (ca. 500 A und 300 V) und Wechselstrom mit niedrigen Stromstärken (100 – 1.000 A), aber auch mit sehr hohen Stromstärken von 100.000 A betrieben.

Im Folgenden wird das Lichtbogenverfahren als Verfahren zur Herstellung von Acetylen betrachtet. Der Einsatz eines Plasmaofens zur Herstellung von Acetylen aus Kohle lief als vom Land Nordrhein-Westfalen gefördertes Pilotprojekt bei der damaligen Hüls AG. Bei diesem Prozess wurde bei Temperaturen von über 2.000°C und sehr kurzen Verweilzeiten von einigen Millisekunden pulverisierte Kohle mit einer Korngröße unter 100 µm, vermischt mit Wasserstoff, eingesetzt. Das Reaktionsgemisch muss sofort durch Wassereinspritzung abgekühlt werden, um die Rückreaktion (Kværner-Reaktion) des gebildeten Acetylen zu verhindern. Das erhaltene Reaktionsgemisch besteht aus Acetylen (25%), Kohlenmonoxid (20%) und Wasserstoff (34%, jeweils in Gewichtsprozent)<sup>961</sup>. Der Prozess kann nach variablem Stromangebot gesteuert werden und damit einen Beitrag zur Netzstabilität leisten. Die Autoren des zitierten Artikels halten einen kommerziellen Einsatz des Verfahrens unter den Randbedingungen preiswerter Kohle und preiswertem Stromangebot für möglich. Unter aktuellen und zukünftigen Randbedingungen ist diese Einschätzung neu zu bewerten.

960 Bakken, Jon Arne et al.: Thermal plasma process development in Norway. In: Pure & Appl. Chem. (1998), 6, S. 1223–1228.

961 Brachold, Harald; Peuckert, Cornelius; Regner, Hans: Lichtbogen-Plasma-Reaktor für die Herstellung von Acetylen aus Kohle. In: Chemie Ingenieur Technik (1993), 3, S. 293–297.

Historisch wurde Acetylen aus einer Mischung von gebranntem Kalk und Koks im Lichtbogenofen bei ca. 2.300°C hergestellt:  $\text{CaO} + 3\text{C} \rightarrow \text{CaC}_2 + \text{CO}$ . Dabei werden 2/3 des Kohlenstoffs zum Acetylid umgesetzt, 1/3 zu Kohlenmonoxid. Das im Lichtbogenofen gebildete Calciumcarbid wurde mit Wasser zu Calciumhydroxid und Acetylen umgesetzt<sup>962</sup>. In den neueren Verfahren wird Acetylen durch Pyrolyse von Flüssiggasen und Raffineriegasen sowie Erdgas im Lichtbogenofen produziert. Dieses Verfahren kann nach Stromangebot gesteuert werden.

Acetylen wird bei der BASF und anderen Unternehmen als chemisches Zwischenprodukt hergestellt<sup>963</sup>. Folgeprodukte bei der BASF sind Butandiol und Tetrahydrofuran. Außerdem wird Acetylen zum autogenen Schweißen verwendet. Tabelle 37 zeigt die bekannten Prozessketten, deren Verfahren wegen des Wechsels zum Grundstoff Naphtha in den letzten 50 Jahren kaum noch weiter entwickelt wurden. Im Lichtbogen aus Kohle, Wasserstoff und Strom aus Kohlekraftwerken oder aus erneuerbaren Quellen erzeugtes Acetylen könnte die petrobasierten Prozesse ersetzen.

Tabelle 37: Wesentliche Acetylen-basierte Prozessketten<sup>964</sup>

Acetylen	+	Formaldehyd	→	Butandiol	→	Polyester, Polyether
		Blausäure		Acrylnitril		Polycacrylfaser, ABS
		CO + Wasser		Acrylsäure		Superabsorber
		Alkohole		Vinylether		Polyvinylether
		Ammoniak		Pyridinderivate		N-Heterocylen
		Wasser		Acetaldehyd		Polyole
		Salzsäure		Vinylchlorid		PVC
		Essigsäure		Vinylacetat		Polyvinylalkohol
		Cyclisierung		Benzol, Styrol		Phenol, Polystyrol, usw.
		Wasserstoff		Ethylen		Polyethylen, Ethylenoxid

Weitere stromintensive Verfahren sind:

- Carbonfaser-Herstellung,
- Erzeugung von Prozesswärme,
- Umkehrosmose,
- Luftzerlegung/Verflüssigung.

962 Hollemann, Arnold Fr.; Wiberg, Egon: (Hg.): Lehrbuch der anorganischen Chemie. (1964), S. 414.

963 Mayer, Ralf: BASF führt Wartungs- und Modernisierungsmassnahmen durch. In: Chemische Rundschau – Chemie Plus.

964 Acetylen-Prozessketten: ebd.; Spektrum Akademischer Verlag: Acetylenchemie unter: <http://www.spektrum.de/lexikon/chemie/acetylenchemie/84> (1998). Online am 31.03.2014; Universität Duisburg (Hg.): Acetylen und Folgeprodukte.

## IV.3 Energiespeicher

### IV.3. Einführung in die Energiespeichersysteme

Im Rahmen des Beschlusses des Energiekonzeptes hat die Bundesregierung im Jahre 2010 den schrittweisen Ausbau der Erneuerbaren Energien (EE) zur Versorgung Deutschlands bestätigt. Demnach soll der Anteil der EE am Stromsektor bis zum Jahr 2030 bei 50% sowie bis 2050 bei 80% liegen. Dies bedeutet für den Bruttoendenergieverbrauch, der Verkehr, Wärme und Strom einschließt, einen EE-Anteil von 60% in 2050.<sup>965</sup>

Bezogen auf den Einsatzantrag werden in diesem Kapitel die Möglichkeiten der Speichertechnologien und der Beitrag der chemischen Industrie zu selbigen untersucht. Hier wird im Besonderen auf die in der chemischen Industrie erforschten Techniken, aber auch auf entwickelte Materialien, die einen Beitrag zur Speicherung von Überschussenergie (z.B. in mechanischen, elektrischen oder thermischen Speichern) leisten können, betrachtet.

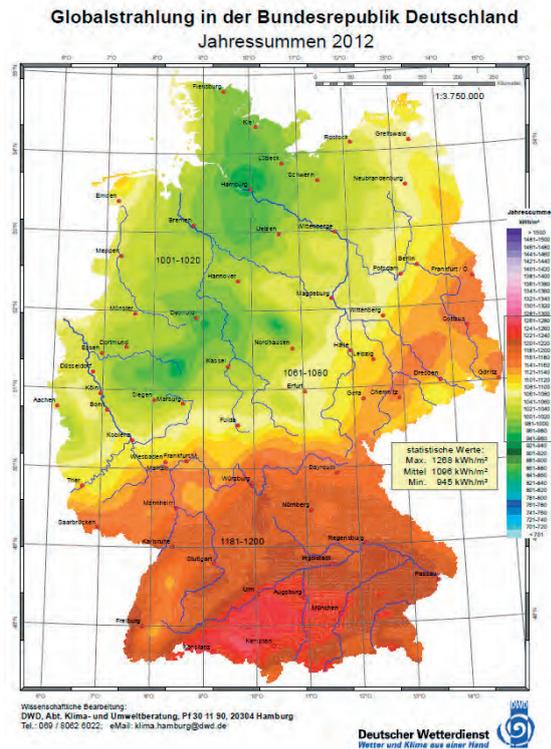
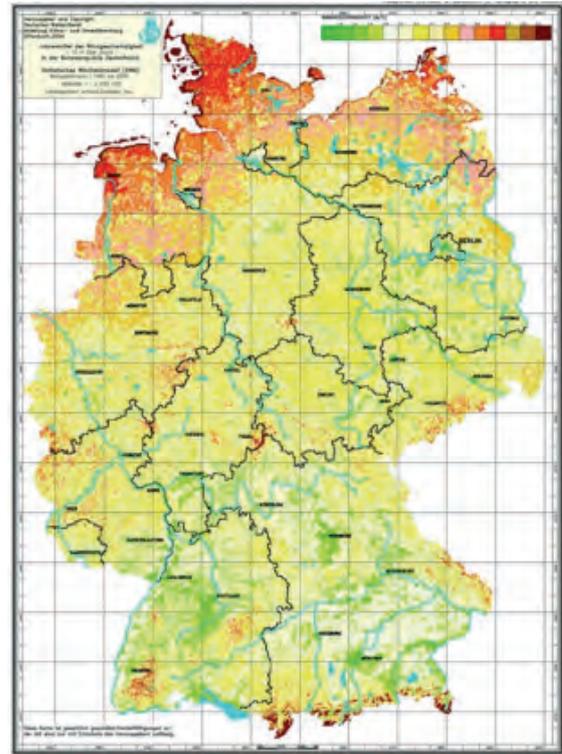
Zu den Erneuerbaren Energien werden im Engeren die Wind-, Wasser- und Solarenergie gezählt, ergänzt um die Geothermie und die Verfeuerung von Biomasse (nicht fossilen Ursprungs). Davon wird die Windenergie den wesentlichen Beitrag leisten. Wind-, Sonnen- und Wasserenergie stehen, von den Investitionen und dem Betrieb der Anlagen abgesehen, kostenlos und CO<sub>2</sub>-neutral zur Verfügung. Nach aktuellen Zahlen des Bundesverbandes der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. mit Sitz in Berlin (BDEW) lag der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung in Deutschland 2013 bei 23,4%. Knapp die Hälfte (45,5%) stammte aus Kohlekraftwerken (19,7% Steinkohle; 25,8% Braunkohle).<sup>966</sup>

Durch die Nutzung erneuerbarer Energien ergeben sich wesentliche Veränderungen bei der Energiebereitstellung im Vergleich zum heutigen System. Bei der Bereitstellung gibt es sowohl regionale als auch saisonale Unterschiede. Während die Küstenregionen mit ihren vielen Windtagen und angrenzenden Landstrichen mit geringem Relief ein prädestiniertes Einsatzgebiet für Windanlagen sind, eignen sich andere Regionen in Deutschland bzw. Europa aufgrund der schwachen Winde weniger für eine Aufstellung. Der Süden Deutschlands bzw. die Länder Südeuropas bieten mit ihren vielen Sonnenstunden hingegen bessere Bedingungen für die Ansiedlung von Photovoltaikanlagen (PV), die wiederum von nördlicheren Regionen nicht erreicht werden können (vgl. Abbildung 85, Abbildung 86).

---

965 Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (Hg.): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. (2010), S. 4/5.

966 Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW): Energiedaten unter: <https://www.bdew.de/internet.nsf/id/B7A2B3B1AA32A3E8C125783700644E07>.

Abbildung 85: Verteilung Sonnenstunden Deutschland 2012<sup>967</sup>Abbildung 86: Mittlere Windgeschwindigkeiten Deutschland<sup>968</sup>

Die Wasserenergie ist vergleichsweise weniger volatil. Zur Bereitstellung reicht ein fließendes, fallendes, aufgestautes oder durch Gezeiten bewegtes Gewässer.

Neben den regionalen Unterschieden kommt bei den erneuerbaren Energien der Aspekt der saisonalen Volatilität hinzu. Besonders die Photovoltaik hat hier einen ausgeprägten Jahresgang. In den Wintermonaten sinkt die potenziell mögliche Leistung durch Sonnenenergie aufgrund geringerer Anzahl von Sonnenstunden am Tag gegenüber den Sommermonaten erheblich. Hinzu kommt ein verschlechterter Wirkungsgrad, bedingt durch den ungünstigeren Einfallswinkel der Sonnenstrahlen auf die PV-Anlagen. Bei der Windenergie kommt es aufgrund der unterschiedlichen Häufung von Windphasen und Flauten ebenfalls zu jahreszeitlichen Schwankungen. Die Wasserenergie ist auch hier wieder weniger betroffen, auch wenn es durchaus zu jahreszeitlichen Schwankungen durch Schneeschmelzen etc. kommen kann. In Summe bedeutet dies, dass die durch erneuerbare Energien bereitgestellte Leistung in gewissem Umfang volatil ist.

Der EE-Ausbau wird somit vor allem durch offshore- und onshore-Windenergie- sowie PV-Anlagenkapazitäten getragen. Eine Quantifizierung der zukünftig installierten EE-Leistungen über den zeitlichen Verlauf der Energiewende ist in den Annahmen (Kapitel IV.4) zu finden. Die Stromerzeugung erfolgt so zukünftig stärker dezentral. Entstanden Schwankungen im bisherigen Stromversorgungssystem überwiegend auf der Verbraucherseite, wird zukünftig auch die Angebotsseite aufgrund eines volatilen Wind- und Sonnenangebots verstärkt Schwankungen unterliegen. Auch

967 Deutscher Wetterdienst (DWD): Verteilung Sonnenstunden Deutschland 2012 unter: <http://www.dwd.de>.

968 Deutscher Wetterdienst (DWD): Jahresmittel der Windgeschwindigkeiten Deutschland 1981-2000 unter: [http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU1/KU12/Klimagutachten/Windenergie/Windkarten\\_\\_entgeltfrei/Windkarten\\_\\_10m/BRD\\_\\_1kmRasterA3\\_\\_10m,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/BRD\\_\\_1kmRasterA3\\_\\_10m.pdf](http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU1/KU12/Klimagutachten/Windenergie/Windkarten__entgeltfrei/Windkarten__10m/BRD__1kmRasterA3__10m,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/BRD__1kmRasterA3__10m.pdf). Online am 26.02.2015.

wenn Windenergie und Photovoltaik sich saisonal und im Tagesablauf ergänzen<sup>969</sup>, haben beide nur eine begrenzte Grundlastfähigkeit.

Diese Schwankungen gilt es auszugleichen sowie Angebot und Bedarf an Energie auszugleichen. Außerdem muss die Netzstabilität (als Funktion von Frequenz-, System- und Spannungsstabilität) gewährleistet sein.<sup>970</sup> Der Infoblock „Regelleistungen zur Netzstabilität“ gibt Auskunft über die möglichen Maßnahmen zur Netzstabilisierung.

#### Infoblock: Regelleistungen zur Netzstabilisierung

Zur Stabilisierung des Stromnetzes unterscheidet man folgende Parameter, die sich hinsichtlich ihrer Reaktionsgeschwindigkeit und Kapazität unterscheiden:

- Primärregelleistung
- Sekundärregelleistung
- Minutenreserve (Tertiärregelleistung)
- Quartärregelleistung.

Um kurzzeitige Schwankungen im Bereich zwischen 30 Sekunden und wenigen Minuten auszugleichen, werden heute mehrere Kraftwerke im Verbund betrieben. Kurze Schwankungen lassen sich so durch Anhebung weniger Prozentpunkte in der Auslastung der einzelnen Kraftwerke beheben (Primärregelleistung). Sollte es zu einem länger anhaltenden (>5 Min.) Mehrbedarf im Netz kommen, werden zusätzliche Kraftwerke (z.B. Gasturbinen o.ä.) angefahren und das Angebot erhöht (Sekundärregelleistung). Beide Fälle treten in einem räumlich begrenzten Verteilnetz auf. Kommt es zu längeren Bedarfen auf überregionaler Ebene, werden die zusätzlichen Regelmechanismen zur Stabilisierung des Netzes eingeschaltet und weitere Kraftwerke hinzugeschaltet und die Leistung umverteilt.

#### Infoblock: Definition Überschussstrom

- Überschussstrom ist die Differenz zwischen der momentanen Erzeugungskapazität für Strom und der momentanen Nachfragelast, die durch zusätzliche Nachfrage wirtschaftlich genutzt werden könnte, aber durch Abregelung oder Abschalten der Stromerzeugungsanlagen verloren geht oder zu negativen Preisen veräußert werden muss.<sup>971</sup>

##### Dabei gilt:

- Überschussstrom beruht in erster Linie auf der Volatilität der EE-Anlagen. Zudem sind konventionelle Kraftwerke nicht flexibel genug, um diese Volatilität voll auszugleichen. Sie tragen dann zum Überschussstrom bei, wenn die nachgefragte Leistung unter den Must-run-Sockel absinkt und sie trotz fehlender Nachfrage einspeisen müssen.
- Kurzfristige Stromspitzen (unter 15 Min.) sind meist nicht wirtschaftlich zu nutzen und deshalb über die Netzregelung zu steuern. Sie werden hier nicht dem Überschussstrom zugerechnet.
- Wenn die zusätzlichen Strommengen die Netzübertragungskapazitäten übersteigen, kann Überschussstrom lokal auftreten, auch wenn in anderen Regionen eine unbefriedigte Nachfragelast vorliegt.
- Grundsätzlich gibt es einen Wettbewerb zwischen der physikalischen Speicherung von Überschussstrom, der kurz- bis mittelfristig wieder in das Netz eingespeist wird, chemischer Speicherung mit (einer möglichen) Rückverstromung im mittel- bis langfristigen Zeitraum (PtG), und der Herstellung von chemischen Produkten (PtC), wobei die Nutzung zur Rückverstromung Vorrang hat, soweit sie für die Umsetzung der Energiewende erforderlich bzw. sinnvoll ist.
- Bei der Nutzung des Überschussstroms treten je nach Wirkungsgrad der physikalischen oder chemischen Umwandlungsstufen Verluste auf, die die Wirtschaftlichkeit ebenso beeinflussen wie die Nutzungszeiten der Anlagen (Investkosten), die den Überschussstrom verbrauchen.
- Überschussstrom wird erst bei einem weitgehenden Ausbau der EE-Anlagen für chemische Umwandlung in einem wirtschaftlich interessanten Volumen zur Verfügung stehen.
- Wenn die saisonalen Schwankungen der EE-Erzeugung für das ganze Stromnetz Bedeutung erlangen, sollte Überschussstrom zur Abdeckung der Schwachzeiten mittel- bis langfristig zur Wiedereinspeisung/Rückverstromung gespeichert werden.

969 Wagner, Friedrich: Electricity by intermittent sources. An analysis based on the German situation 2012. In: The European Physical Journal Plus (2014), 129:20.

970 Tamme, Rainer: Wärmespeicher: Sonne, Wind und Abwärme sammeln. In: Von Kohlehalden und Wasserstoff: Energiespeicher – zentrale Elemente der Energieversorgung (2013), S. 61.

971 Siehe dazu Deutscher Bundestag (Hg.): Kleine Anfrage: Daten zur Abregelung von regenerativen Stromerzeugungsanlagen. (2014).

Diese Schwankungen auf der Angebotsseite können sowohl kurzfristig zu Überschussstromspitzen führen als auch bei zunehmend hohem EE-Anteil zu saisonalen Überschussstrommengen (vgl. Definition Überschussstrom im Infokasten). Diese Veränderungen stellen das deutsche Stromversorgungssystem vor große technische Herausforderungen, um die Systemstabilität und Versorgungssicherheit gewährleisten zu können. Eine zu große Differenz zwischen Erzeugungs- und Verbrauchsseite führt zu einer Überlastung des Stromnetzes bzw. der Endabnehmer und kann zu Schäden und im schlimmsten Fall zum Netzzusammenbruch führen. Entsprechend gilt es einen Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch durch Bereitstellung von Flexibilitäten zu erzielen, die Netzstabilität zu gewährleisten und EE-Stromerzeuger in das Versorgungssystem integrieren zu können. Verschiedene Möglichkeiten zur Bereitstellung von Flexibilitäten sind im Infokasten dargestellt.

#### Infoblock: Generelle Flexibilisierungsmöglichkeiten und deren Funktionen

- **Abregelung**, um Überlastungen des (regionalen) Stromnetzes im Umfeld des Erzeugers zu vermeiden, die Netzinstabilitäten und im schlimmsten Fall einen Netzzusammenbruch zur Folge haben könnten.
- **Netzausbau**, der Zubau von Stromtrassen ermöglicht eine bessere Verteilung zwischen Erzeugern und Verbrauchern; je größer das Netz ist, desto besser gelingt eine Verteilung von Stromerzeugungsspitzen, sodass (regionale) Überlastungen damit vermieden werden. Hierdurch ergibt sich insgesamt eine Glättung im System.
- **Demand Side Management**, ein an das Stromangebot angepasster Verbrauch, sodass Erzeugung und Verbrauch im Ausgleich sind. Damit ergeben sich keine (regionalen) ungenutzten Überschussstromspitzen, die abgeregelt oder anderweitig gespeichert, verschoben oder genutzt werden müssten.
- **Supply Side Management**, angebotsseitige Maßnahmen wie variable Erzeugung von Strom sowie Ersatz und Erweiterung von Kraftwerkskapazität; erfasst u.a. Abregelung und Ausspeicherung.
- **Speicherung**, aktuell nicht benötigter Strom wird (u.U. durch Umwandlung in andere Energieformen) zwischengespeichert, bis er benötigt wird. Hierdurch ergibt sich eine zeitliche und räumliche Entkopplung von Stromerzeugung und -verbrauch, die zur Netzstabilität und Grundlastfähigkeit beiträgt.
- **Unterscheidung Kurzzeit- und Langzeitspeicher**: Kurzzeitspeicher gekennzeichnet durch hohen Zykluswirkungsgrad (min. 75%), aber geringes Speichervolumen; Langzeitspeicher (bislang) geringer Wirkungsgrad (<40 %) und großem Speichervolumen (vgl. VDE-Studie 2012).

### Angebotsseitige Maßnahmen

Konventionelle Kraftwerke, die mit fossilen Energieträgern (bzw. Biomasse) befeuert werden, bieten die Möglichkeit die Auslastung den Bedürfnissen des Abnehmermarktes anzupassen. Dieses ist von großer Bedeutung für die Qualität und Stabilität der Stromversorgung. In Zeiten geringerer Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien werden hierzu die steuerbaren fossil befeuerten Kraftwerke in ihrer Auslastung angehoben. Kommt es jedoch zu starker Einspeisung von EE, z.B. bedingt durch anhaltende Windperioden, müssen diese entsprechend in ihrer Last abgesenkt werden, da CO<sub>2</sub>-neutrale Energiegewinnungsverfahren gesetzlichen Vorrang bei der Einspeisung haben. Diese Art der Steuerung reicht beim aktuellen Anteil der EE zur Stabilisierung des Netzes aus.<sup>972</sup>

Bei einer weiteren, wie der geplanten Erhöhung der EE-Anteile reicht diese Möglichkeit der Kompensation nicht aus. Bereits heute kommt es in Zeiten geringer Abnahmen und gleichzeitiger anhaltender Windphasen zu einem deutlichen Überangebot, das vom Markt nicht abgenommen werden kann. Eine Möglichkeit in solchen Fällen zu reagieren, ist es die Windkraftanlagen bzw. PV-Anlagen abzuschalten. Dieser Lösungsansatz mag zwar für kurze Spitzen sinnvoll erscheinen, führt jedoch bei dauerhafter Abschaltung zu hohen Verlusten und Unwirtschaftlichkeit. Aus diesem Grund befasst sich der Bericht in den Optionen mit verschiedenen Möglichkeiten diesen Überschussstrom zu nutzen. Im Jahr 2010 sind bis zu 150 GWh Windstrom nicht genutzt worden, weil die Netzbetreiber

972 Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V (VDE) (Hg.): Energiespeicher für die Energiewende- Speichereungsbedarf und Auswirkungen auf das Übertragungsnetz für Szenarien bis 2050. (2012), S. 15.

Anlagen abschalten mussten.<sup>973</sup> In den Annahmen finden sich entsprechende Prognosen für die zukünftig zur Verfügung stehenden Mengen an Überschussstrom (vgl. Kapitel IV.4).

### Verbrauchsseitige Maßnahmen

Neben angebotsseitigen Maßnahmen wie dem gezielten Abschalten der Produktion von EE und dem Ausgleich durch konventionelle Kraftwerke bestehen auch Möglichkeiten auf der Abnehmerseite, um auf das volatile Stromangebot zu reagieren. Hierzu bieten sich nach heutiger Sicht zwei weitere Kompensationsmechanismen an. Der naheliegende Schritt wäre die Abnahmesituation an die Bereitstellung der EE zu koppeln. Demnach müsste in Sonnenperioden oder Windphasen die Abnahme entsprechend erhöht werden.

Die im letzten Abschnitt beschriebenen Verfahren mit hoher Energieintensivität und Teile der Elektrolyse lassen, wie beschrieben, durch ihre Auslegung eine volatile und spontane Fahrweise zu. Eine solche Steuerung des Stromverbrauchs nach Stromangebot ist Teil des sogenannten Demand Side Management (DSM), das im späteren Verlauf dieses Kapitels (IV.3.6) eingehender betrachtet und bewertet wird. Zusätzlich bietet es sich an, durch geeignete Speichertechnologien den überschüssig anfallenden Strom aus EE zu speichern, um ihn in Bedarfszeiten wieder abzugeben.

### Verteilnetze

Das Energienetz in Deutschland gehört im europäischen Verbund zum kontinentaleuropäischen Verbundnetz (UCTE-Netz). Dies bedeutet, dass der Strom als Wechselspannung im 220 kV- und 400 kV-Bereich verteilt wird. Dazu muss die Energie, die aus EE-Anlagen stammt, transformiert werden. Die bisherige Auslegung und der Ausbau des Verteilnetzes sind dahingehend optimiert, große Mengen Strom von den Produktionsstandorten in die Ballungszentren zu transportieren. Beim Stromnetz handelt es sich um einen reinen Verteilweg, der jedoch anders als z.B. ein Erdgasverteilstromnetz keine Speicherfunktion übernehmen kann.

Das zunehmend volatile Stromangebot erfordert einen Ausbau der Stromtrassen in Deutschland. Darüber hinaus würde ein großräumiger Stromtransport über alle westeuropäischen Regionen dazu führen, dass eine größere Bandbreite nutzbarer EE-Stroms vorläge. Beispielsweise wird im durch den Sachverständigenrat für Umweltfragen erstellten Szenario 2050 eine Vollversorgung durch erneuerbare Energien im Verbund mit Dänemark und Norwegen vorgesehen.<sup>974</sup> Durch entsprechende Steuerung und Verteilung stellt jedes Land selbst seine Versorgung mit Energie zu 100% sicher, muss dieses jedoch nicht zu jeder Zeit aus eigenem Land gewährleisten, sondern kann auf Überschüsse der Verbundpartner zurückgreifen.

### Intelligente Netze (Verknüpfung von Maßnahmen auf Angebots- und Verbraucherseite)

Auf nationaler Ebene wird in letzter Zeit vermehrt über die sogenannten „smart grids“, also intelligente Netze, welche die anfallenden Überschüsse durch Nutzung von Speichertechnologien und Steuerung von Kraftwerken (EE und fossil) bedarfsgerecht verteilen, gesprochen. Zu diesen Überlegungen gehört auch das virtuelle Kraftwerk, bei denen EE-Anlagen gekoppelt als ein Kraftwerk fungieren. Auch virtuelle Großspeicher, z.B. durch Nutzung von in der Ladung befindlichen Batterien der Elektrofahrzeuge oder Einbeziehung der Unterspannungs-versorgungsanlagen (USV-Anlagen) in Betrieben, werden betrachtet. Für solche Verbünde auf internationaler, nationaler oder regionaler Ebene ist jedoch die Forschung und Auswahl der entsprechenden Speichertechnologie und eine Bereitstellung einer optimalen Mischung zu wettbewerbsfähigen Kosten entscheidend für den Erfolg.

973 Bundesverband WindEnergie e.V.: Abschaltung von Windenergieanlagen um bis zu 69 Prozent gestiegen (01.11.2011).

974 Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU): Klimaverträglich, sicher, bezahlbar: 100 % erneuerbare Stromversorgung bis 2050 (05.05.2010).

### Speicherung und Rückverstromung durch Energiespeicher

Bei der Auswahl der jeweiligen Speichertechnologien ist zu beachten, dass verschiedene Speicherarten unterschiedliche Anforderungen und Qualitäten beinhalten. Durch die bereits genannten Volatilitäten und unterschiedlichen Quellen der EE bedarf es maßgeschneiderter und abgestimmter Speicher. Die jeweiligen Systeme unterscheiden sich in der Ladezeit, die sie zur Aufnahme der überschüssigen Energie benötigen, sowie der Reaktionszeit, mit der sie die gespeicherte Energie wieder abgeben können (Entladedauer). Hinzu kommen erhebliche Unterschiede bei der Aufnahmekapazität.

Die verschiedenen Speichertechnologien lassen sich danach in zwei Kategorien eingruppiert. Zum einen gibt es die Gruppe der Kurzzeitspeicher, zu denen Batterien, Pumpspeicher und Druckluftspeicher mit ihren eher geringen Speichervolumina<sup>975</sup> zählen. Hier kommt es meist auf eine schnelle Energieaufnahme und -bereitstellung an. Charakteristisch für diese Art der Speicher ist ihre recht hohe Zahl der Be- und Entladungszyklen. Zum anderen gehören zu der als Langzeitspeicher bezeichneten Gruppe Lösungen mit großen Speicherpotenzialen wie z.B. die Umwandlung von Strom in chemische Produkte, durch PtG/PtC wie z.B. Methan, Wasserstoff oder dergleichen. Die Wirtschaftlichkeit eines Speichers ergibt sich durch die Investitionskosten und die Vergütung der realisierbaren Zyklen. Diese Notwendigkeit des Be- und Entladens kann jedoch auch wirtschaftlich problematisch werden, indem Speichertechnologien durch eine fortschreitende Vergleichmäßigung der Versorgung des Strommarktes nicht mehr wirtschaftlich betrieben werden können (Beladen in Überschusszeiten „günstig“ → Entladen in Mangelzeiten „teuer“).

Eine Speicherung der Überschussenergie ist zentral in der Nähe der Erzeugung oder dezentral über ein entsprechendes Verteilnetz denkbar. Letzteres kann, je nach Auslegung nicht nur die Volatilität der einzelnen Energieart vor Ort ausgleichen, sondern auch zu einem regionalen Ausgleich führen. Solche Konzepte sind besonders im Hinblick auf Deutschland bzw. europaweite Konzepte interessant.

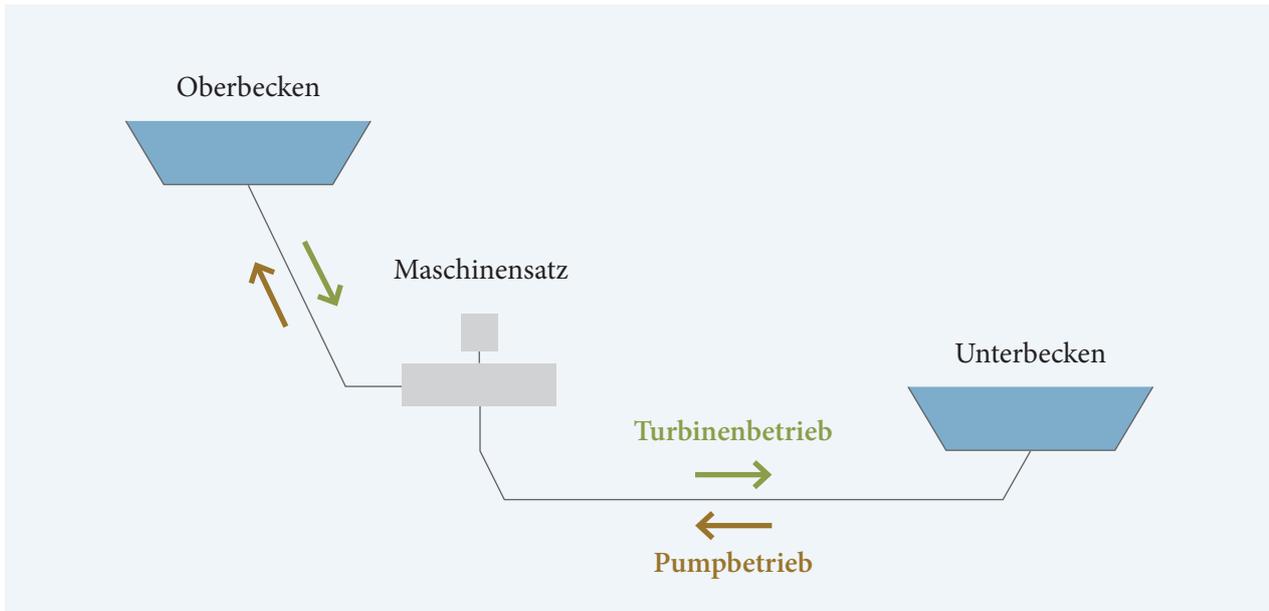
### IV.3.2 Mechanisch/Kinetische Speicher

Zu den mechanischen bzw. kinetischen Energiespeichern zählen Pumpspeicher, Lagespeicher, Schwungradspeicher und Druckspeicher.

Das Wirkprinzip aller Pumpspeicherkraftwerke ist recht ähnlich und beruht auf dem Anheben von Wasser auf ein höheres Energieniveau und späterem Ablassen bei gleichzeitiger Freisetzung der Energie (vgl. Abbildung 87). In Zeiten von überschüssigem oder kostengünstigem Stromangebot wird hierzu mittels Pumpen Wasser aus einem Wasserlauf oder tiefergelegenen Becken in ein höher gelegenes Becken gepumpt. Die so gespeicherte Energie kann im Bedarfsfall freigesetzt werden, sobald das Wasser durch Rohrleitungen geleitet wieder in das untere Becken abfließt und dabei Turbinen bzw. Stromaggregate antreibt. Der Wirkungsgrad solcher Pumpspeicher liegt nach Abzug aller Verluste durch Reibung, Verdunstung etc. zwischen 70% und 80%.<sup>976</sup>

975 Rundel, Paul et al.: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits-, und Energietechnik (UMSICHT) (Hg.): Speicher für die Energiewende. (2013), S. 25 ff.

976 ebd., S. 25.

Abbildung 87: Funktionsschema Pumpspeicherkraftwerk<sup>977</sup>

Entscheidend für die Qualität eines Speichers ist neben der Beckengröße und der damit verbundenen Kapazität auch die Fallhöhe, aus der das Wasser abfließen kann. Diese Lagedifferenz ist maßgeblich für die Energiedichte und liegt bei aktuell errichteten Höhen (70 m – 600 m) bei 200 bis 1.600 Wh/m<sup>3</sup>.<sup>978</sup>

Aufgrund dieser Tatsachen ist eine Errichtung solcher Pumpspeicher nur unter gewissen geomorphologischen Randbedingungen sinnvoll bzw. wirtschaftlich. Für den deutschen Raum bedeutet dieses, dass nur in den Voralpenbereichen und deutschen Mittelgebirgen eine Errichtung sinnvoll erscheint, wobei bereits zum heutigen Zeitpunkt nahezu alle Möglichkeiten der Errichtung ausgeschöpft sind. Neue Ansätze befinden sich aktuell im Versuchsstadium und werden später im Kapitel unter den Optionen näher betrachtet. In Deutschland sind derzeit 33 Pumpspeicher im Einsatz und halten damit eine Kapazität von 0,04 TWh bei einer Leistung von 6,61 GW vor. Das größte wurde 2003 in Goldisthal (Thüringen) errichtet. Es hat eine Leistung von rund 1000 MW bei einer Kapazität von knapp 8500 MW/h. Damit nimmt es auch im europäischen Vergleich einen vorderen Rang ein. In NRW liegen aufgrund der geomorphologischen Gegebenheiten lediglich drei kleinere und ältere Pumpspeicher im Sauerland mit einer Gesamtleistung von 300 MW und einer Kapazität von ~ 1500 MW/h.<sup>979</sup>

Ein Grundproblem als Eignung zur Speicherung von Überschussstrom aus EE ist jedoch, dass durch die geografische Lage der Speicher eine direkte Einspeisung z.B. der Windparks der Küstenregionen nicht möglich ist. Eine dazu dringend benötigte Netztrasse und das entsprechende Verteilnetz sind jedoch in der Bevölkerung nur schwer durchsetzbar und bisher nicht realisiert. Somit werden diese Speicher aktuell hauptsächlich in den Stromclustern vor Ort gespeist und genutzt. Selbst jedoch bei einer direkten Anbindung der Windparks würde die Kapazität der heute bestehenden Pumpspeicher nicht ausreichen, um die anfallende Überschussenergie aufnehmen zu können.

977 Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE) (Hg.): Funktionsschema Pumpspeicherkraftwerk. (2008).

978 Rundel, Paul et al.: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits-, und Energietechnik (UMSICHT) (Hg.): Speicher für die Energiewende. (2013), S. 26.

979 ebd., S. 25 ff.

Neue Ideen zu Pumpspeichern kommen jedoch aus den deutschen Stein- und Braunkohleabbaugebieten. Hier wird nach intelligenten Nachnutzungen der durch den Bergbau entstandenen geologischen und geomorphologischen Gegebenheiten gesucht. Mehrere Projektgruppen untersuchen zu diesem Zweck z.B. die Nutzung von ehemaligen Stollen zu Unterflurpumpspeichern (Universität Duisburg-Essen) oder auch den Umbau von Braunkohleabbauflächen zu Ober- und Unterbecken mit der Nutzung als Pumpspeicher (RWTH Aachen, Prof. Schüttrumpf).<sup>980</sup>

Eine den Pumpspeichern im Wirkprinzip recht ähnliche Speichermethode ist der sogenannte Lagespeicher, in dem große Energiemengen durch das Anheben von Gesteinsmassen gespeichert werden. Diese recht neue Idee beruht auf der Limitierung geeigneter Flächen bzw. Regionen zur Installation von weiteren Pumpspeichern. Der Wirkungsgrad von Lagespeicher soll nach Berechnungen ähnlich dem der Pumpspeicher bei 80% liegen.<sup>981</sup>

Schwungradspeicher sind ebenso wie die Pumpspeicher eine etablierte Technik, um Energie zwischenspeichern. Aufgrund ihres Aufbaus unterscheiden sie sich jedoch erheblich im Einsatzbereich.

In Schwungradspeichern wird Energie als kinetische Energie gespeichert. Durch z.B. einen Elektromotor in Rotation versetzt, dreht sich das Schwungrad stabil um die eigene Achse. Wird die Energie wieder benötigt, wird mithilfe des Schwungrades der Elektromotor als Dynamo gepolt und die dabei gewonnene elektrische Energie wieder freigesetzt. Aufgrund der möglichen Reibungsverluste in der Lagerung oder der Umgebungsluft werden moderne Schwungräder meist magnetisch, also freischwebend gelagert und im Vakuum betrieben. So aufgebaute Schwungradspeicher haben einen Wirkungsgrad von bis zu 95% und lassen sich tiefentladen.<sup>982</sup>

Bauartbedingt haben solche Speicher jedoch einen großen Ruheverlust. Wird die Energie also nicht direkt abgerufen, verliert der Speicher durch die ungenutzte Rotation einen Teil seiner gespeicherten Energie. Aufgrund dieser Tatsache eignen sich Schwungradspeicher besonders für den Einsatz direkter, kurzfristiger Umwandlung. Besonders im Bereich der Primärregelung eignen sie sich hervorragend, da sie zum einen schnell geladen, zum anderen aber auch im Millisekundenbereich ihre Energie wieder bereitstellen können.<sup>983</sup>

---

980 Pummer, Elena; Schüttrumpf, Holger (Hg.): Wasser als Energieträger 43. IWASA (Internationales Wasserbau-Symposium Aachen 2013). (2013).

981 Lingenhöhl, Daniel: Speichertechnik – Ein Granitblock voller Energie unter: <http://www.spektrum.de/news/ein-granitblock-voller-energie/1061069> (2011).

982 Rundel, Paul et al.: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits-, und Energietechnik (UMSICHT) (Hg.): Speicher für die Energiewende. (2013), S. 31.

983 ebd., S. 31.

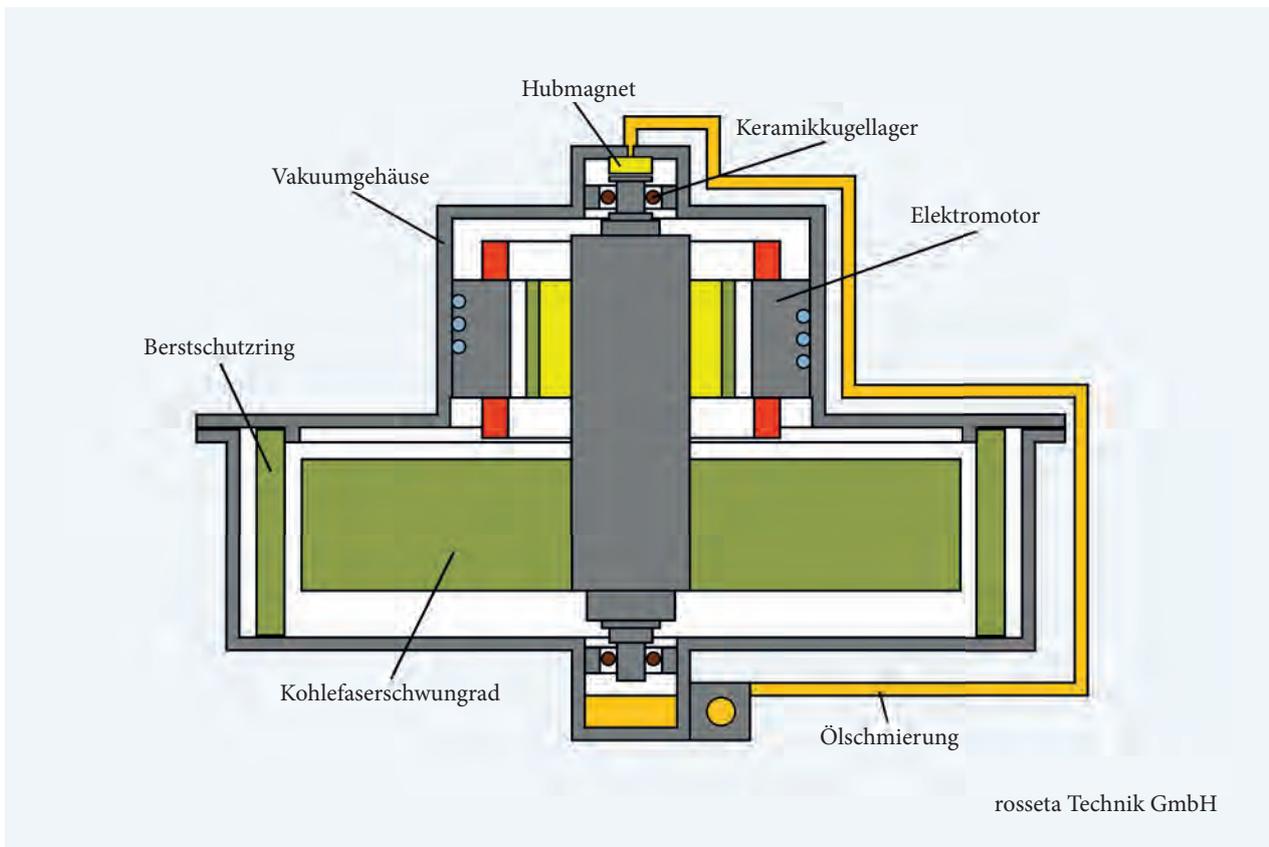


Abbildung 88: Prinzip Schwungradspeicher<sup>984</sup>

Eines der wohl interessantesten Anwendungsfelder der Zukunft wird der private und öffentliche Personennahverkehr sein.<sup>985</sup> Hier bieten sich solche Speicher an, die bei jedem Bremsvorgang anfallende Energie aufzunehmen und im späteren Fahrbetrieb wieder abzugeben. Jedoch sind auch zahlreiche Anwendungen in der Industrie etabliert und für die Zukunft weiter ausbaubar.

Die Energiedichte solcher Schwungräder ist abhängig von ihrer Größe, den Drehzahlen und schlussendlich der eingesetzten Materialien. Sie beginnt mit 5 Wh/kg für konventionelle Schwungräder aus metallischen Werkstoffen und geringen Drehzahlen und reicht bis zu Energiedichten von 100 Wh/kg für hochmoderne Schwungräder aus Faserverbundwerkstoffen und bis zu 100.000 U/min.<sup>986</sup>

Amerikanische Hersteller haben in 2012 damit begonnen mehrere einzelne Schwungräder in einem Cluster zu koppeln. Die so als Verbund geschalteten Räder haben eine Gesamtleistung von 4 MW und gingen 2014 ans Netz<sup>987</sup>. Experten gehen davon aus, dass solche Anlagen auch geeignet sind, um kurzzeitige Überschüsse aus PV oder Windkraft aufzunehmen und Spitzen zu glätten.<sup>988</sup> Effizienzsteigerungen und Ausbaupotenziale sind für diese Technologie auch in Zukunft zu erwarten. Systemlösungen sind bereits heute erhältlich. Die in NRW ansässige Firma STORNETIC bietet bereits

984 rosseta Technik GmbH: Prinzip Schwungradspeicher.

985 Rundel, Paul et al.: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits-, und Energietechnik (UMSICHT) (Hg.): Speicher für die Energiewende. (2013), S. 31.

986 ebd., S. 30.

987 EnergieAgentur.NRW: Schwungmassespeicher unter: <http://www.energieagentur.nrw.de/schwungmassespeicher-22991.asp> (2015).

988 Rundel, Paul et al.: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits-, und Energietechnik (UMSICHT) (Hg.): Speicher für die Energiewende. (2013), S. 30.

heute modular aufgebaute Anlagen an. Hier kann je nach Einsatzzweck und benötigter Energie eine den individuellen Ansprüchen entsprechende Anlage gestellt werden.<sup>989</sup>

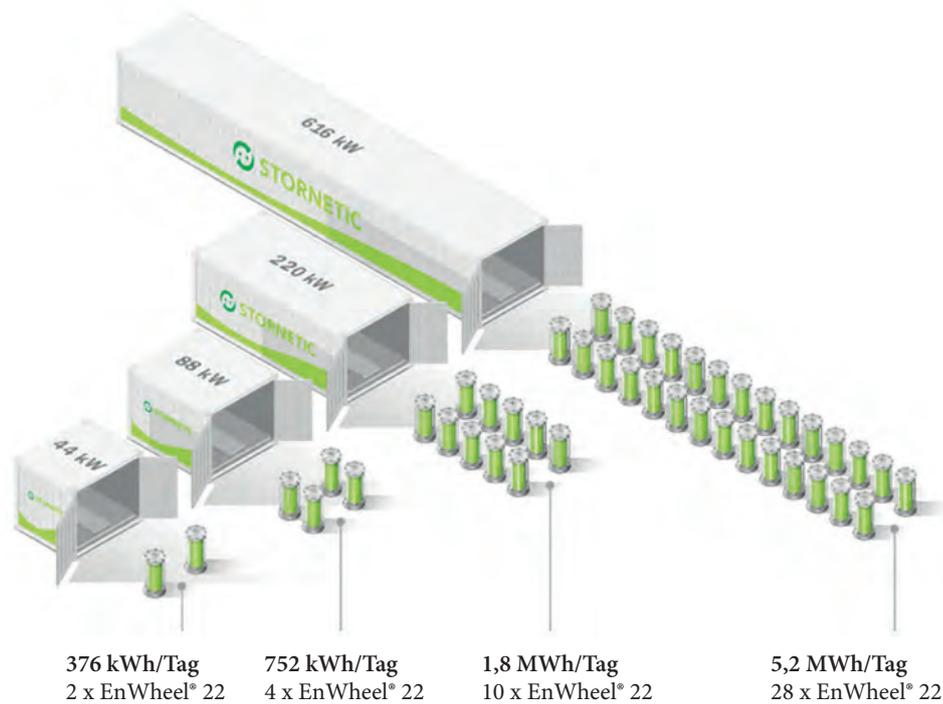


Abbildung 89: Bedarfsgerechte Schwungradspeicher-Lösungen<sup>990</sup>

Druckspeicher sind eine weitere Möglichkeit überschüssige Energie zu speichern und bei Bedarf wieder abzugeben. Aufgrund ihrer Beschaffenheit eignen sich Druckspeicher für eine Bereitstellung im Tertiärbereich bzw. der sogenannten Minutenreserve. Bisher wurden weltweit zwei Druckluftspeicherkraftwerke realisiert. Eines davon steht in Huntorf (Niedersachsen) und wird von E.ON betrieben. Die Nähe zu deutschen Windparks macht es auch für die Speicherung von Überschüssen aus Wind durchaus interessant.

Bei einem Druckluftspeicherkraftwerk wird Luft komprimiert und in unterirdische Kammern geleitet. Damit ein vorzeitiges Entweichen vermieden und ein ausreichender Druckaufbau gewährleistet werden kann, nutzt man als Hohlraum durch das Soleverfahren geschaffene, abgeschlossene, ausgefaltete Kavernen im Untergrund. Diese Kavernen können eine Größe von bis zu 1.000.000 m<sup>3</sup> erreichen und bieten somit ausreichend Vorhaltekapazität zur Speicherung. Zur Freisetzung der Energie wird über Ventile die Druckluft definiert entlassen und treibt dabei Turbinen an, welche die Energie in Strom umwandeln. Die Leistungsdaten für Huntorf liegen bei einer Kapazität von 150.000 m<sup>3</sup> bei vorherrschenden Drücken von 46-66 bar. Mit einer typischen Energiedichte zwischen 1-2 kWh/m<sup>3</sup> hat Huntorf eine Leistung von ~300MW.<sup>991</sup>

Da sich die Luft bei der Kompression stark erwärmt (bis zu 650°C), bergbaurechtlich jedoch nur eine Einleitung von maximal 50°C warmer Luft gestattet ist, muss diese vor Eintritt in die Kavernen abgekühlt werden. In beiden existierenden Kraftwerken wird diese Wärme derzeit an die Umgebung

989 Stornetic GmbH: Stored Power.

990 Stornetic GmbH: Bedarfsgerechte Schwungradspeicher-Lösungen.

991 Rundel, Paul et al.: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits-, und Energietechnik (UMSICHT) (Hg.): Speicher für die Energiewende. (2013), S. 28.

abgegeben und geht dem Kreislauf verloren. Bei Austritt aus den Kavernen muss die sich entspannende und kalte Luft vor Eintritt in die Turbine erwärmt werden. Durch die extern zugeführte Heizenergie und die sich ergebenden Verluste erreicht ein Druckluftspeicherkraftwerk lediglich einen Wirkungsgrad von  $\sim 50\%$ .<sup>992</sup>

Der hohe Verlust durch Abkühlen und Aufheizen der komprimierten und entspannten Luft wird durch neue Konzepte verhindert. Bei den als adiabatische Druckspeicher bezeichneten Verfahren wird die bei der Komprimierung entstehende Abwärme entnommen und in Form von Fest-/Flüssigspeichern zusätzlich zwischengespeichert. Die so fixierte Wärmeenergie kann bei der Entspannung der Luft vor dem Eintritt in die Turbine zur Aufwärmung genutzt werden. So betriebene Druckspeicher haben einen theoretischen Wirkungsgrad von  $70\%$ .<sup>993</sup> Eine Umsetzung ist bisher nicht erfolgt, jedoch befinden sich diese Speicher bereits in einer fortgeschrittenen Konzeptphase. Die Wirtschaftlichkeit wird unterschiedlich beurteilt.

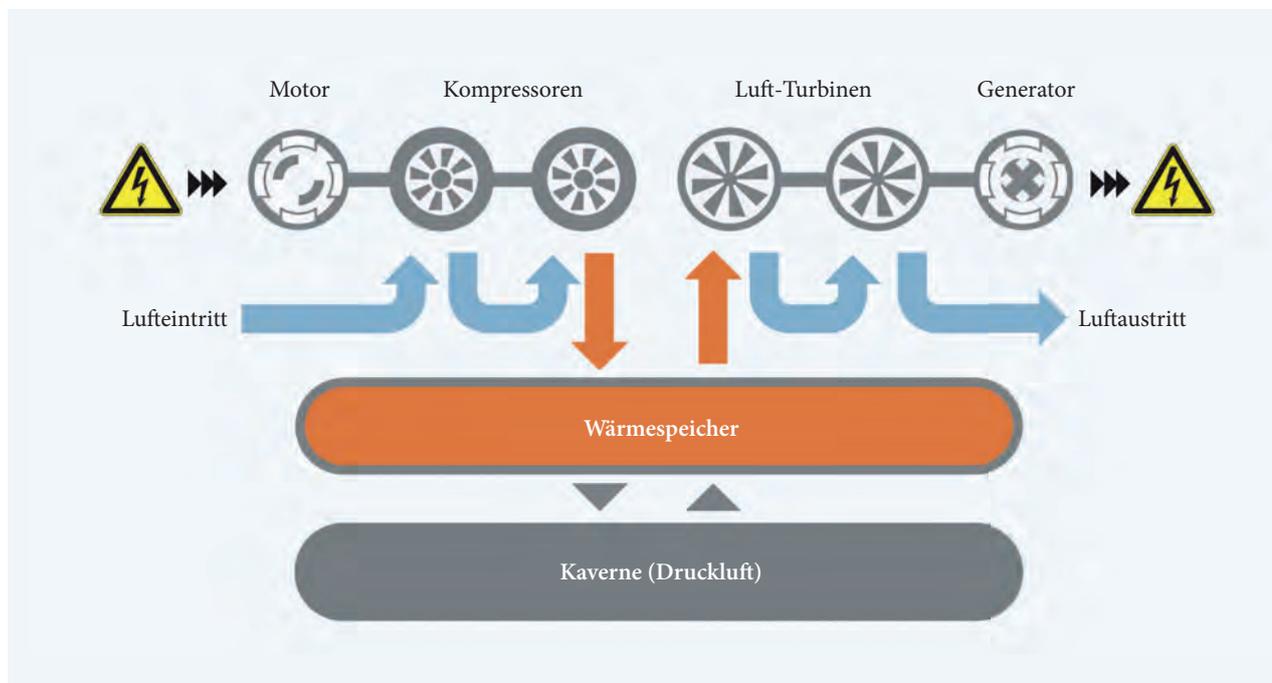


Abbildung 90: Darstellung Prinzip adiabatischer Druckluftspeicher<sup>994</sup>

Die Druckluftspeicherung in Kavernen steht in Konkurrenz zur dortigen Speicherung von Gasen wie Wasserstoff und Methan. Diese Gase lassen sich ebenso wie Druckluft in unterirdischen Kavernen speichern und bieten im Fall des Wasserstoffes eine etwa 60-mal höhere Speicherdichte. Näheres zu den Speichermedien wie Wasserstoff wird in den nachfolgenden Kapiteln zu PtG/PtC (Kapitel IV.3.5) betrachtet.

992 ebd., S. 28.

993 Landinger, Hubert: Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST) (Hg.): Energiespeicher in Stromversorgungssystemen mit hohem Anteil Erneuerbarer Energien. (2010), S.23.

994 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – DLR: Darstellung Prinzip adiabatischer Druckluftspeicher unter: <http://www.dlr.de/Portaldata/1/Resources/standorte/stuttgart/ADELE-Schema-gross.jpg>.

### IV.3.3 Wärmespeicher

#### Bedeutung von Wärme

Der Wärmebedarf in Deutschland wurde für das Jahr 2010 mit 1.335 TWh angegeben. Wärme wird als Raumwärme (51%), für die Industrie als Prozesswärme (40%) oder zur Bereitstellung von Warmwasser (9%) genutzt.<sup>995</sup>

Durch den sehr hohen Endenergiebedarf in Form von Wärme in Deutschland (50% der Energienutzung) sind Wärmespeicher ein wesentliches Element des Energieversorgungssystems.<sup>996</sup> Folglich sind Energieumsatzbetrachtungen vorzunehmen, die sowohl Fragen der Strom- als auch die Wärmespeicherung beinhalten.<sup>997</sup> 300 TWh Wärme pro Jahr werden in Industrieprozessen, Müllverbrennungs- und Biogasanlagen an die Umwelt abgegeben. Zur Nutzung dieser Wärme machen Wärmespeicher eine Entkopplung von Wärmeeinfall und Wärmebedarf möglich.<sup>998</sup>

#### Anfall von Wärme

Wärme kann auf verschiedenen Wegen erzeugt werden. Sie kann mittels Hochspannungselektrodenkesseln, Tauchsiedern, Wärmepumpen oder Induktionsschmelzöfen aus elektrischer Energie erzeugt werden. Bei der Umwandlung von Licht in Wärme wird z.B. in solarthermischen Anlagen Sonnenstrahlung auf ein beheizbares Rohr mit einem Wärmespeichermedium gebündelt, sodass es sich erhitzt.

Wärme kann auch als industrielle Prozessabwärme bei vielen Stoff- und Energieumwandlungsprozessen anfallen. Die Diskrepanz zwischen zeitlichem und geografischem Abwärmeangebot und -nachfrage führt dazu, dass Abwärme an die Umwelt abgegeben wird.

#### Arten von Wärmespeichern

Die Wege der Wärmespeicherung können sowohl für den industriellen Bereich als auch für den privaten und gewerblichen Bereich beschrieben werden:<sup>999</sup>

##### Industrieller Bereich

- Transformation von überschüssiger Niedertemperaturabwärme (unter 100°C) in Prozesswärme über 100°C,
- Betrieb von großdimensionierten Wärmespeicher,
- verbessertes Wärmemanagement;

##### Privater/gewerblicher Bereich

- Einspeisung in dezentrale Wärmeverteiler (Heizungen),
- Einspeisung in dezentrale Warmwassertanks.

995 Agentur für Erneuerbare Energien; BEE: Entwicklung des Wärmebedarfs in Deutschland unter: [http://www.bee-ev.de/\\_medi/en/energieversorgung/waermeversorgung2020/EE\\_02\\_Entwicklung\\_Waermebedarf\\_2000-2020\\_web.jpg](http://www.bee-ev.de/_medi/en/energieversorgung/waermeversorgung2020/EE_02_Entwicklung_Waermebedarf_2000-2020_web.jpg) (2009)

996 Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH); Sauer, Dirk Uwe: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Energiespeicher“ der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2014), S. 2.

997 Markowz, Georg (Evonik Industries AG); Landtag NRW (Hg.): Enquetekommission II Protokoll 15. Sitzung (nichtöffentlich) Anhörung „Energiespeicher“. (2014), S. 25.

998 Evonik Industries AG; Markowz, Georg: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Energiespeicher“ der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2014), S. 8.

999 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR); Tamme, Rainer: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Energiespeicher“ der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2014), S. 1.

Bei Wärmespeichern kann zwischen sensiblen und latenten Wärmespeichern unterschieden werden. Sensible Wärmespeicher nehmen die Wärme auf, indem sie sich selbst erhitzen. Latentwärmespeicher nehmen die Wärme auf und wandeln sie durch Prozesse auf molekularer Ebene wie Wechseln des Aggregatzustands des Wärmespeichermediums um. Durch Umkehrung dieser Prozesse kann die Wärme wieder gewonnen werden.

Ein ähnliches Prinzip gilt für die thermochemischen Speicher, die die Wärmeenergie in umkehrbare, energieerfordernde, chemische Reaktionen umsetzen, die bei Rückreaktion wieder Wärme freisetzen. Die chemische Industrie kann als Großabnehmer von Wärme und mit ihrer Materialkompetenz einen Beitrag zu Wärmespeicherlösungen bieten.

#### IV.3.3.1 Sensible Wärmespeicher

Die Fähigkeit eines Stoffs, Wärme bei einer bestimmten Temperatur aufzunehmen, wird als Wärmekapazität bezeichnet.

Die Möglichkeiten der sensiblen Wärmespeicherung sind an die Temperatur gebunden.<sup>1000</sup> Technisch wird zwischen Niedertemperatur- (bis 100°C) und Hochtemperaturwärmespeichern (ab 100°C) unterschieden.

Für alle Arten der sensiblen Wärmespeicherung gilt, dass sie durch ihre Oberfläche Wärmeenergie an die Umgebung abgeben. Eine Verringerung der Oberfläche kann durch eine Vergrößerung des Speichervolumens vollzogen werden. Durch eine solche Beeinflussung des Oberflächen-Volumen-Verhältnisses nimmt der Speicherwirkungsgrad sensibler Speicher zu. Für Langzeitspeicher, die die Wärme lange speichern sollen, kommen also nur solche mit großen Volumina infrage:<sup>1001</sup>

- große Heißwasser-Wärmespeicher,
- große Kies-Wasser-Wärmespeicher,
- Erdsonden und Aquifer-Wärmespeicher<sup>1002</sup>.

#### Niedertemperaturwärmespeicher

Als Niedertemperaturwärmespeicher kommen Wasser, Beton, Thermoöle und Salze infrage, deren Schmelzpunkt unter 100°C liegen. Die direkte, sensible Wärmespeicherung im Niedertemperaturbereich erfolgt häufig durch das Speichermedium Wasser<sup>1003</sup>, das eine hohe spezifische Wärmekapazität (Wärmeaufnahmevermögen) hat und gleichzeitig durch seinen flüssigen Aggregatzustand leicht zu transportieren ist. So kann eine Einspeisung in das Fernwärmenetz erfolgen, wenn der Wärmeträger Wasser ist. Die Verluste gängiger sensibler Wärmespeicher werden mit 1-5% pro Tag angegeben.<sup>1004</sup>

---

1000 Tamme, Rainer (DLR, Stuttgart), Anhörung der Enquete-Kommission II zur 15. Sitzung am 14.03.2014 (nÖEKPr 16/19), S. 8.

1001 Tamme, Rainer: Wärmespeicher: Sonne, Wind und Abwärme sammeln. In: Von Kohlehalden und Wasserstoff: Energiespeicher – zentrale Elemente der Energieversorgung (2013).

1002 Warmwassereinleitung in (wasserführende) Gesteinsschichten.

1003 ebd.

1004 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR); Tamme, Rainer: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Energiespeicher“ der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2014), S. 1.

### Hochtemperaturwärmespeicher

Zur Speicherung von Prozessdampf in der Brauerei-, Lebensmittel-, Papier- und Baumaterialindustrie werden Gefällespeicher verwendet, in denen Abdampf in einen Behälter mit siedendem Wasser geblasen wird. Unter erhöhtem Druck von bis zu 20 bar kann Wasser auf diese Weise Wärme bis zu 220°C speichern.

Als sensible Hochtemperaturspeicher kommen unter anderem Beton und Flüssigmetalle infrage. Forschung im Bereich des temperaturfesten Betons könnte Speicheranwendungen für bis zu 400°C ermöglichen.<sup>1005</sup>

Hochtemperatur-Wärmespeicherung findet bereits in industriellem Maßstab Anwendung. Zur Speicherung der Prozesswärme in Stahlwerken kommen zum Beispiel feuerfeste mineralische Materialien infrage, die in aufgebauten Gitterwerken gasförmige Wärme eines durchströmenden Windes (Winderhitzer) aufnehmen, später an kalten Frischluftstrom abgeben und als Aktivierungsenergie für den Verhüttungsprozess genutzt werden.

#### IV.3.3.2 Latentwärmespeicher

Latentwärmespeicher machen sich die Übergänge der Aggregatzustände fest, flüssig und gasförmig zu eigen. In einem gasförmigen Stoff steckt in der Regel mehr Energie als in einem flüssigen, in einem flüssigen mehr als in einem festen.

