

Metastudie: Transformationspfade für die chemische Industrie in Deutschland

18. September 2018

Endfassung

Leitautoren: Dr. Roland Geres, Andreas Kohn

Autorenteam: Dr. Christian Pacher, Marcus Hoffmann, Daniel Scholz, Philipp Geres

Haftungsausschluss

Die vorliegende Studie wurde unabhängig im Auftrag des Verbands der Chemischen Industrie e.V.-VCI durch die FutureCamp Climate GmbH (FutureCamp) erstellt.

Zur Sicherstellung der Fehlerfreiheit der in dieser Studie dargestellten Informationen wurden angemessene Maßnahmen getroffen. Dennoch gibt FutureCamp keine Zusicherungen und Gewährleistungen für die Richtigkeit der getroffenen Aussagen und übernimmt keine Haftung für Ungenauigkeiten und Unvollständigkeiten. Gegenüber Parteien, die diese Studie nutzen, wird weder jetzt noch in Zukunft durch FutureCamp, seine Mitarbeiter oder Vertreter eine ausdrückliche oder implizite Zusicherung oder Gewährleistung gegeben oder eine Verantwortung oder Haftung übernommen. Jegliche Haftung ist hiermit ausdrücklich ausgeschlossen.

Inhalt

1	Executive Summary.....	4
2	Einleitung und Ziel der Metastudie.....	6
3	Methodik und thematische Schwerpunkte.....	8
3.1	Treibhausgasrelevanz	8
3.2	Grundannahmen, Methoden und Kernaussagen der Studien.....	8
3.3	Technologien und Prozesse.....	9
3.4	Rohstoffe.....	9
3.5	Energiesystem	9
3.6	Interdependenzen: Sektorkopplung und Circular Economy	9
3.7	Politik und Regulierung.....	10
3.8	Veränderungen auf der Nachfrageseite	10
3.9	Kosten	10
4	Die Studien im Überblick.....	11
4.1	Inhaltliche Schwerpunkte.....	11
4.2	Grundannahmen der Studien	12
4.3	BDI.....	12
4.4	DENA.....	13
4.5	Dechema	14
4.6	BMWi.....	15
4.7	ESYS	16
4.8	MWV.....	17
5	Qualität der Studien	18
5.1	BDI-Studie.....	18
5.2	DENA.....	19
5.3	Dechema	20
5.4	BMWi.....	21
5.5	ESYS	22
5.6	MWV.....	23
6	Synthese und Schlussfolgerungen	23
6.1	Technologien zur Emissionsreduktion	25
6.2	Rohstoffe.....	27
6.3	Energiesysteme	28
6.4	Interdependenzen mit Schwerpunkt Circular Economy	30
6.5	Politik.....	32
6.6	Nachfrage	34
6.7	Vergleich der Kosten	34
6.8	Übergreifende Schlussfolgerungen	37

1 Executive Summary

Diese Metastudie untersucht anhand von sechs Studien die Implikationen der langfristigen deutschen Klimaschutzziele für die Chemieindustrie. Das Ziel der Bundesregierung, die Treibhausgasemissionen (THG) in Deutschland bis zum Jahr 2050 um 80 bis 95% gegenüber 1990 zu senken, ist eine immense Herausforderung. Die Vorgabe ist jedoch kohärent mit den EU-Klimazielen und dem Pariser Klimaschutzabkommen. Das deutsche Klimaschutzziel impliziert so weitgehende Veränderungen, dass von einer Transformation von Wirtschaft und Gesellschaft gesprochen wird. Diese Metastudie untersucht sechs aktuelle Studien zu diesem Thema. Zweck dieser Metastudie ist die Vorbereitung der Arbeiten des VCI an einer Roadmap für die Chemieindustrie.

Die gegenwärtigen Klimaschutzmaßnahmen genügen nicht zur Erreichung der vorgenannten Ziele. Die Mehrzahl der untersuchten Studien ergibt, dass die Fortführung heutiger Maßnahmen bis zum Jahr 2050 zu Minderungen der Treibhausgasausstoßes um ca. 60% gegenüber 1990 führt. Bereits diese Minderungen führen zu erheblichen Kosten.

Die Akzeptanz erforderlicher weiterer Maßnahmen und damit verbundener Belastungen und eine effektive Implementierung sind zentrale Herausforderungen für ein Erreichen der Ziele. Trotz beachtlicher Fortschritte der vergangenen Jahre zeigen Extrapolationen, dass die Ziele der Energiewende ohne weitere Maßnahmen teilweise sehr deutlich verfehlt werden. Die Studien basieren oft auf stark idealisierenden Annahmen zur Implementierung der vorgeschlagenen Maßnahmen. Umsetzungshürden werden nur teilweise systematisch untersucht. Deshalb sind viele der getroffenen Aussagen tendenziell optimistisch.

Um die Emissionen um 80% zu senken, müssen in allen Sektoren bestehende Strukturen verändert werden. Erforderlich ist ein weitgehender Umbau der Stromerzeugung hin zu Erneuerbaren Energien und eine deutlich verstärkte Sektorenkopplung. Sektoren wie Gebäude und Verkehr müssen zudem weitgehend klimaneutral werden. Dieses Ziel kann noch ohne den Einsatz von CCS und eventuell auch ohne einen umfassenden Einsatz von Power-to-X (PtX) erreicht werden. Biomasse wird für Bereiche wie den Luftverkehr und die Industrie benötigt. Die volkswirtschaftlichen Kosten einer Minderung um 80% hängen stark davon ab, ob dies im nationalen Alleingang oder im Rahmen intensiver internationaler Kooperation erfolgt. Insgesamt werden sie als verkraftbar eingeschätzt. Die betriebswirtschaftliche Perspektive wird hingegen kaum beleuchtet, insbesondere nicht hinsichtlich der Wettbewerbsfähigkeit der Wirtschaft. Dies gilt auch für die anderen untersuchten Szenarien.

Das 95%-Ziel kann erreicht werden, jedoch nur unter sehr anspruchsvollen zusätzlichen Annahmen. Hierzu ist eine vollständige Defossilisierung der Stromerzeugung und der industriellen Wärmeerzeugung erforderlich. Das Gasnetz wird zu einem saisonalen Energiespeicher, flexible Kraftwerke auf Basis von Power-to-Gas (PtG) gewährleisten die Versorgungssicherheit. Die Sektoren Verkehr und Gebäude müssen klimaneutral werden. Außerdem sind umfassende Importe von Kohlenwasserstoffen aus Power-to-X auf Basis Erneuerbarer Energien aus dem Ausland notwendig. Dies ist mit entsprechenden Investitionen im In- und Ausland verbunden. In der Industrie sind große Technologiesprünge und der Einsatz von CCS unumgänglich. Die verbleibenden Emissionen würden der Landwirtschaft zukommen, außerdem verbleiben geringfügige Restemissionen in Industrie und Abfallwirtschaft.

Alle Szenarien erfordern zeitnahe Technologieentscheidungen ab den frühen 20er Jahren. Außerdem besteht ein hoher Bedarf für Forschung und Entwicklung sowie Markteinführungs- oder Markthochlaufprogramme. Hinsichtlich der Technologieentscheidungen gibt es erhebliche Spielräume. So können Transformationspfade, die auf einem breiten Technologie- und Energieträgermix basieren, bis 2050 erheblich günstiger sein als solche die verstärkt auf strombasierte Anwendungen setzen.

Fossile Kraftwerke, insbesondere Gas (auch KWK), behalten langfristig eine wichtige Rolle. Sie dienen mit erheblichen Kapazitäten vorrangig der Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit bis 2050. Weil für sie jedoch aufgrund der Entwicklungen eine stark abnehmende Zahl an Volllaststunden erwartet wird, besteht weiterhin großer Druck hinsichtlich Entscheidungen zum Ausbau Erneuerbarer Energien, der Netze, aber auch des Strommarktdesign, der Systemdienlichkeit und Verbrauchsflexibilisierung.

Die Studien lassen offen, wie der für die energieintensive Industrie notwendige Schutz vor Carbon Leakage nach 2030 aussehen könnte. In Studien wird durchgängig ein umfassender Schutz vor Carbon Leakage unterstellt, falls dieser über 2030 hinaus wie bisher erforderlich ist. Diese Annahme ist in der Regel so definiert, dass der Industrie keine höheren CO₂-Kosten als zum Zeitpunkt der Erstellung der Studien entstehen. Allerdings stellen sowohl die Entwicklungen der CO₂-Preise im Jahr 2018 in Folge der Revision des EU-Emissionshandels als auch die deutlichen Kürzungen der kostenlosen Zuteilung diese Annahme fundamental infrage. Die Industrie ist dadurch bereits jetzt einer merklichen und steigenden Kostenbelastung ausgesetzt. Ungeklärt bleibt in den Studien, wie ein Carbon Leakage Schutz, der derzeit auf Basis kostenloser Zuteilung und Strompreiskompensation erfolgt, künftig gestaltet werden könnte.

Auf den Rohstoffbedarf der Chemieindustrie finden die untersuchten Studien keine eindeutige Antwort. Zum Teil wird davon ausgegangen, dass dieser nicht vollständig defossilisiert werden kann. In der Folge ergibt sich ein Bedarf für CCS und für CCU. Vor allem mit Blick auf CCS bedeutet dies, mit erheblichen Akzeptanzproblemen umzugehen. Eine wichtige Option zur Defossilisierung besteht in der Nutzung von Biomasse. Diese ist allerdings nur stark limitiert verfügbar. Der Rohstoffbedarf kann auch über Power-to-Liquids (PtL) gelöst werden, daraus folgen Implikationen für Stromerzeugung und -verteilung sowie Importe von Strom oder PtL. In allen Fällen hat dies auf absehbare Zeit höhere Kosten zur Folge.

Die politischen Handlungsempfehlungen der Studien sind in Bezug auf die Chemieindustrie wenig spezifisch. Mit Blick auf den deutschen Klimagesetzgebungsprozess ist der bestehende europäische Rahmen in der Klima- und Energiepolitik insgesamt zu wenig thematisiert. Dies betrifft die EU-einheitliche Regulierung durch den Emissionshandel ebenso wie die national heruntergebrochenen Komponenten des Effort Sharing und weitere Rechtsakte wie die Erneuerbare Energien-Richtlinie. Dies gilt insbesondere für die in diesen Instrumenten enthaltenen Flexibilitätsoptionen für die Mitgliedsstaaten, die auch für die Flexibilisierung sektoraler Zielsetzungen genutzt werden könnten.

Die Entwicklung der Nachfrage nach Produkten der Chemieindustrie ist in den Studien zu wenig thematisiert. In der Regel wird mit dem Thema der Nachfrage nicht oder über pauschale Annahmen umgegangen. Die Ausnahme hiervon sind Synfuels (PtL). Die Betrachtung der Nachfrageseite sollte in einer branchenspezifischen Roadmap granularer erfolgen. Mögliche Emissionsreduktionsbeiträge der Chemieindustrie für andere Sektoren - z. B. Produktanwendungen, Circular Economy, Integration Erneuerbarer Energien, CCU – sind nicht expliziter Gegenstand der untersuchten Studien. Zu prüfen wäre, ob auch dies Gegenstand in einer eigenen Roadmap sein soll.

2 Einleitung und Ziel der Metastudie

Mit dem Pariser Übereinkommen im Jahre 2015 haben sich alle Staaten der Welt dazu verpflichtet, ihre Beiträge zur Begrenzung der globalen Durchschnittstemperatur auf unter 2°C zu leisten und eine Begrenzung auf 1,5°C anzustreben. Gemäß dem Pariser Übereinkommen soll in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts Treibhausgasneutralität erreicht werden. Die Industrienationen haben sich bereits 2009 in Kopenhagen gemeinschaftlich das Ziel gesetzt, die Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) bis 2050 um 80 bis 95% zu verringern. Die EU und Deutschland haben sich ein identisches Reduktionsziel gesetzt. Der „Klimaschutzplan 2050“ der Bundesregierung hat den Weg für Deutschland zur Erreichung der Ziele 2050 konkreter beschrieben. Unter dem Übereinkommen von Paris wurde er als deutsche Langfriststrategie eingereicht. Gegenwärtig arbeitet die Bundesregierung daran, den Klimaschutzplan 2050 mit konkreten Maßnahmen zu unterlegen.

Die chemische Industrie ist eine energieintensive Industrie und die einzige Industrie, bei der Kohlenstoff sowohl die Hauptbasis für die Energieversorgung als auch die stoffliche Grundlage für viele Produkte darstellt. Zwar hat der Sektor seine THG-Emissionen aus Energieverbrauch und Prozessen seit 1990 deutlich reduziert, jedoch verantwortet die chemische Industrie nach wie vor einen signifikanten Anteil an den Treibhausgas-Emissionen in Deutschland und Europa. Im Jahre 2015 war die Grundstoffchemie mit Emissionen von 23 MtCO_{2e} der Industriesektor mit den zweithöchsten Treibhausgas-Emissionen in Deutschland¹. Sie verursacht demnach 12% aller Industrieemissionen in Deutschland. Hinzu kommen Emissionen petrochemischer Vorprodukte. Die Treibhausgasrelevanz des Sektors im Gesamtkontext einer Transformation von Wirtschaft und Gesellschaft erhöht sich zudem nochmals, wenn auch einerseits die Vorkette der rohstoffliefernden Mineralölindustrie und andererseits die Reduktionseffekte aus der Anwendung chemischer Erzeugnisse berücksichtigt werden. In dieser Perspektive erweist sich die Chemieindustrie nicht nur als Verursacher von Treibhausgasen, sondern auch als einer der wichtigsten Enabler auf dem Weg zu einer umfassenden Senkung von THG-Emissionen.

Über einen Transformationspfad für eine weitgehend treibhausgasneutrale chemische Industrie bis 2050 existieren bislang noch keine klaren Vorstellungen. Aufgrund der Langfristziele in der EU und Deutschland, zu denen sich die Chemie bekennt, ist es sinnvoll strategische Überlegungen zu einem möglichen Transformationspfad anzustellen.

Inzwischen sind mehrere Studien vorgelegt worden, die in unterschiedlichen Szenarien mögliche Wege zur Erreichung der Minderungsziele von 80 bis 95% für das Energiesystem, die Industrie und die Gesamtgesellschaft aufzeigen. Während die chemische Industrie zumeist nicht im Zentrum der Betrachtungen dieser Studien steht, so erlauben sie doch Rückschlüsse auf mögliche Transformationspfade hin zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie.

Ziel dieser Metastudie ist es, eine Reihe dieser Studien systematisch auf relevante Inhalte und Aussagen zu untersuchen und die Erkenntnisse dieser Studien zu einem größeren Bild zusammenzufügen. Es werden sowohl Gemeinsamkeiten der Studien aufgezeigt, als auch Lücken und Widersprüche. Vorrangig sollen die Ergebnisse dieser Metastudie Grundlagen für die Erarbeitung einer Roadmap zur Transformation der chemischen Industrie liefern. Deshalb wird diese Metastudie besonderes Augenmerk auf für die Chemieindustrie besonders relevante Aussagen einschließlich Handlungsempfehlungen bzgl. Politik und Forschung und Technologieentwicklung richten, welche aus den verschiedenen Studien hervorgehen sowie auf Schlussfolgerungen, die ihrerseits als vorgegebene Elemente in die Erarbeitung einer Roadmap einfließen können.

Folgende sechs Studien werden in der Metastudie untersucht:

- Die Studie „Klimapfade für Deutschland“ im Auftrag des Bundesverbands der Deutschen Industrie (im Folgenden auch: BDI).
- Die Leitstudie „Integrierte Energiewende“ der Deutschen Energieagentur (im Folgenden auch: DENA).

¹ Quelle: BDI, S. 133, ohne Raffinerien, die dort statistisch dem Umwandlungssektor zugeordnet werden. Die direkten Emissionen der im Emissionshandel erfassten Chemieindustrie betragen laut VET-Bericht 2015 17,9 Mt CO_{2e} (ohne Raffinerien).

- Die Studie „Low Carbon energy and feedstock for the European Chemical Industry“ der Dechema Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie (im Folgenden auch: DECHEMA).
- Die Studie „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“ im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (im Folgenden auch: BMWi).
- Die Studie „Sektorkopplung – Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems“ aus der Schriftenreihe „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS) der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina, der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften, Acatech, und Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (im Folgenden auch: ESYS).
- Die Studie „Status und Perspektiven flüssiger Energieträger in der Energiewende“ im Auftrag des Mineralölwirtschaftsverbands (im Folgenden auch: MWV).

Vorgehen der Metastudie:

Zunächst werden in Kapitel 3 die wichtigsten inhaltlichen Analysekatoren erläutert, die aus Sicht der chemischen Industrie von besonderem Interesse sind. Diese sind:

- Treibhausgasrelevanz der Chemieindustrie;
- Grundannahmen, Methoden und Kernaussagen der Studien;
- Technologien;
- Rohstoffe;
- Interdependenzen – Sektorkopplung und Circular Economy;
- Politik und Regulierung;
- Veränderungen auf der Nachfrageseite;
- Kosten der Transformation.

In Kapitel 4 werden die inhaltlichen Schwerpunkte und die Grundannahmen der Studien überblicksartig dargestellt. Anschließend werden alle Studien knapp hinsichtlich der von ihnen untersuchten Fragestellung, der angewandten Methoden und der Kernergebnisse charakterisiert. Eine ausführliche Darstellung der Studien findet sich im Anhang.

In Kapitel 5 wird die wissenschaftliche Qualität der Studien untersucht. Das Kapitel diskutiert Methodik und Annahmen der einzelnen Studien im Hinblick auf ihre Eignung für die Beantwortung der jeweils gestellten Forschungsfragen.

Der Syntheseteil der Metastudie folgt in Kapitel 6. In diesem werden die Ergebnisse der untersuchten Studien auf Basis der inhaltlichen Untersuchung und der Bewertung von Methodik und Annahmen diskutiert. Außerdem werden die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst und diskutiert, inwiefern die Ergebnisse dieser Studie in eine Roadmap für eine weitgehend treibhausgasneutrale chemische Industrie in Deutschland Eingang finden können.

Der Anhang enthält eine ausführliche Darstellung der betrachteten Studien, dabei erfolgt eine Zusammenfassung und Überblick zu allen Studien, jeweils unter den Gesichtspunkten „Forschungsfrage“, „Methoden“, „Annahmen“ und „Ergebnisse“. Unter letzterer Überschrift werden die Studien entlang der in Kapitel 3 entwickelten Analysekatoren beschrieben. Außerdem enthält der Anhang Hinweise auf weitere Studien, die für die Fragestellung relevant sein könnten, jedoch im Rahmen dieser Metastudie nicht ausgewertet werden können. Dennoch könnten die dort erwähnten weiteren Studien wertvolle Beiträge zur zu entwickelnden Roadmap liefern.

