

FCI  
FONDS DER  
CHEMISCHEN  
INDUSTRIE



Unterrichtsmaterial Kreislaufwirtschaft

## Den Kreislauf in Schwung bringen

Die Arbeitsblätter und Experimente (siehe Seiten 2 und 3) mit Lösungshinweisen (Hinweise für Lehrkräfte) finden Sie auf den Internetseiten des Fonds unter:

[www.vci.de/fonds/unterrichtsmaterialien](http://www.vci.de/fonds/unterrichtsmaterialien)

Dort sind auch die **Gefährdungsbeurteilungen** hinterlegt. Alle Abbildungen sowie das vorliegende Textheft stehen ebenfalls zum Herunterladen bereit.

Besuchen Sie uns im Internet unter:  
[www.vci.de/fonds](http://www.vci.de/fonds)

Senden Sie uns Ihre Fragen und Anmerkungen per Mail:  
[fonds@vci.de](mailto:fonds@vci.de)

Kennen Sie die Unterrichtsförderung des Fonds? Mit ihr soll der experimentelle Chemieunterricht gestärkt werden.

Bis zu 5.000 Euro können allgemeinbildende Schulen erhalten, an denen Chemie unterrichtet wird. Auch für berufsbildende Schulen, die das Fach Chemie bzw. chemieaffine Lernfelder anbieten, ist die Unterrichtsförderung offen. Der experimentelle Sachunterricht an Grundschulen kann ebenfalls durch die Unterrichtsförderung gestärkt werden. Mit dem Geld können Chemie- bzw. Sachunterrichtslehrkräfte die Dinge anschaffen, die sie brauchen, um einen anschaulichen und spannenden experimentellen Unterricht zu gestalten.  
[Unterrichtsförderung | FCI \(vci.de\)](#)

Arbeitsblätter	Thema	Niveau	Kapitel
1.1	Beständigkeit von Kunststoffen gegen Hydrolyse und Bewitterung	SEK I/SEK II	1
1.2	Kunststoffsorten im deutschen Hausmüll	SEK I/SEK II	1.2
1.3	Herstellung von Methanol aus Kunststoffabfällen	SEK II	1.7.2
1.4	Chemische Depolymerisation – Solvolyse	SEK II	1.7.3
2.1	Der Strahlungshaushalt der Erde und der Treibhauseffekt	SEK I/SEK II	2.1
2.2	Der Kohlenstoffkreislauf	SEK I/SEK II	2.1
2.3	Kippelemente	SEK I/SEK II	2.1
2.4	Carbon Capture and Storage	SEK I/SEK II	2.2
2.5	Negativemissionstechnologien	SEK II	2.7
3.1	Mechanische Aufarbeitung von Elektroschrott	SEK I/SEK II	3.3
3.2	Pyrometallurgische Kupfergewinnung im Überblick	SEK I/SEK II	3.3.1
3.3	Raffinationselektrolyse	SEK I/SEK II	3.3.1



Die Übersicht ist verlinkt. Klicken Sie auf den gewünschten Inhalt und Sie gelangen direkt dorthin. Möchten Sie wieder zurück, klicken Sie rechts oben auf das Home-Icon.



Arbeitsblätter	Thema	Niveau	Kapitel
4.1	Strom für die Elektromobilität	SEK I	4
4.2	Bewährte Akkutechnologie	SEK I/SEK II	4.3
4.3	Die CO <sub>2</sub> -Bilanz der Batterieproduktion	SEK I/SEK II	4.3.3
4.4	Hochofenvergleich	SEK II	4.5.2
4.5	Lithium-Polymerzelle	SEK II	4.7