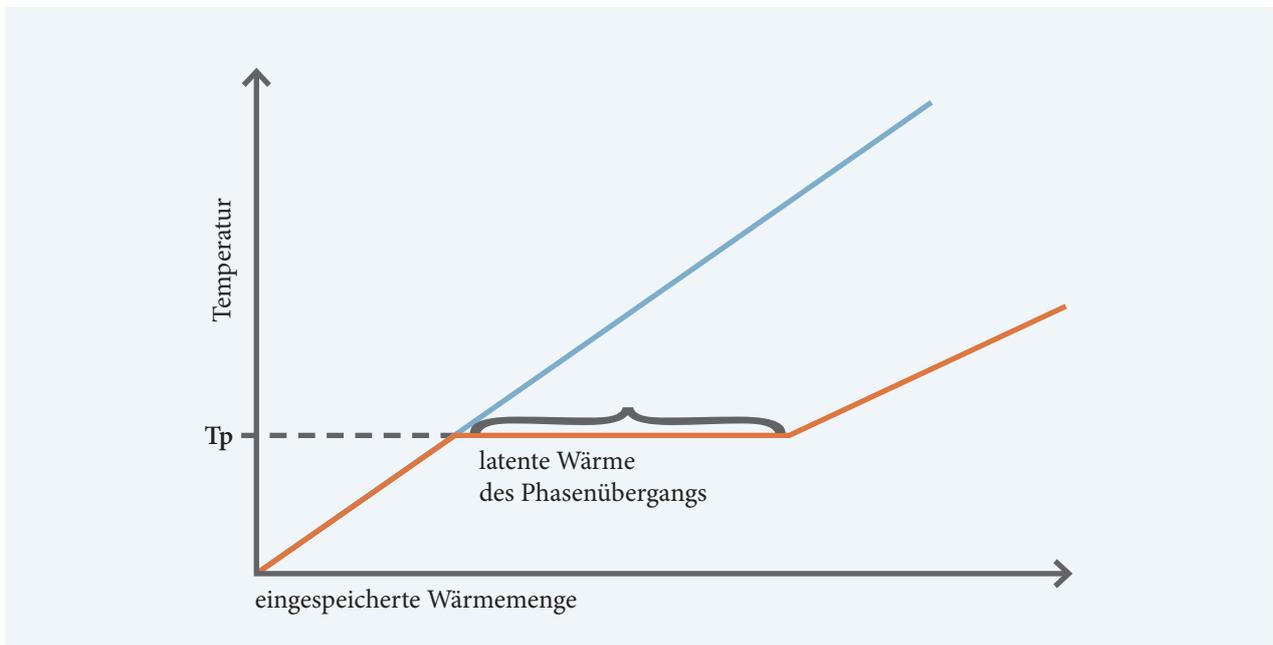


Abbildung 91: Vergleich Latentwärmespeicher (roter Verlauf) und sensibler Wärmespeicher (blauer Verlauf)<sup>1006</sup>

Abbildung 91 zeigt in der blauen Linie den Temperaturanstieg eines Mediums durch Energieeintrag. Es handelt sich um einen sensiblen Energiespeicher.

Beim Latentwärmespeicher kommt es dann nicht zu einer Temperaturerhöhung bei Energieeintrag (rote Linie), wenn ein Stoff von einem energiearmen in einen energiereichen Aggregatzustand

1005 Tamme, Rainer: Wärmespeicher: Sonne, Wind und Abwärme sammeln. In: Von Kohlehalden und Wasserstoff: Energiespeicher – zentrale Elemente der Energieversorgung (2013).

1006 Solar Server: Vergleich Latentwärmespeicher (roter Verlauf) und sensibler Wärmespeicher (blauer Verlauf) unter: <http://www.umweltdatenbank.de/img/latent.gif>.

wechselt (z.B., wenn Eis bei 0°C unter Erhitzen zu Wasser wird). Der Eintrag der Wärmeenergie äußert sich nicht in einer Temperaturerhöhung (latente Speicherung). Bei der Umkehrung des Vorgangs wird die gespeicherte Energie wieder in Wärme abgegeben.

Als latente Wärmespeicher kommen infrage:<sup>1007</sup>

- Salzhydrate (30-80°C),
- Paraffine (10-60°C),
- Fettsäuren (bis 110°C),
- Salze allgemein (über 130°C),
- Alkalisalze (100-1.000°C).

Die Energiedichte von latenten Energiespeichern kann bis zu 120 kWh/m<sup>3</sup> betragen. Latentwärmespeicher befinden sich für die häusliche Wärmespeicherung im Pilotanlagenstadium. Im Anlagenbau kommt latente Wärmespeicherung bereits zum Einsatz.

#### IV.3.3.3 Thermochemische Energiespeicher

Thermochemische Speicher speichern Wärme in Verbindungen, die in wärmeconsumierenden, chemischen Reaktionen entstehen. Wenn der Reaktionsverlauf reversibel ist, kann die Wärme durch die Umkehrreaktion wieder freigesetzt werden.

Da der Wärmeverbrauch einer chemischen Reaktion in der Regel größer ist als bei dem Wechsel von Aggregatzuständen, haben thermochemische Speicher ein besseres Wärmespeichervermögen als sensible oder Latentwärmespeicher<sup>1008</sup> (5- bis 10-mal höhere Speicherdichte als sensible Wärmespeicher, 3- bis 5-mal höhere als Latentwärmespeicher<sup>1009</sup>). Der wirtschaftlich-technische Umsetzungsgrad liegt im Bereich der Grundlagenforschung.

Besonders geeignet sind Reaktionen, bei denen gasförmige Reaktionsprodukte entstehen, die dem Speichersystem entzogen und dann durch Rückreaktion bei Bedarf wieder Wärme erzeugen.<sup>1010</sup>

Eine weitere Form der thermochemischen Energiespeicherung ist die Sorptionsspeicherung. Sorptionsspeichermedien sind zum Beispiel Zeolithe, Silikate oder Metallhydride. Diese Materialien sind hochporös und haben somit eine große innere Oberfläche, auf der Wassermoleküle adsorbieren können. Durch sie wird ein Arbeitsmedium geleitet, das sich an das Speichermedium adsorbieren oder absorbieren kann. Wird dem Sorptionsspeicher Wärme zugeführt, so desorbieren die Wassermoleküle. Wird der Speicher wieder befeuchtet, wird Wärme freigesetzt.

Sorptionsspeicher werden bisher nur im Pilotmaßstab betrieben (Metallhydride bei < 500°C, Zeolithe < 300°C, Silicagele bei < 100°C). Sie verfügen über die höchste potenzielle Energiedichte für Wärmespeicher (Energiedichte 200-500 kWh/m<sup>3</sup>).<sup>1011</sup>

---

1007 Agentur für Erneuerbare Energien: Erneuerbare Wärme – Klimafreundlich, wirtschaftlich, technisch ausgereift. In: *Renews Spezial* (2009), 18, S. 17.

1008 Tamme, Rainer; Bauer, Thomas; Buschle, Jochen; Laing, Doerte; Müller-Steinhagen, Hans; Steinmann, Wolf-Dieter: Latent heat storage above 120°C for applications in the industrial process heat sector and solar power generation. In: *International Journal of Energy Research* (2008), 3, S. 264–271.

1009 Tamme, Rainer: Wärmespeicher: Sonne, Wind und Abwärme sammeln. In: *Von Kohlehalden und Wasserstoff: Energiespeicher – zentrale Elemente der Energieversorgung* (2013), S. 44.

1010 ebd., S. 44f.

1011 ebd. S. 19f.

Für die Nutzung von thermochemischen Wärmespeichern müssen mithilfe der Materialkompetenz der chemischen Industrie noch geeignete Reaktionssysteme mit den nötigen verfahrens- und wärmetechnischen Grundlagen gefunden werden.<sup>1012</sup>

#### IV.3.4 Batterien

Batterien sind elektrochemische Reaktoren. Ihre Wirkungsweise entspricht der einer elektrochemischen Zelle.

Batterien bestehen aus zwei Elektroden, die in ein flüssiges Transportmedium (den Elektrolyten) eingetaucht sind (vgl. Abbildung 92). Wenn ein äußerer Spannungsabnehmer angelegt wird, sind die Elektroden gegenteilig geladen. Die positive Elektrode wird zur Kathode und die negativ geladene zur Anode. An der Oberfläche der Elektroden finden elektrochemische Reaktionen statt, die eine Spannung erzeugen, die elektrisch nutzbar gemacht werden kann. Man spricht von einer Primärzelle.

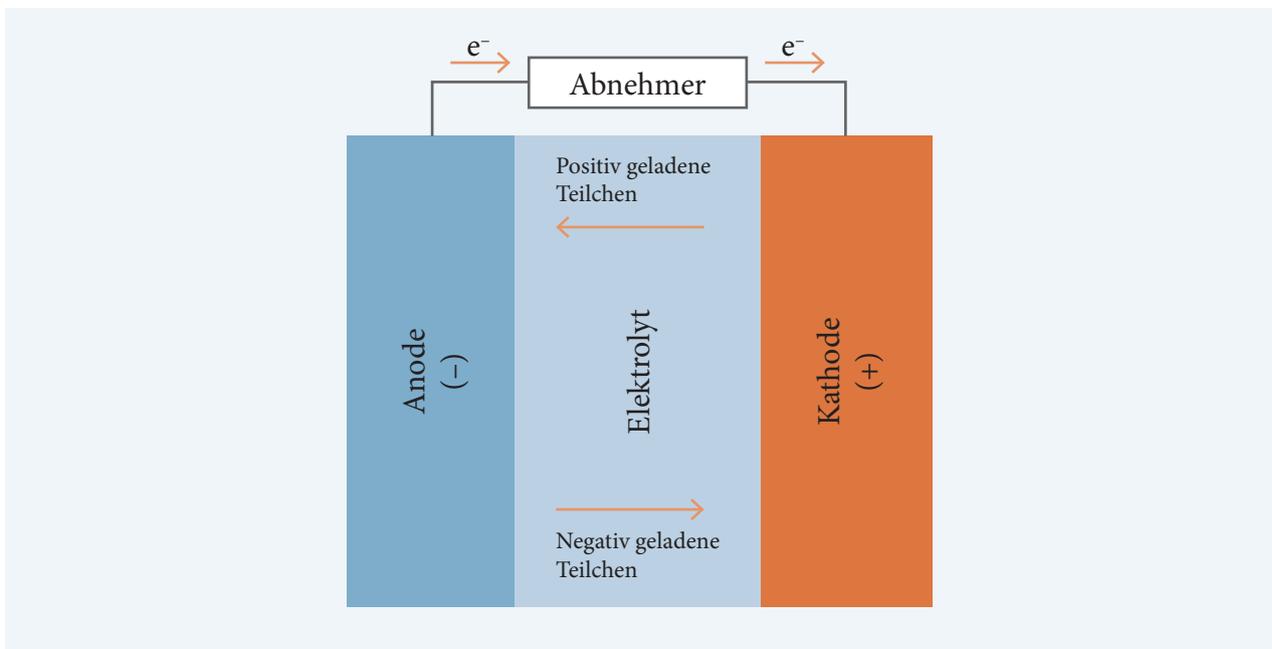


Abbildung 92: Schematischer Aufbau einer Batterie im Entladezustand

Ist die Zelle so konstruiert, dass man den Lade-Entlade-Vorgang wiederholen kann, werden sie Sekundärzellen genannt. Beim Laden ruft der Strom eine elektrochemische Reaktion hervor. Die dabei entstehenden Stoffe sind energetisch höherwertiger als die Ausgangsstoffe. Beim Entladen wird diese Reaktion umgekehrt, wobei die höherwertigen Stoffe unter Stromgewinnung abreagieren. Die Teilchen der reagierenden Stoffe sind im flüssigen Elektrolyten beweglich. Laden/Entladen ist teilweise irreversibel, weswegen die Lebensdauer konventioneller Batterien auf einige Tausend Zyklen beschränkt ist.<sup>1013</sup>

1012 Tamme, Rainer: Wärmespeicher: Sonne, Wind und Abwärme sammeln. In: *Von Kohlehalden und Wasserstoff: Energiespeicher – zentrale Elemente der Energieversorgung* (2013), S. 44.

1013 Schmidt, Volkmar M.: *Elektrochemische Verfahrenstechnik: Grundlagen, Reaktionstechnik, Prozessoptimierung*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2003). ISBN 978-3-527299-58-4, S. 545.

Sowohl Primär- als auch Sekundärzellen sind Batterien. Im weiteren Berichtsverlauf soll unter der Bezeichnung Batterie nur die wieder aufladbare Sekundärzelle (Akkumulator) verstanden werden. Tabelle 38 stellt Vor- und Nachteile von Batterien als Energiespeicher dar.

Tabelle 38: Vor- und Nachteile von Batterien, eigene Darstellung <sup>1014, 1015, 1016</sup>

Vorteile	Nachteile
Hohe Energiedichte	Nötige Ladekontrolle
Hoher Wirkungsgrad	Bei zu hoher Energiedichte Brandrisiko
Geringe Selbstentladung	Hohe Recyclingkosten
Hohe Zyklenzahl	Geringe Lebensdauer
Variationsbreite in Größe, Art und Kapazität	
Schnelle Reaktionszeit (2,5 Millisekunden)	
Schwarzstartfähigkeit <sup>1017</sup>	

Die Fähigkeit einer Batterie Energie aufzunehmen und Ladung unter einer bestimmten Spannung bereitzustellen, ist von der stofflichen Zusammensetzung des Elektrodenmaterials und des Elektrolyten abhängig. Die elektrochemisch aktive Masse legt die maximal speicherbare Energie fest.

Die Speichereigenschaften von Batterien machen Stromspeicherung vor Ort möglich. So können sie zum Beispiel zur ortsnahen Speicherung von PV-Strom eingesetzt werden.<sup>1018</sup> Die dezentralen Anwendungsmöglichkeiten und die Speichereigenschaften von Batterien lassen vernetzte, dezentral lokalisierte Batterien als Großspeicher funktionieren, wenn sie zusammengeschaltet werden.<sup>1019</sup>

Folgende Batterien werden behandelt:

- Blei- und Lithium-Ionen-Batterien als derzeit bereits weit verbreitete kommerzielle Anwendung von Stromspeichern (klassische Batterien),
- Konzepte von Redox-Flow-Batterien, deren Systemkomponenten aus Vanadium, suspendierter Aktivmasse mit organischen Elektrolyten und Aktivmasse,
- Innovative Batterietechnologien wie Zink-Luft-Batterien, wässrige Batterien mit Polymerelektrode, Hochtemperaturbatterien und Organic-Radical Batteries.

#### IV.3.4.1 Klassische Batterien

Klassische Batterien zeichnen sich dadurch aus, dass sie über zwei Elektroden verfügen, die aus einem oder verschiedenen Metallen bestehen. Die Elektroden sind in der Regel in einen sauer-wässrigen Elektrolyten getaucht.

1014 ebd., S. 545.

1015 Evonik Industries AG; Markowz, Georg: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Energiespeicher“ der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2014), S. 11.

1016 Triebel, Clemens (Younicos AG): Landtag NRW (Hg.): Enquetekommission II Protokoll 15. Sitzung (nichtöffentlich)Anhörung „Energiespeicher“. (2014), S. 9.

1017 Möglichkeit, ein Stromnetzsegment nach einem Stromausfall wieder mit Strom zu versorgen; nach: Zoerner, Thorsten: Schwarzstart: Stromausfall - Die Sekunden nach dem Blackout unter: <http://de.slideshare.net/zoernert/schwarzstartfhtigkeit>. Online am 02.03.2015.

1018 Wittwer, Christof: Wie Batteriespeicher für Photovoltaikanlagen der Energiewende nützen können. In: et Energiewirtschaftliche Tagesfragen (2013), S. 38-40.

1019 Münster Electrochemical Energy Technology (MEET); Hörpel, Gerhard: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Energiespeicher“ der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2014), S. 2.

Für Kathoden- und Anodenmaterial kommen verschiedene Metalle infrage. Die mit Abstand höchste Energiedichte hat das Metall Lithium. Je höher diese ist, umso größer ist die Energiedichte der Batterie.

### **Bleibatterien**

In jüngerer Vergangenheit wurden meist Bleibatterien für technische Anwendungen verwendet. Sie sind kostengünstig und etabliert.<sup>1020</sup> Als Auto-Starterbatterien z.B. werden sie standardmäßig verwendet. Ihre Jahresproduktion in Europa beträgt 70 Mio. Stück.<sup>1021</sup> Der Elektrolyt in Bleibatterien ist wässrige Schwefelsäure. Da Blei-Säure-Batterien in wässrigen Lösungen funktionieren, sind sie auf ein Potenzialfenster beschränkt. Das Medium Wasser kann nur einem beschränkten Spannungsfeld (bei geeigneten Elektroden bis maximal 2,4V<sup>1022</sup>) ausgesetzt werden. Eine höhere Spannung hätte die Zersetzung von Wasser zu Sauerstoff und Wasserstoff und damit eine Unbrauchbarkeit des Elektrolyten zur Folge.

Blei-Säure-Batterien stellen momentan die wichtigste Speichertechnologie dar, mit deren Hilfe Primärleistung (elektrischer Strom) erbracht werden kann.

Für stationäre Anwendungen kostet die Kilowattstunde einer stationären Bleibatterie heute etwa 100 Euro.<sup>1023</sup> Bei steigender Produktzahl können diese Investitionskosten stark gesenkt werden. Bei 500.000 Bleibatterie-Hausspeichern kann mit einem Preis von 40 Euro pro Kilowattstunde gerechnet werden.<sup>1024</sup> Die Lebenszykluskosten können dann weiter gesenkt werden, wenn die Batterie stets nur halb entladen wird, was die Lebenszeit einer Bleibatterie vervierfacht.<sup>1025</sup>

Blei-Säure-Batterien spielen derzeit bereits in der Notstromversorgung und Netzstabilisierung eine Rolle. Beispiele für große Blei-Säure-Batterien zur Energiespeicherung im Stromnetz liefern die Stadtwerke Herne mit einer Leistung von 1,2 MW und einer Speicherkapazität von 1,2 MWh, deren Batteriespeicher zur Spitzenlast-Pufferung genutzt wird. Eine Pilotanlage zur Stromspeicherung aus Windkraft wird in Bocholt betrieben.<sup>1026</sup>

### **Lithium-Ionen-Batterien**

Durch den Trend zur Miniaturisierung technischer Geräte und den Leichtbauanforderungen des Mobilitätssektors kam es zu einer vermehrten Nutzung von Lithium-Ionen-Batterien. Lithium verfügt über eine sehr hohe spezifische Energiedichte, die mehr als 10 mal größer ist als die von Blei. Das Element Lithium verfügt im Verhältnis zu anderen Feststoffen über das größte Verhältnis von Ladung zu Masse, was eine sehr große Energiedichte von Lithiumelektroden zur Folge hat.

Lithium reagiert stark mit Wasser, weswegen Lithium-Ionen-Batterien wasserfrei sein müssen. Die Elektroden sind von organischen Elektrolytlösungen umgeben, die in Kombination mit der Lithiumelektrode hohe Spannungen (3,3-3,8V), hohe Energiedichte (200 Wh/kg) und hohe Zyklenfestigkeit gewährleisten. Durch die hohe Energiedichte und den organischen Elektrolyten in Lithium-Ionen-Batterien bestehen Sicherheitsrisiken wie hohe Brandgefahr. Höhere Anforderungen an

1020 Heinzel, Angelika; Mahlendorf, Falko: Elektrochemische Speicher – Batterien und Co. In: Von Kohlehalden und Wasserstoff: Energiespeicher – zentrale Elemente der Energieversorgung (2013), S. 33f.

1021 ebd., S. 33.

1022 ebd., 2013.

1023 ebd., S. 34.

1024 Sauer, Uwe (RWTH Aachen): Landtag NRW (Hg.): Enquetekommission II Protokoll 15. Sitzung (nichtöffentlich) Anhörung „Energiespeicher“. (2014), S. 21

1025 Sauer, Uwe (RWTH Aachen), ebd., S. 21f

1026 Agentur für Erneuerbare Energien: Strom speichern. In: Renew Spezial (2012), 57, S. 16.

Überwachungselektronik und Kühlung sind die Folge, was den Gesamtwirkungsgrad und die Wirtschaftlichkeit einschränkt.<sup>1027</sup> Derzeit können Lithium-Ionen-Batterien eine gespeicherte Kilowattstunde für 40 ct zur Verfügung stellen.<sup>1028</sup>

Lithium-Ionen-Batterien sind keine einheitliche Batteriesorte, weil sie sich durch eine große Variationsmöglichkeit von Elektrodenmaterial, Elektrolyttypen und Trägersubstanzen auszeichnet.<sup>1029</sup> Demnach verfügen Lithium-Ionen-Batteriearten über eine große Variation technischer Kenngrößen.

Lithium-Ionen-Batterien finden derzeit vor allem in Laptops und Mobiltelefonen Anwendung.<sup>1030</sup> Im Zuge der Elektromobilisierung gibt es Bestrebungen vermehrt Lithium-Ionen-Batterien für die Bereitstellung von Antriebsenergie für Autos zu nutzen.<sup>1031,1032</sup> Ein Vorteil für den vermehrten Einsatz im Automobilbereich ist die Gewichtsreduktion durch Lithium-Ionen-Batterien. Im Vergleich zu Bleibatterien haben Lithium-Ionen-Batterien bereits heute ein günstiges Speicher-Gewicht-Verhältnis.

Lithium-Ionen-Batterien stellen eine Perspektive für dezentrale Stromspeicherung dar.

#### IV.3.4.2 Redox-Flow-Batterien (Flüssigbatterien)

Neben den klassischen Batterien sind auch Redox-Flow-Batterien als marktfähiges Produkt zur elektrochemischen Stromspeicherung verfügbar. Redox-Flow-Batterien speichern die elektrische Energie in chemischen Verbindungen. Die chemischen Verbindungen sind in Elektrolyten gelöst, die mittels Pumpen in zwei getrennten Kreisläufen umgewälzt werden. In einer Zelle, die durch eine Membran getrennt ist, treffen die Elektrolyten aufeinander und reagieren kontrolliert unter Ionenaustausch und Lieferung von Strom (vgl. Abbildung 93).

---

1027 ebd. S. 17

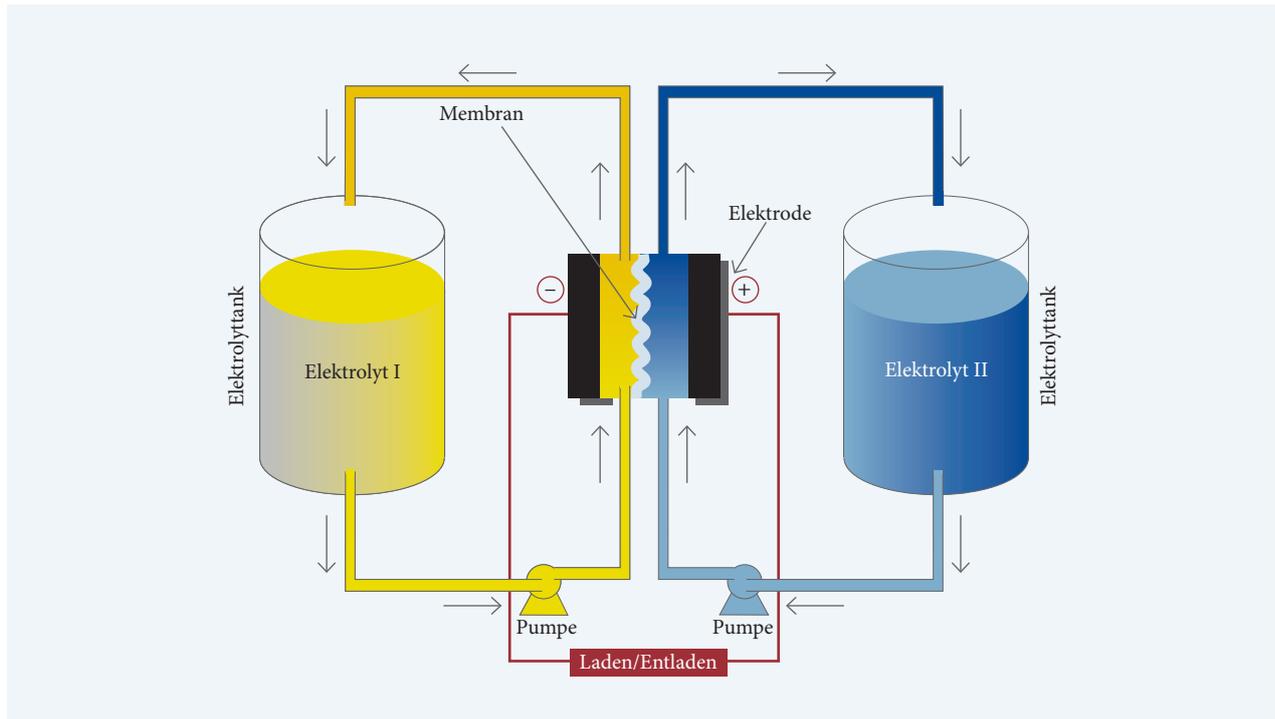
1028 ebd., S. 38-40.

1029 ebd. S. 17.

1030 Hörpel, Gerhard (Universität Münster, MEET): Landtag NRW (Hg.): Enquetekommission II Protokoll 15. Sitzung (nichtöffentlich) Anhörung „Energiespeicher“. (2014), S. 4.

1031 ebd. S. 18.

1032 Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO): Regierungsprogramm Elektromobilität – Übersicht zu umgesetzten oder initiierten Maßnahmen – unter: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/P-R/regierungsprogramm-elektromobilitaet-uebersicht-zu-umgesetzten-oder-initiierten-massnahmen,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf> (2012).

Abbildung 93: Aufbau einer Redox-Flow-Batterie<sup>1033</sup>

Diese Flüssigbatterien sind durch Vergrößerung oder Verkleinerung der Elektrolyttanks flexibel dimensionierbar, was auch die Speicherung größerer Energiemengen erlaubt. Energieumwandlungseinheit und Speichermedium sind voneinander getrennt, was eine ungewollte Entladung verhindert.<sup>1034</sup> Die Vor- und Nachteile von Redox-Flow- im Vergleich zu klassischen Batterien werden in Tabelle 39 dargestellt.

Tabelle 39: Vor- und Nachteile von Redox-Flow-Batterien im Vergleich zu klassischen Batterien, eigene Darstellung<sup>1035,1036,1037</sup>

Vorteile	Nachteile
Hohe Dynamik im Millisekundenbereich mit hoher Überlastfähigkeit	Hohe Kosten (bei derzeitiger Produktion)
Leistung und Energiemenge sind unabhängig skalierbar	Mäßige Energie- und Leistungsdichte
Min. 15 Jahre Lebensdauer bei beliebiger Zyklanzahl	Enger Bereich der Betriebstemperatur (5-50°C), erfordert aufwändige Wärmeregulierung
Umweltfreundlich, weil Elektrolyt stabil bleibt und recycelt werden kann	
Keine Selbstentladung der Tanks	
Kein Brandrisiko	

Unter den Flüssigbatteriekonzepten ist das System von Vanadiumsalz im schwefelsauren Elektrolyten am weitesten kommerzialisiert.

1033 RWTH Aachen: Aufbau einer Redox-Flow-Batterie unter: [http://www.isea.rwth-aachen.de/de/energy\\_storage\\_systems\\_technology\\_redox\\_flow\\_batteries/](http://www.isea.rwth-aachen.de/de/energy_storage_systems_technology_redox_flow_batteries/)

1034 ebd. S. 19.

1035 ebd. S. 19.

1036 Heinzel, Angelika; Mahlendorf, Falko: Elektrochemische Speicher – Batterien und Co. In: Von Kohlehalden und Wasserstoff: Energiespeicher – zentrale Elemente der Energieversorgung (2013), S. 37.

1037 Doetsch, Christian; Burfeind, Jens: Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits-, und Energietechnik (UMSICHT) (Hg.): Batterietechnologien – jenseits von Lithium und Blei. (2014).

Tabelle 40: Redox-Flow-Batteriesysteme, eigene Darstellung <sup>1038</sup>

System	Motivation	Technische Probleme	Umsetzung <sup>1037</sup>
Vanadium-Redox-Flow	<ul style="list-style-type: none"> <li>• gute Effizienz (75%)</li> <li>• flexibles, modulares Design</li> <li>• schnelle Ansprechzeit</li> <li>• tiefentladefähig</li> <li>• geringe Selbstentladung</li> <li>• unschädliches „Cross-Over“</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• geringe Energiedichte</li> <li>• hohe Investmentkosten</li> <li>• funktionieren nur bei 10 – 30°C</li> </ul>	4
Wässrige Flow-Batterie mit suspendierter Aktivmasse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• kostengünstigeres Speicherfluid</li> <li>• keine limitierenden Ressourcen</li> <li>• skalierbar</li> <li>• Moleküle können maßgeschneidert werden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• geringe Zyklenstabilität</li> </ul>	1
Organischer Elektrolit, suspendierte Aktivmasse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• kombiniert Vorteile der klassischen und der Redox-Flow-Batterie, unabhängige Skalierbarkeit von Leistungseinheit und Speicher</li> <li>• höhere Sicherheit</li> </ul>		2

### IV.3.4.3 Innovative Batteriekonzepte

Innovative Batterietypen unterscheiden sich von klassischen in ihren Material- oder Aufbau-eigenschaften. Beispielhaft sollen die Zink-Luft-Batterien, die Nutzung von Polymerelektroden im wässrigen Batteriespeicher, Hochtemperatur- und Organic Radical-Batterien dargestellt werden.

Zink-Luft-Batterien bestehen auf der Kathodenseite aus einer Metallelektrode. Auf der Kathodenseite wird der Batterie kontinuierlich Luft zugeführt. Da die Zelle nur aus einer Kammer besteht, zeichnet sie sich durch geringes Gewicht und eine hohe Energiedichte aus. Die Zinklegierungen in Batterien sind günstig und reagieren im Gegensatz zu Lithium nicht mit Wasser. Die Zink-Luft-Batterie befindet sich wie Entwicklungen sehr ähnlicher Batterietypen heute im Laborstadium. <sup>1040</sup>

Die Anoden in wässrigen Batterien können aus bestimmtem Polymermaterial aufgebaut sein. Das Polymer ist so strukturiert, dass sich das Alkali-Ion des flüssigen Elektrolyten an seine Oberfläche anlagern kann. Die Aktivmasse wäre metallfrei und günstig. Eine höhere Zyklenstabilität in einem sicheren System bei hoher Reaktionsgeschwindigkeit und einem Wirkungsgrad von etwa 80% könnte abgebildet werden. Durch nicht brennbare und ungiftige Materialien wäre ein sicherer Batteriebetrieb gewährleistet. Die Polymeranode befindet sich im Grundlagenforschungsstadium. <sup>1041</sup>

Hochtemperaturbatterien funktionieren im Temperaturbereich von 250 bis 350°C. Sie bestehen aus den Bauelementen flüssige Salzschnmelze, geschmolzenes Alkalimetall und keramische Natriumionenleiter. Sie sind aus günstigen Materialien aufgebaut. Hochtemperaturbatterien verfügen über hohe Effizienz und Energiedichte. Operative Probleme bereiten der korrosive Elektrolyt, der Umgang mit der hohen Betriebstemperatur und die brennbaren Eigenschaften von Schwefel und Natrium. Hochtemperaturbatterien werden als Anlagen betrieben. <sup>1042</sup>

In Organic radical-Batterien werden spezielle Polymere für die Elektrolyte eingesetzt, die stabile Radikale<sup>1043</sup> in die Molekülstruktur eingearbeitet haben. Sie können aus den Elementen Kohlenstoff,

<sup>1038</sup> ebd.

<sup>1039</sup> Umsetzungsgrad: 1 = Grundlagenforschung, 2 = Labormaßstab, 3 = Pilotanlage, 4 = Industrielle Produktion.

<sup>1040</sup> ebd.

<sup>1041</sup> ebd.

<sup>1042</sup> ebd.

<sup>1043</sup> Radikale = Moleküle oder Atome mit ungepaarten Elektronen. Quelle: chemie.de.

Sauerstoff und Stickstoff aufgebaut werden und verfügen über eine hohe Energie- und Stromdichte. Die organischen Zielmoleküle können bedarfsgerecht gestaltet werden. Der Umsetzungsgrad der Organic radical-Batterien befindet sich im Stadium der Grundlagenforschung.<sup>1044</sup>

### IV.3.5 Power to Gas/Power to Chemicals

Dieses Teilkapitel stellt zunächst zwei Systemlösungen zur chemischen bzw. stofflichen Energiespeicherung vor, die Überschussstrom in chemische Energieträger (Wasserstoff bzw. Chemikalien) umwandeln und sich auf verschiedenste Weise energetisch (Power to Gas) und stofflich (Power to Chemicals) nutzen lassen. Die beschriebenen Systemlösungen sollen im Hinblick auf ihr Potenzial als Beitrag der chemischen Industrie zum Gelingen der deutschen Energiewende untersucht werden.

#### IV.3.5.1 Systemlösung<sup>1045</sup> Power to Gas

Die Systemlösung Power to Gas (PtG) nutzt (Überschuss-)Strom aus erneuerbaren Energien (EE) zur Herstellung von Wasserstoff und hat dessen energetische Nutzung zum Ziel<sup>1046</sup>. In diesem Rahmen wird auch die Brennstoffzelle als Energiewandler zur Rückverstromung als ein Nutzungspfad des PtG-Konzepts vorgestellt.

Aktuell erfolgt die Wasserstoffherstellung im PtG-Konzept fast ausschließlich mittels Wasserelektrolyse. Dabei wird Wasser mit Hilfe elektrischer Energie in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. Als Elektrolyseverfahren kommen die alkalische Elektrolyse, die PEM-Elektrolyse (Proton-Exchange Membrane) sowie die Hochtemperatur elektrolyse (Details: vgl. Kapitel IV.2) in Frage<sup>1047</sup>. Weitere Wasserstoffgewinnungsverfahren sind z.B. die Vergasung von Biomasse mit nachfolgender Shiftreaktion<sup>1048</sup> und anschließender Gasreinigung sowie thermochemische Zyklen mit solarthermischer Hochtemperaturwärme<sup>1049,1050</sup>. Der Wirkungsgrad der Wasserelektrolyse entspricht etwa 70%, d.h. 70% der für die Elektrolyse benötigten Stromenergie können im Wasserstoff gespeichert werden. Der Rest wird in Abwärme abgegeben, die aktuell nicht genutzt wird<sup>1051</sup>. Der so gewonnene Wasserstoff kann, wie in Abbildung 94 gezeigt, auf verschiedenste Weise weiterverwendet werden. So kann er

1. gespeichert,
2. ins Erdgasnetz eingespeist,
3. zur Wärme Gewinnung verbrannt,
4. rückverstromt,
5. methanisiert oder
6. stofflich genutzt (vgl. Teilkapitel Power to Chemicals)

1044 ebd.

1045 vgl. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena): Die Systemlösung Power to Gas unter: <http://www.powertogas.info/power-to-gas/energiesystem-der-zukunft.html>. Online am 30.06.2014.

1046 vgl. ebd.

1047 vgl. Rundel, Paul et al.: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits-, und Energietechnik (UMSICHT) (Hg.): Speicher für die Energiewende. (2013), S. 48 ff.

1048 Eine Shift-Reaktion ist ein Verfahren mit dem in einem Synthesegas der CO-Anteil reduziert und gleichzeitig der Wasserstoff-Anteil erhöht wird.

1049 Solarthermische Hochtemperaturwärme: Solarthermische Kraftwerke kombinieren spezielle Spiegelsysteme zur Erzeugung solarer Hochtemperaturwärme mit einem konventionellen Kraftwerksprozess.

1050 vgl. Schüth, Ferdi: Chemische Energiespeicherung unter: <http://archiv.aktuelle-wochenschau.de/2010/w15/woche15.html> (2010). Online am 14.04.2014, S. 3.

1051 vgl. Schmid, Jürgen: Speicherungsmöglichkeiten von Überschuss-Energie mit Wasserstoff oder Methan – ein Vergleich unter: [http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Presse/Pressemitteilungen/2011/111122\\_PowerToGas\\_AnlageIWES\\_pdf.pdf;jsessionid=A83E94287D59F1C236F8A6EE38E4712A?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Presse/Pressemitteilungen/2011/111122_PowerToGas_AnlageIWES_pdf.pdf;jsessionid=A83E94287D59F1C236F8A6EE38E4712A?__blob=publicationFile&v=3). Online am 15.4.2014.

werden<sup>1052</sup>. Der mittels Power to Gas gewonnene Wasserstoff kann also entweder für eine spätere Verwendung gespeichert (vgl. Nutzungspfade 1 und 2) oder direkt energetisch genutzt (vgl. Nutzungspfade 3 und 4) bzw. in andere stoffliche Verbindungen umgewandelt (vgl. Nutzungspfade 5 und 6) werden.

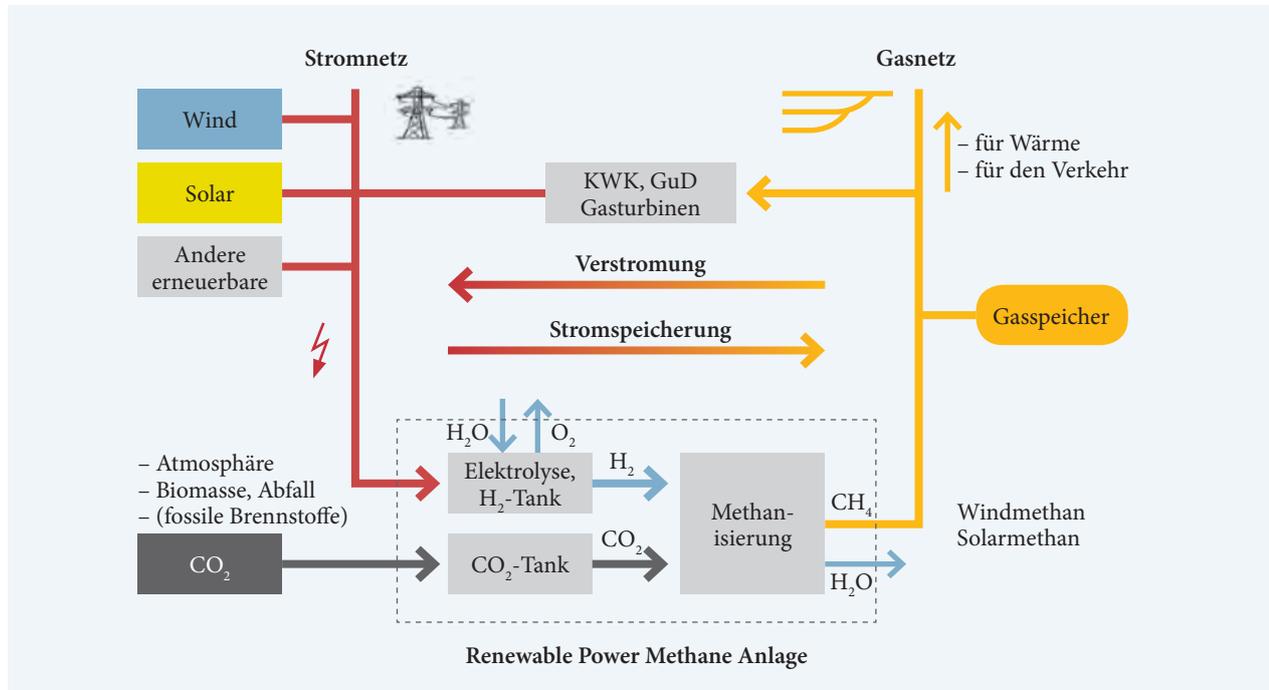


Abbildung 94: Schema Konversionsverfahren zur Wasserstoffherzeugung und Methanisierung aus überschüssigem Strom regenerativer Quellen<sup>1055</sup>

Im Folgenden wird die energetische Nutzung von Wasserstoff (Nutzungspfade 1 bis 4) beschrieben. Das Unterkapitel „Power to Gas: Methanisierung und energetische Nutzung von Methan“ erläutert die energetische Nutzung von Methan (Nutzungspfad 5).

### Power to Gas: Energetische Nutzung von Wasserstoff

#### Generelle Bedeutung von Wasserstoff

Wasserstoff ist ein Energieträger, dessen Heizwert mit 120 MJ/kg ca. dreimal höher ist als der von Benzin<sup>1054</sup>. Da Wasserstoff in der Natur praktisch nur gebunden (z.B. als Wasser, Hydrate, Kohlenwasserstoff, Kohlenhydrat oder Fett) vorkommt<sup>1055</sup>, muss er industriell hergestellt werden<sup>1056</sup>. Derzeit werden weltweit jährlich ca. 50 Mio. t Wasserstoff produziert. Wasserstoff wird aktuell zu ungefähr 95% aus fossilen Rohstoffen (z.B. Erdgas, Kohle) gewonnen, lediglich ca. 5% stammen aus Elektrolyseverfahren. Hauptsächlich wird Wasserstoff durch die Dampfreformierung von Erdgas (Methan) gewonnen. Um die heutige produzierte Jahresmenge an Wasserstoff mittels Wasserelektrolyse zu produzieren, wären ca. 450 Mio. t Wasser sowie entsprechende Strommengen erforderlich.<sup>1057</sup>

1052 vgl. bezüglich Ziffer 1 bis 5: Rundel, Paul et al.: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits-, und Energietechnik (UMSICHT) (Hg.): Speicher für die Energiewende. (2013), S. 47.

1053 Quelle: ebd., S. 47; ursprünglich stammt die Abbildung vom Fraunhofer IWES, Kassel.

1054 vgl. Sattler, Christian; Pütter, Hermann: Noch viele offene Fragen. In: Von Brennstoffzellen bis Leuchtdioden (2008), S. 73 ff.

1055 vgl. Bertau, Martin; et al.: Industrielle Anorganische Chemie. Wiley-VCH (2013). ISBN 3-527-64956-5, S. 1.

1056 vgl. Deutsche Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie (Hg.): Von Kohlehalden und Wasserstoff: Energiespeicher – zentrale Elemente der Energieversorgung (2013). ISBN 978-3-9809691-5-4, S. 56.

1057 vgl. Sattler, Christian; Pütter, Hermann: Noch viele offene Fragen. In: Von Brennstoffzellen bis Leuchtdioden (2008), S. 73 ff.

Unter aktuellen Rahmenbedingungen ist der mittels Power to Gas erzeugte Wasserstoff teurer als Wasserstoff, der aus fossilen Rohstoffen hergestellt wird: Im Vergleich zu Reformwasserstoff (aktueller Marktpreis) würden die Kosten für Wasserstoff aus Erneuerbaren Energien um 300 bis 1500 % höher liegen<sup>1058</sup>.

### 1. Speicherung des Wasserstoffs

Die Speicherung von Wasserstoff ist auf Grund seiner geringen Dichte schwierig. Daher wird bei jeglicher Speicherung versucht, seinen volumetrischen Energiegehalt<sup>1059</sup> (2 MJ/l im Normzustand<sup>1060</sup>) mittels Kompression oder Verflüssigung zu erhöhen<sup>1061</sup>. Die gängigsten Speicherformen für Wasserstoff sind in Tabelle 41 zusammengefasst.

**Tabelle 41: Beschreibung ausgewählter Speicherformen für Wasserstoff, eigene Darstellung**

Druckgas-Speicher	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Speicherung in speziellen Behältern nach Verdichtung</li> <li>• volumetrischer Energiegehalt: 3 – 4 MJ/l</li> <li>• Speicherdrücke von 450 bar derzeit Stand der Technik</li> <li>• bei mobilen Anwendungen ca. 700 bar notwendig<sup>1060</sup></li> </ul>
Flüssig-Speicher	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Speicherung nach Verflüssigung mittels Kühlung</li> <li>• volumetrischer Energiegehalt: 3 – 4 MJ/l</li> <li>• hoher Energieaufwand (Siedepunkt H<sub>2</sub>: -250°C)</li> <li>• keine langfristige Speicherung aufgrund Abdampfverlusten von 0,1 bis 1% pro Tag möglich<sup>1061</sup></li> </ul>
Metall-Hydrid-Speicher	<ul style="list-style-type: none"> <li>• reversible Absorption (Bindung) an Metallverbindungen</li> <li>• ermöglicht sichere Speicherung<sup>1062</sup></li> <li>• volumetrische Energiedichte: 1,5 bis 3,6 MJ/l<sup>1063</sup></li> </ul>
Kavernen-Speicher	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lagerung in unterirdischen Speichern (z.B. in Salzkavernen)</li> <li>• sehr große (theoretische) Speicherkapazität</li> <li>• Bislang noch keine hinreichende Erprobung in Deutschland, lediglich in USA und Großbritannien<sup>1064</sup></li> <li>• Aktuelle Speicherkapazität: 0,2% des GesamtSpeicheraufkommen<sup>1065</sup></li> </ul>

Der auf diese Weise gespeicherte Wasserstoff kann dann für die Nutzungspfade 3 bis 6 zu einem späteren Zeitpunkt eingesetzt werden.

1058 vgl. Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Ein Zwischenbericht des Verbands der Chemischen Industrie (VCI): „Zukunft der Energiespeicher“. (2013), S. 28.

1059 Die volumetrische Energiedichte ist die pro Volumen gespeicherte Energiemenge, die z. B. in Joule pro Kubikmeter (J/m<sup>3</sup>) oder auch in Megajoule pro Liter (MJ/l) anzugeben ist. Nach: Paschotta, Rüdiger: Energiedichte unter: <https://www.energie-lexikon.info/energiedichte.html>. Online am 02.03.2015; Gert Müller-Syring et al.: Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. (DVGW) (Hg.): Entwicklung von modularen Konzepten zur Erzeugung, Speicherung und Einspeisung von Wasserstoff und Methan ins Erdgasnetz. (2013).

1060 Normzustand: Das Volumen eines Stoffes ist abhängig von Druck und Temperatur. Um verschiedene Stoffe miteinander vergleichen zu können, wurde u.a. der Normzustand bzgl. Druck und Temperatur für die verschiedenen Stoffe definiert.

1061 vgl. Rundel, Paul et al.: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits-, und Energietechnik (UMSICHT) (Hg.): Speicher für die Energiewende. (2013), S. 50.

1062 vgl. ebd., S. 50.

1063 vgl. ebd., S. 51.

1064 vgl. ebd., S. 51.

1065 vgl. Otto, Andreas; Hubert, Marc: HERA Hydrogen Storage Systems (Hg.): Wasserstoffspeicherung in Metallhydriden., S. 18.

1066 vgl. Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Ein Zwischenbericht des Verbands der Chemischen Industrie (VCI): „Zukunft der Energiespeicher“. (2013), S. 30.

1067 vgl. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena): Speicherkapazitäten - Gas speichern - Power to Gas - Strategieplattform Power to Gas unter: <http://www.powertogas.info/power-to-gas/gas-speichern/speicherkapazitaeten.html>. Online am 15.04.2014.

## 2. Einspeisung des Wasserstoffs ins Erdgasnetz

Der mittels Power to Gas gewonnene Wasserstoff kann auch ins Erdgasnetz eingespeist und zu einem späteren Zeitpunkt energetisch zur Wärmegewinnung genutzt werden. In diesem Fall substituiert Wasserstoff fossiles Erdgas. Die direkte Einspeisung von Wasserstoff ins öffentliche Gasnetz ist durch gesetzliche Vorgaben mengenmäßig begrenzt (aktuell ist die Beimischung von bis zu 5 Volumenprozent im Erdgasnetz erlaubt<sup>1068</sup>). Die gesetzliche Begrenzung beruht darauf, dass die Wasserstofftoleranzen bei den Endverbraucher-Geräten (sowohl Industrie, Kraftwerke als auch Privathaushalte) begrenzt sind. Bei den in Deutschland gängigen Gasturbinen bspw. liegen die Toleranzen zwischen 1 und 5 Volumenprozent<sup>1069</sup>. Es besteht bei Gasturbinen, Erdgasspeichern bzw. Hochdruck-Erdgastanks deshalb grundlegender Forschungsbedarf, um Wasserstofftoleranzen von bis zu 10 Volumenprozent zu erreichen (entspricht der Toleranz der bestehenden Erdgasinfrastruktur) Aus Abbildung 95 ist die Wasserstofftoleranz ausgewählter Elemente im Erdgasnetz ersichtlich.



Abbildung 95: Übersichtsmatrix: H<sub>2</sub>-Toleranz ausgewählter Elemente im Erdgasnetz<sup>1070</sup>

1068 vgl. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (Hg.): Integration erneuerbaren Stroms in das Erdgasnetz Power to Gas – eine innovative Systemlösung für die Energieversorgung von morgen entwickeln. (2012), S. 10.

1069 vgl. Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Ein Zwischenbericht des Verbands der Chemischen Industrie (VCI): „Zukunft der Energiespeicher“. (2013), S. 15.

1070 Eichel, Rüdiger-A. et al.: Landtag NRW (Hg.): Gutachten „Power to Gas / Energiespeicher“ für die Enquete-Kommission II des Landtags von Nordrhein-Westfalen. (2014), S. 30.; Originalquelle: Gert Müller-Syring et al.: Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. (DVGW) (Hg.): Entwicklung von modularen Konzepten zur Erzeugung, Speicherung und Einspeisung von Wasserstoff und Methan ins Erdgasnetz. (2013), S. 25.

Das deutsche Erdgassystem bietet 530.000 km<sup>1071</sup> Gasleitungen (davon 47.000 km Fernleitungen<sup>1072</sup>) und etwa 47 Erdgasspeicher mit einer Kapazität von 23,5 Mrd. m<sup>3</sup> Gas<sup>1073</sup>. Dies entspricht einer aktuellen Speicherkapazität von 1.000 TWh<sup>1074</sup>.

### 3. Verbrennung des Wasserstoffs

Eine weitere Nutzungsmöglichkeit des gewonnenen Wasserstoffs besteht in der (direkten) Verbrennung zur energetischen Nutzung (Wärmegewinnung). In diesem Falle fungiert Wasserstoff ebenfalls als Substitut fossiler Rohstoffe, insbesondere von Erdgas.

### 4. Rückverstromung des (zwischenlagerten) Wasserstoffs

Eine vierte Möglichkeit stellt die Wasserstoff-Nutzung zur Stromerzeugung (Rückverstromung) dar. Dazu kann der PtG-Wasserstoff z.B. in Gas- und Dampf-Kraftwerken (GuD-Kraftwerke) oder Blockheizkraftwerken zum Antrieb von Stromgeneratoren verbrannt oder in Brennstoffzellen (BZ) zur direkten Stromerzeugung umgesetzt werden. Aufgrund des geringen Wirkungsgradverlusts sind hierbei insbesondere Brennstoffzellen interessant (vgl. Kasten zur Brennstoffzelle). Der in der Brennstoffzelle eingesetzte PtG-Wasserstoff ersetzt andere, zumeist fossile Energieträger, die aktuell zur konventionellen Stromerzeugung eingesetzt werden. Die PtG-Wasserstoffgewinnung mit anschließender Rückverstromung erfüllt damit die Funktion eines klassischen Stromspeichers, der Überschussstrom aufnimmt und bei Bedarf wieder abgibt. Die Rückverstromung mittels Brennstoffzellen hat einen Wirkungsgrad von 60%, wobei die restlichen 40% als Abwärme anfallen, die genutzt werden können. Unter Berücksichtigung des Wirkungsgrads der Elektrolyse können so 40% der ursprünglichen Stromenergie zeitlich entkoppelt wieder genutzt werden.<sup>1075</sup>

---

1071 Angabe Fernleitungsnetzbetreiber, vgl. Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas e.V.: Fernleitungsnetze – Zahlen und Fakten unter: <http://www.fnb-gas.de/de/fernleitungsnetze/zahlen-und-fakten/zahlen-und-fakten.html> (2014). Online am 15.04.2014.

1072 Davon 47.000 km als Fernleitungsnetze, vgl. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena): Gas speichern - Power to Gas - Strategieplattform Power to Gas unter: <http://www.powertogas.info/power-to-gas/gas-speichern.html>. Online am 15.04.2014.

1073 vgl. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena): Speicherkapazitäten - Gas speichern - Power to Gas - Strategieplattform Power to Gas unter: <http://www.powertogas.info/power-to-gas/gas-speichern/speicherkapazitaeten.html>. Online am 15.04.2014.

1074 vgl. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena): Gas speichern - Power to Gas - Strategieplattform Power to Gas unter: <http://www.powertogas.info/power-to-gas/gas-speichern.html>. Online am 15.04.2014.

1075 vgl. Schmid, Jürgen: Speicherungsmöglichkeiten von Überschuss-Energie mit Wasserstoff oder Methan – ein Vergleich unter: [http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Presse/Pressemitteilungen/2011/111122\\_PowerToGas\\_AnlageIWES\\_pdf.pdf;jsessionid=A83E94287D59F1C236F8A6EE38E4712A?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Presse/Pressemitteilungen/2011/111122_PowerToGas_AnlageIWES_pdf.pdf;jsessionid=A83E94287D59F1C236F8A6EE38E4712A?__blob=publicationFile&v=3). Online am 15.4.2014.

## Infoblock zur Brennstoffzelle

Die Brennstoffzelle ist ein Energiewandler, mit dem chemische Energie (z.B. in Form von Wasserstoff) in elektrische Energie (Strom) und Wärme umgewandelt werden kann<sup>1074</sup>. Als Endprodukt entsteht lediglich Wasser.

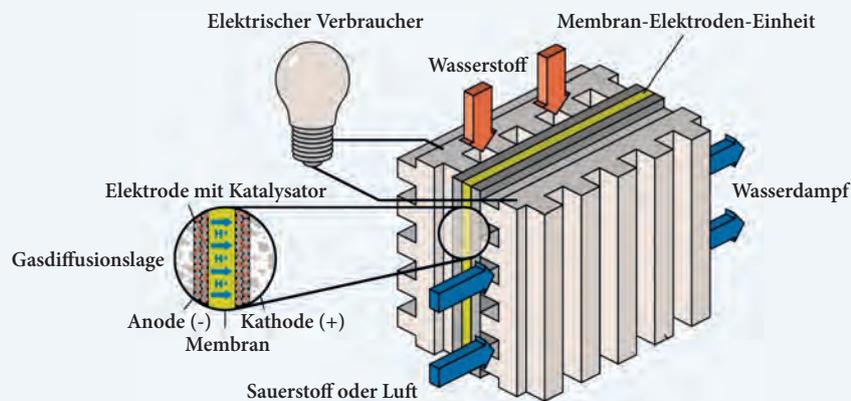


Abbildung 96: Aufbau der PEM-Brennstoffzelle<sup>1075</sup>

Eine Brennstoffzelle besteht aus zwei Elektroden (Anode und Kathode) sowie einem Elektrolyten zur Trennung der beiden Elektroden und der zuzuführenden Reaktionsgase Wasserstoff und Sauerstoff (vgl. Abbildung 96). An der Anode wird der Wasserstoff mit Hilfe eines Katalysators (zumeist aus Platin) in zwei Elektronen und Wasserstoffionen (Protonen) gespalten. Die Elektronen fließen über einen externen Stromkreis zur Kathode. Dort reagieren sie mit dem zugeführten Sauerstoff zu Wassermolekülen, die als Wasserdampf aus der Zelle abgeführt werden. Diese Reaktion erfolgt unter hoher Energiefreisetzung (Reaktionswärme) und ohne äußeren Stimulus und stellt damit die Umkehrreaktion der Elektrolyse dar. Die bei der Reaktion zwischen den beiden Elektroden erzeugte Potentialdifferenz ist die tre<sup>1076</sup>. Der Brennstoffzellentyp wird durch den Aufbau (flüssiger oder fester Elektrolyt<sup>1077</sup>) der BZ bestimmt und hat maßgeblichen Einfluss auf Funktionsweise und Anwendung.

Ein Vorteil der Brennstoffzelle gegenüber der Batterie ist, dass sie nicht aufgeladen werden muss, sondern kontinuierlich betrieben werden kann<sup>1078</sup>. Die hohen Wirkungsgrade sind zudem über große Leistungsbereiche (insbesondere bei Brennstoffzellen-Mini-Blockheizkraftwerken) bei hoher Flexibilität (schnelles An- und Abfahren) gegeben<sup>1081</sup>.

### 5. Power to Gas: Methanisierung und energetische Nutzung von Methan

Da es bislang keine eigenständige Wasserstoffinfrastruktur gibt und dessen Einspeisung in das Erdgasnetz mit den oben beschriebenen Einschränkungen verbunden ist, kann alternativ eine anschließende Umwandlung des Wasserstoffs mit CO (Kohlenmonoxid) oder CO<sub>2</sub> zu Methan (CH<sub>4</sub>) erfolgen (vgl. oben Nutzungspfad 5)<sup>1082</sup>. Dies kann thermochemisch (mittels heterogener Katalyse in einer Gasphasenreaktion) oder biochemisch (durch Mikroorganismen, sog. methanogene *Archae-*

1076 Tillmetz, Werner: (Hg.): Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien – Tragende Säulen der Energiewende 2.0 Weiterentwicklung des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie. (2013), S. 3.

1077 EnergieAgentur.NRW: Brennstoffzellen – Grundlagen – Funktionsprinzip von Brennstoffzellen – Aufbau der Brennstoffzelle unter: <http://www.brennstoffzelle-nrw.de/index.php?id=21>. Online am 15.04.2014.

1078 Zitiert aus Merten, Christian: Funktion der PEM-Brennstoffzelle unter: <http://www.diebrennstoffzelle.de/zelltypen/pemfc/funktion.shtml>. Online am 15.04.2014.

1079 Der Elektrolyt ist in der Brennstoffzelle zugleich Trenn- und Leitmaterial, denn er trennt die beiden Elektroden und leitet zugleich die Ionen und ermöglicht so erst einen Stromfluss.

1080 Funke, Klaus: Energiegewinnung ohne Abgase. In: Von Brennstoffzellen bis Leuchtdioden (2008), S. 52.

1081 vgl. Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Ein Zwischenbericht des Verbands der Chemischen Industrie (VCI): „Zukunft der Energiespeicher“. (2013), S. 17.

1082 Sterner, Michael: Bioenergy and renewable power methane in integrated 100% renewable energy systems – Limiting global warming by transforming energy systems. Kassel Univ. Press (2009). ISBN 3-899-58799-5.

Bakterien) geschehen<sup>1083</sup>. Das auf diese Weise synthetisch erzeugte Methan kann ebenso wie der originäre Wasserstoff gespeichert, ins Erdgas eingespeist, verbrannt, rückverstromt (Nutzungspfade 1 bis 3) oder stofflich genutzt werden (Nutzungspfad 6) und so andere (insbesondere fossile) Energieträger substituieren.

Methan hat mit 50,3 MJ/kg eine um den Faktor 2,5 kleinere Energiedichte als Wasserstoff<sup>1084</sup>. Die derzeitige Hauptnutzung des synthetisch hergestellten Methans ist seine Verbrennung zur Wärmegewinnung, gefolgt von der Rückverstromung, welche in der Regel via Methan-Brennstoffzellen oder durch den Antrieb von Turbinen erfolgt. Zurzeit haben die Einspeisung ins Erdgasnetz und die stoffliche Nutzung keine nennenswerte Relevanz<sup>1085</sup>. Bei einer Rückverstromung von Methan lassen sich nur 36-38% der ursprünglichen Stromenergie wiedergewinnen<sup>1086</sup>.

Das für die Methanisierung benötigte CO<sub>2</sub> kann aus der Atmosphäre, Industrieabgasen (Verbrennung, chemische Prozesse) oder Biogasanlagen (Hydrierung des Gemischs aus Methan und Kohlendioxid) stammen<sup>1087</sup>. Die Gewinnung und Aufbereitung des CO<sub>2</sub> für die Methanisierung ist energetisch und technologisch sehr aufwändig (vgl. Kapitel II.1 Rohstoffe). Sofern das CO<sub>2</sub> örtlich getrennt vom Entstehungsort des Wasserstoffs anfällt, muss es zur Methanisierung dorthin (bzw. umgekehrt der Wasserstoff zum CO<sub>2</sub>) via Pipelines transportiert werden.

Das von der Kommission beauftragte PtG-Gutachten zeigt, dass für eine 5%-ige Wasserstoff-Beimischung im aktuellen Erdgasnetz zur Erzeugung der entsprechenden Menge an Wasserstoff 18,4 TWh Überschussstrom notwendig wären. Die Menge an abgeregeltem Strom entsprach im Jahr 2013 jedoch nur 0,385 TWh, war also um den Faktor 50 kleiner. Würde mit derselben Überschussstrommenge kein Wasserstoff sondern Methan hergestellt, hätten hiermit lediglich 1,25% des Jahresbedarfs Methan in 2013 gedeckt werden können. Hierfür

wären 2,13 Mio t CO<sub>2</sub> notwendig, wovon jedoch nur 1,6 Mio t als regeneratives Biogas zur Verfügung gestanden hätten. Zusammenfassend lässt sich damit feststellen, dass weder Überschussstrom noch CO<sub>2</sub> aus regenerativen Quellen in ausreichendem Maße für das PtG-Konzept zur Verfügung steht.<sup>1088</sup> Tabelle 42 zeigt die Überschussmengen, die je nach Wasserstoffbeimischung ins Erdgasnetz notwendig sind (blaue Tabelle) sowie den CO<sub>2</sub>-Bedarf für eine entsprechende Methanisierung (rote Tabelle).

---

1083 vgl. Rundel, Paul et al.: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits-, und Energietechnik (UMSICHT) (Hg.): Speicher für die Energiewende. (2013), S. 52.

1084 vgl. Bertau, Martin; et al.: Industrielle Anorganische Chemie. Wiley-VCH (2013). ISBN 3-527-64956-5, S.1.

1085 vgl. Deutsche Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie (Hg.): Von Brennstoffzellen bis Leuchtdioden Energie und Chemie – Ein Bündnis für die Zukunft. (2008), S. 73.

1086 vgl. Schmid, Jürgen: Speicherungsmöglichkeiten von Überschuss-Energie mit Wasserstoff oder Methan – ein Vergleich unter: [http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Presse/Pressemitteilungen/2011/111122\\_Power-ToGas\\_AnlageIWES\\_pdf.pdf;jsessionid=A83E94287D59F1C236F8A6EE38E4712A?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Presse/Pressemitteilungen/2011/111122_Power-ToGas_AnlageIWES_pdf.pdf;jsessionid=A83E94287D59F1C236F8A6EE38E4712A?__blob=publicationFile&v=3). Online am 15.4.2014.

1087 vgl. Rundel, Paul et al.: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits-, und Energietechnik (UMSICHT) (Hg.): Speicher für die Energiewende. (2013), S. 52.

1088 Eichel, Rüdiger-A. et al.: Landtag NRW (Hg.): Gutachten „Power to Gas / Energiespeicher“ für die Enquete-Kommission II des Landtags von Nordrhein-Westfalen. (2014), S. 35-36.

Tabelle 42: Überschussstrommengen, SNG-Produktion und CO<sub>2</sub>-Bedarf für unterschiedliche H<sub>2</sub>-Zumischungen unter heutigen Bedingungen<sup>1089</sup>

H <sub>2</sub> -Zumischung	Überschussstrom (TWh)	CO <sub>2</sub> -Bedarf (Mio. t)	SNG (Mrd. m <sup>3</sup> <sub>H</sub> )	Anteil am Erdgasverbrauch 2013
7 Vol. %	7,4	0,85	0,43	0,5 %
5 Vol. %	18,4	2,13	1,07	1,25 %
10 Vol. %	36,8	4,26	2,14	2,49 %

**Anwendungsfelder Power to Gas: Energetische Nutzung von Wasserstoff und Methan**

Der im Rahmen der Systemlösung PtG mittels Elektrolyse erzeugte Wasserstoff bzw. das daraus hergestellte Methan können – entsprechend Abbildung 97 – in folgende Anwendungsfelder gehen: energetische Nutzung zur Stromerzeugung, Wärmeversorgung und Mobilität (als Kraftstoff: Wasserstoff in Brennstoffzellen-Autos, bzw. Methan in Erdgasautos) sowie stoffliche Nutzung in der Industrie (z.B. Hydrierungsreaktionen in der Chemie; vgl. Kapitel IV.3.5). Aktuell wird 1% des hergestellten Wasserstoffs als Kraftstoff eingesetzt<sup>1090</sup>.

