

Innovationen in der Chemie

Lösungen zu dem Arbeitsmaterial Kapitel 8 – Ressourcenschonung – von der Wegwerf- zur Kreislaufwirtschaft

Weiterführende Aufgaben und Experimente	Thema	Niveau
Kapitel 8	Ressourcenschonung – von der Wegwerf- zur Kreislaufwirtschaft	
Aufgabe 8.1	Seltene Metalle – Stoffsteckbriefe mit Museumsgang	Sekundarstufe I/II
Aufgabe 8.2	Bessere Ressourcennutzung von seltenen Metallen (Gruppenpuzzle)	Sekundarstufe II
Experiment 8.1	Kupferrecycling aus Computerschrott	Sekundarstufe II
Experiment 8.2	Recycling von Gold aus Computern	Lehrerexperiment!
Aufgabe 8.3	Mehr Nachhaltigkeit durch Kraftstoffe aus Biomasse	Sekundarstufe II
Aufgabe 8.4	Herstellung von Polyurethan durch katalytische Fixierung von Kohlenstoffdioxid	Sekundarstufe II
Aufgabe 8.5	Kohlenstoffdioxid – besser als sein Ruf? (Poster-Ausstellung)	Sekundarstufe II

Sekundarstufe I/II

Aufgabe 8.1: Seltene Metalle – Stoffsteckbriefe mit Museumsgang

- a/b) Recherche zu einem ausgewählten seltenen Metall und Erstellung eines Steckbriefs: Gallium, Indium, Tellur, Selen, Tantal, Yttrium, Neodym, Europium, Praseodym, Dysprosium (Liste erweiterbar um Antimon, Platin, Germanium, Thallium, Palladium, Molybdän u. a.)

Beispiel: Steckbrief Gallium

Eigenschaften	silberglänzendes, hartes und sprödes metallisches Element Fp: 29,6 Grad Celsius, Sdp: 2.403 Grad Celsius Wegen seines niedrigen Schmelzpunktes (schmilzt in der Hand) und seines hohen Siedepunktes ungewöhnlich großer Schmelzbereich; Eignung als Thermometerflüssigkeit (Quarzinstrumente) Dichte: 5,91 g/cm ³ Galliumverbindungen sind meist farblos
Vorkommen	Häufigkeit: ca. 1,4 x 10 ⁻³ Prozent in der Erdkruste, findet sich in oxidischer Form als Begleiter in Al-, Zn- und Cu-Erzen
Gewinnung bzw. Herstellung	Nebenprodukt der Aluminiumherstellung durch elektrolytische Abscheidung aus der Hydroxidlösung Gewinnung aus alkalischen Gallianatlösungen durch Elektrolyse alkalischer Lösungen an Quecksilberkathoden
Verwendung	größte und wichtigste Verwendung: zur Herstellung von Halbleitersubstanzen (Galliumarsenid u. a.) für Solarzellen und Leuchtdioden (95 Prozent des produzierten Galliums)
Besonderheiten	entdeckt 1875 von Paul Émile Lecoq de Boisbaudran (Frankreich); vorausgesagt 1871 durch Dmitri Mendelejew sehr selten und daher wesentlich teurer als Gold Galliummetall weist keine toxischen Eigenschaften auf, es wirkt jedoch reizend auf Haut, Augen und Atemwege.

- c) Zusammenstellung der Informationen aus dem Museumsgang

Ergebnisse exemplarisch für Gallium siehe oben

Metall	Eigenschaften	Vorkommen	Gewinnung bzw. Herstellung	Verwendung
Gallium				
...				

Sekundarstufe I/II

d)

Quiz

Seltene Metalle sind Metalle, die ...

- A) in geringen Mengen benötigt werden. B) **in geringen Mengen auf der Erde vorkommen.**
C) in geringen Mengen gefördert werden. D) auf dem Weltmarkt einen geringen Preis erzielen.

Metalle der Seltenen Erden zählen zu den:

- A) Alkalimetallen B) Altmetallen
C) **Lanthanoiden** D) Erdalkalimetallen

Um die knapper werdenden Ressourcen der seltenen Metalle besser zu nutzen, sind folgende Maßnahmen geeignet:

- A) Einstellung der Handy-Produktion B) **Substitution der seltenen Erden durch andere Stoffe**
C) **Recycling von Elektronikschrott** D) erhöhte Rohstoffförderung

Seltene Metalle werden zur Herstellung folgender Produkte benötigt:

- A) Hybridautos B) **OLEDs (organische Leuchtstoffdioden)**
C) Laser D) Glasfaserkabel

Sekundarstufe II

Aufgabe 8.2: Bessere Ressourcennutzung von seltenen Metallen (Gruppenpuzzle)

- a) Bilden Sie drei Gruppen und informieren Sie sich über die drei übergreifenden Ansätze zur besseren Ressourcennutzung (Material A, B oder C). Bearbeiten Sie dazu die entsprechenden Arbeitsaufträge.

Material A: Dünnschichtverfahren zur Herstellung von Solarzellen

- a) Recherchieren Sie, wo überall Dünnschichtsolarmodule verwendet werden.

Dünnschichtzellen sind im Vergleich zu kristallinen Solarzellen aus Siliziumwafern etwa 100-mal dünner. Dadurch können sie einfacher und großflächiger produziert werden. Aufgrund ihres geringen Gewichts und ihrer flexiblen Gestaltungsmöglichkeit durch den Einsatz unterschiedlichster Trägermaterialien eignet sich die Dünnschichttechnik neben dem Einsatz für Photovoltaik-Anlagen auch für eine weitergehende Verwendung, beispielsweise als aufrollbare Solarzellen in Kleidung, Taschen, Wanderrucksäcken.

- b) Skizzieren Sie den Aufbau einer Dünnschichtsolarzelle.

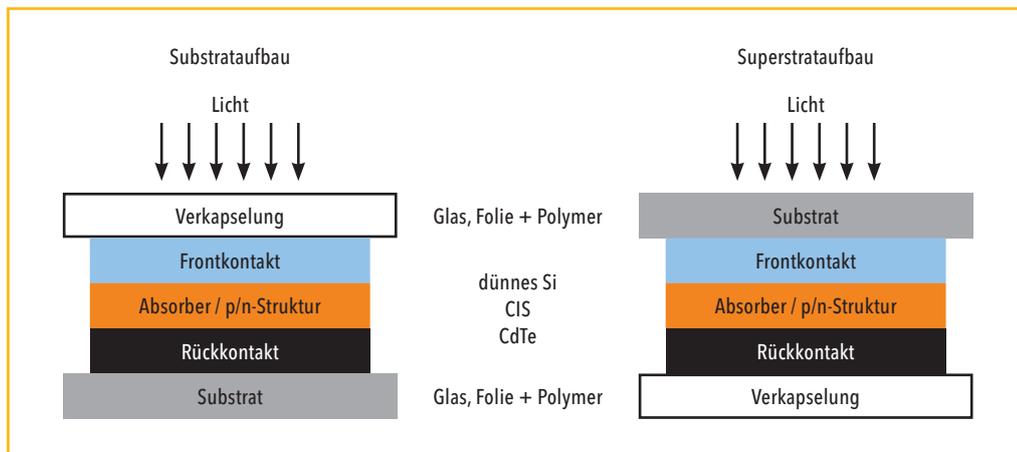


Abbildung 8.1: Prinzipieller Aufbau eines Dünnschichtmoduls. Das Substrat befindet sich entweder auf der lichtabgewandten Seite (Substrataufbau) oder auf der lichtzugewandten Seite (Superstrataufbau).

Quelle: http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2010-2/th2010_11_02.pdf (mod.)