3 Methodik und thematische Schwerpunkte

Dieser Abschnitt erläutert die konzeptionelle und inhaltliche Vorgehensweise der Studie. Er erläutert, welche Themenbereiche für die Auswertung der Studien von besonderem Interesse sind. Wo nötig, erklärt dieser Abschnitt, was sich hinter bestimmten Begriffen verbirgt und warum ein Themenbereich für die chemische Industrie von Interesse ist.

3.1 Treibhausgasrelevanz

Die Treibhausgasrelevanz der Chemieindustrie ist die übergeordnete Bezugsgröße der Untersuchung. Die analysierten Studien haben unterschiedliche Schwerpunktsetzungen und berücksichtigen die Chemieindustrie dabei in ganz verschiedener Weise. In Vorbereitung einer Roadmap jedoch gilt es, chemie-spezifische Schlussfolgerungen zu ziehen. Die Treibhausgasrelevanz bildet den hierfür notwendigen konzeptuellen Zugang. Sie ist im Folgenden erläutert.

Die Chemieindustrie verursacht direkte und indirekte Emissionen. Direkte Emissionen entstehen durch chemische Prozesse wie z. B. die Ammoniaksynthese oder die Produktion von Salpetersäure und durch eigene Energieerzeugung zur Deckung des Strom- und vor allem Wärmebedarfs. Indirekte Emissionen entstehen insbesondere durch den Bezug von Energie und darüber hinaus die Bereitstellung fossiler Rohstoffe und die Nutzung der chemischen Produkte.

Der oben genannte Anteil von rund 12% aller Industrieemissionen in Deutschland beinhaltet weder Emissionen aus der Nutzung der in der Chemieindustrie hergestellten Produkte (z. B. Kunststoffe und Kraft- und Brennstoffe) noch Beiträge der Chemieindustrie zur Vermeidung von Emissionen in anderen Sektoren. Außerdem ist in dieser Zahl die Vorkette unberücksichtigt, also die Herstellung von Rohstoffen durch die Raffinerieindustrie und deren Vorkette.

Die Chemieindustrie ist also auf vielfältige Weise an verschiedenen Stellen von politischen Zielen und Maßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen berührt und es existieren zahlreiche Wechselwirkungen. Emissionsreduktionen können auf verschiedene Weise bei verschiedenen Quellen und in unterschiedlicher Priorisierung herbeigeführt werden.

Für die Zwecke dieser Metastudie und dafür notwendige Kategorisierungen erfolgt deshalb eine Orientierung einerseits entlang der Emissionsanteile und -quellen der Chemieindustrie, andererseits entlang der Hauptinhalte der untersuchten Studien. In dieser Studie wird deshalb die Mineralölwirtschaft als Teil der Chemieindustrie betrachtet. Wo sinnvoll, wird begrifflich unterschieden zwischen Mineralölwirtschaft und Grundstoffchemie.

Für die direkten Emissionen sind industrielle Produktionsprozesse und dafür verwendete Technologien Gegenstand der untersuchten Studien. Die genutzten Rohstoffe spielen durch den Bezug zu Produktionsprozessen sowohl für direkte als auch indirekte Emissionen eine Rolle. Gleiches gilt für das Energiesystem, insbesondere mit Blick auf den eigenen Strom- und Wärmebedarf, aber auch Produkte, z. B. der Mineralölwirtschaft. Zwischen den genannten Kategorien bestehen Interdependenzen. Schließlich werden Produktion und damit verbundene Emissionen auch deutlich beeinflusst durch die Nachfrage nach Erzeugnissen der chemischen Industrie.

In den untersuchten Studien finden sich Aussagen zu diesen Aspekten und den Kosten, die mit der Erfüllung gesetzter politischer Ziele verbunden sind. Es finden sich darüber hinaus auch Empfehlungen und Forderungen an die Politik in Deutschland.

3.2 Grundannahmen, Methoden und Kernaussagen der Studien

Zum Verständnis der Ergebnisse der untersuchten Studien werden die wichtigsten Grundannahmen wiedergegeben, insbesondere zu solchen Parametern, zu denen sich in allen Studien Annahmen finden, zum Beispiel zu CO₂- oder Ölpreisen. Gleiches gilt für wichtige methodische Aspekte, etwa die Nutzung von Szenarien oder die Betrachtungsebene „Volkswirtschaft“ vs. „Entscheider“. Wichtig ist

auch, welche Kernaussagen in den Studien besonders hervorgehoben werden, weil daraus Intentionen erkennbar werden.

3.3 Technologien und Prozesse

Unter diese Kategorie fallen sowohl Anlagen als auch ressourcen- und energiesparendere Verfahren. Um Energie und Eingangsstoffe effizienter zu nutzen, oder gar neue Eingangsstoffe verwenden zu können, müssen bestehende Verfahren optimiert und neue Verfahren eingeführt oder erforscht werden. Oftmals existieren Verfahren, die in der Theorie möglich sind oder auf Pilotebene erprobt werden, die jedoch noch nicht wirtschaftlich sind. Die weitere Erforschung und Entwicklung dieser Technologien und Verfahren und deren Markteinführung muss folglich vorangetrieben werden, wenn das Ziel einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie erreicht werden soll. Diese Metastudie wird deswegen die sechs Studien daraufhin untersuchen, welche technologischen Möglichkeiten genannt werden, wie hoch Anwendungspotentiale sind und welche Barrieren für die Anwendung aktuell existieren.

3.4 Rohstoffe

Eng mit der Frage nach den Prozessen ist die Frage nach Eingangsstoffen für die Produktion verbunden. Die chemische Industrie setzt zum großen Teil Mineralöl als Rohstoff ein. 16% des Mineralölaufkommens in Deutschland werden in der Chemie verwendet, sie deckt dadurch 75% ihres organischen Rohstoffbedarfs. Soll die chemische Industrie langfristig den Einsatz fossiler Rohstoffe minimieren, so muss sie Wege finden, diese durch Rohstoffe mit nicht fossilem Kohlenstoff zu ersetzen oder den Kohlenstoff im Kreislauf zu führen. Deshalb wird diese Metastudie die sechs Studien darauf hin untersuchen, welche Möglichkeiten bzw. Potentiale bestehen und welche Handlungsbedarfe sich daraus ableiten.

3.5 Energiesystem

Die chemische Industrie hat den höchsten industriellen Energiebedarf (Strom und Gas) in Deutschland. Die Transformation des Energiesystems ist das Kernstück der Energiewende. In diese Untersuchungskategorie fallen alle Aspekte, die das Energiesystem betreffen. Den größten und in den Studien am detailliertesten untersuchten Teil hiervon macht das Stromsystem mit Stromerzeugung, Im- und Exporten, Netzen und Speichern aus. Ebenso zählen alle weiteren Primärenergieträger, erforderliche Infrastrukturen sowie Im- und Exporte zum Energiesystem. Als Schlüsselbegriff zum Energiesystem erweist sich das Schlagwort einer Defossilisierung.

3.6 Interdependenzen: Sektorkopplung und Circular Economy

Unter diese Kategorie fallen Veränderungen und Innovationen, die zwar auch mit Technologien und Verfahren verbunden sind, jedoch ebenso mit organisatorischen Neuerungen und neuen Konzepten im Produktdesign. Sowohl Sektorenkopplung (zumeist in einem engeren Sinne als synonym für Elektrifizierung von Verbrennungsprozessen verwendet, also eine vollständige De-Fossilisierung der Stromerzeugung voraussetzend) als auch Kreislaufwirtschaft („Circular Economy“) implizieren die Notwendigkeit einer stärkeren Verbindung und Koordination von Sektoren. Die Folge ist eine steigende Interdependenz. Der Bedarf nach steigender Effizienz macht eine bessere Abstimmung der Stoff- und Energieflüsse zwischen den verschiedenen Sektoren nötig. Die energetische und stoffliche Weiterverwertung von Neben- und „Abfallprodukten“ verschiedener Sektoren sowie eine möglichst weitgehende Weiterverwendung von Produkten oder Komponenten tragen der Erkenntnis Rechnung, dass einerseits die Ressourcen der Erde begrenzt sind aber vor allem, dass die Aufnahmefähigkeit für

bestimmte Abfallprodukte (z. B. CO₂) begrenzt ist. Während die Circular Economy für die Ketten, die der chemischen Industrie nachgelagert sind, neue Anforderungen an Produktdesign und –vertrieb bedeutet, liegt die Herausforderung für die chemische Industrie darin, mehr recycelte Materialien zu verwenden, besser recycelbare Materialien zu produzieren und sich in der Folge gegebenenfalls auf veränderte Eigenschaften recycelter Materialien („Verunreinigungen“ etc.) einzustellen. Insbesondere zur Vermeidung von CO₂-Emissionen aus den Produkten, ist es für die Chemie sinnvoll geschlossene Kohlenstoffkreisläufe zu verfolgen. Mit großer Wahrscheinlichkeit erfordern diese Konzepte auch eine Koordination zwischen den Sektoren, zum Teil (Dechema) auch als „Industrial Symbiosis“ bezeichnet, die in Tiefe und Breite über das heutige Ausmaß hinausgeht. Diese Metastudie wird in den sechs Studien nach Anhaltspunkten dafür suchen, welche Potenziale und Herausforderungen der Sektorenkopplung und der Kreislaufwirtschaft innewohnen.

3.7 Politik und Regulierung

Eine Transformation der chemischen Industrie muss von politischen Rahmenbedingungen flankiert werden, die eine Transformation unterstützen und nicht behindern. Diese Metastudie wird in den sechs Studien nach politischen Maßnahmen suchen, die entweder für die Zukunft angenommen oder angeraten werden. Dabei werden auch in den Studien angesprochene Umsetzungshemmnisse im jeweiligen Zusammenhang angesprochen.

3.8 Veränderungen auf der Nachfrageseite

Diese Kategorie umfasst mögliche Konsequenzen, die resultieren können, wenn zunehmend klimafreundlichere, ressourcenschonendere Materialien und Produkte nachgefragt werden. Ob politisch ausgelöst oder durch veränderte Kundenpräferenzen motiviert, die Transformation der chemischen Industrie wird mit hoher Wahrscheinlichkeit auch mit einer Veränderung der Nachfrage einhergehen. Ökologische Erwägungen und veränderte Anforderungen an Materialien sind denkbar. Diese Metastudie strebt danach, in den sechs Studien ein besseres Bild davon zu gewinnen, inwiefern sich die Nachfrage wandeln könnte und welche Chancen und Risiken diesem Wandel innewohnen könnten.

3.9 Kosten

Viele der oben erwähnten Veränderungen werden Investitionsentscheidungen beeinflussen und oft Mehrinvestitionen in neue Anlagen oder Forschung und Entwicklung sowie Markteinführung erfordern. Deshalb stellt sich in dieser Metastudie die Frage, ob die sechs Studien für die chemische Industrie die Mehrkosten abschätzen, mit denen die Transformation verbunden sein könnte. Hierbei werden die Studien sowohl auf Aussagen zu volkswirtschaftlichen als auch zu betriebswirtschaftlichen Kosten untersucht.

4 Die Studien im Überblick

4.1 Inhaltliche Schwerpunkte

Jede der untersuchten Studien hat eine eigene Ausrichtung, die sich aus der jeweiligen Fragestellung, aber auch der Wahl der Methode und wesentlicher Annahmen sowie der zugrundegelegten Daten und der eingesetzten Modelle ergibt. Die Studien werden in diesem Kapitel charakterisiert. Die Kurzdarstellungen gehen auf die meist allgemeinen Kernergebnisse und einige chemiespezifische Aussagen ein. Im Anhang werden alle Studien ausführlich beschrieben. Die nachfolgende Grafik dient dazu, die Studien grob zu verorten.

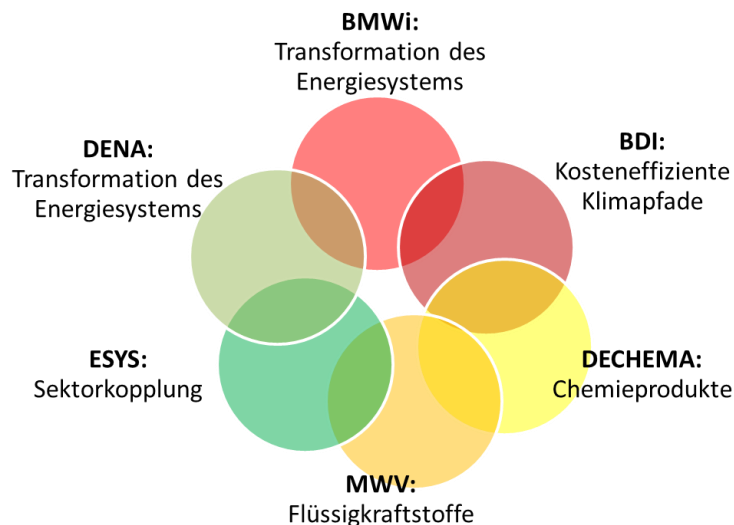


Abbildung 1 : Grobe Charakterisierung der Schwerpunkte der einzelnen Studien

Die BDI-Studie analysiert kosteneffiziente Transformationspfade zur Erreichung der deutschen Klimaziele für 2050, sog. Klimapfade. Aufgrund eines intensiven Bottom-up-Prozesses ist einer ihrer Schwerpunkte die Industrie, wodurch sie auch für die Chemieindustrie wesentliche Aussagen enthält. Die BMWi-Studie legt ihren Schwerpunkt auf die Transformation des Energiesystems. Sie ist hinsichtlich der Modellierung die aufwändigste Studie. Während andere Studien etwa eine „Kupferplatte“ (also einen vollständigen und bedarfsgerechten Netzausbau) annehmen, enthält diese Studie ein eigenes Szenario zur Untersuchung eines verlangsamten Ausbaus der Übertragungsnetze. Die DENA-Studie entwickelt ebenfalls Transformationspfade für das Energiesystem zur Erreichung der 2050-Ziele. Ihr Szenarioansatz unterscheidet sie jedoch von der BMWi-Studie. Sie baut vorrangig auf Branchenwissen einer großen Zahl an Studienpartnern auf. Die ESYS-Studie hat das Ziel, verschiedene Alternativen für eine Transformation bis 2050 zu untersuchen. Ihr Schwerpunkt ist die Kopplung der Sektoren Strom, Wärme und Verkehr. Die MWV-Studie zeichnet sich durch ihre Perspektive aus, die besonders für einen Teilsektor der chemischen Industrie, die Mineralölwirtschaft, relevant ist. Ihr Untersuchungsschwerpunkt ist die Perspektive flüssiger Energieträger. Die DEHEMA-Studie ist die zweite sektorspezifische Untersuchung. Sie untersucht Optionen für eine CO₂-arme europäische Chemieindustrie anhand von neun Produkten, die zusammen mehr als die Hälfte des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen der Chemischen Industrie ausmachen. Die Auswahl der Studien gibt somit einerseits einen guten Überblick über verschiedene Untersuchungsansätze zu einer Transformation des Energiesystems und der Industriesektoren, andererseits deckt sie chemiespezifische Aspekte ab.

4.2 Grundannahmen der Studien

	BDI	DENA	DECHEMA	BMWi	ESYS	MWV
Klimaziele (2050)	-80% und -95%	-80% und -95%	CO ₂ -neutrale chemische Industrie	-80% und -95%	-60 / 75 / 85 / 90%	-80% und -95%
CO ₂ -Preis (2050, Preise je t)	45 € (NA) 124 € (GK)	60 €	196 €	modell-endogen	modell-endogen	55 \$ (PtX80) 150\$ (PtX95) ²
Carbon Leakage	umfassender Schutz	umfassender Schutz	<i>nicht betrachtet</i>	<i>nicht betrachtet</i>	<i>nicht betrachtet</i>	umfassender Schutz
Ölpreis (2050; \$/Barrel)	115 (NA) 50 (GK)	55	98 (IEA-ETP 2DS)	68	86 € ³	115 \$ (PtX80) 50 \$ (PtX 95)
Wirtschaftswachstum DE Gesamtwirtschaft (% p.a.)	1,2	1	-	0,8 - 0,7	-	1,3
Wirtschaftswachstum DE/EU Chemische Industrie (% p.a.)	1,3	Ammoniak: 1,3 Chlor: 1,5 Ethylen: 0,2	1,0	0,7 (Industrie) ⁴	-	-
Bruttowertschöpfung (2050, Mrd. €)	3.835	3.655	-	3.400	-	3.846
Beschäftigte (2050, Mio.)	39,1	-	-	-	-	37,952
Bevölkerung DE (2050, Mio.)	76,6	76,1	-	74	-	76,6
Diskontsätze (% p.a.)	2 (jedoch für PtX: 7)	10,5	10	7	8	2 - 7
Stromkosten (2050, ct/kWh)	14,2-15,5 (Systemkosten) 4 (EE-Gestehungskosten PtL-Import 2030)	14-17 (Systemkosten)	4 (Industriestrompreis)	-	-	1,9 – 5,7 (Gestehungskosten MENA)

Tabelle 1: Abkürzungen: NA = Szenario Nationale Alleingänge; GK = Szenario Globaler Klimaschutz; REF = Referenzszenario; EL80: Elektrifizierungsszenario mit 80%-Ziel; EL95: Elektrifizierungsszenario mit 95%-Ziel; TM80: Technologiemixszenario mit 80%-Ziel; TM95: Technologiemixszenario mit 95%-Ziel; PtX80: Szenario mit 80%-Ziel; PtX95: Szenario mit 95%-Ziel

4.3 BDI

Die Studie „Klimapfade für Deutschland“ wurde von der Boston Consulting Group und der Prognos AG im Auftrag des Bundesverbands der Deutschen Industrie erstellt. Sie erschien im Januar 2018.–Die Studie untersucht, wie die Deutschen Treibhausgasziele für das Jahr 2050 volkswirtschaftlich kosteneffizient erreicht werden können.

Die Studie enthält drei Szenarien, die jeweils unterschiedliche qualitative und quantitative Rahmenbedingungen in Energie- und Klimapolitik sowie Wirtschaft berücksichtigen. Jedes Szenario wird jeweils quantitativ und modellgestützt unter energie- und volkswirtschaftlichen Gesichtspunkten untersucht. Aus den drei Szenarios werden insgesamt fünf Klimapfade modelliert, welche für die Studie namensgebend sind. Das erste ist ein aus dem Referenzszenario abgeleiteter Referenzpfad. Dieser stellt dar, welche Emissionsreduktionen bis 2050 mit den Maßnahmen und unter den Annahmen des Referenzszenario erreicht werden können. Für die beiden anderen Szenarien „Nationale Alleingänge“ und „Globaler Klimaschutz“ hingegen werden jeweils zwei sog. Klimapfade

² Die Studie geht von einem Wechselkurs \$/€ von 1,39 im Jahr 2050 aus.