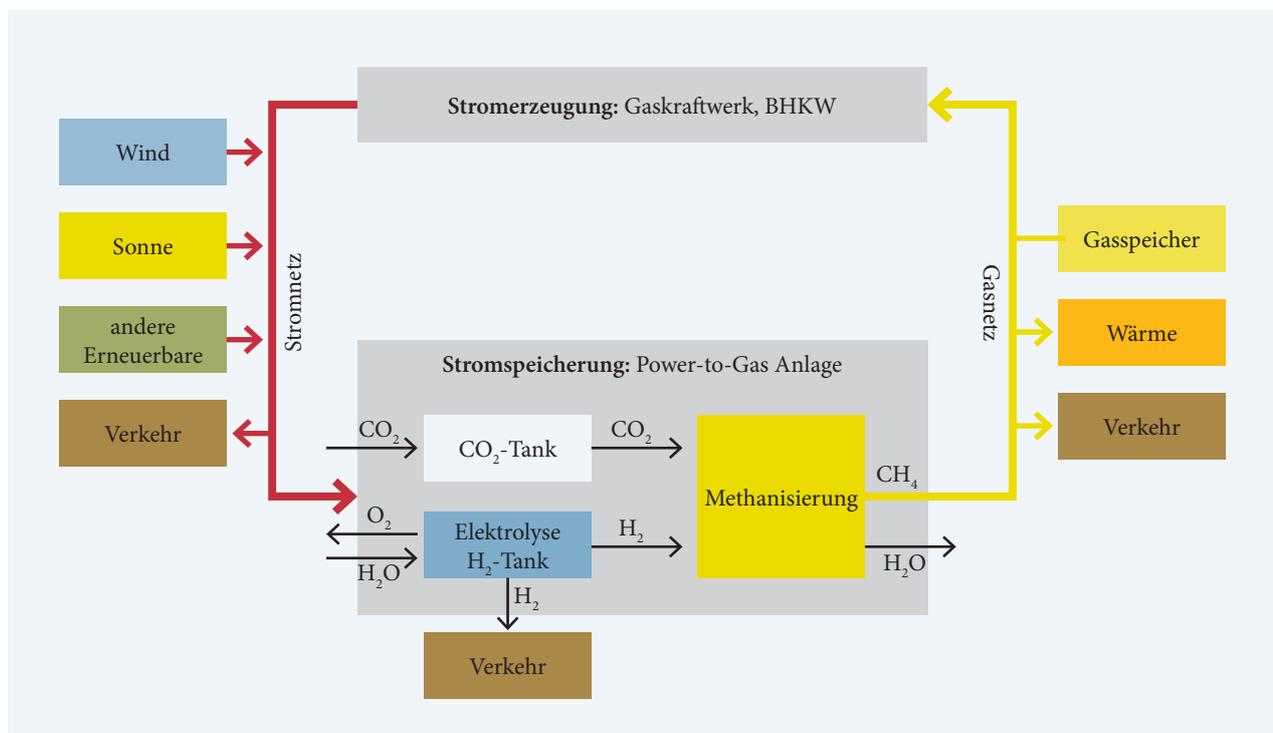


Abbildung 97: Anwendungsfelder für Power to Gas<sup>1091</sup>

**Anwendungsbeispiele**

Die Systemlösung PtG befindet sich im Forschungs- und Entwicklungsstadium. In Deutschland sind aktuell mehrere Pilot- bzw. Demonstrationsanlagen in Betrieb, weitere Anlagen werden projektiert oder sind im Bau.<sup>1092</sup> Beispielhaft werden hier die im münsterländischen Ibbenbüren angesiedelte Wasserelektrolyse-Demonstrationsanlage, das H<sub>2</sub>Herten-Projekt im Ruhrgebiet sowie das Projekt „Wind-Wasserstoff“ der Initiative ChemCoast in Norddeutschland kurz vorgestellt. Das Wind-Was-

1089 ebd., S. 36.

1090 vgl. Deutsche Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie (Hg.): Von Brennstoffzellen bis Leuchtdioden Energie und Chemie – Ein Bündnis für die Zukunft. (2008), S. 73 ff.

1091 Fraunhofer IWES: Power-to-Gas läuft auch an kleinen Biogasanlagen – Pilotversuch am Hessischen Biogas-Forschungszentrum zur direkten Methanisierung erfolgreich abgeschlossen unter: <http://www.iwes.fraunhofer.de/de/Presse-Medien/Pressemitteilungen/2013/power-to-gas-laeuft-auch-an-kleinen-biogasanlagen.html> (2013). Online am 15.04.2014.

1092 Zitiert aus: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (Hg.): Integration erneuerbaren Stroms in das Erdgasnetz Power to Gas – eine innovative Systemlösung für die Energieversorgung von morgen entwickeln. (2012), S. 10.

serstoff-Projekt wurde ausgewählt wegen der zu erwartenden steigenden Bedeutung von Offshore-windparks im Rahmen der deutschen Energiewende.

### Demonstrationsanlage in Ibbenbüren (NRW)

In Ibbenbüren wird derzeit eine Power to Gas-Demonstrationsanlage errichtet, um Überschussstrom aus Wind und Photovoltaik in Wasserstoff umwandeln zu können. Der erzeugte Wasserstoff soll in das regionale Gasnetz eingespeist und bei Bedarf wieder rückverstromt werden. In Ibbenbüren wird zu diesem Zweck eine PEM-Elektrolyse<sup>1093</sup> mit einer geplanten elektrischen Leistung von 100 Kilowatt und eine Wasserstoffproduktion von 20 m<sup>3</sup>/h getestet.<sup>1094</sup>

### HyCologne – Wasserstoff Region Rheinland e.V.

HyCologne ist ein Cluster für Wasserstoff, Brennstoffzellen und Elektromobilität. Das im Cluster enthaltene Projekt „Chemergy“ verfolgt das Ziel, den in der chemischen Industrie der Region Köln bzw. Rheinland als Nebenprodukt anfallenden Wasserstoff öffentlich zugänglich und als Energieträger im Straßen- bzw. Flugverkehr nutzbar zu machen. Für den Straßenverkehr wird der Betrieb von wasserstoffbetriebenen Pkw und Bussen einschließlich der entsprechenden Wasserstoffinfrastruktur vorbereitet. Eine mögliche zukünftige Anwendung im Flugverkehr, die ebenfalls vom Projekt verfolgt wird, ist die Bordstromversorgung von Flugzeugen über Brennstoffzellen.<sup>1095</sup>

### H<sub>2</sub>Herten: Wasserstoffversorgungs- und Energiekomplementärsystem

Mehrere auf Wasserstoff und Brennstoffzellen spezialisierte Unternehmen haben sich auf einem alten Zechengelände zum Wasserstoff-Kompetenzzentrum Herten zusammengeschlossen, um Synergien von der Produktion über den Transport bis hin zur Anwendung von Wasserstoff zu erschließen. Das Projekt befindet sich derzeit im Probetrieb. Auf dem Projektgelände befinden sich hierzu zwei Anlagen, die elektrolytisch mittels regenerativen Stroms aus Wind und Biomasse Wasserstoff erzeugen. Ziel ist eine Wasserstoffproduktion von 30 m<sup>3</sup>/h. Für 2014 ist über einen zusätzlichen Gasmotor die Abwärmenutzung geplant<sup>1096</sup>. Darüber hinaus gibt es zur Anwendungserprobung eine Wasserstofftankstelle sowie mehrere Brennstoffzellenfahrzeuge. Das Leistungsangebot umfasst außerdem die Unterstützung der Firmen etwa hinsichtlich der Fördermöglichkeiten.<sup>1097</sup>

### Projekt Wind-Wasserstoff der Initiative ChemCoast

In der Initiative ChemCoast haben sich mehrere Unternehmen, Verbände, Landkreise und Kammern der Bundesländer Niedersachsen, Hamburg und Schleswig-Holstein zusammengeschlossen, um Entwicklungs- und Aufbaumöglichkeiten einer Wind-Wasserstoff-Wirtschaft am Beispiel der Region Unterelbe zu untersuchen. Die bisherigen Ergebnisse wurden im August 2013 in einer Studie veröffentlicht. Hiernach sollen nun an drei Standorten in der Region Unterelbe die Infrastruktur für die Erzeugung und Verteilung von Wasserstoff geschaffen und die Standorte miteinander verbunden werden. 2015 soll eine industrielle Elektrolyseanlage mit 20 MW elektrischer Eingangsleistung gebaut werden, um Wasserstoff für den industriellen Eigenbedarf zu produzieren. Bis 2025 sollen

---

1093 Bei der PEM-Elektrolysetechnologie besteht der Elektrolyseur aus einer protonendurchlässigen Polymermembran (englisch proton exchange membrane, abgekürzt PEM).

1094 vgl. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena): Interaktive Projektkarte - Power to Gas - Strategieplattform Power to Gas unter: <http://www.powertogas.info/power-to-gas/interaktive-projektkarte/rwe-demonstrationsanlage-ibbenbueren.html>. Online am 15.04.2014.

1095 vgl. HyCologne – Wasserstoff Region Rheinland e.V.: Projekt „CHEMERGY“ unter: <http://www.hycologne.de/de/projekt-chemergy/>. Online am 13.08.2014.

1096 vgl. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena): Interaktive Projektkarte - Power to Gas - Strategieplattform Power to Gas unter: <http://www.powertogas.info/power-to-gas/interaktive-projektkarte/h2herten.html>. Online am 15.04.2014.

1097 vgl. HTVG mbH: Wasserstoffstadt Herten – Herten setzt auf Wasserstoff unter: <http://www.wasserstoffstadt-herten.de/>. Online am 15.04.2014.

sodann eine weitere Elektrolyseanlage gebaut, die Eingangsleistungen beider Elektrolysen erweitert, eine Rohrleitungsinfrastruktur und ein Kavernenspeicher errichtet werden. Der produzierte Wasserstoff soll dann in der Industrie stofflich und in anderen Bereichen (insbesondere im Verkehrssektor) energetisch genutzt werden. Hinsichtlich der Wettbewerbsfähigkeit von regenerativ gewonnenem Wasserstoff gibt die Studie einen potenziellen Preis von 6-7 Euro pro Kilogramm<sup>1098</sup> an, womit dieser derzeit nicht konkurrenzfähig gegenüber Wasserstoff aus Erdgasreformierung (1,7 Euro/kg) bzw. Diesel (1,3 Euro/l)<sup>1099,1100</sup> ist.

### Entwicklungsstand (FuE, aktueller Stand, Beispiele)

Hinsichtlich der verschiedenen Systemkomponenten lässt sich folgender Entwicklungsstand bzw. Forschungsbedarf identifizieren:

**Elektrolyse:** Der allgemeine Entwicklungsstand für die Elektrolysen wurde bereits im Kapitel Elektrochemie beschrieben. Die zur Wasserelektrolyse geeignete alkalische und saure PEM-Elektrolyse wird zwar seit längerem in Nischenanwendungen z.B. zur Herstellung hochreinen Wasserstoffs kommerziell eingesetzt<sup>1101</sup>, sie ist aber noch nicht auf die Integration in die Systemlösung Power to Gas abgestimmt. Die für das PtG-System relevante Hochtemperaturelektrolyse ist derzeit auf dem Niveau der Grundlagenforschung.<sup>1102</sup>

**Wasserstoffspeicherung:** Hochdruck- und Flüssigspeicher werden bereits kommerziell eingesetzt.<sup>1103</sup> Im Bereich der Metall-Hydrid-Speicher werden momentan Legierungen, Materialien und Katalysatoren beforscht, um die Reaktionsabläufe zu beschleunigen und die Speicherdichten zu erhöhen. Größtenteils in der Grundlagenforschung befinden sich Ansätze, Wasserstoff in porösen Medien zu speichern. Zudem wird an sogenannten Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) geforscht, wobei verflüssigter Wasserstoff an das Trägermaterial sicher gebunden wird, was den Speicher transportfähig macht. Allerdings sind die derzeit erzielbaren Gesamtwirkungsgrade von 25 bis 30% vergleichsweise gering.<sup>1104</sup>

**Methanisierung:** Bereits in den 1970er Jahren wurde die Methanisierung aus Kohle industriell als Erdgassubstitut angewendet<sup>1105</sup>. Die Anwendung für die Systemlösung PtG wird derzeit im Rahmen des von der dena koordinierten Forschungsprojekts „Power-to-Gas“ untersucht<sup>1106</sup>.

1098 Preise regenerativen Wasserstoffs berechnet für obige Modellregion in den Jahren 2015 und 2025.

1099 2013 als Basisjahr für Preise von konventionell erzeugtem Wasserstoff und Diesel.

1100 vgl. Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Ein Zwischenbericht des Verbands der Chemischen Industrie (VCI): „Zukunft der Energiespeicher“. (2013), S. 5; vgl. ChemCoast: Gemeinsames Projekt von Politik und Unternehmen im Norden bringt zukunftsweisende Ergebnisse: (12.08.2013).

1101 vgl. EnergieAgentur.NRW (Hg.): Wasserstoff – Schlüssel zur Energiewende- Beispiele aus Nordrhein-Westfalen von der Herstellung bis zur Nutzung. (2013), S. 16.

1102 vgl. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (Hg.): Integration erneuerbaren Stroms in das Erdgasnetz Power to Gas – eine innovative Systemlösung für die Energieversorgung von morgen entwickeln. (2012), S. 11 sowie Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Ein Zwischenbericht des Verbands der Chemischen Industrie (VCI): „Zukunft der Energiespeicher“. (2013), S. 29 und Rundel, Paul et al.: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits-, und Energietechnik (UMSICHT) (Hg.): Speicher für die Energiewende. (2013), S. 82.

1103 vgl. EnergieAgentur.NRW (Hg.): Wasserstoff – Schlüssel zur Energiewende- Beispiele aus Nordrhein-Westfalen von der Herstellung bis zur Nutzung. (2013).

1104 vgl. Rundel, Paul et al.: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits-, und Energietechnik (UMSICHT) (Hg.): Speicher für die Energiewende. (2013), S. 82 f.

1105 Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena): Strom in Gas umwandeln - Power to Gas - Strategieplattform Power to Gas unter: <http://www.powertogas.info/power-to-gas/strom-in-gas-umwandeln/methanisierung.html>. Online am 15.04.2014.

1106 vgl. Rundel, Paul et al.: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits-, und Energietechnik (UMSICHT) (Hg.): Speicher für die Energiewende. (2013), S. 83.

Brennstoffzellentechnologien: In Nordrhein-Westfalen wird die Nutzung von Wasserstoff sowie die Brennstoffzellentechnologie durch das „NRW Hydrogen HyWay“-Programm (2. Phase 2013-2016) gefördert<sup>1107</sup>. Das durch die Kommission in Auftrag gegebene Gutachten zeigt auf, dass für das PtG-Konzept zwar inzwischen viele Studien vorliegen, diese aber immer nur Teilaspekte betrachten. Aus diesem Grund lässt sich (noch) kein geschlossenes energiewirtschaftliches Bild für Deutschland oder gar Nordrhein-Westfalen erstellen.<sup>1108</sup> Die bislang umfangreichste Studie im Auftrag des DVGW<sup>1109</sup> hat anhand von vier typischen Anwendungsfällen die Auslegung von Elektrolyseuren zur Wasserstoffherstellung sowie Anlagen zur anschließenden Methanisierung simuliert. Dabei zeigte sich, dass die Elektrolyseure mit Hilfe von EE-Überschussstrom nur 300 bis maximal 1.400 Volllaststunden betrieben werden könnten. Die angeschlossene Methanisierung würde 160 h bzw. 650-700 h betrieben werden können. Das entsprechende Gutachten kommt damit zu dem Schluss, dass „sich weder für Wasserstoff noch für synthetisches Methan ein wirtschaftlicher Vorteil zu anderen Endenergieträgern feststellen [lässt] (vergleiche Tab. 3<sup>1110</sup>). Dies gilt selbst für den Fall, dass der Strom ohne Kosten bezogen werden könnte. Erst bei Volllaststunden von 7000 und Strombezugskosten von Null erreichen beide Produkte das Preisniveau einiger vergleichbarer Produkte [...].“<sup>1111</sup> Hierfür wäre eine komplette Nutzung von regenerativem Strom notwendig.

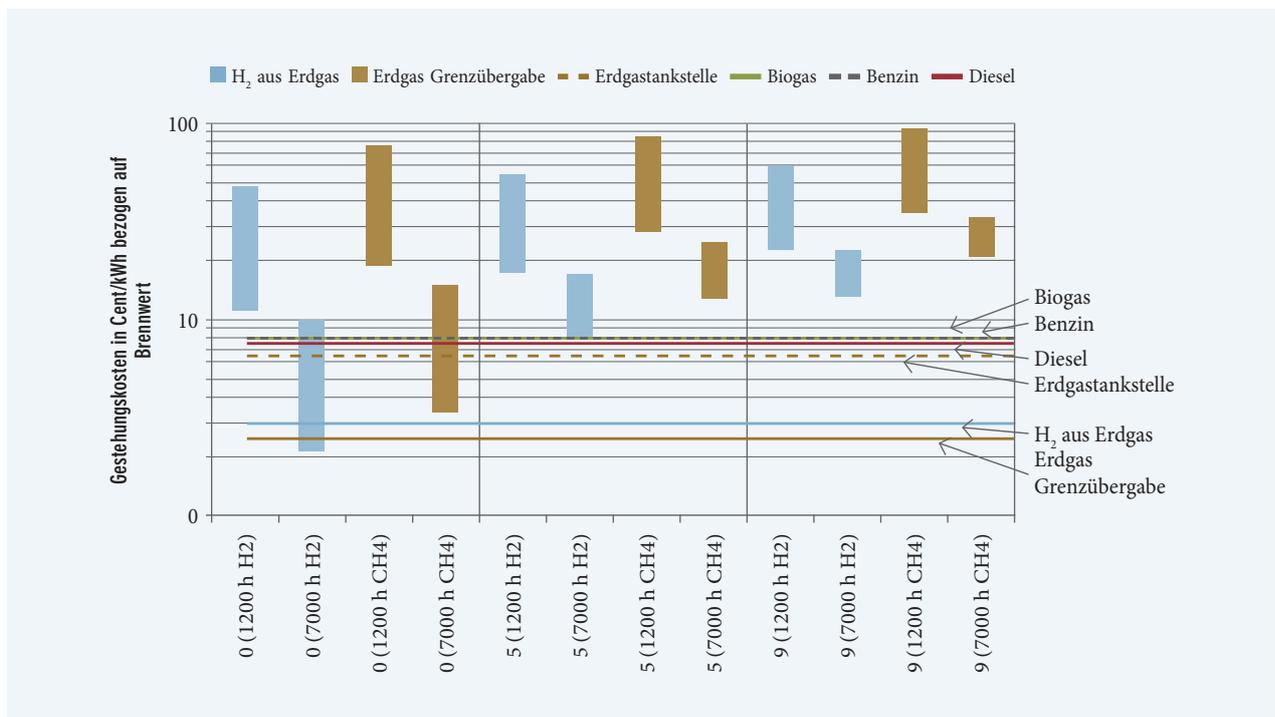


Abbildung 98: Spezifische Gestehekosten für Wasserstoff und synthetisches Methan im Vergleich zu anderen Energieträgern (wälzbare Kosten nach GasNZV abgezogen)<sup>1112</sup>

1107 vgl. EnergieAgentur.NRW: Erfolgreiches NRW-Förderprogramm für Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnik wird fortgesetzt – Klimaschutz ‚made in NRW‘ | EnergieAgentur.NRW (23.10.2013).

1108 Eichel, Rüdiger-A. et al.: Landtag NRW (Hg.): Gutachten „Power to Gas / Energiespeicher“ für die Enquete-Kommission II des Landtags von Nordrhein-Westfalen. (2014), S. 27-39.

1109 Gert Müller-Syring et al.: Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. (DVGW) (Hg.): Entwicklung von modularen Konzepten zur Erzeugung, Speicherung und Einspeisung von Wasserstoff und Methan ins Erdgasnetz. (2013).

1110 Tab. 3 aus PtG-Gutachten, S. 33.

1111 Eichel, Rüdiger-A. et al.: Landtag NRW (Hg.): Gutachten „Power to Gas / Energiespeicher“ für die Enquete-Kommission II des Landtags von Nordrhein-Westfalen. (2014), S. 34.

1112 ebd., S. 35.

### IV.3.5.2 Power to Chemicals

#### Power to Chemicals: Stoffliche Nutzung von Speichermolekülen

Power to Chemicals (PtC) beschreibt eine Systemlösung, bei der Überschussstrom zur Herstellung chemischer Grund- und Zwischenprodukte genutzt wird. Sie stellt wie das Power to Gas-Konzept eine Form der chemischen Energiespeicherung dar, die sich zur Langzeitspeicherung eignet, da die so produzierten Zwischenprodukte in die Wertschöpfungskette eingespeist werden.

Für die Systemlösung PtC sind potenziell alle energieintensiven elektrochemischen Verfahren denkbar. Als Speichermoleküle eignen sich die in Tabelle 43 aufgeführten, zu denen auch Wasserstoff und Methan zählen. Unter den potenziellen Speichermolekülen finden sich sowohl Folgeprodukte aus PtG-Wasserstoff (vgl. Nutzungspfad 6, Abschnitt IV.3.5.1) als auch solche ohne vorgelagerte Wasserstoffproduktion. Ebenfalls kann im Power to Chemicals-Konzept Wasserstoff als Kopplungsprodukt aus stromverbrauchenden chemischen Prozessen wie der Chlor-Alkali-Elektrolyse (d.h. nicht aus Wasserelektrolyse) anfallen und genutzt werden. Die Speichermoleküle können grundsätzlich in bestehenden chemischen Wertschöpfungsketten eingesetzt werden und damit entsprechende Plattformchemikalien aus fossilen Rohstoffen substituieren.

Tabelle 43: Überblick Speichermoleküle aus energieintensiven Verfahren<sup>1115</sup>

Speicher-molekül	Verfahren	Energie-gehalt	Entwicklungsstand	Anwendungen
Wasserstoff	Kværner-Verfahren <sup>1112</sup>	119 MJ/kg	Noch nicht anwendbar, Forschungsbedarf	s.o. Unterkapitel PtG • Chemie: Hydrierungsmittel (z.B. Düngemittel) • Erdölraffinerien (zur hydrierenden Entschwefelung), • Metall- und Elektronikindustrie (als Schutz-, Reduktions- und Schweißgas), • Glasindustrie
	PtG		Demonstrations- und Pilotanlagen	
Methan	PtG	50-55,7 MJ/kg	Forschungs- und Entwicklungsstadium	Kraftstoffe sowie als C1-Basischemikalie für alle kohlenstoffhaltigen Stoffe für die chemische Industrie <sup>1113</sup>
Methanol	Katalytische Verfahren	22,4 MJ/kg	jahrzehntelange Erfahrungen in großtechnischer Anwendung	Kraftstoffe, BZ, Grundchemikalie für C1-Wertschöpfungskette
Ethanol	Synol-Verfahren	26,4 MJ/kg	Etabliert seit ca. 1940, Modifikation der Fischer-Tropsch-Synthese	Als Grundchemikalie für C2-Wertschöpfungskette
Chlor	Chlor-Alkali-Elektrolyse <sup>1114</sup>		Ausgereifte Technik, bereits jahrzehntelang großtechnisch angewendet	Bestandteil zahlreicher chemischer Wertschöpfungsketten (bei Herstellung 65% der chemischen Produkte)
Acetylen	Lichtbogenverfahren <sup>1116</sup>	49,9 MJ/kg	Technik vorhanden, derzeit in Deutschland nur eine Anlage	Synthesebaustein für die Herstellung von Spezial- und Feinchemikalien

### Anwendungsbeispiele PtC

Als PtC-Anwendungsbeispiel wurde die CO<sub>2</sub>RRECT-Initiative in Niederaußem (NRW) gewählt. In dieser haben sich verschiedene Vertreter aus Industrie (Energie- bzw. Chemiebranche) und Wissenschaft zusammengeschlossen. Seit 01. Februar 2013 werden dort aus regenerativ – mittels Elektrolyse – erzeugtem Wasserstoff und CO<sub>2</sub>, welches aus der Rauchgaswäsche des Braunkohlekraftwerks Niederaußem stammt, die Basischemikalien Methan bzw. Methanol erzeugt. Die Elektrolyse produziert bis zu 50 Nm<sup>3</sup> <sup>1118</sup> Wasserstoff pro Stunde und dient dabei auch der Erprobung des Einsatzes in

1113 vgl. Schüth, Ferdi: Chemische Energiespeicherung unter: <http://archiv.aktuelle-wochenschau.de/2010/w15/woche15.html> (2010). Online am 14.04.2014.

1114 Zur Methanspaltung im Plasmaverfahren, als Kopplungsprodukt entsteht Ruß; in den 1980er und 1990er Jahren entwickelt und im Produktionsmaßstab umgesetzt wurde, derzeit aber nicht mehr im Betrieb ist. Nach: [www.diebrennstoffzelle.de](http://www.diebrennstoffzelle.de): Kvaerner-Verfahren unter: <http://www.diebrennstoffzelle.de/wasserstoff/herstellung/kvaerner.shtml>. Online am 02.03.2015.

1115 vgl. Schüth, Ferdi: Chemische Energiespeicherung unter: <http://archiv.aktuelle-wochenschau.de/2010/w15/woche15.html> (2010). Online am 14.04.2014.

1116 Als Kopplungsprodukt entsteht beim Membran- bzw. Amalgamverfahren Wasserstoff, der ebenfalls stofflich genutzt werden kann. Bei der Sauerstoffverzehrkathode entsteht kein Wasserstoff.

1117 Altbekanntes Verfahren auf Basis gasförmiger Kohlenwasserstoffe (ursprünglich auf Basis von Kohle, aber auch andere Rohstoffe denkbar), das wegen seiner Energieintensität aktuell nur noch selten genutzt wird. Acetylen (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) ist sehr energiereich und ist im Vergleich zu Methan (CH<sub>4</sub>) wasserstoffärmer, wodurch Potential zur zusätzlichen Wasserstoff-Ausbeute besteht. Siehe auch Kapitel IV.2.3.4.

1118 Angabe in Normkubikmeter (Nm<sup>3</sup>).

einem Stromverbund mit hohem Anteil an erneuerbaren Energien.<sup>1119</sup> Nach erfolgreicher Förderung wird nun eine entsprechende Produktionsanlage gebaut.

Ein weiteres Anwendungsbeispiel für PtC ist Sunfirefuel, ein vom BMBF gefördertes Verbundprojekt zur Herstellung regenerativer Treibstoffe aus mittels Wasserelektrolyse erzeugtem Wasserstoff und CO<sub>2</sub>. Treibstoffe bieten gegenüber Wasserstoff und Methan als Gase den Vorteil, dass sie sich aufgrund ihrer hohen Energiedichte für den Transport über lange Distanzen zwischen Stromerzeugung und -verbrauch eignen. Im Projekt soll zur Wasserstoffgewinnung die Hochtemperaturelektrolyse genutzt werden, die großes Potenzial hat, bei der jedoch noch hoher Forschungsbedarf besteht. Es sollen Wirkungsgrade von 70% erzielt werden.<sup>1120</sup>

### IV.3.6 Potenzial Demand Side Management (DSM)/Supply Side Management (SSM)

Vor dem Hintergrund des volatilen Stromangebots aus Wind- und Sonnenenergie wird in diesem Bericht untersucht werden, in welchem Umfang eine an das Stromangebot angepasste Steuerung elektrochemischer Verfahren einen Beitrag zur Stabilisierung der Stromnetze und zur effizienteren Nutzung des volatil anfallenden Stroms leisten kann. Bei der nachfolgenden Betrachtung wird unterschieden zwischen den Beiträgen durch eine flexible Steuerung der Stromnachfrage durch eine angepasste Fahrweise elektrochemischer Verfahren (DSM) sowie andererseits durch die Bereitstellung von Strom aus Speichern und anderen Anlagen bzw. durch deren Abschaltung bei einem temporären Überangebot (SSM).

Für DSM kann die chemische Industrie einen wichtigen Beitrag durch eine an das Stromangebot angepasste Fahrweise (energieintensiver) chemischer Industrieprozesse leisten<sup>1121</sup>. Dabei können auch Verfahren wie Power to Gas und Chemicals und die Wasserstoffelektrolyse in Betracht kommen. DSM als flächendeckendes Energie-/Strommanagementkonzept befindet sich derzeit noch in der Pilotphase: Die dena führt seit Ende 2013 bis voraussichtlich Frühjahr 2016 das Pilotprojekt „Demand-Side-Management Bayern“ durch. Es werden dort zunächst Unternehmensanalysen vorgenommen, um wirtschaftliche Lastmanagement-potenziale zu identifizieren. Zudem sollen technische und ökonomische Marktpotenziale abgeleitet und daraus Standards zur Erschließung von DSM-Potenzialen entwickelt werden (vgl. Tabelle 44).<sup>1122</sup> Die heute bestehenden Anlagen sind auf einen kontinuierlichen, stabilen Betrieb ausgelegt, so dass keine oder kaum Erfahrungen bezüglich der Auswirkungen einer flexiblen Fahrweise (entsprechend dem DSM-Konzept) von Industrieprozessen bestehen.

1119 vgl. Rundel, Paul et al.: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits-, und Energietechnik (UMSICHT) (Hg.): Speicher für die Energiewende. (2013), S. 82 f. vgl. ebd., S. 83 f. vgl. dena: Interaktive Projektkarte – Power to Gas – Strategieplattform Power to Gas unter: <http://www.powertogas.info/power-to-gas/interaktive-projektkarte/co2rrect.html>. Online am 15.04.2014.

1120 vgl. BMBF: Herstellung von Kraftstoffen aus CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O unter: <http://www.sunfirefuel.com/> (2013). Online am 15.04.2014.

1121 vgl. DECHEMA (Hg.): Elektrifizierung chemischer Prozesse. (2015); Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Technologische Optionen zur flexiblen Nutzung von elektrischer Energie und Energiespeichern in der Chemieindustrie (finaler Entwurf eines Diskussionspapiers). (2015).

1122 vgl. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (Hg.): dena-Pilotprojekt Demand-Side-Management Bayern. Potenziale erkennen – Märkte schaffen – Energiewende gestalten – Klima schützen. (2013), S. 15 f.

Tabelle 44: Demand Side Management-Potenzial nach Stromspannungs-Strängen<sup>1123</sup>, Erläuterung<sup>1124</sup>

	Dauer [1/4-h]	NS-Strang [kW]		MS-Strang [kW]		HS-Masche [MW]	
		positiv	negativ	positiv	negativ	positiv	negativ
Weißer Ware	1	2,4	1,5	143,3	90,6	17,2	10,9
Elektromobile	4	18,5	18,5	137,5	67,4	16,5	8,1
Wärmepumpe	8	0,4	3,9	22,3	247,5	2,5	28,2
Prozesskälte Prozesswärme Belüftung (Gewerbe)	4	0,5	1,0	91,3	-182,0	11,0	21,8
Klimakälte Heizungssysteme (Gewerbe)	7	0,5	4,7	87,9	-876,7	10,5	105,2
NE-Metalle Metallerzeugung Grundstoffchemie (industrie)	16	-	-	3,1	28,5	4,2	38,4
Papier, Stein, Erde, Ernährung Klimatisierung (industrie)	8	-	-	1,6	30,7	2,1	41,5
<b>Summe</b>	-	<b>22,2</b>	<b>26,9</b>	<b>568,5</b>	<b>1.434,1</b>	<b>64,0</b>	<b>254,1</b>

Die DSM-Potenziale der chemischen Industrie und der Nichteisenmetallerzeugung liegen auf der Verbrauchsseite bei der Mittelspannung bei 28,5 kW und ganz besonders bei der Hochspannung bei 38,4 MW. Basierend auf der Entwicklung unseres Energiesystems in der Vergangenheit ist zu erwarten, dass der chemischen Forschung und Industrie eine immer größere Bedeutung bei der Erzeugung und Wandlung von Energie zukommen wird.<sup>1125</sup>

1123 entnommen aus: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (Hg.): dena-Netzstudie II. Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015-2020 mit Ausblick 2025. (2010), S. 248.

1124 Die Überschriften „negativ“ und „positiv“ im Kopf der Tabelle bezeichnen die negativen und positiven DSM-Potentiale, dabei bedeuten positiv > Abschaltung von Lasten; negativ > Zuschaltung von Lasten Die Zahlen „-182,0“ und „-876,7“ in der 6. Spalte sind zu lesen bis zu 182,0 usw.

1125 DECHEMA; GDCh; DBG; DGMK; VDI-GVC; VCI (Hg.): Positionspapier Energieversorgung der Zukunft – der Beitrag der Chemie. (2007), S. 5.

## IV.4 Annahmen

### IV.4.1 Relevante Megatrends

Die folgenden Annahmen ermöglichen die Abschätzung der zukünftigen Entwicklung von elektrochemischen Verfahren in der chemischen Industrie und verwandter Industriezweige sowie der Energiespeicherung. Dabei werden die wesentlichen Zukunftsentwicklungen und deren Auswirkungen auf das Stromangebot und die Art der Stromerzeugung für die Industrie betrachtet. Die relevanten Megatrends dafür sind:

- Demografische Entwicklung,
- Umbrüche bei Energie und Ressourcen,
- Klimawandel und Umweltbelastung,
- Urbanisierung und neue Mobilitätsmuster,
- neue Konsummuster,
- Konvergenz von Technologien,
- Business Ökosystem.

Die Megatrends sind bereits in der Berichtseinleitung beschrieben. Die Auswirkungen der Megatrends werden zunächst für den Strommarkt mit starker Relevanz für die Elektrochemie dargestellt. Anschließend werden die Auswirkungen der Megatrends für die Energiespeicherarten Wärmespeicher (Kapitel IV.4.2.1), Batterien (Kapitel IV.4.2.2) und Power to Gas/Power to Chemicals (IV.4.2.3) dargestellt.

Die Auswirkungen der Megatrends auf die Stromerzeugung und den Stromverbrauch werden im Folgenden erläutert und wo machbar quantifiziert. Denn die Entwicklung von Energiespeicherlösungen steht im engen Zusammenhang mit den Entwicklungen auf dem Energiemarkt.

#### Zukünftiger Stromverbrauch

Die Megatrends lassen erwarten, dass es bei Berücksichtigung von Effizienzgewinnen weltweit insgesamt zu einer Steigerung des Stromverbrauchs kommt, der allerdings in den Industrieländern und den weniger entwickelten Ländern sehr unterschiedlich ausfällt. Wie in Abbildung 100 gezeigt, wird der weltweite Stromverbrauch nach dem IEA WEO New Policies Scenario (wahrscheinlichstes Szenario) von 21.410 TWh bis 2035 auf 36.640 TWh zunehmen (Basis 2010). Der Anstieg in den OECD-Ländern und Europa ist jedoch wesentlich geringer: von 9.618 TWh auf 11.956 TWh in 2035 (OECD), von 3.232 TWh auf 3.938 TWh (Europa).<sup>1126</sup> Während nach diesen Daten im Zeitraum bis 2035 weltweit mit einem Anstieg von 2,9% pro Jahr auszugehen ist, beträgt die Steigerungsrate für die OECD nur 0,97% pro Jahr und für die EU 0,87% pro Jahr.

#### Zukünftige Stromerzeugung

Im Folgenden werden die zukünftigen Veränderungen in der Stromerzeugung dargestellt. Der Anteil der fossilen Rohstoffe für die Stromerzeugung nimmt zwar in allen Regionen ab, bleibt jedoch dominierend. Für die Betrachtung der Elektrochemie und die Stromspeicherung ist zu beachten, dass der Anteil des fluktuierend anfallenden Stroms aus Photovoltaik und Wind bis 2035 noch zunimmt. Die EU sowie auch die Bundesregierung haben hierfür entsprechende Ziele formuliert.

---

<sup>1126</sup> International Energy Agency (IEA) (Hg.): World Energy Outlook 2012. (2012), S. 180.

Der Anteil der Primärenergie aus erneuerbaren Quellen soll in der EU zum Erreichen der Klimaziele bis 2030 auf 30% steigen, 2014 wurde das Ziel jedoch auf 27% abgesenkt.<sup>1127</sup> In Europa soll der Anteil der Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen bis 2035 auf 43% steigen. Abbildung 101 zeigt, dass der Zuwachs des erneuerbaren Stroms in Europa überwiegend aus den volatilen Quellen Wind und Sonne stammen wird. In Deutschland ist ein Anteil von 30% (2030) geplant. Weitere Ziele sind: 45% bis 2040, 60% am Bruttoenergieverbrauch bis 2050.<sup>1128</sup> Nach einer vom Umweltbundesamt (UBA) in Auftrag gegebenen Studie ist die Stromerzeugung bis 2050 vollständig aus erneuerbaren Quellen möglich.<sup>1129</sup>

Die nachfolgende Abbildung 99 zeigt die geplanten Zwischenziele des Ausbaus EE.

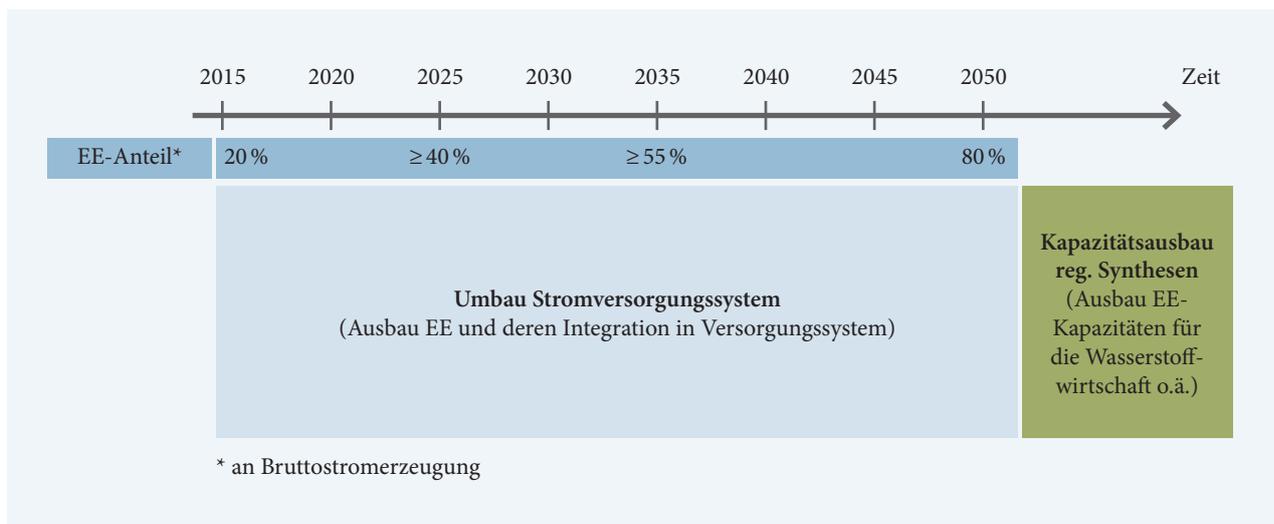


Abbildung 99: Abschätzung der zeitlichen Entwicklung der Rahmenbedingungen (eigene Darstellung)

Die Abbildung 100 und Abbildung 101 zeigen die entsprechenden Prognosen zur Entwicklung der Stromerzeugung weltweit und in Europa im Jahre 2035. Dargestellt sind jeweils die Kapazitäten sowie Quellen.

1127 Thomson Reuters (Markets) Deutschland GmbH: Regierung – Keine Einigung auf Klimaziele bei EU-Gipfel unter: <http://de.reuters.com/article/domesticNews/idDEBEEA2I04N20140319> (2014).

1128 Umweltbundesamt (UBA) (Hg.): Ausbauziele der erneuerbaren Energien. (2013).

1129 UBA: Energieziel 2050: 100 Prozent Strom aus erneuerbaren Quellen (07.07.2010).

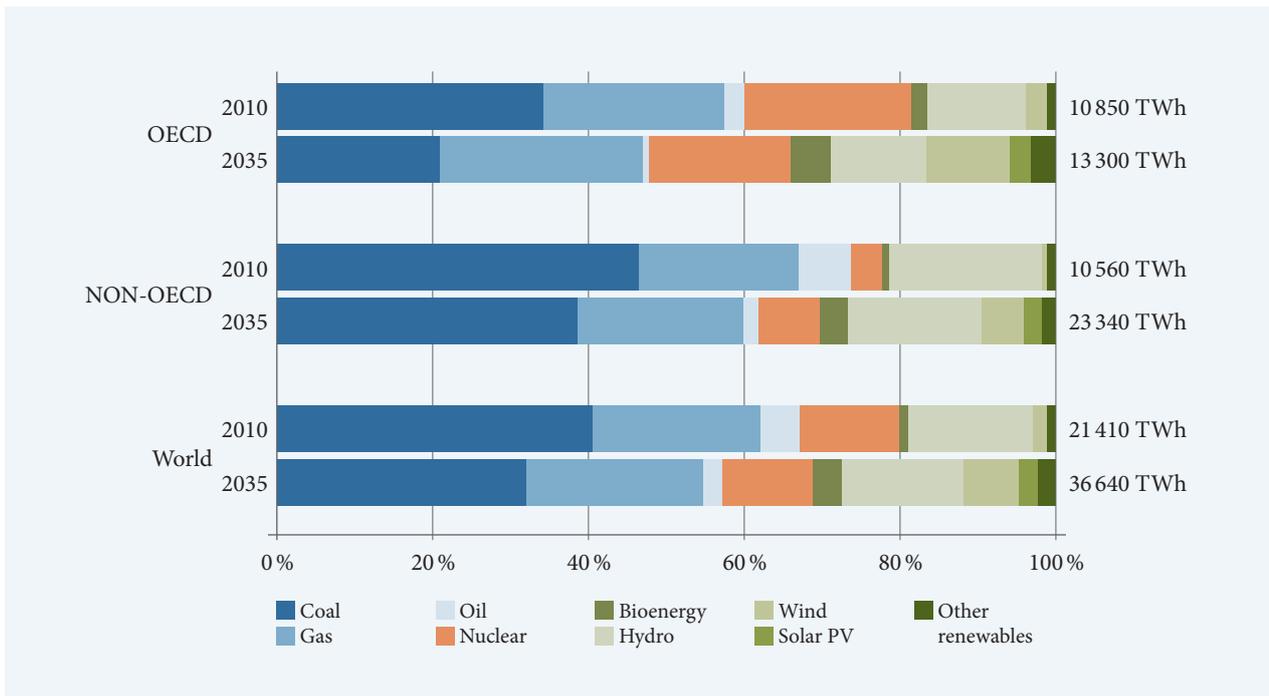


Abbildung 100: Prognose 2035 – Globale Stromerzeugung nach Quelle und Regionen, nach dem WEO „New Policies Scenario“<sup>1130</sup>



Abbildung 101: Zuwachs der Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen in Europa<sup>1131</sup>

1130 International Energy Agency (IEA) (Hg.): World Energy Outlook 2012. (2012), S. 183.

1131 ebd., S. 200.

In Deutschland wird die Bruttostromerzeugung mittelfristig voraussichtlich in etwa auf dem heutigen Niveau (2013: 629 TWh<sup>1132</sup>) bleiben (2030: 621 TWh<sup>1133</sup>). Die Stromerzeugungskapazitäten Nordrhein-Westfalens werden sich bis 2020 kaum ändern (2012: 46 GW; Prognose 2020: 45 GW; Prognose 2030: 39 GW; Prognose 2050: 35 GW)<sup>1134</sup>. Abbildung 102 zeigt die mögliche Entwicklung der Bruttostromerzeugung in Deutschland (Darstellungen aus anderen Quellen weichen teilweise davon ab).

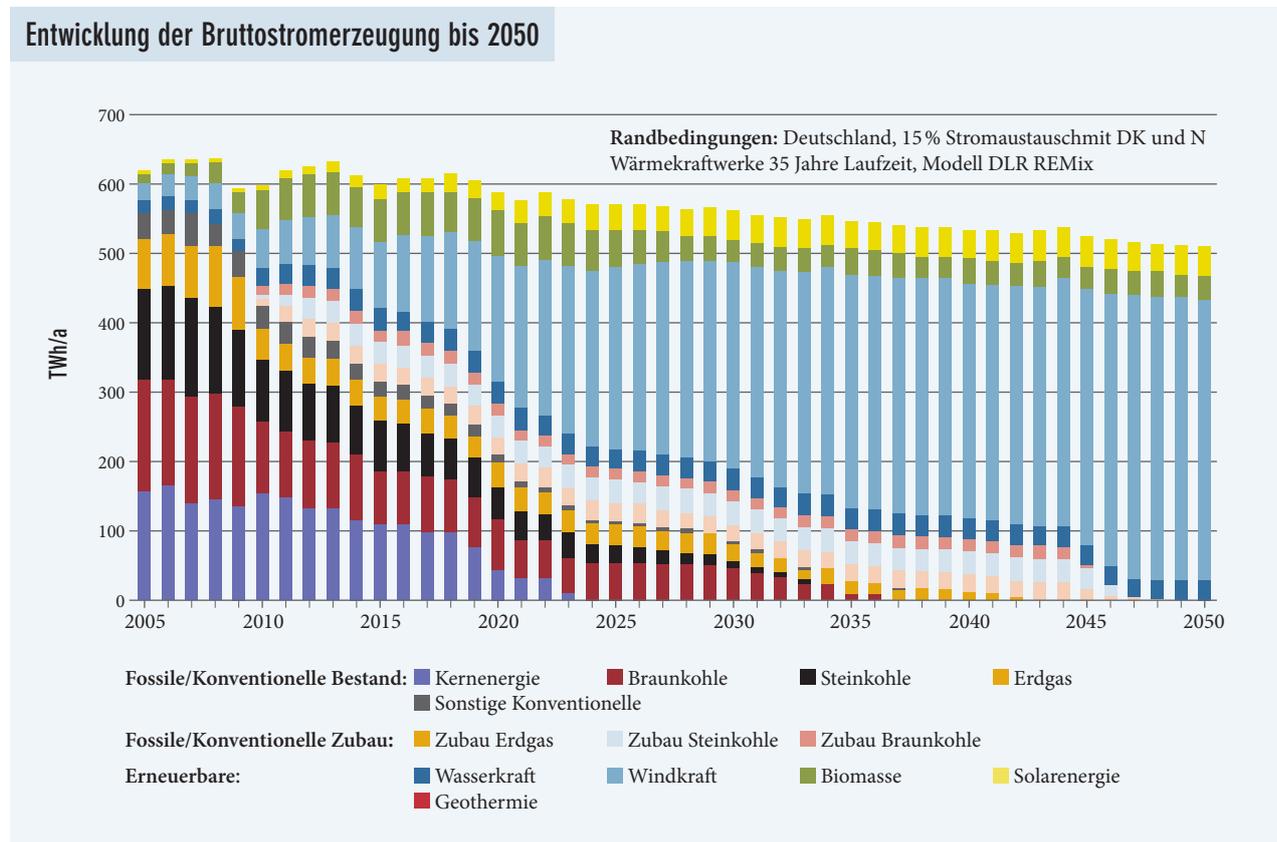


Abbildung 102: Prognose Entwicklung der Bruttostromerzeugung bis 2050<sup>1135</sup>

Hieraus lassen sich folgende Abschätzungen zu den installierten Leistungen der verschiedenen Energieerzeugungssysteme ableiten: Die dena rechnet nach dem „Szenario NEP B 2012“ im Jahr 2030 mit folgenden Beiträgen an installierter Leistung aus erneuerbaren Energien: Windenergie 61,1 GW; Photovoltaik 62,8 GW; Biomasse 9,2 GW; Kraft-Wärme-Kopplung 21,4 GW.<sup>1136</sup> Die Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen werden hier – wegen ihres nach Wärmebedarf gesteuerten Betriebs – den erneuerbaren zugerechnet. Abbildung 103 zeigt, dass die bis 2030 installierten Leistungen von Stromanlagen mit erneuerbaren Energiequellen mit Ausnahme der Biomasse (Anteil 4%) fluktuierende

1132 vgl. AG Energiebilanzen e. V. (AGEB); Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW); Deutscher Braunkohlen-Industrie-Verein e.V. (DEBRIV); Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland 1990 – 2013 unter: <http://www.ag-energiebilanzen.de/>. Online am 24.02.2015.

1133 vgl. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER); Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (RWI); Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung (ZEW) (Hg.): Die Entwicklung der Energiemärkte bis 2030. (2010), S. 10.

1134 Prognos AG: Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz (MKULNV) (Hg.): Positionspapier zur Vorbereitung von Initialgesprächen mit der energieintensiven Wirtschaft (Prognos-Gutachten). (2013).

1135 Entnommen aus: Rundel, Paul et al.: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits-, und Energietechnik (UMSICHT) (Hg.): Speicher für die Energiewende. (2013), S.8.

1136 Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (Hg.): dena-Verteilnetzstudie. Ausbau- und Innovationsbedarf der Stromverteilnetze in Deutschland bis 2030. (2012).

Stromerzeuger sind. Damit nimmt die Volatilität des Stromangebots noch weiter zu, was den Bedarf an Stromspeichern bzw. an Flexibilität bei der Stromabnahme weiter steigert.

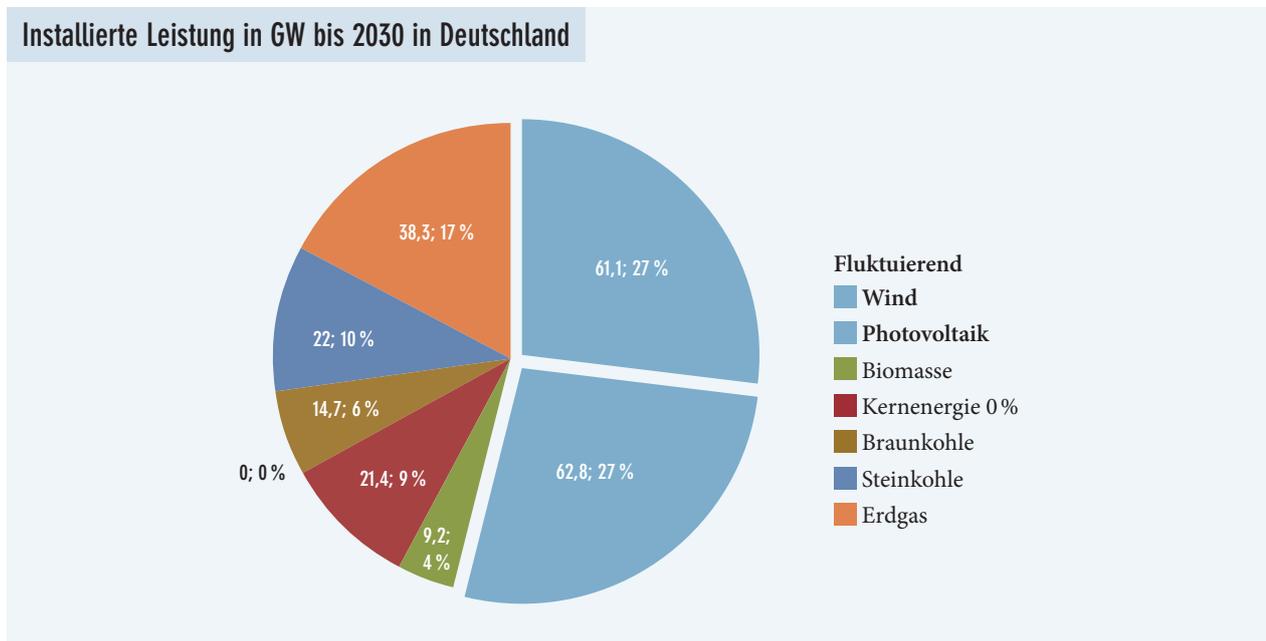


Abbildung 103: Verteilung der insgesamt installierten Leistung 2030 in Deutschland<sup>1137</sup>

### Resultierende Entwicklungen hinsichtlich Speicherbedarf, Überschussstrom und Kosten

Eine Analyse verschiedener aktueller Energieszenarien für Deutschland<sup>1138,1139,1140</sup> im Rahmen eines durch die Enquetekommission in Auftrag gegebenen Gutachtens<sup>1141</sup> kommt bezüglich des zukünftigen Speicherbedarfs zu dem Ergebnis, dass dieser deutlich über die vorhandenen Kapazitäten hinausgeht. Abhängig von den betrachteten Rahmenbedingungen und den hierfür getroffenen Annahmen variiert jedoch der quantifizierte Speicherbedarf stark.<sup>1142</sup>

Anhand der VDE-Studie<sup>1143</sup> aus dem Jahr 2012, die im vorstehenden Gutachten berücksichtigt worden ist, sowie der 2014 veröffentlichten Studie von Agora Energiewende<sup>1144</sup> werden im Folgenden die sich durch die Energiewende ändernden Rahmenbedingungen für verschiedene EE-Zubauszenarien bis 2050 dargestellt.

1137 Zahlen aus Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (Hg.): dena-Netzstudie II. Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015-2020 mit Ausblick 2025. (2010), S. 6 und 48; Gesamtleistung BRD: 224,3 GW; davon: 96,4 GW fossil ( 43% ), fluktuierend: 123,9 GW.

1138 Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V (VDE) (Hg.): Energiespeicher für die Energiewende- Speicherungsbedarf und Auswirkungen auf das Übertragungsnetz für Szenarien bis 2050. (2012).

1139 Kuhn, Philipp: Technische Universität München (Hg.): Speicherbedarf im Stromnetz. Fachtagung Energieeffizienz – eine stete Herausforderung an Wissenschaft und Praxis. (2011)

1140 UBA: Energieziel 2050: 100 Prozent Strom aus erneuerbaren Quellen (07.07.2010).

1141 Eichel, Rüdiger-A. et al.: Landtag NRW (Hg.): Gutachten „Power to Gas / Energiespeicher“ für die Enquete-Kommission II des Landtags von Nordrhein-Westfalen. (2014).

1142 ebd., S. 17-23.

1143 vgl. Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V (VDE) (Hg.): Energiespeicher für die Energiewende- Speicherungsbedarf und Auswirkungen auf das Übertragungsnetz für Szenarien bis 2050. (2012).

1144 Agora Energiewende (Hg.): Studie – Stromspeicher in der EnergiewendeUntersuchung zum Bedarf an neuen Stromspeichern in Deutschland für den Erzeugungsausgleich, Systemdienstleistungen und im Verteilnetz. (2014).

- Beide Studien zeigen für das Jahr 2025 mit einem EE-Anteil an der Stromproduktion von 40%, dass eine Bereitstellung der benötigten Flexibilitäten durch Speicher aufgrund ihrer relativ hohen Investitionskosten nicht wirtschaftlich ist. Andere Flexibilisierungsmaßnahmen wie DSM und insbesondere steuerbare Kraftwerke stellen kostengünstigere Alternativen dar. Für einen Speicherzubaubestünde laut Agora-Studie ein Bedarf von  $\leq 8$  GW an Kurz- und Langzeitspeichern. Bezüglich des EE-Überschussstroms ergeben sich laut VDE-Studie in diesem Szenario nur wenige Stunden im Jahr ( $< 50$ ), in denen die EE-Erzeugung den Verbrauch übersteigt ( $< 1$  Promille Überschussenergie im Verhältnis zu erzeugter Menge), jedoch können die auftretenden Spitzen sehr groß sein. Die Stromgestehungskosten sind nach der VDE-Studie vergleichbar mit dem Preisniveau von 2010. Entsprechend beider Studien führt ein Speichereinsatz aus Kostengründen zu einer Verdrängung von Gas- und Steinkohle- hin zu Braunkohlekraftwerken.
- Für das Jahr 2035 mit einem EE-Anteil von ca. 60% ist entsprechend der Agora-Studie ein geringer Ausbau an Langzeitspeichern erforderlich ( $\sim 3$  GW). Die Investitionskosten der Speicher dominieren weiterhin deren Gesamtkosten. Der Speichereinsatz führt zu einer Verstetigung des Grundlastanteils in der Residuallast und verringert so den Bedarf an Spitzenlasten.
- Durch den weiteren EE-Zubau bis auf 80% im Jahr 2050 entsteht entsprechend der VDE-Studie ein Speicherbedarf, der die heute vorhandenen Speicherkapazitäten übersteigt. Dabei ist der Bedarf an Langzeitspeichern deutlich größer als für Kurzzeitspeicher. Ohne Speicherzubaub wäre eine Abregelung von 7% der erzeugten Energie notwendig. Ein Vollzubaub an entsprechender Speicherkapazität ist allerdings ökonomisch nicht sinnvoll. Empfohlen wird ein Zubau von 50% der maximal benötigten Speicherkapazitäten, da hierdurch nur noch 1% Abregelung notwendig ist. Unter dieser Annahme besteht ein Speicherbedarf von 18 GW installierter Leistung mit Speicherkapazität von 7,5 TWh für Langzeitspeicher sowie von 14 GW mit (70 GWh Kapazität) für Kurzzeitspeicher. Die Kosten in diesem Szenario werden vor allem durch Kosten für Langzeitspeicher (75%) dominiert. Erst in diesem Szenario ergibt sich ein positiver Klimaschutzbeitrag durch den Speichereinsatz in Form einer 10%igen Reduzierung von  $\text{CO}_2$ -Emissionen zusätzlich zu den Einsparungen durch eine Substitution fossiler Brennstoffe durch EE in der Erzeugung. Die Stromgestehungskosten steigen nur um 10% (in dieser Zubauvariante) im Vergleich zu 2010. Dies resultiert vor allem aus einer Kostendegression für EE-Anlagen sowie wegfallender Kosten für die Brennstoffe in konventionellen Kraftwerken.
- Im 90%-Szenario der Agora-Studie besteht ein Speicherbedarf von 16 GW für Langzeitspeicher und von 7 GW für Kurzzeitspeicher. In diesem Fall ist der Speicherzubaub ebenfalls mit ökonomischen Vorteilen verbunden, sofern sich die Speicherkosten günstig entwickeln. Der Speichereinsatz begrenzt die erforderliche Abregelung auf 3%.
- Bei einer Vollversorgung mit EE (d.h. 100%) verdreifacht sich laut der VDE-Studie der Speicherbedarf. Auch die Agora-Studie sagt einen dramatisch steigenden Speicherbedarf voraus. Dabei nimmt laut der VDE-Studie der Bedarf an Kurzzeitspeichern um das 2,5-fache im Vergleich zum 80% Szenario zu (36 GW installierte Leistung mit 184 GWh an Speicherkapazität). Für Langzeitspeicher besteht sogar ein 3,5-mal größerer Bedarf (68 GW mit 26 TWh). Die Stromgestehungskosten steigen durch den steigenden Speicherbedarf. Bei einer Anhebung auf 100% EE steigen die Gestehungskosten des Stroms um 20%.

Damit kommen beide Studien übereinstimmend zu dem Ergebnis, dass mit steigendem Anteil der Bedarf an Flexibilitäten zunimmt, der zunächst kostengünstiger durch alternative Maßnahmen wie DSM und steuerbare Kraftwerke anstelle von Speichern bereitgestellt werden können. Erst ab einem EE-Anteil von ca. 80% ergibt sich ein nennenswerter Bedarf an Speichern bzw. ein ökonomischer Vorteil durch den Speichereinsatz. Bei der Abschätzung des zukünftigen Speicherbedarfs ist zu beachten, dass die Studien das Gesamtsystem des deutschen Stromversorgungsnetzes und dessen Kostenoptimierung im Blick haben. Auf regionaler Ebene bestehen z.T. schon heute Randbedingungen, die einen Speichereinsatz erforderlich und diesen auch kosteneffizient machen.

Zur Quantifizierung der zukünftigen Überschussstrommengen findet man in der Literatur, abhängig von den unterschiedlichen Randbedingungen, Werte von 14 bis 54 TWh für einen EE-Anteil von 80 bis 100% (vgl. Abbildung 104 und Abbildung 105). Die genauen Mengen des in Zukunft zur Verfügung stehenden Überschussstroms sind dementsprechend derzeit noch nicht absehbar.

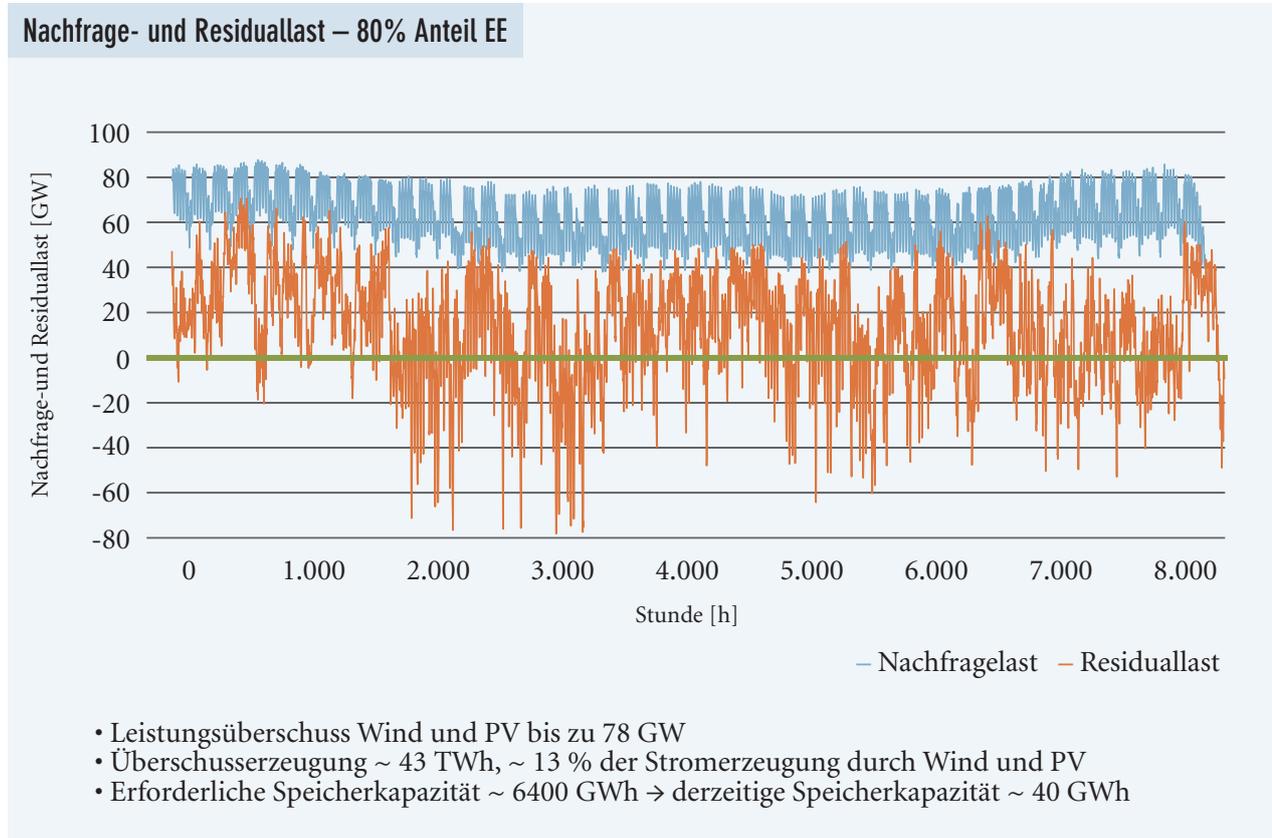


Abbildung 104: Leistungsüberschuss und Überschusserzeugung bei 80%-Anteil EE<sup>1145</sup>

1145 Vgl. Voß, Alfred: IER Universität Stuttgart (Hg.): Energiewende – Quo vadis? (2014), S. 21.

Studie	Szenario	Speicher	Überschuss		Randbedingungen
			GW	TWh	
WWF	2050: 96,7% EE-Strom („Innovation“; ohne CCS)	PSW et al.	20,4	54,7	EE-Import zulässig: 48 TWh Gesicherte Leistung durch GT & Speicher
Leitstudie 2011	2050: 84,9% EE-Strom (Szenario A)	P2G H <sub>2</sub> PSW + AA-CAES	3,3 9,0	7,0 6,0	EE-Import zulässig: 62 TWh 88 TWh EE-Strom H <sub>2</sub> Verkehr 19 TWh EE-Strom H <sub>2</sub> KWK
Leitstudie 2010		P2G H <sub>2</sub> PSW + AA-CAES	40,0	76,0	EE-Import zulässig: 196 TWh 330 TWh EE-Strom H <sub>2</sub> für Verkehr, KWK & H <sub>2</sub> -GT
SRU	2050: 100% EE-Strom (Szenario 1.a)	PSW CAES	8,0 32,0	1,0 34,0	Kein EE-Import 53 TWh Abregelung p.a.
VDE 2012	80% EE-Strom (Szenario D)	Kurzzeit Langzeit	25,8 28,6	14,8 14,8	Kein EE-Import/-Export
Quelle: P. Stenzel, R. Bongartz, J. Fleer, W. Hennings, Energiespeicher, BWK 65, 2013 (4) S. 58-69					
Bestand 2012	~25% EE-Strom	PSW	6,8	6,0	25 TWh EE-Export 0,5 TWh Abregelung p.a.