Sekundarstufe II

- c) Stellen Sie eine Liste mit Vor- und Nachteilen der Dünnschichtsolarmodule zusammen.

Vorteile	Nachteile
preiswerte Fertigung	empfindlich in der Handhabung und Installation wg. geringerer Stabilität
geringer Rohstoffverbrauch	Wirkungsgrad deutlich niedriger als bei mono- oder polykristallinen Modulen
geringe Anschaffungskosten	starke Anfangsdegradation (Verminderung der Leistung)
geringes Gewicht	geringere Lebensdauer als kristalline oder polykristalline Module
hohe Ausbeute auch bei diffusem Licht	hoher Flächenbedarf, um die gleiche Leistung wie kristalline Module zu erzielen
keine Wirkungsgradverluste durch Wärme	-
vielseitig in der Verwendung	-

- d) Begründen Sie, warum Dünnschichtsolarmodule einen Beitrag zur effizienteren Ressourcennutzung leisten.
-
- Ergibt sich aus den Angaben in der obigen Tabelle

Material B:

Thermoelektrika aus organischen Halbleitern

- a) Recherchieren Sie, für welche Anwendungen in den nächsten Jahren der Einsatz von thermoelektrischen Generatoren zu erwarten ist.

Materialien, die Wärmeströme in elektrische Ströme umwandeln, werden als Thermoelektrika bezeichnet. Thermoelektrische Generatoren (TEG) können bereits aus kleinen Temperaturdifferenzen Strom erzeugen. Die Technologie wird seit Jahrzehnten bei der Stromversorgung von Weltraumsonden eingesetzt.

Moderne TEGs haben ein breites Anwendungsspektrum in der Abwärmenutzung – von der Energierückgewinnung in Automobilen, in Kraftwerken und bei Industrieprozessen bis hin zu Zentralheizungen in Eigenheimen oder auch beim Einsatz in einer „sprechenden Kaffeekanne“. Das Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik in Freiburg hat eine solche Kaffeekanne entwickelt, in der der Füllstand und die Temperatur des Inhalts über einen Sensor gemessen und die Daten zum Beispiel an einen PC in einem Sekretariat weitergeleitet werden. Das Besondere daran: Die Kaffeekanne produziert selbst die notwendige Energie für die Sensorik – ganz einfach mit Hilfe eines thermoelektrischen Elements aus dem heißen Kaffee.

Weitere zukunftssträngige Einsatzbereiche der Thermoelektrik sind die Überwachung von komplexen Bauteilen mit Sensoren wie bei Flugzeugen, Kraftwerken, Windkraft- oder Chemieanlagen, zudem bei Gefahrguttransporten auf Straße, Schiene oder per Schiff, und zwar überall dort, wo eine externe elektrische und

Sekundarstufe II

permanente Versorgung der Sensoren nicht möglich ist. Um zum Beispiel die Wartung einer Flugzeughülle künftig zu vereinfachen, soll diese über entsprechend angebrachte Sensoren, die über thermoelektrische Bauteile mit Strom versorgt werden, realisiert werden. Die Sensoren melden etwaige Beulen oder Risse an eine Überwachungseinheit. Die nötige Energie gewinnen sie aus dem Temperaturunterschied zwischen Umgebung und Innenraum. Die Sensoren kommen ohne Batterien und ohne Wartung aus. Daher lassen sie sich an nahezu allen Stellen und fast beliebig lange einsetzen.

Verändert übernommen aus: <https://www.ipm.fraunhofer.de/content/dam/ipm/de/PDFs/produktblaetter/TE/KUT/Thermoelektrik-Wärme-verstromen.pdf>

b) Erläutern Sie die Funktionsweise eines thermoelektrischen Generators.

Die direkte Wandlung von Wärme in elektrische Energie beruht auf dem sogenannten „Seebeck-Effekt“, einem von Thomas Johann Seebeck 1822 entdeckten Phänomen. Danach entsteht in einem Stromkreis aus zwei verschiedenen elektrischen Leitern bei einer Temperaturdifferenz zwischen den Kontaktstellen eine elektrische Spannung entlang eines metallischen Leiters. Diese elektrische Spannung oder Potentialdifferenz hängt unmittelbar von der Temperaturdifferenz entlang des Leiters ab und ist für jedes Leitermaterial spezifisch. Während ein einfaches Thermoelement aus zwei verschiedenen Metallen besteht (siehe Abbildung 8.2), werden in Generatoren anstelle von Metallen Halbleitermaterialien verwendet, da sich dadurch die Effizienz gegenüber metallischen Thermoelementen wesentlich steigern lässt. Gebräuchliche Materialien für thermoelektrische Generatoren sind Bismutellurid (Bi_2Te_3), Bleitellurid (PbTe), Siliciumgermanium (SiGe), Bismutantimonid (BiSb) oder Eisendisilicid (FeSi_2). Werkstoffe mit besseren thermoelektrischen Eigenschaften sind gegenwärtig nicht bekannt. Um ausreichend hohe Spannungen zu erhalten, werden mehrere zwischen der kalten und der warmen Seite montierte Elemente elektrisch in Reihe geschaltet. Hinsichtlich des einfachen Aufbaus, der Zuverlässigkeit und der Lebensdauer sind Thermogeneratoren trotz ihres geringen Wirkungsgrades allen anderen Verfahren überlegen.

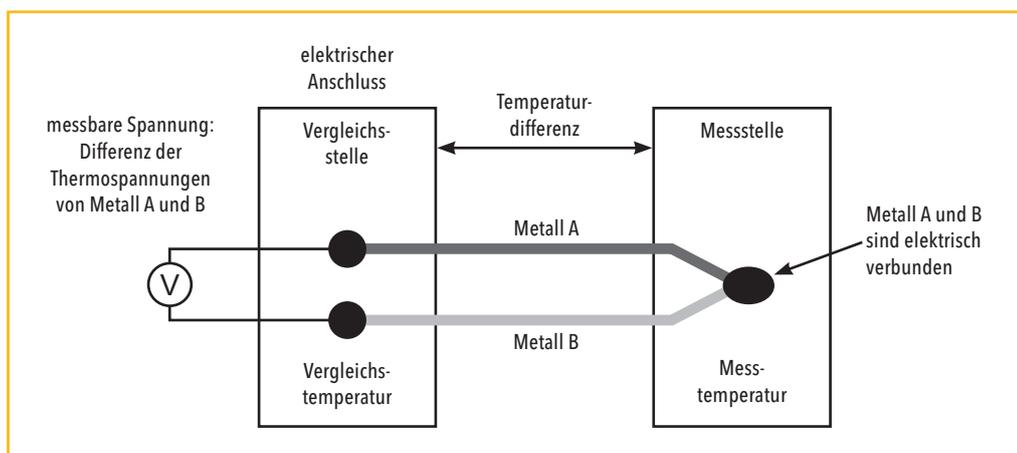


Abbildung 8.2: Schematische Messschaltung mit einem Thermoelement

Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Thermoelement> (mod.)

Sekundarstufe II

- c) Erstellen Sie eine Liste mit Vor- und Nachteilen eines thermoelektrischen Generators aus organischen Halbleitern.