³ Umgerechnet aus Angabe 52 € / MWh

⁴ Die Studie enthält spezifische Annahmen für insgesamt 18 Chemieprodukte

errechnet: bei einem wird eine Minderung bis 2050 um 80% gegenüber 1990 erreicht, beim anderen sind es 95%. Zwischenziele, etwa für 2030, werden nicht vorgegeben. Die Klimapfade beschreiben stets konsistente Bündel technischer Maßnahmen, keine politischen Steuerungsinstrumente. Implizit wird jedoch eine kosteneffiziente politische Steuerung angenommen.

Die Kernergebnisse der Studie sind:

- Eine Fortsetzung der derzeitigen Klimaschutzanstrengungen führt bis 2050 zu einer Reduktion der Treibhausgase von ca. 61% ggü. 1990. Dies führt zu einer „Minderungslücke“ von 19-34 Prozentpunkten.
- Eine Reduktion der Treibhausgase um 80% bis 2050 ist technisch möglich und volkswirtschaftlich darstellbar. In der Chemieindustrie erfolgen die Reduktionen dann durch Energieeffizienz, den Verzicht auf Kohle und den Einsatz erneuerbarer Energien.
- Eine Reduktion um 95% ist an der Grenze des Machbaren. Dann sind für weite Teile der Volkswirtschaft Nullemissionen nötig. Dies bedeutet u.a. einen weitgehenden Verzicht auf fossile Energieträger, einen umfassenden Einsatz von Power-to-X und CCS. In der Chemie könnte allein der Einsatz von Wasserstoff in der Ammoniaksynthese einen zusätzlichen Stromverbrauch von 30 TWh erfordern. CCU wäre nur noch für die stoffliche Nutzung zulässig, etwa für Polymere in der Chemie. In den Raffinerien würde durch CCS 7 Mt CO_{2e} gemindert, durch Dampfreformierung in der Ammoniaksynthese 4 Mt CO_{2e}.
- Für beide Klimapfade wird angenommen, dass die national verfügbare Biomasse in der Industrie für Nieder- und Mitteltemperaturwärme verwendet wird, bzw. zum Einsatz kommt, um biogenes CO₂ für Power-to-Gas-Prozesse zu nutzen.
- Die volkswirtschaftlichen Mehrkosten liegen nach Abzug der Energieeinsparungen bei 15-30 Mrd. € p.a. Die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen der Klimapfade sind bei optimaler politischer Umsetzung neutral.
- Der deutschen Wirtschaft bieten erfolgreiche Klimaschutzbemühungen erhebliche Chancen für Exporte. Der Markt für Klimatechnologien wird für 2030 auf 1-2 Bio. Euro geschätzt.
- Es bestehen erhebliche Herausforderungen in der Umsetzung. Internationale Kooperation kann die Risiken erheblich mindern.

Eine ausführliche Besprechung und Zusammenfassung der Studie findet sich im Anhang zu dieser Studie.

4.4 DENA

Die DENA-Studie „Integrierte Energiewende“ wurde im Juni 2018 veröffentlicht. Sie basiert sie auf einem umfassenden Beteiligungsprozess. Der Schlüsselbegriff der Studie ist die „Integrierte Energiewende“. Darunter wird ein Ansatz verstanden, der ein Energiesystem optimiert auf Grundlage einer Berücksichtigung technischer Anlagen, Infrastrukturen und Märkte, weitere sektorspezifische Anforderungen und schließlich Wechselwirkungen in den Energiemärkten.

In der Studie werden fünf Szenarien modelliert: Das Referenzszenario basiert auf der Annahme einer Fortführung aktueller Politik- und Technologieentwicklungen, allerdings bereits auf einem ambitionierten Niveau. Die Klimaziele sind in diesem Szenario nicht bindend. Das Elektrifizierungsszenario unterstellt eine Steigerung der Energieeffizienz und eine breite Elektrifizierung in allen Sektoren. Synthetische Energieträger werden berücksichtigt, wo zwingend erforderlich und spielen eine deutlich größere Rolle als etwa in der BDI-Studie. Dieses Szenario wird in zwei Varianten gerechnet, nämlich für die Minderungsziele 80% sowie 95%. Das Technologiemix-Szenario geht ebenfalls von einer Steigerung der Energieeffizienz aus, lässt jedoch eine breitere Variation der eingesetzten Energieträger und Technologien zu. Es wird ebenfalls in den zwei Varianten 80% und 95% gerechnet.

Die Studie hat eine integrierte Untersuchung der Energiewende über Sektoren hinweg zum Ziel. Ihr Fokus sind die Energiesysteme. Die energiewirtschaftlichen Analysen werden durch Einschätzungen zu Umsetzungsherausforderungen und gesellschaftliche Fragestellungen komplementiert. Es sollen

bestmöglicher Transformationspfade zur Erreichung der Klimaziele identifiziert und mit praxistauglichen Hinweisen und Handlungsempfehlungen hinterlegt werden.

Die Kernergebnisse der Studie sind:

- Eine Minderung der Treibhausgasemissionen sowohl um 80% als auch um 95% bis 2050 ist grundsätzlich erreichbar.
- Eine Fortführung momentaner Politiken führt nur zu einer Reduktion um 62% bis 2050. Weil die untersuchten Transformationspfade sich bereits 2030 deutlich unterscheiden, müssen in dieser Legislaturperiode Entscheidungen zu den angestrebten Klimazielen fallen.
- Transformationspfade, die auf einem breiten Technologie- und Energieträgermix basieren, sind bis 2050 um bis zu 600 Mrd. Euro günstiger als solche die verstärkt auf strombasierte Anwendungen setzen.
- Der höchste Investitionsbedarf besteht im Gebäude- und Energiesektor. Bei der Verkehrswende spielt neben der Elektrifizierung die Verringerung des spezifischen Energieverbrauchs eine zentrale Rolle. Die Transformation bringt auch einen Strukturwandel. So sind für die chemische Grundstoffindustrie auch grundlegende Veränderungen notwendig. Bei verstärkter Nutzung von Strom anstelle von Öl und Gas als Energieträger im Jahr 2050 muss die Versorgung der Chemieindustrie mit Naphtha als wichtigem Grundstoff auf anderem Wege sichergestellt werden.
- Unabhängig davon, ob auf stärkere Elektrifizierung oder einen breiteren Technologiemix gesetzt wird, spielen synthetische erneuerbare Energieträger eine zunehmend wichtige Rolle. In den 95%-Szenarien ist der Einsatz von PtX 2050 etwa dreimal so hoch wie in den 80%-Szenarien.
- Hinsichtlich der Rohstoffe geht die Studie von einem vermehrten Einsatz von CO₂ als Einsatzstoff für industrielle Produktion aus. Langfristig sollen 5 Mio. t CO₂ p. a. eingesetzt werden, wobei die Herstellung von Synfuels ausgenommen ist. Biomasse als Rohstoff wird nicht betrachtet.
- In der Studie wurden für den Chemiesektor insbesondere die Ammoniak-, Chlor- und Ethylenherstellung in Bezug auf Ihre Dekarbonisierungspotenziale erläutert, allerdings nicht näher bewertet.

Eine ausführliche Besprechung und Zusammenfassung der Studie findet sich im Anhang zu dieser Studie.

4.5 Dechema

Die Studie „Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry“ konzentriert sich auf Optionen zur emissionsarmen Produktion der neun meistproduzierten (petro-)chemischen Produkte in Europa, welche allein für mehr als 50% des Energieverbrauchs und CO₂-Emissionen des Chemie-Sektors verantwortlich sind. Diese sind Methanol, Ethylen, Propylen, Benzol, Toluol, Xylene, Ammoniak, Harnstoff, Chlor. Des Weiteren sind diese Grundstoffe essenzielle Bestandteile nahezu aller Produkte der organischen Chemie. Die Studie wurde vom European Chemical Industry Council (CEFIC) in Auftrag gegeben und von der Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie DECHEMA e.V. erstellt. Sie wurde im Juni 2017 publiziert.

Das Ziel der Studie ist, Optionen für eine kohlenstoffarme, d. h. treibhausgasemissionsarme europäische Chemieindustrie zu erforschen. Die Studie bietet einen vergleichenden Überblick über Technologieoptionen mit ihren Beschränkungen, technischer Machbarkeit und wirtschaftlichen Umsetzbarkeit. Es werden drei Szenarien gegenüber einem Business-as-usual-Fall untersucht.

Die Kernergebnisse der Studie sind:

- Die Implementierung der untersuchten Technologien würde sehr große CO₂-Einsparungen ermöglichen. Diese liegen zwischen 70 und 210 Mt. CO₂e p.a., je nach Szenario.
- Werden Produktion und Nutzung von Kraftstoffen berücksichtigt, übersteigt das zusätzliche Minderungspotential im Jahr 2050 die momentanen Emissionen der Chemieindustrie in allen Szenarien.
- Die größten Herausforderungen für diese technischen Maßnahmen sind die Verfügbarkeit CO₂-armen Stroms, die Verfügbarkeit alternative Rohstoffe einschließlich Biomasse und Investitionen in einem Umfang, der sektor-übliche Volumina der letzten Jahre deutlich übersteigt. Außerdem sind die ermittelten Produktionskosten unter gegenwärtigen Voraussetzungen nicht wettbewerbsfähig.
- Viele Umsetzungsbedingungen liegen außerhalb der Chemieindustrie.
- Um eine Transformation hin zu den untersuchten CO₂-armen Technologien zu erreichen sind umfassende Investitions-, Forschungs- und Entwicklungsvorhaben nötig. Außerdem müssen Potentiale für industrielle Symbiosen und das Recycling nachhaltiger Materialien ausgeschöpft und weiter entwickelt werden.

Eine ausführliche Besprechung und Zusammenfassung der Studie findet sich im Anhang zu dieser Studie.

4.6 BMWi

Die Studie „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“ (im Folgenden bezeichnet mit „BMW_i“ bzw. „BMW_i-Studie“) wird von Fraunhofer ISI, der Consentec GmbH und dem Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Ifeu, im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, BMW_i, erstellt.

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Metastudie war die BMW_i-Studie in Teilen veröffentlicht. Diese Teile beziehen sich auf den unteren Rand des langfristigen Zielintervalls von 80 bis 95% Emissionsreduktion. Die Metastudie bezieht sich nur auf diese veröffentlichten Teile.

Die Studie untersucht die Frage, wie die Energiewende kosteneffizient gelingen kann.

Dabei gehen die Ersteller in einer wesentlichen Grundannahme von einer Emissionsreduktion am unteren Rand des Zielintervalls von 80 bis 95% aus.

Die Kernergebnisse der Studie sind:

- Ein Referenzszenario, das ein Auslaufen der Energiewende simuliert, führt bis 2050 zu einer Reduktion der THG-Emissionen in Deutschland um 56,6% ggü. 1990.
- Im Basisszenario, dem zentralen Zielszenario der Studie, wird die Erreichung der energie- und klimapolitischen Ziele zu möglichst geringen Kosten ermittelt. Es führt bis 2050 zu einer Reduktion um 83,3% ggü. 1990.
- Das hohe Ambitionsniveau der energie- und klimapolitischen Ziele verlangt einen Transformationsprozess, der ein Zusammenwirken „weiter Teile der Gesellschaft und Energiewirtschaft“ voraussetzt und damit als Kernaufgabe eine breite gesamtgesellschaftliche Akzeptanzsicherung verlangt.
- Der Energieeffizienz kommt für den notwendigen Umgang mit knappen erneuerbaren Ressourcen (die Studie nennt hier insbes. Biomasse) und verfügbarem Strom eine zentrale Bedeutung zu.
- Effizienzsteigerungen und Sektorkopplung sind synergetisch zu verbinden. Dabei helfen Technologien wie Power-to-Heat oder Elektromobilität bei der Dekarbonisierung. Sie erhöhen die Flexibilität im Energiesystem und erlauben somit die Integration höherer Anteile erneuerbarer Energien.
- Für bestimmte Industrieprozesse wird der Wettbewerb um die knappe erneuerbare Ressource Biomasse (heute noch stark verwendet in Umwandlungs- und Gebäudesektor) sehr

bedeutsam. Dabei entsteht eine Nutzungskonkurrenz zu Luft- und Seeverkehr, wobei für eine Entwicklung der Verschiebungseffekte jeweilige Opportunitätskosten und Nutzungsalternativen der konkurrierenden Sektoren entscheidend sind.

- Power-to-Gas ist bei der angenommenen 80%igen Reduktion weder sachlich notwendig noch wirtschaftlich. Dagegen wird Power-to-Heat ab 2040 für viele Einsatzbereiche gerade auch in der Industrie ein großes Potential zugeschrieben.
- Die Industrie steht vor grundlegendem Wandel der den Einsatz neuer Technologien, Prozesse und Stoffnutzungskonzepte einschließlich von CCS als Option mit hohem Emissionsminderungspotential neben Maßnahmen der Energieeffizienz oder des Einsatzes von Strom- und Biomasse verlangt. Besonders hoch ist die CO₂-Abscheiderate in der Chemieindustrie, hier liegt sie bei 95%. Die Verfügbarkeit von Biomasse ist mit vielen Unsicherheiten verbunden, die eingehend diskutiert werden.
- Die Stromkosten werden voraussichtlich bis 2030 ansteigen um anschließend wieder zu sinken und bis 2050 das aktuelle Niveau zu erreichen. Dabei wird im gleichen Maße wie der intraeuropäische Stromaustausch zunimmt auch der europäische Kontext der Dekarbonisierung im Energiesystem an Bedeutung gewinnen und andere (teurere) Flexibilitätsoptionen überflüssig machen.

Eine ausführliche Besprechung und Zusammenfassung der Studie findet sich im Anhang zu dieser Studie.

4.7 ESYS

Die Studie „Sektorenkopplung – Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems“ wurde im Rahmen des Projekts „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS) von der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Acatech und der Union der deutschen Akademien der Wissenschaften erstellt. Die Studie ist im November 2017 erschienen. Sie wird im Folgenden als „ESYS“ abgekürzt.

Das Ziel der Studie ist das Aufzeigen der Zusammenhänge und Abhängigkeiten im sich transformierenden Energiesystem. Dabei zeigt sie auf Basis einer Analyse des gesamten Energiesystems Alternativen für die Zielerreichung auf.

Die Kernergebnisse der Studie sind:

- Die Energiewende ist eine gesamtgesellschaftliche Herausforderung, die als Kraftakt der deutschen Wiedervereinigung vergleichbar ist.
- Die Erreichung zahlreicher Einzelziele der Energiewende verlangt substantielle Veränderungen – andernfalls werden diese „teilweise signifikant verfehlt“.
- Der Wandel verlangt im Kern eine Sektorkopplung (je ambitionierter das Klimaziel desto enger sind Strom, Wärme und Verkehr zu koppeln) und eine ganzheitliche Optimierung des Energiesystems mit einem entsprechenden Umbau bzw. einer Weiterentwicklung des regulatorischen Rahmens.
- Für eine effektive Begrenzung der Ausbaubedarfe für erneuerbare Energien ist die Senkung des Energieverbrauchs durch Effizienzverbesserungen und Einsparungen notwendig.
- Die Kopplung der Sektoren Wärme und Verkehr muss bereits 2030 erheblich fortgeschritten sein. Elektrolyseure und Kraftstoffsynthese sind dann bereits eine Option im Energiesystem.

Eine ausführliche Besprechung und Zusammenfassung der Studie findet sich im Anhang zu dieser Studie.

4.8 MWV

Die Studie „Status und Perspektiven flüssiger Energieträger in der Energiewende“ der Prognos AG, des Fraunhofer Instituts für Umwelt- Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT und des Deutschen Biomasseforschungszentrums DFBZ ist im Mai 2018 erschienen. Untersucht werden die aktuelle und zukünftige Bedeutung von Mineralöl in Deutschland, und dessen Substituierbarkeit durch flüssige Energieträger auf Basis Erneuerbarer Energien oder Biomasse.

Um diese Themen zu untersuchen, wurden zunächst drei verschiedene sog. Technologiepfade erarbeitet. Sie ermitteln die Potentiale zu den technologischen Schwerpunkten Power-to-X, Erneuerbare Energien für die Stromerzeugung und Biomassenutzung in Deutschland. Anschließend wurden Szenarien erstellt, die die künftige Rohstoff- und Energieversorgung Deutschlands beschreiben. Das Referenzszenario entspricht dem der BDI-Studie. Zwei weitere Szenarien untersuchen die Erreichung der Treibhausgas-Ziele von -80% und -95% im Jahr 2050 ggü. 1990. Neben den Klimazielen ist die Versorgungssicherheit eine Randbedingung. Eine Optimierung der volkswirtschaftlichen Kosten erfolgte nicht. Stattdessen erfolgt die Betrachtung der Kosten aus Verbrauchersicht. Die Klimaziele werden in den Szenarien durch einen Technologiemix erreicht. Die Herstellung der PtL-Rohstoffe erfolgt überwiegend im Ausland auf Basis von Strom aus Erneuerbaren Energien, hierfür sind erhebliche Investitionen im Ausland erforderlich.

Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass:

- PtL nach heutigem Kenntnisstand unverzichtbar sind, wenn eine weitgehend treibhausgasneutrale Energieversorgung geschaffen werden soll.
- Flüssige Energieträger können gegenüber strombasierten Minderungsoptionen wettbewerbsfähig sein.
- Derzeit werden 16% des Mineralölaufkommens in Deutschland dafür eingesetzt, 75% des Rohstoffbedarfs der organischen Chemie zu decken. In der chemischen Industrie sind flüssige Energieträger kaum zu ersetzen, ebenso in Teilen des Verkehrssektors. Ein teilweiser Ersatz fossiler Rohstoffe durch PtL in der Petrochemie könnte auch den Umfang des Einsatzes von CCS reduzieren.
- Aufgrund der Bedarfe wird die Entwicklung des Power-to-Liquid-Technologiepfads als eine No-Regret-Maßnahme beschrieben. Wichtig für die großtechnische Anwendung ist ein allmählicher und stetiger Markthochlauf.
- Der chemischen Industrie, insbesondere der Mineralölwirtschaft – die dann ggf. umzubenennen wäre – kommt durch den PtL-Ansatz eine Rolle als Enabler für eine Defossilisierung zu.

Eine ausführliche Besprechung und Zusammenfassung der Studie findet sich im Anhang zu dieser Studie.