Abbildung 105: Verfügbare Überschussmengen für Energiespeicher unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen<sup>1146</sup>

Aus heutiger Sicht zeichnet sich ab, dass für sehr hohe EE-Anteile (nach 2040) nicht eine bestimmte Flexibilisierungsoption, sondern ein Mix von Maßnahmen die kostengünstigste Lösung verspricht. Wie dieser Mix idealerweise aussehen wird, kann derzeit nicht abgeschätzt werden, da dieser unter anderem von der Art und Geschwindigkeit des EE-Zubaus, der zukünftigen Preisentwicklung bei Speichern sowie von deren technischer Verfügbarkeit abhängt. Insgesamt stehen Kurzzeitspeicher in stärkerer Konkurrenz zu anderen Flexibilisierungsmaßnahmen (insbesondere DSM und KWK-Anlagen) als Langzeitspeicher.

#### IV.4.2 Auswirkungen der Megatrends auf die Elektrochemie

Die theoretischen Grundlagen der Elektrochemie sind gut untersucht und werden zur mathematischen Modellierung von chemischen Reaktionen und zur technischen Auslegung der Anlagen angewandt. Forschungsbedarf besteht bei der technischen Anwendung der Elektrochemie für neue Synthesewege, besonders bei der Synthese von organischen Stoffen. Dafür sind die Elektrodenoberflächen und ihre Abstände voneinander, ihre katalytische Wirkung bzw. das Auffinden der am besten geeigneten Katalysatoren und Zelleneinbauten sowie die Geometrie der Zellen auszulegen. Bei den organischen Elektrosynthesen ist auch die Auswahl von geeigneten Systemen für die Einstellung der Leitfähigkeiten der Elektrolyten notwendig. Bei der Nutzung von Strom aus Quellen mit nicht-konstanter Verfügbarkeit sind die Anpassung der Prozesse an das schwankende Stromangebot zu optimieren und mathematische Modellen zu entwickeln, die die Optimierung der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens nach den Stromkosten erlauben. Diese Steuerungsmechanismen können sehr komplex sein, wenn die Weiterverarbeitung der elektrochemisch erzeugten Zwischenprodukte bzw. deren Lagerkapazität mit einbezogen wird.

<sup>1146</sup> Kessler, Alois: EnBW Energie Baden-Württemberg AG (Hg.): Speicher für die Energieversorgung von morgen. (2014), S. 3.

### IV.4.3 Auswirkungen der Megatrends auf die Energiespeicherarten

#### IV.4.3.1 Auswirkungen der Megatrends auf Wärmespeicher

##### Marktpotenzial

Umbrüche in Energie und Ressourcen, neue Konsummuster und die durch die Konvergenz der Technologien angetriebene Miniaturisierung ermöglichen die Effektivierung von Wärmeenergie-nutzung. Diese kann durch Wärmespeicherlösungen erzielt werden. Vor allem in dicht besiedelten Regionen, die durch die Urbanisierung entstehen, führen angepasste Infrastrukturen zu einem Aus-bau von Wärmespeicherung. Systemlösungen werden durch den Trend des „Business Ökosystems“ geschaffen, indem neue Wertschöpfungspartnerschaften zwischen Abwärmeproduzenten und Wär-mebereitstellern entstehen.

Die chemische Industrie ist hinsichtlich ihres Wärmebedarfs (nach der Metallherzeugung und –ver-arbeitung) eine der energieintensivsten Branchen<sup>1147</sup>. Etwa 3/4 der Energie werden für die Erzeugung von Prozesswärme eingesetzt. Entsprechend hoch ist dort das (theoretische) Potenzial für die An-wendung von Wärmespeichern. Hierbei ist zu beachten, dass in der chemischen Industrie ein sehr hoher Bedarf von Hochtemperaturwärme ( $>250^{\circ}\text{C}$ ) besteht (Anteil  $>50\%$ <sup>1148</sup>). Damit unterscheidet sich die chemische Industrie von anderen industriellen Sektoren, dem Handel und Gewerbe sowie von Privathaushalten, wo vor allem Systeme für den Niedertemperatur- ( $<100^{\circ}\text{C}$ ), aber auch Mit-teltemperaturbereich relevant sind. Die in der chemischen Industrie benötigte Wärmeenergie wird heute vielfach durch eigene KWK-Anlagen erzeugt.

Wegen der hohen Energiekosten werden in der Chemie trotz eines bereits sehr hohen Effizienzgrads auch künftig weitere Effizienzverbesserungen angestrebt, weshalb mit einem steigenden Bedarf an Wärmespeicherlösungen zu rechnen ist.

##### Forschungsbedarf

Das Innovationspotenzial für Wärmespeicher liegt in Verbesserungen der Materialien (a) zur Wär-mespeicherung und (b) zur Wärmeübertragung.

(a) Wärmespeichernde Medien müssen nahezu kostenfrei zur Verfügung stehen, damit Wärmespei-cher wirtschaftlich zu betreiben sind. Zur weiteren Reduzierung der Wärmeverluste können geeig-nete Dämmmaterialien (effektivere Dämmstoffe und Superisolatoren) z.B. nanoporöse Baustoffe entwickelt und genutzt werden, um die Effizienz des Heizwärmeeinsatzes zu verbessern. Sie können von der chemischen Industrie zur Verfügung gestellt werden.<sup>1149</sup> Dies gilt sowohl für den industriellen wie den häuslichen Wärmegebrauch.

Vor allem Hochtemperaturwärmespeicher sind auf hohe Bauteilbeständigkeit, Materialwechselsta-bilität und Korrosionsbeständigkeit angewiesen. Für solarthermische Kraftwerke der Zukunft wer-den Wärmeträger benötigt, die deutlich höheren Temperaturen standhalten.<sup>1150</sup>

1147 vgl. Lauterbach, C.; Schmitt, B.; Vajen, K.: Institut für Thermische Energietechnik, Universität Kassel (Hg.): Das Potential solarer Prozesswärme in Deutschland- Teil 1 des Abschlussberichtes zum Forschungsvorhaben „SOPREN – Solare Prozesswärme und Energieeffizienz“. (2011).

1148 vgl. ebd.

1149 DECHEMA; GDCh; DBG; DGMK; VDI-GVC; VCI (Hg.): Positionspapier Energieversorgung der Zukunft – der Beitrag der Chemie. (2007), S. 26f.

1150 Tamme, Rainer: Wärmespeicher: Sonne, Wind und Abwärme sammeln. In: Von Kohlehalden und Wasserstoff: Energiespeicher – zentrale Elemente der Energieversorgung (2013).

(b) Thermoelektrika ermöglichen die Umwandlung von Wärme in Elektrizität. Es handelt sich um Materialien, die über eine hohe elektrische, aber eine geringe Wärmeleitfähigkeit verfügen. Effektivere Thermoelektrika können helfen Abwärme in Form elektrischer Energie nutzbar zu machen. Mit Mitteln der Nanotechnologie können diese Materialeigenschaften besser eingestellt werden.<sup>1151,1152</sup>

#### IV.4.3.2 Auswirkungen der Megatrends auf Batterietechnik

##### Marktpotenzial

Die Konvergenz der Technologien führt dazu, dass die chemische Industrie einen größeren Beitrag zur Energiebereitstellung liefern wird.<sup>1153</sup> Systeminnovationen des Business Ökosystems stellen Lösungen für dezentrale und intelligent gesteuerte Kleinspeicher zur Verfügung.

Vor allem dezentrale Stromspeicherung in Batterien ist für EE-Anlagen und haushaltsnahe Energiebereitstellung denkbar: Eine Verquickung von Produktion und Speicherung von PV-Strom in Batterien wird voraussichtlich ab 2020 wirtschaftlich werden.<sup>1154,1155</sup> Neue Konsummuster erhöhen zudem die Nachfrage nach haushaltsnahen Batteriespeichern, die als System in der Lage sind große Mengen von erneuerbar produziertem Strom zu speichern.

Der Ausbau der Elektromobilität hat durch neue Fahrzeug- und Antriebstechniken Auswirkungen auf die Batterietechnik. Durch Miniaturisierung kann außerdem die Energiedichte von Batterien weiter erhöht werden.

Eine großtechnische Produktion von großen Batteriesystemen ist in Deutschland möglich. Allerdings bestehen große Produktionskapazitäten in asiatischen Ländern wie Südkorea, die insbesondere bei kleinen Batterien über einen großen Technologievorsprung verfügen.<sup>1156</sup> Ein Potenzial für eine heimische Produktion könnte insbesondere bei Redox-Flow-Batterien bestehen<sup>1157</sup>.

##### Forschungsbedarf

Die Funktionsweise von Batterien wird maßgeblich von den Materialien bestimmt, aus denen sie aufgebaut sind.<sup>1158</sup> Die chemische Industrie kann hierzu Materialien bereitzustellen, die Kosten, Haltbarkeit und Sicherheit der Batterien verbessern. Fortschritte der Batterietechnik hängen vor allem von der Materialentwicklung der Elektroden und der Elektrolyte ab.<sup>1159</sup>

Für Blei-Säure-Akkus gibt es Forschungsbedarf zur Verbesserung der Energiedichte, Zyklenstabilität und für eine Gewichtsreduktion.

---

1151 DECHEMA; GDCh; DBG; DGMK; VDI-GVC; VCI (Hg.): Positionspapier Energieversorgung der Zukunft – der Beitrag der Chemie. (2007), S. 15f.

1152 Schüth, Ferdi: Quo vadis, NanoEnergie? In: UNIKATE (2013), S. 17–24.

1153 DECHEMA; GDCh; DBG; DGMK; VDI-GVC; VCI (Hg.): Positionspapier Energieversorgung der Zukunft – der Beitrag der Chemie. (2007), S. 5.

1154 ebd., S. 104-106.

1155 Drake, Frank-Detlef et al.: Sind Speicher wirklich der fehlende Baustein zur Energiewende? In: et Energiewirtschaftliche Tagesfragen (2013), 8, S. 34–37.

1156 Hörpel, Gerhard (MEET): Landtag NRW (Hg.): Enquetekommission II Protokoll 15. Sitzung (nichtöffentlich)Anhörung „Energiespeicher“. (2014), S. 6.

1157 Sauer, Uwe (RWTH Aachen): ebd., S. 19.

1158 Hörpel, Gerhard (MEET): ebd., S. 4.

1159 DECHEMA; GDCh; DBG; DGMK; VDI-GVC; VCI (Hg.): Positionspapier Energieversorgung der Zukunft – der Beitrag der Chemie. (2007), S. 5.

Lithium-Ionen-Batterien haben im Vergleich zu anderen Batterietechniken das höchste Innovationspotenzial.<sup>1160</sup> Sie werden mittelfristig Blei-Säure-Batterien ablösen.<sup>1161</sup> Forschungsbedarf liegt hier bei nicht brennbaren Elektrolyten, kostengünstigeren Aktivmassen, Produktion großflächiger Zellen und der Temperaturstabilität.

Für verschiedene Redox-Flow-Batterien liegt der Forschungsbedarf im Bereich kostengünstigerer Materialien, Maßstabvergrößerung und einem optimierten Aufbau.

Für innovative Batteriekonzepte fehlt technisches Wissen vor allem über eine bifunktionale, poröse Gaselektrode.

Noch nicht erschlossenes Forschungs- und Entwicklungspotenzial, das zu einer heimischen Batterieproduktion führen kann, wird bei Redox-Flow-Batterien und bei großformatigen Lithium-Ionen-Batterien gesehen.<sup>1162,1163</sup>

#### IV.4.3.3 Auswirkungen der Megatrends auf PtG und PtC

Im Folgenden werden die Auswirkungen der Megatrends auf die Systemlösungen PtG und PtC unter wirtschaftlichen (Marktpotenzial) sowie technischen (Forschungsbedarf) Aspekten beschrieben.

##### Marktpotenzial

Entsprechend Abbildung 99 ergibt sich zunächst Marktpotenzial für die energetische Nutzung durch Rückverstromung von elektrolytisch erzeugtem Wasserstoff und daraus hergestelltem Methan (PtG-Konzept). Darüber hinaus kann PtG-Wasserstoff bzw. das entsprechende Methan stofflich in der Chemie und im Verkehrssektor eingesetzt werden (PtC-Konzept). Dabei besitzen chemische Energieträger mit hoher Energiedichte besondere Bedeutung, da sie als synthetische Kraftstoffe z.B. im Flug-, Schiffs- und Schwerlastverkehr eingesetzt werden können, wo die Energiedichte elektrischer Energie zum Antrieb nicht ausreicht. Mit einer stofflichen Nutzung von PtG-Wasserstoff und – Methan ist voraussichtlich erst dann zu rechnen, wenn mindestens ein Anteil von 80% EE-Strom erreicht wird. Bei einem Strompreis von 3 – 5 ct/KWh geht die Agora-Studie davon aus, dass sich bereits vor 2050 entsprechende Märkte entwickeln werden.<sup>1164</sup>

##### PtG-Konzept

Ab 2030 spielt PtG in Deutschland eine zunehmende Rolle als Langzeitspeicher von Strom aus EE. Bereits vor 2030 kann PtG eine Bedeutung zukommen, solange wegen fehlender Stromnetze eine Verteilung des Windstroms aus Norddeutschland in die stromverbrauchenden südlichen Länder nicht möglich ist.<sup>1165</sup>

1160 Hörpel, Gerhard (MEET): Landtag NRW (Hg.): Enquetekommission II Protokoll 15. Sitzung (nichtöffentlich) Anhörung „Energiespeicher“. (2014), S. 27.

1161 ebd.

1162 Hörpel, Gerhard (MEET): Landtag NRW (Hg.): Enquetekommission II Protokoll 15. Sitzung (nichtöffentlich) Anhörung „Energiespeicher“. (2014), S. 4.

1163 Sauer, Uwe (RWTH Aachen): ebd., S. 17.

1164 Agora Energiewende (Hg.): Studie – Stromspeicher in der Energiewende Untersuchung zum Bedarf an neuen Stromspeichern in Deutschland für den Erzeugungsausgleich, Systemdienstleistungen und im Verteilnetz. (2014).

1165 vgl. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (Hg.): Integration erneuerbaren Stroms in das Erdgasnetz Power to Gas – eine innovative Systemlösung für die Energieversorgung von morgen entwickeln. (2012), S. 10.

*Wasserstoff*

Die EU strebt bis 2050 den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft an, um ein kohlenstoffreies Energiesystem zu realisieren<sup>1166</sup>. Der Aufbau zielt insbesondere auf den Verkehrssektor ab. Danach sollen 2050 ca. 80% der Personenwagen und Stadtbusse mit Wasserstoff-BZ betrieben werden, um die Klimaziele hinsichtlich der angestrebten CO<sub>2</sub>-Einsparungen erreichen zu können. Wasserstoff soll zudem sowohl in zentralen stationären Endverbraucheranwendungen als auch in entlegenen Regionen eingesetzt werden.<sup>1167</sup>. Dementsprechend ist von einem stark steigenden Bedarf an Wasserstoff auszugehen.

Die Weiterentwicklung im Bereich E-Mobilität erfordert infrastrukturelle Anpassungen: Wasserstoff- bzw. BZ-betriebene Fahrzeuge benötigen Wasserstofftankstellen. Für Erdgasbetriebene Fahrzeuge sind solche bereits vorhanden.

Derzeit beträgt der Preis für Wasserstoff an der Tankstelle ca. 9,50 Euro/kg<sup>1168</sup> aus regenerativen Quellen und ca. 3 bis 4,20 Euro/kg<sup>1169</sup> aus der Erdgasreformierung. Für den PtG-Wasserstoff wird eine moderate Preisreduktion von ca. 7 Euro/kg in 2015 auf ca. 5,80 Euro/kg in 2025 vorhergesagt<sup>1170</sup>.

*Methan (Entwicklung deutsches Gasnetz)*

Es ist eine Erweiterung der Kapazität des deutschen Gasnetzes bis 2025 um 15,2 Mrd. m<sup>3</sup> geplant, von denen voraussichtlich 9 Mrd. m<sup>3</sup> realisiert werden<sup>1171</sup>. Entsprechend des Netzentwicklungsplans Gas 2012 sind die Kosten zur Erdgasnetzerweiterung stark abhängig vom angestrebten Wasserstoffgehalt. Für eine Wasserstoffbeimischung von maximal 1 Volumenprozent wurden Kosten von 105 Mio. Euro abgeschätzt, die sich bei einer Wasserstofftoleranz von 10 Volumenprozent auf 3.750 Mio. Euro<sup>1172</sup> erhöhen würden, weil dafür große Investitionen erforderlich wären.<sup>1173</sup> Nach dem Netzentwicklungsplan Gas 2012 bestünde ein theoretisches Einspeisepotenzial von Wasserstoff aus Offshorewindkraftanlagen von 13.000 MW im Jahr 2022, was eine Wasserstoffkonzentration von 60% in Teilen des Erdgasnetzes zur Folge hätte. Laut der Strategieplattform Power to Gas wird jedoch wegen der begrenzten Beimischungsmöglichkeit von Wasserstoff nur mit einer realisierbaren Einspeisekapazität von 1.000 MW gerechnet.<sup>1174</sup> Der Koalitionsvertrag der Bundesregierung sieht als Ausbaupfad für Wind auf See 6,5 GW bis 2020 und 15 GW bis 2030 installierte Leistung vor, wobei jährlich im Durchschnitt zwei Windparks mit einer Leistung von jeweils ca. 400 MW gebaut werden müssten<sup>1175</sup>. Diese Kapazität steht für eine PtG-Nutzung nur zur Verfügung, bis die erforderlichen Stromtrassen verlegt sind, da der Strom dann ohne die Umwandlungsverluste in die Regionen mit hoher Stromnachfrage verschoben werden kann.

1166 Vgl. Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (Hg.): The European Hydrogen Energy Roadmap. (2008) S. 4.

1167 vgl. ebd.

1168 vgl. Büttner, Roman; Stockburger, Christoph: Brennstoffzellenautos: Die Wasserstoff-Offensive des Peter Ramsauer unter: <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/brennstoffzelle-der-bessere-kraftstoff-fuer-elektroautos-a-835997.html> (2012). Online am 13.08.2014.

1169 vgl. Höhle, Bernd; Grube, Thomas: Kosten einer potenziellen Wasserstoffnutzung für E-Mobilität mit Brennstoffzellenantrieben. In: et Energiewirtschaftliche Tagesfragen (2011), 6, S. 62–66, S. 66.

1170 vgl. ChemCoast: Gemeinsames Projekt von Politik und Unternehmen im Norden bringt zukunftsweisende Ergebnisse: (12.08.2013).

1171 vgl. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena): Speicherkapazitäten - Gas speichern - Power to Gas - Strategieplattform Power to Gas unter: <http://www.powertogas.info/power-to-gas/gas-speichern/speicherkapazitaeten.html>. Online am 15.04.2014.

1172 Ohne Kosten für die Umstellung von Abnehmerprozessen und Überwachungstechnologien.

1173 vgl. Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas e.V. (Hg.): Netzentwicklungsplan Gas 2012 der deutschen Fernleitungsnetzbetreiber. (2013).

1174 vgl. Verband der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft e.V. (VIK); Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Positionspapier Wasserstoffeinspeisung in Erdgasnetze. (2013), S. 7.

1175 vgl. Die Bundesregierung (Hg.): Deutschlands Zukunft gestalten – Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD. (2013), S. 41.

Die Verfügbarkeit von CO<sub>2</sub> im Jahr 2050 zur Methanisierung des Wasserstoffs wurde in der Anhörung „Rohstoffsituation“ entsprechend der Ziele der Bundesregierung auf 50 Mio. t abgeschätzt<sup>1176</sup>.

### *Brennstoffzelle*

Die Brennstoffzelle könnte in Zukunft als Bindeglied zwischen nachhaltiger Mobilität (für elektrische Antriebe) und Energieversorgung dienen<sup>1177</sup>. Im Bereich der Brennstoffzellen wird das größte Marktpotenzial bei der Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC) gesehen: Für 2025 wird ein Marktanteil von 40% prognostiziert<sup>1178</sup>. Für die Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC) wird 2025 ein Marktanteil von 25% prognostiziert<sup>1179</sup>.

### **PtC-Konzept**

Bedingt durch den prognostizierten Rohstoffwandel hin zu einem höheren Anteil von alternativen Rohstoffen, wie Biomasse etc. am Rohstoffmix der chemischen Industrie (vgl. Rohstoff-Kapitel) könnte gleichzeitig der Bedarf der chemischen Industrie an Wasserstoff steigen, wenn es künftig zu einer Nutzung von Kohle und CO<sub>2</sub> als alternativem Rohstoff kommt. Denn beide Rohstoffe haben im Vergleich zum aktuellen Basisrohstoff Erdöl einen geringeren Wasserstoffgehalt pro Kohlenstoffatom und müssen daher mit Wasserstoff reduziert werden.

### *Chlor*

Chlor ist relevant für 65% aller chemischen Produkte. Entsprechend des prognostizierten Chemiewachstums<sup>1180</sup> wird es einen steigenden Bedarf an Chlor geben.

### *Ethanol*

Ethanol wird zukünftig vermehrt als alternative C2-Basischemikalie dienen (an Ethylen orientiert)<sup>1181</sup>. Ethanol besitzt einen höheren Marktwert als Methan, eignet sich als Flüssigkeit besser für den Transport und kann z.B. Kraftstoffen beigemischt werden. Der Alkohol Butanol ist hierfür noch besser geeignet.<sup>1182</sup>

## **Forschungsbedarf**

### **PtG-Konzept**

Für alle im Rahmen von PtG relevanten Elektrolyseverfahren besteht Forschungsbedarf bei der Verbesserung der Systemstabilität und der Kostenreduktion bei den Komponenten. Hierzu bedarf es auch der Forschung zum Betrieb unter schwankenden Bedingungen (Lastwechsel).<sup>1183</sup> Zudem besteht Forschungsbedarf bei der Weiterentwicklung der Elektrolyseure (z.B. Hochdruckelektrolyseure) und allgemein den unterschiedlichen Technologien zur Methanisierung. Für die Markteta-

1176 Meyer, Bernd (TU Freiberg): Landtag NRW (Hg.): Enquetekommission II Protokoll 5. Sitzung (nichtöffentlich). (2013), S. 56.

1177 Smolinka, Tom; Günther, Martin; Garcke, Jürgen: Fraunhofer ISE; FCBAT (Hg.): NOW Studie „Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien“ Kurzfassung des Abschlussberichts. (2011), S. 5.

1178 Funke, Klaus: Energiegewinnung ohne Abgase. In: Von Brennstoffzellen bis Leuchtdioden (2008), S. 51 f.

1179 ebd., S. 51 f.

1180 Vgl. Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Die deutsche chemische Industrie 2030.VCI-Prognos-Studie. (2013).

1181 Vgl. Schüth, Ferdi: Chemische Energiespeicherung unter: <http://archiv.aktuelle-wochenschau.de/2010/w15/woche15.html> (2010). Online am 14.04.2014.

1182 Haas, Thomas (Evonik): Landtag NRW (Hg.): Enquetekommission II Protokoll 5. Sitzung (nichtöffentlich). (2013), S. 53.

1183 Vgl. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (Hg.): Integration erneuerbaren Stroms in das Erdgasnetz Power to Gas – eine innovative Systemlösung für die Energieversorgung von morgen entwickeln. (2012), S. 11 sowie Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Ein Zwischenbericht des Verbands der Chemischen Industrie (VCI): „Zukunft der Energiespeicher“. (2013), S. 29 und Rundel, Paul et al.: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits-, und Energietechnik (UMSICHT) (Hg.): Speicher für die Energiewende. (2013), S. 82.

blierung der Systemlösung PtG im großtechnischen Maßstab ist die Forschung auf eine Steigerung des Gesamtwirkungsgrades und der Reduzierung der Erzeugungskosten für Wasserstoff und Methan ausgerichtet.<sup>1184</sup> Bezüglich des bei der Methanisierung von Wasserstoff benötigten CO<sub>2</sub> sind durch Forschung die Technologien zur Abtrennung zu verbessern.<sup>1185</sup>

Bei den Brennstoffzellen besteht allgemein Forschungsbedarf hinsichtlich kostengünstigerer und effizienterer sowie beständiger Materialien (insbesondere Katalysatoren aus nicht-edlen Metallen), der Erhöhung der Lebensdauer ohne Leistungsverluste sowie der Alltagstauglichkeit (z.B. Gewichts- und Volumenreduktion)<sup>1186</sup>.

### PtC

Das Lichtbogenverfahren zur Acetylenherstellung wird in Deutschland zurzeit lediglich in Marl angewendet. Das Acetylen dient als Rohstoff für die dort ebenfalls angesiedelte Butandiolanlage.<sup>1187</sup> Zwar bietet die auf Acetylen aufbauende Reppe-Chemie<sup>1188</sup> einen Zugang zu vielen Wertschöpfungsketten, doch ist sie weitgehend durch modernere Prozesse verdrängt worden und wird heute nur noch in wenigen Produktionsverfahren eingesetzt. Eine Renaissance der Reppe-Chemie bedürfte breiter Forschungsarbeiten.

Das Kværner-Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff und Aktivkohle (reiner Kohlenstoff) im Plasma befindet sich derzeit noch in der Pilotphase und wird daher frühestens in 10 bis 15 Jahren im industriellen Maßstab einsetzbar sein<sup>1189</sup>.

---

1184 Zitiert aus ebd., S. 84.

1185 Vgl. Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Ein Zwischenbericht des Verbands der Chemischen Industrie (VCI): „Zukunft der Energiespeicher“. (2013), S. 29.

1186 Vgl. Kabza, Alexander: PEMFC – proton exchange membrane fuel cell unter: <http://pemfc.de/#zweipunktsechs> (2013). Online am 15.04.2014.

1187 Vgl. ISP MARL GmbH: Butandiolanlage unter: [http://www.isp-marl.de/index.php?option=com\\_content&view=article&id=66&Itemid=72&lang=de](http://www.isp-marl.de/index.php?option=com_content&view=article&id=66&Itemid=72&lang=de). Online am 15.04.2014.

1188 Als Reppe-Chemie wird der technisch außerordentlich wichtige moderne Teil der Acetylenchemie nach seinem Begründer Walter Reppe bezeichnet. Nach: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH: Acetylenchemie unter: <http://www.spektrum.de/lexikon/chemie/acetylenchemie/84> (1998). Online am 02.03.2015.

1189 Vgl. Kern, Jürgen: Verfahren zur Wasserstoff-Gewinnung unter: <http://www.hycar.de/herstellung.htm> (2007). Online am 15.04.2014.

## IV.5 Optionen

Das Energiesystem steht vor großen Veränderungen. Verschiedene Handlungsoptionen stehen der chemischen Industrie theoretisch zur Verfügung, um auf diese Veränderungen zu reagieren. Die Optionen werden nach Potenzialen elektrochemischer Synthesen für eine effizientere und nachhaltigere Produktion (Optionen H.1a und H.1b) und Potenzialen elektrochemischer Verfahren zur Energiespeicherung (Optionen H.2a und H.2b) unterschieden. Darüber hinaus werden Optionen für weitere Lösungen zur Energiespeicherung betrachtet (Optionen H.3a-d).

Die Optionen zur elektrochemischen Synthese kommen dort zum Tragen, wo elektrochemische Prozesse andere chemisch-katalytische Verfahren ergänzen oder teilweise ersetzen können und wo der Ersatz der chemischen Verfahren durch elektrochemische Verfahren mit Effizienz- oder Nachhaltigkeitsvorteilen verbunden ist. Konkret soll das Potenzial von Verfahren zur Herstellung von Grundstoffen bewertet werden. Die Option bezieht sich dabei nur auf die Verfahren der organischen Chemie mit Reduktions- oder Oxidationsreaktionen und nicht auf organische Substitutionsreaktionen, da diese nicht elektrochemisch durchführbar sind und nicht auf Verfahren der anorganischen Chemie, da diese bereits etabliert sind. Weitere Grenzen der Machbarkeit bei den organischen elektrochemischen Reaktionen werden durch die Viskosität der Stoffe und die Neigung zur Kristallisation oder Ausfällung gesetzt. Wegen der verfahrensbedingt sehr geringen Abstände der Elektrodenplatten von nur wenigen Millimetern kann der Durchfluss behindert werden.

Das Potenzial elektrochemischer Prozesse wird dabei beispielhaft anhand der organischen Grundchemikalien Adipodinitril und Sebacinsäure sowie anhand des Lichtbogen-Verfahrens zur Produktion von Acetylen betrachtet.

Voraussetzung dafür, dass Überschussstrom in chemischen Prozessen eingesetzt werden kann, ist die Anbindung der Chemieparks an das öffentliche Stromnetz mit genügender Kapazität. Das ist in der Regel gegeben, da die Chemieparks, trotz meist eigener Stromerzeugung in KWK-Anlagen, aus Gründen der Betriebssicherheit über diese Anschlüsse verfügen.

Ein weiterer Aspekt ist die Nutzung des Demand Side Managements durch elektrochemische Verfahren, die in der chemischen Industrie Einsatz finden (z.B. die Chlor-Alkali-Elektrolyse) sowie entsprechenden elektrochemischen Verfahren in anderen Industriezweigen wie der Aluminiumproduktion. Es wird auch gezeigt, wo die chemische Industrie durch geänderte Fahrweisen der stromverbrauchenden bzw. energieintensiven Anlagen einen Beitrag zur Netzstabilität bei den Stromnetzen durch Abnahme von Überschussstrom aus erneuerbaren Quellen mit schwankendem Angebot leisten kann.

Die Optionen zur Energiespeicherung beschreiben das Potenzial des Ausbaus von Energiespeicherlösungen entsprechend der Ausbauziele Erneuerbare Energien der Bundesregierung für die Energiewende. Zum einen kann die chemische Industrie als Bereitsteller und Entwickler von Materialien, die Energiespeicherlösungen ermöglichen, von einem steigenden Bedarf nach Speichern profitieren. Zum anderen ist sie selbst integraler Bestandteil des Energiesystems und könnte künftig stärker Energiedienstleistungen durch DSM oder Nutzung von Energiespeichern im Rahmen des sich verändernden Energiesystems erbringen.

## IV.5.1 Ausbau der elektrochemischen und energieintensiven Produktion organischer Produkte

### Option H.1a: Elektrochemische Produktion (organische Elektrosynthesen) der organischen Grundchemikalien Adipodinitril und Sebacinsäure

#### Beschreibung

Zurzeit gibt es in Deutschland keine nennenswerten industriellen elektrochemischen Verfahren zur Herstellung von organischen Produkten, es werden nur Kleinmengen nach diesen Verfahren hergestellt. Adipodinitril und Sebacinsäure werden heute in großen Mengen konventionell produziert. Diese Stoffe sind jedoch auch elektrochemisch zugänglich. Die elektrochemischen Verfahren von Adipodinitril und Sebacinsäure könnten einen Beitrag zur Netzstabilisierung beitragen, wenn sie nach Stromangebot gesteuert werden.

#### Begründung

Der Gesamtstromverbrauch in Deutschland für alle heute angewandten elektrochemischen Verfahren zur Herstellung von organischen Produkten wurde in der schriftlichen Antwort zur Anhörung „Elektrochemische Verfahren“ von den Sachverständigen Weber und Kintrup mit 0,1 TWh pro Jahr angegeben. Das ist im Vergleich zur Chlor-Alkali-Elektrolyse mit rund 14 TWh und der Aluminiumelektrolyse mit 5,4 TWh sehr wenig<sup>1190</sup>. Technisch möglich wäre die elektrochemische Herstellung von Sebacinsäure, Adipodinitril, aromatischen Aldehyden, Aminophenol, Piperidin und weiteren, wobei das elektrochemische Produktionspotenzial von Adipodinitril 500.000 t pro Jahr und Sebacinsäure 50.000 t pro Jahr beträgt, was einem Stromverbrauch von ca. 2 TWh entspricht.

#### Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte

##### Ökologie

Die hohe Ausbeute führt bei Verwendung von kohlendioxidfrei erzeugtem Strom und Strom aus KWK-Anlagen zu einem niedrigen Carbon Footprint bei geringen Emissionen und geringem Abfallanfall im Vergleich zu konventionellen chemischen Verfahren.

##### Ökonomie

Die elektrochemischen Verfahren sind bekannt und wurden längere Zeit kommerziell angewandt. Die alternativen, nicht-elektrochemischen Verfahren sind offenbar wirtschaftlicher und werden deshalb bevorzugt. Da bei elektrochemischen Verfahren die Stromkosten den zentralen Kostenfaktor darstellen, können sich elektrochemische Verfahren gegenüber konventionellen Verfahren nur durchsetzen, wenn der Strompreis, was derzeit nicht erkennbar ist, soweit sinkt, dass die Kostenseite elektrochemischer gegenüber konventionellen Verfahren Vorteile bietet.

##### Innovation

Der Ausbau der organischen Elektrochemie in Deutschland würde – wenn kommerziell wettbewerbsfähig – Forschung und Entwicklung im Bereich der derzeit nicht im Fokus stehenden Elektrochemie beflügeln und bei niedrigen Stromkosten zukünftig zu einer vermehrten industriellen Anwendung führen. Allerdings stehen solche Anlagen in Deutschland noch nicht zur Verfügung und müssten somit erst errichtet bzw. konventionelle Anlagen umgebaut werden. Nur bei Neuinvestitionen in eine Anlage oder bei wesentlichen Erweiterungen mit Umbauten wäre die Abschätzung der Wirtschaftlichkeit möglich.

---

1190 Bayer MaterialScience AG; Kintrup, Jürgen; Weber, Rainer: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Elektrochemische Verfahren“ der Enquete Kommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2014).

## Soziales

Ob die vermehrte Nutzung der Elektrochemie zusätzliche Arbeitsplätze schafft oder vorhandene erhält, kann derzeit nicht beurteilt werden. Dies wäre aber zumindest zweifelhaft, da lediglich bestehende Herstellungsverfahren durch elektrochemische substituiert würden.

### Option H.1b: Vermehrte Nutzung des Lichtbogenverfahrens

#### Beschreibung

Das wesentliche Produkt des Lichtbogen-Verfahrens ist Acetylen, ein interessanter chemischer Grundstoff, aus dem die in Tabelle 37 gezeigten Zwischenprodukte für eine Vielzahl von Wertschöpfungsketten gewonnen werden können. Hierfür sind die Rohstoffe Methan, flüssige Kohlenwasserstoffe, Kohlenstaub und Koks (über Calciumcarbid) geeignet (siehe IV.2.5). Der Grundstoff Acetylen wurde in den meisten Produktionsverfahren durch preiswert verfügbare aus Naphtha hergestellte Zwischenprodukte verdrängt. Wenn zukünftig Strom aus regenerativen Quellen preiswert zur Verfügung stehen würde, kann es zu einer Renaissance der Acetylenchemie kommen.

#### Begründung

Acetylen ist, wie sich aus Tabelle 37 ergibt, ein Grundstoff für die Herstellung zahlreicher Zwischenprodukte. Eine Herstellung mittels des elektrochemischen Lichtbogenverfahrens hat daher ein entsprechend hohes Potenzial.

#### Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte

#### Ökologie

Die mögliche flexible Fahrweise würde zudem eine effizientere Nutzung des volatil anfallenden Stroms aus EE ermöglichen. Allerdings wird beim Lichtbogenverfahren ein wesentlicher Teil des Kohlenstoffs zu CO<sub>2</sub> umgesetzt und belastet damit den Carbon Footprint.

#### Ökonomie

Das Lichtbogen-Verfahren ist bekannt und wurde schon über längere Zeit optimiert. Da die variablen Kosten vom Stromverbrauch dominiert werden, ist heute in Deutschland der hohe Strompreis ein Standortnachteil (siehe Abbildung 72).

#### Innovation

Die Steuerung der Lichtbogenverfahren nach Stromangebot würde zu weiteren Optimierungen der Anlagen für diese Fahrweise führen und kann innovative Beiträge zum Demand Side Management liefern.

## Soziales

Wenn sich die ökonomischen Rahmenbedingungen insbesondere beim Strompreis so verändern, dass die Nutzung des Lichtbogenverfahrens ökonomische Vorteile gegenüber den derzeit verwendeten konventionellen Verfahren zur Acetylenherstellung hat, kann dies zu einer Sicherung bestehender Arbeitsplätze in diesem Bereich beitragen.

### IV.5.2 Nutzung bestehender Verfahren zum Einsatz volatiler Strommengen

Demand Side Management kann (in einem begrenzten Umfang) mit bestehenden Anlagen relativ schnell umgesetzt werden. Darüber hinaus ist ein Kapazitätsausbau notwendig. Zwar werden viele Prozesse auch heute schon in einem engen Rahmen flexibel gefahren, doch wird durch einen DSM-Einsatz die Flexibilität des Verfahrens erheblich vergrößert. Die daraus resultierenden Aus-

wirkungen auf die Lebensdauer der Anlagen und Produktqualität sind derzeit vielfach noch unbekannt. Ökonomisch führt die flexible Fahrweise nach aktuellem Strommarktdesign (Abnahme von konstanten Strommengen wird wegen besserer Planbarkeit für die Erzeuger von diesen entlohnt) zu negativen Folgen. DSM erfordert einen Ausbau der Anlagenkapazität bei gleichbleibender Produktionsmenge mit entsprechendem Investitionsaufwand. Gleichzeitig verringern sich Volllaststunden mit negativen Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit des Prozesses. Die Eignung eines Prozesses ergibt sich technisch aus den An- und Abfahrzeiten sowie die Auswirkungen auf die Anlage und Produktqualität.

### **Option H.2a: Vermehrte Herstellung von Aluminium in Deutschland**

#### **Beschreibung**

Primäraluminium wird ausschließlich elektrochemisch gewonnen. Bei einer Steigerung der heimischen Aluminiumproduktion unter Verzicht auf jährliche Primäraluminiumimporte von 1,57 Mio. t (2011) könnten insgesamt 2 Mio. t im Inland hergestellt werden. Dafür würde der Stromverbrauch für die Produktion von heute ca. 5,4 TWh auf max. 27 TWh pro Jahr steigen. Die Aluminiumelektrolysen können, wie beschrieben, nach Stromangebot gesteuert werden. Innerhalb von 24 Stunden ist eine Reduktion von 50% möglich, wobei das Ziel ist, zunächst einen Einstieg mit vorhandenen Kapazitäten durch entsprechende Vergütungsregelungen im Rahmen der Änderung des Marktdesigns zu realisieren.

Voraussetzung für einen Ausbau der Produktionskapazitäten in Deutschland ist jedoch eine entsprechende Nachfragesteigerung auf dem globalen Aluminiummarkt oder die Abschaltung von Anlagen an anderer Stelle z.B. weil sie veraltet oder unwirtschaftlich sind. Eine weitere Randbedingung ist die Verfügbarkeit ausreichend preiswerten Stroms in Deutschland für den wirtschaftlichen Normalbetrieb der erweiterten Aluminiumanlagen.

#### **Begründung**

Da die Aluminiumelektrolyse eine flexible Fahrweise erlaubt, können auf ein Jahr hochgerechnet maximal ca. 5,4 TWh Strom dafür variabel nach Stromangebot eingesetzt werden. Dies entspricht bei 6.000 jährlichen Betriebsstunden rechnerisch einer installierten Leistung von 2,25 GW (zum Vergleich: das Potenzial der gesamten NE-Metallerzeugung und Grundstoffchemie wird in Tabelle 44 mit 38,4 MW angegeben), die maximal zur positiven und negativen Stabilisierung des Hochspannungsnetzes zur Verfügung stünde.

#### **Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte**

##### **Ökologie**

Die vermehrte Herstellung von Primäraluminium würde zu Einsparungen beim Transport des heute importierten Aluminiums führen, hätte aber einen Transport von Bauxit zur Folge. Die sofortige Verarbeitung des noch heißen Primäraluminiums aus der Elektrolyseanlage im Verbund ist energetisch günstiger, da ein Wiederaufschmelzen für Gussverfahren und ein Erwärmen für das Walzen zu Blechen und Ziehen zu Drähten entfällt, falls die Verarbeitung an der gleichen Betriebsstätte erfolgt. In diesem Fall führt die vermehrte Primäraluminiumherstellung zu einem niedrigeren Carbon Footprint. Der flexible Stromverbrauch der Anlagen gewährleistet zusammen mit anderen Maßnahmen eine verbesserte Verwendung von Überschussstrom und kann dadurch fossile Energieträger schonen.

## Ökonomie

Das Schmelzelektrolyse-Verfahren ist bekannt und wurde schon über längere Zeit optimiert. Ein Standortnachteil in Deutschland ist heute trotz der EEG-Befreiungen der hohe Strompreis (siehe Abbildung 72).

## Soziales

Die vermehrte Nutzung der Aluminium-Elektrolyse würde zusätzliche Arbeitsplätze für gut ausgebildete Arbeitskräfte im Inland bieten und hätte weitere Arbeitsmarktvorteile für die Aluminiumverarbeitung und das Aluminium-Recycling.

## Option H.2b: Nutzung der Chlor-Alkali-Elektrolyse (CAE) zur Netzstabilisierung

### Beschreibung

Chlor ist einer der wichtigsten Rohstoffe der chemischen Industrie. 65% aller Produkte basieren auf Chlor oder sind direkt bzw. indirekt von ihm abhängig. Zur Herstellung im industriellen Maßstab werden aktuell Verfahren der Chlor-Alkali-Elektrolyse und vereinzelt die Salzsäureelektrolyse eingesetzt.

### Begründung

Ein Ausbau der Chlorproduktion ist nur bei wachsenden Bedarfen infolge von verstärkter Nachfrage spezieller Materialien anzunehmen. Sicher ist jedoch, dass Chlor als wichtiger Teil der bestehenden und kommenden Wertschöpfungsketten bestehen bleibt, da Chlor aus Sicherheitsgründen nur eingeschränkt transportiert und gelagert werden kann. Aufgrund des hohen Stromverbrauchs der Elektrolysen von rund 14 TWh pro Jahr (Deutschland), können diese Anlagen zur Netzstabilisierung beitragen, sofern die Fahrweisen an das Stromangebot angepasst werden.<sup>1191</sup> Moderne Elektrolyseure lassen sich aus dem Stand innerhalb von 15 Minuten hochfahren. Eine Anpassung der Auslastung laufender Systeme liegt somit im Bereich der Tertiärregelung. Umgekehrt lässt die hohe Flexibilität der Fahrweise in kurzer Zeit auch Produktionsanpassungen zu, die bei entsprechender Vergütung die Wirtschaftlichkeit verbessern können.

Voraussetzung ist, dass die aus EE stammende Überschussenergie über entsprechende Verteilnetze zu den Verbundstandorten gelangt.

### Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte

#### Ökologie

Zur Nutzung der CAE als Stromnetzstabilisator können vorhandene Kapazitäten genutzt werden. Bis zum Erreichen der Auslastungsgrenze werden keine Neuanlagen benötigt. Altanlagen lassen sich zudem, sofern nicht bereits geschehen, durch modernere Membranverfahren ersetzen und bestehende Membranverfahren, sofern kein Wasserstoff benötigt wird, durch die Aufrüstung mit einer Sauerstoffverzehrkathode wirtschaftlicher betreiben. Problematisch ist die Lagerung von Chlor. Durch seine hohe Reaktivität ist eine Lagerung in größeren Mengen aus Sicherheitsgründen nur in begrenztem Umfang möglich. Eine Produktion von Chlor muss demnach immer am Bedarf der abnehmenden Betriebe gekoppelt sein. Diese wiederum müssen in gewissem Umfang ebenfalls volatil und den Aufkommen angepasst betrieben werden.

---

1191 Vogel Business Media GmbH & Co. KG: So wird die Elektrolyse zum Joker im Energiemarkt unter: [http://www.process.vogel.de/anlagenbau\\_effizienz/articles/435084/](http://www.process.vogel.de/anlagenbau_effizienz/articles/435084/) (2014).

## Ökonomie

Der Einsatz der CAE-Verfahren ist weit verbreitet und erprobt. Durch den Einsatz moderner Membranen, intelligenter Zellaufbauten und fortschrittlicher Elektrodenmaterialien ist die Wirtschaftlichkeit in den letzten Jahren weiter gestiegen. Ein Standortnachteil in Deutschland ist heute trotz der EEG-Befreiungen der hohe Strompreis (siehe Abbildung 72).

Da der Speicher in diesem Fall Chlor ist, sind hohe Transport- und Lageraufwendungen zu berücksichtigen. Gegebenenfalls müssen hier weitere Lagermöglichkeiten bzw. Kapazitäten für aus Chlor hergestellte Zwischenprodukte geschaffen werden.

## Soziales

Durch die Nutzung der Chlor-Elektrolysen als Puffer können bisherige Arbeitsplätze gesichert werden, wenn die Wirtschaftlichkeit dargestellt ist.

### Option H.2c: Vermehrter Betrieb der Wasserelektrolyse

Durch elektrochemische Spaltung von Wasser lassen sich elektrolytisch die Gase Sauerstoff und Wasserstoff herstellen, wobei insbesondere der Wasserstoff von Interesse ist. Wasserstoff wird in der chemischen Industrie im überwiegenden Maße aus Erdgas mit Hilfe der Dampfreformierung gewonnen. Wasserstoff wird in vielen chemischen Prozessen eingesetzt (s. Vermehrte Nutzung von PtG-Konzepten zur Energiespeicherung, vgl. Option H.3c).

## IV. 5.3 Ausbau chemierelevanter Energiespeicherlösungen

### Option H.3a: Vermehrte Nutzung von Wärmespeichern zur Energiespeicherung

#### Beschreibung

Diese Option betrachtet bezüglich des Einsatzes von Wärmespeichern zwei verschiedene Aspekte, nämlich

- a) die Möglichkeit einer effizienten Nutzung von EE-Überschussstrom zur Wärmeerzeugung und ggf. Zwischenspeicherung je nach Temperaturlage in Wärmespeichern in der chemischen Industrie sowie
- b) die Nutzung bisher nicht genutzter Abwärme in der chemischen Industrie.

#### Begründung

Wärme, die an einem Ort zu einem gegebenen Zeitpunkt nicht genutzt wird, geht verloren, während zu einem späteren Zeitpunkt oder an anderer Stelle Wärme durch Einsatz von Energieträgern erzeugt werden muss. Hier können Wärmespeicher dabei helfen, den Aufwand zur Erzeugung von Wärme zu reduzieren und damit zum Energiesparen beitragen. Andererseits können Wärmespeicher mit Überschussstrom aufgeheizt werden und damit die Wärme für spätere Nutzung zur Verfügung stellen. Dazu werden geeignete Wärmespeicher benötigt.

Da Wärme der derzeit wichtigste Energieträger in der chemischen Industrie ist, ist es wegen der hohen Energiekosten zu erwarten, dass noch stärker nach Lösungen zur effektiveren Nutzung und Speicherung von Wärme gesucht wird.

In der chemischen Industrie besteht neben Nieder- und Mitteltemperatur-wärmespeichern ein insbesondere Bedarf an Hochtemperaturwärmespeichern (>250°C). Die in der chemischen Industrie benötigte Wärmeenergie wird heute vielfach durch eigene KWK-Anlagen erzeugt. Darüber hinaus wird zukünftig in dem zunehmenden Austausch zwischen Wärmeproduzenten und Wärmeab-

nehmern einen steigenden Bedarf für Wärmespeicherung im Niedrig- und Mitteltemperaturbereich geben.

### **Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte**

#### **Ökologie**

Für die Umwandlungskette von elektrischer Energie in Wärme und deren Rückverstromung gibt es bisher nur im Hochtemperaturbereich technische Ansätze. Im Niedertemperaturbereich ist dies mit vergleichsweise hohen Verlusten verbunden.

Eine noch weitere Intensivierung der (Ab-)Wärmenutzung in der chemischen Industrie durch Wärmespeicherung geht mit einer Einsparung von Energierohstoffen und einer geringeren Emission an Abwärme in die Umwelt einher. Eine geringere Verfeuerung von fossilen Energierohstoffen zur Wärmeproduktion führt zu einer Verminderung des Carbon Footprints. Werden weniger wärme-producinge Energierohstoffe verbraucht, die aus dem Tagebau oder aus nachwachsenden Quellen kommen, hat dies eine geringere Flächennutzung zur Folge.

#### **Ökonomie**

##### *Innovation*

Die technische Umsetzbarkeit weiterer Wärmespeicherlösungen erscheint erreichbar. Allerdings besteht ein hohes Optimierungspotenzial bei Speichermaterialien, insbesondere für Hochtemperaturanwendungen, wie sie in der chemischen Industrie typisch sind.

Für die Nutzung von EE-Überschussstrom zur Wärmeerzeugung sind Entwicklungen im Bereich der Thermoelektrika von besonderer Bedeutung. Denn sie ermöglichen es für die Rückverstromung Wärme effektiver in Elektrizität umzuwandeln.

Bezüglich der verbesserten Nutzung von Abwärme liegt das Innovationspotenzial, das FuE-Aktivitäten rechtfertigt, vor allem im hohen Wert der Abwärme, die bislang ungenutzt bleibt. Die Fähigkeit zur Markterschließung hierfür ist aus Wirtschaftlichkeitsgründen beschränkt (s. Wettbewerbsfähigkeit). Besondere Herausforderungen in diesem Bereich liegen in der Entwicklung von Hochtemperaturwärmespeichern. Hier kann die Materialkompetenz der chemischen Industrie einen besonderen Beitrag leisten, Wärmespeicherung und –nutzung zu verbessern. Dies gelingt durch die Entwicklung von besseren Isolatoren oder maßgeschneiderten sensiblen wie latenten Wärmespeichern, mit denen Investitionskosten gesenkt und der Speicherwirkungsgrad erhöht werden können. Künftige Wärmespeicherlösungen müssen Anforderungen an Ungefährlichkeit und Umweltverträglichkeit genügen, damit Verbraucherakzeptanz gewährleistet ist.

##### *Wettbewerbsfähigkeit*

Jede Form der Wärmespeicherung muss mit anderen Formen der Wärmeerzeugung wie etwa der Verbrennung fossiler Rohstoffe zur Wärmeengewinnung nach Bedarf konkurrieren. Zu vergleichende Parameter sind dabei Rohstoff-, Betriebs-, Investitionskosten sowie Kosten für die Emission von CO<sub>2</sub>.

Wärmespeicherlösungen sind sowohl als zentrale als auch als dezentrale Energiespeicherung denkbar.

Zur Verwendung bislang ungenutzter Abwärme bestehen sowohl Wärmeverteilnetze als auch die nötige Kompetenz zur kaskadenartigen Wärmeenergienutzung in den Chemieverbänden. Nordrhein-Westfalen kann durch die räumliche Nähe vieler wärme-producinger wie wärme-consuminger Betriebe und die dichte Besiedlung Synergien bei der Schaffung von wirtschaftlichen Wärmenutzungsverbänden schaffen. Vor allem der Ausbau von KWK-Anlagen, die flexibel strom- und wär-

megeführt werden, kann die Auslastung von großdimensionierten Wärmespeichern gewährleisten und damit Wirtschaftlichkeitspotenzial heben. Der hohe Wirkungsgrad von KWK-Anlagen könnte somit über die Hauptwärmenutzungsperiode hinaus gewährleistet bleiben.<sup>1192</sup>

Die großdimensionierte Wärmenutzung durch Wärmespeicherung ist aus Gründen der Wirtschaftlichkeit derzeit zunächst auf den Niedertemperaturbereich z.B. im Fernwärmenetz beschränkt. Im Gegensatz zu Strom kann Wärme sowohl im Verteilnetz transportiert, als auch gespeichert werden. Auf die bestehende Wärmeverteilinfrastruktur kann aufgebaut werden.

Speichermedien für die Speicherung von Wärme im Hochtemperaturbereich sind kostenintensiver, weil teurere Speichermedien genutzt werden müssten. Wirtschaftlich sind Wärmespeicherlösungen vor allem, wenn sie eine Neuinstallation von Kraftwerken bzw. Öfen unnötig machen. Langzeit- und saisonale Speicherung sind derzeit nicht wirtschaftlich zu betreiben. Ihre Marktreife wird um das Jahr 2020 erwartet.<sup>1193</sup>

### Soziales

Die ökonomisch sinnvolle Nutzung noch vorhandener Wärmepotenziale hilft bestehende Nachteile deutsche Unternehmen durch hohe Energiekosten zu verringern und dadurch zur Sicherung von Arbeitsplätzen beizutragen.

## Option H.3b: Vermehrte Nutzung von Batterien zur Energiespeicherung

### Beschreibung

Diese Option befasst sich mit dem Stromspeicherpotenzial von Batterien, das für Zwecke der zentralen und dezentralen Speicherung besteht.

### Begründung

Großbatterien wie Redox-Flow-Batterien oder vernetzte Kleinbatterien (virtuelle Speicher) können als Stromspeicher aus technischer Sicht grundsätzlich die kontinuierliche Versorgung mit Elektrizität von Großverbrauchern in volatilen Energiesystemen sicherstellen. Wenn Stromgroßabnehmer künftig stärker auf dem Spotmarkt Strom kaufen, so müssen die Phasen, in denen Strom aufgrund z.B. meteorologischer Bedingungen günstig zur Verfügung steht, durch Stromkauf und -speicherung genutzt werden, um in hochpreisigen Phasen Strom günstiger nutzen zu können.

Batterien werden im Rahmen der insgesamt erforderlichen Speicher- und Flexibilisierungslösungen als dezentraler Stromspeicher in künftigen Stromspeichersystemen gesehen. Sie bieten die Möglichkeit der stationären Speicherung (z.B. Bleibatterien und Redox-Flow-Batterien) sowie der mobilen Speicherung (Batterien für Elektromobilität, Lithium-Ionen-Batterien für technische Geräte etc.). Kommutativ zusammengeschaltet können sie beträchtliche Speicherkapazitäten darstellen.

„Gute Batterien gibt es nur über gute Materialien.“<sup>1194</sup> Zur Senkung der Herstellkosten von Batterien und zur Verbesserung ihrer Leistung ist die Materialkompetenz der chemischen Industrie erforderlich.

1192 Müller-Urlaub, Bertold: Kraft-Wärme-Kopplung als Grundpfeiler eines neuen Marktdesigns. In: et Energiewirtschaftliche Tagesfragen (2012), 11, S. 26–28.

1193 ebd. S. 2.

1194 Hörpel, Gerhard (MEET): Landtag NRW (Hg.): Enquetekommission II Protokoll 15. Sitzung (nichtöffentlich)Anhörung „Energiespeicher“. (2014), S. 4.

## Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte

### Ökologie

Materialien, die in Batterien Verwendung finden, werden stärker nachgefragt. Derzeitige Forschungstrends weisen vor allem in Richtung einer stärkeren Nutzung von Lithium-Ionen-Batterien.

Durch die Verringerung des Verbrauchs fossiler Brennstoffe zur Stromproduktion und die Nutzung von virtuellen Speichern oder Großbatterien wird der Ausstoß klimaaktiver Gase gesenkt. Eine negative Wirkung auf die Klimabilanz ergibt sich, wenn der zum Betrieb notwendige Strom mithilfe fossiler Energieträger erzeugt wird.

### Ökonomie

#### *Innovation*

Länder in Fernost haben einen großen Innovationsvorsprung in der Batterietechnik (v.a. Lithium-Ionen-Batterien).<sup>1195</sup> Innovationspotenziale, die zu einer Umsetzung heimischer Produktion von Batterien führen können, werden vor allem für großdimensionierte Lithium-Ionen-Batterien und Redox-Flow-Batterien gesehen.

Die Akzeptanz für kleine, dezentrale Stromspeicher ist eher gegeben als für Großspeicherlösungen, weswegen haushaltsnahe Stromspeicher wie Batterien ein Marktpotenzial aufweisen.

#### *Wettbewerbsfähigkeit*

Batterien gehören zu den teuersten Möglichkeiten Strom zu speichern, weil ihre Anschaffung relativ hohe Investitionskosten verursacht. Die günstigste Batteriesorte sind Bleibatterien. Der Vorteil von Lithium-Ionen-Batterien liegt im hohen Wirkungsgrad und in der hohen Energiedichte. Redox-Flow-Batterien haben den Vorteil einer hohen Skalierbarkeit und einer hohen Zyklenfestigkeit. Je nach Einsatzzweck können so die verschiedenen Batterieparameter wirtschaftlich genutzt werden.

Darüber hinaus kann die Stromspeicherung in Batterien für dezentrale Produzenten von Strom aus erneuerbaren Quellen wie PV oder Wind wirtschaftlich sein, weil der eingespeiste Strom zu bestimmten Zeiten zu geringen Preisen zur Verfügung steht, oder dort, wo er im Haushalt vom Erzeuger selbst verwendet werden kann. Eine kontinuierlichere und berechenbarere Stromabgabe von EE-Anlagen sowie ein geringerer Bedarf an Stromnetzausbau wären die Folge.

Die Investitionskosten müssen in wirtschaftlichen Gesamtrechnungen dem über den Normalbetrieb hinausgehenden Ausbau von Stromnetzen gegenübergestellt werden. Dieser würde nicht nötig, wenn zu erwartende Produktionsspitzen in Speichern abgefangen werden, bevor sie das Verteilnetz erreichen. So kostet eine 100 kW Lithium-Ionen-Batterie 18.000 Euro pro Jahr. Ein vergleichbarer Netzausbau summiert sich auf 2.000-4.000 Euro pro Jahr.<sup>1196</sup>

Die Gründe für hohe Investitionskosten von Batterien liegen vor allem in der noch fehlenden Massenproduktion derjenigen Batterietypen, die zur Großspeicherung geeignet sind. Es ist zu erwarten, dass sich größere Produktionsstückzahlen preissenkend auf Batteriespeichersysteme auswirken, weshalb Investitionsentscheidungen eher aufgeschoben werden.<sup>1197</sup>

---

1195 Sauer, Uwe (RWTH Aachen): ebd., S. 21.

1196 ebd..

1197 Sauer, Uwe (RWTH Aachen): Landtag NRW (Hg.): Enquetekommission II Protokoll 15. Sitzung (nichtöffentlich)Anhörung „Energiespeicher“. (2014), S. 16.

## Soziales

Eine größere Nachfrage nach zentralen und dezentralen Batteriesystemen von Industrie, Stromversorgern und Privathaushalten hätte eine höhere Beschäftigung im Bereich der Produktion von Batterien sowie bei Batteriewartungsarbeiten und Batterievernetzungsdienstleistungen zur Folge. Der Aufbau einer Batterieproduktion mit einhergehender Schaffung von Beschäftigung ist aus technologischer Sicht in Deutschland zwar möglich<sup>1198</sup>, unterliegt aber einem sehr starken Wettbewerbsdruck aus Asien.

## Option H.3c: Vermehrte Nutzung von Power to Gas-Konzepten zur Energiespeicherung

### Beschreibung

Diese Option beinhaltet ein Szenario, in dem Überschussstrom im Rahmen des PtG-Konzeptes zur Wasserstoffproduktion genutzt und – ggf. nach Methanisierung und/oder Zwischenspeicherung – energetisch verwertet wird (vgl. Ist-Zustand PtG, Nutzungspfade 2 bis 5).

### Begründung

Eine klimaneutrale Wasserstoffgewinnung durch Nutzung von EE-Überschussstrom kann einen wichtigen Beitrag zum Erreichen der nationalen und internationalen Klimaschutzziele sowie zur Einsparung bzw. Substitution fossiler Energieträger (Erdgas und Erdöl) leisten. Es kann regenerativ erzeugter Überschussstrom genutzt werden, der ansonsten unter Umständen ungenutzt bliebe. Diese Option dient zudem einer Potenzialbetrachtung für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft. Außerdem sollen die Potenziale von Wasserstoff und Methan verglichen werden.

Die Umwandlung von Strom in chemische Energiespeicher mittels PtG stellt eine der wenigen Möglichkeiten der Langzeitspeicherung dar. Für eine Langzeitspeicherung und den saisonalen Ausgleich von EE kommen derzeit nur chemische Sekundärenergieträger wie Wasserstoff und kohlenstoffbasierte Brennstoffe (z.B. Erdgassubstitut) in Betracht, die sich aus verschiedenen EE herstellen lassen (gilt auch für PtC).<sup>1199</sup> Denn viele andere gängige Energiespeicher eignen sich hierzu aufgrund von hohen Energieverlusten, die zeitbedingt auftreten, nicht. Diese Form der Energiespeicherung hat zwar aktuell noch eine untergeordnete Bedeutung, wird aber mit zunehmendem EE-Anteil immer wichtiger werden für eine sichere Energieversorgung in der Zukunft<sup>1200</sup>. Darüber hinaus können chemische Sekundärenergieträger in anderen Anwendungsbereichen eingesetzt werden (z.B. im Straßenverkehr).<sup>1201</sup>

## Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte

### Ökologie

#### Ressourceneffizienz

Wasserstoff wird heute hauptsächlich durch Erdgasreformierung gewonnen. Mittels des PtG-Konzepts könnte er durch Wasserelektrolyse kohlenstofffrei erzeugt werden. Hierdurch könnte fossiles Erdgas eingespart werden. Sofern der Strom für die Wasserelektrolyse aus EE kommt, wäre sowohl

1198 Hörpel, Gerhard (MEET): ebd., S. 28

1199 Specht, Michael; Baumgart, Frank; Feigl, Bastian; Frick, Volkmar; Stürmer, Bernd; Zuberbühler, Ulrich: Speicherung von Bioenergie und erneuerbarem Strom im Erdgasnetz. In: Themen 2009 – Forschen für globale Märkte erneuerbarer Energien (April 2010), S. 69-78.

1200 vgl. Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE) (Hg.): Energiespeicher für die Energiewende- Speicherungsbedarf und Auswirkungen auf das Übertragungsnetz für Szenarien bis 2050. (2012), S. 19 f.

1201 Specht, Michael; Baumgart, Frank; Feigl, Bastian; Frick, Volkmar; Stürmer, Bernd; Zuberbühler, Ulrich: Speicherung von Bioenergie und erneuerbarem Strom im Erdgasnetz. In: Themen 2009 – Forschen für globale Märkte erneuerbarer Energien (April 2010) S. 69-78.

die Energie- als auch die Rohstoffquelle erneuerbar. Dies gilt auch für Methan, sofern das hierfür benötigte CO<sub>2</sub> aus der Abgasabscheidung bzw. aus Biogas stammt. Dies wäre durch eine kreislaufwirtschaftliche Kohlenstoffnutzung ressourcenschonend.

Andererseits sind die CO<sub>2</sub>-Abtrennung aus Verbrennungsprozessen und die Elektrolyse sehr energieintensiv. Dies könnte das Ziel der Bundesregierung – Senkung des gesamten Primärenergieverbrauchs – gefährden. In diesem Zusammenhang ist die Betrachtung der Wirkungsgrade der einzelnen Prozessschritte des PtG-Konzepts bedeutend. Für die Rückverstromung wird der Gesamtwirkungsgrad der Verfahrenskette Strom – Elektrolyse – Wasserstoff – Erdgas – Einspeisung ins Erdgasnetz zwischen 14 und 36 % elektrisch beschrieben<sup>1202</sup>. Der Wirkungsgrad ließe sich mittels Kraft-Wärme-Kopplung auf 80% der eingesetzten Stromenergie erhöhen (davon ca. 50% als Strom)<sup>1203</sup>.

Die Wasserelektrolyse weist eine geringe Effizienz auf, wenn der dabei anfallende Sauerstoff nicht genutzt wird. Erst bei Anfall großer Mengen Elektrolysauerstoffs kann dieser außer für die Brennstoffzelle auch wirtschaftlich für andere Prozesse am Chemiestandort, z.B. in den dortigen Kläranlagen genutzt werden<sup>1204</sup>.

### *Carbon Footprint*

Das gesamte PtG-System ist im Idealfall CO<sub>2</sub>-neutral bis -positiv (bei kohlenstoff-freier Wasserstoffproduktion, EE-Strom und kreiswirtschaftlicher Nutzung des Kohlenstoffs für die Methanisierung). Bei der Verbrennung von Wasserstoff entsteht nur Wärme und Wasser; dieser Vorgang ist dementsprechend CO<sub>2</sub>-neutral. Wird Methan dagegen verbrannt, entsteht CO<sub>2</sub>. Diese Verbrennung ist ebenfalls klimaneutral, wenn der darin enthaltene Kohlenstoff aus nichtfossilen Quellen stammt. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Brennstoffzellen-Hybrid-Fahrzeugen sind bei Nutzung von Wasserstoff aus Windkraft um das elffache geringer als beim Einsatz von Wasserstoff aus Erdgasreformierung. Ein vergleichbares Einsparungspotenzial ergibt sich für Fahrzeuge mit Gasverbrennungsmotor, die Methan aus Windkraft anstelle von Erdgas nutzen<sup>1205</sup>. Methan ist allerdings um das 27-fache klimaschädlicher als CO<sub>2</sub>, was im Falle von Leckagen einen klimarelevanten Nachteil darstellen würde.