Vorteile	Nachteile
Das zurzeit am häufigsten eingesetzte Material für thermoelektrische Generatoren (TEGs) ist der Halbleiter Bismutellurid. Tellur gehört allerdings zu den seltenen Metallen, ist teuer und giftig. Man geht davon aus, dass die Tellurvorräte nur noch bis 2030 reichen werden. Organische Halbleiter versprechen hier Ersatz.	Die Einsatzbereiche organischer Halbleiter sind auf Temperaturen von bis zu 200 Grad Celsius beschränkt – bei höheren Temperaturen verdampfen die organischen Stoffe.
Die Verwendung von organischen Verbindungen ist vorteilhaft, da diese in großen Mengen synthetisiert werden können. Dadurch sind sie preiswert, leicht zu verarbeiten und ressourcenschonend.	Die Lebensdauer der organischen Halbleiter ist noch nicht ausreichend, insbesondere, wenn sie unter anspruchsvollen oder extremen Bedingungen eingesetzt werden sollen.
Das organische Material kann großflächig und kostengünstig in verschiedenen Farben hergestellt werden. Das erlaubt es, Halbleiter auf flexiblen Folien herzustellen, die sich auch gekrümmten Oberflächen anpassen. Zusätzlich besteht dadurch die Möglichkeit, Designgesichtspunkte bei der Nutzung von Thermogeneratoren zu berücksichtigen.	Zurzeit gibt es noch keine gut leitfähigen n-Halbleiter aus organischen Materialien.

- d) Begründen Sie, warum der Ersatz von anorganischen Halbleitern durch organische bei thermoelektrischen Generatoren einen Beitrag zur effizienteren Ressourcennutzung leistet.

Organische Halbleiter sind aus vergleichsweise einfachen Kunststoffen in großen Mengen nachhaltig zu produzieren. Die Verwendung der Seltene-Erden-Metallen als Halbleiter bringt eine größere Umweltbelastung mit sich, da diese in der Erdkruste nur in Spuren vorhanden sind und aufwendig abgebaut und angereichert werden müssen. Inwieweit sich eine Wiederverwendung bzw. ein Recycling zum Beispiel von organischen Halbleiterfolien realisieren lässt, muss sich noch zeigen.

Sekundarstufe II

Material C: Recycling von Seltene-Erden-Metallen in der Lampenproduktion

- a) Recherchieren Sie, für welche Anwendungen die Seltene-Erden-Metalle Yttrium, Gadolinium und Europium benötigt werden.

Seltene-Erden-Metalle	Anwendungen
Yttrium	<ul style="list-style-type: none"> ⬡ Legierungsbestandteil von Heizleiterleitungen und von Chrom-Nickel-Stahl. Dort verbessert es die Oxidationsbeständigkeit. ⬡ In Aluminium- und Magnesiumlegierungen wirkt es festigkeitssteigernd. ⬡ Es verbessert die Lebensdauer von Heizdrähten in Ionenquellen von Massenspektrometern. ⬡ In Zündkerzen für Ottomotoren erhöht es die Lebensdauer der Kerzen. ⬡ Yttrium-Kobalt-Legierungen dienen zur Herstellung von Dauermagneten. ⬡ Yttriumverbindungen wie das Yttriumvanadat dienen zusammen mit Europium in Farbbildröhren als Aktivatoren für das rote Leuchten. ⬡ „YIG“ (Yttrium-Iron-Granat = Yttrium-Eisen-Granat) wird in der Elektronik zur Herstellung von Speicherchips eingesetzt.
Gadolinium	<ul style="list-style-type: none"> ⬡ Gadolinium(III)-Verbindungen finden begrenzt Verwendung als Kontrastmittel bei Untersuchungen im Kernspintomograph. Allerdings mehren sich die Anzeichen, dass sich das Metall bei MRT-Untersuchungen im Gehirn ablagern könnte. ⬡ Anwendung in der Herstellung wiederbeschreibbarer Compact Discs (CDs). ⬡ Zusätze von einem Prozent Gadolinium erhöhen die Bearbeitbarkeit, die Hochtemperatur- und die Oxidationsbeständigkeit verschiedener Metalllegierungen.
Europium	<ul style="list-style-type: none"> ⬡ Hauptsächliche Anwendung: als Dotierungsmittel für die Produktion von Leuchtstoffen, die etwa in Kathodenstrahlröhrenbildschirmen verwendet werden und wurden (Oszilloskope, Computerbildschirme, Fernseher, Flugzeuginstrumente). ⬡ Verwendung in Kompaktleuchtstofflampen, sowohl mit zwei-, als auch mit dreiwertigem Europium für verschiedene Farben.

- b) Erstellen Sie ein Fließdiagramm für den Recyclingprozess.



Sekundarstufe II

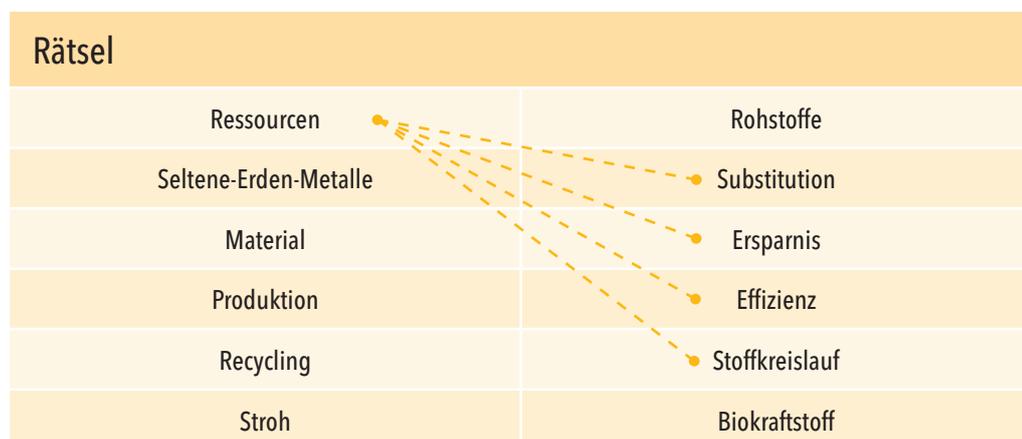
- c) Nennen Sie Vorteile des Recyclings von Seltene-Erden-Metallen aus Elektronikschrott im Vergleich zur Gewinnung aus Erzen. Recherchieren Sie dazu gegebenenfalls im Internet.
- Produkte mit Seltene-Erden-Metallen können aus gut organisierten Sammlungen wirtschaftlich zusammengeführt und dem Recycling zugeführt werden.
 - Recycling wird bei knapper werdenden Ressourcen bestimmter Metalle gegenüber der Gewinnung aus Erzen wirtschaftlicher.
 - Der Abbau Seltener Erden (zum Beispiel in China) belastet die Umwelt, zerstört Landschaften und erzeugt radioaktiven Müll. Recycling ist somit ein Beitrag zum Umweltschutz.
 - Die Wiedergewinnung erhöht die Unabhängigkeit von Importen aus anderen Ländern.
- d) Begründen Sie, warum das Recycling von Seltene-Erden-Metallen einen Beitrag zur effizienteren Ressourcennutzung leistet.
- Die ertragreichen und somit wirtschaftlichen Lagerstätten von Seltene-Erden-Metallen sind fast erschöpft. Die Gewinnung aus Erzen wird immer aufwendiger und belastet zunehmend die Umwelt.
 - Erst zwei Prozent der im Umlauf befindlichen Seltene-Erden-Metalle, die in Leuchtstoffen verschiedenster Art eingesetzt sind, werden derzeit der Wiederverwendung zugeführt.