5 Qualität der Studien

In diesem Kapitel wird die Qualität der Ausführung der einzelnen Studien vor dem Hintergrund ihrer Nutzbarkeit für die Erarbeitung einer Roadmap für die Chemieindustrie bis 2050 bewertet. Kernpunkte der Bewertung sind die jeweilige Methodik und Annahmen, einschließlich der verwendeten Daten und Tools. Einzelne inhaltliche Aussagen werden in diesem Kapitel hingegen nicht bewertet. Vielmehr dient dieses Kapitel als Grundlage und Orientierung für die kritische Würdigung der Ergebnisse im Folgekapitel 6.

5.1 BDI-Studie

Das besondere methodische Merkmal der BDI-Studie ist die Arbeit mit sog. Klimapfaden. Diese Herangehensweise hat den Vorzug, dass für einzelne dieser Pfade konkrete Zahlenergebnisse ermittelt werden können: Die Klimaziele bekommen so ein Preisschild. In der kritischen Lektüre der Studie fällt jedoch auf, dass keine einheitliche Taxonomie zur Anwendung kommt. Teilweise spricht die Studie von fünf Klimapfaden – dem Referenzpfad sowie den vier möglichen Kombinationen aus den Zielen 80% und 95% und den globalen Rahmenbedingungen „nationale Alleingänge“ sowie „Globaler Klimaschutz“. An anderer Stelle werden diese Kombinationen dann wiederum als Szenarien bezeichnet, etwa bei der Ermittlung der Effekte auf das BIP. Die volkswirtschaftlichen Mehrkosten werden für drei Klimapfade ermittelt (Referenz, 80%, 95%), jedoch fehlt die Differenzierung der Pfade 80% und 95% nach den beiden unterschiedlichen Varianten („nationale Alleingänge“ und „Globaler Klimaschutz“) für die Entwicklung des internationalen Umfelds. Die gleiche Problematik besteht hinsichtlich der für die einzelnen Sektoren ermittelten Emissionen. Hier ist deshalb unklar, wie ein unterschiedliches internationales Umfeld sich auswirkt. Die konsistente Anwendung des methodischen Ansatzes wäre wünschenswert – sowohl hinsichtlich sektoraler Emissionen als auch der Mehrkosten.

Mit dem Referenzszenario wird eine Minderungslücke ermittelt. Dieser Ansatz ist hilfreich, weil die Kostenunterschiede zwischen bestehenden und weiteren erforderlichen Maßnahmen klarer werden. Ebenfalls positiv hervorzuheben ist die Unterscheidung zweier Varianten für die globalen Rahmenbedingungen. Die Unterscheidung „nationale Alleingänge“ und „globaler Klimaschutz“ zeigt die Tragweite internationaler Kooperation auf: Während „globaler Klimaschutz“ gewissermaßen den Idealfall unter dem Pariser Abkommen darstellt, zeigt „nationale Alleingänge“ die mögliche Kostendifferenz einer maximalen Implementierungslücke auf.

Die Modellierung bezieht sich auf die gesamte Zeit bis 2050. Im Gegensatz zu anderen Studien wurde das Erreichen von Zwischenzielen, etwa der Klimaschutzziele für das Jahr 2030, nicht zur Bedingung gemacht. Das ist vor dem Hintergrund des Zieles der Studie, volkswirtschaftlich optimale Ergebnisse herauszuarbeiten nachvollziehbar. Andererseits muss darauf hingewiesen werden, dass sowohl der deutsche Klimaschutzplan als auch der für Deutschland rechtsverbindliche klimapolitische Rahmen der EU Ziele für 2030 beinhalten.

Als problematisch erachten wir den Umgang der Studie mit dem EU-Emissionshandel (EU-ETS). Auf eine Modellierung dieses Instruments wird vollständig verzichtet. Stattdessen wird ein CO₂-Preispfad angenommen, der auch lediglich im Energiesektor voll berücksichtigt wird. Damit ist die Grundannahme der Modellierung eine Umkehrung der regulatorischen Wirklichkeit: Anstatt einer Mengensteuerung wird eine Preissteuerung angenommen. Dies ist allerdings ein methodisches Problem in vielen energie- und volkswirtschaftlichen Analysen. Der verwendete Preispfad zeigt die Schwächen des Ansatzes auf: Es handelt sich dabei um ein WEO-Preisszenario, bei dem jedoch für die Zeit von 2020 bis 2040 die angenommenen Preise reduziert wurden. Im Ergebnis liegen die Preisannahmen für das Jahr 2020 im Szenario „Nationale Alleingänge“ mit 11 € je t CO₂ deutlich unter den realen heutigen Preisen im EU-ETS.

Der aus dem EU-ETS resultierende Wettbewerb um verfügbare Emissionsbudgets ist das zentrale politische Steuerungsinstrument der Transformation. In der Studie wurde jedoch auf eine Modellierung des Emissionshandels verzichtet. Zum Zeitpunkt der Erstellung waren die wesentlichen Eckpunkte der Revision, insbesondere das Gesamtmengengefüge klar.

Neben den Preisannahmen für CO₂ sind auch für Energieträger Annahmen getroffen. Diese Preisannahmen sind allesamt an eine angenommene Ölpreisentwicklung gekoppelt. Ob das

hinsichtlich der Biomasse sinnvoll ist, erscheint fraglich, da dieser als knappem Brenn- und Rohstoff der Transformation unter Umständen eine herausgehobene Rolle zukommt.

Hinsichtlich der technischen Maßnahmen führt die Entscheidung, nur ausreichend ausgereifte Technologien zu berücksichtigen, zu einer eher konservativen Tendenz der Studie. Verzerrend wird dies dort, wo bestimmte Maßnahmen aufgrund angenommener Umsetzungsprobleme ausgeschlossen werden: Beim Thema Verzögerung des Kernkraftausstiegs ist dieses Argument nachvollziehbar, beim Ausschluss von CCS und der Reduktion von Emissionen im Tierbestand hingegen zumindest diskussionswürdig (beide Maßnahmen werden als „letzte Möglichkeiten“ betrachtet). Gleiches gilt für die sehr zurückhaltende Bewertung von PtX und PtX-Importen, die unter anderem auf einen abweichenden Diskontsatz (7% statt 2%) im Vergleich zu anderen technologischen Optionen zurückzuführen ist.

Im Kern optimistisch wird hingegen die Umsetzung betrachtet. So werden politische Rahmenbedingungen, welche potenziell einschränkend auf die eingesetzten Maßnahmen wirken können, ebenso wenig berücksichtigt wie potentielle Implementierungsdefizite. Auch ist die Annahme einer Netzinfrastruktur ohne dauerhafte Netzengpässe („Kupferplatte“) eine deutliche Idealisierung der vorherrschenden Bedingungen.

Ob idealisierende und übermäßig konservative Tendenzen der Studie sich im Ergebnis die Waage halten oder zu einer nicht näher interpretierbaren Verzerrung führen, lässt sich aus technologischer und wirtschaftlicher Sicht nicht einschätzen. Die explizite und intensive Mitwirkung aller Sektoren spricht aber eher dafür, dass sie sich insgesamt die Waage halten.

Bei den Vermeidungskosten wurde ein Ansatz gewählt, der volkswirtschaftliche Vermeidungskosten modelliert. Damit sind die ausgewiesenen Kosten nicht mit denen aus einer Entscheiderperspektive vergleichbar, weil z. B. keine „echten“ Stromkosten oder Zinssätze angenommen werden.

Bei den Vermeidungskostenkurven wird aus unserer Sicht die Modellierung nicht hinreichend deutlich. Inwiefern bei der Darstellung der Kosten und eingesparter CO₂-Mengen aller Einsparpotentiale berücksichtigt wurde, wie dieser Zusammenhänge sich über die Zeit entwickeln und die Entwicklung von Interdependenzen über die Zeit berücksichtigt wurden, bleibt unklar. Dies betrifft besonders die Entwicklung der Vermeidungskosten über die Zeit und Interdependenzen, etwa durch Sektorenkopplung oder Verteilungsfragen knapper Güter wie z. B. Biomasse oder Strom aus Erneuerbaren Energien.

Die Studie enthält keine sektorspezifische Analyse der Chemieindustrie. Aussagen zu Prozessen und Produkten sowie zu Eingangsstoffen bleiben deshalb zumeist beispielhaft.

5.2 DENA

Der Ansatz der DENA hat, wie jede Forschungsarbeit, Systemgrenzen. Hinsichtlich der Kosten führt die Arbeit mit einem Referenzszenario laut DENA dazu, dass keine Aussagen zum Kostenoptimum des Gesamtsystems gemacht werden können. Dies ist auch aus anderen Gründen nicht möglich, etwa der Entscheidung, bestimmte Technologien wie CCS nur als „letztes Mittel“ einzusetzen. Wenngleich derartige Einschätzungen zur politischen Machbarkeit immer auch andere Ansichten zulassen, ist die Herangehensweise, nicht ein reines technisches Kostenoptimum zu rechnen nachvollziehbar. Durch diese Herangehensweise wird die Differenz zwischen einem rechnerischen Optimum und der Implementierungswirklichkeit abgeschätzt.

Die Modellierung der Klimaziele macht neben dem Ziel für 2050 auch das Erreichen der Zwischenziele des Klimaschutzplans für 2030 und 2040 zur Bedingung (-55% 2030 und -70% 2040). Eine Abweichung gibt es im 95%-Szenario. Hier wird das Zwischenziel für 2040 auf -75% angehoben. Diese Anpassung erscheint uns plausibel. Die Studie hat dadurch den Vorteil, für die Diskussion um die Ausgestaltung der Maßnahmen zum deutschen Klimaschutzplan der Zielsystematik zu folgen, die sich auch aus dem Klimaschutzplan und v.a. dem rechtsverbindlichen EU-Rahmen für Deutschland ergibt.

Die Entscheidung, synthetische Kraftstoffe nicht nach dem Quellenprinzip zu bilanzieren, ist nachvollziehbar. Dass sie jedoch mit einem CO₂-Faktor von Null bilanziert werden, erscheint kritikwürdig. Ebenso wie beispielsweise Windkraftanlagen führt die Herstellung und der Import von synthetischen Brenn- und Kraftstoffen zu Emissionen bei der Herstellung der Anlagen, ihrem Betrieb

und dem Transport der Energieträger. Eine Berücksichtigung dieser Emissionen in Form eines Emissionsfaktors wäre angesichts der Abweichung vom Quellenprinzip angezeigt. Sofern importierte synthetische Brenn- und Kraftstoffe im Produktionsland mit erneuerbarem Strom hergestellt wurde, ist der anzusetzende Emissionsfaktor allerdings sehr gering (Vorkette EE-Strom).

Der breit angelegte Ansatz, der eine große Zahl an Stakeholdern einbezieht, ist angesichts der vielen Akzeptanzprobleme verschiedenster Einzelfragen der Energiewende mit seiner Diskursorientierung und Transparenz aus unserer Sicht zu begrüßen.

Beim Personenverkehr fällt auf, dass die Studie etwa von einer Stagnation der PKW- Verkehrsleistung zwischen 2015 und 2030 ausgeht und dann eine deutliche Reduktion erkennen lässt, von 919 Mrd. Pkm 2030 auf 874 Mrd. Pkm 2050. Begründet wird dies mit der rückläufigen Bevölkerungsentwicklung. Zwar modelliert die Studie Binnenmigration auf Kreisebene. Die Höhe der Zuwanderung wird jedoch als „besonders problematisch zu prognostizieren“ bezeichnet. Dies gilt es bei allen an demographische Annahmen gebundenen Modellierungen zu berücksichtigen.

Eher optimistisch erscheint die Annahme, dass die prognostizierte Zunahme der Güterverkehrsleistung von 42% 2050 ggü. 2015 zum größten Teil auf der Schiene erfolgt (Anstieg von 124 Mrd. tkm 2015 auf 239 Mrd. tkm 2050).

Hinsichtlich der Szenarien fällt auf, dass für die übrige Welt ein ambitionierter Klimaschutz angenommen wird. Ein Szenario wie „Nationale Alleingänge“ der BDI-Studie gibt es nicht. Im Gegenteil basiert das Referenzszenario der DENA auf der Annahme einer deutschen Klimapolitik, die weniger ambitioniert ist als das internationale Umfeld. Die Frage, ob es plausibel ist, dass Deutschland weniger ambitionierten Klimaschutz als die übrige Welt betreiben wird, bezeichnet die Studie selbst als „fraglich“.

Positiv hervorzuheben ist, dass die Studie in ihrem Annex umfangreich einzelne Annahmen aufschlüsselt.

5.3 Dechema

Eine Stärke und Schwäche der Studie zugleich ist ihre enge Eingrenzung auf die Ermittlung der Umsetzbarkeit emissionsarmer Produktionsweisen in der Chemieindustrie. Dabei wird auf die Modellierung eines Gesamtsystems verzichtet. Die Studie kann deshalb nur eingeschränkt Aussagen zu Wirtschaftsstruktur, zum Energiesystem oder auch zu volkswirtschaftlichen Effekten machen. Zwar sind etwa zur Verfügbarkeit von Biomasse oder zu den Potentialen für die Erzeugung von Strom aus Erneuerbaren Energien in Deutschland Annahmen getroffen. Doch diese dienen mehr der Einordnung der ermittelten potentiellen Bedarfe als einer Modellierung. Dies unterscheidet die DECHEMA-Studie deutlich von anderen hier untersuchten.

Die Studie kann aufgrund des Forschungsdesigns wie andere Studien auch keine Aussagen zu Effekten wie Produktionsverlagerungen oder einem Wandel der Nachfrage treffen. Während die ermittelten Herstellungskosten Rückschlüsse auf die Wettbewerbsfähigkeit und die Carbon Leakage Problematik zulassen, bleibt die Nachfrage ein blinder Fleck. Für die Produktion industrieller Erzeugnisse – und chemischer im Speziellen - ist diese Frage jedoch von großer Bedeutung: Wie verändern sich Märkte und Nachfragemuster? Welche Produktsubstitutionen sind denkbar, etwa im Bereich der Baustoffe? Wie verändern sich aufgrund der über den EU-Emissionshandel geschaffenen absoluten Mengenbegrenzung Marktpreise und zu welchen Nachfrageänderungen kann dies führen? Diese Fragen bleiben hier unbeantwortet, weil der Studie keine Gesamtsystem-Modellierung zugrunde liegt; auch in anderen Studien bleiben sie unbeantwortet, etwa weil von einem Erhalt der momentanen industriellen Struktur ausgegangen wird.

Die Eingrenzung der Untersuchung auf die 9 am häufigsten hergestellten chemischen Produkte ergibt Sinn, weil diese zugleich die Grundstoffe für nahezu alle organischen Chemieprodukte in den momentanen petrochemischen Wertschöpfungsketten darstellen. Andererseits muss zumindest darauf hingewiesen werden, dass die knappe andere Hälfte des Energiebedarfs und rund ein Drittel der CO₂-Emissionen des Sektors nicht detailliert untersucht wurden. Die Struktur des Sektors mit hunderten verschiedenen Prozessen und tausenden Produkten hat zweifellos das Potential erheblicher weiterer Komplexitäten.

Der Eingrenzung auf bestimmte Produkte entspricht die systematische Eingrenzung der technologischen Optionen auf Energieeffizienzmaßnahmen in konventionellen Erzeugungsanlagen, einem Wechsel der Eingangsstoffe hin zu alternativen Kohlenstoffquellen und der Einsatz von emissionsarmem Strom.

Der Rückgriff auf Technology Readiness Levels ist ein methodisch sinnvoller Umgang mit dem unterschiedlichen Reifegrad gerade neuer Verfahren umzugehen. Mit Blick auf Gesamtsystem-Modellierungen wäre zu erörtern, ob nicht die TRLs 4-5 stärker berücksichtigt werden sollten.

Der Rückgriff auf Daten und Annahmen zum Energiesystem aus IEA-Szenarien ist stimmig und erhöht die Vergleichbarkeit mit anderen Studien. Nichtsdestotrotz handelt es sich dabei lediglich um Szenarien.

Hinsichtlich der ermittelten Kosten erlauben die Sensitivitätsanalysen für kritische Parameter eine bessere Einordnung.

Hervorzuheben ist, dass die Studie in ihrem Annex umfangreich einzelne Annahmen aufschlüsselt.

Sie stellt aus unserer Sicht schon allein aufgrund ihrer Fokussierung auf die Chemie auf jeden Fall einen wichtigen, ggf. teilweise aktualisierungsbedürftigen Input für die Erarbeitung der Roadmap dar.

5.4 BMWi

Die Studie des BMWi basiert auf der weitestgehenden Modellierung. Das Forschungsdesign basiert auf einer Kaskade aus neun Komponenten, also einzelnen Modellen. Diese sind miteinander verknüpft, wobei verschiedene Iterationen zwischen einzelnen oder mehreren Komponenten erfolgen. Der Studie liegt eine feingliedrige Abbildung des Energiesystems zugrunde. So sind etwa für Chemie spezifische Annahmen für insgesamt 18 Chemieprodukte getroffen. Obschon der Fokus auf dem Stromsystem liegt, sind auch für die Industrie spezifische Aussagen möglich. So ermittelt etwa das Basisszenario (80% Minderung) für die Chemieindustrie 2050 eine Abscheiderate (CCS) von 95%.

Die Studie enthält ein Szenario, das einen geringeren Ausbau der Übertragungsnetze untersucht, also eine Abweichung von der mehrfach zugrunde gelegten Annahme einer „Kupferplatte“. Darin kommt sie zu der Erkenntnis, dass auch bei deutlich eingeschränktem Ausbau der Netze ein Erreichen der Ziele möglich ist. Allerdings hat dies starke Auswirkungen auf das Stromsystem und die damit einhergehenden Kosten.

Hervorzuheben ist, dass die Studie in einer Wirkungsanalyse auch ökologische Belange artikuliert. Direkt in der Studie berücksichtigt ist, wie in anderen Studien auch, eine Restriktion der verfügbaren Biomasse.

Ein Nachteil der sehr komplexen Modellierung ist, dass für die Sektoren Wärme, Industrie und Verkehr weniger Szenarien betrachtet und in geringerer Detailtiefe diskutiert werden.

Anhand der BMWi-Studie lässt sich die in dieser Metastudie mehrfach artikuliert Kritik einer fehlenden Abbildung des EU-Emissionshandel mit seinen festen Mengenbeschränkungen besonders gut nachvollziehen. Wie auch in anderen Studien verwendet die des BMWi stattdessen einen CO₂-Preisfad. Dieser beginnt im Jahr 2020 bei 10 € je t CO₂ und damit etwa 50% unter dem heutigen Niveau. Bis 2050 steigt dieser Preis auf 100 € je t CO₂ an. Die genaue Handhabung des Preises in den verknüpften Modellen wird aus der vorliegenden Dokumentation deutlich. Einerseits wird von einer Vorgabe gesprochen, andererseits von Iterationen.