## Ökonomie

### *Innovation und Markterfolg*

Auch wenn die Systemkomponenten Wasserelektrolyse und Methanisierung bereits kommerziell betrieben werden (vgl. Ist-Zustand), gibt es für die PtG-Systemlösung bislang wenig Wissen und Erfahrung. So gibt es derzeit noch keine großtechnischen, kommerziellen Systemanwendungen (lediglich Pilot- und Demonstrationsanlagen).

Die Ausspeicherleistungen bei der Untertagegasspeicherung inklusive Verstromung reichen bis in den 10 GW-Bereich bei Zykluszeiten von Tagen bis Monaten. Sie stellen somit die einzige absehbare Option dar, EE mit einer Kapazität im Bereich von TWh Energie saisonal zu speichern und bei Be-

1202 vgl. Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.): Ein Zwischenbericht des Verbands der Chemischen Industrie (VCI): „Zukunft der Energiespeicher“. (2013), S. 22.

1203 vgl. Schmid, Jürgen: Speicherungsmöglichkeiten von Überschuss-Energie mit Wasserstoff oder Methan – ein Vergleich unter: [http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Presse/Pressemitteilungen/2011/111122\\_Power-ToGas\\_AnlageIWES\\_pdf.pdf;jsessionid=A83E94287D59F1C236F8A6EE38E4712A?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Presse/Pressemitteilungen/2011/111122_Power-ToGas_AnlageIWES_pdf.pdf;jsessionid=A83E94287D59F1C236F8A6EE38E4712A?__blob=publicationFile&v=3). Online am 15.4.2014.

1204 Aussage Dr. Leidinger in einer internen Runde am 24.01.2014.

1205 EnergieAgentur.NRW (Hg.): Wasserstoff – Schlüssel zur Energiewende- Beispiele aus Nordrhein-Westfalen von der Herstellung bis zur Nutzung. (2013), S. 11.

darf zurück zu verstromen.<sup>1206</sup> Derzeit ist unklar, ab wann die Wirtschaftlichkeit der Power to Gas-Anlagen erreicht sein wird.

#### *Markterschließung*

Die Markterschließung ist derzeit nicht vorhanden, es besteht jedoch Potenzial z.B. bei der Nutzung von Wasserstoff bzw. Methan als Kraftstoff bzw. Ersatzbrennstoff zur Energieerzeugung (vgl. Annahmen: Marktpotenzial). Beim Umgang (insbesondere der Speicherung) ist das Gefährdungspotenzial von Wasserstoff zu beachten (da es mit Luft explosionsgefährliches Knallgas bilden kann), was die Akzeptanz der Bevölkerung im Zusammenhang mit dem Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft mindern könnte. PtG-Langzeitspeicher werden ab 2030 im Rahmen der Umsetzung der Energiewende zunehmend an Bedeutung gewinnen (vgl. Annahmen).

#### *Forschungsintensität*

Die Forschungsintensität ist in diesem Bereich als hoch einzustufen, da es zurzeit verschiedenste Demonstrationsprojekte gibt. Allerdings besteht ein hoher finanzieller Aufwand für eine ggf. angestrebte flächendeckende Realisierung.

#### *Wettbewerbsfähigkeit (Wirtschaftlichkeit (Preis))*

PtG-Wasserstoff sowie daraus hergestelltes Methan sind aktuell drei- bis fünfzehnfach teurer als fossiles Erdgas (wegen Fracking in den USA bzw. global) bzw. Wasserstoff aus der Erdgasreformierung (vgl. Ist-Zustand und Annahmen). „Unter der Randbedingung, dass lediglich negative Regelenergie genutzt wird, was einer Volllaststundenzahl von 1.200 h entspricht, lässt sich weder für Wasserstoff noch für synthetisches Methan ein wirtschaftlicher Vorteil zu anderen Endenergieträgern feststellen (vergleiche Tab. 3. [im Gutachten]). Dies gilt selbst für den Fall, dass der Strom ohne Kosten bezogen werden könnte. Erst bei einer Volllaststundenzahl von 7000 und Strombezugskosten von Null erreichen beide Produkte das Preisniveau einiger vergleichbarer Produkte (Diesel, Benzin, Biogas). Allerdings ist darauf hinzuweisen, dass es sich für diesen Fall mit einer sehr niedrigen Auslastung nicht mehr lediglich um negative Regelenergie, sondern um die komplette Nutzung von regenerativem Strom handelt und damit ein völlig anderes Versorgungskonzept unterstellt wird.“<sup>1207</sup> Der Aufbau teurer PtG-Anlagen rentiert sich daher aktuell aus wirtschaftlicher Sicht nicht. Ob fossiles Erdgas bzw. Wasserstoff aus Erdgasreformierung sich so sehr verteuert bzw. die Kosten für synthetisch erzeugtes Methan oder PtG-Wasserstoff so stark sinken, dass letztere wettbewerbsfähig werden, ist aktuell nicht absehbar. Die Wasserelektrolyse hat einen geringeren Wirkungsgrad als die Chlor-Alkali-Elektrolyse (mit Wasserstoff als Kopplungsprodukt), was die Wirtschaftlichkeit der PtG-Systemlösung beeinträchtigt.

Ein Vorteil von Wasserstoff ist, dass er ein Energieträger ist, der flexibel eingesetzt werden kann. Wasserstoff ist allerdings aufgrund seiner geringen volumetrischen Energiedichte im Normzustand schwer zu speichern. Seine Speicherung setzt daher große Volumenkapazitäten voraus, was die Speicherung von Wasserstoff im Vergleich zu anderen Energieträgern teu(er)er macht. Entsprechende Speicherkapazitäten müssten zudem erst aufgebaut werden. Eine alternative Einspeisung ins Erdgasnetz ist aufgrund der Toleranzen der Endverbrauchergeräte begrenzt bzw. erfordert eine Umrüstung mit Kosten im Milliardenbereich (vgl. Ist-Zustand). Demgegenüber sind ausreichende Speicherkapazitäten für Methan im bestehenden Erdgasnetz vorhanden.

1206 Specht, Michael; Baumgart, Frank; Feigl, Bastian; Frick, Volkmar; Stürmer, Bernd; Zuberbühler, Ulrich: Speicherung von Bioenergie und erneuerbarem Strom im Erdgasnetz. In: Themen 2009 – Forschen für globale Märkte erneuerbarer Energien (April 2010).

1207 Eichel, Rüdiger-A. et al.: Landtag NRW (Hg.): Gutachten „Power to Gas / Energiespeicher“ für die Enquete-Kommission II des Landtags von Nordrhein-Westfalen. (2014), S. 34.

Derzeit sind Brennstoffzellen (BZ) trotz der hohen Wirkungsgrade verglichen mit anderen Rückverstromungsmöglichkeiten noch zu teuer. Ein Vorteil der BZ ist, dass diese sowohl mit fossilen Brennstoffen (z.B. Erdgas) als auch mit regenerativen Brennstoffen (Wasserstoff, Biogas) flexibel betrieben werden kann.

#### *Auswirkungen auf Wertschöpfungsketten und Infrastruktur*

Für Wasserstoff besteht heute keine eigene flächendeckende Infrastruktur in Form von Leitungsnetzen oder Speichern. Eine Wasserstoffwirtschaft müsste zunächst erst weiter auf- bzw. ausgebaut werden. Dabei ist zu beachten, dass in Nordrhein-Westfalen ein Wasserstoffpipelinennetz bereits vorhanden ist<sup>1208</sup>. Jedoch gibt es derzeit sehr wenige Tankstellen zur Abnahme von Wasserstoff im Verkehrssektor. Alternativ zum Aufbau eines bundesweiten Wasserstoffpipelinennetzes wäre eine Nutzung des vorhandenen Erdgasnetzes (begrenzt) möglich. Hierbei sind die Kosten für den Aus- bzw. Umbau des Erdgasnetzes (für den vermehrten Wasserstofftransport) zu beachten (vgl. Annahmen).

Auf der Verbraucherseite gibt es derzeit wenige Möglichkeiten der Abnahme von Wasserstoff außerhalb der Chemie, was auf eine mögliche Gefahr der Überproduktion durch Realisierung des PtG-Konzepts hinweist. Durch Methanisierung des Wasserstoffs könnten diese Probleme umgangen werden, da als Endabnehmer erdgasbetriebene Autos, Heizgeräte, Gaskraftwerke sowie in infrastruktureller Hinsicht Gasnetze und Tankstellen bereits vorhanden sind.

Im Zusammenhang mit dem PtG-Konzept ist ein Vorteil für Nordrhein-Westfalen die Dichte bzw. enge räumliche Nähe von Produzenten (z.B. Stahl, Zement für CO<sub>2</sub>; Energie für Strom) und Abnehmern (Chemie). Das für die Methanisierung benötigte CO<sub>2</sub> aus den Abgasströmen der Nachbarindustrien müsste jedoch preisgünstig zur Verfügung stehen, derzeit ist die Abgasreinigung (Auswaschen des CO<sub>2</sub>) noch sehr teuer.

#### *Versorgungssicherheit*

Um Deutschland bzw. Nordrhein-Westfalen weniger abhängig von fossilem Erdgas zu machen, kann die Eigenversorgung mit Wasserstoff bzw. Methan die Versorgungssicherheit erhöhen. Dies hängt jedoch primär von der Verfügbarkeit von preisgünstigem (Überschuss-)Strom ab. In diesem Zusammenhang ist auch zu berücksichtigen, ob genügend CO<sub>2</sub> für die Methanisierung im Rahmen von PtG vorhanden wäre (vgl. Rohstoff-Kapitel).

### **Soziales**

#### *Beschäftigung*

Die Arbeitsplätze könnten in der chemischen Industrie Nordrhein-Westfalens durch den Auf- und Ausbau der Elektrolyse gesichert werden. Bei der Systemlösung PtG läge (neues) Beschäftigungspotenzial eher in der Energiewirtschaft.

#### *Bildung*

Bei der Aus- und Weiterbildung gibt es zur erfolgreichen Realisierung des PtG-Konzepts Anpassungsbedarf in den Bereichen Elektrochemie, Energiewirtschaft, BWL, VWL und Systemverständnis. Aus- und Weiterbildung wären insgesamt interdisziplinärer auszurichten. Von einer Fachkräfteverfügbarkeit ist prinzipiell auszugehen.

---

1208 200 km Rohrleitungssystem im Rhein-Ruhr-Gebiet, vgl. Bertau, Martin; et al.: Industrielle Anorganische Chemie. Wiley-VCH (2013). ISBN 3-527-64956-5, S.3.

### *Steuerbeitrag*

Durch die Energiewende entstehen hohe volkswirtschaftliche Kosten, welche durch den wirtschaftlichen Betrieb der PtG-Systemlösung ausgeglichen werden könnten. Durch den Erhalt wichtiger Industriezweige in Nordrhein-Westfalen könnten dem Staat Steuereinnahmen gesichert werden.

## **Option H.3d: Vermehrte Nutzung von Power to Chemicals-Konzepten zur Energiespeicherung**

### **Beschreibung**

Im Rahmen dieser Option soll eine Möglichkeit aufgezeigt werden, wie EE-Überschussstrom zur Herstellung von Speichermolekülen genutzt und diese stofflich verwertet werden können (vgl. Ist-Zustand, Nutzungspfad 6 bzw. PtC-Unterkapitel).

### **Begründung**

Diese Option soll das Potenzial der chemienächsten (für die chemische Industrie meisten nahe-liegende) Nutzungsform von Überschussstrom beleuchten. Denn das PtC-Konzept könnte durch Ausbau bestehender Chemieanlagen realisiert werden, es würde so einen Beitrag zum Erhalt von energieintensiven Chemieanlagen am Standort Nordrhein-Westfalen leisten. Darüber hinaus könnten chemische Sekundärenergieträger in anderen Anwendungsbereichen eingesetzt werden, etwa im Straßenverkehr.<sup>1209</sup> Diese Option beleuchtet damit einen möglichen Beitrag der Chemie zur Langzeitspeicherung von Energie als Alternative bzw. Ergänzung zum Ausbau klassischer Speichertechnologien.

### **Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte**

#### **Ökologie**

##### *Ressourceneffizienz*

Die mittels PtC herstellbaren Speichermoleküle sind Basischemikalien, die heute vorwiegend aus fossilen Rohstoffen hergestellt werden. Mit der Systemlösung PtC könnten diese fossilen Ressourcen eingespart werden. Zudem würde Überschuss-Strom genutzt und EE-Anlagen müssten nicht abgeregelt werden. Es bedarf allerdings vergleichender Ökobilanzen für aktuelle und neue Verfahren, um eine exakte Bewertung vornehmen zu können. Zudem ist das Potenzial zukünftiger Überschussmengen nicht abschließend bewertbar (vgl. Annahmen).

Energieintensive Verfahren, die im PtC-Konzept genutzt würden, laufen dem Ziel der Bundesregierung, den Primärenergieverbrauch insgesamt zu senken, entgegen. Dies macht eine Bewertung der Wirkungsgrade von Verfahren zur Einschätzung der Nutzungseffizienz notwendig.

##### *Carbon Footprint*

Das PtC-Konzept ist im Idealfall CO<sub>2</sub>-neutral bis -positiv, wenn die dafür benötigte Energie (Strom) und der benötigte Kohlenstoff aus erneuerbaren Quellen bzw. Abgasströmen stammen. Es findet dann zudem eine kreislaufwirtschaftliche Nutzung von Kohlenstoff statt. Hierzu sind ebenfalls im Einzelfall (für jedes Verfahren bzw. jedes Speichermolekül) vergleichende Ökobilanzen erforderlich. Ein solcher Vergleich ist im Rahmen dieses Berichts nicht zu leisten.

---

1209 Specht, Michael; Baumgart, Frank; Feigl, Bastian; Frick, Volkmar; Stürmer, Bernd; Zuberbühler, Ulrich: Speicherung von Bioenergie und erneuerbarem Strom im Erdgasnetz. In: Themen 2009 – Forschen für globale Märkte erneuerbarer Energien (April 2010), S. 69-78.

## Ökonomie

### *Innovation und Markterfolg*

Wissen und Erfahrung sowie technischer Realisierungsgrad sind bei PtC für die einzelnen Verfahren unterschiedlich. Die Chlor-Alkali-Elektrolyse ist ein seit Jahrzehnten großtechnisch angewendetes Verfahren. Beim Lichtbogenverfahren bestehen zwar historisch großtechnische Erfahrungen, allerdings gibt es derzeit nur eine Anlage in Deutschland (vgl. Ist-Zustand). Andere Verfahren wie das Kvaerner-Verfahren befinden sich noch im Forschungsstatus.

### *Markterschließung*

Die bei PtC entstehenden Basischemikalien sind bereits am Markt in großen Mengen etabliert. Es muss allerdings ermittelt werden, welche Mengen der entsprechenden Chemikalien sich mittels PtC herstellen lassen, d.h. welche Anlagenkapazitäten hierfür zur Verfügung stehen. Diese Abschätzungen liegen bislang nicht vor.

Es gibt im Bereich PtC aktuelle Forschungsaktivitäten, diese sind jedoch (anders als etwa im Bereich PtG) nicht in spezifischen Förderprogrammen integriert. Insgesamt ist die aktuelle Forschungsin-tensität geringer als für PtG.

### *Wettbewerbsfähigkeit*

Für eine Erweiterung des PtC-Konzepts wären neue bzw. erweiterte Anlagekapazitäten notwendig. Chemische Anlagen sind im Vergleich z.B. zu Energieanlagen zumeist (bezogen auf Speicherkapazität) teurer. Die Wirtschaftlichkeit zur Nutzung von Wasserstoff und Methan aus PtG im PtC-Konzept ist aktuell aufgrund des höheren Preises nicht gegeben. Gleiches gilt für Methanol als alternative Basischemikalie<sup>1210</sup>. Aufgrund ihrer Eigenschaften und der höheren Wertschöpfung eignen sich kurzkettige Alkohole wie Ethanol und Butanol besser als Speichermoleküle (vgl. Ist-Zustand). Energieintensität und Wirkungsgradverluste tragen ebenfalls zur Kostenintensität bei. Die PtC-Anlagen könnten aufgrund der Volatilität des EE-Stroms nur mit geringen Volllastzeiten fahren. Sie wären dementsprechend suboptimal ausgelastet, was den Unternehmensgewinn verringern bzw. den Return of Invest verlängern würde.

Beim PtC-Konzept könnten die bestehenden Wertschöpfungsketten erhalten bleiben, da Anwendungen und Basischemikalien gleich sind wie bei den fossilen Rohstoffquellen Erdgas bzw. Erdöl. Bestehende Logistikstrukturen (Infrastruktur) in Chemparks könnten bei PtC ebenfalls genutzt werden und müssten nicht neu errichtet werden. Allerdings müssten neue Kapazitäten zur Zwischenspeicherung geschaffen werden, damit die nachfolgenden Produktionen weiterhin kontinuierlich erfolgen können. Die Nutzung bestehender Infrastruktur bedeutet einen Vorteil gegenüber der Nutzung von PtG-Wasserstoff. Für Chlor gilt, dass die Lagerung aufgrund des gasförmigen Zustands und der hohen Reaktionsfähigkeit mit einem hohen sicherheitstechnischen Aufwand und einem entsprechenden Investment verbunden ist.

Die Versorgungssicherheit mit Basischemikalien würde gesichert werden, da die Abhängigkeit von ausländischem fossilem Erdgas reduziert wird – vorausgesetzt es ist genügend EE-Überschussstrom vorhanden. Andererseits wäre nur für die Substitution fossiler Rohstoffe zur Deckung der deutschen Polymerherstellung (8 Mio. t) mittels PtG-Methan schon die gesamte Windstromkapazität aus Nord- und Ostsee notwendig<sup>1211</sup>.

1210 Meyer, Bernd (TU Freiberg): Landtag NRW (Hg.): Enquetekommission II Protokoll 5. Sitzung (nichtöffentlich). (2013), S. 51.

1211 Bringezu, Stefan (Wuppertal Institut): ebd., S. 51.

Die Forschung im Bereich PtC ist mit hohem Investment verbunden, da Demonstration in Produktionsanlagen stattfinden muss.

### **Soziales**

#### *Beschäftigung*

Die Beschäftigung in der chemischen Industrie Nordrhein-Westfalens kann gesichert werden, wenn Wertschöpfungsketten erhalten bleiben. Darüber hinaus könnten im Bereich der Energiewirtschaft ebenfalls Arbeitsplätze gesichert werden. Die Qualität der Beschäftigung würde ebenfalls erhalten bleiben.

#### *Bildung*

Lerninhalte in Aus- und Weiterbildung sind bezüglich Verfahrens- und Prozesstechnik auf neue Verfahren anzupassen. Insgesamt steigt die Komplexität der Themen bzw. Zusammenhänge, welche vermittelt werden müssen. Fachkräfte sind aufgrund der bereits bestehenden Prozesse grundsätzlich verfügbar.

## IV.6 Bewertung

### IV.6.1 Potenzial des Ausbaus der elektrochemischen und energieintensiven Produktion organischer Produkte

Elektrochemische Verfahren bieten im Vergleich zu anderen chemischen Herstellverfahren eine Reihe von Vorteilen. Da ihr Hauptreagenz Elektronen sind, sind im Vergleich zu den meisten katalytischen Verfahren weniger oder im günstigsten Fall gar keine Synthese-Chemikalien erforderlich. Sie ermöglichen eine sichere Erzeugung reaktiver Verbindungen unter milden Bedingungen (Temperatur, Druck). Elektrochemische Verfahren erlauben außerdem die direkte Umwandlung von elektrischer Energie in Wertprodukte („power-to-chemicals“) und dadurch auch den Einsatz reaktions-träger Ausgangsstoffe wie  $\text{CO}_2$ . Ein weiterer Vorteil elektrochemischer Verfahren ist die Möglichkeit, besonders hohe Oxidations- oder Reduktionspotenziale vermeiden zu können, wodurch Synthesen von ansonsten schwer bzw. nicht zugänglichen chemischen Verbindungen möglich werden. Außerdem ist die gleichzeitige Herstellung von zwei oder mehr Wertprodukten (z.B. Chloralkali-Elektrolyse: Chlor, Natronlauge und Wasserstoff) sowie ein modularer Anlagenaufbau möglich, der eine Kapazitätserweiterung erheblich vereinfacht.

Generell können elektrochemische Verfahren nur bei Reduktions- oder Oxidationsreaktionen zur Anwendung kommen, Substitutionsreaktionen sind nicht elektrochemisch durchführbar. Darüber hinaus finden elektrochemische Verfahren (in flüssiger Phase) dort ihre Grenzen, wo eine hohe Viskosität der Reaktanten o. Produkte besteht oder diese zur Kristallisation bzw. Ausfällung neigen. Für elektrochemische Verfahren machen die Stromkosten einen großen Anteil an den Produktionskosten aus, wodurch in Regionen mit hohen Strompreisen große Herausforderungen für die Wirtschaftlichkeit (auch im Vergleich zu alternativen Syntheserouten) bestehen.

#### Option H.1a: Elektrochemische Produktion (org. Elektrosynthesen) der organischen Grundchemikalien Adipodinitril und Sebacinsäure

Diese Option betrachtet das Potenzial der bereits entwickelten, jedoch nicht großtechnisch umgesetzten elektrochemischen Syntheserouten für die Grundchemikalien Adipodinitril (500.000 t/a) und Sebacinsäure (50.000 t/a). Weitere organischer Produkte, die über elektrochemische Syntheserouten technisch zugänglich wären, sind u.a. aromatische Aldehyde, Aminophenol und Piperidin.

Der geringere Abfallanfall stellt einen ökologischen Vorteil elektrochemischer Syntheserouten dar, der durch die Nutzung von EE-Strom oder Strom aus KWK-Anlagen verstärkt werden kann.

Die elektrochemischen Verfahren zur Herstellung von Adipodinitril und Sebacinsäure sind zwar seit längerer Zeit kommerziell verfügbar, jedoch sind die nicht-elektrochemischen Verfahren offenbar wirtschaftlicher und damit derzeit bevorzugt. Dies lässt sich vor allem damit begründen, dass die Produktionskosten bei elektrochemischen Synthesen durch die Stromkosten dominiert werden, weshalb diese unter aktuellen Bedingungen in Deutschland nicht konkurrenzfähig sind. Für die Feinchemie sind die Stromkosten wirtschaftlich weniger bedeutend, da a) ihr Anteil an den Produktionskosten geringer ist, b) die Produkte eine höhere Wertschöpfung besitzen und c) katalytische Verfahren vielfach weniger effizient und dadurch mit höheren Rohstoffkosten und einem höheren Aufarbeitungsaufwand verbunden sind. Der Einstieg in die verstärkte Entwicklung und Nutzung von elektrochemischen Verfahren zur Herstellung von Feinchemikalien erscheint daher sinnvoll und könnte die technologische Grundlage für eine spätere Nutzung auch im Bereich der Grundchemika-

lien schaffen. Bei der ökonomischen Betrachtung ist neben den hohen Stromkosten zu berücksichtigen, dass erhebliche Neuinvestitionen in entsprechende Anlagen notwendig wären.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich durch Organoelektrosynthesen (theoretisch) vielfältige Produkte erschließen lassen. Sie bieten besonderes Potenzial für die Feinchemie. Ihr Potenzial zur Herstellung organischer Grundchemikalien und damit zur Substitution konventioneller chemisch-katalytischer Verfahren wird allerdings heute noch als gering eingeschätzt, da die bekannten elektrochemischen im Vergleich zu katalytischen Verfahren bei aktuellen Strompreisen in Deutschland nicht wirtschaftlich sind. Mit zunehmendem Ausbau der erneuerbaren Energien und bei Weiter- und Neuentwicklung von elektrochemischen Verfahren könnte der Anteil elektrochemischer Synthesen in Zukunft jedoch zunehmen, sofern dann Strom zu wettbewerbsfähigeren Preisen bezogen werden kann.

### **DSM-Potenzial der Organoelektrosynthesen von Adipodinitril und Sebacinsäure**

Eine Herstellung von Adipodinitril und Sebacinsäure über elektrochemische Verfahren könnte außerdem einen Beitrag zur Netzstabilisierung sowie zur wirtschaftlichen Nutzung eines volatilen Stromangebots durch eine Flexibilisierung des Stromverbrauchs (DSM) leisten. Dies setzt die technische Möglichkeit eines flexiblen Betriebs der entsprechenden Synthesen sowie Möglichkeiten zur wirtschaftlichen (Zwischen)speicherung der entstehenden Zwischenprodukte voraus. Aktuell beträgt der Gesamtstromverbrauch für alle heute in Deutschland angewandten elektrochemischen Verfahren zur Herstellung von organischen Produkten 0,1 TWh pro Jahr<sup>1212</sup>. Insgesamt ist der Umfang des DSM-Potenzials für die Organoelektrosynthesen von Adipodinitril und Sebacinsäure im Vergleich zur Chlor-Alkali-Elektrolyse und Primäraluminiumherstellung vergleichsweise gering.

### **Option H.1b: Vermehrte Nutzung des Lichtbogenverfahrens**

Das Lichtbogenverfahren stellt eine Alternativprozessroute zur Herstellung von Acetylen auf Basis von Kohle, Methan oder flüssigen Kohlenwasserstoffen dar. Acetylen ist ein interessanter chemischer Grundstoff, aus dem eine Vielzahl von Zwischenprodukten für chemische Wertschöpfungsketten gewonnen werden können.

In den letzten Jahrzehnten wurden Acetylen-basierte Prozesse jedoch aus wirtschaftlichen Gründen weitgehend durch Olefin-basierte Prozesse, insbesondere auf Basis von Naphtha, verdrängt. Innerhalb der Verfahren zur Herstellung von Acetylen spielt das Lichtbogenverfahren heute industriell nur noch eine untergeordnete Rolle. Hierfür sind vor allem der hohe Strombedarf und die damit verbundenen Kosten verantwortlich.

Bisher stellen auch die mit der Stromerzeugung verbundenen hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen eine ökologische Hürde dar.

Auf der anderen Seite bietet das Lichtbogenverfahren im Hinblick auf die sich ändernde Rohstoff- und Energiesituation in Deutschland eine Möglichkeit dar, heimische Braunkohle unter Verwendung von EE-Strom stofflich zu nutzen. Für diese Kohlechemie besteht jedoch hoher Forschungsbedarf hinsichtlich der Energieeffizienz und des Kohlenstoffbindungsvermögens im Produkt. Eine noch ungelöste ökologische und ökonomische Hürde stellt die Verfügbarkeit von großen Mengen an kostengünstigem EE-Strom dar, die voraussichtlich auch langfristig nicht gegeben sein wird.

---

1212 Bayer MaterialScience AG; Kintrup, Jürgen; Weber, Rainer: Landtag NRW (Hg.): Stellungnahme zur Anhörung „Elektrochemische Verfahren“ der Enquete Kommission zur Zukunft der chemischen Industrie in NRW. (2014).

Wie für die Organoelektrosynthesen gilt auch für das Lichtbogenverfahren, dass erhebliche Investitionen zum Aufbau entsprechender Produktionskapazitäten notwendig wären.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Lichtbogenverfahren ökologische und ökonomische Nachteile gegenüber alternativen Verfahren aufweist. Aktuell besteht keine Wettbewerbsfähigkeit gegenüber konventionellen Prozessrouten von Acetylen auf Naphtha-Basis. Die aktuelle ökologische Hürde durch hohe CO<sub>2</sub>-Emissionen kann durch die Nutzung von Strom aus GuD-Kraftwerken oder gar aus erneuerbaren Energien verringert werden. Letzteres hängt allerdings von der Verfügbarkeit preiswerten EE-Stroms ab. Nichtsdestotrotz besitzt das Verfahren Potenzial im Hinblick auf die stoffliche Kohlenutzung bzw. die Nutzung von Erdgas anstelle von Erdöl sowie die Möglichkeit zum Demand Side Management.

#### **DSM-Potenzial des Lichtbogenverfahrens**

Durch seinen hohen Stromverbrauch eignet sich das Lichtbogenverfahren generell zum DSM. Die Realisierung ist jedoch abhängig von den erzielbaren Erlösen und der Verfügbarkeit von kostengünstigem EE-Strom.

### **IV.6.2 Nutzung bestehender Verfahren zum Einsatz volatiler Strommengen**

#### **Option H.2a: Vermehrte Herstellung von Aluminium in Deutschland**

Primäraluminium wird ausschließlich elektrochemisch gewonnen. Die Aluminiumelektrolyseure können nach Stromangebot gesteuert werden (Reduktion um 50% in 24 h möglich) und eignen sich damit für das DSM, jedoch nicht für kurzfristige Anpassungen. Rein rechnerisch besteht für die Aluminiumelektrolyse eine installierte Leistung von 3 GW und damit ein fast 100-faches Potenzial verglichen mit der gesamten Nichteisen-Metallerzeugung und der Grundstoffchemie (38,4 MW). Das Schmelzelektrolyse-Verfahren wird großtechnisch in NRW angewendet. Ein Standortnachteil ist jedoch der hohe Strompreis. Für eine ökologische Nachhaltigkeit müssten zudem große Mengen an preiswertem EE-Strom verfügbar sein. Eine Ausweitung der deutschen bzw. nordrhein-westfälischen Produktionskapazitäten ist darüber hinaus nur bei steigender (globaler) Nachfrage sinnvoll, nicht jedoch nur zur Bereitstellung von Netzstabilisierungsleistungen. Ergäbe sich mittels DSM eine positive Erlössituation, könnten Arbeitsplätze in der Aluminiumindustrie in NRW, die unter globalem Wettbewerbsdruck stehen, erhalten bleiben.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Ausweitung der elektrochemischen Produktion von Primäraluminium rein rechnerisch ein großes Potenzial für die Umsetzung des Demand-Side-Managements besitzt. Allerdings stehen dem ökologische und ökonomische Hürden, wie ein hoher Strompreis und die voraussichtlich begrenzte Verfügbarkeit von regenerativem Strom, gegenüber. Außerdem ist es fraglich, ob vermehrte Produktionskapazitäten in NRW im globalen Markt wettbewerbsfähig wären. Insofern wird derzeit nicht von einem Ausbau der Primäraluminiumproduktion in NRW und damit von einem über den aktuell möglichen Beitrag zur Netzstabilisierung ausgegangen. Falls verlustarme Fernleitungen zum Stromtransport aus Wasserkraft (z.B. aus Norwegen oder Island) zur Verfügung stehen, kann sich die Bewertung ändern.

#### **Option H.2b: Nutzung der Chlor-Alkali-Elektrolyse (CAE) zur Energiespeicherung**

Chlor ist einer der wichtigsten Rohstoffe der chemischen Industrie. Zur Herstellung im industriellen Maßstab wird aktuell das Verfahren der Chlor-Alkali-Elektrolyse (CAE) und vereinzelt die Salzsäureelektrolyse eingesetzt. Die Fahrweise der CAE-Verfahren lässt sich bereits heute in einem gewissen Rahmen an das Stromangebot anpassen, allerdings fehlen trotz des hohen technologischen Reifegrads Erfahrungen hinsichtlich der Auswirkungen einer noch stärkeren dynamischen Fahrweise auf die Lebensdauer, Produktqualität und Sicherheit von CAE-Anlagen. Entsprechend besteht ein

großer Bedarf an Studien und zur Entwicklung robusterer Materialien. In NRW könnte für DSM auf große CAE-Kapazitäten zurückgegriffen werden.

Aus ökologischer Sicht sollten die Anlagen mit dem Membranverfahren betrieben werden. An Standorten, wo kein Wasserstoff benötigt wird, kann durch den Einsatz der Sauerstoffverzehrkathode eine weitere Steigerung der Energieeffizienz erzielt werden.

Diesem Vorteil stehen höhere Investitionskosten für den für eine flexible Fahrweise notwendigen Kapazitätsausbau der Anlagen und eine eventuelle Umstellung auf die SVK-Technologie gegenüber. Durch die an das Stromangebot angepasste Fahrweise sinkt die Zahl der Volllaststunden, was die Wirtschaftlichkeit der vergleichsweise teuren Chemieanlagen negativ beeinflusst. Es ist darüber hinaus sicherzustellen, dass die dann schwankend anfallenden Chlormengen in den konstant laufenden Nachfolgeprozessen mit gleichbleibenden Mengen eingesetzt werden können. Die hohe Reaktivität von Chlor stellt für die Lagerung in größeren Mengen technisch und ökonomisch eine Herausforderung dar. Ein darüber hinaus gehender Kapazitätsausbau ist begrenzt, da z.B. Massenkunststoffe als Chlorabnehmer in NRW keine Wachstumssparte darstellen.

Die an das Stromangebot angepasste Fahrweise bietet die Möglichkeit, den Betrieb vorhandener CAE-Anlagen wirtschaftlich zu optimieren und damit vorhandene Arbeitsplätze zu sichern. Dies hängt davon ab, wie eine entsprechende Dienstleistung vergütet wird und inwieweit unter diesen Bedingungen ein marktgesteuertes Demand Side Management preisliche Nachteile durch hohe Energiekosten kompensieren kann.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass erst dann mit einem für die Nutzung des DSM-Potenzials notwendigen Ausbau der CAE-Kapazitäten zu rechnen ist, wenn die regulatorischen und marktwirtschaftlichen Rahmenbedingungen diese Zusatzleistung honorieren und nicht bestrafen. Unter diesen veränderten Bedingungen kann durch DSM die Wirtschaftlichkeit vorhandener Anlagen verbessert und damit eine Abwanderung dieses insbesondere für die Grundstoff- und Kunststoffchemie wichtigen Chemie-Zweigs verhindert werden. Es gilt daneben die Effizienz der CAE-Verfahren, insbesondere das Membranverfahren (mit und ohne Sauerstoffverzehrkathode) durch Innovationen weiter zu steigern.

### IV.6.3 Energiespeicher

Die Optionen H.3 analysieren, welche Potenziale verschiedene Energiespeichertechnologien besitzen und welchen Beitrag die chemische Industrie hierzu als Produkt- und Komponentenlieferant, Entwickler, Know-how-Träger und potenzieller Abnehmer leisten kann. Aufgrund ihrer Bedeutung für die chemische Industrie werden Wärmespeicher und Batterien sowie die Technologiekonzepte Power-to-Gas und Power-to-Chemicals betrachtet. Mechanische Speicher sind nicht Teil der Betrachtungen. Dabei werden die genannten Energiespeicher, wenn möglich, mit alternativen Maßnahmen zur Netzstabilisierung (Netzausbau, dynamische Fahrweise/DSM, Abschaltung von EE-Stromerzeugern...) verglichen

#### Option H.3a: Vermehrte Nutzung von Wärmespeichern zur Energiespeicherung

Diese Option befasst sich mit dem Potenzial EE-Überschussstrom in Wärme umzuwandeln und zur Bereitstellung als Prozesswärme in Wärmespeichern zwischenzuspeichern. Zwar besteht in der chemischen Industrie ein hoher Wärmebedarf insbesondere auch für Temperaturen  $>250^{\circ}\text{C}$ <sup>1213</sup>.

---

1213 vgl. Lauterbach, C.; Schmitt, B.; Vajen, K.: Institut für Thermische Energietechnik, Universität Kassel (Hg.): Das Potential solarer Prozesswärme in Deutschland- Teil 1 des Abschlussberichtes zum Forschungsvorhaben „SOPREN – Solare Prozesswärme und Energieeffizienz“. (2011)

Aufgrund geringer zur Verfügung stehender Mengen an EE-Überschussstrom wird jedoch dieser Option auch mittel- bis langfristig ein geringes Potenzial eingeräumt. Die Umwandlung von elektrischer in Wärmeenergie ist mit hohen Wirkungsgraden möglich. Die Rückverstromung der (z.B. in Salzschnmelzen) gespeicherten Wärme ist jedoch mit großen Verlusten verbunden, so dass andere Technologien der EE-Stromspeicherung in Wärmespeichern häufig überlegen sind. Für thermische Solarkraftwerke sind Wärmespeicher (z.B. Salzschnmelzen als Latentwärmespeicher) jedoch eine günstige Lösung für den Nachtbetrieb. Für eine breitere Nutzung der Wärmespeicher müssen Materialien für eine effiziente Hochtemperatur-Wärmespeicherung entwickelt werden (vgl. Optionsbetrachtung oben). Diese können erst mittelfristig zur Verfügung stehen.

Im Hinblick auf eine effizientere Energienutzung bieten Wärmespeicher in der chemischen Industrie Potenzial zur Nutzung bisher ungenutzter Abwärme. Denn die chemische Industrie ist hinsichtlich ihres Wärmebedarfs (nach der Metallherzeugung und –verarbeitung) eine der energieintensivsten Branchen.

Wegen der hohen Energiekosten werden in der Chemie trotz eines bereits sehr hohen Effizienzgrads auch künftig weitere Effizienzverbesserungen angestrebt, weshalb mit einem steigenden Bedarf an Wärmespeicherlösungen zu rechnen ist.

Mit Hilfe von Wärmespeichern kann eine ungenutzte Wärmeabgabe (z.B. beim Abkühlen eines Prozesses bei Chargenwechsel oder Reinigung) in die Umwelt vermieden und diese für andere Anwendungen (z.B. Aufwärmen beim Anfahren eines Prozesses) nutzbar gemacht werden. Hierdurch ergibt sich eine verbesserte Ressourceneffizienz und CO<sub>2</sub>-Bilanz. Zudem ermöglicht die Wärmespeicherung eine zeitliche und ggf. auch räumliche Trennung von Anfall und Nutzung von Wärmeenergie.

Nordrhein-Westfalen bietet aufgrund der hohen Dichte und räumlichen Nähe von Wärmeproduzenten (z.B. Müllverbrennungsanlagen, Papier- und Stahlindustrie) und –konsumenten besonderes Potenzial für Synergien bei der Schaffung von Wärmenutzungsverbänden über einen Produktionsstandort bzw. Chemiepark hinaus.

Die technische Umsetzbarkeit von Wärmespeicherlösungen ist in vielen Fällen gegeben. Allerdings besteht ein hohes Optimierungspotenzial bei Speichermaterialien, insbesondere für Hochtemperatur-Anwendungen, um robuste Systeme mit langen Lebenszeiten, hohen Wirkungsgraden und geringen Kosten zu realisieren. Hier kommt der chemischen Industrie als Material(mit)entwicklerin eine entscheidende Rolle zu.

Die Wirtschaftlichkeit von Wärmespeicherlösungen ist von verschiedenen Faktoren wie Energiekosten, Investitionskosten, Temperaturniveau etc. abhängig und muss mit alternativen Maßnahmen (z.B. Kopplung von Industrieprozessen ohne Zwischenspeicherung) verglichen werden. Die Wirtschaftlichkeit wird sich vor allem dort ergeben, wo eine hohe Zyklenzahl gegeben ist und Investitionen in Energieerzeugungskapazitäten vermieden werden können. Aktuell lassen sich am ehesten Wärmespeicherlösungen für den Niedertemperaturbereich wirtschaftlich realisieren. Anwendungsmöglichkeiten sind in Privathaushalten, Gewerbe, Handel und auch in der Industrie z.B. zum Heizen und zur Warmwasseraufbereitung vielfältig gegeben. Hier ergeben sich entsprechende Absatzmärkte für Materialien aus der chemischen Industrie. Wärmespeicherlösungen für den Hochtemperaturbereich sind mit großen technischen Herausforderungen verbunden, bieten aber gerade im Hinblick auf den Einsatz in der chemischen Industrie ein besonderes Potenzial.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Potenzial von Wärmespeichern allgemein und aufgrund des beträchtlichen Wärmebedarfs in der chemischen Industrie im Besonderen als sehr groß

eingeschätzt wird. Dabei ist zwischen Nieder- und Mitteltemperatur- sowie Hochtemperaturanwendungen zu unterscheiden. Während im Niedertemperaturbereich kurzfristig Potenziale erschlossen werden können, sind die Herausforderungen für Hochtemperaturanwendungen oftmals noch nicht gelöst. Neben der Anwendung in der chemischen Industrie ergeben sich aus Wärmespeichern interessante Märkte für entsprechende Speichermaterialien.

### **Option H.3b: Vermehrte Nutzung von Batterien zur Energiespeicherung**

Die potenziellen Einsatzbereiche von Batterien sind abhängig vom Typ vielfältig. Sie können in stationären wie mobilen Anwendungen unterschiedlichste Aufgaben wie Strombereitstellung im Sekunden- bis Stundenbereich, Netzstabilisierung durch Pufferung von Stromerzeugungsspitzen, Schwarzstart usw. übernehmen. Eine generelle Nachhaltigkeitsbewertung ist aufgrund dieser Vielfalt nicht möglich, sondern muss im Einzelfall im Vergleich zu alternativen Maßnahmen erfolgen. Die nachfolgenden Betrachtungen fokussieren nicht auf mobile Anwendungen (Kleinelektrogeräte wie Handys oder Elektrofahrzeuge).

Entsprechend des von der EK eingeholten Gutachtens besteht ab einem EE-Anteil über 40% Bedarf an Kurzzeitspeichern zum Ausgleich tageszeitlich und/oder wetterbedingter kurzer Leistungsschwankungen des Stromangebots. Hierfür eignen sich insbesondere Batterien, da sie einen hohen Wirkungsgrad (>80 %) aufweisen und schnelle Be- und Entladungsvorgänge ermöglichen. Batterien stellen deshalb für die stationäre kurz- bis mittelzeitige Strompufferung besonders in Regionen mit hoher EE-Einspeisung aufgrund ihrer Leistungscharakteristika eine geeignete Flexibilisierungsoption dar.

Allerdings sind sie eine vergleichsweise teure Speicheroption. Potenzial bieten sie deshalb vor allem da, wo kurzzeitige Stromschwankungen auftreten und diese die Netzstabilität gefährden oder die Lebensdauer von EE-Stromerzeugern negativ beeinflussen. Dies ist z.B. zur Pufferung von Stromspitzen an PV- und Windkraftanlagen (kleine dezentrale PV-Anlagen wie auch in EE-Parks) sowie in Systemen der Informationstechnik oder Infrastrukturversorgung der Fall. Der wirtschaftliche Vorteil ergibt sich hier über die vermiedenen Kosten. In den beiden ersten Anwendungen stehen Batterien in wirtschaftlicher Konkurrenz zu einer Abregelung der Stromerzeugung.

Um bestehende ökonomische Nachteile auszugleichen, gilt es durch technische Innovationen und Aufbau einer Massenproduktion die Stückkosten zu senken. Entsprechend besteht großer Bedarf für effizientere, kostengünstigere und robustere Membranen, Elektroden und Elektrolyte, Batteriesysteme mit höheren Lebensdauern und verbesserten Wirkungsgraden. Hier kommt der chemischen Industrie als Materialentwickler und –lieferant eine wichtige Bedeutung zu.

Eine großtechnische Produktion von Batteriesystemen ist zwar in Deutschland möglich, jedoch eher unwahrscheinlich, da große Produktionskapazitäten in asiatischen Ländern wie Südkorea bestehen, die über einen großen Technologievorsprung verfügen. In Deutschland besteht daher eher Beschäftigungspotenzial in der chemischen Industrie sowie in Dienstleistungen im Bereich von komplexen Speichersteuerungssystemen (vgl. Anhörung „Energiespeicher“).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Batterien bereits vielfach Einsatz finden und weiteres Marktpotenzial für verschiedene zentrale und dezentrale mobile sowie stationäre Anwendungen besitzen. Allerdings konkurrieren Batterien zur Bereitstellung von Netzdienstleistungen mit alternativen Maßnahmen wie z.B. Netzausbau und Abregelung von EE-Stromerzeugern. Hier haben Batterien wegen der Investitionskosten in der Regel einen erheblichen Nachteil. Diesem sollte durch intensive FuE-Aktivitäten für verbesserte Materialien und neue Konzepte zur Systemintegration begegnet werden.

### Option H.3c: Vermehrte Nutzung von Power to Gas-Konzepten zur Energiespeicherung

Die Nutzung von Überschussstrom zur elektrolytischen Wasserstoff-Produktion und ggf. anschließenden Methanisierung und/oder Zwischenspeicherung stellt eine der wenigen Möglichkeiten zur Langzeitspeicherung und für den saisonalen Ausgleich von EE-Erzeugungsschwankungen dar. Langzeitspeicher haben bei einem EE-Ausbau ab 80 % eine essentielle Bedeutung für das Energiesystem (vgl. PtG-Gutachten). Im PtG-Konzept wird der elektrolytisch gewonnene Wasserstoff oder das entsprechende Methan zur Wärmeerzeugung oder mittels Rückverstromung energetisch verwertet. Damit besitzt das PtG-Konzept essentielle Bedeutung zur erfolgreichen Umsetzung der Energiewende, da es die einzige Möglichkeit in Deutschland für einen Ausbau an Langzeitspeichern darstellt.

Eine klimaschonende Wasserstoff-Gewinnung durch Nutzung von EE-Überschussstrom kann einen wichtigen Beitrag zum Erreichen der nationalen und internationalen Klimaschutzziele sowie zur Einsparung bzw. Substitution fossiler Energieträger (Erdgas und Erdöl) leisten. Das gesamte PtG-System ist im Idealfall CO<sub>2</sub>-neutral bis –positiv, sofern der benötigte Strom – und im Falle von Methan auch das CO<sub>2</sub> – aus regenerativen Quellen stammen. Beide stehen allerdings nicht in ausreichendem Maße zur Verfügung (vgl. Kohle- und PtG-Gutachten). Es ergibt sich jedoch auch schon eine verbesserte ökologische Nachhaltigkeit, wenn nur der Wasserstoff regenerativ erzeugt wird.

Der Gesamtwirkungsgrad ist aufgrund der komplexen Prozesskette, insbesondere bei anschließender Methanisierung, geringer als bei anderen Speichertechnologien. Dieser ließe sich mittels Kraft-Wärme-Kopplung deutlich erhöhen. Auch wenn die einzelnen Systemkomponenten Wasserelektrolyse und Methanisierung bereits kommerziell betrieben werden, ist unter aktuellen regulatorischen und Markt-Randbedingungen eine wirtschaftliche Machbarkeit für die PtG-Systemlösung noch nicht gegeben. So existieren derzeit noch keine großtechnischen kommerziellen Systemanwendungen (lediglich Pilot- und Demonstrationsanlagen). Aktuell und auch auf mittelfristige Sicht sind sowohl PtG-Wasserstoff als auch PtG-Methan, u.a. wegen der teuren Anlagentechnik sowie geringer Vollaststunden, um ein Vielfaches teurer als die aus fossilem Erdgas gewonnenen Grundstoffe (vgl. PtG-Gutachten, ChemCoast-Studie<sup>1214</sup>). Langzeitspeicher sind durch hohe Abrufdauern aber geringe Abrufhäufigkeit gekennzeichnet, die hohe Systemkosten bei geringen Einsatzzeiten erzeugen.

Der Beitrag des PtG-Systems zur Eigenversorgung mit Wasserstoff/Methan und damit zur Erhöhung der Versorgungssicherheit ist heute aufgrund nicht zur Verfügung stehender Mengen an EE-Strom sowie einer fehlenden Wirtschaftlichkeit gegenwärtig gering.

Die erfolgreiche Realisierung des PtG-Konzepts stellt eine komplexe Aufgabenstellung dar, die nur durch interdisziplinäre Zusammenarbeit in den Bereichen Elektrochemie, Energie-Wirtschaft, BWL, VWL, Kommunikations- und Regelungstechnik begegnet werden kann.

Ob Wasserstoff oder Methan eine nachhaltigere Nutzung versprechen, muss im Einzelfall überprüft werden. Wasserstoff kann als Brennstoff zur Rückverstromung in Gaskraftwerken oder Brennstoffzellen eingesetzt werden. Eine Methanisierung reduziert den Gesamtwirkungsgrad der Prozesskette und erhöht so die Gesteungskosten. Darüber hinaus muss für die Methanisierung in der Nähe eine entsprechende CO<sub>2</sub>-Quelle und idealerweise ein Wärmesenke sowie ein Erdgasanschluss mit ausreichender Aufnahmekapazität vorhanden sein. Insgesamt bietet Methan gegenüber Wasserstoff den Vorteil, dass es ohne Konzentrationsbegrenzung ins Erdgasnetz eingespeist werden kann.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass dem PtG-Konzept erst bei einem deutlichen Ausbau eine mögliche Realisierungschance eingeräumt wird. Besondere Herausforderungen stellen dabei die

---

1214 ChemCoast: Gemeinsames Projekt von Politik und Unternehmen im Norden bringt zukunftsweisende Ergebnisse: (12.08.2013).

derzeit fehlende wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit, die Verfügbarkeit von kostengünstigem Strom aus regenerativen Quellen und der Wirkungsgrad der Wasserelektrolyse sowie der Gesamtwirkungsgrad der Prozesskette (besonders für PtG-Methan) dar. Dennoch ist die weitere Verfolgung dieser Option aus heutiger Sicht unerlässlich, da chemische Energiespeicher die einzige Möglichkeit zur Langzeitspeicherung darstellen und damit essentiell für einen EE-Ausbau  $\geq 80\%$  entsprechend der Ziele der Bundesregierung sind und somit langfristig benötigt werden. Ob eine Realisierung auf Basis von Wasserstoff oder Methan ökologisch und ökonomisch sinnvoller ist, muss durch entsprechende Studien und Demonstrationsvorhaben ermittelt werden. Aufgrund mangelnder Daten und Erfahrungen ist derzeit nicht absehbar, welche der vorgestellten Nutzungspfade am nachhaltigsten ist.

### **Option H.3d: Vermehrte Nutzung von Power to Chemicals-Konzepten zur Energiespeicherung**

Das Power to Chemicals-Konzept beschreibt einerseits die stoffliche Nutzung von PtG-Wasserstoff bzw. -Methan in der chemischen Industrie zur Herstellung von Chemikalien oder im Verkehrssektor als Kraftstoffe (ohne weitere Umwandlung). Andererseits kann es auch die Nutzung von EE-Überschussstrom zur Herstellung von Chemikalien und Kraftstoffen mittels elektrochemischer Verfahren darstellen.

Derzeit ist noch unklar, welche Mengen (günstigen) EE-Überschussstroms in Zukunft vorhanden sein werden. Voraussichtlich bis 2050 wird die energetische Nutzung des erzeugten PtG-Wasserstoffs bzw. -Methans vorrangig zur Rückverstromung (im Sinne einer klassischen Speicherfunktion) eingesetzt werden müssen, um eine Versorgungssicherheit sowie eine ausreichende Integration erneuerbarer Energien zu erreichen.

Es ist jedoch denkbar, dass sich sehr langfristig nach erfolgreicher Umsetzung der Energiewende (nach 2050) Rahmenbedingungen ergeben, unter denen ein zusätzlicher Ausbau von PtG-Wasserelektrolysen-Anlagenkapazitäten wirtschaftlich wird. Der hergestellte Wasserstoff könnte dann stofflich im Verkehr und in der chemischen Industrie genutzt werden. Hiermit verbunden wäre z.B. der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft. Unter diesen Bedingungen wäre z.B. die Nutzung von Wasserstoff für Hydrierungsreaktionen beim Einsatz alternativer Rohstoffe wie Biomasse, Kohle und  $\text{CO}_2$  möglich. Auch Methan könnte in Zukunft eine noch wichtigere Rolle z.B. zur Olefin-Synthese über Synthesegas spielen. Als Produkte besitzen Kraftstoffe aufgrund ihrer hohen Energiedichte, guten Lagerfähigkeit und hohen Wertschöpfung großes Potenzial, die zum Ausgleich jahreszeitlich schwankender Nachfrage flexibel für Mobilitätszwecke und zur Wärmeerzeugung eingesetzt werden können und somit eine wichtige strategische Energiereserve darstellen.

Im Hinblick auf die Realisierung einer Wasserstoffwirtschaft sowie die stoffliche Nutzung von PtG-Wasserstoff bzw. -Methan bietet Nordrhein-Westfalen mit einer hohen Dichte von Produzenten (z.B. Stahl und Zement für  $\text{CO}_2$ ; Energie für Strom) und Abnehmern (Chemie, Raffinerien, hohes Verkehrsaufkommen, speziell hoher Anteil an ÖPNV) entscheidende Standortvorteile. Außerdem gibt es mit der bestehenden Wasserstoff-Pipeline im Rhein-Ruhr-Gebiet eine wichtige Infrastruktur für die Erzeugung, Verteilung und den Verbrauch von Wasserstoff.

Zusammenfassend wird festgehalten, dass die Realisierung von PtC-Konzepten eine langfristige Aufgabe ist, für die es vielfache ökologische und technisch-ökonomische Hürden zu überwinden gilt. Für eine Realisierung ist eine (Weiter-)entwicklung der Teiltechnologien, eine Untersuchung der gesamten Prozessketten sowie der verschiedenen Effekte auf das Gesamtenergiesystem notwendig, um die zeitlichen Entwicklungen z.B. im Hinblick auf eine entsprechende FuE-Roadmap abschätzen zu können.

# Inhalt Kapitel V

V.	HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN .....	375
	Fazits und Handlungsempfehlungen.....	377
a.	Rohstoffe .....	377
	Fazit.....	377
	Handlungsempfehlungen.....	377
b.	Werkstoffe .....	379
	Fazit.....	379
	Handlungsempfehlungen.....	379
c.	Verfahren.....	381
	Fazit.....	381
	Handlungsempfehlungen.....	381
d.	Energieumsätze.....	383
	Fazit.....	383
	Handlungsempfehlungen.....	383
e.	Querschnittsthema: Stärkung Innovationsfähigkeit.....	385
	Handlungsempfehlungen.....	385
f.	Querschnittsthema: Dialog für Industrie- und Technologieakzeptanz.....	387
	Handlungsempfehlungen.....	387
g.	Querschnittsthema: Gesellschaftliche Herausforderungen – Qualifikation, demografische Entwicklung und gute Arbeitsverhältnisse .....	388
	Handlungsempfehlungen.....	388
	ANHANG .....	391
	Anhörungen .....	391
	Gutachten .....	391
	Vorträge .....	391
	LITERATURVERZEICHNIS .....	393



## V. Handlungsempfehlungen

Der chemischen Industrie kommt für die nachhaltige Entwicklung des Industriestandortes Nordrhein-Westfalen und gleichzeitig für Wachstum und Wohlstand unseres Bundeslandes eine besondere Rolle zu. Sie ist zudem ein zentraler Lieferant von Materialien für viele Industriebranchen. Gleichzeitig hat sie eine hohe Innovationsfähigkeit und ist dadurch in der Lage Lösungen für wichtige gesellschaftliche Herausforderungen zu entwickeln. Aus diesen Gründen sind die nachhaltige Zukunftssicherung und der Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit des Chemiestandorts Nordrhein-Westfalen und die Unterstützung einer nachhaltigen Entwicklung der chemischen Industrie eine wichtige Aufgabe für Wirtschaft, Politik und Gesellschaft.

In den vorstehenden Kapiteln hat die Enquetekommission Perspektiven für die Erforschung und Entwicklung nachhaltiger Rohstoffbasen, Werkstoffe und Produktionsverfahren sowie den nachhaltigen Einsatz erneuerbarer Energie in der chemischen Industrie untersucht und bewertet. Auf der Grundlage dieser Analyse und der darin eingeflossenen Sachverständigengutachten und Sachverständigenanhörungen, die von der Enquetekommission eingeholt bzw. durchgeführt wurden, werden der Politik nachfolgend in Bezug auf die untersuchten Themenfelder Handlungsempfehlungen unterbreitet. Die Handlungsempfehlungen sollen entsprechend des Einsetzungsbeschlusses des Landtages dem Ziel dienen, den Chemiestandort Nordrhein-Westfalen unter dem Gesichtspunkt einer nachhaltigen Chemiewirtschaft und im Hinblick auf seine zukünftige globale Wettbewerbsfähigkeit zu sichern und auszubauen.

Die Enquetekommission hat in ihrer Untersuchung dabei den dreidimensionalen Begriff der Nachhaltigkeit zugrunde gelegt, der auf einem gleichgewichtigen Ausgleich zwischen den sozialen, ökologischen und ökonomischen Auswirkungen beruht (vgl. Einleitung).

Vor dem Hintergrund der bereits im Einleitungskapitel beschriebenen zukünftigen globalen Veränderungsprozesse wird die Zukunft nordrhein-westfälischer Chemiestandorte insbesondere davon abhängen, ob es gelingt, das politische und wirtschaftliche Umfeld des Chemiestandorts Nordrhein-Westfalen so attraktiv und stabil zu gestalten, dass hier in neue effizientere Anlagen (auch auf der Basis neuer Anlagenkonzepte) und innovative Produkte investiert wird. Dabei sind die Vergleichbarkeit der Energie- und Rohstoffkosten mit anderen globalen Chemieregionen, die Innovationsfähigkeit der Unternehmen und Wissenschaft, die Akzeptanz von Industrie und Innovationen in der Bevölkerung, die hohe Qualifikation und funktionierende Ausbildung sowie eine funktionierende Infrastruktur entscheidend. Eine zentrale Bedeutung kommt darüber hinaus einem leistungsstarken Industriennetzwerk zu. Denn vollständige Wertschöpfungsketten und die enge Vernetzung ihrer Akteure sind essentiell für das Heben notwendiger Effizienz- und Innovationspotenziale.

Die Enquetekommission hat sich auf Basis des Einsetzungsantrags auf einige für die Zukunftssicherung der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen wichtige Aspekte einer nachhaltigen Chemiewirtschaft fokussiert, die sowohl ökologische Fragestellungen als auch für die Wettbewerbsfähigkeit der Branche bedeutende Faktoren und Möglichkeiten für gute und sichere Beschäftigung berücksichtigt.

Die hohen Energie- und Rohstoffkosten in Deutschland und somit auch in Nordrhein-Westfalen stellen einen Standortnachteil für die chemischen Produktionsstandorte dar. Der Verbesserung der Ressourceneffizienz kommt daher eine Schlüsselrolle bei der Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit der nordrhein-westfälischen Chemie zu. Besondere Herausforderungen bestehen im Hinblick auf die Nutzung alternativer Rohstoffe sowie auf neue Werkstoff- und Abfallverwertungskonzepte. Damit

die Energiewende eine nachhaltige Energieversorgung zu wettbewerbsfähigen Preisen für Industrie und Bürger ermöglicht, bedarf es innovativer Speichertechnologien sowie neuer Betriebskonzepte. Hierzu ist die Material- und Prozessexpertise der chemischen Industrie gefragt, um Zukunftsherausforderungen, wie z.B. dem Klimawandel oder der zunehmenden Diversifizierung der Rohstoffbasis zu begegnen.

Eine Grundvoraussetzung für die Lösung der beschriebenen Herausforderungen ist die Innovationsfähigkeit der NRW-Chemie. Diese ist aktuell sehr hoch, allerdings holen andere Chemieregionen auf. Besondere Herausforderungen bestehen deshalb nicht zuletzt für den Erhalt und den Ausbau leistungsstarker Industrienetzwerke. Denn hier liegt ein einzigartiger Wettbewerbsvorteil der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen. Sie ermöglichen eine effiziente Nutzung von Infrastruktur- sowie Stoff- und Energieströmen einerseits und bilden andererseits durch die räumliche Nähe von Kunden und Lieferanten eine wichtige Grundlage für eine hohe Innovationsfähigkeit in der Wertschöpfungskette.

Damit neue Technologien und Produkte einen größtmöglichen Nachhaltigkeitsbeitrag leisten können, sind neue Anforderungen an die Aus- und Weiterbildung zu stellen. Die nachhaltige Entwicklung der chemischen Industrie, die ressourceneffiziente und innovative Prozesse und Produkte zur Verfügung stellt, sichere und gut bezahlte Arbeitsplätze schafft sowie zum Wachstum und Wohlstand des Landes beiträgt, muss von einer breiten gesellschaftlichen Akzeptanz getragen werden.

## Fazits und Handlungsempfehlungen

### a. Rohstoffe

#### Fazit

Als Rohstoffe setzt die chemische Industrie heute überwiegend die Nebenprodukte anderer Branchen wie die Rohölfraktion Naphtha aus Raffinerien ein. Die Rohstoffbasis für die chemische Industrie in Nordrhein-Westfalen wird bis 2040 zwar weiterhin vom Erdöl dominiert sein, sie wird sich aber im Betrachtungszeitraum, insbesondere mittel- bis langfristig, verändern. Alternative Rohstoffe werden an Bedeutung gewinnen (vgl. Optionenbewertung „Rohstoffe“).

Erdgas<sup>1214</sup>, Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Synthesegas<sup>1215</sup>, Braunkohle, Lignocellulose und Biomasseströme besitzen zukünftig für Nordrhein-Westfalen das größte Potenzial als alternative Rohstoffquellen. Durch eine Koppelung von Stoffströmen über Branchen- und Sektorengrenzen hinweg lassen sich Stoffkreisläufe schließen, neue Rohstoffquellen erschließen und so Ressourcen effizienter nutzen. Welche alternativen Kohlenstoffquellen in Nordrhein-Westfalen konkret in welchen Mengen ökologisch und ökonomisch nachhaltig nutzbar sind, ist nach aktueller Datenlage nicht hinreichend abschätzbar (vgl. Optionenbewertung „Rohstoffe“).

Die begrenzte Verfügbarkeit vieler alternativer Rohstoffe in einer ausreichenden Qualität (z.B. Agrarbiomasse) limitiert ihr Potenzial zur Substitution von Basischemikalien (vgl. Optionenbewertung „Rohstoffe“). So ist auch der Einsatz von CO<sub>2</sub> begrenzt durch die Verfügbarkeit von CO<sub>2</sub>-frei hergestelltem Wasserstoff.

#### Handlungsempfehlungen

Handlungsempfehlungen für eine langfristige Sicherung von Rohstoffversorgung der rohstoffintensiven Basischemie in Nordrhein-Westfalen und damit zum Erhalt intakter geschlossener Wertschöpfungsketten in der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen

- (1) Möglichkeiten der Erdgas-Verfügbarkeit
  - Ermittlung der Potenziale, die sich aus einer zunehmenden weltweiten Verfügbarkeit von LNG für eine günstigere Rohstoffversorgung der NRW-Chemie ergeben können,
  - Entwicklung von tragfähigen Geschäftsmodellen für den dafür notwendigen Ausbau der Erdgas-Infrastruktur (z.B. Bevorratung, Pipelines, LNG-Terminals in Seehäfen),
  - Abschätzung des Potenzials heimischer Gasreserven (z.B. Grubengas oder Biogas aus Abfällen u.a.) sowie Prüfung, ob die Nutzung der heimischen Erdgasressourcen ökologische und ökonomische Vorteile gegenüber dem importierten Gas haben kann
- (2) Ermittlung konkreter Mengenpotenziale und Qualitäten von unter Nachhaltigkeitsaspekten produzierter Agrarbiomasse, wie Holz und Stroh, von CO<sub>2</sub> sowie von Agrar- und Lebensmittelreststoffströmen in Nordrhein-Westfalen
- (3) Verbesserung der Verfügbarkeit kommunaler Abfallströme als Rohstoffbasis für die chemische Industrie im Sinne einer Kaskadennutzung

---

1214 vgl. Kapitel II.1.1.2 Erdgas.

1215 aus Erdöl-, Erdgas- und Kohlenutzung sowie aus Abgasströmen, Kuppelgase aus anderen Industriesektoren.