Sekundarstufe II

- e) Bilden Sie Gruppen, in denen jeweils zwei Experten zu jedem Thema vertreten sind. Stellen Sie sich Ihre Arbeitsergebnisse gegenseitig vor. Tragen Sie die Ergebnisse in einer Tabelle nach folgendem Muster zusammen:

	effektivere Materialnutzung	Substitution	Recycling
Beispiel	Dünnschichtsolarzellen	thermoelektrische Generatoren aus organischen Halbleitern	Seltene-Erden-Metalle aus Leuchtstoffröhren
(noch ungelöste) Probleme	<ul style="list-style-type: none"> ○ niedriger Wirkungsgrad ○ geringe Stabilität ○ geringe Lebensdauer ○ hoher Flächenbedarf, da geringe Leistung pro Quadratmeter Flächenmodul 	<ul style="list-style-type: none"> ○ keine leitfähigen n-Halbleiter aus organischen Materialien ○ niedriger Wirkungsgrad ○ geringe Lebensdauer ○ schlechte thermische Stabilität 	Trotz Rohstoffknappheit ist das Recycling zurzeit noch wirtschaftlich unrentabel (Rohstoffe sind noch zu billig).
Beitrag zur effizienteren Ressourcennutzung	<ul style="list-style-type: none"> ○ Einsparung von teuren Halbleitermaterialien ○ vergleichsweise hoher Wirkungsgrad bei diffusem Licht 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Ersatz von teuren seltenen Metallen ○ Kunststoffe sind in großen Mengen nachhaltig produzierbar 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Wiedergewinnung der teuren und zum Teil seltenen Seltene-Erden-Metalle ○ Recycling ist umweltschonender als die Gewinnung aus Erzen.

- f)



Anmerkung: Zusätzliche Paarungen sind mit einer Verbindungslinie  markiert.

Sekundarstufe II

Experiment 8.1: Kupferrecycling aus Computerschrott

a) Beschreiben und erklären Sie mit eigenen Worten den Recyclingprozess eines Computers.

1. Der Elektronikschrott wird zerkleinert und sortiert. Dabei werden die Leiterplatten, kupferreiche Fraktionen und metallhaltige Stäube für die Weiteraufbereitung abgetrennt.
2. Im nächsten Schritt erfolgt eine Pyrolyse, damit die anhaftenden Kunststoffreste zersetzt werden. Neben dem Pyrolysegas erhält man einen kohlenstoffreichen Feststoff (Pyrolysekoks), der Metalle und Reste von Glas und Keramik enthält.
3. Zur Metallgewinnung kann der kohlenstoffreiche Feststoff aufgeschmolzen werden (pyrometallurgisches Verfahren). Dabei verbrennt der Kohlenstoff. Man erhält eine Schlacke (mineralisches Konzentrat) sowie eine Metallphase, aus der Kupferlegierungen zurückgewonnen werden.
4. Alternativ zum Aufschmelzen können die Metalle nach einem nasschemischen Verfahren (hydrometallurgisches Verfahren) zurückgewonnen werden. Dazu werden die Metalle aus dem Pyrolysekoks oder, falls sie nicht von Kunststoff bedeckt sind, direkt vom Elektronikschrott gelöst, voneinander getrennt und durch Raffination (siehe Aufgabenteil c) gereinigt.

Hinweis: Nach der Zerlegung und Sortierung der Computerbestandteile werden die Edelmetall- und die halbedelmetallhaltigen Bestandteile, die in der Regel auf Leiterplatten verbaut sind, der Pyrolyse zugeführt. Hier stellt sich die Frage, warum die Metalle nicht gelöst und einem nasschemischen Trennverfahren zugeführt werden.

Der Grund dafür ist, dass die Verwertung von Leiterplatten auf nasschemischem Weg einige Probleme mit sich bringt. Es ist durchaus möglich, die Leiterplatten mit verdünnter Säure zu behandeln, so zum Beispiel eine Kupferlösung zu gewinnen und dann mit Hilfe der Solventextraktion und der Raffinationselektrolyse das Kupfer zurückzugewinnen. Allerdings lassen sich die Edelmetalle, die doch immerhin so wertvoll sind, nicht mit der verdünnten Säure lösen, d. h., sie bleiben auf der Leiterplatte zurück. Um sie herauszulösen und einer weiteren Verarbeitung zugänglich zu machen, muss man der Behandlung mit der verdünnten Säure eine Behandlung mit einer sehr starken Säure (in der Regel Königswasser) folgen lassen. Diese würde dann auch die edlen Metalle lösen, die dann aus dieser Lösung zurückzugewinnen wären.

Ein weiterer Nachteil der hydrometallurgischen Methode: Das Trägermaterial und die Kunststoffe (die zudem noch in beträchtlichem Maße mit Flammschutzmitteln versetzt sind) werden nicht verwertet. Sie bleiben zurück und müssen getrennt entsorgt werden. Hinzu kommt, dass beim hydrometallurgischen Verfahren große Mengen an Säure und Lösemittel verwendet werden, sodass besondere Anforderungen an die Reinheit der Abwässer der Betriebe gestellt werden müssen. Dies alles führt dazu, dass das nass-chemische Verfahren zur Verwertung von Leiterplatten nicht so wirtschaftlich durchführbar ist wie das thermische und daher in der Regel nicht so häufig angewendet wird.

Auf der anderen Seite ist es natürlich ein Vorteil des nasschemischen Verfahrens, dass die Kunststoffteile nicht erhitzt werden und dass damit die Bildung von gefährlichen Dioxinen oder Furanen während des Prozesses ausgeschlossen wird. Daher müssen die nasschemischen Verfahren immer dort zum Einsatz kommen, wo bei einer anderen Verwertung die Zerstörung der Dioxine nicht hundertprozentig gewährleistet werden kann.

Sekundarstufe II

- b) Führen Sie das Experiment 8.1 zur Kupferraffination durch und protokollieren Sie Ihre Beobachtungen.

Hinweis: Die 1-Euro-Münze besteht aus 75 Prozent Kupfer, 20 Prozent Zink und fünf Prozent Nickel.

Die Masse des Reinkupferblechs hat sich nach 20 Minuten Elektrolyse auf etwa 0,15–0,2 Gramm erhöht, die Masse der 1-Euro-Münze hat um etwa 0,17 bis 0,22 Gramm abgenommen.

Der unter dem Pluspol sichtbare Niederschlag besteht nicht wie im technischen Verfahren aus Edelmetallen, sondern aus schwerlöslichen Kupfer- und Nickeloxiden und -hydroxiden, die sich in geringer Konzentration an der Anode bilden und von dort im Laufe des Elektrolyseprozesses abfallen und zu Boden sinken.

Hinweis: Um die Vorgänge besser sichtbar zu machen, bietet sich eine ergänzende Anordnung im Experiment an, dessen Aufbau in Abbildung 8.3 dargestellt ist. Schon nach kurzer Zeit deutet die Blauverfärbung der Lösung auf hydratisierte Kupferionen hin, die nur aus der 1-Euro-Münze stammen können. Elektrolysiert man etwa 30 Minuten lang, kann man an der Kohlelektrode eine Kupferabscheidung feststellen. Es ist zu bedenken, dass die Farbe zum Teil auch von $[\text{Ni}(\text{NH}_3)_6]^{2+}$ -Ionen herrührt, die ebenfalls eine blauviolette Färbung der Lösung verursachen.

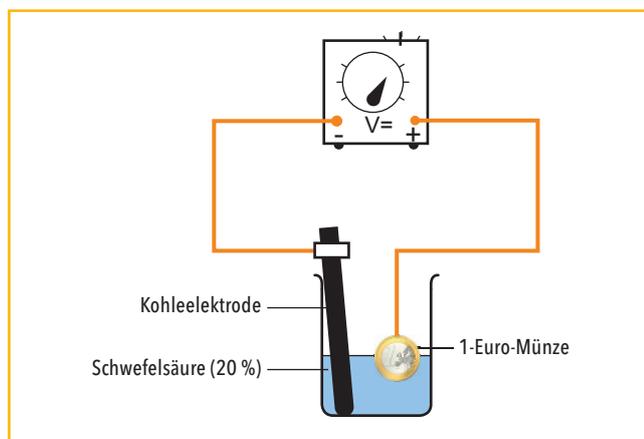


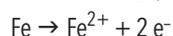
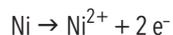
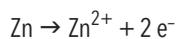
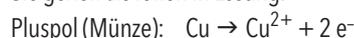
Abbildung 8.3: Alternativer Versuchsaufbau zur Kupferraffination

Bildnachweis: coonlight – stock.adobe.com

Sekundarstufe II

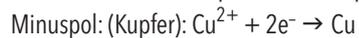
- c) Erläutern Sie unter Angabe der entsprechenden Reaktionsgleichungen die chemischen Vorgänge, die während des Elektrolyseprozesses ablaufen.