Das Szenario, in dem ein geringerer Ausbau der Übertragungsnetze untersucht wird, zeigt die Schwäche des Ansatzes deutlich: In diesem Szenario führt der geringere Netzausbau unter sonst gleichen Bedingungen zu einer höheren fossilen Stromerzeugung und damit zu höheren Emissionen, die Emissionsminderung im Stromsektor fällt zu gering aus. Um dies zu korrigieren, heben die Forschungsnehmer den CO₂-Preis schrittweise an, bis sich für das Jahr 2050 145 € je t CO₂ ergeben. Dieser Preis bedingt in der Modellierung nun aber aus modelltechnischen Gründen höhere Emissionen im EU-Ausland. Das muss wiederum durch eine weitere Nebenbedingung kompensiert werden, die vorgibt, dass die Emissionen sowohl in Deutschland als auch im übrigen Europa nicht über denen des Basisszenarios liegen dürfen.

Inwiefern eine derartige Abbildung von CO₂-Kosten sinnvolle Aussagen über die Wirkmechanismen des durch klare Mengenrestriktionen regulierten Umwandlungssektors und der Industrie zulassen, ist kaum zu bewerten.

Das Beispiel deutet auch auf Restriktionen des insgesamt sehr ambitionierten Ansatzes hin: Die Verknüpfung vieler Einzelmodelle führt zwangsläufig zu Schnittstellenproblematiken und in die Notwendigkeit, durch zusätzliche Randbedingungen nachzusteuern. Die Auswirkungen dieses Vorgehens auf die Qualität der Ergebnisse kann allenfalls, wie in diesem Beispiel, indikativ bewertet werden.

Insgesamt jedoch sind die Limitationen in der Studie gut berücksichtigt: Zum einen systematisch, indem auch Szenarien zu Restriktionen wie einem nicht-idealtypischen Ausbau der Netze untersucht werden. Zum anderen auf Ebene der Interpretation. Die Studie betont, dass sich in Modellen bestimmte Entwicklungen leichter gestalten als in der Wirklichkeit: Einerseits müssen die Modelle bei den Akteuren keine Glaubwürdigkeit der klimapolitischen Zielsetzungen herstellen. Andererseits ist die konkrete Abstimmung der Komponenten des Energiesystems im Modell einfacher als in der Realität. Dies gilt insbesondere für die innereuropäische Kooperation. Ob diese das geforderte Maß an frühzeitigen Absprachen und einer insgesamt in hohem Maße verflochtenen Kooperation leisten kann, ist angesichts teilweise auseinanderstrebender Kräfte in den vergangenen Jahren zumindest fraglich.

5.5 ESYS

Insgesamt ist die Studie teilweise sehr theoretisch. Studienteile insbesondere zu dem ausführlich behandelten Thema Regulierung haben eher den Charakter allgemeiner Abhandlungen von grundsätzlichem Charakter, sie sind nicht aus dem Modell heraus argumentiert.

Die Studie fordert ein einheitliches CO₂-Preissignal. Diese Position ist aus Sicht der chemischen Industrie kritisch zu sehen, da zwischen einzelnen Sektoren erheblich unterschiedliche „CO₂-Kaufkraft“ besteht. Dies wird klar, wenn man etwa die Situation einer Industrie, die im internationalen Wettbewerb steht mit der des Betreibers eines privaten PKW vergleicht. Zu dieser Forderung kann es aus unserer Sicht nur deshalb kommen, weil die Studie davon ausgeht, dass es für die Industrie keine CO₂-Kostenbelastung gibt. Das entspricht jedoch nicht der Realität der tatsächlichen Carbon Leakage-Regeln.

Es finden sich kaum Aussagen zur Chemieindustrie. Die beispielhafte Aussage, es könne für ein Unternehmen günstiger sein, seinen Energieverbrauch zu senken, ehe es auf die Herstellung chemischer Produkte auf eine strombasierte Produktion umstellt, wirft Fragen zur Tiefe des Verständnisses von Produktionsprozessen in der chemischen Industrie und Effizienzpotenzialen in dieser auf.

Die Studie untersuchte sieben verschiedene Zielszenarien für 2050, mit Zielwerte zwischen -60 und -90%, jedoch nicht das -95%-Ziel. Das ist bedauerlich, weil die in anderen Studien betonten immensen Herausforderungen dieses Ziels aus dieser Studie heraus nicht bewertet werden können.

Hinsichtlich der Modellierung ist positiv hervorzuheben, dass die CO₂-Ziele in dieser Studie jahresscharf erreicht werden, ein Handelssystem wird simuliert (im Gegensatz zu den Preisvorgaben anderer Studien, die eher einer Besteuerung entsprechen würden). Allerdings finden sich insgesamt wenige Aussagen zur Industrie.

Hinsichtlich der CO₂-Kosten wird für die Industrie keine Kostenbelastung angenommen. Dies entspricht nicht dem tatsächlichen System der kostenlosen Zuteilung und der Situation, in der sich Unternehmen bereits heute befinden.

Das Modell von ESYS berücksichtigt CO₂-Emissionen durch nicht-energetische Nutzung kohlenstoffhaltiger fossiler Rohstoffe, z. B. in der chemischen Industrie oder der Stahlerzeugung, nicht.

5.6 MWV

Der Fokus der Studie liegt auf flüssigen Energieträgern (PtL). Damit ist sie einerseits eingegrenzt auf einige spezifische Technologien. Andererseits liefert sie sehr differenzierte Antworten auf einen Teilbereich einer Transformation, der für die chemische Industrie hochgradig relevant werden könnte. Dies gilt umso mehr, als die Chemieindustrie einschließlich der Mineralölwirtschaft durch Produkte wie PtL zum Enabler einer Transformation wird. Die Studie wurde in zwei Teilen erstellt. Der erste beschreibt drei Technologiepfade. Diese sind hinsichtlich der Struktur der Kapitel und der Inhalte unterschiedlich aufbereitet, was die direkte Vergleichbarkeit der Kernaussagen zwischen den einzelnen Technologiepfaden erschwert. Im vorliegenden Dokument liegt der Schwerpunkt jedoch ohnehin auf den PtL-Technologien.

Die Studie betrachtet PtL als nach heutigem Kenntnisstand unverzichtbar, wenn eine weitgehend treibhausgasneutrale Energieversorgung geschaffen werden soll. Diese Erkenntnis mag teilweise dem Forschungsdesign, das auf eben diese Technologien fokussiert ist, geschuldet sein. Es besteht jedoch auch kein sachlicher Grund, diese Schlussfolgerung anzuzweifeln, insbesondere mit Blick auf die immensen Herausforderungen des 95%-Szenarios.

Dass neben den Klimazielen die Versorgungssicherheit eine Randbedingung ist, bewerten wir positiv. Dass eine Optimierung der volkswirtschaftlichen Kosten hingegen nicht erfolgt ist plausibel, da stattdessen die Betrachtung der Kosten aus Verbrauchersicht erfolgt. Die Klimaziele werden in den Szenarien durch einen Technologiemix erreicht.

Hervorzuheben ist, wie differenziert die Aussagen der Studie sowohl in technischer wie wirtschaftlicher Sicht ausfallen. So wird etwa eine Verbraucherperspektive eingenommen; es werden praktische Umsetzungshürden berücksichtigt; und es erfolgt eine Fallstudie zu Raffinerien. Außerdem fällt an der Studie positiv auf, dass die Ergebnisse der Untersuchungen immer auch quantitativ unterlegt sind.

6 Synthese und Schlussfolgerungen

In diesem Kapitel wird ein Gesamtbild der untersuchten Studien gezeichnet. Hierzu werden die Aussagen der Studien zu den wichtigsten Themen zusammengeführt. Es werden Gemeinsamkeiten und Lücken herausgearbeitet. Gemeinsamkeiten, weil sie ggf. für die Erarbeitung einer Roadmap als angenommene Rahmenbedingungen genutzt werden können, Lücken, weil sie ergänzende Arbeitsschwerpunkte für die Roadmap darstellen können. Das Kapitel folgt dabei der thematischen Gliederung, entlang derer die Studien analysiert wurden. In einem Schlusskapitel werden übergreifende Schlussfolgerungen gezogen.

Da der Schwerpunkt dieser Metastudie darauf liegt, die Erarbeitung einer Roadmap für die Chemieindustrie vorzubereiten, werden insbesondere Aussagen, die sich direkt auf die Chemieindustrie beziehen einbezogen. Dies gilt ebenso für Aussagen, die indirekt von besonderer Bedeutung sind, etwa zur Entwicklung des Stromsystems, zu Kosten und zu politischen Maßnahmen.

Die Synthese verfolgt das Ziel, Aussagen aus den Studien zu verdichten und verzichtet deshalb so weit wie möglich auf Bezüge zu einzelnen Studien.

Die nachfolgende Tabelle bietet eine Übersicht zu zentralen Annahmen und Ergebnissen der sechs Studien:

	BDI	DENA	DECHEMA	BMW i	ESYS	MWV
Untersuchte Klimaziele (1990-2050)	-80% und -95%	-80% und -95%	CO ₂ -neutrale chemische Industrie	-80% und -95%	-60 / 75 / 85 / 90%	-80% und -95%
Emissionsreduktion Chemie kumuliert 2015-2050, Szenario in Klammer	57% (80%) ca. 90-95% (95%)	31-46% (80%) 85% (95%) (Industrie)	59 / 84 / 176% ⁵ (Potentiale, ohne PtL)	69% (80%) (Industrie, Basisjahr)	-	75% (80%) 95% (95%) (Industrie)
Wachstum Produktion Chemie % p.a. sowie, in Klammer, kumuliert 2015-2050 in %	1,3 (57) Ammoniak 0,3 (11)	Ammoniak 1,3 (57) Chlor 1,5 (68) Ethylen 0,2 (7)	1,0 (42)	0,7 (28) (Industrie) ⁶ Ammoniak konst. Ethylen -3% kum Chlor +7% kum.	k. A.	k. A.
Energieeffizienz p.a. und kumuliert 2015-2050	Industrie: Fortschreibung des Trends. Bis 2050: 90% Durchdringung heute bekannter Effizienztechnologien;	Industrie: 26-33% Effizienzgewinne bis 2050	0,2 - 1,0 % p.a. 7 - 4,2 % kum.	Umsetzung von 75% der Einsparoptionen	k. A.	Fortschreibung des Trends
Treibhausgasrelevanz Scope 1+2						
Entwicklung Energieverbrauch Chemie (Mengen) Werte für 2050	k. A.	Ca. 225 TWh/a in Technologie-szenarien Ca. 335 TWh/a in Elektrifizierungs-szenarien (Endenergiebedarf für das Jahr 2050)	1.900 TWh/a, mit Produktion synthetischer Kraftstoffe 4.600 TWh/a (Strombedarfe 2050 für das mittlere Szenario)	Insgesamt leichter Rückgang CCS 22 TWh/a (Brennstoffe), 5 (Strom) (Basisszenario 2050)	k. A.	k. A.
Minderung der energiebedingten Emissionen (Chemie)	Strom: Erzeugung aus EE Wärme: Biomasse sowie, im 95% Szenario, synthetische Brennstoffe	Strom und Dampf: Erzeugung aus EE	Werden nicht betrachtet	Anstieg biogener Brennstoffe	k. A.	CCS bei Raffinerien
Entwicklung der Rohstoffbasis der Chemie	Weiterhin Nutzung fossiler Rohstoffe	Weiterhin fossil, jedoch Verlagerung von Öl zu Gas und Rückgang des Bedarfs Tlw. PtG	Weitgehender Umstieg auf stoffliche CO ₂ -Nutzung (CCU) und in geringem Umfang auf Biomasse	Weiterhin Nutzung fossiler Rohstoffe	k. A.	Weiterhin Nutzung fossiler Rohstoffe, PtL, BtL
Minderung der prozessbedingten Emissionen der Chemie durch	keine genannt (80%-Szenario) CCS (95%-Pfad)	<u>Ethylen:</u> Umstellung auf Erdgas, Elektrolyse <u>Ammoniak:</u> Umstellung auf Erdgas bis 2030, später Elektrolyse	Elektrifizierung, H ₂ -basierte Verfahren, Biomasse, CCU CO ₂ -Input für CCU wird als negative Emission angerechnet	Nutzung CCS für Ethylen, Ammoniak und Methanol in signifikantem Umfang ab 2035	k. A.	CCS

⁵ Die Studie ermittelt theoretische Reduktionspotentiale für die untersuchten neun Produkte.

⁶ Die Studie enthält spezifische Annahmen für insgesamt 18 Chemieprodukte

	BDI	DENA	DECHEMA	BMWi	ESYS	MWV
Treibhausgasrelevanz Scope 3						
Werden Emissionen aus den Produkten der Chemie betrachtet? ⁷	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
Bezüge zur Kreislaufwirtschaft durch Kreislaufführung von Kohlenstoff	Lediglich Überlegungen: Im Bezug zu CCS, Nutzung von CO ₂ aus Stahlproduktion für Ammoniak oder Methanol	Harnstoffherstellung als CO ₂ -Senke diskutiert	Kreislaufführung von Kohlenstoff durch CCU und Biomasse CO ₂ -Recycling zur Erreichung negativer Emissionen	Stoffliche Nutzung von CO ₂ diskutiert	Diskussion von Einsparungen bei der Herstellung von Ethylen, Propylen, Ammoniak und Chlor sowie Recycling	Nein

Tabelle 2: Zentrale Annahmen und Ergebnissen der sechs Studien

6.1 Technologien zur Emissionsreduktion

Die Erreichung der geforderten Reduktion der Treibhausgasemissionen erfolgt in allen Studien, wenngleich unterschiedlich akzentuiert, durch:

- Die Umgestaltung des Energiesystems, insbesondere den Ausbau Erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung und den Ausbau der Netze;
- Die deutliche Ausweitung der Nutzung Erneuerbarer Energien in anderen Verbrauchssektoren wie Wärme, Verkehr und Petrochemie
- Den Einsatz neuer sektorspezifischer Technologien;
- Die Steigerung der Energieeffizienz;
- Defossilisierung der Chemieindustrie und ihrer Vorkette.

Überwiegend wird in den Studien der Energiesektor genauer betrachtet, es finden sich aber auch in allen Studien Aussagen zur Chemieindustrie. Teilweise sind diese sehr grob oder auf einzelne Prozesse konzentriert, teilweise gehen sie bis hin zu szenarioabhängigen verbleibenden Restemissionen der Chemie.⁸ Nachfolgend sind Gemeinsamkeiten und Lücken der Studien dargestellt.

Keine der Studien betrachtet die gesamte Chemieindustrie. Zwar treffen alle Studien Aussagen zur Chemieindustrie, in der Regel – für den jeweiligen Studienzweck passend - fokussiert auf die energieintensivsten Prozesse (z. B. Ammoniaksynthese, Chlorelektrolyse). Die Studien von DECHEMA und MWV untersuchen konkrete Prozesse und Produkte. Im Fall der DECHEMA-Studie werden neun chemische Prozesse betrachtet. Jedoch auch dies umfasst nur rund zwei Drittel der Emissionen der Chemieindustrie. Nicht erfasst sind die weniger energieintensiven Teile der Chemie, die unter anderem auch Wärme benötigen, was auch DECHEMA verbunden mit Aussagen zur Steigerung der Energieeffizienz (u. a. durch Stärkung von Verbänden, aber auch spezifische Technologien im Niedertemperaturbereich) betont. In der MWV-Studie wird das Thema PtL eingehend untersucht, einschließlich der Vorketten in den Raffinerien. Die anderen Studien treffen zwar Aussagen für die gesamte Chemieindustrie, gehen dabei jedoch allenfalls beispielhaft auf einzelne Produkte und Prozesse ein. *Mit Blick auf für 2050 angestrebte Emissionsniveaus ist es deshalb naheliegend, in einer Roadmap die gesamte Chemieindustrie in den Blick zu nehmen, zumal es sich hier auch überwiegend um weniger energieintensiv empfindliche Prozesse oder Teilprozesse handelt.*

⁷ In den Studien, die Gesamtsysteme bilanzieren (BDI, DENA, BMWi, ESYS) werden Emissionen der Produkte zumindest indirekt über die Betrachtung der Emissionen aus der Abfallverbrennung bilanziert.

⁸ So verbleiben der Grundstoffchemie im 80%-Pfad des BDI 10 MtCO₂e, im 95%-Pfad sind es unter 2 Mt. CO₂e.

Steigerungen der Energieeffizienz basieren überwiegend auf Annahmen. Nur zum Teil werden Effizienzsteigerungen modellbasiert ermittelt⁹. Das ist eine Gemeinsamkeit und Lücke zugleich. Besser wäre es, Effizienzsteigerungsraten stellten sich in Abhängigkeit anderer Parameter wie etwa der trotz Carbon Leakage-Regelungen existierenden realen Energie- und CO₂-Kostenbelastung sowie aus anderen Gründen (z. B. nachfragebedingt) entstehende Portfolioveränderungen ein.¹⁰ DECHEMA und ESYS weisen aus unserer Sicht zu Recht ausdrücklich darauf hin, dass mit sinkenden Emissionsbudgets weitere Effizienzsteigerungen kaum noch zu Minderungsbeiträgen führen.

Für eine Roadmap empfiehlt es sich, die Annahmen zu Effizienzsteigerungen differenzierter zu wählen.

Strombasierte Verfahren in der Chemieindustrie sind in allen Studien eine Vermeidungsoption.

Der in allen Studien vorgesehene weitere Ausbau der Erneuerbaren Energien ist eine Voraussetzung dafür, direkte Emissionen der Chemieindustrie durch strombasierte Verfahren zu reduzieren. Dies gilt sowohl für Wärmebereitstellung als auch für chemische Prozesse. Alle Studien weisen aber auch ausdrücklich darauf hin, dass eine vollständig auf strombasierten Verfahren beruhende Produktion in der Chemieindustrie mit einem erheblich höheren Strombedarf verbunden ist und deshalb nicht immer energetisch sinnvoll bzw. überhaupt umsetzbar erscheint, und zudem mit sehr hohen Kosten verbunden ist.

Für die Erarbeitung einer Roadmap heißt dies einerseits, dass nicht für alle Prozesse strombasierte Verfahren angenommen werden sollten, jedenfalls sind andere Alternativen und daraus resultierende Emissionen auch in Betracht zu ziehen. Andererseits stellt sich für eine Roadmap die Frage, welche Beiträge zur Emissionsreduktion von Seiten der Chemieindustrie möglich erscheinen. Dies könnte bedeuten, die Markteinführung solcher Technologien (ggf. auch Power-to-X) und den weiteren Ausbau der Erneuerbaren Stromerzeugung zu unterstützen. Zu diskutieren wäre, unter welchen Bedingungen dies erfolgen könnte, auch mit Blick auf konkrete Rahmenbedingungen, zum Beispiel die Einbeziehung solcher Anlagen in die Strompreiskompensation. Von Beiträgen zur Markteinführung würden dann auch andere Sektoren profitieren und die Chemieindustrie möglicherweise zu stärkeren oder schnelleren Reduktionen in diesen beitragen. Die Darstellung dieser Beiträge kann zudem die Wahrnehmung der Chemieindustrie als einen Enabler des Klimaschutzes stärken. Sie kann zudem dazu beitragen, stärker zu betonen, dass Deutschlands Rolle im globalen Klimaschutz auch in der Entwicklung und Markteinführung von Technologien besteht.