- (4) Gesetzliche Gleichstellung von stofflicher und energetischer Nutzung nachwachsender Rohstoffe durch Beendigung der Förderung einer energetischen Nutzung von Pflanzen
- (5) Unterstützung von Verfahrensentwicklungen zur Bereitstellung von heimischen Kohlenstoffquellen und CO<sub>2</sub> als Rohstoff für die chemische Industrie
- (6) Prüfung und ggf. Initiierung geeigneter gesetzlicher Maßnahmen, um im Zusammenhang mit dem europäischen Emissionshandelssystem die Attraktivität sowohl von alternativen Rohstoffen als auch einer stofflichen CO<sub>2</sub>-Nutzung zu erhöhen
- (7) Forschungsförderung zur Entwicklung von Phosphat-Recycling aus Abwasser und Entwicklung von Rückgewinnungsstrategien von Rohstoffen aus Abfallströmen, z.B. seltenen Erden etc.

### **Handlungsempfehlungen, die die Innovationskraft der chemischen Wertschöpfungskette im Hinblick auf eine stärkere Diversifizierung der Rohstoffbasis fördern**

- (8) Stärkung von Forschung und Entwicklung zu Nutzungstechnologien für alternative Rohstoffe durch das Land Nordrhein-Westfalen
  - für Erdgas
  - für nachwachsende Rohstoffe, insbesondere Lignocellulose sowie Reststoffströme
  - für angewandte CO<sub>2</sub>-Forschung
  - durch Ergänzung der Forschungslandschaft Nordrhein-Westfalen um einen verfahrenstechnischen Lehrstuhl zur Kohlechemie, mit dem Schwerpunkt der Katalyse
  - durch Förderung von Pilotanlagen<sup>1216</sup> für das Verfahren der hydrothermalen Carbonisierung (HTC) und zur stofflichen Umwandlung von organischen Reststoffen in Plattformchemikalien
  - durch Förderung einer Pilotanlage zur stofflichen Umwandlung von Kohle in Plattformchemikalien
  - durch Förderung einer Demonstrationsanlage zur stofflichen CO<sub>2</sub>-Nutzung (z.B. auf Grundlage eines mikrobiellen Prozesses)
- (9) Ausweitung von Forschung und Entwicklung zur Schließung von Stoffkreisläufen (vgl. auch b. Werkstoffe)
- (10) Unterstützung und Förderung von Projekten zur Integration von Stoff- und Energieströmen der Chemie-, Energie- und Stahlindustrie.

---

<sup>1216</sup> Bei der Anlagenentwicklung vom Labor- oder Technikumsmaßstab hin zu einer großtechnischen Lösung gibt es erfahrungsgemäß Zwischenschritte. Diese führen über Demonstrationsanlagen, die die Funktionsfähigkeit mit kleinskalierten Stoffströmen zeigen, zu Pilotanlagen, die dann schon Stoffströme mittlerer Größe verarbeiten und schließlich zu großtechnischen Anlagen führen können.

## b. Werkstoffe

### Fazit

Von der chemischen Industrie wird ein breites Werkstoffportfolio basierend auf petrochemischen, biologisch abbaubaren und biobasierten Kunststoffen zur Verfügung gestellt. Auf der Basis der entsprechenden Produkt- und Anwendungsanforderungen erfolgt die Werkstoffauswahl nach ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten in den jeweiligen Wertschöpfungsketten (vgl. Werkstoffkapitel). Biobasierte Werkstoffe bieten per se keine ökologischen Vorteile gegenüber petrochemisch basierten Werkstoffen. Biobasierte Werkstoffe werden im Rahmen des Rohstoffwandels langfristig an Bedeutung gewinnen. Die biologische Abbaubarkeit hängt nicht von der Rohstoffbasis ab, es gibt sowohl petrochemische als auch biobasierte biologisch abbaubare Werkstoffe (vgl. Optionenbewertung „Werkstoffe“).

Die Verwertung eines Werkstoffs am Ende des Produktlebens sollte sich an Nachhaltigkeitskriterien orientieren. Daher ist ein werkstoffliches Recycling dort anzuwenden, wo sortenreine Stoffströme in wirtschaftlich lohnenden Mengen verfügbar sind. Dort, wo es das Anwendungsprofil erlaubt, ist der Einsatz „sortenreiner“ Werkstoffe sinnvoll, da so eine vergleichsweise einfache Wiederverwertung auf gleichem Produktverwendungsniveau möglich ist. Ansonsten ist die thermische Verwertung in vielen Fällen die derzeit nachhaltigste Form der Nachnutzung (vgl. Optionenbewertung „Werkstoffe – Nachnutzungsoptionen“). Zukünftig können neue Verwertungswege, wie z.B. die Nutzung für Synthesegas an Bedeutung gewinnen.

Der Beitrag von Werkstoffen zur Nachhaltigkeit wird auch wesentlich vom Produktdesign und von der Anwendung bestimmt. Das gilt insbesondere in langlebigen Produkten, wo die Nutzungsphase einen großen Beitrag liefert.

### Handlungsempfehlungen

Handlungsempfehlungen für eine Sicherung der Innovationskraft der chemischen Industrie durch den Erhalt geschlossener Wertschöpfungsketten in der chemischen Industrie Nordrhein-Westfalen

- (11) Förderung von Forschung und Entwicklung verbesserter petrochemischer und biobasierter Werkstoffkonzepte. Hierbei ist ein Schwerpunkt auf das Produkt-design zu legen, das die Nutzungsphase, z.B. für light weight-Anwendungen oder andere Beiträge zur besseren Ressourcennutzung im Blick hat
- (12) Ausweitung von Forschung und Entwicklung zu ökologisch und ökonomisch nachhaltigem Materialrecycling, insbesondere neuer Methoden der stofflichen Trennung und für ein vereinfachtes werkstoffliches Recycling mit dem Ziel, den Einsatz der Rezyklate auf gleichem Produktniveau und einen Ausbau der Synthesegasnutzung als Sekundärrohstoffe zu erreichen
- (13) Einsatz biologisch abbaubarer Werkstoffe dort sinnvoll, wo a) die Abbaubarkeit mit der jeweils beabsichtigten Nutzung vereinbar ist (z.B. für Agrarfolien), b) die biologische Zersetzung (Kompostierung) der jeweiligen Werkstoffe konkrete ökologische Vorteile gegenüber der aktuellen Nutzung bietet und c) der mit der Umsetzung eines Kompostierungssystems verbundene Aufwand in einem angemessenen Verhältnis zum ökologischen Nutzen steht. Maßnahmen zur stärkeren Förderung des Einsatzes biologisch abbaubarer Werkstoffe sollten diesen Anforderungen genügen.

**Maßnahmen zur Müllvermeidung bzw. zur Verbesserung der Voraussetzungen für Recycling**

- (14) Entwicklung von Konzepten zur Schließung von Stoffkreisläufen, die ökologischen, ökonomischen und sozialen Nachhaltigkeitskriterien entsprechen und auf Life Cycle Analysen über den gesamten Lebenszyklus beruhen
- (15) Unterstützung von Produktionsdesigns, die gemäß des Cradle-to-Cradle-Ansatzes (von der Wiege zur Wiege), eine Nutzung von Rohstoffen in einem nächsten Nutzungszyklus von Anfang an mitberücksichtigt. Hier können auch Chemikalienleasing und Mietmodelle für Endprodukte eine befördernde Rolle spielen
- (16) Sensibilisierung von Entscheidungsträgern in den Wertschöpfungsketten für den Einsatz alternativer Werkstoffe
- (17) Analyse der Ursachen und der Auswirkungen der Meeresvermüllung, Entwicklung geeigneter Problemlösungsstrategien sowie Information und Sensibilisierung der Verbraucher zu Gründen und Ursachen der Meeresvermüllung
- (18) Normung des Begriffs „Bio-Kunststoff“.

## c. Verfahren

### Fazit

Den Verfahren kommt eine zentrale Bedeutung für einen effizienteren Umgang mit Rohstoffen und Energie und damit für die Wettbewerbsfähigkeit der chemischen Industrie zu. In diesem Zusammenhang stellen die Prozessintensivierung (insbesondere die Mikroreaktionstechnik), die Katalyse und die Biotechnologie wichtige Schlüsseltechnologien dar (vgl. Optionenbewertung „Verfahren“).

Intensivierte chemische Verfahren sind bezüglich der Produkte und Standorte flexibel einsetzbar und bieten ökologische und ökonomische Vorteile. Die Ausweitung dieser Technologie auf unterschiedliche Produkte und Prozesse sollte nachdrücklich unterstützt werden. Der Katalyse kommt bei der Erschließung von Effizienzpotenzialen innerhalb der Verfahrensentwicklung eine wichtige Rolle zu.

Braunkohle ist neben Biomasse und  $\text{CO}_2$  aus Verbrennungs- und Industrieprozessen die einzige Kohlenstoffquelle, die in Nordrhein-Westfalen langfristig zur Verfügung steht. Um diese Ressource in Zukunft auch nutzen zu können, müssten die Verfahren zur stofflichen Nutzung von Braunkohle weiter entwickelt werden.

Die Biotechnologie ermöglicht durch maßgeschneiderte Biokatalysatoren die Erschließung alternativer Rohstoffe und besitzt das Potenzial für die nachhaltige Synthese von chemischen Produkten. Insbesondere bei der Nutzung ligninhaltiger Biomasse kann die Biotechnologie zur Realisierung nachhaltiger Verfahren verhelfen. Die biomimetische Chemie bietet (langfristig) Potenzial zur Entwicklung bioinspirierter Katalysatoren und Materialien (vgl. Optionenbewertung „Verfahren“).

### Handlungsempfehlungen

Handlungsempfehlungen zur Stärkung der Prozessintensivierung, der Katalyse und der Biotechnologie als Schlüsseltechnologien für Nordrhein-Westfalen

- (19) Vernetzung der verschiedenen in Nordrhein-Westfalen vorhandenen wissenschaftlichen und industriellen Kompetenzen im Bereich (Bio)Katalyse, um die Technologieführerschaft in diesem Bereich zu erhalten
- (20) Unterstützung der Biotechnologie und der Prozessintensivierung/Mikroreaktionstechnik/Flow Chemistry als Schlüsseltechnologien für die chemische Industrie
- (21) Verfahrenskonzepte für großtechnische biotechnologisch basierte Produktionen, insbesondere mit gasförmigen Rohstoffen (z.B.  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  /  $\text{H}_2$ )
- (22) Nutzung von Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ )/Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ )-Strömen für rohstoffflexible Bioraffineriekonzepte
- (23) Förderung von Forschungsprojekten, die eine Nutzung von Industrie- und Agrarabfallstoffen sowie Restwärme im Verbund untersuchen
- (24) Schaffung eines Lehrstuhls der Verfahrenstechnik zum Themengebiet stoffliche Nutzung von Braunkohle und organischen Reststoffen

- (25) Schaffung eines Lehrstuhls für biomimetische Chemie
- (26) Förderung von Demonstrationsanlagen zur modularen Produktion, insbesondere zur Förderung von Technologiekonzepten, die eine modulare, kompakte und flexible reaktionstechnische Stoffumwandlung, Stofftrennung und Aufarbeitung integrieren.

## d. Energieumsätze

### Fazit

Elektrochemische Prozesse können zur direkten Umwandlung von elektrischer Energie in chemische Produkte genutzt werden. Industriell werden diese z.B. zur Herstellung von Chlor und Aluminium sowie in geringerem Maße zur Synthese von organischen Zwischenprodukten angewandt. Durch elektrochemische Verfahren lassen sich vielfältige Produkte insbesondere für die Feinchemie erschließen. Das Potenzial zur Herstellung organischer Grundchemikalien wird noch als gering eingeschätzt, dieses könnte jedoch mit weiterem Ausbau der erneuerbaren Energien und bei Weiter- und Neuentwicklung der Verfahren zunehmen. Aktuell stellen die Energiekosten eine hohe ökonomische Hürde für die Wettbewerbsfähigkeit elektrochemischer Prozesse und deren Entwicklung dar (vgl. Optionenbewertung „Energieumsätze“). Die Chlor-Alkali-Elektrolyse ist das bedeutendste elektrochemische Verfahren der chemischen Industrie (vgl. Kapitel elektrochemische Prozesse). Chlor-Alkali-Elektrolysen können einen Beitrag zum Demand Side Management (DSM) leisten, wenn die regulatorischen und marktwirtschaftlichen Rahmenbedingungen diese Zusatzleistung honorieren (vgl. Optionenbewertung „Energieumsätze“).

Der Bedarf an Energiespeichern (z.B. Batterien, Wärmespeicher und chemische Energieträger) wird durch die Umsetzung der Energiewende zunehmen. Dies gilt insbesondere für effiziente Langzeitspeicher zum Ausgleich des volatilen Anfalls Erneuerbarer Energien (vgl. Kapitel „Energiespeicher“). Das Potenzial von Wärmespeichern wird allgemein und insbesondere für die chemische Industrie als groß eingeschätzt. Für Batteriespeicher besteht ebenfalls weiteres Marktpotenzial. Der chemischen Industrie kommt eine wichtige Rolle bei der Entwicklung geeigneter Speichermaterialien zu (vgl. Optionenbewertung „Energieumsätze“). Die Power to Gas/Chemicals-Konzepten werden essentiell für die Bereitstellung von Langzeitspeichern mit einem weitgehenden Ausbau der EE-Kapazitäten. Durch den flexiblen Einsatz ihrer Produkte zur Strom- u. Wärmeerzeugung, Herstellung von Chemikalien und Kraftstoffen sowie deren direkter Einsatz für Mobilitätszwecke ist eine Kopplung der unterschiedlichen Energiesektoren möglich. Für einen erfolgreichen Einsatz muss die Wettbewerbsfähigkeit durch die Verfügbarkeit von kostengünstigem EE-Strom sowie die (Weiter)Entwicklung der Teiltechnologien und deren Systemintegration verbessert werden (vgl. Optionenbewertung „Energieumsätze“).

### Handlungsempfehlungen

Handlungsempfehlungen für eine Gestaltung regulatorischer und marktwirtschaftlicher Rahmenbedingungen, damit sich Flexibilisierungs- und Netzstabilisierungsmaßnahmen wirtschaftlich rentieren und genutzt werden können

- (27) Unterstützung der Umsetzung der Energiewende auf Bundesebene unter Sicherung wettbewerbsfähiger Energiepreise für die in Nordrhein-Westfalen im internationalen Wettbewerb stehenden Unternehmen der chemischen Industrie durch die Landesregierung und Landespolitik
- (28) Abschätzung der nicht für die Gestaltung der Energiewende benötigten Mengen an Überschussstrom und deren Anfallprofil als Grundlage für die Entwicklung künftiger chemierelevanter Potenziale, die zum Teil in dem Bericht der Enquetekommission beschrieben sind
- (29) Einsatz Nordrhein-Westfalens im Rahmen der aktuellen Neugestaltung eines Strommarktdesigns dafür, dass die in Nordrhein-Westfalen vorhandenen industriellen Flexibilisierungsmöglichkeiten wie Demand Side Management und Power to Chemicals diskriminierungsfrei und wirtschaftlich genutzt werden können.

**Handlungsempfehlungen für die technische Erschließung von DSM-Potenzialen in Nordrhein-Westfalen**

- (30) Zur Erschließung des vorhandenen und möglichen DSM-Potenzials in Nordrhein-Westfalen bedarf es
- einer fundierten Erfassung des tatsächlich vorhandenen industriellen DSM-Potenzials in Nordrhein-Westfalen
  - einer gezielten DSM-Beratung insbesondere von KMUs (z.B. im Rahmen des betrieblichen Energiemanagements)
- (31) Unterstützung der Entwicklung volatiler Fahrweise von Chlor-Alkali-Elektrolysen, die je nach Stromangebot (mit und ohne Sauerstoffverzehrkathode) Wasserstoff erzeugen können.

**Handlungsempfehlung für eine Stärkung der Elektrochemie als Schlüsseltechnologie für effiziente Produktionsverfahren und zur Entwicklung effizienter Energiespeicher**

- (32) Ausbau und Stärkung von Lehrstühlen für Elektrochemie an nordrhein-westfälischen Hochschulen (z.B. durch Ausbau einer (langfristig ausgelegten) zentralen Kompetenzstelle, Ausweitung von elektrochemischen Lehrinhalten in den Curricula der Chemie- und Verfahrenstechnik Studiengängen, etc.).

**Handlungsempfehlungen zu einer Weiterentwicklung notwendiger Energiespeichertechnologien, die eine für Nordrhein-Westfalen besondere Relevanz haben**

- (33) Verstärkung der wissenschaftlichen Ressourcen zur Erforschung chemischer Energiespeicher und zur Weiterentwicklung von Power to Gas-Technologien im Hinblick auf notwendige Effizienzsteigerungen und eine verbesserte Wirtschaftlichkeit (z.B. Weiterentwicklung durch die zentrale Kompetenzstelle)
- (34) Ermittlung von für die chemische Industrie geeigneter, also in räumlicher Nähe befindlicher, Abwärmepotenziale sowie Entwicklung neuer Geschäftsmodelle zur Nutzung dieser Abwärmepotenziale
- (35) Erprobung der Nutzungspfade verschiedener Energiespeicher und der flexiblen Fahrweise elektrochemischer Prozesse.

## e. Querschnittsthema: Stärkung Innovationsfähigkeit

Die Innovationsfähigkeit hat für die Stärkung des Industriestandorts Nordrhein-Westfalen essentielle Bedeutung, da hierdurch Wettbewerbsnachteile bei Energie-, Rohstoff-, Arbeits-, Umwelt- und Logistikkosten in gewissem Umfang kompensiert werden können (vgl. Einleitung Handlungsempfehlungen).

Umgekehrt ist die Sicherung der Produktionsstandorte in Nordrhein-Westfalen grundlegend für die Innovationsfähigkeit, weil gerade in der Chemie die räumliche Nähe zwischen Forschung und Entwicklung sowie Produktion zentrale Voraussetzung für die Entwicklung von Innovationen ist. Demonstrationsanlagen wiederum ermöglichen den Nachweis einer technologischen und wirtschaftlichen Machbarkeit neuer Prozesse und tragen damit wesentlich zum erfolgreichen Transfer von innovativen Ideen zur Marktreife bei. Der Betrieb von Demonstrationsanlagen in Nordrhein-Westfalen verhilft zur Implementierung neuer Verfahren in der hiesigen chemischen Industrie und sichert damit durch einen Technologievorsprung die Produktionsstandorte in Nordrhein-Westfalen (vgl. Gutachten „Innovationsleistungsfähigkeit der NRW-Chemie im Bereich Katalyse“).

Nordrhein-Westfalen verfügt über eine hohe Dichte der universitären sowie institutionellen Forschungslandschaft, die (traditionell) eng mit den Innovationsbereichen in der chemischen Industrie vernetzt ist. Zur Erschließung von Effizienzpotenzialen sind die Verbundstruktur innerhalb von Industriestandorten sowie die Zusammenarbeit entlang der Wertschöpfungskette wesentlich. Eine Ausrichtung von Innovationsnetzwerken über Sektoren und Wertschöpfungsketten hinweg bietet großes Potenzial für Innovationen (vgl. Optionenbewertungen „Energieumsätze“ und „Verfahren“ sowie Gutachten „Innovationsleistungsfähigkeit der NRW-Chemie im Bereich Katalyse“). Hochqualifizierte Arbeitskräfte bilden eine essentielle Grundlage für die Innovationsfähigkeit der Branche. Die chemische Industrie in Nordrhein-Westfalen profitiert aktuell von der hohen Qualität und fachlichen Breite der (universitären und nicht-universitären) Ausbildung in Nordrhein-Westfalen (vgl. Optionenbewertungen sowie Gutachten „Innovationsleistungsfähigkeit der NRW-Chemie im Bereich Katalyse“). Der Stellenwert einer qualifizierten beruflichen Aus- und Weiterbildung wird zum Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit zunehmen.

Die Stärkung der Innovationsfähigkeit in der nordrhein-westfälischen Chemie war Teilaspekt bei jedem der von der Enquetekommission behandelten Themen und insbesondere Gegenstand in den durchgeführten Anhörungen sowie Thema eines der Gutachten. Sie war jedoch nicht Gegenstand einer eigenständigen Untersuchung der Enquetekommission. Gleichwohl möchte die Enquetekommission die zahlreichen Hinweise der externen Sachverständigen aufgreifen und über einige Handlungsempfehlungen einen Prozess anstoßen, der diese aus Sicht der Kommission wichtigen Gedanken und Ansätze vertieft und konkretisiert.

### Handlungsempfehlungen

#### Handlungsempfehlungen zu wissenschaftlichen Netzwerken sowie Aus- und Weiterbildung

Die großen Zukunftsherausforderungen sind durch eine hohe Komplexität der damit verbundenen Fragestellungen gekennzeichnet, die sich nur durch eine gezielte Vernetzung der verschiedenen Akteure (Akademia, Industrie etc.) und unter Einbeziehung aller beteiligten Disziplinen lösen lassen. Um das vorhandene Innovationspotenzial auszuschöpfen, ist zusätzlich eine Vernetzung unterschiedlicher Industriebranchen notwendig. Diesen Umständen müssen zukünftige Modelle sowohl für die Zusammenarbeit in der Forschung, als auch in der Aus- und Weiterbildung Rechnung tragen. Diese Modelle sollten die an den nordrhein-westfälischen Hochschulen vorhandenen Kompetenzen in den oben genannten Themenfeldern unter Einbeziehung von Wissenschaftlern aus der Industrie

vernetzen, die für die nordrhein-westfälische Chemie (und Industrie) eine herausragende Bedeutung haben. Ähnliche Ansätze gilt es in der Aus- und Weiterbildung mit dem Ziel zu entwickeln, eine breite interdisziplinäre und qualitativ hochwertige Ausbildung sicherzustellen.

Die Kommission empfiehlt daher:

- (36) Fortsetzung des in der Enquetekommission begonnenen Dialogs unter dem Dach des NRW-Clusters Chemie mit Vertreterinnen und Vertretern der Fraktionen des Landtags. Hierdurch soll der Austausch zwischen Industrie, Forschung, Wissenschaft und Politik intensiviert werden, der auch die Zusammenarbeit im Bereich Ausbildung und Forschung (wie z.B. Fortsetzung der Best Practice-Beispiele wie SusChemSys und CLIB2021, Modelle für die Weiterbildung innerhalb der Industrie) weiterentwickeln kann
- (37) die Stärkung der bestehenden Landescluster und deren branchenübergreifenden Zusammenarbeit, um Synergien durch die Entwicklung marktgetriebener Projektideen zu heben.

#### **Handlungsempfehlungen zur Förderpolitik**

Exzellenz lässt sich nicht in der Breite, sondern nur in der Fokussierung auf eine übersichtliche Zahl von zukunftsweisenden Technologien erreichen. Es gilt Kompetenzen, insbesondere solche, die für die Entwicklung der identifizierten Zukunftstechnologien essentiell sind, aufzubauen und/oder systematisch auszubauen. Hierfür bedarf es der langfristigen (politischen) Unterstützung, da die Entwicklungszeit für zukunftsweisende Technologien bis zum Markteintritt 20-30 Jahren betragen. Um einen möglichst großen ökonomischen und gesellschaftlichen Nutzen durch den Einsatz von Fördermitteln zu erzielen, bedarf es einer

- (38) Identifikation von Entwicklungsfeldern, die für Nordrhein-Westfalen eine strategische Bedeutung haben (z.B. in Form einer Roadmap: Biotechnologie, Kohlechemie, Prozessintensivierung, Power to Gas-Technologien, Elektrochemie, (Wärme-)Energiespeicher, stoffliche CO<sub>2</sub>-Nutzung) und Integration dieser Entwicklungsfelder in die Leitmarktstrategie Nordrhein-Westfalen
- (39) Ausrichtung der Förderwettbewerbe innerhalb der Leitmarktstrategie Nordrhein-Westfalen in der Form, dass diese Förderschwerpunkte in den identifizierten Entwicklungsfeldern ermöglichen
- (40) Fortführung der Bemühungen den bürokratischen Aufwand bei NRW-Förderprojekten, insbesondere auch bei der Umsetzung der europäischen Förderinstrumenten, zu minimieren.

Die Sicherung und Stärkung der Forschungs- und Entwicklungsleistung der nordrhein-westfälischen Industrie und insbesondere der chemischen Industrie ist von zentraler Bedeutung für den Erhalt ihrer Wettbewerbsfähigkeit, für den Erhalt von Arbeitsplätzen und Wohlstand. Um den FuE-Einsatz der Industrie zu stärken und darüber die Innovationsfähigkeit der chemischen Industrie zu sichern, wird Folgendes vorgeschlagen

- (41) Einsatz der Landesregierung und Landespolitik auf Bundesebene für die Einführung einer steuerlichen Forschungsförderung.

Aktuell gelangen viele im Labor- und Technikumsmaßstab ausgereifte Technologien nicht zur Marktreife bzw. industriellen Anwendungen.

- (42) Förderung von Pilot- und Demonstrationsvorhaben (verstärkte Förderung nach TRL 5-7).

## f. Querschnittsthema: Dialog für Industrie- und Technologieakzeptanz

Eine Offenheit gegenüber neuen Technologien, innovativen Prozesse und Produkte sowie die Akzeptanz von Nordrhein-Westfalen als Industriestandort sind essentiell, damit auch zukünftig durch die chemische Industrie in Nordrhein-Westfalen neue Lösungen entwickelt werden können. Hier kommt dem Dialog zwischen allen Stakeholdern sowie der Bereitstellung transparenter Informationen eine Schlüsselrolle zu.

### Handlungsempfehlungen

#### Handlungsempfehlungen zum Dialog zwischen Politik, Industrie und Wissenschaft zur Weiterentwicklung der Ergebnisse der Enquetekommission

- (43) Fortführung des gemeinsamen Dialogs zwischen Politik (Landesregierung und Landtag), Industrie und Wissenschaft zur Weiterentwicklung des Industrie- und Chemiestandorts Nordrhein-Westfalen. Hierzu wird dem Landtag die Bildung einer Parlamentariergruppe Industrie-Nordrhein-Westfalen vorgeschlagen
- (44) Weiterentwicklung der Forschungs- und Industriestrategien zu einem Gesamtprojekt „Industriestandort Nordrhein-Westfalen 2030“.

#### Handlungsempfehlungen für einen verbesserten Stakeholder-Dialog zur Schaffung von Technologie- und Industrieakzeptanz

Die Umsetzung neuer Technologien in innovative Prozesse und Produkte sowie der Erhalt des Industriestandorts Nordrhein-Westfalen hängen letztlich von deren Akzeptanz in der Gesellschaft ab. Chancen und Risiken müssen daher ergebnisoffen und wissenschaftsbasiert anhand von Nachhaltigkeitskriterien abgewogen werden.

- (45) Intensivierung des fachlichen und gesellschaftlichen Dialogs unter Einbindung aller Stakeholder, idealerweise unter Leitung eines erfahrenen und fachkundigen Moderators
- (46) Stärkung des Themas LCA: wissenschaftlich fundierte Lebenszyklusanalysen schaffen eine vergleichbare Basis für die Nachhaltigkeitsbewertung von Produkten, Prozessen u.ä., sie stellen damit einen wichtigen Beitrag zur Transparenz dar. Dies ist insbesondere im Hinblick auf die öffentliche Debatte und zur Herstellung einer gesellschaftlichen Akzeptanz von essentieller Bedeutung
- (47) Stärkung und Wahrnehmung der Verantwortung von Politik, Industrie, Clustern/Netzwerken, Verbänden, Nichtregierungsorganisationen sowie Medien und Fachleuten für eine sachliche und verständliche Darstellung von Chancen und Risiken z.B. neuer Technologien
- (48) Einführung eines NRW-Innovationspreises für wegweisende chemische Erfindungen für nachhaltige Entwicklungen.

## **g. Querschnittsthema: Gesellschaftliche Herausforderungen – Qualifikation, demografische Entwicklung und gute Arbeitsverhältnisse**

Die chemische Industrie ist wie kaum ein anderer Wirtschaftsbereich davon abhängig, über ausreichende Fachkräfte in Produktion, Forschung und Entwicklung zu verfügen. Angesichts der demografischen Entwicklung in Deutschland und Nordrhein-Westfalen steht die Gewinnung von Fachkräften für die Chemie in Konkurrenz zu anderen Bereichen der Wirtschaft, der Dienstleistungsbranche, der Verwaltung und dem Ausland. Daher ist es wichtig, in die Qualifizierung und Fachkräftegewinnung zu investieren, sowohl seitens der Unternehmen als auch der Landes- und Bundespolitik.

Attraktive Arbeitsplätze, gute Rahmenbedingungen für sichere Beschäftigung sind der beste Weg, Fachkräftepotenzial zu sichern und die Probleme der demografischen Entwicklung zu lösen. Sie sorgen gleichzeitig für hohe gesellschaftliche Akzeptanz der Branche.

### **Handlungsempfehlungen**

#### **a) Demografische Entwicklung**

- (49) Stetige systematische Auswertung der demografischen Entwicklung in Nordrhein-Westfalen, um das Fachkräftepotenzial zu ermitteln
- (50) Ermittlung der Qualifikationsprofile des vorhandenen Fachkräftepotenzials und der zukünftig benötigten Qualifikationen auf Grund sich ändernder Anforderungen in der chemischen Industrie
- (51) Entwicklung und Umsetzung von Konzepten für die schulische Bildung, die duale (Facharbeiter-)Ausbildung, die technische und naturwissenschaftliche Hochschulbildung für die Anforderungen einer innovativen, ökologischen und wirtschaftlich erfolgreichen Chemieindustrie (und der gesamten Wirtschaft in Wertschöpfungsketten gedacht).
- (52) Schaffung der Voraussetzungen, dass ältere Beschäftigte lange leistungsfähig im Arbeitsleben bleiben, dabei ihre Erfahrungen und ihr Wissen an die jüngeren weitergeben und gesund in den Ruhestand gehen können.

#### **b) Qualifikation und Ausbildung**

- (53) Verbesserung der Berufsorientierung an weiterführenden Schulen, insbesondere mit Blick auf die Möglichkeiten einer dualen Berufsausbildung
- (54) Entwicklung und Umsetzung von Modellen zur Integration von „bildungsfernen“ Jugendlichen in eine reguläre Ausbildung (wie Start in den Beruf in der chemischen Industrie), um auch bei sinkendem Potenzial an Schulabgängern einer möglichst großen Zahl von Jugendlichen eine qualitativ hochwertige Ausbildung zu sichern
- (55) Förderung der akademischen Aus-, Fort- und Weiterbildung durch erleichterten Zugang zu Universitäten und Hochschulen (Hochschulzugang z.B. für Facharbeiter und Meister)
- (56) Verstärkte Zusammenarbeit von Industrieforschung und Hochschulen in gemeinsamen Forschungsprojekten – Studenten frühzeitig an Industrie heranführen
- (57) Stärkung der Ausbildung in den MINT-Fächern durch:

- Unterstützung der MINT-Initiativen in Bund und Ländern, Unterstützung für Jugend forscht mit einem Schwerpunkt auf chemienahen Forschungsthemen
- eine breitere MINT-Wissensvermittlung im Schulunterricht als Grundlage für ein besseres Verständnis auch von komplexeren Technologie-Fragestellungen
- Einleitung einer Qualitätsoffensive naturwissenschaftlicher Unterrichtsfächer zur Verbesserung des breiteren Verständnisses naturwissenschaftlicher und technologischer Grundlagen und Kompetenzen.

#### **c) Gesunde und gute Arbeitsverhältnisse fördern**

Gesunde und gute Arbeitsverhältnisse sind eine Voraussetzung für erfolgreiche industrielle Produktion, für Innovation und Fortschritt. Sie ist Voraussetzung für die Akzeptanz industrieller und insbesondere chemischer Produktion.

- (58) Unterstützen von Maßnahmen zur Verbesserung des Arbeits- und Gesundheitsschutzes in den Betrieben durch alle Beteiligten (Beschäftigte, Unternehmen, Krankenkassen, Rentenversicherungsträger, Berufsgenossenschaften usw.).

Die vorstehenden Handlungsempfehlungen können aus Sicht der Enquetekommission auch im Interesse der Wettbewerbsfähigkeit der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen einen wichtigen Beitrag dafür leisten, um ...

Handlungsfelder	Relevante Handlungsempfehlungen
... die Energiewende und die zunehmende Diversifizierung der Rohstoffbasis in der Chemie zu stärken,	(1)-(6), (8)-(10), (21)+(22), (24), (27)-(35)
... Energie und Rohstoffe effizienter zu nutzen,	(3), (5), (7)-(10), (12), (20)-(23), (34)
... Stoffkreisläufe stärker zu schließen,	(3), (5), (7), (9)+(10), (12), (14)-(17), (22)+(23), (46)
... chemische Wertschöpfungskette und Verbundstrukturen zu stärken,	(10), (16), (19)-(20), (21)-(24), (26), (27), (43)-(48)
... die Innovationsfähigkeit der chemischen Industrie weiter auszubauen durch	allgemein: (45)-(48), (49)-(58)
• Verbesserung der Innovationsprozesse	(36)-(42)
• Technologische Innovationen und	(5), (7)+(8), (12), (19)-(26), (31)-(35), (47)
• Innovative Produkte.	(11), (13), (15), (16), (18)

# Anhang

## Anhörungen

Die Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie hat folgende nicht-öffentliche Anhörungen durchgeführt:

- Anhörung zum Thema „Rohstoffe“ am 20. September 2013, nöEKPr 16/5;
- Anhörung zum Thema „Werkstoffe“ am 11. Oktober 2013, nöEKPr 16/6;
- Anhörung zum Thema „Elektrochemische Verfahren“ am 14. Februar 2014, nöEKPr 16/17 (2. Neudruck);
- Anhörung zum Thema „Energiespeicher“ am 14. März 2014, nöEKPr 16/19;
- Anhörung zum Thema „Intensivierte chemische Verfahren“ am 09. Mai 2014, nöEKPr 16/20;
- Anhörung zum Thema „Biotechnologische Verfahren“ am 23. Mai 2014, nöEKPr 16/22;
- Anhörung zum Thema „Verfahren der biomimetischen Chemie“ am 27. Juni 2014, nöEKPr 16/25.

## Gutachten

Die Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie hat folgende Gutachten in Auftrag gegeben:

- „Power to Gas/Energiespeicher“, vorgelegt durch Prof. Dr. Rüdiger Eichel und Prof. Dr. Walter Leitner vom Forschungszentrum Jülich und der RWTH Aachen;
- „Stoffliche Nutzung der Braunkohle, vorgelegt durch Prof. Dr.-Ing. Bernd Meyer von der Technischen Universität Bergakademie Freiberg;
- „Innovationsleistungsfähigkeit der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen“, vorgelegt von Dr. Christoph Sievering von der CleanTechNordrhein-Westfalen GmbH in Kooperation mit Prof. Dr. Walter Leitner von der RWTH Aachen;
- „Biomimetische Chemie“, vorgelegt von Prof. Dr. Christian Limberg von der Humboldt-Universität Berlin;
- „Kleinskalige Konti-Verfahren: „Milli/Meso“ Flow Chemistry/Mikroreaktionstechnik“, vorgelegt von Dr. Peter Poehlauer.

## Vorträge

Die Enquetekommission hat in ihren nicht-öffentlichen Sitzungen folgende Vorträge gehört:

- *Die chemische Industrie in Nordrhein-Westfalen – Stand und Ausblick*, Dr. Ernst Grigat am 13. Juni 2013;
- *Verfügbarkeiten und Potenziale fossiler Kohlenwasserstoffe und mineralischer Rohstoffe für die chemische Industrie*, Dr. Volker Steinbach am 18. Juli 2013;
- *Präsentation der Studie „Die deutsche chemische Industrie 2030“*, Kai Gramke und Dr. Henrik Meincke am 30. Oktober 2013;
- *Nachhaltigkeitskriterien für die chemische Industrie*, Rainer Hoffmann sowie Prof. Dr. Klaus Kümmerner am 22. November 2013;
- *REACH: Analyse der Gestaltung des Regulierungsinstrumentes und Einbindung in die Gesamtstrategie*, Klaus Berend am 16. Januar 2014 (Brüsselreise);
- *Innovative Verfahren in der Chemieproduktion*, Søren Bøwadt am 16. Januar 2014 (Brüsselreise);
- *Wirtschafts- und Industriepolitik*, Dr. Carsten Pillath am 17. Januar 2014 (Brüsselreise);

- *Forschungspolitik*, Dr. Wolfgang Burtscher am 17. Januar 2014 (Brüsselreise);
- *Center for Next Generation Processes (NPG<sup>2</sup>) – Neue Verfahrenskonzepte am Beispiel der Bioraffinerie*, Prof. Dr. Matthias Wessling am 06. Juni 2014;
- *Stoffliche Nutzung der Braunkohle*, Dr. Reinhold Elsen am 26. September 2014;
- *Power to Gas/Energiespeicher*, Dr. Ulrich Bünger am 28. November 2014;
- *Zukünftige Förder- und Forschungslandschaft sowie aktuelle und zukünftige Fördermöglichkeiten und Förderpraxis zugunsten der hiesigen chemischen Industrie*, Minister Johannes Remmel sowie Dr. Bernhard Roth-Harting und Dr. Walther Pelzer am 12. Dezember 2014.

# Literaturverzeichnis

Rohstoffe mit Billionen-Wert in Afghanistan entdeckt. In: *Die WELT* (14.06.2010).

UN Prognose: Die Erde hat nun 7,2 Milliarden Bewohner. In: *Die WELT* (27.12.2013).

Abdi, Fatwa F.; Han, Lihao; Smets, Arno H. M et al. (2013): Efficient solar water splitting by enhanced charge separation in a bismuth vanadate-silicon tandem photoelectrode. In: *Nature Communications*. 4, 2195.

Acid, Sebacic; Pankaj, Dutia (2007): A Techno-Commercial Profile. Online am 24.03.2014 unter: [http://www.chemicalweekly.com/Profiles/sebacic\\_acid.pdf](http://www.chemicalweekly.com/Profiles/sebacic_acid.pdf).

AG Energiebilanzen e. V. (AGEB); Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW); Deutscher Braunkohlen-Industrie-Verein e.V. (DEBRIV) : Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland 1990 – 2013. Online am 24.02.2015 unter: <http://www.ag-energiebilanzen.de/>.

Agentur für Erneuerbare Energien (2009): Erneuerbare Wärme – Klimafreundlich, wirtschaftlich, technisch ausgereift. In: *Renews Spezial*, 18.

Agentur für Erneuerbare Energien (2012): Strom speichern. In: *Renews Spezial*, 57,

Agentur für Erneuerbare Energien; BEE (2009): Entwicklung des Wärmebedarfs in Deutschland unter: [http://www.bee-ev.de/\\_medien/energieversorgung/waermeversorgung2020/EE\\_02\\_Entwicklung\\_Waermebedarf\\_2000-2020\\_web.jpg](http://www.bee-ev.de/_medien/energieversorgung/waermeversorgung2020/EE_02_Entwicklung_Waermebedarf_2000-2020_web.jpg).

Agerer, Markus : Kunststoffe – Einführung. Online am 19.12.2013 unter: <http://www.maschinenbau-wissen.de/skript/werkstofftechnik/kunststoffe/80-kunststoffe>.

Agerer, Markus: Verbundwerkstoffe – Grundlagen. Online am 19.12.2013 unter: <http://www.maschinenbau-wissen.de/skript/werkstofftechnik/verbundwerkstoffe/86-grundlagen-verbundwerkstoffe>.

Agora Energiewende (2014): Studie – Stromspeicher in der Energiewende Untersuchung zum Bedarf an neuen Stromspeichern in Deutschland für den Erzeugungsausgleich, Systemdienstleistungen und im Verteilnetz. unter: [http://www.agora-energiewende.de/fileadmin/downloads/publikationen/Studien/Speicher\\_in\\_der\\_Energiewende/Agora\\_Speicherstudie\\_Web.pdf](http://www.agora-energiewende.de/fileadmin/downloads/publikationen/Studien/Speicher_in_der_Energiewende/Agora_Speicherstudie_Web.pdf). Online am 22.09.2014.

Ahrens, Ralph (2011): Chlorherstellung mit Quecksilber vor dem Aus. Online am 17.02.2015 unter: <http://www.ingenieur.de/Themen/Klima-Umwelt/Chlorherstellung-Quecksilber-Aus>.

ALBA Group (2013): Koalitionsvertrag: Kein großer Wurf für Recyclingbranche. Online am 05.03.2014 unter: [http://www.recyclingnews.info/Politik\\_und\\_Recht/Recyclingbranche\\_im\\_Koalitionsvertrag](http://www.recyclingnews.info/Politik_und_Recht/Recyclingbranche_im_Koalitionsvertrag).

Alstrum-Acevedo, James H.; Brennaman, M. Kyle; Meyer, Thomas J. (2005): Chemical Approaches to Artificial Photosynthesis. 2. In: *Inorganic Chemistry*. 44, 20,

Amii, Hideki; Nagaki, Aiichiro; Yoshida, Jun-ichi (2013): Flow microreactor synthesis in organo-fluorine chemistry. In: *Beilstein Journal of Organic Chemistry*. 9.

AMSilk GmbH (März 2014) Presseberichte der Fa. AMSilk unter: <http://www.amsilk.com/ueberuns/presseberichte.html>.

Anastas, Paul T.; Kirchhoff, Mary M. (2002): Origins, Current Status, and Future Challenges of Green Chemistry †. In: *Accounts of Chemical Research*. 35, 9.

Andruleit, Harald et al. (2009): Energierohstoffe 2009: Reserven, Ressourcen, Verfügbarkeit. Online am 04.02.2015.

Arbeitskreis Nachhaltigkeit AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. (2010): Nachhaltigkeit von Faserverbundkunststoffen – Betrachtung anhand ausgewählter Anwendungsbeispiele. unter: [http://www.avk-tv.de/files/20101230\\_20101125\\_nachhaltigkeit\\_von\\_faserverbundwerkstoffen\\_101125\\_21.pdf](http://www.avk-tv.de/files/20101230_20101125_nachhaltigkeit_von_faserverbundwerkstoffen_101125_21.pdf). Online am 09.01.2014.

Auroux, Pierre-Alain; Iossifidis, Dimitri; Reyes, Darwin R.; Manz, Andreas (2002): Micro Total Analysis Systems. 2. Analytical Standard Operations and Applications. In: *Analytical Chemistry*. 74, 12.

Babies, Hans Georg; Bahr, Andreas; Benitz, Uwe et al. (2009): Kurzstudie – Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen 2010. unter: [http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Downloads/Energiestudie-Kurzstudie2010.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Downloads/Energiestudie-Kurzstudie2010.pdf?__blob=publicationFile). Online am 09.02.2015.

Bachema AG (2010): Elektronikschrott und Kehrrechtsschlacke – Nicht Selten – und dennoch rar. In: *Chemische Rundschau*. 2010, 12.

Baerns, M.; Hofmann, H.; Renken, A.; Falbe, J.; Fetting, F.; Keim, W.; Onken, U. (1999): Chemische Reaktionstechnik: Lehrbuch der Technischen Chemie. ISBN 978-3-527308 41-5.

Bai, Jim; Aizhu, Chen (2011): China Shenhua coal-to-liquids project profitable -exec. Online am 27.01.2015 unter: <http://www.reuters.com/article/2011/09/08/shenhua-oil-coal-idUSL3E7K732020110908>.

Bakken, Jon Arne et al. (1998): Thermal plasma process development in Norway. In: *Pure & Appl. Chem*. 70, 6.

Ball, Philip (2007): Natural order. In: *Nature*, 6.

Bardt, Hubertus (2008): Sichere Energie- und Rohstoffversorgung. ISBN 978-3-602241-33-0.

Barilla Center for Food & Nutrition; Nierenberg, D.; Rubinelli, L.; Worldwatch Institute (2012): Eating Planet 2012: Nutrition Today. ISBN 978-8-866270-29-4.

Bäroth, Timo; Wendenburg, Sonja (2013): Mit Rekordgeschwindigkeit zum menschlichen Genom unter: <http://archiv.aktuelle-wochenschau.de/2013/w31/woche31.html>.

BASF : Kunststoffverarbeitung von Styrolpolymeren und technischen Thermoplasten im BASF PlasticsPortal unter: <http://www.plasticsportal.net/wa/kunststoffe/kunststoffverarbeitung.html>.

BASF (2012): ecovio® – Bioabbaubarer Kunststoff auf Basis nachwachsender Rohstoffe. unter: [http://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~de\\_DE/function/conversions:/publish/common/upload/biodegradable\\_plastics/Ecovio\\_Brochure.pdf](http://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~de_DE/function/conversions:/publish/common/upload/biodegradable_plastics/Ecovio_Brochure.pdf). Online am 07.01.2014.

BASF (2012): The certified compostable polymer ecoflex®. unter: [http://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~en\\_GB/function/conversions:/publish/common/upload/biodegradable\\_plastics/Ecoflex\\_Brochure.pdf](http://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~en_GB/function/conversions:/publish/common/upload/biodegradable_plastics/Ecoflex_Brochure.pdf). Online am 07.01.2014.

BASF; Hamprecht, Jens (2013): Stellungnahme zur Anhörung „Werkstoffe“ der Enquete Kommission zur Zukunft der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen. Drucksache, 16/1114 unter: <http://www.landtag.Nordrhein-Westfalen.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMST16-1114.pdf>.

Baxendale, Ian R.; Brocken, Laurens; Mallia, Carl J. (2013): Flow chemistry approaches directed at improving chemical synthesis. In: *Green Processing and Synthesis*. 2, 3.

Bayer MaterialScience AG (2005): Vom Erdöl zu Polymeren. Online am 10.01.2014.

Bayer MaterialScience AG; Kintrup, Jürgen; Weber, Rainer (2014): Stellungnahme zur Anhörung „Elektrochemische Verfahren“ der Enquete Kommission zur Zukunft der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen. Drucksache, 16/1378 unter: <http://www.landtag.Nordrhein-Westfalen.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMST16-1378.pdf>. Online am 24.02.2015.

Bayer Technology Services GmbH; Peters, Martina (2013): Stellungnahme zur Anhörung „Rohstoffsituation – Schwerpunkt Rohstoffeffizienz und Rohstoffsubstitution“ der Enquete Kommission zur Zukunft der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen. Drucksache, 16/976 unter: <http://www.landtag.Nordrhein-Westfalen.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMST16-976.pdf>.

Bazzanella, A. (2008): Prozessintensivierung – Eine Standortbestimmung. unter: [http://www.dechema.de/dechema\\_media/Roadmap+PI+FS+Stand+MV+2008.pdf](http://www.dechema.de/dechema_media/Roadmap+PI+FS+Stand+MV+2008.pdf). Online am 07.07.2014.

Beck, F.; Guthke, H. (1969): Entwicklung neuer Zellen für elektro-organische Synthesen. In: *Chemie Ingenieur Technik*. 41, 17.

Beller, Matthias; Centi, Gabriele (2009): Catalysis and Sustainable Development: The Marriage for Innovation. In: *ChemSusChem*. 2, 6.

Bensaid, Samir; Centi, Gabriele; Garrone, Edoardo; Perathoner, Siglinda; Saracco, Guido (2012): Towards Artificial Leaves for Solar Hydrogen and Fuels from Carbon Dioxide. In: *ChemSusChem*. 5, 3.

Berglar, Kai; Al Barazi, Siyamend et al. (2011): Rohstoffversorgung für die deutsche Industrie – Anteil der Top 5 Länder am Weltverbrauch 2005. unter: <http://www.saarland.ihk.de/ihk-saarland/Integrale?SID=CRAWLER&MODULE=Frontend.Media&ACTION=ViewMediaObject&Media.PK=3756&Media.Object.ObjectType=full>. Online am 05.12.2014.

Bertau, Martin; et al. (2013): Industrielle Anorganische Chemie. ISBN 3-527-64956-5.

Bidder, Benjamin Umstrittene Erweiterungspläne – Ostsee-Pipeline durch Naturschutzgebiet geplant. In: *SPIEGELONLINE WISSENSCHAFT* (10.06.2013).

Bieringer, T.; Buchholz, S.; Kockmann, N. (2013): Future Production Concepts in the Chemical Industry: Modular – Small-Scale – Continuous. In: *Chemical Engineering & Technology*. 36, 6,

Bild der Wissenschaft online (2002): Künstliche Spinnenseide hergestellt unter: [http://www.wissenschaft.de/archiv/-/journal\\_content/56/12054/1178816/K%C3%BCnstliche-Spinnenseide-hergestellt/](http://www.wissenschaft.de/archiv/-/journal_content/56/12054/1178816/K%C3%BCnstliche-Spinnenseide-hergestellt/).

Bild der Wissenschaft online (2014): Nerven am seidenen Faden unter: [http://www.bild-der-wissenschaft.de/bdw/bdwlive/heftarchiv/index2.php/function.include?object\\_id=33592271](http://www.bild-der-wissenschaft.de/bdw/bdwlive/heftarchiv/index2.php/function.include?object_id=33592271).

BIO.Nordrhein-Westfalen : Das Cluster BIO.Nordrhein-Westfalen. Online am 20.10.2014 unter: <http://www.bio.Nordrhein-Westfalen.de/>.

BIOACOM AG; biotechnologie.de : Was ist Biotechnologie? Online am 01.07.2014 unter: <https://www.biotechnologie.de/BIO/Navigation/DE/Hintergrund/basiswissen.html>.

BIOCOM AG; biotechnologie.de (2013): Die deutsche Biotechnologie-Branche 2013- Daten & Fakten. unter: <http://www.biotechnologie.de/BIO/Redaktion/PDF/de/umfrage/2013-umfrage,property=pdf,bereich=bio,sprache=de,rwb=true.pdf>. Online am 02.07.2014.

BIOCOM AG; biotechnologie.de (2014): Die deutsche Biotechnologie-Branche 2014- Daten & Fakten. unter: <http://www.biotechnologie.de/BIO/Redaktion/PDF/de/umfrage/2014-umfrage,property=pdf,bereich=bio,sprache=de,rwb=true.pdf>. Online am 15.05.2014.

BIOCOM AG; biotechnologie.de (2013): Marktstudie: Biopolymere weltweit auf Wachstumskurs. Online am 20.12.2013 unter: <http://www.biotechnologie.de/BIO/Navigation/DE/Hintergrund/studien-statistiken,did=162988.html>.

Bioeconomy Science Center : Strategische Entwicklung einer Forschungsinfrastruktur zur Bioökonomie in Nordrhein-Westfalen. Online am 08.09.2014 unter: [http://www.biosc.de/strategieprojekt\\_biosc](http://www.biosc.de/strategieprojekt_biosc).

biokunststoffe.de; greentech GmbH & Cie. KG : biokunststoffe/Beispiele/ Eigenschaften/ Anwendungsgebiete Biopolymere. Online am 20.12.2013 unter: <http://www.bio-plastics.org/en/information--knowledge-a-market-know-how/bioplastic-types/starch-blends-a-derivates>.

bioSicherheit.de (2012): Pflanzenzüchtung und Gentechnik für bessere Stickstoffnutzung: Weniger Dünger, mehr Ertrag unter: <http://www.biosicherheit.de/fokus/1413.stickstoffnutzung-gentechnik.html>.

Biotechnology Industry Organization (BIO) (2010): Biobased Chemicals and Products – A new driver of U.S. economic development and green jobs. unter: [http://www.bio.org/sites/default/files/20100310\\_biobased\\_chemicals.pdf](http://www.bio.org/sites/default/files/20100310_biobased_chemicals.pdf). Online am 02.03.2015.

Biowert Industrie GmbH : BIEWERT – bio based industry. Online am 23.07.2014 unter: <http://www.biowert.de/company>.

Bischoff, Roland (2014): Gemüse im Tank – Bioabfälle und Holzspäne ersetzen Erdöl. In: *Bild der Wissenschaft Plus*, 1.

- Blum, Andreas : Ressource Erdöl: eine kurze Begriffserklärung. Online am 24.2.2014 unter: <http://raize.ch/Geologie/erdoel/oil-begriffe.html>.
- Bode, Sven; Groscurth, Helmuth-M. (2014): Die künftigen Kosten der Stromerzeugung. unter: [http://www.arrhenius.de/uploads/media/arrhenius\\_KostenStromerzeugung\\_042014.pdf](http://www.arrhenius.de/uploads/media/arrhenius_KostenStromerzeugung_042014.pdf). Online am 05.01.2015.
- Bonten, Christian; Rieger Bernhard : Biokunststoffe- DIN EN 13432. unter: [http://www.k-online.de/cipp/md\\_k/lib/all/lob/return\\_download,ticket,g\\_u\\_e\\_s\\_t/bid,501/no\\_mime\\_type,0/~k\\_bioplastics.pdf](http://www.k-online.de/cipp/md_k/lib/all/lob/return_download,ticket,g_u_e_s_t/bid,501/no_mime_type,0/~k_bioplastics.pdf). Online am 07.01.2014.
- Bornscheuer, Uwe; Buchholz, Klaus; Seibel, Jürgen (2014): Enzymatic Degradation of (Ligno)cellulose. In: *Angewandte Chemie International Edition*. 53, 41.
- Bozell, Joseph J.; Petersen, Gene R. (2010): Technology development for the production of biobased products from biorefinery carbohydrates—the US Department of Energy’s “Top 10” revisited. In: *Green Chemistry*. 12, 4.
- Brachold, Harald; Peuckert, Cornelius; Regner, Hans (1993): Lichtbogen-Plasma-Reaktor für die Herstellung von Acetylen aus Kohle. In: *Chemie Ingenieur Technik*. 65, 3.
- Bramsiepe, C.; Schembecker, G. (2012): Modular process design advantage in terms of planning process that enables laboratory to production with small effort. In: *Chemie Ingenieur Technik*. 84, 5.
- Braungart, Michael; McDonough, William (2008): Einfach intelligent produzieren. ISBN 978-3-833301-83-4.
- Bringezu, Stefan; O’Brien, Meghan; Schütz, Helmut (2012): Beyond biofuels: Assessing global land use for domestic consumption of biomass. In: *Land Use Policy*. 29, 1.
- Brodhagen, Andreas; Grünewald, Marcus; Kleiner, Matthias; Lier, Stefan (2012): Erhöhung der Wirtschaftlichkeit durch beschleunigte Produkt- und Prozessentwicklung mit Hilfe modularer und skalierbarer Apparate. In: *Chemie Ingenieur Technik*. 84, 5.
- Brunner, Christoph; Muster, Bettina; Schnitzer, Hans (2011): Prozessintensivierung. Online am 07.07.2014 unter: [http://www.aee.at/aee/index.php?option=com\\_content&view=article&id=32&Itemid=113#autor\\_1](http://www.aee.at/aee/index.php?option=com_content&view=article&id=32&Itemid=113#autor_1).
- Budzinski, Adalbert Kunststoffe aus CO<sub>2</sub> – wird die Traumreaktion bald Realität (2011). In: *Chemische Rundschau – Chemie Plus*, S. 26–28.
- Bühler, Bruno; Hollmann, Frank; Junker, Björn et al. (2014): Diskussionspapier: Biotechnologie der Schlüssel zur Bioökonomie. unter: [http://biotech.dechema.de/biotech\\_media/ZFpapier-p-1735.pdf](http://biotech.dechema.de/biotech_media/ZFpapier-p-1735.pdf). Online am 02.07.2014.
- Bulan, Andreas; Jörissen, Jakob; et al. (2009): CO<sub>2</sub>-Reduktion bei der Herstellung chemischer Grundstoffe – Einsatz von Sauerstoffverzehrkatoden bei der Chlorherstellung. Klimaschutz und Anpassung an die Klimafolgen.

Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) (2014): Drittlandskohlepreis. Online am 02.03.2015 unter: <http://www.bafa.de/bafa/de/energie/steinkohle/drittlandskohlepreis/index.html>.

Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BMWi) (2014): Aufkommen und Export von Erdgas- Entwicklung der Grenzübergangspreise ab 1991. unter: [http://www.bafa.de/bafa/de/energie/erdgas/ausgewahlte\\_statistiken/egasmon.pdf](http://www.bafa.de/bafa/de/energie/erdgas/ausgewahlte_statistiken/egasmon.pdf). Online am 10.12.2014.

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2013): Deutschland – Rohstoffsituation 2012. unter: [http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min\\_rohstoffe/Downloads/Rohsit-2012.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=11](http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/Rohsit-2012.pdf?__blob=publicationFile&v=11). Online am 24.02.2015.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2010): Megastädte – die Welt von morgen nachhaltig gestalten. unter: [http://future-megacities.org/fileadmin/documents/konferenzen/Megacities\\_in\\_Balance\\_2010/Megacities\\_Shaping\\_of\\_a\\_sustainable\\_future.pdf](http://future-megacities.org/fileadmin/documents/konferenzen/Megacities_in_Balance_2010/Megacities_Shaping_of_a_sustainable_future.pdf).

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2010): Nationale Forschungsstrategie Bio-Ökonomie 2030 – Unser Weg zu einer bio-basierten Wirtschaft. unter: <http://www.bmbf.de/pub/biooekonomie.pdf>. Online am 01.07.2014.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2011 – 2015): Richtlinien zur Förderung im Rahmen der „Innovationsinitiative industrielle Biotechnologie“. Online am 07.10.2014 unter: <http://www.bmbf.de/de/16331.php>.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2012): Rohstoffquelle Handy. Online am 09.01.2014 unter: [http://www.die-rohstoff-expedition.de/fileadmin/handy.wissenschaftsjahr-2012/content\\_de/Pressebereich/Download/WJ2012\\_Rohstoffquelle\\_Handy.pdf](http://www.die-rohstoff-expedition.de/fileadmin/handy.wissenschaftsjahr-2012/content_de/Pressebereich/Download/WJ2012_Rohstoffquelle_Handy.pdf).

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2012): Weiße Biotechnologie – Chancen für eine bio-basierte Wirtschaft. unter: [http://www.bmbf.de/pub/weisse\\_biotechnologie.pdf](http://www.bmbf.de/pub/weisse_biotechnologie.pdf). Online am 02.07.2014.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2012): Wirtschaftsstrategische Rohstoffe für den Hightech-Standort Deutschland. unter: [http://www.fona.de/mediathek/pdf/Wirtschaftsstrategische\\_Rohstoffe\\_barrierefrei\\_neu.pdf](http://www.fona.de/mediathek/pdf/Wirtschaftsstrategische_Rohstoffe_barrierefrei_neu.pdf). Online am 24.03.2014.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2013): Herstellung von Kraftstoffen aus CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O. Online am 15.04.2014 unter: <http://www.sunfirefuel.com/>.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2012): Kartoffelernte 2013 – Vorläufige Daten zu Anbauflächen, Hektarerträgen und Erntemengen unter: [http://www.bmel.de/Shared-Docs/Downloads/Landwirtschaft/Markt-Statistik/Kartoffelernte2013.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmel.de/Shared-Docs/Downloads/Landwirtschaft/Markt-Statistik/Kartoffelernte2013.pdf?__blob=publicationFile).

Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) (2011): Deutscher Außenhandel mit Agrar- und Ernährungsgütern 2010- Daten und Fakten. Online am 11.3.2014.

Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) (2013): Besondere Ernte- und Qualitätsermittlung (BEE) 2012. Online am 12.03.2014 unter: <http://www.bmelv-statistik.de/de/fachstatistiken/besondere-ernteermittlung/>.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2009): Erdgasfahrzeuge – eine saubere Alternative unter: <http://www.bmub.bund.de/themen/luft-laerm-verkehr/verkehr/foerderprojekte/erdgasfahrzeuge/erdgasfahrzeuge-im-aufwind/>.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2011): Hintergrundinformationen zum Ausbau der Erneuerbaren Energien in Deutschland bis 2020. unter: [http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/hintergrund\\_ausbau\\_ee\\_bf.pdf](http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/hintergrund_ausbau_ee_bf.pdf). Online am 09.01.2014.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU); Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (BDI) (2010): Produktbezogene Klimaschutzstrategien – Product Carbon Footprint verstehen und nutzen. unter: [http://www.bdi.eu/download\\_content/PCf-leitfaden\\_100810\\_online.pdf](http://www.bdi.eu/download_content/PCf-leitfaden_100810_online.pdf). Online am 09.12.2014.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2014): Kennziffern des Energieverbrauchs – Deutschland. Online am 03.02.2015 unter: <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten-und-analysen/Energiedaten/energiegewinnung-energieverbrauch.html>.

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (2006): Kurzbericht – Verfügbarkeit und Versorgung mit Energierohstoffen. Online am 06.02.2014.

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (2010): Energie in Deutschland – Trends und Hintergründe zur Energieversorgung. unter: <http://www.uni-bielefeld.de/chemie/arbeitsbereiche/pc2/download/energie-in-deutschland.pdf>. Online am 15.04.2014.

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (2012): Energiestatistiken. unter: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/energiestatistiken-grafiken>. Online am 06.02.2014.

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi); Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU); Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2011): Regierungsprogramm Elektromobilität. unter: [http://www.bmbf.de/pubRD/programm\\_elektromobilitaet.pdf](http://www.bmbf.de/pubRD/programm_elektromobilitaet.pdf). Online am 15.4.2014.

Bundesverband Braunkohle : Anteil der Braunkohle am Primärenergieverbrauch in Deutschland. Online am 23.02.2015 unter: <http://www.braunkohle.de/128-0-Anteil-der-Braunkohle-am-Primae-nergieverbrauch-in-Deutschland.html>.

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW) : Energiedaten unter: <https://www.bdew.de/internet.nsf/id/B7A2B3B1AA32A3E8C125783700644E07>.

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW) (2013): Erneuerbare Energien und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken 2013. unter: [https://www.bdew.de/internet.nsf/id/17DF3FA36BF264EBC1257B0A003EE8B8/\\$file/Energieinfo\\_EE-und-das-EEG-Januar-2013.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/17DF3FA36BF264EBC1257B0A003EE8B8/$file/Energieinfo_EE-und-das-EEG-Januar-2013.pdf). Online am 09.01.2014.

Bundesverband WindEnergie e.V. (01.11.2011) Abschaltung von Windenergieanlagen um bis zu 69 Prozent gestiegen unter: <https://www.wind-energie.de/presse/pressemitteilungen/2011/abschaltung-von-windenergieanlagen-um-bis-zu-69-prozent-gestiegen>.

Burmeister, Klaus (2012): Wertschöpfungsperspektiven für die Zukunft: Megatrends und nachhaltige Zukunftsmärkte. Online am 10.12.2014 unter: [http://www.forschungsnetzwerk.at/downloadpub/2012MT\\_und\\_ZM\\_komp.pdf](http://www.forschungsnetzwerk.at/downloadpub/2012MT_und_ZM_komp.pdf).

Buttermann, Hans Georg; Freund, Florian; Hillebrand, Elmar (2010): Bedeutung der rheinischen Braunkohle – sektorale und regionale Beschäftigungs- und Produktionseffekte. unter: [http://www.eefa.de/images/veroeffentl/Endbericht-RWE\\_Regiokohle\\_Final\\_05-11-2010-1.pdf](http://www.eefa.de/images/veroeffentl/Endbericht-RWE_Regiokohle_Final_05-11-2010-1.pdf). Online am 10.12.2014.

Büttner, Roman; Stockburger, Christoph (2012): Brennstoffzellenautos: Die Wasserstoff-Offensive des Peter Ramsauer. Online am 13.08.2014 unter: <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/brennstoffzelle-der-bessere-kraftstoff-fuer-elektroautos-a-835997.html>.

C. Lindner Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH (2012): Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2011 – Kurzfassung. unter: [http://www.plasticseurope.org/documents/document/20120906171002-consultic\\_studie\\_2011.pdf](http://www.plasticseurope.org/documents/document/20120906171002-consultic_studie_2011.pdf). Online am 07.01.2014.

Capgemini Consulting; Ministerium für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen (MIWF) (2010): Roadmap zur Errichtung einer Knowledge-Based Bio-Economy – Nordrhein-Westfalen auf dem Weg in die Umsetzung. unter: <http://www.wissenschaft.Nordrhein-Westfalen.de/fileadmin/Medien/Dokumente/Forschung/Fortschritt/Biooekonomie-Studie.pdf>. Online am 01.07.2014.

Carus, Michael; Dammer, Lara (2013): Food or non-food: Which agricultural feedstocks are best for industrial uses? unter: <http://bio-based.eu/download/?did=882&file=0>. Online am 05.03.2014.

Carus, Michael et al. (2014): Building tomorrow's biorefineries. unter: <http://www.biocore-europe.org>. Online am 21.05.2014.