An der Anode (Pluspol) werden alle Metalle, deren Standardelektrodenpotential kleiner als 0,4 Volt ist, oxidiert. Sie gehen als Ionen in Lösung.



Edlere Metalle, deren Standardelektrodenpotential größer als 0,4 Volt ist, werden nicht oxidiert. Sie fallen als Anodenschlamm zu Boden.

An der Kathode (Minuspol) werden Kupferionen zu Kupfer reduziert.



Die Metallionen der unedleren Metalle bleiben aufgrund ihres niedrigen Standardelektrodenpotentials in Lösung.

- d) Begründen Sie, warum im Anodenschlamm Silber und Gold zu finden sind, aber kein Eisen.

Edlere Metalle als Kupfer haben ein deutlich positiveres Standardelektrodenpotential, sie sind unter den Bedingungen der Kupferraffination nicht oxidierbar und lösen sich nicht. Eisen dagegen ist unedler als Kupfer und bleibt daher in Lösung.

Sekundarstufe II

Experiment 8.2: Recycling von Gold aus Computern

Hinweis

! Dieses Experiment darf nur als Demonstrationsexperiment von Lehrkräften durchgeführt werden.

Erläuterung der Arbeitsschritte:

1. Abtrennen der goldbeschichteten Bauteile mit Hilfe eines Seitenschneiders und einer Heißluftpistole: Sammeln der vergoldeten Computerteile
2. Einlegen der vergoldeten Computerteile in konz. Salzsäure und Wasserstoffperoxid: Lösen der unter dem Gold liegenden Metallschichten wie zum Beispiel Kupfer
3. Filtrieren der Lösung: Abtrennen des Goldes (einschließlich kleiner Platinenreste)
4. Zugabe einer Mischung aus konz. Salzsäure und konz. Salpetersäure (Königswasser): Lösen des Goldes
5. Filtrieren der Lösung: Abtrennen des gelösten Goldes von nichtlöslichen Platinenresten
6. Eindampfen: Gewinnung der Goldsäure (Tetrachloridogold(III)säure)

a) Protokollieren Sie Ihre Beobachtungen und erläutern Sie die einzelnen Arbeitsschritte.

Beobachtungen:

Beim Einlegen der vergoldeten Platinenteile in konz. Salzsäure und Wasserstoffperoxid ist eine Gasbildung zu beobachten. Die Lösung färbt sich grünlich. Nach einem Tag hat sich die Lösung dunkelbraun gefärbt, die Platinen sind frei von Metallkontakten.

Nach dem Filtrieren der Lösung erhält man einen Filtrerrückstand mit sichtbaren Goldpartikeln.

Wird der Filtrerrückstand in einer Mischung aus konz. Salzsäure und konz. Salpetersäure (Königswasser) gelöst, entsteht eine gelbe Lösung. Wird die gelbe Lösung eingedampft, erhält man einen gelborangen Feststoff.

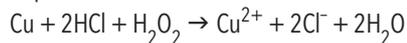
b) Werten Sie Ihre Beobachtungen unter Angabe der entsprechenden Reaktionsgleichungen aus.

Ablösen der Goldpartikel von der Platine:

Uedle Metalle werden durch Oxoniumionen der konz. Salzsäure oxidiert und gehen als Metallionen in Lösung. Dabei entsteht Wasserstoff (Gasentwicklung).



Kupfer lässt sich nicht durch Säuren oxidieren. Deshalb wird Wasserstoffperoxid als Oxidationsmittel zugesetzt.

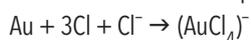


Gold wird unter den gegebenen Reaktionsbedingungen nicht oxidiert und verbleibt als Feststoff in der Lösung.

Die abgefilterten Goldpartikel werden in Königswasser aufgelöst. Königswasser ist ein Gemisch aus konz. Salzsäure und konz. Salpetersäure im Verhältnis 3:1. Werden die beiden Säuren gemischt, entstehen naszierendes Chlor und Nitrosylchlorid.

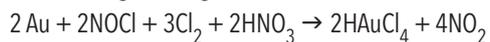


Das naszierende Chlor (Chloratome) hat ein besonders hohes Redoxpotential und oxidiert Gold und andere Edelmetalle wie zum Beispiel Platin.



Sekundarstufe II

Die Gesamtgleichung für diese Redoxreaktion lautet:



Überschüssige Salzsäure wird beim Verdampfen als HCl-Gas ausgetrieben. Die überschüssige Salpetersäure zersetzt sich zu Wasser, Sauerstoff und gasförmigem Stickoxid, sodass die Goldsäure (Tetrachloridogold(III)-säure) als Produkt übrig bleibt.

- c) [Recherchieren Sie, wozu Goldsäure verwendet werden kann.](#)

Tetrachlorogoldsäure dient als Ausgangssubstanz für die Herstellung anderer Goldverbindungen. Sie kann zum Vergolden von Gegenständen oder zur Herstellung von Goldnanopartikeln genutzt werden.

Sekundarstufe II

Aufgabe 8.3: Mehr Nachhaltigkeit durch Kraftstoffe aus Biomasse

- a) Informieren Sie sich darüber, was man unter Pyrolyse versteht.

Unter Pyrolyse versteht man die Zersetzung organischer Verbindungen bei hohen Temperaturen unter Sauerstoffausschluss. Es kommt dabei zu Bindungsbrüchen und zur Bildung kleinerer Pyrolyseprodukte, die als Gase, Flüssigkeiten und Feststoffe auftreten können. Die Mengenanteile und die Zusammensetzung der Produkte hängen nicht nur vom zu pyrolysierenden Substrat, sondern auch von der Pyrolysetemperatur, gegebenenfalls zugegebenen Hilfsstoffen, den Druckverhältnissen und der Pyrolysedauer ab. Bei der Pyrolyse von Polymeren entsteht in vielen Fällen das zugehörige Monomer als bedeutsamer Anteil des Pyrolysegases.

- b) Erstellen Sie für die Herstellung von Dimethylether aus organischen Rohstoffen ein Fließdiagramm. Erläutern Sie anhand des Diagramms die einzelnen Prozessschritte.