In allen Studien sind Power-to-X-Technologien mindestens bei den 95%-Szenarien eine unverzichtbare Vermeidungsoption. Gemeinsam ist allen Studien, dass der PtX-Einsatz bei 95%-Reduktionszielen bis 2050 zwingend ist. Aufgrund der begrenzten Ausbaupotentiale für Erneuerbare Energien in Deutschland bedeutet dies umfassenden Import von Strom oder PtX-Produkten aus Basis Erneuerbarer Energien. Die entsprechende Technologieentwicklung und Maßnahmen zum Markthochlauf bereits vor 2030 erscheint es deshalb ebenfalls zwingend. Dies gilt sowohl für energetische Nutzungen (z. B. Verkehrskraftstoffe) als auch Rohstoffe (u. a. H₂). In allen Studien werden auch der erheblich höhere Strombedarf von PtX und auch deren erhebliche zusätzliche Kosten gegenüber heute verwendeten Energieträgern und v. a. Rohstoffen für die Chemieindustrie betont. Teilweise wird der Industrie (allerdings ohne explizite Nennung einzelner Branchen in diesem Zusammenhang) die Rolle als Leitmarkt für H₂-Anwendungen zugeordnet. Überwiegend wird in den Studien betont, dass auch bei moderateren Zielen – also dem 80%-Ziel – die Markteinführung und Nutzung von PtX zwingend ist. Lediglich im Fall der BDI-Studie ist dies nicht der Fall. Hier kommen 2050 etwa keine synthetischen Kraftstoffe zum Einsatz.¹¹ Zum Teil werden auch spezifische Aspekte benannt, etwa der Flächenbedarf für Elektrolyseure und daraus gezogene Schlussfolgerung nach Dezentralität der entsprechenden Anlagen, was zu Verbundkonzepten passt.

Für eine Roadmap stellt sich bezüglich PtX die Frage, inwiefern die Chemieindustrie oder einzelne Verfahren der Chemie sich unter zu benennenden Bedingungen und Forderungen besonders dafür eignen, die Markteinführung von PtX zu unterstützen. Dies kann im eigenen Interesse erfolgen, aber

⁹ Die BMWi-Studie tut dies anhand des Modells FORECAST Industry.

¹⁰ Der Carbon Leakage-Schutz wird in den Studien zumeist so implementiert, dass bei den Unternehmen keine über die zum Zeitpunkt der Studiererstellung hinaus anfallenden CO₂-Kosten aus dem Emissionshandel entstehen. Diese Annahme ist bereits jetzt mit Blick auf die reale Marktentwicklung und die rückläufige kostenlose Zuteilung nicht zutreffend.

¹¹ Ein Grund dafür könnte in den uneinheitlichen Diskontsätzen liegen. Während die anderen Studien Sätze zwischen 7 und 10% zugrunde legen, verwendet die BDI-Studie einheitlich 2%, außer für PtX (7%). Vgl. hierzu die Übersichtstabelle unter 4.2

auch mit Blick auf erhebliche positive Wirkungen wie etwa Kostendegression, ggf. auch schnellere Emissionsreduktion in anderen Sektoren.

Alle Studien benennen als potenzielle „Gamechanger“ CCS, CCU und die Herstellung geschlossener CO₂-Kreisläufe. Neben technologischen Aspekten werden in allen Studien mit CCS zusammenhängende Akzeptanzprobleme als wesentliche Barriere genannt, dies führt in einigen Szenarien sogar zum Ausschluss von CCS als Option. Für die Chemieindustrie ergeben sich Zusammenhänge für eigene Rohstoffe oder die Produktion von Synfuels und andere Grundstoffe wie e-Ethylen, e-Methanol usw., vor allem über CCU. In diesem Zusammenhang wird in einzelnen Studien auch auf industrielle Verbünde und Symbiosen verwiesen. Auch wird die Künstliche Intelligenz als möglicher Game-Changer genannt. Allerdings folgt daraus in der Chemieindustrie wenig an Reduktionspotenzial.

Für eine Roadmap-Erarbeitung erscheint wichtig, die Voraussetzungen insbesondere für CCU, die Herstellung geschlossener CO₂-Kreisläufe und damit einhergehende industrielle Verbünde genauer zu beschreiben. Dies sollte auch mit Blick auf praktische Hürden erfolgen.

Alle Studien weisen auf einen hohen und dringenden FuE-Bedarf hin. Zum Teil werden auch explizite Technologiereifen (TRL) und Technologielücken benannt, z. B. bzgl. der Herstellung von Ethylen und Propylen, sowie auf den Bedarf zur Überführung neuer Technologien in die industrielle Anwendung. Dies spiegelt sich dann folgerichtig auch in den politischen Forderungen wieder.

Für die Erarbeitung einer Roadmap sollte dieser FuE-Bedarf spezifiziert werden.

6.2 Rohstoffe

Fossile Rohstoffe spielen weiter eine wichtige Rolle für die Grundstoffchemie. In den volkswirtschaftlich optimierten Studien arbeitet die Grundstoffchemie weiterhin mit fossilen Rohstoffen. Die Emissionsreduktion findet durch Abscheidung und Lagerung statt (CCS). Eine zunehmende Bedeutung zeichnet sich für die stoffliche Nutzung (CCU) ab. Fossile Eingangsstoffe bleiben auch aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von Biomasse relevant. PtL und eine weitgehende Umstellung auf CCU spielen in einigen Szenarien eine zunehmend wichtige Rolle, sind jedoch noch nicht wettbewerbsfähig und zudem abhängig von der Verfügbarkeit großer Mengen Erneuerbarer Energien zu geringen Kosten.

Alle Studien gehen davon aus, dass die Verfügbarkeit nachhaltig erzeugter Biomasse begrenzt ist. Die Studien teilen die verfügbaren Mengen unterschiedlich auf. Überwiegend wird argumentiert, dass die energetische Nutzung – neben stofflichen Verwertungen z. B. in der Möbelindustrie – in der Industrie konzentriert sein sollte, um dort Kohle und Gas in der Nieder- und Mitteltemperaturwärmeerzeugung zu ersetzen. Aber auch die stoffliche Nutzung in der Chemieindustrie wird in Betracht gezogen und in einer Studie für fünf Produkte analysiert. Zum Teil wird bei Biomassenutzungen (aber auch anderen alternativen emissionsarmen Syntheserouten) auf den erheblich höheren Bedarf an Energie und, bei elektrischen Routen, den steigenden Bedarf an seltenen Erden und Edelmetallen (u. a. Katalysatoren) hingewiesen. Sehr unterschiedlich werden die Biomassepotentiale bewertet. Zwar kommen die Studien zu vergleichbaren Größenordnungen (vgl. Tabelle 3: Biomassepotentiale in den verschiedenen Studien). Allerdings streuen die diskutierten Potentiale sehr breit. Die Mehrzahl der Studien tendiert zu einer Beschränkung auf nationale Potentiale. In Anbetracht der Konkurrenz zur Nahrungsmittelerzeugung erscheint diese Beschränkung rational. Während ca. drei Viertel dieser Potentiale aus Rest- und Abfallstoffen stammen, sind die Annahmen bzgl. Energiepflanzen tendenziell konservativ. Eine Studie weist darauf hin, dass für deren Anbau keine Flächen zur Verfügung stünden, falls Deutschland einen Beitrag zur Ernährungssicherheit einer wachsenden Weltbevölkerung leiste.

Für die Erarbeitung einer Roadmap stellen sich bezüglich Biomasse mehrere Fragen. Zum einen taucht die Frage auf, wie die Kanalisierung von Biomasse für die industrielle Wärmeerzeugung instrumentell angesichts auch anderer Verbraucher (z.B. kommunale Fern- oder Nahwärmenetze, Kleinverbraucher insbesondere in ländlichen Regionen) herbeigeführt werden soll und welche

Annahmen hierzu zu treffen sind. Spätestens dann, wenn Biomasse auch als Rohstoff eine größere Rolle spielen soll und damit Nutzungskonkurrenzen deutlich zunehmen, entsteht die Frage, ob auch Szenarien mit höheren Verfügbarkeiten und ggf. niedrigeren Kosten unterstellt werden sollen oder ob die Verfügbarkeitsbegrenzung als Annahme übernommen wird. Ferner sind auch Annahmen zur Verfügbarkeit wichtiger relevanter Materialien zu treffen.

Studie	Biomasse-Potential im Jahr 2050
BDI	1.200 PJ (DE)
DENA	1.116 PJ (DE; Strommenge umgerechnet ¹²)
DECHEMA	15.000 PJ (EU)
BMW i	1.434 PJ (DE)
ESYS	989 PJ (DE; nur Rest- und Abfallstoffe)
MWV	1.500 PJ (DE)

Tabelle 3: Biomassepotentiale in den verschiedenen Studien

Die Verfügbarkeit von CO₂ als Rohstoff ist in den ambitionierten Szenarien begrenzt. Es finden sich in manchen Studien auch explizite, allerdings widersprüchliche Aussagen zur Verfügbarkeit von CO₂ als Rohstoff und damit auch Hinweise auf mögliche neue Knappheiten, vor allem bei hohen Marktanteilen von PtX. Die Folge kann der Bedarf geografischer Nähe von Quellen und Verbrauchern sein, also neue Formen industrieller Verbünde auch bezüglich der stofflichen Nutzung von CO₂.¹³ Abhängig von den Annahmen zur Verfügbarkeit von CCU-Technologien kann aus einer möglichen Verfügbarkeitsbegrenzung von CO₂ auch die Priorisierung von Kohlenstoff-Recycling gegenüber CCU abgeleitet werden.

In der Roadmap sollten also zu den beiden Gesichtspunkten CCU und Kohlenstoff-Recycling Annahmen zu technologischer Verfügbarkeit, Voraussetzungen und Kosten getroffen werden, sowie ggf. weitere Annahmen.¹⁴

6.3 Energiesysteme

In allen Studien ist die Defossilisierung des Energiesystems und insbesondere der Stromerzeugung der wesentliche Schlüssel zur Erreichung der mittel- und langfristigen Emissionsreduktionsziele. Häufig ist dies der Schwerpunkt der Betrachtung, zumindest ein wesentlicher Untersuchungsgegenstand. Zumeist werden Aussagen für die nationale Ebene getroffen, i.d.R. wird auch das Stromsystem der EU betrachtet. Nachfolgend sind Gemeinsamkeiten und Lücken der Studien dargestellt.

Alle Studien gehen von einer vollständigen oder nahezu vollständigen Defossilisierung der Stromerzeugung bis 2050 aus. Diese ist verbunden mit einem Anteil Erneuerbarer Energien an der Nettostromproduktion in der Größenordnung von 80-90% ggü. heute rund 30%. Die Studien benennen mit unterschiedlicher Akzentuierung die damit verbundenen Herausforderungen. Diese sind insbesondere die begrenzten Potentiale in Deutschland bezüglich des Zubaus Erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung, der Ausbaubedarf der Verteil- und Übertragungsnetze, damit zusammenhängende Investitionsbedarfe und Akzeptanzprobleme, sowie die Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit und damit zusammenhängende, kostenrelevante Kapazitätsbedarfe.

Die Anteile der Erneuerbaren Energien am gesamten Primärenergiebedarf steigen in allen Studien bis 2050 in die Größenordnung von 50-60% ggü. heute rund 12%. Die Herausforderungen liegen hier im technologischen Entwicklungs- und Investitionsbedarf sowie

¹² Die Studie gibt eine Potentialgrenze von 310 TWh Bioenergie an. Diese wurde mit einem Faktor 3,6 in PJ umgerechnet, ohne dass ein Aufschlag für Wandlungsverluste erfolgte. Der Wert ist also tendenziell zu niedrig.

¹³ Eine Studie regt dazu ein öffentlich zugängliches Mapping von Quellen, Verbrauchern und Infrastruktur an.

¹⁴ Vgl. hierzu das Unterkapitel zu Interdependenzen.

teilweise auch höheren Brennstoffkosten, zum Beispiel bei PtX oder der Bereitstellung von Wärme für die industrielle Verwendung. Die Importe verlagern sich zunehmend hin zu PtX auf Basis Erneuerbarer Energien, sofern dies nicht über Annahmen der Szenarien ausgeschlossen ist. Allerdings fallen selbst größere Importe von PtX weit geringer aus als heutige Importe fossiler Brennstoffe und Rohstoffe.

Für eine Roadmap können aus unserer Sicht sowohl diesbezügliche Annahmen als auch Ergebnisse der Studien im Kern übernommen werden. Jedoch sollten die damit verbundenen Herausforderungen insbesondere in der Chemieindustrie klar benannt werden. Wichtiger für eine Roadmap sind aus unserer Sicht die Variationen auf dem Weg dorthin.

Bereits in den jeweiligen Referenzpfaden der Studien werden immerhin rund 60% Emissionsreduktion bis 2050 unterstellt, im Wesentlichen auf Basis der Fortführung heutiger Maßnahmen und Entwicklungen. Neben angenommenen Effizienzsteigerungen in allen Sektoren sind dafür insbesondere die Entwicklungen in der Stromerzeugung in Deutschland ausschlaggebend.

Thermische Kraftwerke bleiben in allen Studien systemrelevant und garantieren die Versorgungssicherheit. Auffallend ist, dass die Versorgungssicherheit bei Dunkelflauten stets durch flexible Kraftwerke garantiert wird. Die Kapazitäten variieren hierfür zwischen 60 und 160 GW, einschließlich der KWK-Eigenerzeugungsanlagen der Industrie. Die Studien gehen von einem relevanten Zubau von Gaskraftwerken aus, bereits vor 2030, wenn auch in unterschiedlicher Dimensionierung v.a. in den 95%-Szenarien. Insbesondere Erdgas bleibt für die Stromerzeugung als Primärenergieträger bis 2050 bedeutsam, jedoch mit einer sinkenden Anzahl Volllaststunden. Um auch die flexiblen Kraftwerke zu Defossilisieren, wird Erdgas in einigen Szenarien zunehmend durch PtG ersetzt. In den Studien wird auch ein starker Rückgang der Kohleverstromung zum Teil bereits bis 2030, spätestens bis 2040 unterstellt.¹⁵ Zum Teil erfolgt ein Rückgang der Kohleverstromung marktendogen, also auch ohne dezidierte Ausstiegsbeschlüsse. Zugleich sind zumindest bis 2030 fossile Kraftwerke auf dem Strommarkt sehr wichtig. Sie bleiben nach derzeitigem Marktdesign des Strommarktes auch preisbildend. Wenn der Anteil an Gaskraftwerken auch vor 2030 steigt, wirft dies aus unserer Sicht die Frage auf, wann dann in Deutschland ein Merit-Order-Effekt durch den steigenden Anteil von Gaskraftwerken zu erwarten ist. Dies ist jedoch in den Studien ebenso wenig untersucht worden wie ein anderes Strommarktdesign, das auch Einfluss auf Eigenerzeugungsanlagen der Industrie haben kann.

Für eine Roadmap regen wir an, explizite Annahmen hierzu zu treffen. Mögliche Merit-Order-Effekte können den Strompreis und damit die Energiekosten der chemischen Industrie ebenso beeinflussen wie z. B. die Preise für Brennstoffe und Emissionsrechte. Der Einfluss möglicher Merit-Order-Effekte in Deutschland auf Kosten, aber auch Effizienzsteigerungen und Emissionsverläufe sollte abgebildet werden.

Die Entwicklung der Stromnachfrage fällt je nach Szenario sehr unterschiedlich aus. Wesentliche Treiber dieser unterschiedlichen Entwicklungen sind der Grad der Elektrifizierung und Sektorkopplung, der Grad der Nutzung von PtX aufseiten der nachfragesteigernden Elemente, sowie Effizienzsteigerungsannahmen und Energieeinsparmaßnahmen.

Für eine Roadmap könnten Spannweiten für die Entwicklung der Stromnachfrage abgeleitet und in Szenarien abgebildet werden. Umfassende Auswirkungen auf die Chemieindustrie haben besonders die PtX-Erzeugungstechnologien, für sie könnten unterschiedliche Szenarien angelegt werden.

Die erneuerbaren Stromerzeugungskapazitäten werden in allen Studien massiv ausgebaut. In allen Szenarien werden die Erneuerbaren Energien massiv ausgebaut. Photovoltaik und Windkraftanlagen spielen die Hauptrolle in der Stromerzeugung hinsichtlich der Strommengen. Dies gilt auch in den Szenarien am unteren Rand der 80-95%-Intervalls sowie für die Szenarien ohne Nutzung von Power-to-X. Das wirft unterschiedlich genau untersuchte Fragen zur Integration von Erneuerbaren Energien im Netz und zum Netzausbau auf allen Spannungsebenen auf, außerdem zu Ausbaupotenzialen in Deutschland und Stromimporten.

¹⁵ BDI unterstellt eine Wirtschaftlichkeit für einen Teil der Kohleverstromung auch nach 2050 im Szenario „nationale Alleingänge“, was aus unserer Sicht auch mit Blick auf reale CO₂-Preisentwicklungen und andere aktuelle politische Prozesse zu konservativ erscheint.

Für eine Roadmap kann dies zum Beispiel die Frage aufwerfen, auf welche Art und Weise die chemische Industrie zur Systemintegration Erneuerbarer Energien beitragen kann und welche Bedingungen hierfür zu erfüllen sind. Ferner folgt daraus auch, dass Eigenerzeugungsanlagen ein über das heute schon bestehende Maß hinaus höhere Bedeutung zukommen kann, sowohl für die Industrie selbst als auch mit Blick auf Kapazitäten zur Stabilisierung des Stromsystems. Auch hierfür wären Voraussetzungen abzuleiten, aber auch technische und wirtschaftliche Implikationen für die überwiegend wärmegeführten Anlagen.

Erforderlich ist es auch, Abregelungen bei EE-Erzeugungsanlagen möglichst vollständig zu vermeiden und bereits vor 2030 den Netzausbau zu beschleunigen. Ferner ist der Zubau von Speichern erforderlich. Dabei werden erhebliche, auch technische Restriktionen unterstellt. Zumindest zwischenzeitlich wird Deutschland zum **Importeur** von Strom, was auch an Begrenzungen der möglichen nutzbaren Produktionskapazitäten in Deutschland liegt. Abhängig von Reduktionsziel und v.a. dem Technologiemix (DENA) kann Deutschland wieder zum Exporteur von Strom werden.