Carus, Michael et al. (2014): Ökologische Innovationspolitik – Mehr Ressourceneffizienz und Klimaschutz durch nachhaltige stoffliche Nutzungen von Biomasse., ISSN 1862-4804 unter: [http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte\\_01\\_2014\\_druckfassung\\_uba\\_stofflich\\_abschlussbericht\\_lang\\_20\\_2\\_2014\\_2.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_01_2014_druckfassung_uba_stofflich_abschlussbericht_lang_20_2_2014_2.pdf). Online am 08.12.2014.

Castelligasse (2014): Antimon Rohstoffmärkte. Online am 04.02.2014 unter: <http://www.castelligasse.at/Politik/Rohstoffmaerkte/rohstoffe.htm>.

Centi, Gabriele; van Santen, Rutger A. (2008): Catalysis for Renewables: From Feedstock to Energy Production. ISBN 978-3-527-62112-5.

CHEManager International (2012): Competitiveness Trends in the European Chemicals Industry – European Market Share unter: <http://www.chemanager-online.com/en/news-opinions/graphics/competitiveness-trends-european-chemicals-industry-0>.

ChemCoast (12.08.2013) Gemeinsames Projekt von Politik und Unternehmen im Norden bringt zukunftsweisende Ergebnisse. Online am 15.04.2014 unter: <http://www.chemcoast.de/news/gemeinsames-projekt-von-politik-und-unternehmen-im-norden-bringt-zukunftsweisende-ergebnisse>.

Chemical Online (2008): World Ethylene Market To Cross 160 Million Tons By 2015, According To New Report By Global Industry Analysts. Online am 15.04.2014 unter: <http://www.chemicalonline.com/doc/world-ethylene-market-to-cross-160-million-0001?VNETCOOKIE=NO>.

CHEMIE.DE Information Service GmbH : Wasserstoffherstellung. Online am 12.01.2015 unter: <http://www.chemie.de/lexikon/Wasserstoffherstellung.html>.

CHEMIE.DE Information Service GmbH (2012): Bayer modernisiert Chlor-Produktion in Krefeld-Uerdingen unter: <http://www.chemie.de/news/138193/bayer-modernisiert-chlor-produktion-in-krefeld-uerdingen.html>.

Chemtrix BV Headquarters : Flow Chemistry Applications. Online am 09.10.2014 unter: <http://www.chemtrix.com/applications>.

Chemtrix BV Headquarters : Flow Chemistry Downloads. Online am 09.10.2014 unter: <http://www.chemtrix.com/downloads>.

Chen, Hsin Liang; Lee, How Ming et al. (2008): Review of plasma catalysis on hydrocarbon reforming for hydrogen production—Interaction, integration, and prospects. In: *Applied Catalysis B: Environmental*. 85, 1-2.

Clariant SE (20.07.2012) Clariant startet Biokraftstoff der Zukunft. Online am 23.07.2014 unter: <http://newsroom.clariant.com/de/clariant-launches-biofuel-of-the-future/>.

CLIB2012 – Cluster Industrielle Biotechnologie e.V. (07.04.2014) CLIB2021 und FISCH unterzeichnen LOI zur strategischen Zusammenarbeit / BIG-C Konzept vorgestellt. Online am 25.09.2014 unter: <http://www.clib2021.de/news/news-clib2021?id=222>.

CLIB2021 – Cluster Industrielle Biotechnologie e.V. (2013/2014): CLIB2021 – Biotech. unter: <http://www.clib2021.de>. Online am 02.07.2014.

Clustersekretariat des Landes Nordrhein-Westfalen : Neue Werkstoffe – ExzellenzNordrhein-Westfalen. Online am 19.02.2014 unter: <http://www.exzellenz.Nordrhein-Westfalen.de/leitmaerkte/neue-werkstoffe/>.

Cohen, Yann; Karev, Adi; South, Jeremy; Tuo, Lavi (2012): China Coal to olefin (CTO/MTO) – Exploring for the new El Dorado. *Chemical Quarterly*, 2012.Q4.

Consultic Marketing & Industrierberatung (2012): Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland. unter: [http://www.plasticseurope.org/documents/document/20120906171002-consultic\\_studie\\_2011.pdf](http://www.plasticseurope.org/documents/document/20120906171002-consultic_studie_2011.pdf). Online am 07.01.2014.

COPLARE Coastal Plastics Recycling (2011): Kunststoff-Kompendium. unter: <http://www.coplare.de/coplare/weiterf%C3%BChrende-informationen/>. Online am 07.01.2014.

CORDENKA GmbH (2013): Fahren auf Rayon. unter: [http://www.cordenka.com/pdf/CORDENKA\\_fahren\\_auf\\_rayon.pdf](http://www.cordenka.com/pdf/CORDENKA_fahren_auf_rayon.pdf). Online am 20.12.2013.

Corning Incorporated (2014): Corning Micro-Reaction Technology. unter: [http://www.corning.com/docs/corporate/discovery\\_center/emerging\\_technologies/technical\\_library/Microreactor\\_brochure.pdf](http://www.corning.com/docs/corporate/discovery_center/emerging_technologies/technical_library/Microreactor_brochure.pdf). Online am 09.10.2014.

Corning Incorporated (2014): Corning Microreactor technology brings new market to Corning. Online am 09.10.2014 unter: [http://www.corning.com/news\\_center/corning\\_stories/microreactors.aspx](http://www.corning.com/news_center/corning_stories/microreactors.aspx).

Cox, Nicholas; Pantazis, Dimitrios A.; Neese, Frank; Lubitz, Wolfgang (2013): Biological Water Oxidation. In: *Accounts of Chemical Research*. 46, 7.

Cravotto, Giancarlo; Cintas, Pedro (2012): Harnessing mechanochemical effects with ultrasound-induced reactions. In: *Chemical Science*. 3, 2.

CSIR-National Chemical Laboratory : Indus Magic – Innovate, Develop & Up Scale Modular, Agile Intensified & Continuous Processes & Plants. Online am 09.10.2014 unter: <http://www.indusmagic.org>.

de Jong, Ed et al. : Bio-based Chemicals – Valued Added Products from Biorefineries. unter: <http://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/10/Task-42-Biobased-Chemicals-value-added-products-from-biorefineries.pdf>.

de la Hoz, A.; Loupy, André (2012): *Microwaves in Organic Synthesis*. ISBN 978-3-527-33116-1.

de la Hoz, Antonio; Diaz-Ortiz, Angel; Moreno, Andres (2005): Microwaves in organic synthesis. Thermal and non-thermal microwave effects. In: *Chemical Society Reviews*. 34, 2.

Department of Energy & Climate Change (2013): International industrial energy prices. Online am 10.03.2014.

Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina – Nationale Akademie der Wissenschaften – (2012): Bioenergy – Chances and Limits., 978-3-8047-3081-6. Online am 17.3.2014.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt : DBU-Forschungscluster „Novel Process Windows“. Online am 07.08.2014 unter: <https://www.dbu.de/1561.html>.

Deutsche Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie e.V. (DBG) (2008): Von Brennstoffzellen bis Leuchtdioden. Energie und Chemie – Ein Bündnis für die Zukunft. Online am 15.04.2014.

Deutsche Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie e.V. (DBG) (Hg.): (2013): Von Kohlehalden und Wasserstoff: Energiespeicher – zentrale Elemente der Energieversorgung. ISBN 978-3-9809691-5-4.

Deutsche Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie e.V. (DBG); Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (DECHEMA); Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V. (DGM); Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V. (GDCh); Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (2012): Positionspapier Chemie als ein Innovationstreiber in der Materialforschung. unter: [http://www.dgm.de/dgm/images/Positionspapier\\_Chemie\\_Materialforschung.pdf](http://www.dgm.de/dgm/images/Positionspapier_Chemie_Materialforschung.pdf). Online am 17.12.2013.

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) : Die Systemlösung Power to Gas. Online am 30.06.2014 unter: <http://www.powertogas.info/power-to-gas/energiesystem-der-zukunft.html>.

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) : Gas speichern - Power to Gas - Strategieplattform Power to Gas. Online am 15.04.2014 unter: <http://www.powertogas.info/power-to-gas/gas-speichern.html>.

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) : Interaktive Projektkarte - Power to Gas -Strategieplattform Power to Gas. Online am 15.04.2014 unter: <http://www.powertogas.info/power-to-gas/interaktive-projektkarte/rwe-demonstrationsanlage-ibbenbueren.html>.

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) : Interaktive Projektkarte - Power to Gas -Strategieplattform Power to Gas. Online am 15.04.2014 unter: <http://www.powertogas.info/power-to-gas/interaktive-projektkarte/co2rrect.html>.

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) : Interaktive Projektkarte - Power to Gas -Strategieplattform Power to Gas. Online am 15.04.2014 unter: <http://www.powertogas.info/power-to-gas/interaktive-projektkarte/h2herten.html>.

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) : Speicherkapazitäten -Gas speichern -Power to Gas - Strategieplattform Power to Gas. Online am 15.04.2014 unter: <http://www.powertogas.info/power-to-gas/gas-speichern/speicherkapazitaeten.html>.

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) : Strom in Gas umwandeln - Power to Gas -Strategieplattform Power to Gas. Online am 15.04.2014 unter: <http://www.powertogas.info/power-to-gas/strom-in-gas-umwandeln/methanisierung.html>.

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (2010): dena-Netzstudie II. Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015-2020 mit Ausblick 2025.

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (2012): Integration erneuerbaren Stroms in das Erdgasnetz – Power to Gas – eine innovative Systemlösung für die Energieversorgung von morgen entwickeln. unter: [http://www.dena.de/fileadmin/user\\_upload/Publikationen/Energiesysteme/Dokumente/Fachbroschuere\\_Power\\_to\\_Gas.pdf](http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/Energiesysteme/Dokumente/Fachbroschuere_Power_to_Gas.pdf). Online am 15.04.2014.

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (2012): dena-Verteilnetzstudie. Ausbau- und Innovationsbedarf der Stromverteilnetze in Deutschland bis 2030. unter: [http://www.dena.de/fileadmin/user\\_upload/Projekte/Energiesysteme/Dokumente/denaVNS\\_Abschlussbericht.pdf](http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Projekte/Energiesysteme/Dokumente/denaVNS_Abschlussbericht.pdf). Online am 04.04.2014.

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (2013): dena-Pilotprojekt Demand-Side-Management Bayern.Potenziale erkennen – Märkte schaffen – Energiewende gestalten – Klima schützen. unter: [http://www.dsm-bayern.de/docs/131213\\_Projektdarstellung\\_DSM\\_Bayern\\_\\_dena.de\\_und\\_Presse.pdf](http://www.dsm-bayern.de/docs/131213_Projektdarstellung_DSM_Bayern__dena.de_und_Presse.pdf). Online am 15.04.2014.

Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V. (DGM) (2014): Bio-inspired Materials – International School and Conference on Biological Materials Science 18-21 March 2014. unter: [http://www.dgm.de/past/2014/bio-inspired/images/Bio\\_Inspired\\_programme.pdf](http://www.dgm.de/past/2014/bio-inspired/images/Bio_Inspired_programme.pdf).

Deutsche Industrievereinigung Biotechnologie (DIB) im Verband der chemischen Industrie e.V. (VCI) (2014): Forschungs- und technologiepolitische Empfehlungen der chemischen und biotechnischen Industrie zur Ressourceneffizienz und zur Rohstoffbasis im Wandel. unter: <https://www.vci.de/langfassungen-pdf/forschungs-und-technologiepolitik-fuer-ressourceneffizienz-und-breitere-rohstoffbasis.pdf>.

Deutsche Industrievereinigung Biotechnologie (DIB) (2011): Statusbericht zu möglichen Potenzialen von Bioraffinerien für die Bereitstellung von Rohstoffen in Industrie und Forschung – Zusammenfassung. unter: <https://www.vci.de/langfassungen-pdf/statusbericht-zu-moeglichen-potenzialen-von-bioraffinerien-fuer-die-bereitstellung-von-rohstoffen-in-industrie-und-forschung.pdf>.

Deutsche Melasse Handelsgesellschaft mbH : Melasse, Zuckerrübenmelasse und Zuckerrohrmelasse. Online am 14.04.2014 unter: <http://www.deutsche-melasse.de/DMH-Company-profile.45.0.html?&L=1>.

Deutsche Rohstoffagentur (dera) (2010): Rohstoffinformationen – Deutschland Rohstoffsituation 2010.

Deutsche Umwelthilfe : Alte Handys: zu wertvoll für den Müll. Online am 09.01.2014 unter: [http://baublog.haus-krekel.de/wp-content/uploads/2010/10/duh-flyer\\_handy-recycling\\_klein.pdf](http://baublog.haus-krekel.de/wp-content/uploads/2010/10/duh-flyer_handy-recycling_klein.pdf).

Deutscher Braunkohlen- Industrie-Verein e.V. (DEBRIV) (2014): Braunkohle in Deutschland 2013 – Daten und Fakten. Online am 14.04.2014 unter: [http://www.brd.Nordrhein-Westfalen.de/planen\\_bauen/pdf/Braunkohle\\_in\\_Deutschland\\_DEBRIV\\_Statistikfaltblatt.pdf](http://www.brd.Nordrhein-Westfalen.de/planen_bauen/pdf/Braunkohle_in_Deutschland_DEBRIV_Statistikfaltblatt.pdf).

Deutscher Bundestag (2014): Kleine Anfrage: Daten zur Abregelung von regenerativen Stromerzeugungsanlagen. Drucksache, 18/645 unter: [http://www.bundestag.de/presse/hib/2014\\_02/07/262238](http://www.bundestag.de/presse/hib/2014_02/07/262238).

Deutscher Wetterdienst (DWD) : Jahresmittel der Windgeschwindigkeiten Deutschland 1981-2000. Online am 26.02.2015 unter: [http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU1/KU12/Klimagutachten/Windenergie/Windkarten\\_\\_entgeltfrei/Windkarten\\_\\_10m/BRD\\_\\_1kmRasterA3\\_\\_10m,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/BRD\\_1kmRasterA3\\_10m.pdf](http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU1/KU12/Klimagutachten/Windenergie/Windkarten__entgeltfrei/Windkarten__10m/BRD__1kmRasterA3__10m,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/BRD_1kmRasterA3_10m.pdf).

Deutscher Wetterdienst (DWD) : Verteilung Sonnenstunden Deutschland 2012 unter: <http://www.dwd.de>.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) : Darstellung Prinzip adiabatischer Druckluftspeicher unter: <http://www.dlr.de/Portaldata/1/Resources/standorte/stuttgart/ADELE-Schema-gross.jpg>.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR); Tamme, Rainer (2014): Stellungnahme zur Anhörung “Energiespeicher” der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen. Drucksache, 16/1481 unter: <http://www.landtag.Nordrhein-Westfalen.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMST16-1481.pdf>.

Die Bundesregierung (2013): Deutschlands Zukunft gestalten – Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD. unter: [http://www.bundesregierung.de/Content/DE/\\_Anlagen/2013/2013-12-17-koalitionsvertrag.pdf;jsessionid=036C47277CA50568067CBC11190C51B0.s2t1?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](http://www.bundesregierung.de/Content/DE/_Anlagen/2013/2013-12-17-koalitionsvertrag.pdf;jsessionid=036C47277CA50568067CBC11190C51B0.s2t1?__blob=publicationFile&v=2). Online am 8.12.2014.

Die Bundesregierung (2013): Manganknollen – Wertvolle Rohstoffe am Meeresgrund. Online am 10.12.2014 unter: <http://www.bundesregierung.de/ContentArchiv/DE/Archiv17/Artikel/2013/09/2013-09-24-manganknollen-im-pazifik.html>.

DigInfo TV (2013): Artificial Photosynthesis System as efficient as plants and can reduce CO<sub>2</sub> levels. Online am 19.12.2014 unter: <http://www.diginfo.tv/v/12-0223-r-en.php>.

DIN CERTO : DIN EN 13432 “Anforderungen an die Verwendung von Verpackungen durch Kompostierung und biologischen Abbau”. Online am 07.01.2014 unter: <http://www.dincertco.de/de/kompostierbarkeitszeichen.html>.

DIN CERTO Gesellschaft für Konformitätsbewertung mbH : Biobasierte Produkte – für mehr Nachhaltigkeit – DIN CERTCO. unter: [http://www.dincertco.de/de/din\\_geprueft\\_biobasiert\\_fuer\\_mehr\\_nachhaltigkeit.html](http://www.dincertco.de/de/din_geprueft_biobasiert_fuer_mehr_nachhaltigkeit.html). Online am 20.12.2013.

Dispan, Jürgen (2013): Kunststoffverarbeitung IMU-Infodienst 4-13 // Kunststoffverarbeitung in Deutschland. ISBN 978-3-934859-46-3.

DocCheck Flexikon : Penicillin unter: <http://flexikon.doccheck.com/de/Penicillin>.

Doetsch, Christian; Burfeind, Jens (2014): Batterietechnologien – jenseits von Lithium und Blei. unter: [http://www.leopoldina.org/fileadmin/redaktion/Politikberatung/pdf/Christian\\_Doetsch\\_Batterietechnologien.pdf](http://www.leopoldina.org/fileadmin/redaktion/Politikberatung/pdf/Christian_Doetsch_Batterietechnologien.pdf). Online am 07.01.2015.

Drake, Frank-Detlef et al. (2013): Sind Speicher wirklich der fehlende Baustein zur Energiewende? In: *et Energiewirtschaftliche Tagesfragen*. 63, 8.

Duales System Deutschland GmbH : Porträt – Der Grüne Punkt. Online am 07.01.2014 unter: <http://www.gruener-punkt.de/corporate/unternehmen/portraet.html>.

Duales System Deutschland GmbH (2010): Der Grüne Punkt – The company logo. Online am 06.01.2014 unter: <http://www.dsd-holding.de/en/communication/picture-database/news/article/the-company-logo-as-a-file.html>.

Dunn, P. J.; Galvin, S.; Hettenbach, K. (2004): The importance of Green Chemistry in Process Research and Development. Online am 26.08.2014 unter: [http://www.rsc.org/images/greenchem\\_tcm18-212395.gif](http://www.rsc.org/images/greenchem_tcm18-212395.gif).

edie newsroom (2013): Future chemical plants could halve environmental footprint of processes. Online am 09.10.2014 unter: <http://www.edie.net/news/6/Future-chemical-plants-could-halve-environmental-footprint-of-processes/25669/>.

Ehrfeld, Wolfgang; Hessel, Volker; Löwe, Holger (2000): Microreactors – New Technology for Modern Chemistry. ISBN 3-527-29590-9.

Eichel, Rüdiger-A. et al. (2014): Gutachten “Power to Gas / Energiespeicher” für die Enquete-Kommission II des Landtags von Nordrhein-Westfalen. Online am 24.02.2015.

Emele, Lukas (2009): Entwicklung der Strompreise im Verhältnis zur Kaufkraft und Abhängigkeit der Strompreise von den Primärenergiekosten im Untersuchungszeitraum 1950 bis heute. unter: <http://www.lukas-emele.de/cms/wp-content/uploads/2009/05/Projekt1.pdf>. Online am 05.03.2014.

Emery Oleochemicals : Products/Plastic Additives – Products, Edenol, Loxiol. Online am 06.01.2014 unter: [http://www.emeryoleo.com/plastic\\_addictives.php](http://www.emeryoleo.com/plastic_addictives.php).

Endres, H.-J.; Siebert-Raths, A. (2009): Technische Biopolymere. ISBN 978-3-446-41683-3.

EnergieAgentur.Nordrhein-Westfalen : Brennstoffzellen – Grundlagen – Funktionsprinzip von Brennstoffzellen – Aufbau der Brennstoffzelle. Online am 15.04.2014 unter: <http://www.brennstoffzelle-Nordrhein-Westfalen.de/index.php?id=21>.

EnergieAgentur.Nordrhein-Westfalen (2013): Wasserstoff – Schlüssel zur Energiewende- Beispiele aus Nordrhein-Westfalen von der Herstellung bis zur Nutzung. Online am 15.04.2014.

EnergieAgentur.Nordrhein-Westfalen (23.10.2013) Erfolgreiches NRW-Förderprogramm für Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnik wird fortgesetzt – Klimaschutz ‚made in Nordrhein-Westfalen‘. Online am 15.04.2014 unter: <http://www.energieagentur.Nordrhein-Westfalen.de/erfolgreiches-Nordrhein-Westfalen-foerderprogramm-fuer-brennstoffzellen-und-wasserstofftechnik-wird-fortgesetzt-klimaschutz-made-in-Nordrhein-Westfalen--23187.asp>.

EnergieAgentur.Nordrhein-Westfalen (2015): Schwungmassespeicher unter: <http://www.energieagentur.Nordrhein-Westfalen.de/schwungmassespeicher-22991.asp>.

Ensinger GmbH : Halbzeuge aus technischen Kunststoffen. Online am 17.12.2013 unter: <http://www.ensinger-online.com/de/technische-kunststoffe-halbzeuge/halbzeuge-aus-technischen-kunststoffen/>.

Erb, Karl-Heinz et al. (2009): Eating the Planet: Feeding and fuelling the world sustainably, fairly and humanely – a scoping study., 116 unter: [https://www.ciwf.org.uk/includes/documents/cm\\_docs/2009/e/eating\\_the\\_planet\\_full\\_report\\_nov\\_2009.pdf](https://www.ciwf.org.uk/includes/documents/cm_docs/2009/e/eating_the_planet_full_report_nov_2009.pdf). Online am 15.4.2014.

Eubeler, Jan P. (2010): Biodegradation of Synthetic Polymers in the Aquatic Environment. unter: <http://elib.suub.uni-bremen.de/edocs/00101809-1.pdf>. Online am 07.01.2014.

Euro Chlor : Chlorine Industry Review 2013-2014. [http://www.eurochlor.org/media/86511/annual\\_report\\_2014\\_full\\_final2.pdf](http://www.eurochlor.org/media/86511/annual_report_2014_full_final2.pdf), Online am 19.02.2015.

Europäische Kommission (2006): Medium and Long-term Opportunities and Risks of the Biotechnological Production of Bulk Chemicals from Renewable Resources – The Potential of White Biotechnology (The BREW Project). unter: [http://www.bio-economy.net/applications/files/Brew\\_project\\_report.pdf](http://www.bio-economy.net/applications/files/Brew_project_report.pdf). Online am 10.02.2015.

Europäische Kommission (2011): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen – Grundstoffmärkte und Rohstoffe: Herausforderungen und Lösungsansätze. unter: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0025:FIN:de:PDF>. Online am 24.03.2014.

European Bioplastics (2012): Was sind Biokunststoffe? Begriffe, Werkstofftypen und Technologien – eine Einführung. unter: [http://en.european-bioplastics.org/wp-content/uploads/2011/04/fs/Biokunststoffe\\_de.pdf](http://en.european-bioplastics.org/wp-content/uploads/2011/04/fs/Biokunststoffe_de.pdf). Online am 20.12.2013.

European Bioplastics (2013): European Bioplastics publishes data on land-use for bioplastics. unter: [http://en.european-bioplastics.org/wp-content/uploads/2013/04/EuBP\\_PR\\_land\\_use\\_for\\_bioplastics\\_130408.pdf](http://en.european-bioplastics.org/wp-content/uploads/2013/04/EuBP_PR_land_use_for_bioplastics_130408.pdf). Online am 20.12.2013.

European Commission (2014): Modular, flexible, sustainable: the future of chemical manufacturing. Online am 10.10.2014 unter: <http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/news/modular-flexible-sustainable-future-chemical-manufacturing>.

Evonik Industries AG : Sie begegnen PLEXIGLAS® Tag für Tag. Online am 20.12.2013 unter: <http://www.plexiglas.de/product/plexiglas/de/Pages/default.aspx>.

Evonik Industries AG : VESTAMID® – Eine Evolutionsgeschichte der Hochleistungspolyamide. Online am 20.12.2013 unter: <http://www.vestamid.de/product/vestamid/de/Produkte-Dienstleistungen/VESTAMID-Terra/technische-eigenschaften/Pages/default.aspx>.

Evonik Industries AG : VESTAMID® Terra – Because we care. Online am 20.12.2013 unter: <http://www.vestamid.de/product/vestamid/de/produkte-dienstleistungen/vestamid-terra/pages/default.aspx>.

Evonik Industries AG (20.10.2010) Evonik plant neue Methioninanlage in Singapur. Online am 20.10.2014 unter: <http://corporate.evonik.de/de/presse/suche/pages/news-details.aspx?newsid=15195>.

Evonik Industries AG (2011): Plexiglas: Ökologisch arbeiten. unter: <http://www.plexiglas-and-energy.com/de/umweltschutz/recycling/oekologie/>. Online am 06.01.2014.

Evonik Industries AG (2012): Der Evotrainer. Online am 28.10.2014 unter: <http://www.aerosil.com/sites/dc/Downloadcenter/Evonik/Global/de/Magazine/elements/elements-37.pdf>.

Evonik Industries AG; Häger, Harald (2013): Stellungnahme zur Anhörung “Werkstoffe” der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen. Drucksache, 16/1109 unter: <http://www.landtag.Nordrhein-Westfalen.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMST16-1109.pdf>.

Evonik Industries AG; Markowz, Georg (2014): Stellungnahme zur Anhörung “Energiespeicher” der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen. Drucksache, 16/1480 unter: <http://www.landtag.Nordrhein-Westfalen.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMST16-1480.pdf>.

Evonik Industries AG; Plasticker-News (31.07.2013) Evonik: Pilotanlage für biobasierte? Amino-Laurinsäure als alternativer Rohstoff für PA 12. Online am 20.12.2013 unter: [http://plasticker.de/Kunststoff\\_News\\_19640\\_Evonik\\_Pilotanlage\\_fuer\\_biobasierte\\_+969\\_Amino\\_Laurinsaure\\_als\\_alternativer\\_Rohstoff\\_fuer\\_PA\\_12](http://plasticker.de/Kunststoff_News_19640_Evonik_Pilotanlage_fuer_biobasierte_+969_Amino_Laurinsaure_als_alternativer_Rohstoff_fuer_PA_12).

Extricom GmbH Blach Extruder & Components (2013): EU stellt Forschungsmittel für Kunststoff-Recycling zur Verfügung. Online am 05.03.2014 unter: [http://www.extricom.de/index.php?option=com\\_content&view=article&id=100:eu-stellt-forschungsmittel-fuer-kunststoff-recycling&Itemid=95&lang=de](http://www.extricom.de/index.php?option=com_content&view=article&id=100:eu-stellt-forschungsmittel-fuer-kunststoff-recycling&Itemid=95&lang=de).

ExzellenzNordrhein-Westfalen : Die großen gesellschaftlichen Herausforderungen unserer Zeit und die Leitmärkte der Zukunft. Online am 20.10.2014 unter: <http://www.exzellenz.Nordrhein-Westfalen.de/leitmaerkte/>.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (2012): Roadmap Bioraffinerien im Rahmen der Aktionspläne der Bundesregierung zur stofflichen und energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe. unter: [http://www.bmbf.de/pub/RoadmapBioraffinerien\\_2014\\_bf\\_1.pdf](http://www.bmbf.de/pub/RoadmapBioraffinerien_2014_bf_1.pdf).

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (2013): Energiepflanzen: Algen. Online am 05.03.2014 unter: <http://energiepflanzen.fnr.de/pflanzen/algen/>.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (2013): Potenzialatlas – Bioenergie in den Bundesländern. unter: [www.unendlich-viel-energie.de](http://www.unendlich-viel-energie.de). Online am 29.04.2014.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (2013): Grafik Anbau nachwachsender Rohstoffe in Deutschland. Online am 05.03.2014 unter: [http://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/r/z/rz\\_fnr4\\_0252\\_grafik\\_nawaro\\_anbau\\_101013\\_deut.jpg](http://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/r/z/rz_fnr4_0252_grafik_nawaro_anbau_101013_deut.jpg).

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (2014): Jahresbericht Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. 2013/2014. unter: [http://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/j/a/jahresbericht\\_2013-14\\_web.pdf](http://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/j/a/jahresbericht_2013-14_web.pdf). Online am 03.02.2015.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR); Biopolymernetzwerk : Biobasierte Polyolefine. Online am 20.12.2013 unter: <http://biopolymernetzwerk.fnr.de/biobasierte-werkstoffe/werkstoffe/biobasierte-polyolefine/>.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR); Biopolymernetzwerk : Biobasierte Polysuccinate. Online am 20.12.2013 unter: <http://biopolymernetzwerk.fnr.de/biobasierte-werkstoffe/werkstoffe/biobasierte-polysuccinate/>.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR); Biopolymernetzwerk : Biobasiertes PET. Online am 20.12.2013 unter: <http://biopolymernetzwerk.fnr.de/biobasierte-werkstoffe/werkstoffe/biobasiertes-pet/>.

Ferlin, Patrick; Schwede, Christian (2013): F<sup>3</sup> Factory – Fast, flexible, modular production technology provides platform for future European growth. unter: [http://www.f3factory.com/scripts/pages/en/newsevents/F%C2%B3\\_Factory\\_Achievements\\_and\\_CaseStudy\\_Summaries.pdf](http://www.f3factory.com/scripts/pages/en/newsevents/F%C2%B3_Factory_Achievements_and_CaseStudy_Summaries.pdf). Online am 07.07.2014.

finanzen.net (2014): Aluminiumpreis – Euro. Online am 03.06.2014 unter: <http://www.finanzen.net/rohstoffe/aluminiumpreis/euro>.

Fischmeister, Cedric; Doucet, Henri (2011): Greener solvents for ruthenium and palladium-catalysed aromatic C–H bond functionalisation. In: *Green Chemistry*. 13, 4,

Flaschel, E. (2004): Positionspapier: Weiße Biotechnologie: Chancen für Deutschland. unter: [http://www.dechema.de/dechema\\_media/wbt04.pdf](http://www.dechema.de/dechema_media/wbt04.pdf). Online am 01.07.2014.

Flint, E. B.; Suslick, K. S. (1991): The Temperature of Cavitation. In: *Science*. 253, 5026,

Flores-Zamora, M. I.; Martinez-Pérez, C. A.; Garcia-Guaderrama, M.; Estrada-Guel, I.; Espinosa-Magana, F.; Martinez-Sánchez, R. (2008): Comparative study of Al-Ni-Mo alloys obtained by mechanical alloying in different ball mills. In: *Reviews on Advanced Materials Science*, 18.

Food + Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2013): FAO Statistical Yearbook 2013- World food and agriculture. unter: <http://www.fao.org/docrep/018/i3107e/i3107e00.htm>. Online am 13.03.2014.

Food + Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2013): Food wastage footprint – Impacts on natural resources- Summary report. unter: <http://www.fao.org/docrep/018/i3347e/i3347e.pdf>. Online am 03.02.2015.

Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE) (2010): Reichweitenabschätzung der Lithiumvorkommen. Online am 24.03.2014 unter: <http://www.ffe.de/die-themen/ressourcen-und-klimaschutz/298-reichweitenabschaetzung-der-lithiumvorkommen>.

Forster, Michael (2014): Die Industrie in Nordrhein-Westfalen. Statistische Analysen und Studien Nordrhein-Westfalen, Band 81. [http://www.it.nrw.de/statistik/analysen/stat\\_studien/2014/band\\_81/z089201454.pdf](http://www.it.nrw.de/statistik/analysen/stat_studien/2014/band_81/z089201454.pdf), Online am 19.02.2015.

Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN (2012): Antrag auf Einrichtung einer Enquete-Kommission zur Zukunft der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen im Hinblick auf nachhaltige Rohstoffbasen, Produkte und Produktionsverfahren. Drucksache, 16/1630 (Neudruck).

Fratzl, Peter; Weinkamer, Richard (2007): Nature's hierarchical materials. In: *Progress in Materials Science*, 52.

Fraunhofer Institut für Chemisch-Biotechnologische Prozesse (CBP) : Projekte Pilotanlage chemisch-biotechnologischen Prozesszentrum (CBP). Online am 07.10.2014 unter: <http://www.cbp.fraunhofer.de/de/projekte.html>.

Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik (IGB) (2012): Algen – Nachhaltige Rohstoffquelle für Werkstoffe und Energie. Online am 13.03.2014.

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI); Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits-, und Energietechnik (UMSICHT) (2013): Biokohle – Hydrothermale Carbonisierung von Biomasse. unter: <http://www.umsicht.fraunhofer.de/content/dam/umsicht/de/dokumente/OE-300prozesse/htc-biokohle-innovationscluster-bioenergy.pdf>.

Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) (2013): Power-to-Gas läuft auch an kleinen Biogasanlagen – Pilotversuch am Hessischen Biogas-Forschungszentrum zur direkten Methanisierung erfolgreich abgeschlossen. Online am 15.04.2014 unter: <http://www.iwes.fraunhofer.de/de/Presse-Medien/Pressemitteilungen/2013/power-to-gas-laeuft-auch-an-kleinen-biogasanlagen.html>.

Freie Universität Berlin : Biomimetische Wasserstoffproduktion unter: <http://www.physik.fu-berlin.de/einrichtungen/ag/ag-heberle/projekte/bioelektrochemie/index.html>.

Freie Universität Berlin (2001): Kunststoffe zum Kennenlernen. Online am 7.1.2014 unter: <http://www.chemie.fu-berlin.de/chemistry/kunststoffe/polystyrol.htm>.

Freie Universität Berlin (2004): Kunststoffe zum Kennenlernen: Epoxidharze. Online am 09.01.2014 unter: <http://www.chemie.fu-berlin.de/chemistry/kunststoffe/epoxidharze.htm>.

Fremery, Max; Höver, Hermann; Schwarzlose, Gert (1974): Elektrochemische Benzol-Oxidation, ein nebenproduktfreier Weg zum Hydrochinon. In: *Chemie Ingenieur Technik*. 46, 15.

Freudentahl, Diana; Langner, Ramona; Kohlhoff, Jürgen; Reschke, Stefan (2013): Biokunststoffe aus Polyhydroxyalkanoaten. In: *Werkstoffe in der Fertigung*.

Fricke, Klaus (2009): Urban Mining – nur ein Modebegriff? In: *Müll und Abfall*, 10.

Friebe, Peter (1998): Adsorption und Reduktion von Kohlendioxid an Übergangsmetallen. unter: <http://www.dissertation.de/FDP/pf72.pdf>. Online am 03.04.2014.

Fritsche, Uwe R. (2007): Endenergiebezogene Gesamtemissionen für Treibhausgase aus fossilen Energieträgern unter Einbeziehung der Bereitstellungsvorketten. unter: [http://www.iinas.org/tl\\_files/iinas/downloads/GEMIS/2006\\_vorketten\\_iwo.pdf](http://www.iinas.org/tl_files/iinas/downloads/GEMIS/2006_vorketten_iwo.pdf). Online am 14.04.2014.

Fukuyama, Takahide; Rahman, Md Taifur; Baxendale, Ian R. et al. (2008): Organic Chemistry in Microreactors. ISBN 978-3-527318-69-8.

Funke, Klaus Energiegewinnung ohne Abgase. In: *Von Brennstoffzellen bis Leuchtdioden. Energie und Chemie – Ein Bündnis für die Zukunft* (2008).

FutureChemistry Holding BV : FutureChemistry – Scientific Publications. Online am 09.10.2014 unter: <http://www.futurechemistry.com/scientific-publications.html>.

FutureChemistry Holding BV : FutureChemistry – Smart, safe and clean chemistry. Online am 09.10.2014 unter: <http://www.futurechemistry.com/applications.html>.

Garagounis, Ioannis; Kyriakou, Vasileios; Skodra, Aglaia; Vasileiou, Eirini; Stoukides, Michael (2014): Electrochemical synthesis of ammonia in solid electrolyte cells. In: *Frontiers in Energy Research*.

Gaschen, Annina; Liechti, Jürgen (2010): Klärschlamm – eine weitgehend ungenutzte Ressource. In: *Umwelt Perspektiven*, 4.

Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO) (2012): Regierungsprogramm Elektromobilität – Übersicht zu umgesetzten oder initiierten Maßnahmen – unter: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/P-R/regierungsprogramm-elektromobilitaet-uebersicht-zu-umgesetzten-oder-initiierten-massnahmen,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>.

Gert Müller-Syring et al. (2013): Entwicklung von modularen Konzepten zur Erzeugung, Speicherung und Einspeisung von Wasserstoff und Methan ins Erdgasnetz. unter: [http://www.dvgw-innovation.de/fileadmin/dvgw/angebote/forschung/innovation/pdf/g1\\_07\\_10.pdf](http://www.dvgw-innovation.de/fileadmin/dvgw/angebote/forschung/innovation/pdf/g1_07_10.pdf). Online am 24.02.2015.

Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. : Weltweite Aluminiumproduktion. Online am 03.03.2014 unter: <http://www.aluinfo.de/index.php/produktion-weltweit.html>.

Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. (2014): Jährliche Produktion von Primär- und Sekundäraluminium in Deutschland. Online am 06.03.2014 unter: <http://www.aluinfo.de/index.php/produktion.html>.

Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V. (GDCh); Verband der Chemischen Industrie (VCI); Deutsche Bunsen-Gesellschaft (DBG); Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (DECHEMA); Gesellschaft für Korrosionsschutz e.V. (GfKORR) (2010): Elektrochemie – Herausforderungen an die Lehre in der Chemikerausbildung. unter: [https://www.gdch.de/index.php?eID=tx\\_nawsecuredl&u=0&file=fileadmin/downloads/Service\\_und\\_Informationen/Presse\\_Oeffentlichkeitsarbeit/PDF/echem2010.pdf&t=1408603087&hash=d287ee0687c6dd988cb1a4305b50e5a0f81ebd53](https://www.gdch.de/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&file=fileadmin/downloads/Service_und_Informationen/Presse_Oeffentlichkeitsarbeit/PDF/echem2010.pdf&t=1408603087&hash=d287ee0687c6dd988cb1a4305b50e5a0f81ebd53).

Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (DECHEMA) (2015): Elektrifizierung chemischer Prozesse. ISBN: 978-3-89746-168-0

Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (DECHEMA) : Lignocellulose Bio-raffinerie – Schlüsselkomponenten für biobasierte Produkte. Online am 07.10.2014 unter: <http://lignocellulose-bioraffinerie.de/>.

Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (DECHEMA) (03.07.2013) Unge-wöhnliche Verfahrenskombination könnte CO<sub>2</sub> zum Rohstoff machen.

Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (DECHEMA); Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V. (DGMK); Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (2010): Positionspapier: Rohstoffbasis im Wandel. unter: [http://www.dechema.de/dechema\\_media/Positionspapier\\_Rohstoffbasis+im+Wandel-p-3094.pdf](http://www.dechema.de/dechema_media/Positionspapier_Rohstoffbasis+im+Wandel-p-3094.pdf). Online am 8.9.2014.

Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (DECHEMA); Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V. (GDCh); Deutsche Bunsen-Gesellschaft (DBG); Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V. (DGMK); Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (VDI-GVC); Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (2007): Positionspapier Energieversorgung der Zukunft – der Beitrag der Chemie. unter: [http://www.energie-und-chemie.de/index.php?eID=tx\\_nawsecuredl&u=0&file=fileadmin/downloads/Service\\_und\\_Informationen/Presse\\_Oeffentlichkeitsarbeit/Sonstige/psp2.pdf&t=1421838219&hash=a0f61d4f5f0a9175009759c38c919e406d9c8e78](http://www.energie-und-chemie.de/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&file=fileadmin/downloads/Service_und_Informationen/Presse_Oeffentlichkeitsarbeit/Sonstige/psp2.pdf&t=1421838219&hash=a0f61d4f5f0a9175009759c38c919e406d9c8e78).

Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (DECHEMA); Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (VDI-GVC) (2014): ProcessNet – ProcessNet-Jahrestagung & 31. DECHEMA-Jahrestagung der Biotechnologen 2014. Online am 07.10.2014 unter: [http://processnet.de/jt2014-proc\\_page-3706.html](http://processnet.de/jt2014-proc_page-3706.html).

Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (DECHEMA); Wagemann, Kurt (2014): Stellungnahme zur Anhörung „Biotechnologische Verfahren“ der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen. Drucksache, 16/1711 unter: <http://www.landtag.nordrhein-westfalen.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMST16-1711.pdf>.

Gleich, Arnim von; Pade, Christian; Petschow, Ulrich; Pissarskoi, Ulrich (2007): Bionik: Aktuelle Trends und zukünftige Potenziale. ISBN 978-3-932092-86-2.

Gosten, Alexander Untersuchung über den Nutzen des Deponierückbaus – Gedanken zum Deponierückbau unter heutigen Rahmenbedingungen am Beispiel einer BSR-Deponie. In: *Recycling und Rohstoffe* (2009).

Gotro, Jeffrey (2013): Polyethylene Furanoate (PEF): 100% Biobased Polymer to Compete with PET? Online am 20.12.2013 unter: <http://polymerinnovationblog.com/polyethylene-furanoate-pef-100-biobased-polymer-to-compete-with-pet/>.

Götz, Roland (2007): Diskussionspapier – Der künftige Erdgasbedarf Europas. unter: [http://www.swp-berlin.org/fileadmin/contents/products/arbeitspapiere/Der\\_Erdgasbedarf\\_der\\_EU\\_11\\_05\\_1\\_\\_ks.pdf](http://www.swp-berlin.org/fileadmin/contents/products/arbeitspapiere/Der_Erdgasbedarf_der_EU_11_05_1__ks.pdf).

Grabowski, Heinrich; Gnau, Peter (2013): Zielgruppe Bio-Kunststoffe und Entsorger. Online am 19.12.2013 unter: <http://www.gogreenpartners.de/14.html>.

Graedel, T. E. et al. (2011): Recycling Rates of Metals – A Status Report. unter: [http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Metals\\_Recycling\\_Rates\\_110412-1.pdf](http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Metals_Recycling_Rates_110412-1.pdf). Online am 03.12.2014.

Grimm, Vera; Braun, Matthias; Teichert, Olav, Zweck, Axel (2011): Übersichtsstudie: Biomasse – Rohstoff der Zukunft für die chemische Industrie.

Grimm, Vera; Eickenbusch, Heinz (2012): Rohstoffquelle Biomasse – Stand und Perspektiven. unter: [http://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user\\_upload/downloads/studien/11-12-2012-Rohstoffquelle\\_Biomasse\\_Web.pdf](http://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/studien/11-12-2012-Rohstoffquelle_Biomasse_Web.pdf).

Groß, Michael (2013): Biosprit aus Algen? In: *Nachrichten aus der Chemie*. 61, 10,

Günther, Edeltraud : Stichwort: Downcycling. Online am 06.01.2014 unter: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/126551/downcycling-v6.html>.

Gürsel, Iris Vural; Hessel, Volker; Wang, Qi; Noël, Timothy; Lang, Jürgen (2012): Window of opportunity – potential of increase in profitability using modular compact plants and micro-reactor based flow processing. In: *Green Processing and Synthesis*. 1, 4.

Gustavsson, Jenny; Cederberg, Christel; Sonesson, Ulf (2011): Global Food Losses and Food Waste. unter: <http://www.fao.org/docrep/014/mb060e/mb060e00.pdf>. Online am 11.3.2014.

Gutzmer, Jens (14.01.2010) Freiburger Wissenschaftler erkunden heimische Lithiumvorkommen. Online am 15.04.2014 unter: <https://tu-freiberg.de/presse/pressemappe/mappe01.html>.

H. Cheng\*, K. Scott, C. Ramshaw (1998): Application of process intensification: To oxygen electro-reduction ELECTROCHEM'98. Online am 14.10.2014.

Hady, Łukasz; Wozny, Günter (2012): Multikriterielle Aspekte der Modularisierung bei der Planung verfahrenstechnischer Anlagen. In: *Chemie Ingenieur Technik*. 84, 5,

Hamann, Carl H.; Vielstich, Wolf (Hg.): (2005): Elektrochemie. ISBN 978-3-527-31068-5.

Heatric : Compact diffusion-bonded heat exchangers – The future of heat transfer engineering. unter: <http://www.heatric.com/hres/Heatric%20general%20introduction%20brochure>. Online am 09.10.2014.

Heinzel, Angelika; Mahlendorf, Falko Elektrochemische Speicher – Batterien und Co. In: *Von Kohle-halden und Wasserstoff: Energiespeicher – zentrale Elemente der Energieversorgung* (2013).

heise online (2008): Die effizienteste Solarzelle der Welt unter: <http://www.heise.de/newsticker/meldung/Die-effizienteste-Solarzelle-der-Welt-196245.html>.

Hempel, Maximilian (2012): Funding activities by the German Federal Environmental Foundation (Deutsche Bundesstiftung Umwelt) in the field of sustainable chemistry. In: *Green Processing and Synthesis*. 1, 3.

Henkel KGaA (2002): Geschäftsbericht 2001. Online am <http://www.henkel.de/blob/19876/409e53847df6407c23a8f93e2b7850b9/data/2001-geschaeftsbericht.pdf>.

Hermann, Hauke; Emele, Lukas; Loreck, Charlotte (2014): Prüfung der klimapolitischen Konsistenz und der Kosten von Methanisierungsstrategien. unter: [www.oeko.de/oekodoc/2005/2014-021-de.pdf](http://www.oeko.de/oekodoc/2005/2014-021-de.pdf).

Herz, Carsten; Siebenhaar, Hans-Peter Fracking-Boom in USA: Schiefergas jagt Europäern Angst ein. In: *Handelsblatt Online* (13.11.2013).

Heß, Werner (2008): Ein Blick in die Zukunft – acht Megatrends, die Wirtschaft und Gesellschaft verändert.

Hessel, Volker (2009): Novel Process Windows – Gates to Maximizing Process Intensification via Flow Chemistry. In: *Chemical Engineering & Technology*. 32, 11,

Hessel, Volker (2011): Novel Process Windows- Boosted Micro Process Technology. Online am 03.03.2015 unter: <http://erc.europa.eu/projects-and-results/erc-funded-projects/hessel?retain-filters=1>.

Hessel, Volker; Cortese, B.; Croon, M.H.J.M. de (2011): Novel process windows – Concept, proposition and evaluation methodology, and intensified superheated processing. In: *Chemical Engineering Science*. 66, 7.

Hessel, Volker; Kralisch, Dana; Kockmann, Norbert (2014): Novel Process Windows. ISBN 978-3-527-32858-1.

Hessel, Volker; Kralisch, Dana; Kockmann, Norbert; Noël, Timothy; Wang, Qi (2013): Novel Process Windows for Enabling, Accelerating, and Uplifting Flow Chemistry. In: *ChemSusChem*. 6, 5.

Hessel, Volker; Lob, Patrick; Lowe, Holger (2005): Development of Microstructured Reactors to Enable Organic Synthesis Rather than Subduing Chemistry. In: *Current Organic Chemistry*. 9, 8.

Hessel, Volker; Löwe, Holger (2002): Mikroverfahrenstechnik: Komponenten – Anlagenkonzeption – Anwenderakzeptanz – Teil 1. In: *Chem Ingenieur Technik*. 74, 2.

Hessel, Volker; Löwe, Holger; Müller, Andreas et al (2005): Chemical Micro Process Engineering: Processing and Plants. ISBN 978-3-527-30998-6.

Hessel, Volker; Löwe, Holger; Schönfeld, Friedhelm (2005): Micromixers—a review on passive and active mixing principles. In: *Chemical Engineering Science*. 60, 8-9.

Hessel, Volker; Renken, Albert; Schouten, Jaap C.; Yoshida, Jun-ichi (2009): Micro Process Engineering, Vol.1: Fundamentals, Operations and Catalysts. ISBN 978-3-527-31550-5.

Hessel, Volker, Hardt, Steffen; Löwe, Holger (2004): Chemical Micro Process Engineering: Fundamentals, Modelling and Reactions – Front Matter. ISBN 978-3-527307-41-8.

Heyde, Michael; Gerke, Gilian; Mühle Sarah (2010): Werkstoffliche Verwertung von Verpackungskunststoffen aus der Getrenntsammlung. In: *Müll und Abfall*, 01.

Heymann, Eric (2011): Textil-/Bekleidungsindustrie: Innovationen und Internationalisierung als Erfolgsfaktoren. Deutsche Bank Research, 519 unter: [https://www.dbresearch.de/PROD/DBR\\_INTERNET\\_DE-PROD/PROD0000000000275049.pdf](https://www.dbresearch.de/PROD/DBR_INTERNET_DE-PROD/PROD0000000000275049.pdf). Online am 19.12.2013.

High Level Group on the Competitiveness of the European Chemicals Industry (2009): Report of the Ad Hoc Group on Research, Innovation and Human Resources. unter: [http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/chemicals/files/hlg\\_18dec2007/finalreport\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/chemicals/files/hlg_18dec2007/finalreport_en.pdf). Online am 02.03.2015.

Hilscher, Jürgen : BMW i3: Elektroauto mit Carbon-Fahrgastzelle in der BMW Welt. Online am 09.01.2014 unter: <http://www.bimmertoday.de/2013/09/23/bmw-i3-2013-elektroauto-serie-bmw-welt-carbon-life-drive-modul/>.

Höhlein, Bernd; Grube, Thomas Kosten einer potenziellen Wasserstoffnutzung für E-Mobilität mit Brennstoffzellenantrieben. In: *et Energiewirtschaftliche Tagesfragen* (25.05.2011), S. 62–66.

Holladay, J. E.; Bozell, Joseph J.; White, J. E.; Johnson, D. (2007): Top Value-Added Chemicals from Biomass Volume II—Results of Screening for Potential Candidates from Biorefinery Lignin. unter: [www1.eere.energy.gov/biomass/pdfs/pnnl-16983.pdf](http://www1.eere.energy.gov/biomass/pdfs/pnnl-16983.pdf).

Holleman, Arnold Fr.; Wiberg, Egon (1964): Lehrbuch der anorganischen Chemie.

Holthausen, Max (22.06.2011) Ammoniaksynthese unter milden Bedingungen unter: <http://www.muk.uni-frankfurt.de/38893669/145>.

Holze, Rudolf (2010): Elektrochemische Synthesen und Produktionsverfahren. unter: <http://www.tu-chemnitz.de/chemie/elchem/anleitungen/esyn.pdf>. Online am 05.01.2015.

Howes, Laura (2013): Twisting molecules for faster reactions unter: <http://www.rsc.org/chemistry-world/2013/10/twisting-molecules-conformer-faster-reactions>.

HTVG mbH : Wasserstoffstadt Herten – Herten setzt auf Wasserstoff. Online am 15.04.2014 unter: <http://www.wasserstoffstadt-herten.de/>.

Humphries, Marc (2013): Rare Earth Elements: The Global Supply Chain. Online am 19.02.2015.

Hüthig GmbH; chemietechnik online (2014): EU-Verbot für Amalgam-basierte Chloralkali-Elektrolysen für zu Marktkonsolidierungen. Online am 17.02.2015 unter: <http://www.chemietechnik.de/texte/anzeigen/121721/EU-Verbot-fuer-Amalgam-basierte-Chloralkali-Elektrolyse-fuehrt-zu-Marktkonsolidierungen/IHS-Amalgam-Verfahren-Chloralkali-Elektrolyse-Quecksilber-EU>.

Huy, Dieter et al. (2013): Deutschland – Rohstoffsituation 2012. unter: [http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min\\_rohstoffe/Downloads/Rohsit-2012.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=11](http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/Rohsit-2012.pdf?__blob=publicationFile&v=11). Online am 09.12.2014.

HyCologne – Wasserstoff Region Rheinland e.V. : Projekt “CHEMERGY”. Online am 13.08.2014 unter: <http://www.hycologne.de/de/projekt-chemergy/>.

IfBB Hochschule Hannover (2013): Global biopolymer market size sorted by material grade 2010 – 2016. Online am 07.01.2014 unter: <http://ifbb.wp.hs-hannover.de/downloads/content/Statistics/Market%20statistics/Market%20share/By%20groups%20of%20bioplastics/Global%20biopolymer%20market%20size%20sorted%20by%20material%20grade.png>.

IfBB Hochschule Hannover (2013): Global biopolymer production capacity 2010 – 2016. Online am 07.01.2014 unter: <http://ifbb.wp.hs-hannover.de/downloads/content/Statistics/Market%20statistics/Production%20capacities/Global%20biopolymer%20production%20capacity.png>.

IfBB Hochschule Hannover (2013): Global biopolymer production capacity sorted by market segment 2011. Online am 07.01.2014 unter: <http://ifbb.wp.hs-hannover.de/downloads/content/Statistics/Market%20statistics/Production%20capacities/By%20fields%20of%20application/Global%20biopolymer%20production%20capacity%20sorted%20by%20market%20segment%202011.png>.

IfBB Hochschule Hannover (2013): Global biopolymer production capacity sorted by market segment 2016. Online am 07.01.2014 unter: <http://ifbb.wp.hs-hannover.de/downloads/content/Statistics/Market%20statistics/Market%20share/By%20fields%20of%20application/Global%20biopolymer%20market%20size%20sorted%20by%20market%20segment%202016.png>.

IfBB Hochschule Hannover (2013): Material share of biopolymer production capacity sorted by material grade 2012. Online am 07.01.2014 unter: <http://ifbb.wp.hs-hannover.de/downloads/content/Statistics/Market%20statistics/Market%20share/By%20groups%20of%20bioplastics/2012/Market%20size%20share%20of%20biopolymer%20production%20capacity%20sorted%20by%20material%20grade%202012.png>.

IfBB Hochschule Hannover (2013): Material share of biopolymer production capacity sorted by region 2012. Online am 06.01.2014 unter: <http://ifbb.wp.hs-hannover.de/downloads/content/Statistics/Market%20statistics/Production%20capacities/By%20regions/2012/Material%20share%20of%20biopolymer%20production%20capacity%20sorted%20by%20region%202012.png>.

Illg, Tobias; Löb, Patrick; Hessel, Volker (2010): Flow chemistry using milli- and microstructured reactors – From conventional to novel process windows. In: *Bioorganic & Medicinal Chemistry*. 18, 11.

index mundi (2009-2010): Phosphate Rock. Online am 24.03.2014 unter: [http://www.indexmundi.com/en/commodities/minerals/phosphate\\_rock/](http://www.indexmundi.com/en/commodities/minerals/phosphate_rock/).

Industrielle Biotechnologie Bayern Netzwerk GmbH : CO<sub>2</sub> als Rohstoff. Online am 07.10.2014 unter: <http://www.ibbnetzwerk-gmbh.com/de/industrielle-biotechnologie/>.

Industrielle Biotechnologie Bayern Netzwerk GmbH : Empfehlungen für eine verbesserte Investitionslage und Förderpraxis in Deutschland. Online am 07.10.2014 unter: <http://www.ibbnetzwerk-gmbh.com/de/industrielle-biotechnologie/industrielle-biotechnologie-und-politik/was-noetig-ist-weiterer-massnahmenbedarf/>.

Information und Technik Nordrhein-Westfalen (IT.Nordrhein-Westfalen) (2011): Statistisches Jahrbuch Nordrhein-Westfalen 2011. unter: <https://webshop.it.Nordrhein-Westfalen.de/download.php?id=17393>. Online am 05.03.2014.

INGENIEUR.de : Smarter Kunststoff-Einsatz wird Kernkompetenz der Autobauer. Online am 09.01.2014 unter: <http://www.ingenieur.de/Themen/Kunststoffe/Smarter-Kunststoff-Einsatz-Kernkompetenz-Autobauer>.

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER); Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (RWI); Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung (ZEW) (2010): Die Entwicklung der Energiemärkte bis 2030. unter: [http://www.rwi-essen.de/media/content/pages/publikationen/rwi-projektberichte/PB\\_Energieprognose-2009.pdf](http://www.rwi-essen.de/media/content/pages/publikationen/rwi-projektberichte/PB_Energieprognose-2009.pdf). Online am 24.02.2015.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis Summary for Policymakers. Online am 14.04.2014.

International Energy Agency (IEA) (2012): World Energy Outlook 2012.

Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien (IWR) (2011): Klima: Weltweiter CO<sub>2</sub>-Ausstoß steigt 2012 um 1,3% auf neuen Rekordwert. Online am 18.03.2014 unter: <http://www.iwr.de/news.php?id=24965>.

INVITE GmbH (2012): Forschungszentrum INVITE – Einladung in die Zukunft. Online am 07.07.2014 unter: [http://www.invite-research.com/fileadmin/user\\_upload/dokumente/DE\\_Einladung-in-die-Zukunft.pdf](http://www.invite-research.com/fileadmin/user_upload/dokumente/DE_Einladung-in-die-Zukunft.pdf).

ISP MARL GmbH : Butandiolanlage. Online am 15.04.2014 unter: [http://www.isp-marl.de/index.php?option=com\\_content&view=article&id=66&Itemid=72&lang=de](http://www.isp-marl.de/index.php?option=com_content&view=article&id=66&Itemid=72&lang=de).

Jacoby, Mitch (2014): Rethinking Photocatalysis. In: *Chemical Engineering & Technology*, 21.

Jansen, Marco (2012): Green PE: conventional performance from a sustainable source. Online am 04.02.2015.

Jasinski, Stephen M. (2013): Phosphate Rock. Online am 24.03.2014.

- Jaskula, Brian W. (2012): Lithium. unter: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lithium/mcs-2012-lithi.pdf>. Online am 10.03.2014.
- Jiménez-González; Constable, David (2011): Green Chemistry and Engineering: A Practical Design Approach. ISBN 978-0-470170-87-8.
- Jörissen, Jakob (2006): Chlor, Natronlauge und anderes aus Elektrolyseverfahren unter: <http://archiv.aktuelle-wochenschau.de/2006/woche7b/woche7b.html>.
- Jungmeier, Gerfried (2013): Facts & Figures of Producing Biofuels in Biorefineries – Current Status and Future Perspectives. unter: [http://www.3aps.at/site/sites/default/files/conferences/2013\\_10\\_03\\_eco-mobility2013/2\\_11\\_Jungmeier\\_Joanneum\\_Research.pdf](http://www.3aps.at/site/sites/default/files/conferences/2013_10_03_eco-mobility2013/2_11_Jungmeier_Joanneum_Research.pdf).
- Kaajakari, Ville (2009): Practical MEMS: Design of microsystems, accelerometers, gyroscopes, RF MEMS, optical MEMS, and microfluidic systems. ISBN 978-0-982299-10-4.
- Kabza, Alexander (2013): PEMFC – proton exchange membrane fuel cell. Online am 15.04.2014 unter: <http://pemfc.de/#zweipunktsechs>.
- Kagermann, Henning (2013): Chemie bringt das E-Auto weiter. In: *Nachrichten aus der Chemie*, 61.
- Kaiser, W. (2011): Kunststoffchemie für Ingenieure: Von der Synthese bis zur Anwendung. ISBN 978-3-446430-47-1.
- Kamm, Birgit; Kamm, Michael; Hirth, Thomas; et al. Lignocellulose-based Chemical Products and Product Family Trees. In: *Biorefineries – industrial processes and products: status quo and future directions* (2006).
- Kanan, Matthew W.; Nocera, Daniel G. \* (2008): In Situ Formation of an Oxygen-Evolving Catalyst in Neutral Water Containing Phosphate and  $\text{CO}_2$ . In: *Science*, 321.
- Kappe, C. Oliver (2004): Controlled Microwave Heating in Modern Organic Synthesis. In: *Angewandte Chemie International Edition*. 43, 46.
- Karrer, Martin : Kunststoffe / Eigenschaften. unter: <http://www.karrer-works.ch/DownloadDateien/MaterialEigenschaftKunststoff.pdf>.
- Kavalov, B.; Petric, H.; Georgakaki, A. (2009): Liquefied Natural Gas for Europe – Some Important Issues for Consideration. unter: [http://ec.europa.eu/dgs/jrc/downloads/jrc\\_reference\\_report\\_200907\\_liquefied\\_natural\\_gas.pdf](http://ec.europa.eu/dgs/jrc/downloads/jrc_reference_report_200907_liquefied_natural_gas.pdf). Online am 14.04.2014.
- Kenneth S. Suslick , David A. Hammerton , Raymond E. Cline (1986): Sonochemical hot spot. In: *J. Am. Chem. Soc.*, 108, 18.
- Kern, Jürgen (2007): Verfahren zur Wasserstoff-Gewinnung. Online am 15.04.2014 unter: <http://www.hycar.de/herstellung.htm>.
- Kessler, Alois (2014): Speicher für die Energieversorgung von morgen. Online am 19.02.2015.

Kirschning, Andreas (2009): Chemistry in flow systems. In: *Beilstein Journal of Organic Chemistry*. 5.

Kirschning, Andreas (2011): Chemistry in flow systems II. In: *Beilstein Journal of Organic Chemistry*. 7.

KJEMI (2014): "Designer Solvents" Is World's Top Chemistry Paper. Online am 08.08.2014 unter: <http://www.kjemi.com/artikkel/1932/designer-solvents-is-worlds-top-chemistry-paper/>.

Kluge, Jonathan A.; Rabotyagova, Olena; Leisk, Gary G.; Kaplan, David L. (2008): Spider silks and their applications. In: *Trends in Biotechnology*. 26, 5.

Knaep, Fons de; Braish, Tamim; Gadamasetti, Kumar (2007): Process Chemistry in the Pharmaceutical Industry – Emerging Trends in Process Chemistry. ISBN 978-0-8493-9051-7.

Krankenhaus-IT online (2013): Technologie-Konvergenz krempelt die Klinik-IT um. Online am 15.04.2014 unter: <https://www.kh-it.de/files/downloads/topnews/KH-IT-Journal-Ingolstadt-2013.pdf>.

Krasberg, Nicolai; Hohmann, Lukas; Bieringer, Thomas; Bramsiepe, Christian; Kockmann, Norbert (2014): Selection of Technical Reactor Equipment for Modular, Continuous Small-Scale Plants. In: *Processes*. 2, 1.

Kreis Recklinghausen; WiN Emscher-Lippe Gesellschaft zur Strukturverbesserung mbH : Oberflächenatlas Nordrhein-Westfalen. Online am 24.02.2015 unter: [http://www.chemieatlas.de/oberflaeche\\_Nordrhein-Westfalen/](http://www.chemieatlas.de/oberflaeche_Nordrhein-Westfalen/).

Kreis Recklinghausen; WiN Emscher-Lippe Gesellschaft zur Strukturverbesserung mbH : Polymeratlas Nordrhein-Westfalen. Online am 24.02.2015 unter: [http://www.chemieatlas.de/polymere\\_Nordrhein-Westfalen/](http://www.chemieatlas.de/polymere_Nordrhein-Westfalen/).

Kuhn, Philipp (2011): Speicherbedarf im Stromnetz. Fachtagung Energieeffizienz – eine stete Herausforderung an Wissenschaft und Praxis. unter: [https://www.ffe.de/fachtagung2011/download/FfE-Fachtagung\\_2011\\_Vortrag\\_Kuhn.pdf](https://www.ffe.de/fachtagung2011/download/FfE-Fachtagung_2011_Vortrag_Kuhn.pdf). Online am 24.02.2015.

kunststoffland Nordrhein-Westfalen (2012): Zahlen und Fakten. Online am 19.12.2013 unter: <http://www.kunststoffland-Nordrhein-Westfalen.de/ueber-uns/zahlen-und-fakten.html>.

KunststoffWeb (22.05.2012) Uhde Inventa-Fischer: Verfahren zur Produktion von PBS. Online am 20.12.2013 unter: [http://www.kunststoffweb.de/ki\\_ticker/Uhde\\_Inventa-Fischer\\_Verfahren\\_zur\\_Produktion\\_von\\_PBS\\_t222386](http://www.kunststoffweb.de/ki_ticker/Uhde_Inventa-Fischer_Verfahren_zur_Produktion_von_PBS_t222386).

Kurz, Philipp; Wiechen, Mathias (2012): Biomimetische Oxide für die Wasseroxidation. In: *Nachrichten aus der Chemie*. 60, 1.

Kuttkat, Bernhard; Otto, Claudia (17.10.2012) Biobasierte Kunststoffe werden immer bedeutender. Online am 06.01.2014 unter: <http://www.nachhaltige-produktion.de/umwelt-schutz/articles/382196/index3.html>.

Lackiertechnik in Deutschland (2013): DFO Tagung Kunststofflackierung 2013. Online am 20.12.2013 unter: <http://www.dfo.info/de/dfo-ev/kompetenz-ziele/tagungen/tagungsdetails.html?idtagung=8>.