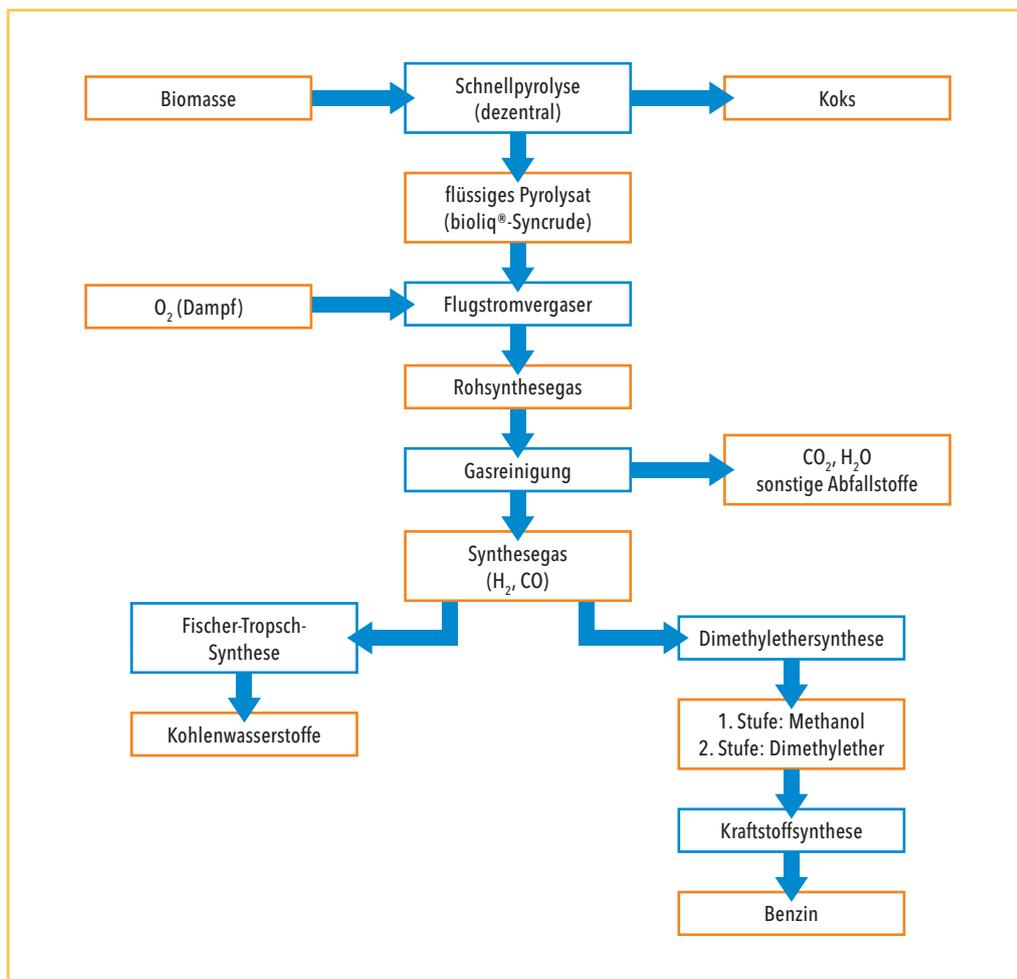


Abbildung 8.4: Prozessschritte zur Herstellung von Dimethylether aus nachwachsenden Rohstoffen (blau: Verfahren; orange: Stoffe)

Sekundarstufe II

Erläuterung der Prozessschritte:

- ⬡ **Rohstoffbereitstellung**
Als Rohstoffe kommen verschiedene Ausgangsmaterialien wie Stroh, Bioabfälle und Restholz bis hin zu Energiepflanzen infrage, die eigens für die Kraftstofferzeugung angebaut werden.
- ⬡ **Pyrolyse: Biomasse → Syncrude**
Pyrolyse der Biomasse bei hohen Temperaturen (500 Grad Celsius) zu einer schwerölähnlichen organischen Flüssigkeit (Syncrude).
- ⬡ **Hochdruck-Flugstromvergasung: Syncrude → Synthesegas**
Die organische Flüssigkeit aus der Pyrolyse wird in einem Reaktor unter Zuführung von Wärme, Druck und einem Vergasungsmittel, zum Beispiel Sauerstoff, in den gasförmigen Zustand übergeführt (thermochemische Vergasung). Das Synthesegas besteht vor allem aus Wasserstoff (H₂), Kohlenstoffmonoxid (CO) und Kohlenstoffdioxid (CO₂). Daneben enthält es noch Spuren weiterer Gase.
- ⬡ **Gasreinigung**
Das Synthesegas muss von Schwefel- und Stickstoffverbindungen und anderen Schadkomponenten befreit werden. Zudem kommt es durch einen sogenannten CO-Shift zur Anreicherung von Wasserstoff durch Abreicherung von CO: $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$.
Das Kohlenstoffdioxid wird ebenfalls abgetrennt.
- ⬡ **Synthesen**
Zur Kraftstoffsynthese stehen zwei Verfahren zur Verfügung: Fischer-Tropsch (FT)-Synthese (siehe unten) und Methanol-to-Gasoline®-Verfahren (MtG):
 $n\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow n/2 \text{CH}_3\text{-O-CH}_3 + n/2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow (\text{CH}_2)_n + n(\text{H}_2\text{O})$
- ⬡ **Produktaufbereitung**
Neben Kraftstoffen lassen sich aus Synthesegas auch viele wichtige Grundstoffe der chemischen Industrie herstellen.

Anmerkung: Abbildung 8.5 gibt einen Überblick über die Vielzahl der synthetischen Produkte, die aus Biomasse-Rohstoffen hergestellt werden können.

Sekundarstufe II

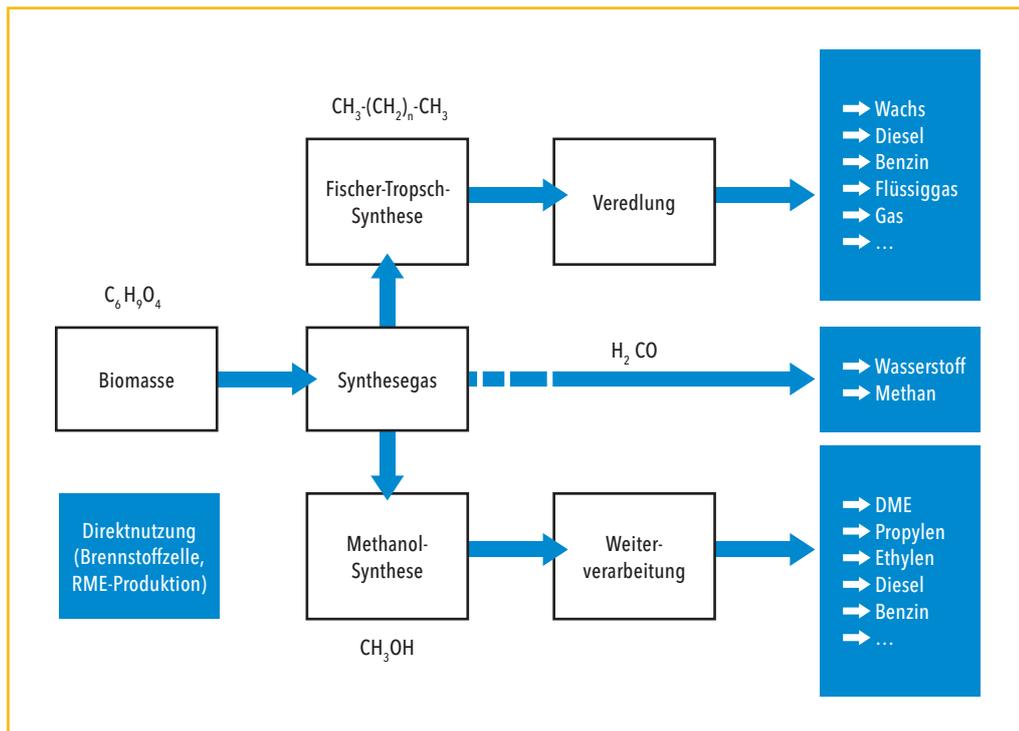
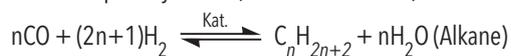


Abbildung 8.5: Chemische Pfade zu synthetischen Produkten aus Biomasse

Quelle: Dahmen, N. & Dinjus, E. (2010), Chemie Ingenieur Technik 2010, 82, No. 8, 1148 (mod.)

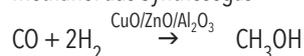
- c) Geben Sie die Reaktionsgleichungen für die Herstellung von Kohlenwasserstoffen (Alkanen), Methanol und Dimethylether aus Synthesegas an.