Die Gasinfrastruktur bleibt in allen Szenarien wichtig. Alle Studien betonen die Bedeutung, Erhalt und ggf. auch Ausbau der heutigen Gasinfrastruktur für die Versorgungssicherheit auch der Industrie, ihre Rolle als Speicher und auch eine mögliche Rolle bei der Integration erneuerbarer Energien (Synthetisches Gas, Beimischung H₂).

Dies kann aus unserer Sicht in der Roadmap übernommen werden, jedoch sollte dort ein expliziterer Bezug zur Rolle der Chemieindustrie in dieser Infrastruktur z.B. als Nutzer hergestellt werden.

Steigende Strompreise spielen mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit aller strombasierten Maßnahmen eine große Rolle. In allen Szenarien steigen die Strompreise absehbar weiter. Durch steigende Kosten des Stromsystems steigen auch die Stromkosten. In allen Studien steigen deshalb auch die Strompreise. Dies gilt vorrangig für die Großhandelsstrompreise. Verbrauchssektoren müssen durch Einspareffekte teilweise weniger Geld für Energie ausgeben. Denn die Endverbraucherpreise liegen oft nur geringfügig höher als heute, da in der derzeitigen Regulierung der steigende Großhandelsstrompreis durch eine sinkende EEG-Umlage kompensiert wird. Die Wirtschaftlichkeit strombasierter Maßnahmen und Technologien hängt jedoch nicht allein von den Strompreisen für Erneuerbare Energien ab. Maßgeblich ist auch das Gesamtsystem der Energiebesteuerung: Das Verhältnis des Strompreises im Vergleich zu anderen Energieträgern ist entscheidend für die Frage, in welchem Maße fossile Technologien durch strombasierte ersetzt werden. Hohe Strompreise können die Kosten der Energiewende auch senken, weil sie zu Energieeinsparungen und Effizienzsteigerungen führen oder nicht-strombasierte Minderungsmaßnahmen anreizen.

Für die Roadmap heißt dies, dass es sinnvoll erscheint, unterschiedliche Strompreise anzunehmen und daraus dann auch Umsetzung möglicher Effizienzmaßnahmen sowie den Einsatz strombasierter Verfahren und daraus folgende Produktionskosten chemischer Erzeugnisse abzuleiten. Dies kann dann ein Baustein für die Ableitung entsprechender politischer Rahmenbedingungen sein. Die Annahmen zur Strompreisentwicklung aus den Studien können dazu aus unserer Sicht übernommen werden.

6.4 Interdependenzen mit Schwerpunkt Circular Economy

Circular Economy wird in den Studien oft nur knapp untersucht, zumeist in der Ausprägung „geschlossene CO₂-Kreisläufe“. Aus Sicht der Treibhausgasrelevanz haben die Themenfelder Circular Economy und geschlossene CO₂-Kreisläufe eine große Bedeutung für die Energie- und Klimapolitik. In den Studien werden sie nur teilweise und jeweils nicht im Schwerpunkt untersucht. Es werden jedoch zumindest punktuelle Aussagen getroffen.

Für die zumeist in den Studien betrachteten Szenarien zur Erreichung eines 80 %- bzw. 95 %- Reduktionsziels spielen geschlossene CO₂-Kreisläufe eine untergeordnete Rolle. Hier stehen

vor allem der Umbau der Energieerzeugung auf Biomasse und Strom, der Ausbau der Übertragungsnetze und Energie- und Materialeffizienzsteigerungen im Vordergrund. Schnittstellen gibt es lediglich bei der Abscheidung von CO₂ aus Kraftwerken und der weiteren Nutzung von synthetisch erzeugten Kraft- und Brennstoffen. Ein Großteil der Studien sieht zudem CCS als wesentlichen Zwischenschritt zum Erreichen der Klimaschutzziele, zumindest wenn das ambitionierte 95 %-Ziel erreicht werden soll.

Die Nutzung von CO₂ (CCU) wird unter dem Aspekt der zukünftigen Energieversorgung sowie als Kohlenstoffsenke diskutiert. Power-to-X-Verfahren spielen eine wesentliche Rolle in allen betrachteten Szenarien der Studien, d. h. über Elektrolyseverfahren H₂ zu erzeugen und dieses mit CO₂ zu z. B. flüssigen oder gasförmigen Kraft- und Brennstoffen weiterzuverarbeiten. Dies stellt auch einen Teil der Kreislaufwirtschaft dar, allerdings wird das CO₂ in der Regel schnell wieder in die Atmosphäre abgegeben und führt daher nicht zu langfristigen Bindungen und damit einem langfristigen Entzug von CO₂-Emissionen aus der Atmosphäre. Allerdings werden dadurch fossile Emissionen substituiert und eine weitere Belastung der Atmosphäre verhindert. In der DECHEMA-Studie wird die Nutzung von CO₂ im Gegensatz zu den anderen Studien als Kohlenstoffsenke bilanziert. Zum Teil werden in den Studien zu Gunsten der PtX die Treibhausgas-Emissionen der industriellen Quelle zugeordnet, aus der das als unvermeidlich betrachtete CO₂ stammt. Dieser Punkt ist mit Blick auf aktuell laufende Regulierungsvorhaben (neue Monitoring-Verordnung im Emissionshandel) nicht unproblematisch, weil dies implizieren würde, auch bei Weiterleitung von CO₂ zugunsten CCU die Abgabepflicht im ETS für CO₂ bei der Emissionsquelle zu belassen, die dieses für CCU zur Verfügung stellt. Wäre dies so, wären jedenfalls mögliche direkte Anreizwirkungen aus dem Emissionshandel für CCU nicht möglich.¹⁶ Dieser Gesichtspunkt verliert bei der Bewertung von CCU an Bedeutung, wenn die CO₂-Emissionen mittels Direct Air Capture direkt der Atmosphäre entzogen werden, wie es z.B. im BDI 95%-Szenario der Fall ist.

Für eine Roadmap sollte die Zuordnung der Emissionen aus der Nutzung von PtX, die mittels CCU einen ursprünglich fossilen Anteil haben, mindestens thematisiert werden.

In der chemischen Industrie gibt es neben Power-to-X zahlreiche weitere Einbindepotenziale, die allerdings größtenteils noch nicht entwickelt oder nur in kleinen Forschungsmaßstäben erprobt sind. Die unterschiedlichen Studien gehen auch auf einige Anwendungen bzw. auf alternative Herstellpfade ein, bspw. von Methanol unter Verwendung von CO₂ als Edukt. Vor allem im Bereich der Verbrennung stehen über das Rauchgas erhebliche CO₂-Quellen zur Verfügung. Dabei spielen insbesondere Stein- und Braunkohle- sowie Erdgaskraftwerke die entscheidende Rolle. Die Techniken für die Gewinnung sind verfügbar, werden bislang aber nur in Pilot- und Demonstrationsanlagen eingesetzt. Auch die energieintensive Möglichkeit, CO₂ aus der Umgebungsluft zu extrahieren, bspw. über das Direct Air Capture (DAC)-Verfahren werden immer wieder angesprochen, da diese zu einer künstlichen CO₂-Senke führen.

Die möglichen Reduktionspotenziale durch CCU lassen sich heute aber nicht genau bewerten. Der Grund dafür ist, dass sich die meisten Ansätze noch im Forschungsstadium befinden. Zudem erlauben es die unterschiedlichen Herstellungsverfahren gerade im Chemiebereich, auf unterschiedliche Wege bestimmte Produkte zu erzeugen. Möglicherweise können nicht alle Erzeugungswege gleichermaßen bedient werden und damit ggf. auch nicht das potenziell zur Verfügung stehende CO₂ auch vollständig in bestimmten Produkten eingebunden werden. Generell ist auch zu prüfen, ob und unter welchen Bedingungen durch CCU-Technologien überhaupt positive CO₂-Effekte entstehen oder durch die notwendigen Aufbereitungsschritte letztlich nicht mehr CO₂ entsteht, als durch die spätere Einbindung eingespart wird. Diese Frage wird in keiner der vorliegenden Studien näher diskutiert.

Für die Erarbeitung einer Roadmap für die Chemieindustrie erscheint dieses Themengebiet wichtig. Dies gilt sowohl mit Blick auf schwerer adressierbare prozessbedingte Emissionen als auch in Bezug auf z. B. technologische und langfristige Verfügbarkeitsfragen im Falle der großtechnischen Nutzung von CO₂ als Rohstoff. Grundsätzlich lässt sich als Fazit ziehen, dass in allen Studien gegenseitige

¹⁶ Zur Neufassung der Monitoring-VO im Emissionshandel laufen gerade Forschungsvorhaben der Deutschen Emissionshandelsstelle, in denen u.a. auch die Zurechnung von CO₂-Emissionen bei CCU thematisiert wird.

Einflüsse zwischen der Sektorkopplung und einer Kreislaufwirtschaft attestiert werden. Zum Erreichen der ambitionierten Klimaschutzziele sehen aber die meisten Studien nicht eine ausgeprägte Kohlenstoff-Kreislaufwirtschaft im Vordergrund, sondern andere Aspekte wie die Umstellung der Energieversorgung auf Biomasse, Energieeffizienz und Materialeffizienz oder auch CCS. Dies mag aber auch daran liegen, dass es schwierig und aufwändig ist, die Potenziale und auch die technologische Entwicklung von CCU näher zu beleuchten.

6.5 Politik

Die in den Studien enthaltenen Forderungen an die Politik lassen sich vergleichsweise kurz zusammenfassen. Da es sich hierbei um politische Festlegungen handelt, empfehlen wir dem VCI die Diskussion dieser Punkte mit Blick auf die Entwicklung einer Roadmap.

Alle Studien beinhalten einige generelle Forderungen:

- Grundbedingungen für das Gelingen einer Transformation sind ein wirksamer Carbon-Leakage Schutz, langfristige Planungssicherheit und Klarheit der Rahmenbedingungen. Die gilt vor allem mit Blick auf Investitionen in neue Technologien. Ohne Carbon-Leakage-Schutz hat die Industrie über den langen Zeitraum bis 2050 kaum eine Perspektive in Deutschland.

In diesem Zusammenhang könnten in einer Chemie-spezifischen Roadmap auch spezifische Herausforderungen und Barrieren der chemischen Industrie betont werden, z. B. den Kostendruck bei energieintensiven Verfahren, fehlende Betriebserfahrungen mit neuen Technologien und deren Einbettung in Verbundanlagen.

- Bestehende Politiken müssen besser integriert und abgestimmt werden. Dies gilt für das Verhältnis der politischen Ebenen, etwa das Verhältnis nationaler zu europäischer Klimapolitik ebenso wie für bestimmte Themenbereiche wie etwa der Energiebesteuerung. Teilweise fehlt es in den Studien jedoch an einer detaillierten Auseinandersetzung mit instrumentellen Widersprüchen. In einigen Studien gibt es einen klaren Vorrang der europäischen Ebene, etwa hinsichtlich der CO₂-Reduktionsziele. Dieser Vorrang basiert auf der idealisierenden Voraussetzung einer umfassenden Zusammenarbeit der Staaten, etwa beim grenzüberschreitenden Netzausbau. Dies widerspricht bisherigen tatsächlichen Entwicklungen wie etwa der schwerpunktmäßigen Ausrichtung der deutschen Energiepolitik auf die Energiewende in Deutschland.

In der Roadmap könnte das Thema Integration und Verzahnung von Politiken zumindest in Form von in der Chemie besonders relevanten Beispielen angereichert werden, in denen z. B. Hemmnisse für Effizienzsteigerungen durch die Wechselwirkungen zwischen Instrumenten klar benannt werden. Ein konkretes Beispiel hierfür wäre etwa die Schwellenwertproblematik der Ausnahmeregelung beim EEG.

- Problematisiert wird auch die sehr unterschiedliche Energiebesteuerung. Sie diskriminiert sowohl zwischen Energieträgern, die chemisch ähnlich sind, aber unterschiedlich verwendet werden, als auch zwischen chemisch verschiedenen Energieträgern, die gleich verwendet werden. *Es muss hier offen gelassen werden, ob im Zuge einer Roadmap ein Ergebnis zu diesem Themengebiet abgeleitet werden soll. Sollte die Diskussion um eine Umgestaltung des für Energie geltenden Steuer-, Umlagen- und Abgabensystems relevant werden, wäre zumindest denkbar, auch zu diesem Punkt unterschiedliche Annahmen zu treffen.*
- Die Studien betonen den Bedarf für FuE und Bildung und an entsprechenden Förderungen. Wichtig für eine Roadmap erscheinen spezifischere Aussagen zur Markteinführung neuer Technologien, zum Beispiel eine in einer Studie vorgeschlagene „Markthochlaufstrategie Synfuels“ und die Weiterentwicklung entsprechender Infrastrukturen für flüssige und gasförmige Energieträger und Rohstoffe oder gezielte Investitionsbeihilfen, insbesondere für die Markteinführung. *Es ist naheliegend, dass auch in der Roadmap entsprechende Forderungen abgeleitet werden können, insbesondere dann, wenn dadurch auch Beiträge für die Fortentwicklung und Stabilisierung des gesamten Energiesystems geleistet werden.*
- Einige Studien fordern Monitoring-Prozesse und Transparenz, ausgeprägte verstetigte Dialogforen mit allen Stakeholdern sowie aktive Maßnahmen der Politik zur Erhöhung der Akzeptanz notwendiger Maßnahmen in der Bevölkerung. Dies wird beispielsweise mit Blick auf

den Netzausbau, die Installation von Windkraftanlagen, aber auch andere Infrastrukturmaßnahmen bis hin zu einer neuen Diskussion zu CCS geltend gemacht. *Diesen Forderungen kann man sich aus unserer Sicht nur anschließen.*

Alle Studien fordern auch spezifische Instrumente zur Steigerung der Energieeffizienz. Dies wird auch damit begründet, dass angenommene Effizienzsteigerungen in der Industrie nicht den realen Verbesserungen der letzten 10 Jahre entsprechen. Dazu kann hier keine Vertiefung erfolgen, jedoch ist darauf hinzuweisen, dass die Studien noch nicht die nunmehr vorliegende Neufassung der EED und der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED) berücksichtigen konnten, von deren Umsetzung in Deutschland ganz abgesehen.

Diese sollten insbesondere bezüglich ihrer Implikationen für die Industrie als weitere Vorbereitung der Erarbeitung einer Roadmap ausgewertet werden. Ein Beispiel hierfür könnte eine Quote Themengebiet PtX in der RED sein.

Alle Studien betonen die Rolle international harmonisierter Politik und auch – solange dies nicht gegeben ist – wirksame Carbon Leakage Schutz-Regeln. Diese Untersuchungen haben zwei bedeutende Lücken: Zum einen wird nicht diskutiert, ob die volkswirtschaftlichen Kosten und die damit einhergehenden Verteilungsdiskussionen mit hinreichenden Carbon-Leakage-Regelungen überhaupt kompatibel sind. Zum anderen ist die Berücksichtigung von Carbon Leakage in den Studien selbst ungenügend weil idealisierend angenommen, Carbon Leakage-Schutz bedeute, der Industrie entstünden keine CO₂-Kosten, zumindest nicht über das heutige Maß hinaus. Dies entspricht bereits heute nicht den Tatsachen. Spätestens ab 2021 führen die Regeln des revidierten EU-Emissionshandels zu einer maßgeblichen, jedenfalls höher als bisher ausfallenden Kostenbelastung der Industrie.¹⁷

Bemerkenswert ist aus unserer Sicht, dass die Konkretisierung internationaler Kooperation, wie im Pariser Klimaschutzabkommen bereits angelegt, auch die Form internationaler Handels- und Kompensationsmechanismen annehmen kann und gemäß dem Pariser Abkommen auch soll. Darauf wird in den betrachteten Studien kaum Bezug genommen, auch nicht explizit darauf, dass das Pariser Abkommen das Ziel der THG-Neutralität verfolgt und nicht das der Null-Emission. Vor diesem Hintergrund ist es naheliegend, zumindest in langfristigen Betrachtungen bis 2050 sowohl internationalen Emissionsrechtehandel stärker zu berücksichtigen als auch Politiken, die auf eine Stärkung der Senkenfunktion abzielen. Dies gilt mit Blick auf CCS und PtL, aber auch die Sektoren Landnutzung und Forst, zumal in diesen sowohl innerhalb der EU als auch weltweit deutlich niedrigere Reduktionskosten denkbar sind.

Es empfiehlt sich deshalb, in der Roadmap auch die mögliche Alternative „Ausgleichsmaßnahmen und internationale Kooperation“ zu berücksichtigen. Dies kann ggf. in Zusammenhang mit Kostenbetrachtungen oder als Rückfalloption bei späterer Verfügbarkeit bestimmter Technologien erfolgen. Dies gilt insbesondere dann, wenn im weiteren politischen Prozess erkennbar werden sollte, dass wie in einigen Studien enthalten, Budgetansätze verfolgt werden. Diese sind im Kern auch in den EU-Instrumenten Emissionshandel, Effort Sharing und der LULUCF-Verordnung angelegt. In diesem Fall könnten schneller in der CO₂-Bilanz wirksame und vergleichsweise günstige Maßnahmen noch wichtiger werden.

In allen Studien ist der EU-Emissionshandel berücksichtigt, teilweise jedoch wird er in den Modellen nur ungenügend abgebildet, nämlich über angenommene CO₂-Preise, nicht jedoch über das mit dem Emissionshandel verbundene Mengenregime. Für die Industrie findet sich zum Teil auch die vereinfachende Annahme, dass die im Emissionshandel gesetzten Ziele 2030 und 2050 proportional über alle Industriesektoren hinweg erreicht werden. Das Problem einer Abbildung über Preise ist, dass sich keine Steuerungswirkung eines Handelssystems entfaltet. Dadurch machen sich Entlastungseffekte im System nicht in der Weise bemerkbar, wie sie vom Emissionshandel angereizt werden. Simuliert wird dann de facto eine Besteuerung. In einer Studie wird der Emissionshandel jahresscharf über ein handelbares Mengensystem abgebildet.

Für eine Roadmap sollte dieses Instrument aus unserer Sicht aufgrund seiner zentralen Bedeutung für die EU-Klimapolitik genauer abgebildet werden bezüglich seiner Implikationen für die Chemieindustrie, mindestens in Form von Beispielen und mit Bezug zu alternativen Technologien für Wärmebedarf und Prozesse.

Alle Studien betonen den Bedarf, sektorübergreifende industrielle Partnerschaften und Symbiosen auszubauen. Auch dieser Punkt erscheint wichtig für eine Roadmap.