Lahl, Uwe; Zeschmar-Lahl, Barbara (Hg.): (2011): Going Green – Chemie: Handlungsfelder für eine ressourceneffiziente Chemieindustrie. ISBN 978-3-86928-065-3.

Lambrecht, Jens; Wolf, Hans Peter, Gerlach, Ernst : Chemische Eigenschaften von Siliconelastomeren. unter: [http://www.vde.com/de/fg/ETG/Archiv/Aktuelles/Documents/MCMS/chemische\\_eigenschaften.pdf](http://www.vde.com/de/fg/ETG/Archiv/Aktuelles/Documents/MCMS/chemische_eigenschaften.pdf). Online am 09.01.2014.

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV Nordrhein-Westfalen) (2013): Treibhausgas-Emissionsinventar Nordrhein-Westfalen 2011. unter: [http://www.lanuv.Nordrhein-Westfalen.de/klima/pdf/Treibhausgas\\_Emissionsinventar.pdf](http://www.lanuv.Nordrhein-Westfalen.de/klima/pdf/Treibhausgas_Emissionsinventar.pdf). Online am 18.03.2014.

Landinger, Hubert (2010): Energiespeicher in Stromversorgungssystemen mit hohem Anteil Erneuerbarer Energien.

Landtag Nordrhein-Westfalen (2013): Enquetekommission II Protokoll 5. Sitzung (nichtöffentlich). Drucksache, nöEKPr 16/5.

Landtag Nordrhein-Westfalen (2013): Enquetekommission II Protokoll 6. Sitzung (nichtöffentlich). Drucksache, nöEKPr 16/6.

Landtag Nordrhein-Westfalen (2014): Enquetekommission II Protokoll 14. Sitzung (nichtöffentlich) – Anhörung „Elektrochemische Verfahren“. Drucksache, nöEKPr 16/17.

Landtag Nordrhein-Westfalen (2014): Enquetekommission II Protokoll 15. Sitzung (nichtöffentlich) – Anhörung „Energiespeicher“. Drucksache, nöEKPr 16/19.

Landtag Nordrhein-Westfalen (2014): Enquetekommission II Protokoll 17. Sitzung (nichtöffentlich) – Anhörung „Biotechnologische Verfahren“. Drucksache, nöEKPr 16/22.

Landtag Nordrhein-Westfalen (2015): Enquetekommission II Protokoll 20. Sitzung (nichtöffentlich). Drucksache, nöEKPr 16/27.

Lang, Reinhold; Rieger, Bernhard; Schlarb, Alois : Standard-Kunststoffe. unter: [http://www.k-online.de/cipp/md\\_k/lib/all/lob/return\\_download,ticket,g\\_u\\_e\\_s\\_t/bid,476/no\\_mime\\_type,0/~k\\_standard\\_kunststoffe.pdf](http://www.k-online.de/cipp/md_k/lib/all/lob/return_download,ticket,g_u_e_s_t/bid,476/no_mime_type,0/~k_standard_kunststoffe.pdf). Online am 09.01.2014.

LanzaTech (2014): Technical Overview unter: <http://www.lanzatech.com/innovation/technical-overview/>.

LanzaTech Inc. (2014): LanzaTech. unter: [http://www.lanzatech.com/wp-content/uploads/2014/05/LanzaTech\\_Ex\\_Summary\\_8.5x11\\_05\\_09\\_2014.pdf](http://www.lanzatech.com/wp-content/uploads/2014/05/LanzaTech_Ex_Summary_8.5x11_05_09_2014.pdf). Online am 08.09.2014.

Lauterbach, C.; Schmitt, B.; Vajen, K. (2011): Das Potential solarer Prozesswärme in Deutschland-Teil 1 des Abschlussberichtes zum Forschungsvorhaben „SOPREN – Solare Prozesswärme und Energieeffizienz“. unter: [http://solar.umwelt-uni-kassel.de/publikationen/uploads/Potential\\_solarer\\_Prozesswaerme\\_in\\_Deutschland.pdf](http://solar.umwelt-uni-kassel.de/publikationen/uploads/Potential_solarer_Prozesswaerme_in_Deutschland.pdf).

Lebouvier, Alexandre; Iwarere Samuel A.; d'Argenlieu Philippe; Ramjugernath Deresh; Fulcheri Laurent (2013): Assessment of Carbon Dioxide Dissociation as a New Route for Syngas Production: A Comparative Review and Potential of Plasma-Based Technologies. In: *Energy Fuels*. 27, 5.

Letcher, T. M.; Scott, J. L.; Peter, L. (2012): *Materials for a Sustainable Future*. ISBN 978-1-849734-07-3.

Lévesque, François; Seeberger, Peter H. (2012): Kontinuierliche Synthese des Malariawirkstoffs Artemisinin. In: *Angewandte Chemie*. 124, 7.

Lexikon der Chemie (1998): Penicillinacylase. Online am 02.07.2014 unter: <http://www.spektrum.de/lexikon/chemie/penicillinacylase/6779>.

Limberg, Christian (2014): Gutachten „Biomimetische Chemie“ für die Enquete-Kommission II des Landtags von Nordrhein-Westfalen. Online am 05.01.2015.

Linder, Hermann (Hg.): (1998): *Biologie – Lehrbuch für die Oberstufe*. ISBN 3-507-10580-2.

Lingenhöhl, Daniel (2011): Speichertechnik – Ein Granitblock voller Energie unter: <http://www.spektrum.de/news/ein-granitblock-voller-energie/1061069>.

Lin-Hi, Nick : Stichwort: Greenwashing unter: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/9119/greenwashing-v7.html>.

Liu, Feng; Concepcion, Javier J.; Jurss, Jonah W.; Cardolaccia, Thomas; Templeton, Joseph L.; Meyer, Thomas J. (2008): Mechanisms of water oxidation from the blue dimer to photosystem II. Online am 13.01.2015 unter: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18330966>.

Löb, Patrick; Pennemann, Helmut; Hessel, Volker (2004): g/l-Dispersion in interdigital micromixers with different mixing chamber geometries. In: *Chemical Engineering Journal*. 101, 1-3.

Lonza Group Ltd. (08.02.2012) *Factory of Tomorrow*. Online am 08.08.2014 unter: <http://www.lonza.com/about-lonza/media-center/news/2012/factory-of-tomorrow-e.aspx>.

Lu, Yi (2006): Biosynthetic Inorganic Chemistry. In: *Angewandte Chemie International Edition*. 45, 34.

Lubitz, Wolfgang; Cox, Nicholas Wie Pflanzen Wasser spalten. In: *Spektrum der Wissenschaft* (September 2013), S. 34–43.

Lubitz, Wolfgang; Reijerse, Edward J.; Messinger, Johannes (2008): Solar water-splitting into H<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>: design principles of photosystem II and hydrogenases. In: *Energy & Environmental Science*. 1, 1.

Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (2008): *The European Hydrogen Energy Roadmap*. unter: [http://www.hyways.de/docs/Brochures\\_and\\_Flyers/HyWays\\_Roadmap\\_FINAL\\_22FEB2008.pdf](http://www.hyways.de/docs/Brochures_and_Flyers/HyWays_Roadmap_FINAL_22FEB2008.pdf). Online am 15.04.2014.

Luo, J., et al. (2014): Water photolysis at 12.3% efficiency via perovskite photovoltaics and Earth-abundant catalysts. In: *Science*, 345.

Madou, Marc J. (2002): *Fundamentals of Microfabrication: The Science of Miniaturization*, Second Edition. ISBN 978-0-849308-26-0.

manager magazin online (2012): Erdgas: Wintershall und Statoil schmieden Pipeline-Pakt. Online am 04.03.2014 unter: <http://www.manager-magazin.de/unternehmen/energie/a-868306.html>.

Mangold, Klaus-Michael; Janek, Jürgen (2006): *Angewandte Elektrochemie: Grundbegriffe der Elektrochemie*. Online am 26.02.14 unter: <http://archiv.aktuelle-wochenschau.de/2006/woche2b/woche2b.html>.

Mannheimer Schulen (2005 – 2006): *Recycling und Verwertung von Kunststoffen*. Online am 06.01.2014 unter: <http://www.mannheimer-schulen.de/lilo/2005-2006/chemie/dat/verwertung.html>.

Marsh Risk Management Research (2013): *Managing Risk on the new frontiers of energy exploration*. unter: [https://uk.marsh.com/Portals/18/Documents/MRMR%20New%20Frontiers%20of%20Energy%20Expl%202013\\_A4.pdf](https://uk.marsh.com/Portals/18/Documents/MRMR%20New%20Frontiers%20of%20Energy%20Expl%202013_A4.pdf).

Matschiner, Von H.; Fechtel, U.; Trutschel, R.; Altmann, H. (1989): Darstellung von 4-Alkyloxybenzaldehyddimethylacetalen durch anodische Methoxylierung von 4-Alkyloxytoluenen. In: *Liquid Crystals*. 6, 4.

Maugeri, Leonardo (2004): Oil: never Cry Wolf – why the petroleum age is far from over. In: *Science*. 304, 5674.

Max-Planck-Institut für chemische Energiekonversion; Wieghardt, Karl (2014): Stellungnahme zur Anhörung "Verfahren der biomimetischen Chemie" der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen. Drucksache, 16/1855 unter: <http://www.landtag.Nordrhein-Westfalen.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMST16-1855.pdf>. Online am 19.12.2014.

Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH : Elektrochemische CO<sub>2</sub> Reduktion – mit Hochdurchsatz auf der Suche nach neuen Katalysatoren. Online am 03.04.2014 unter: <http://www.mpie.de/index.php?id=4120>.

Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung; Fratzl; Peter (2014): Stellungnahme zur Anhörung "Verfahren der biomimetischen Chemie" der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen. Drucksache, 16/1867 unter: <http://www.landtag.Nordrhein-Westfalen.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMST16-1867.pdf>.

Mayer, Ralf : BASF führt Wartungs- und Modernisierungsmassnahmen durch. In: *Chemische Rundschau – Chemie Plus*. 2012.

McKone, James R.; Lewis, Nathan S.; Gray, Harry B. (2014): Will Solar-Driven Water-Splitting Devices See the Light of Day? In: *Chemistry of Materials*. 26, 1.

Mecking, Stefan (2004): Biologisch abbaubare Werkstoffe– Natur oder Petrochemie? In: *Angewandte Chemie*. 116, 9.

Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest : Handys, Smartphones, Apps. Online am 09.01.2014 unter: [http://www.mpfs.de/fileadmin/Infoset\\_neu/Infoset\\_Handy.pdf](http://www.mpfs.de/fileadmin/Infoset_neu/Infoset_Handy.pdf).

Merten, Christian : Funktion der PEM-Brennstoffzelle. Online am 15.04.2014 unter: <http://www.diebrennstoffzelle.de/zelltypen/pemfc/funktion.shtml>.

Messinger, J., Renger, G (1995): Structural changes in the water-oxidizing complex monitored via the pH dependence of the reduction rate of redox state S1 by hydrazine and hydroxylamine in isolated spinach thylakoids. In: *Biochemistry*, 34.

Messner, J.; Babies, H. G. (2011): MENA – Der Nahe Oste und Nordafrika – Eine Schlüsselregion für die Erdölversorgung der Welt. unter: [http://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity\\_Top\\_News/Energie/34\\_MENA.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](http://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Energie/34_MENA.pdf?__blob=publicationFile&v=2). Online am 23.02.2015.

Meurer, Sebastian Die Umsiedlung ist beendet. In: RP Online (27.05.2008).

Meyer, Bernd et al. (2014): Gutachten „Stoffliche Nutzung von Braunkohle“ für die Enquete-Kommission II des Landtags von Nordrhein-Westfalen.

Michels, Carmen (2011): Aus der Natur in den Alltag – Anwendungen und Potentiale für Biokunststoffe. unter: [http://hagen-stiftung.de/fileadmin/dokumente/Meldungen/News/Biokunststoffe\\_im\\_Fokus\\_-\\_FKuR.pdf](http://hagen-stiftung.de/fileadmin/dokumente/Meldungen/News/Biokunststoffe_im_Fokus_-_FKuR.pdf). Online am 20.12.2013.

Ministerium für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen : Bioökonomie in Nordrhein-Westfalen. Online am 20.10.2014 unter: <http://www.wissenschaft.Nordrhein-Westfalen.de/forschung/fortschritt-Nordrhein-Westfalen/grosse-gesellschaftliche-herausforderungen-bewaeltigen/multitalent-biotechnologie/biooekonomie-in-Nordrhein-Westfalen/>.

Ministerium für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen (MIWF) : Bioökonomie in Nordrhein-Westfalen. Online am 08.09.2014 unter: <http://www.wissenschaft.Nordrhein-Westfalen.de/forschung/fortschritt-Nordrhein-Westfalen/grosse-gesellschaftliche-herausforderungen-bewaeltigen/multitalent-biotechnologie/biooekonomie-in-Nordrhein-Westfalen/>.

Ministerium für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen (MIWF) : Regionale Innovationsnetzwerke in Nordrhein-Westfalen. Online am 08.09.2014 unter: <http://www.wissenschaft.Nordrhein-Westfalen.de/forschung/fortschritt-Nordrhein-Westfalen/globale-herausforderungen-lokal-meistern/regionale-innovationsnetzwerke-in-Nordrhein-Westfalen/>.

Ministerium für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen (MIWF) (2013): Entstehungs- bzw. Produktionskosten ausgewählter landwirtschaftlicher Produkte sowie Potentiale zur stofflichen Verwertung in Bioraffinerien in Nordrhein-Westfalen. Diskussionsgrundlage für Follow-up-Gespräch Landwirtschaft/Chemie/Energie am 29.1.2013.

Ministerium für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen (MIWF) (2013): Kosten und Potentiale zum Einsatz von Biomasse in Bioraffinerien zur Herstellung von Biopolymeren am Beispiel von Stroh. Diskussionsgrundlage für Follow-up-Gespräch Landwirtschaft/Chemie/Energie am 29.1.2013.

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz (MKULNV) (2012): EnergieDaten.Nordrhein-Westfalen 2012. unter: [http://www.umwelt.Nordrhein-Westfalen.de/ministerium/pdf/energiedaten\\_Nordrhein-Westfalen\\_2012\\_web.pdf](http://www.umwelt.Nordrhein-Westfalen.de/ministerium/pdf/energiedaten_Nordrhein-Westfalen_2012_web.pdf).

MM MaschinenMarkt (2014): Multifunktionale Spinnenseide – ein vielversprechender Werkstoff unter: [http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/produktion/kunststoffverarbeitung\\_gummiverarbeitung/articles/449694/index3.html](http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/produktion/kunststoffverarbeitung_gummiverarbeitung/articles/449694/index3.html).

Müller-Eisen, U. Chlor-Alkali-Elektrolyse, persönliche Mitteilung (2003).

Müller-Urlaub, Bertold (2012): Kraft-Wärme-Kopplung als Grundpfeiler eines neuen Marktdesigns. In: *et Energiewirtschaftliche Tagesfragen*. 62, 11.

Münster Electrochemical Energy Technology (MEET); Hörpel, Gerhard (2014): Stellungnahme zur Anhörung „Energiespeicher“ der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen. Drucksache, 16/1407.

Neubauer, Katja (2009): Isolierung eines Biopolymers aus gentechnisch veränderten Pflanzen. unter: <http://d-nb.info/1005797811/34>. Online am 06.08.2014.

Neubauer, Uta (2011): Abschied vom Quecksilber. Online am 17.02.2015 unter: <http://www.nzz.ch/aktuell/startseite/abschied-vom-quecksilber-1.9909808>.

Nexant ChemSystems (2008): Biochemical opportunities in the United Kingdom NNFCC Project No. 08-008. unter: [http://www.nnfcc.co.uk/publications/nnfcc-project-factsheet-biochemical-opportunities-in-the-uk-nnfcc-08-008/at\\_download/file](http://www.nnfcc.co.uk/publications/nnfcc-project-factsheet-biochemical-opportunities-in-the-uk-nnfcc-08-008/at_download/file). Online am 8.9.2014.

Neyts, E. C.; Bogaerts, A. (2014): Understanding plasma catalysis through modelling and simulation—a review. In: *Journal of Physics D: Applied Physics*. 22, 47.

Niesing, Birgit : Carbon in Serie. In: *weiter.vorn*, 3/12.

Noleppa, Steffen; Witzke, Harald von (2012): Tonnen für die Tonne. unter: [http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/studie\\_tonnen\\_fuer\\_die\\_tonne.pdf](http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/studie_tonnen_fuer_die_tonne.pdf). Online am 12.05.2014.

nova-Institut GmbH (2013): Industrial Material Use of Biomass in Europe 2013. Online am 02.03.2015 unter: [http://www.nova-institut.de/bio/data/images/14-01\\_industrial\\_material\\_use\\_of\\_biomass\\_in\\_europe\\_2013\\_nova\\_institut.pdf](http://www.nova-institut.de/bio/data/images/14-01_industrial_material_use_of_biomass_in_europe_2013_nova_institut.pdf).

nova-Institut GmbH (2013): Bio-based Polymers in the World Capacities, Production and Applications: Status Quo and Trends towards 2020 – Market study.

Nordrhein-Westfalen.INVEST GmbH : Wissen für die Welt: Forschungseinrichtungen in Nordrhein-Westfalen. Online am 17.11.2014 unter: [http://www.Nordrhein-Westfaleninvest.com/Nordrhein-Westfaleninvest\\_deutsch/Nordrhein-Westfalen\\_im\\_Ueberblick/Daten\\_Fakten/Forschung\\_Entwicklung/index.php](http://www.Nordrhein-Westfaleninvest.com/Nordrhein-Westfaleninvest_deutsch/Nordrhein-Westfalen_im_Ueberblick/Daten_Fakten/Forschung_Entwicklung/index.php).

Obernberger, Ingwald (1997): Aschen aus Biomassefeuerungen – Zusammensetzung und Verwertung. In: *VDI Bericht*. 1319.

Oosterbroek, Edwin; van den Berg, A. (2003): Lab-on-a-Chip, 1st Edition: Miniaturized Systems for (Bio)Chemical Analysis and Synthesis. ISBN 978-0-444511-00-3.

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2005): Biotechnology policies – Statistical Definition of Biotechnology. Online am 15.05.2014 unter: <http://www.oecd.org/sti/biotech/statisticaldefinitionofbiotechnology.htm>.

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2009): The Bioeconomy to 2030 – Main Findings and Policy Conclusions. unter: <http://www.oecd.org/futures/long-termtechnologicalsocietalchallenges/42837897.pdf>. Online am 07.10.2014.

Osawa, Yoshitaka; Miyazaki, Kumiko (2006): An empirical analysis of the valley of death: Large scale R&D project performance in a Japanese diversified company. In: *Asian Journal of Technology Innovation*. 14, 2.

Österreichischer Rundfunk (2012): Bald „Lithium“-Abbau auf der Koralm? Online am 24.03.2014 unter: <http://ktnv1.orf.at/stories/498485>.

Österreichisches Chemiefaser-Institut: Zusammenfassungen / Abstracts 1992. Online am 19.02.2015.

Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften : Forschungsschwerpunkt Kunststoffrecycling. unter: [https://www.ostfalia.de/cms/de/ifr/not\\_in\\_menu/forschung\\_projekte\\_agib\\_verbund.html](https://www.ostfalia.de/cms/de/ifr/not_in_menu/forschung_projekte_agib_verbund.html). Online am 05.03.2014.

Otto, Andreas; Hubert, Marc : Wasserstoffspeicherung in Metallhydriden. unter: Online am 15.04.2014.

Pacific Northwest National Laboratory (PNNL); National Renewable Energy Laboratory (NREL) (2004): Top Value Added Chemicals from Biomass – Volume I – Results of Screening for Potential Candidates from Sugars and Synthesis Gas.

Paddon, C. J.; Westfall, P. J.; Pitera, D. J et al. (2013): High-level semi-synthetic production of the potent antimalarial artemisinin. In: *Nature*. 496, 7446.

PAKUFOL Folienprodukte GmbH : Kunststoffverwertung. Online am 20.12.2013 unter: <http://www.pakufol.de/pakufol/das-unternehmen/kunststoffverwertung.html>.

Pardemann, Robert (2013): Stoff-Kraft-Kopplung in kohlebasierten Polygenerationenkonzepten (bisher unveröffentlicht).

Parvulescu, Vasile I.; Magureanu, Monica; Lukes, Petr (2013): Plasma Chemistry and Catalysis in Gases and Liquids. ISBN 978-3-527649-54-9.

Paschotta, Rüdiger : Energiedichte. Online am 02.03.2015 unter: <https://www.energie-lexikon.info/energiedichte.html>.

Pashkova, Aneta; Greiner, Lasse (2011): Towards Small-Scale Continuous Chemical Production: Technology Gaps and Challenges. In: *Chemie Ingenieur Technik*.

Patel, Martin; Crank, Manuela; Dornburg, Veronika; Hermann, Barbara; et al. (2006): Medium and Long-term Opportunities and Risks of the Biotechnological Production of Bulk Chemicals from Renewable Resources. unter: [www.bio-economy.net/applications/files/Brew\\_project\\_report.pdf](http://www.bio-economy.net/applications/files/Brew_project_report.pdf).

Perrey, Karen et al. (2014): Gutachten "Innovationsleistungsfähigkeit der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen – Katalyse" für die Enquete-Kommission II des Landtags von Nordrhein-Westfalen.

Pflaum, Hartmut et al. (2008): Potenzialstudie "Anwendungspotenziale der Bioverfahrenstechnik (weiße Biotechnologie) in Nordrhein-Westfalen"- Abschlussbericht – Ziel, Inhalt und Ergebnisse der Studie. unter: [https://www.umwelt.Nordrhein-Westfalen.de/umwelt/pdf/biotech/ergebnisse\\_biotech\\_studie.pdf](https://www.umwelt.Nordrhein-Westfalen.de/umwelt/pdf/biotech/ergebnisse_biotech_studie.pdf). Online am 01.07.2014.

Pflug, Kai (2014): Renaissance einer alten Technologie – Pro und Kontra Kohlechemie – die Zukunft in China trotz zahlreicher Herausforderungen. In: *CHEManager*, 17.

Pharmazeutische Zeitung online (2007): Weidenrindenextrakt: unter: <http://www.pharmazeutische-zeitung.de/index.php?id=2666>.

Pinaud, Blaise A.; Benck, Jesse D.; Seitz, Linsey C.; Forman, Arnold J.; Chen, Zhebo; Deutsch, Todd G.; James, Brian D.; Baum, Kevin N.; Baum, George N.; Ardo, Shane; Wang, Heli; Miller, Eric; Jaramillo, Thomas F. (2013): Technical and economic feasibility of centralized facilities for solar hydrogen production via photocatalysis and photoelectrochemistry. In: *Energy & Environmental Science*. 6, 7.

Piotrowski, Stephan et al. (2014): New nova Methodology for Techno-Economic Evaluations of Innovative Industrial Processes (nTEE). unter: <https://biobs.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/generated/files/stakeholders/NOVA%20-nova-paper-5.pdf>. Online am 03.02.2015.

Plant Biomechanics Group Freiburg, Kompetenznetz Biomimetik (2014): Bionik-Vitrine ausgestellt in der Zoologischen Schausammlung des Instituts für Biologie unter: <http://www.bionik-vitrine.de/index.html>.

PlasticsEurope : The Plastics Portal. Online am 09.01.2014 unter: <http://www.plasticseurope.de/anwendung/verpackung.aspx>.

PlasticsEurope (2009): Too valuable to be thrown away. unter: <http://www.plasticseurope.org/document/plastics-too-valuable-to-be-thrown-away.aspx?Page=DOCUMENT>. Online am 19.12.2013.

PlasticsEurope (2012): Plastics – the Facts 2012 – An analysis of European plastics production, demand and waste data for 2011. unter: [http://www.plasticseurope.org/documents/document/20121119153010-plasticsthefacts\\_2012\\_final.pdf](http://www.plasticseurope.org/documents/document/20121119153010-plasticsthefacts_2012_final.pdf). Online am 13.01.2014.

PlasticsEurope (2012): Grafiken zum Wirtschaftspressegespräch. unter: [http://www.plasticseurope.org/documents/document/20120508141857-grafiken\\_wpk\\_2012.pdf](http://www.plasticseurope.org/documents/document/20120508141857-grafiken_wpk_2012.pdf). Online am 07.01.2014.

PlasticsEurope (2012): Business Data and Charts 2011/2012. Online am 19.12.2013.

PlasticsEurope (2013): Kunststoff-Produktionsstandorte in Deutschlandbranche Deutschland. Online am 19.12.2013.

PlasticsEurope (2013): Geschäftsbericht 2012 PlasticsEurope Deutschland e.V. unter: <http://www.plasticseurope.de/Document/geschäftsbericht-2012.aspx?FolID=2>. Online am 07.01.2014.

PlasticsEurope Deutschland; Baunemann, Rüdiger (2013): Stellungnahme zur Anhörung „Werkstoffe“ der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen. Drucksache, 16/1112 unter: <http://www.landtag.Nordrhein-Westfalen.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMST16-1112.pdf>. Online am 07.01.2014.

Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Online am 06.01.2015.

PROCESSNET (2013): Herstellung von Wasserstoff – Elektrolyse. unter: [http://www.processnet.org/processnet\\_media/FG\\_Chemische\\_Reaktionstechnik-p-8/Chemische\\_Energieforschung-p-89/Herstellung\\_von\\_Wasserstoff\\_Elektrolyse-p-685.pdf](http://www.processnet.org/processnet_media/FG_Chemische_Reaktionstechnik-p-8/Chemische_Energieforschung-p-89/Herstellung_von_Wasserstoff_Elektrolyse-p-685.pdf).

processnet.org : Kraftstoffe aus Kohle. Online am 29.04.2014 unter: [http://www.processnet.org/processnet\\_media/FG\\_Chemische\\_Reaktionstechnik-p-8/Chemische\\_Energieforschung-p-89/Kraftstoffe\\_aus\\_Kohle-p-688.pdf](http://www.processnet.org/processnet_media/FG_Chemische_Reaktionstechnik-p-8/Chemische_Energieforschung-p-89/Kraftstoffe_aus_Kohle-p-688.pdf).

Prognos AG (2013): Die deutsche chemische Industrie 2030VCI-Prognos-Studie. unter: [https://www.vci.de/Downloads/Publikation/Langfassung\\_Prognos-Studie\\_30-01-2013.pdf](https://www.vci.de/Downloads/Publikation/Langfassung_Prognos-Studie_30-01-2013.pdf). Online am 07.01.2014.

Prognos AG (2013): Positionspapier zur Vorbereitung von Initialgesprächen mit der energieintensiven Wirtschaft (Prognos-Gutachten). Drucksache, MMV 16/648 unter: <http://www.landtag.Nordrhein-Westfalen.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMV16-648.pdf>. Online am 19.02.2015.

Prognos AG (2014): Der Wirtschaftsstandort Nordrhein-Westfalen 2030. Aktivieren – Stärken – Ausbauen. unter: [http://www.prognos.com/uploads/tx\\_atwpubdb/150126\\_Prognos\\_Studie\\_Wirtschaftsstandort\\_Nordrhein-Westfalen\\_2030.pdf](http://www.prognos.com/uploads/tx_atwpubdb/150126_Prognos_Studie_Wirtschaftsstandort_Nordrhein-Westfalen_2030.pdf). Online am 23.02.2015.

Pude, Ralf; Werner, Antje; Vollrath, Birgit; Gödeke, Katja (2012): Pflanzen für Industrie und Energie. unter: <http://mediathek.fnr.de/broschuren/bioenergie/energiepflanzen/pflanzen-fur-industrie-und-energie.html>. Online am 05.03.2014.

Pummer, Elena (2013): Wasser als Energieträger – 43. IWASA (Internationales Wasserbau-Symposium Aachen 2013).

Pütter, Hermann (2008): Industrielle Organische Elektrochemie. unter: <http://archiv.aktuelle-wochenschau.de/2006/woche35b/woche35b.html>.

PV-Tech (2008): SunPower claims new 23.4 percent solar cell efficiency record unter: [http://www.pv-tech.org/news/sunpower\\_claims\\_new\\_234\\_percent\\_solar\\_cell\\_efficiency\\_record](http://www.pv-tech.org/news/sunpower_claims_new_234_percent_solar_cell_efficiency_record).

Raey, David; Ramshaw, Colin; Harvey, Adam (2012): Process intensification–engineering for efficiency, sustainability and flexibility. In: *Green Processing and Synthesis*. 1, 1.

Ramshaw, Colin (1999): Process Intensification and Green Chemistry – Green Chemistry. In: *Green Chemistry*, 1.

Raschka, Achim; Carus, Michael (2012): Stoffliche Nutzung von Biomasse – Basisdaten für Deutschland, Europa und die Welt. Online am 05.03.2014.

Razzaq, T.; Glasnov, T. N.; Kappe, C. O. (2009): Accessing Novel Process Windows in a High-Temperature/Pressure Capillary Flow Reactor. In: *Chemical Engineering & Technology*. 32, 11.

Razzaq, T.; Kappe, C. O. (2010): Continuous Flow Organic Synthesis under High-Temperature/Pressure Conditions. In: *Chemistry – An Asian Journal*, 6.

Rechenberg, Ingo (2013): Vorbild Vogelflug: Evolution aerodynamischer Tricks am Vogelflügel. Online am 05.01.2015 unter: [www.bionik.tu-berlin.de](http://www.bionik.tu-berlin.de).

Recyclingportal.eu (2014): Umfrage: Verpackungsbranche schätzt Produktionsausichten positiv ein. Online am 05.03.2014 unter: <http://www.recyclingportal.eu/artikel/32035.shtml>.

Recyclingportal.eu (2014): Regranulate für Russland: DKR sieht Absatzchancen im osteuropäischen Markt. Online am 05.03.2014 unter: <http://www.recyclingportal.eu/artikel/32154.shtml>.

Rehse, Hans Peter; Schmitz, Sibylle (2012): Zahlen zur Landwirtschaft in Nordrhein-Westfalen 2012. unter: <http://www.landwirtschaftskammer.de/wir/pdf/zahlen-landwirtschaft.pdf>. Online am 4.9.2014.

Reiher, Markus (2007): Von der Natur lernen: Theorie der Stickstoff-Fixierung unter milden Bedingungen. In: *Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich*. 152, 3.

Reinhardt, Denise; Ilgen, Florian; Kralisch, Dana; König, Burkhard; Kreisel, Günter (2008): Evaluating the greenness of alternative reaction media. In: *Green Chemistry*. 10, 11.

Renneberg, R.; Süßbier, D.; Berkling, V. (2012): *Biotechnologie für Einsteiger*. ISBN 978-3-827430-47-2.

Reppold, Vera (2011): Abfallbilanz Nordrhein-Westfalen für Siedlungsabfälle 2010/2011. unter: [https://www.umwelt.Nordrhein-Westfalen.de/fileadmin/redaktion/PDFs/umwelt/abfallbilanz/abfallbilanz\\_2010\\_11\\_1.pdf](https://www.umwelt.Nordrhein-Westfalen.de/fileadmin/redaktion/PDFs/umwelt/abfallbilanz/abfallbilanz_2010_11_1.pdf). Online am 14.04.2014.

Reyes, Darwin R.; Iossifidis, Dimitri; Auroux, Pierre-Alain; Manz, Andreas (2002): Micro Total Analysis Systems. 1. Introduction, Theory, and Technology. In: *Analytical Chemistry*. 74, 12.

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH) : Aufbau einer Redox-Flow-Batterie unter: [http://www.isea.rwth-aachen.de/de/energy\\_storage\\_systems\\_technology\\_redox\\_flow\\_batteries/](http://www.isea.rwth-aachen.de/de/energy_storage_systems_technology_redox_flow_batteries/).

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH) : Bioraffinerie NGP2. Online am 08.09.2014 unter: <http://www.avt.rwth-aachen.de/AVT/index.php?id=945>.

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH); Sauer, Dirk Uwe (2014): Stellungnahme zur Anhörung „Energiespeicher“ der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen. Drucksache, 16/1505 unter: <http://www.landtag.Nordrhein-Westfalen.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMST16-1505.pdf>. Online am 06.01.2015.

RIA Novosti (2013): Russland will weiter nach Arktis-Öl bohren unter: <http://de.sputniknews.com/zeitungen/20130926/266956813.html>.

Rieger, Bernhard : Standard-Kunststoffe. unter: [http://www.k-online.de/cipp/md\\_k/lib/all/lob/return\\_download,ticket,g\\_u\\_e\\_s\\_t/bid,891/no\\_mime\\_type,0/~k\\_standard\\_kunststoffe\\_korrigiert.pdf](http://www.k-online.de/cipp/md_k/lib/all/lob/return_download,ticket,g_u_e_s_t/bid,891/no_mime_type,0/~k_standard_kunststoffe_korrigiert.pdf). Online am 09.01.2014.

Riehmer, Steffen; Gass, Michael (2014): Die grüne Bioraffinerie Brensbach – Merkmale nach VDI 6310-1 und nachhaltige Kreislaufwirtschaft.

Roland Berger Strategy Consultants Holding GmbH : Trend Compendium 2030-Trend 4: Climate change & ecosystem at risk. Online am 10.12.2014 unter: <http://www.rolandberger.com/gallery/trend-compendium/tc2030/content/assets/trendcompendium2030.pdf>.

Rongé, Jan; Bosserez, Tom; Martel, David; Nervi, Carlo; Boarino, Luca; Taulelle, Francis; Decher, Gero; Bordiga, Silvia; Martens, Johan A. (2014): Monolithic cells for solar fuels. In: *Chem. Soc. Rev.* 43, 23.

Ross, Julian (2011): Heterogeneous Catalysis, 1st Edition. ISBN 978-0-080956-84-8.

rosseta Technik GmbH : Prinzip Schwungradspeicher unter: <http://www.rosseta.de/fotos/schema1.jpg>.

Rotert, H.Hermann : Eigenschaften von Kunststoffen. Online am 7.1.2014 unter: <http://www.rotertos.de/wiki/wichtige-informationen/eigenschaften-kunststoffe>.

Rottke, Johannes; Grote, Florian; Fröhlich, Holger; Köster, Dirk; Strube, Jochen (2012): Efficient Engineering by Modularization into Package Units. In: *Chemie Ingenieur Technik*.

Rundel, Paul et al. (2013): Speicher für die Energiewende. Online am 14.04.2014.

Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) (05.05.2010) Klimaverträglich, sicher, bezahlbar: 100 % erneuerbare Stromversorgung bis 2050 unter: [http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/AktuellePressemitteilungen/2010/2010\\_02\\_PM\\_100\\_Prozent\\_erneuerbare\\_Stromversorgung\\_bis\\_2050.html](http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/AktuellePressemitteilungen/2010/2010_02_PM_100_Prozent_erneuerbare_Stromversorgung_bis_2050.html)

Sahm, Hermann; Antranikian, Garabed; Stahmann, Klaus-Peter; Takors, Ralf (2013): Industrielle Mikrobiologie. ISBN 978-3-827430-39-7.

SAM Sustainable Asset Management AG (2012): DJSI 2012 Review Results. Online am 12.05.2014.

Sattler, Christian; Pütter, Hermann Noch viele offene Fragen. In: *Von Brennstoffzellen bis Leuchtdioden. Energie und Chemie – Ein Bündnis für die Zukunft* (2008).

Savage, Phillip E. (2012): Algae Under Pressure and in Hot Water. In: *Science*, 6110,

Savage, Phillip E.; Rebacz, Natalie A. (2010): Water Under Extreme Conditions for Green Chemistry – Handbook of Green Chemistry. ISBN 978-3-527688-63-0.

Schaefer, Hans J. (2008): Nachhaltige Synthese durch Elektrolyse. unter: <http://archiv.aktuelle-wochenschau.de/2008/woche34/w34.html>. Online am 24.03.14.

Scheffer, Fritz; Schachtschabel, Paul; Blume, Hans-Peter (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. ISBN 978-3-827413-24-6.

Schildt, J.; Baum, A.; Brodde, K.; Leesch, K. (2011): Textil-Fibel 4: Wissenswertes über Fäden, Fasern und faire Kleidung zum Wohlfühlen. ISBN 978-3-9811689-6-9.

Schill, Sue (2013): Ineos declares commercial cellulosic ethanol online in Florida. In: *BIOMASS Magazine*.

Schlee, D.; Kleber, H.-P. (Hg.): (1991): Wörterbücher der Biologie Teil 1 & Teil 2. ISBN 3-334-00328-0.

Schlögl, Robert (2012): Chemical Energy Storage: "The solar refinery". ISBN 978-3-110264-07-4.

Schmid, Jürgen : Speichermöglichkeiten von Überschuss-Energie mit Wasserstoff oder Methan – ein Vergleich. Online am 15.4.2014 unter: [http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Presse/Pressemitteilungen/2011/111122\\_PowerToGas\\_AnlageIWES\\_pdf.pdf?jsessionid=A83E94287D59F1C236F8A6EE38E4712A?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Presse/Pressemitteilungen/2011/111122_PowerToGas_AnlageIWES_pdf.pdf?jsessionid=A83E94287D59F1C236F8A6EE38E4712A?__blob=publicationFile&v=3).

Schmidt, Volkmar M. (2003): Elektrochemische Verfahrenstechnik: Grundlagen, Reaktionstechnik, Prozessoptimierung. ISBN 978-3-527299-58-4.

Schneider K., Müller, A (1999): Die biologische Stickstoff-Fixierung: Dem Geheimnis eines lebensnotwendigen Prozesses auf der Spur. Online am 06.01.2015 unter: [http://www.uni-bielefeld.de/presse/fomag/S\\_43\\_49.pdf](http://www.uni-bielefeld.de/presse/fomag/S_43_49.pdf).

Schobert, Harold H. (2013): Chemistry of fossil fuels and biofuels. ISBN 978-0-521114-00-4.

Schulte, Andreas (2003): Wald in Nordrhein-Westfalen. ISBN 978-3-402064-81-8.

Schüth, Ferdi (2006): Heterogene Katalyse. Schlüsseltechnologie der chemischen Industrie. In: *Chemie in unserer Zeit*. 40, 2.

Schüth, Ferdi (2009): DIE 50% IDEE – Vom Produkt zur Produktionsanlage in der halben Zeit. unter: [http://processnet.org/processnet\\_media/die+50prozent\\_idee-p-1159.pdf](http://processnet.org/processnet_media/die+50prozent_idee-p-1159.pdf). Online am 04.07.2014.

Schüth, Ferdi (2010): Chemische Energiespeicherung. Online am 14.04.2014 unter: <http://archiv.aktuelle-wochenschau.de/2010/w15/woche15.html>.

Schüth, Ferdi (2011): Controlled nanostructures for applications in catalysis. In: *Physical Chemistry Chemical Physics*. 13, 7.

Schüth, Ferdi (2013): Quo vadis, NanoEnergie? In: *UNIKATE*. 43.

Seeberger, P. H.; Blume, T. (2007): *New Avenues to Efficient Chemical Synthesis*. ISBN 978-3-540-70848-3.

Seiwert, Martin; Hennersdorf, Angela; Kiani-Kress, Rüdiger; Brück, Mario (2011): Alles auf eine Faser. In: *Wirtschaftswoche*, 48.

Sheldon, R. A.; Arends, Isabella; Hanefeld, Ulf (Hg.): (2007): *Green Chemistry and Catalysis: Biocatalysis and Organic Chemistry*. ISBN 978-3-527-30715-9.

Sims, Ralph E. H. (2007): *Bioenergy Project Development & Biomass Supply*. unter: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/biomass.pdf>. Online am 15.4.2014.

Smolinka, Tom; Günther, Martin; Garcke, Jürgen (2011): NOW Studie "Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien" Kurzfassung des Abschlussberichts.

Solar Server : Vergleich Latentwärmespeicher (roter Verlauf) und sensibler Wärmespeicher (blauer Verlauf) unter: <http://www.umweltdatenbank.de/img/latent.gif>.

Specht, Michael; Baumgart, Frank; Feigl, Bastian; Frick, Volkmar; Stürmer, Bernd; Zuberbühler, Ulrich Speicherung von Bioenergie und erneuerbarem Strom im Erdgasnetz. In: *Themen 2009 – Forschungen für globale Märkte erneuerbarer Energien* (April 2010).

Speight, James G. (1999): *The Chemistry and Technology of Petroleum*. ISBN 978-0-824702-17-5.

Spektrum Akademischer Verlag (1998): *Acetylenchemie*. Online am 31.03.2014 unter: <http://www.spektrum.de/lexikon/chemie/acetylenchemie/84>.

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH (1998): *Acetylenchemie*. Online am 02.03.2015 unter: <http://www.spektrum.de/lexikon/chemie/acetylenchemie/84>.

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH (1999): *Knöllchenbakterien*. Online am 02.03.2015 unter: <http://www.spektrum.de/lexikon/biologie/knoellchenbakterien/36459>.

SPIEGEL ONLINE (2009): *Selbstreinigende Materialien: Blütenrein dank Lotus-Effekt* unter: <http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/selbstreinigende-materialien-bluetenrein-dank-lotus-effekt-a-640664.html>.

Springer Gabler Verlag : *Stichwort Bionik* unter: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/1344/bionik-v7.html>.

Staatliche Geologische Dienste der Deutschen Bundesländer (SGD); Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2013): *Stellungnahme zu den geowissenschaftlichen Aussagen des UBA-Gutachtens, der Studie Nordrhein-Westfalen und der Risikostudie des ExxonMobil InfoDialogprozesses zum Thema Fracking*. unter: [http://www.infogeo.de/dokumente/download\\_pool/SN\\_SGD-Fracking-Studien\\_V5\\_0.pdf](http://www.infogeo.de/dokumente/download_pool/SN_SGD-Fracking-Studien_V5_0.pdf). Online am 24.02.2014.

Stahmann, K.-P.; Revuelta, J. L.; Seulberger, H. (2000): Three biotechnical processes using *Ashbya gossypii*, *Candida famata*, or *Bacillus subtilis* compete with chemical ribo<sup>-</sup>avin production. In: *Applied Microbiology and Biotechnology*, 53.

Stankiewicz, Andrzej (2003): Reactive separations for process intensification: an industrial perspective. In: *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 42, 3.

Stankiewicz, Andrzej I.; Moulijn, Jacob A. (2000): Process Intensification Transforming Chemical Engineering. In: *Process Engineering Progress*.

Statistisches Bundesamt (2012): Bruttoinlandprodukt 2011 für Deutschland. unter: [https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressekonferenzen/2012/BIP2011/Pressebrochure\\_BIP2011.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressekonferenzen/2012/BIP2011/Pressebrochure_BIP2011.pdf?__blob=publicationFile). Online am 05.12.2014.

Statistisches Bundesamt (2012): Statistisches Jahrbuch 2012 – Deutschland und Internationales. unter: [https://www.destatis.de/DE/Publikationen/StatistischesJahrbuch/StatistischesJahrbuch2012.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Publikationen/StatistischesJahrbuch/StatistischesJahrbuch2012.pdf?__blob=publicationFile).

Statistisches Bundesamt (2015): Erdgasverbrauch in Deutschland in den Jahren 1998 bis 2013 (in Milliarden Kubikmeter). Online am 23.02.2015 unter: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/41033/umfrage/deutschland---erdgasverbrauch-in-milliarden-kubikmeter/>.

Statistisches Landesamt Nordrhein-Westfalen : Preisentwicklung ausgewählter OPEC-Rohöl in den Jahren 1960 bis 2014 (in US-Dollar je Barrel). Online am 04.12.2014 unter: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/810/umfrage/rohloelpreisentwicklung-otec-seit-1960/>.

Steinbach, Volker (2013): Verfügbarkeiten und Potenziale fossiler Kohlenwasserstoffe und mineralischer Rohstoffe für die chemische Industrie.

Steinbach, Volker (2013): Energierohstoffe im 21. Jahrhundert – Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit fossiler Energierohstoffe. Online am 19.02.2015.

Steinbach, Volker; Wilken, Hildegard (2012): Forschung auf dem Rohstoffsektor in der BGR.

Steinbüchel, Alexander : Cyanophycin – Biosynthese und Abbau. Online am 20.12.2013 unter: <http://mibi1.uni-muenster.de/Biologie.IMMB.Steinbuechel/Forschung/Cyanophycin.html>.

Sterner, Michael (2009): Bioenergy and renewable power methane in integrated 100% renewable energy systems – Limiting global warming by transforming energy systems. ISBN 3-899-58799-5.

Steynberg, André; Dry, Mark (2004): Fischer-Tropsch Technology. ISBN 978-0-080472-79-9.

Stiftung Weltbevölkerung : Weltbevölkerung wächst bis 2050 stärker als angenommen auf 9,6 Milliarden Menschen. Online am 09.01.2014 unter: [http://www.weltbevoelkerung.de/informieren/unsere-themen/bevoelkerungsdynamik/aktuell/news-ansicht/display/weltbevoelkerung-waechst-bis-2050-staerker-alsangenommen-auf-96-milliarden-menschen.html?no\\_cache=1](http://www.weltbevoelkerung.de/informieren/unsere-themen/bevoelkerungsdynamik/aktuell/news-ansicht/display/weltbevoelkerung-waechst-bis-2050-staerker-alsangenommen-auf-96-milliarden-menschen.html?no_cache=1).

Stornetic GmbH : Bedarfsgerechte Schwungradspeicher-Lösungen unter: [http://stornetic.com/assets/content/industrie\\_container\\_de.jpg](http://stornetic.com/assets/content/industrie_container_de.jpg).

Stornetic GmbH : Stored Power unter: <http://stornetic.com/>.

Styring et al. (2011): Carbon Capture and Utilisation in the green economy- Using CO<sub>2</sub> to manufacture fuel, chemicals and materials. Online am 8.12.2014.

SÜDZUCKER (2013): FAQ Zuckerrübe/Zuckerrohr. Online am 5.3.2014 unter: <http://www.suedzucker.de/Pdf/de/FAQ/Zuckerruebe-Zuckerrohr.pdf>.

Syldatk, Christoph; Hauer, Bernhard; May, Oliver : Biokatalyse in der chemischen IndustrieV-AAM-Fachgruppe Biotransformationen. In: *Biospektrum*. 7. Jahrgang, 2.01.

SynBioTA – Innovations- und Technikanalyse der Synthetischen Biologie : Biomaterialien unter: <http://www.tecdesign.uni-bremen.de/typo3/index.php?id=673>.

Syrris : Scaling Up – Flow Chemistry. Online am 09.10.2014 unter: <http://syrris.com/applications/flow-chemistry/scaling-up>.

Syrris : Syrris – Flow reactors, microreactors and productivity tools for R&D Chemists. Online am 09.10.2014 unter: <http://syrris.com/>.

Tamme, Rainer Wärmespeicher: Sonne, Wind und Abwärme sammeln. In: *Von Kohlehalden und Wasserstoff: Energiespeicher – zentrale Elemente der Energieversorgung* (2013).

Tamme, Rainer; Bauer, Thomas; Buschle, Jochen; Laing, Doerte; Müller-Steinhagen, Hans; Steinmann, Wolf-Dieter (2008): Latent heat storage above 120°C for applications in the industrial process heat sector and solar power generation. In: *International Journal of Energy Research*. 32, 3.

Technische Universität Bergakademie Freiberg; Meyer, Bernd (2013): Stellungnahme zur Anhörung „Rohstoffe“ der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen. Drucksache, 16/1062 unter: <http://www.landtag.Nordrhein-Westfalen.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMST16-1062.pdf>. Online am 04.03.2014.

Ter Plastics Polymer Group : Lösungen/Metallersatz. Online am 09.01.2014 unter: <http://www.terhell.de/de/loesungen/metallersatz.php>.

ThalesNano Nanotechnology Inc : Nanotechnology. Online am 09.10.2014 unter: <http://thalesnano.com/>.

ThalesNano Nanotechnology Inc : Nanotechnology – References. Online am 09.10.2014 unter: <http://thalesnano.com/references>.

Thoma, Martin (2014): Zersetzung von Wasser – Elektrolyse: Hoffmanscher Zersetzungsapparat unter: [http://www.martin-thoma.de/chemie/bilder/hoffmanscher\\_zersetzungsapparat.jpg](http://www.martin-thoma.de/chemie/bilder/hoffmanscher_zersetzungsapparat.jpg).

Thomson Reuters (Markets) Deutschland GmbH (2014): Regierung – Keine Einigung auf Klimaziele bei EU-Gipfel unter: <http://de.reuters.com/article/domesticNews/idDEBEEA2I04N20140319>.

Tillmetz, Werner (2013): Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien – Tragende Säulen der Energiewende 2.0. unter: [http://www.now-gmbh.de/fileadmin/user\\_upload/RE\\_Publikationen\\_NEU\\_2013/Publikationen\\_NIP/Wasserstoff-\\_und\\_Brennstoffzellentechnologien\\_-\\_Tragende\\_Saeulen\\_der\\_Energiewende\\_2\\_0.pdf](http://www.now-gmbh.de/fileadmin/user_upload/RE_Publikationen_NEU_2013/Publikationen_NIP/Wasserstoff-_und_Brennstoffzellentechnologien_-_Tragende_Saeulen_der_Energiewende_2_0.pdf). Online am 15.04.2014.

Tipkötter, Nils (2014): Optimierung und Scale-up der enzymatischen Hydrolyse inkl. Ligninabbau. In: *CIT*. 86, 9.

Tremblay, Jean-Francois (2014): China's Feedstock Revolution. In: *Chemical & Engineering News*.

Tuczek, Felix : Wie funktionieren Metallzentren in Proteinen? Von Modellkomplexen zu biomimetischen Reaktionen unter: <http://www.chemie.uni-kiel.de/pages/kielchem/Tuczek.pdf>.

U.S. Geological Survey (2015): Flourspar – Statistics and Information. Online am 24.02.2015 unter: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/flourspar/>.

U.S. Geological Survey (2015): Phosphate Rock – Statistics and Information. Online am 24.02.2015 unter: [http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate\\_rock/](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/).

Umweltbundesamt (UBA) : Chlor-Alkali-Anlagen. Online am 26.02.2015 unter: <http://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industriebereiche/chemische-erzeugnisse-raffinerien/chlor-alkali-anlagen>.

Umweltbundesamt (UBA) (2009): Biologisch abbaubare Kunststoffe. unter: <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3834.pdf>. Online am 07.01.2014.

Umweltbundesamt (UBA) (07.07.2010) Energieziel 2050: 100 Prozent Strom aus erneuerbaren Quellen. Online am 07.01.2015 unter: <http://www.umweltbundesamt.de/presse/presseinformationen/energieziel-2050-100-prozent-strom-aus-erneuerbaren>.

Umweltbundesamt (UBA) (2013): Treibhausgasausstoß in Deutschland 2012 – vorläufige Zahlen aufgrund erster Berechnungen und Schätzungen des Umweltbundesamtes. unter: <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4432.pdf>. Online am 18.03.2014.

Umweltbundesamt (UBA) (2013): Ausbauziele der erneuerbaren Energien. unter: <http://www.umweltbundesamt.de/daten/energiebereitstellung-verbrauch/ausbauziele-der-erneuerbaren-energien>. Online am 20.03.2014.

Union zur Förderung von Öl- und Proteinpflanzen e.V. (ufop) (2013): Geschäftsbericht 2012/2013. Online am 12.03.2014.

United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat) (2011): Cities and Climate Change Global Report on Human Settlements 2011. Online am 02.03.2015.

United States Department of Agriculture (2008): U.S. Biobased Products Market Potential and Projections Through 2025. unter: [www.usda.gov/oce/reports/energy/BiobasedReport2008.pdf](http://www.usda.gov/oce/reports/energy/BiobasedReport2008.pdf).

United States Department of Agriculture (2013): Sugar: World Markets and Trade. unter: <http://usda01.library.cornell.edu/usda/current/sugar/sugar-11-21-2013.pdf>. Online am 05.03.2014.

Universal Lexikon : Stilböstrol unter: [http://universal\\_lexikon.deacademic.com/149137/Stilb%C3%B6strol](http://universal_lexikon.deacademic.com/149137/Stilb%C3%B6strol).

Universität Duisburg : Acetylen und Folgeprodukte. TC IV / 12 unter: <https://www.uni-due.de/tchem/as/skripte/Acetylen.pdf>. Online am 31.03.2014.

URBAN MINING® e.V. : Urban Mining. Von der Kreislaufwirtschaft zur Rohstoffindustrie. Online am 24.02.2015 unter: <http://www.urban-mining-verein.de/index.php?id=92>.

Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (2013): VCI-Prognos-Studie – Die deutsche chemische Industrie 2030.

Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (2012): Factbook 05 – Die Formel Ressourceneffizienz. unter: <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/media-weitere-downloads/dokumente/2012-06-12-vci-factbook-05-01-gesamt-pdf.pdf>. Online am 06.02.2014.

Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (2012): Kurzfassung der VCI-Prognos-Studie – Die deutsche chemische Industrie 2030.

Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (2013): Synergieeffekte sparen Kosten. unter: <https://www.vci.de/langfassungen-rtf/standortvorteile.rtf>.

Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (2013): Ein Zwischenbericht des Verbands der Chemischen Industrie: “Zukunft der Energiespeicher”. unter: <https://www.vci.de/langfassungen-pdf/vci-positionspapier-zukunft-der-energiespeicher.pdf>. Online am 15.04.2014.

Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (2013): Daten und Fakten zum Thema: Rohstoffbasis der chemischen Industrie. unter: [www.vci.de/Downloads/Top-Thema/DF\\_Rohstoffbasis.pdf](http://www.vci.de/Downloads/Top-Thema/DF_Rohstoffbasis.pdf). Online am 05.03.2014.

Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (2014): Unternehmensstruktur NRW-Chemie / Spartenstruktur NRW-Chemie.

Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (2014): Auf einen Blick: Chemische Industrie 2014. unter: <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/vci-flyer-chemieindustrie-2014-rz-webds.pdf>.

Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (2015): Technologische Optionen zur flexiblen Nutzung von elektrischer Energie und Energiespeichern in der Chemieindustrie (finaler Entwurf eines Diskussionspapiers).

Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V (VDE) (2008): Funktionsschema Pumpspeicherkraftwerk. Positionspapier zur Wasserkraft.

Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V (VDE) (2012): Energiespeicher für die Energiewende- Speicherungsbedarf und Auswirkungen auf das Übertragungsnetz für Szenarien bis 2050. unter: [http://www.chemieingenieurwesen.de/VDE-Studie\\_Energiespeicher\\_Kurzfassung.pdf](http://www.chemieingenieurwesen.de/VDE-Studie_Energiespeicher_Kurzfassung.pdf). Online am 22.09.2014.

Verband der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft e.V. (VIK); Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (2013): Positionspapier Wasserstoffeinspeisung in Erdgasnetze. Online am 04.03.2015.

Verband der ölsaatenverarbeitenden Industrie in Deutschland e.V. (OVID) (2013): Daten & Fakten ölhaltige Pflanzen. Online am 05.03.2014 unter: <http://www.ovid-verband.de/unsere-branchen/daten-und-grafiken/>.

Verband kommunaler Unternehmen e.V. (VKU): Informationspapier des VKU zu biologisch abbaubaren Kunststoffen. unter: <http://www.vku.de/abfallwirtschaft/abfallbehandlung/biologische-abfallbehandlung/entsorgung-biokunststoffe.html>. Online am 07.01.2014.

Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (2014): Klassifikation und Gütekriterien von Bioraffinerien – VDI-6310 Blatt 1 Entwurf. unter: [https://www.vdi.de/uploads/tx\\_vdirili/pdf/2069986.pdf](https://www.vdi.de/uploads/tx_vdirili/pdf/2069986.pdf). Online am 24.07.2014.

Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas e.V. (2013): Netzentwicklungsplan Gas 2012 der deutschen Fernleitungsnetzbetreiber. unter: [http://www.fnb-gas.de/files/130310\\_netzentwicklungsplan\\_gas\\_2012.pdf](http://www.fnb-gas.de/files/130310_netzentwicklungsplan_gas_2012.pdf). Online am 15.04.2014.

Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas e.V. (2014): Fernleitungsnetze – Zahlen und Fakten. Online am 15.04.2014 unter: <http://www.fnb-gas.de/de/fernleitungsnetze/zahlen-und-fakten/zahlen-und-fakten.html>.

Vereinigung Rohstoffe und Bergbau e.V. (VRB) (2014): Fakten und Zahlen: Der Beitrag der Rohstoffindustrie zur Gesamtwirtschaftlichen Wertschöpfung unter: <http://www.v-r-b.de/pages/layout-1sp.php?idpage=15>.

Vilkner, Torsten; Janasek, Dirk; Manz, Andreas (2004): Micro Total Analysis Systems. Recent Developments. In: *Analytical Chemistry*. 76, 12.

Vogel Business Media GmbH & Co. KG (2008): RWE nimmt Algenzucht-Pilotanlage zur Kohlendioxid-Konversion in Betrieb. Online am 21.05.2014 unter: [http://www.process.vogel.de/anlagen\\_apparatebau/aufbereitung/articles/153304/](http://www.process.vogel.de/anlagen_apparatebau/aufbereitung/articles/153304/).

Vogel Business Media GmbH & Co. KG (2014): So wird die Elektrolyse zum Joker im Energiemarkt unter: [http://www.process.vogel.de/anlagenbau\\_effizienz/articles/435084/](http://www.process.vogel.de/anlagenbau_effizienz/articles/435084/).

Vogt, Regine et al. (2006): Beitrag der Abfallwirtschaft zur nachhaltigen Entwicklung in Deutschland. unter: <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/2899.pdf>. Online am 13.03.2014.

Voß, Alfred (2014): Energiewende – Quo vadis? unter: [http://www2.ier.uni-stuttgart.de/publikationen/pb\\_pdf/Stuttgart%202014\\_02%20Energiewende%20Rotary%20%20Vortrag.pdf](http://www2.ier.uni-stuttgart.de/publikationen/pb_pdf/Stuttgart%202014_02%20Energiewende%20Rotary%20%20Vortrag.pdf). Online am 24.02.2015.

Wacker Chemie AG : Silicone – Verbindungen und Eigenschaften. unter: [http://www.wacker.com/cms/media/publications/downloads/6415\\_DE.pdf](http://www.wacker.com/cms/media/publications/downloads/6415_DE.pdf). Online am 09.01.2014.

Wagemann, Kurt; Hirth, Thomas; Popp, Werner (2010): Verbundvorhaben Lignocellulose-Bioraffinerie (Phase 2) – Aufschluss lignocellulosehaltiger Rohstoffe und vollständige stoffliche Nutzung der Komponenten. unter: [http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Landwirtschaft/Bioenergie-NachwachsendeRohstoffe/Bioraffinerie-Lignocellulose.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Landwirtschaft/Bioenergie-NachwachsendeRohstoffe/Bioraffinerie-Lignocellulose.pdf?__blob=publicationFile).

Wagner, Friedrich (2014): Electricity by intermittent sources. An analysis based on the German situation 2012. In: *The European Physical Journal Plus*, 129:20.

Wang, Guang-Hui; Hilgert, Jakob; Richter, Felix Herrmann; Wang, Feng; Bongard, Hans-Josef; Spliethoff, Bernd; Weidenthaler, Claudia; Schüth, Ferdi (2014): Platinum–cobalt bimetallic nanoparticles in hollow carbon nanospheres for hydrogenolysis of 5-hydroxymethylfurfural. In: *Nature Materials*. 13, 3.

Weingärtner, Lioba; Trentmann, Claudia (2011): *Handbuch Welternährung*. ISBN 978-3-593393-54-4.

Weizsäcker, Ernst Ulrich von; Desha, Cheryl (2010): *Faktor Fünf – Die Formel für nachhaltiges Wachstum*. ISBN 3-426-27486-8.

Wikipedia : Acetylsalicylsäure. Online am 05.01.2015 unter: <http://de.wikipedia.org/wiki/Acetylsalicyls%C3%A4ure>.

Wikipedia : Arzneistoff. Online am 05.01.2015 unter: <http://de.wikipedia.org/wiki/Arzneistoff>.

Wikipedia : Haber-Bosch-Verfahren. Online am 12.01.2015 unter: <http://de.wikipedia.org/wiki/Haber-Bosch-Verfahren>.

Wiles, Charlotte; Watts, Paul (2011): *Micro Reaction Technology in Organic Synthesis*. ISBN 978-1-439824-71-9.

Wirth, Thomas : *Microreactors in Organic Synthesis and Catalysis*. ISBN 978-3-527-31869-8.

Wirtschaftsvereinigung Kunststoff WVK (2012): *Konjunkturbericht der deutschen Kunststoff-Industrie*. unter: [http://www.wv-kunststoff.org/images/pdfs/WVK-Reporting\\_Oktober\\_2012\\_V1c.pdf](http://www.wv-kunststoff.org/images/pdfs/WVK-Reporting_Oktober_2012_V1c.pdf). Online am 13.01.2014.

WirtschaftsWoche Green (2013): *Rohstoffe: Bioraffinerien machen Abfall zu Erdöl-Ersatz*. Online am 23.07.2014 unter: <http://green.wiwo.de/rohstoffe-bioraffinerien-machen-abfall-zu-erdoel-ersatz/>.

wissen.de : *Der Lotus-Effekt* unter: <http://www.wissen.de/der-lotus-effekt>.

Wittwer, Christof (2013): *Wie Batteriespeicher für Photovoltaikanlagen der Energiewende nützen können*. In: *et Energiewirtschaftliche Tagesfragen*.

Wong, Tak-Sing (2011): *Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity*. In: *Nature*, 477.

World Health Organization (WHO) : *World Health Statistics 2011*. Online am 19.02.2015.

WWF Deutschland (2013): *Fleisch frisst Land*. unter: [http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF\\_Fleischkonsum\\_web.pdf](http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF_Fleischkonsum_web.pdf). Online am 08.12.2014.

[www.diebrennstoffzelle.de](http://www.diebrennstoffzelle.de) : *Kvaerner-Verfahren*. Online am 02.03.2015 unter: <http://www.diebrennstoffzelle.de/wasserstoff/herstellung/kvaerner.shtml>.

Wydra, Sven (2010–2013): Weiße Biotechnologie – Stand und Perspektiven der industriellen Biotechnologie für nachhaltiges Wirtschaften. Online am 02.07.2014 unter: <https://www.tab-beim-bundestag.de/de/untersuchungen/uI0023.html>.

Z\_punkt GmbH (2008): Megatrends. unter: [http://www.internationalmonitoring.com/fileadmin/Downloads/External\\_Monitoring/Z\\_Punkt\\_Die\\_20\\_wichtigsten\\_Megatrends\\_x.pdf?PHPSESSID=a86e3c449feeb354c42fed817cc443a1](http://www.internationalmonitoring.com/fileadmin/Downloads/External_Monitoring/Z_Punkt_Die_20_wichtigsten_Megatrends_x.pdf?PHPSESSID=a86e3c449feeb354c42fed817cc443a1). Online am 19.02.2015.

Z\_punkt GmbH (2013): Megatrends update. unter: [http://www.z-punkt.de/fileadmin/be\\_user/D\\_Publikationen/D\\_Giveaways/Megatrends\\_Update\\_DE.pdf](http://www.z-punkt.de/fileadmin/be_user/D_Publikationen/D_Giveaways/Megatrends_Update_DE.pdf). Online am 10.12.2014.

Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH (ZEW); Niedersächsisches Institut für Wirtschaftsforschung e.V. (NIW) (2014): Innovationsindikatoren Chemie 2014. unter: <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/kurzstudie-innovationsindikatoren-chemie-2014-von-zew-und-niw.pdf>.

Ziaie B, Baldi A, Lei M, Gu Y, Siegel RA. (2004): Hard and soft micromachining for BioMEMS: review of techniques and examples of applications in microfluidics and drug delivery. In: *Advanced Drug Delivery Reviews*. 56, 2.

Zoerner, Thorsten : Schwarzstart: Stromausfall – Die Sekunden nach dem Blackout. Online am 02.03.2015 unter: <http://de.slideshare.net/zoernert/schwarzstartfhigkeit>.

Zwilling, Martin (2013): Grafik Valley of Death. Online am 07.07.2014 unter: <http://blogs-images.forbes.com/martinzwilling/files/2013/02/valley-o>.