Fischer-Tropsch-Synthese (Alkane und Alkene):

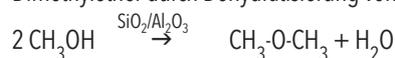


Die Dimethylethersynthese geschieht in zwei Schritten. Die Reaktionen laufen bei Temperaturen von 270 Grad Celsius und einem Druck von fünf bis zehn MPa ab.

1. Methanol aus Synthesegas



2. Dimethylether durch Dehydratisierung von Methanol



Sekundarstufe II

- d) Beurteilen Sie das bioliq[®]-Verfahren hinsichtlich seines Beitrags zur Ressourcenschonung. Stellen Sie dazu die Vor- und Nachteile der Biokraftstoffe der ersten Generation (Ethanol, Rapsölmethylester) denen von Biokraftstoffen der zweiten Generation gegenüber.

Biokraftstoffe der ersten Generation greifen auf Biomasse zurück, die auch zu Ernährungszwecken verwendet werden können (zum Beispiel Rapsöl[®]-Biodiesel). Kraftstoffe der zweiten Generation verwenden Pflanzen oder Pflanzenteile, die nicht unmittelbar für die Lebensmittelerzeugung verwendet werden (Blätter, Schalen, Halme, Baumstämme bzw. Anbaukulturen wie Miscanthus, Jatropha, schnellwachsende Hölzer etc.).

Weitere Vorteile von Biokraftstoffen der zweiten und dritten Generation:

- ⬡ Entwicklung neuer Herstellungsverfahren zur Verbesserung der Biokraftstoffe, zum Beispiel der Einsatz von Mikroorganismen zur Ethanolgewinnung aus Biomasse, die bislang nicht genutzt werden kann, oder bessere Vergasungstechnologien
- ⬡ Nutzung weiterer chemischer Verbindungen und weiterer Pflanzenbestandteile
- ⬡ Verbesserung der Klimabilanz und des ökologischen Fußabdrucks
- ⬡ eine kostengünstigere Herstellung und somit eine schnellere Wettbewerbsfähigkeit gegenüber fossilen Kraftstoffen beim Berücksichtigen der externen Kosten
- ⬡ eine stärkere Reduzierung von Treibhausgasen (bis zu 90 Prozent im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen)

Sekundarstufe II

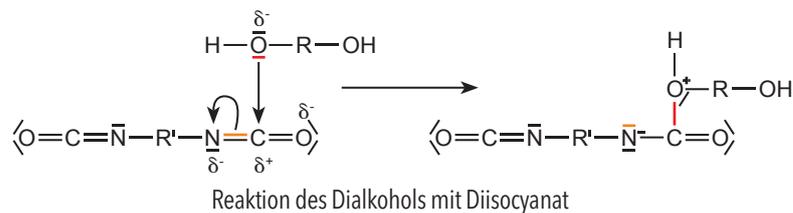
Aufgabe 8.4: Herstellung von Polyurethan durch katalytische Fixierung von Kohlenstoffdioxid

- a) Recherchieren Sie, welche Produkte aus Polyurethanen hergestellt werden.

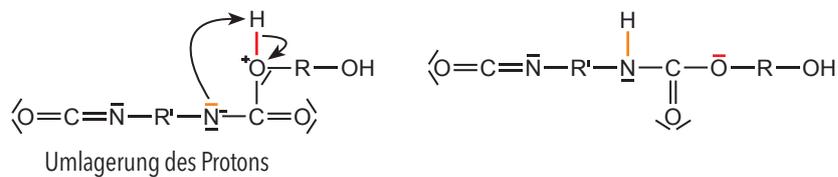
Zum Beispiel Matratzen, Schuhsohlen, Dichtungen, Schläuche, Fußböden, Dämmstoffe, Lacke, Klebstoffe, Dichtstoffe, Skier, Autositze, Laufbahnen in Stadien, Amaturenbretter, Sportgeräte, Fußbälle, Dämmmaterial, Isolierungen u. v. a. m.

- b) Erläutern Sie exemplarisch am Beispiel des 1,4-Butandiolis und des 1,6-Hexandiisocyanats die Herstellung eines unvernetzten Polyurethans.

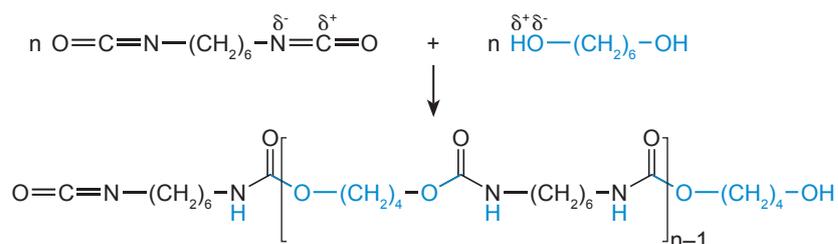
Polyurethane werden durch die Polyadditionsreaktion aus mehrwertigen Alkoholen (zum Beispiel Diolen) und Isocyanaten hergestellt. Dabei reagiert die Hydroxylgruppe des Alkohols (-OH) mit der Isocyanatgruppe (-N=C=O). Bei der Reaktion greift das Sauerstoffatom der Hydroxylgruppe aufgrund seiner negativen Teilladung das positivisierte Kohlenstoffatom der Isocyanatgruppe an und bildet mit diesem eine Elektronenpaarbindung aus.



Da dadurch das Sauerstoffatom eine positive, das Stickstoffatom eine negative Ladung trägt, wird zum Ladungsausgleich das Proton der Hydroxylgruppe auf das Stickstoffatom übertragen.

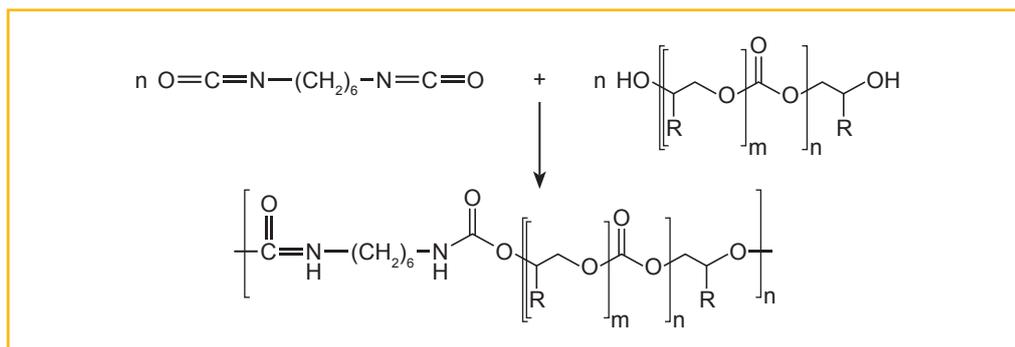


Gesamtreaktion:



Sekundarstufe II

- c) Zeichnen Sie einen Ausschnitt aus einem Polyurethanmolekül, das aus einem Polyethercarbonatpolyol und 1,6-Hexandiisocyanat hergestellt wird.



- d) Erläutern Sie, warum die Polyurethansynthese durch katalytische Kohlenstoffdioxid-Fixierung einen Beitrag zur Ressourcenschonung leistet.

Die Fixierung von Kohlenstoffdioxid zu höherwertigen chemischen Verbindungen wie dem Polyethercarbonatpolyol liefert einen Beitrag zur Einsparung von organischen Grundchemikalien, in diesem Fall von bifunktionalen Alkanolen, die für die Polyurethansynthese benötigt werden.