¹⁷ Vgl. hierzu bspw. <https://www.vik.de/wp-content/uploads/2018/01/VIK-Studie-CO2-Kostenbelastung-EU-ETS-Reform.pdf>.

In einer Studie findet sich die explizite Forderung, das heute bestehende Abgaben- und Umlagesystem an den Erfordernissen einer integrierten Energiewende auszurichten. Dies bedeutet, bestehende Widersprüche wie zum Beispiel Steuersätze für bestimmte Brenn- und Kraftstoffe oder Verzerrungen zwischen Sektoren zu beseitigen, stärker auf Treibhausgas-Intensitäten abzustellen und ggf. auch die Finanzierungsbasis für den Ausbau Erneuerbarer Energien zu verändern. Hier ist aus unserer Sicht eine Diskussion innerhalb des VCI notwendig, ob dies in der zu erarbeitenden Roadmap abgebildet werden soll oder nicht.

6.6 Nachfrage

Dieses Themengebiet stellt die größte Lücke aller betrachteten Studien dar. Zwar finden sich in allen Studien Annahmen zur weiteren Produktionsentwicklung. Diese Annahmen sind aber eher pauschal und wenn überhaupt kaum differenziert zwischen verschiedenen Produktgruppen, teilweise erscheinen sie auch kritikwürdig. Eher pauschale, wenn auch zutreffende Aussagen wie eine gute Ausgangslage für Erfolge auf dem Weltmarkt und daraus entstehende Chancen aus einem nationalen Leitmarkt hinaus helfen hier nicht weiter. Dies erscheint für die Erarbeitung einer Roadmap für die sehr stark diversifizierte Chemieindustrie auf keinen Fall ausreichend. Aus unserer Sicht ist es für diese notwendig:

- *differenzierte Annahmen zu Wachstum und Produktionsentwicklung zu treffen, sowohl zu energieintensiven als auch weniger energieintensiven Teilen der Chemieindustrie,*
- *dabei auf Nachfrageimpulse durch die Transformation anderer Sektoren einzugehen, wie z. B. klassische Beispiele Dämmstoffe, Elektrofahrzeuge oder Batterien,*
- *dabei auch auf denkbare Substitutionseffekte, die nachfrageerhöhend und –senkend wirken können einzugehen (nicht nur bei Mineralölen) und auch*
- *auf denkbare neue Geschäftsfelder, auf jeden Fall PtX/H₂ aber auch denkbare GameChanger aus der Chemie wie neue Werkstoffe und ggf. auch „synthetisches Fleisch“.*

Da seitens VCI bereits eine eigenständige Studie zur Entwicklung der Nachfrage in Auftrag gegeben wurde, deren Ergebnisse ebenfalls in die Erarbeitung der Roadmap einfließen sollen, wird hier auf dieses Themengebiet nicht weiter eingegangen.

6.7 Vergleich der Kosten

In den betrachteten Studien werden unterschiedliche Perspektiven zur Ermittlung der Kosten gewählt. Dadurch ist ein vollständiger Kostenvergleich kaum möglich und auch nicht sinnvoll. Zumeist wird eine volkswirtschaftliche Perspektive zugrunde gelegt, mit entsprechenden Zins-/Diskontsatz von um 2% p.a. Bei Studien mit einer betrieblichen Perspektive und der EU-weiten Betrachtung liegen diese dagegen bei ca. 10%. In einer Studie werden sowohl volkswirtschaftliche Kosten ausgewiesen als auch bezüglich der Investitionskosten einzelner Verfahren zumindest implizit auch eine betriebswirtschaftliche Sicht, weil aus den Annahmen hervorgeht, dass auch dort ein kalkulatorischer Zins von 10,5% angenommen wurde. Allein diese Annahmen beeinflussen die Ergebnisse so stark, dass sie nicht direkt verglichen werden können. Ferner sind nicht in allen Studien dezidierte Kosten und Investitionsbedarfe für die Chemieindustrie ausgewiesen.

Die ökonomische Einordnung folgt in nahezu allen untersuchten Studien einer gesamtwirtschaftlichen Logik. Für die untersuchten Szenarien werden volkswirtschaftliche Mehrkosten und Mehrinvestitionen ermittelt. Eine Ausnahme bildet hier die Studie der DECHEMA, in der konkrete Produktionskosten ermittelt werden. Zumindest in Fallbeispielen nimmt die Studie des BDI eine Entscheiderperspektive ein. Insgesamt kommen die betriebswirtschaftlichen Betrachtungen jedoch zu kurz.

Für die Entwicklung einer Roadmap empfehlen wir, die betriebswirtschaftliche Sicht stärker abzubilden. Dadurch können Auswirkungen auf die Industrie konkretisiert und besser verstanden werden, auch mit Blick auf daraus ableitbare Vorschläge an die Politik.

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die ausgewiesenen Kosten.

Kostenkategorie	Studie					
	BDI	Dena	Dechema	BMW	ESYS	MWV
Volkswirtschaftliche Gesamtkosten	<p>Berücksichtigung der Energieträgerpreise</p> <p><i>Folgende Zahlen sind zu den Kosten der technischen Maßnahmen (unten) zu addieren.</i></p> <p>80%: +470 Mrd. € 95%: +960 Mrd. €</p> <p>In diesen Kosten enthalten sind 240 Mrd. € für bestehende Anstrengungen.</p>	<p>Elektrifizierung: 80%: 1.770 Mrd. € 95%: 2.220 Mrd. €</p> <p>Technologiemix: 80%: 1.180 Mrd. € 95%: 1.680 Mrd. €</p>	<p>Hier werden die unten genannten Kosten aus der Entscheidungsebene hergeleitet, also der betriebswirtschaftlichen Sicht, fokussiert insbesondere auf Investitionsbedarfe der Chemieindustrie EU-weit. Die so ermittelten Kosten können deshalb kaum mit den auf volkswirtschaftlicher Ebene Deutschlands definierten Kosten verglichen werden.</p>	<p>Annualisierte Mehrkosten über die untersuchten Sektoren hinweg im Basisszenario gegenüber dem Referenzszenario unterteilt in Fixkosten (FK; Investition, Wartung, Instandhaltung) und Energiekosten (EK):</p> <p>2020: FK: + 4.024 Mio. € EK: - 997 Mio. €</p> <p>2030: FK: + 13.360 Mio. € EK: - 7.369 Mio. €</p> <p>2040: FK: + 23.548 Mio. € EK: - 11.121 Mio. €</p> <p>2050: FK: + 27.535 Mio. € EK: - 12.485 Mio. €</p> <p>Kumulierte Mehrkosten (bei linearer Interpretation, Summe Fixkosten und Energiekosten) 2050: ~ 285 Mrd. €</p>	<p>Kumulierte systemische Gesamtkosten bis 2050 (Kosten für Neuanschaffungen und Ersatz inkl. Kapitalkosten, Betriebskosten, Wartung und Kosten für Brennstoffe)</p> <p>Referenz: ca. 4.040 Mrd. €* 60%: 4.304 Mrd. €* 75%: 5.100 Mrd. €** 85%: 6.100 Mrd. €** 90%: 7.400 Mrd. €**</p> <p>* aus Grafik abgelesen ** auf Basis der abgelesenen Kosten und den im Text dargestellten Mehrkosten errechnet</p>	<p>Kumulierte volkswirtschaftliche Mehrkosten ggü. Referenzszenario mit Blick auf Energiekosten und Investitionen:</p> <p>PtX 80: 1.534 Mrd. € PtX 95: 1.459 Mrd. €</p> <p>kumulierte Energiekosten: Referenz: 3.400 Mrd. € PtX 80: 4.900 Mrd. € PtX 95: 4.800 Mrd. €</p>
Kosten der Maßnahmen / Investitionen	<p>Kosten der technologischen Maßnahmen:</p> <p>530 Mrd. € (REF) 1.530 Mrd. € (80%) 2.330 Mrd. € (95%)</p> <p>Davon u.a.: 80%-Szenario: 430 Mrd. €: Stromsektor (ca. 250</p>	<p>Stromimportkosten: EL80: 131 Mrd. € EL95: 231 Mrd. € TM80: 104 Mrd. € TM95: 115 Mrd. €</p> <p>Infrastrukturkosten: EL80: 377 Mrd. €</p>			<p>Systemische Gesamtkosten bis 2050: Referenz: 4.040 Mrd. €* 60%: + 300 Mrd. €* 75% ggü. 60%: +800 Mrd. € 85% ggü. 75%: +1.000 Mrd. € 90% ggü. 85%: +1.300 Mrd. €</p> <p>* aus Grafik abgelesen</p>	<p>Kumulierte Mehrinvestitionen ggü. Referenzszenario: PtX 80: 34 Mrd. € PtX 95: 59 Mrd. €</p>

	<p>Mrd € für Erneuerbare, ca. 180 Mrd. für Netzausbau)</p> <p>95%-Szenario: 620 Mrd. €: Stromsektor (zusätzlicher Aufbau von Elektrolysekapazität für PtG, Aufbau von Synfuel-Infrastruktur im Ausland)</p>	<p>EL95: 391 Mrd. € TM80: 252 Mrd. € TM95: 273 Mrd. €</p> <p>Kapitalkosten: EL80: 1.746 Mrd. € EL95: 1.866 Mrd. € TM80: 1.064 Mrd. € TM95: 1.098 Mrd. €</p>				
Mehrkosten (Chemie) Industrie	<p>80 %-Szenario: 28 Mrd. € für branchen-spezifische Maßnahmen in der Grundstoffindustrie Chemie: Ammoniaksynthese, Chlorelektrolyse, Lachgasabbau</p> <p>95%-Szenario: Bis zu 30 Mrd. € für Neubau von Raffinerien zur Umwandlung des stofflichen Feedstocks, Zusatzkosten für CCS in diesen Raffinerien</p>	-	<p>Gesamte Investitionskosten bis 2050 für die technischen Maßnahmen in Europa BAU: 72,3 Mrd. € Efficiency: 492,9 Mrd. € Intermediate: 594,5 Mrd. € Ambitious: 671,7 Mrd. € Maximum: 934,3 Mrd. €</p>	<p>Annualisierte Mehrkosten (Fix- und Energiekosten) für Grundstoffchemie (GC) und sonstige chemische Industrie (SCI), Basisszenario ggü. Referenzszenario:</p> <p>2030: GC: + 238 Mio. € SCI: + 15 Mio. €</p> <p>2040: GC: + 1.502 Mio. € SCI: + 27 Mio. €</p> <p>2050: GC: + 1.860 Mio. € SCI: + 97 Mio. €</p>	-	<p>Kosten für inländische PtX-Anlagen: 5 Mrd. € (80%-Szenario) 1 Mrd. € (95%-Szenario, weil dort CCS)</p> <p>Kosten Raffinerien: Anpassung PtL Syncrude: 4,5-6 Mrd. € CCS: 2,5 Mrd. € zzgl. 1,5 Mrd. € Betriebskosten (kum.)</p>

6.8 Übergreifende Schlussfolgerungen

Die Mehrzahl der untersuchten Studien ergibt, dass die **Fortführung heutiger Maßnahmen bis zum Jahr 2050 zu Minderungen der Treibhausgasausstoßes um ca. 60% gegenüber 1990 führt**. Bereits diese Minderungen führen zu erheblichen Kosten. Diese Szenarien dienen in der Regel zur Bestimmung einer Minderungslücke und von Differenzkosten.

Die Akzeptanz erforderlicher Maßnahmen und damit verbundener Belastungen und eine effektive Implementierung sind zentrale Herausforderungen für ein Erreichen der Ziele. Trotz beachtlicher Fortschritte der vergangenen Jahre zeigen Extrapolationen, dass die Ziele der Energiewende ohne weitere Maßnahmen teilweise sehr deutlich verfehlt werden. Bei den Studien kann vielfach konstatiert werden, dass ihnen stark idealisierende Annahmen zur Implementierung der vorgeschlagenen Maßnahmen zugrunde liegen. Umsetzungshürden werden beim BMWi mit eigenen Szenarien untersucht. Die DENA-Studie hat hierfür einen „Untersuchungsschwerpunkt Bottleneck“. In den Studien des BDI und von ESYS werden diese Aspekte zwar angesprochen, jedoch in den

Um die Emissionen um 80% zu senken, müssen in allen Sektoren bestehende Strukturen verändert werden. Erforderlich ist ein weitgehender Umbau der Stromerzeugung hin zu Erneuerbaren Energien und eine deutlich verstärkte Sektorenkopplung und. Sektoren wie Gebäude und Verkehr müssen weitgehend klimaneutral werden. Dieses Ziel kann noch ohne den Einsatz von CCS und eventuell auch ohne einen umfassenden Einsatz von Power-to-X erreicht werden. Biomasse wird für Bereiche wie den Luftverkehr und die Industrie benötigt. Die volkswirtschaftlichen Kosten einer Minderung um 80% hängen stark davon ab, ob dies im nationalen Alleingang oder im Rahmen intensiver internationaler Kooperation erfolgt. Insgesamt werden sie als verkraftbar eingeschätzt. Die betriebswirtschaftliche Perspektive wird hingegen kaum beleuchtet, insbesondere nicht hinsichtlich der Wettbewerbsfähigkeit der Wirtschaft. Dies gilt auch für die anderen untersuchten Szenarien.

Das Erreichen eines 95%-Ziels ist möglich, jedoch nur unter sehr anspruchsvollen zusätzlichen Annahmen. Es erfordert eine vollständige Defossilisierung der Stromerzeugung und der industriellen Wärmezeugung. Das Gasnetz wird zu einem saisonalen Energiespeicher, flexible Kraftwerke auf Basis von Power-to-Gas gewährleisten die Versorgungssicherheit. Die Sektoren Verkehr und Gebäude müssen klimaneutral werden. Außerdem sind umfassende Importe von Power-to-X auf Basis Erneuerbarer Energien aus dem Ausland notwendig. In der Industrie sind große Technologiesprünge und der Einsatz von CCS erforderlich. Die verbleibenden Emissionen würden der Landwirtschaft zukommen, außerdem Restemissionen in Industrie und Abfallwirtschaft.

Alle Szenarien erfordern zeitnahe Technologieentscheidungen ab den frühen 20er Jahren. Außerdem besteht ein hoher Bedarf für Forschung und Entwicklung sowie Markteinführungs- oder Markthochlaufprogramme. Hinsichtlich der Technologieentscheidungen gibt es erhebliche Spielräume. So können Transformationspfade, die auf einem breiten Technologie- und Energieträgermix basieren, bis 2050 erheblich günstiger sein als solche die verstärkt auf strombasierte Anwendungen setzen.

Fossile Kraftwerke, insbesondere Gas (auch KWK), behalten langfristig eine wichtige Rolle. Sie dienen mit erheblichen Kapazitäten vorrangig der Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit bis 2050. Weil für sie jedoch aufgrund der Entwicklungen eine stark abnehmende Zahl an Volllaststunden erwartet wird, besteht weiterhin großer Druck hinsichtlich Entscheidungen zum Ausbau Erneuerbarer Energien, der Netze, aber auch des Strommarktdesigns, der Systemdienlichkeit und Verbrauchsflexibilisierung.

Die Studien lassen offen, wie der für die energieintensive Industrie notwendige Schutz vor Carbon Leakage aussehen könnte. In Studien wird durchgängig ein umfassender Schutz vor Carbon Leakage unterstellt. Diese Annahme ist in der Regel so definiert, dass der Industrie keine höheren CO₂-Kosten als derzeit, also 2015/16, entstehen. Bereits diese Annahme ist so nicht mehr haltbar, weil sie nicht den derzeitigen realen Bedingungen entspricht: Die geltenden Regeln stellen die Industrie nur auf Basis von Benchmarks mit einem kostenlosen Budget an Zertifikaten aus. Die Marktentwicklung im Emissionshandel, die 2018 zu einer Verdreifachung der Preise auf ein Niveau von deutlich über 20 € je Zertifikat geführt hat, bedeutet für viele Unternehmen bereits jetzt eine signifikante Kostenbelastung. Weil die kostenlose Zuteilung ab 2021 abgesenkt wird, wird sich diese Kostenbelastung weiter ansteigen. Ungeklärt bleibt auch, wie ein Carbon Leakage Schutz, der derzeit auf Basis kostenloser Zuteilung erfolgt, künftig gestaltet werden.

Auf den Rohstoffbedarf der Chemieindustrie finden die untersuchten Studien keine eindeutige Antwort. Zum Teil wird davon ausgegangen, dass dieser nicht vollständig defossilisiert werden kann. In der Folge ergibt sich ein Bedarf für CCS und für CCU. Vor allem mit Blick auf CCS bedeutet dies, mit erheblichen Akzeptanzproblemen umzugehen. Eine wichtige Option zur Defossilisierung besteht in

der Nutzung von Biomasse. Diese ist allerdings nur stark limitiert verfügbar. Der Rohstoffbedarf kann auch über PtL gelöst werden, daraus folgen Implikationen für Stromerzeugung und -verteilung sowie Importe von Strom oder Power-to-Liquids (PtL). Auch bei der Nutzung von CCU in großem Maßstab wird Strom in erheblichen Mengen benötigt, zudem muss eine Anrechnung des CO₂-Inputs als negative Emission möglich sein, um Emissionsreduktionen bilanzieren zu können. In allen Fällen hat dies auf absehbare Zeit höhere Kosten zur Folge.

Die politischen Handlungsempfehlungen der Studien sind in Bezug auf die Chemieindustrie wenig spezifisch. Mit Blick auf den deutschen Klimagesetzgebungsprozess ist der bestehende europäische Rahmen in der Klima- und Energiepolitik insgesamt zu wenig thematisiert. Dies betrifft die EU-einheitliche Regulierung durch den Emissionshandel ebenso wie die national heruntergebrochenen Komponenten des Effort Sharing und weitere Rechtsakte wie die Erneuerbare Energien-Richtlinie. Dies gilt insbesondere für die in diesen Instrumenten enthaltenen Flexibilitätsoptionen für die Mitgliedsstaaten, die auch für die Flexibilisierung sektoraler Zielsetzungen genutzt werden könnten..

Die Entwicklung der Nachfrage nach Produkten der Chemieindustrie ist in den Studien zu wenig thematisiert. In der Regel wird mit dem Thema der Nachfrage nicht oder über pauschale Annahmen umgegangen. Die Ausnahme hiervon sind Synfuels (PtL). Die Betrachtung der Nachfrageseite sollte in einer branchenspezifischen Roadmap granularer erfolgen. Mögliche Emissionsreduktionsbeiträge der Chemieindustrie für andere Sektoren - z. B. Produktanwendungen, Circular Economy, Integration Erneuerbarer Energien, CCU – sind nicht expliziter Gegenstand der untersuchten Studien. Zu prüfen ist, ob auch dies Gegenstand in einer eigenen Roadmap sein soll.