Zudem werden Polyurethane in großen Produktionsmengen hergestellt, sodass die Nutzung von Kohlenstoffdioxid für die Herstellung dieser Polymergruppe einen wichtigen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft und damit zur Reduzierung der Kohlenstoffdioxid-Emissionen leisten kann.

Sekundarstufe I/II

Aufgabe 8.5: Kohlenstoffdioxid – besser als sein Ruf? (Poster-Ausstellung)

a) Bilden Sie dazu Arbeitsgruppen und recherchieren Sie zu folgenden Themen:

Natürlicher Treibhauseffekt

- Die Rolle von Wasser, Kohlenstoffdioxid und Methan, die natürlich in der Atmosphäre vorkommen (Absorption von IR-Strahlung, die von der Erdoberfläche in die Atmosphäre zurückgestrahlt wird). Dadurch erhöht sich die Temperatur der Atmosphäre von etwa -18 Grad Celsius auf im Mittel 15 Grad Celsius.
- Gegenüberstellung zum anthropogen verursachten Treibhauseffekt

Kohlenstoffdioxid in der Lebensmittelindustrie

- Kühlen und Frosten von Lebensmitteln
- Kaltmahlen: Erst in Pulverform lassen sich viele Materialien effizient einsetzen. Beim Kaltmahlen werden die zu mahlenden Stoffe mit tiefkaltem, flüssigem Stickstoff oder Kohlenstoffdioxid abgekühlt und verspródet, wodurch sie sich fein zermahlen lassen.
- Karbonisieren von Erfrischungsgetränken, Einsatz in der Getränkeindustrie

Kohlenstoffdioxid in der Schädlingsbekämpfung

Die schädliche Wirkung des Kohlenstoffdioxids in höheren Konzentrationen macht man sich zum Beispiel bei der Bekämpfung von Insekten sowie deren Larven und Eiern zunutze. Hierfür wird Kohlenstoffdioxid aus Tankanlagen oder Flaschen entnommen und in Konzentrationen von über 60 Vol.-% in gasdichte Zelte, Gaskammern, Foliensäcke, Räume oder ganze Gebäude, in denen sich die Schädlinge aufhalten, eingeleitet.

Kohlenstoffdioxid als Dünger

Kontrollierte Zufuhr von CO₂ in Gewächshäusern (Steigerung der Photosyntheseleistung)

Kohlenstoffdioxid in der Brandbekämpfung

Kohlenstoffdioxid wird zur Bekämpfung von Bränden der Brandklassen B und C eingesetzt. Es wird als Löschmittel vor allem bei elektrischen und elektronischen Anlagen verwendet, da es im Gegensatz zu allen wasserbasierten Löschmitteln und den meisten Pulvern nicht elektrisch leitend ist. Kohlenstoffdioxid kann nicht zum Löschen brennender Leichtmetalle – beispielsweise Alkali- und Erdalkalimetallen – eingesetzt werden, da es mit diesen chemisch reagiert ($2\text{CO}_2 + \text{Mg} \rightarrow 2\text{C} + 2\text{MgO}$).

Kohlenstoffdioxid als Lösemittel

Flüssiges Kohlenstoffdioxid dient bei der chemischen Reinigung mit bestimmten Zusätzen als Ersatz für das lange Zeit verwendete Tetrachlorethen, auch Perchlorethylen (PER) genannt.

Kohlenstoffdioxid im überkritischen Zustand dient in der Lebensmitteltechnologie und in der pharmazeutischen Industrie als Extraktionsmittel für Naturstoffe. So wird mit Hilfe von überkritischem Kohlenstoffdioxid Kaffee vom Koffein befreit. Der Vorteil gegenüber der Verwendung von organischen Extraktionsmitteln liegt auf der Hand: Kohlenstoffdioxid hinterlässt im Kaffee keinerlei Rückstände, kann immer wieder verwendet werden und verursacht keine Entsorgungsprobleme.

Hinweis: Man erhält überkritisches Kohlenstoffdioxid, wenn man das Gas bei einer Temperatur über 31 Grad Celsius komprimiert (Druck über 7,375 MPa). Ab dieser kritischen Temperatur kann es durch Druckerhöhung nicht mehr verflüssigt werden. Es gerät unter diesen Druck- und Temperaturbedingungen allerdings in einen Zustand, der sich gegenüber dem von echten Flüssigkeiten nicht nur durch eine geringere Dichte und eine geringere Viskosität sondern auch noch durch ein hervorragendes Lösungsvermögen auszeichnet.

Sekundarstufe II

Kohlenstoffdioxid als Rohstoff

Aus dem Gas lassen sich heute mit innovativen Methoden Kunststoffe und andere höherwertige Chemikalien herstellen (siehe Aufgabe 8.4).

Benzin aus Kohlenstoffdioxid

In neuen Varianten bekannter Verfahren wird zunächst mit Hilfe von Ökostrom aus Wasser per Elektrolyse Wasserstoff erzeugt, um dieses dann mit Kohlenstoffdioxid in einem Reforming-Schritt zu Synthesegas umzusetzen (Hochtemperatur-Reformer, $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$). Mit Hilfe des Fischer-Tropsch-Verfahrens werden daraus Benzin, Diesel und Kerosin hergestellt (siehe Abbildung 8.6).

Die dazu notwendigen Prozesse sind seit langer Zeit bekannt. Allerdings wird Wasserstoff zum Beispiel mit einer neu entwickelten Hochtemperatur-Elektrolyse aus Wasserdampf hergestellt, was energetisch deutliche Vorteile aufweist.

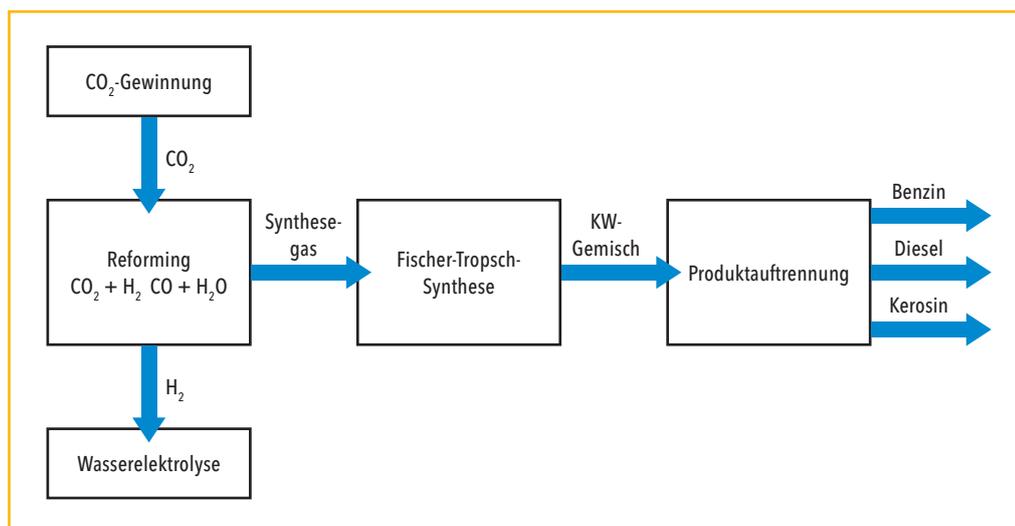


Abbildung 8.6: Verfahrenskonzept einer nachhaltigen „Power-to-Liquid“-Technologie

- Organisieren Sie eine Poster-Ausstellung, mit der Sie über die positiven Seiten des Kohlenstoffdioxids informieren. (Hinweis: Ein wissenschaftliches Poster ist ein visueller Vortrag in Form eines Plakats.)
- Informieren Sie sich gegenseitig während eines Rundgangs durch die Poster-Ausstellung über die positiven Seiten von Kohlenstoffdioxid.