Experimente	Thema	Niveau	Kapitel
1.1	Identifizierung verschiedener Kunststoffe	SEK II	1.2
1.2	Reduktion von Metalloxiden mit Kunststoffabfällen	SEK I/SEK II	1.4
1.3	Umschmelzen eines Thermoplasts	SEK II	1.4
1.4	Pyrolyse von Polyethen	SEK II	1.7.1
1.5	Hydrolyse von Polyethylenterephthalat	SEK II (Demonstrationsexperiment)	1.7.3
1.6	Herstellen eines Kunststoffs aus Milchsäure	SEK I/SEK II	1.8
2.1	Einfluss der Temperatur auf das Gleichgewichtssystem	SEK II	2
2.2	Einfluss des Druckes auf das Gleichgewichtssystem	SEK II	2
2.3	Einfluss des pH-Werts auf das Gleichgewichtssystem	SEK II	2
2.4	Modellexperiment zum Bau eines Treibhauses	SEK II	2.1
2.5	Modellversuch zur Speicherung von CO <sub>2</sub>	SEK II	2.7
3.1	Elektrolytische Abscheidung von Kupfer an Kohle aus einer Kupferlegierung	SEK II	3.3.1
3.2	Direktelektrolyse von Leiterplatten	SEK II	3.3.1
4.1	Lithium-Sauerstoff-Batterie	SEKI/SEK II	4.7



Die Übersicht ist verlinkt. Klicken Sie auf den gewünschten Inhalt und Sie gelangen direkt dorthin. Möchten Sie wieder zurück, klicken Sie rechts oben auf das Home-Icon.



<b>Einleitung</b>	<b>6</b>
<hr/>	
<b>1 Kunststoffe – Sind die Alleskönner fit für den Kreislauf?</b>	<b>10</b>
<hr/>	
1.1 Großer Nutzen – unübersehbare Probleme	10
1.2 Die wichtigsten Polymerklassen	12
1.3 Produktion und Verbrauch in Deutschland	13
1.4 Was passiert mit Kunststoffabfällen in Deutschland?	14
1.5 Nur was man hat, kann man recyceln	16
1.6 Verbundstoffe	17
1.7 Hoffnungsträger chemisches Recycling	18
1.7.1 Die Pyrolyse	19
1.7.2 Die Gasifizierung	19
1.7.3 Die Chemolyse/Solvolyse	20
1.8 Sind biobasierte und bioabbaubare Kunststoffe eine Lösung?	21
1.9 Der gesetzliche Rahmen	22
1.10 Ohne Kunststoffe geht es nicht	22
1.11 Ausblick	23
<b>2 Kohlenstoffdioxid – Treibhausgas und Rohstoff für die chemische Industrie</b>	<b>24</b>
<hr/>	
2.1 Treibhausgase in der Atmosphäre	25
2.2 Rohstoff für die chemische Industrie	26
2.3 Bereitstellung von CO <sub>2</sub>	28
2.3.1 Aminwäsche	28
2.3.2 Das CLC-Verfahren	29
2.4 Kohlenstoffquellen in der chemischen Synthese	29
2.4.1 Harnstoff	31
2.4.2 Salicylsäure	32
2.4.3 Methanolsynthese	32
2.4.4 Verwendung von Methanol	34
2.5 Einsatz von CO <sub>2</sub> in der Kunststoffsynthese	35



2.6	Künstliche Photosynthese	36
2.7	Ausblick	38
<b>3</b>	<b>Elektroschrott – Eine wachsende Herausforderung</b>	<b>40</b>
3.1	Die Mengen	40
3.2	Wertvoller Schrott	42
3.3	Verwertung von Elektroschrott	42
3.3.1	Kupferraffination	45
3.3.2	Seltenerdmetalle	47
3.4	Beispiel Fernseher und Bildschirme	48
3.5	Ausblick	50
<b>4</b>	<b>Fahrzeuge – Batterie für die Elektromobilität</b>	<b>52</b>
4.1	Elektromobilität nimmt Fahrt auf	52
4.2	Nichts geht ohne Lithium-Ionen-Batterie	53
4.3	Die Rohstoffe	54
4.3.1	Lithium	55
4.3.2	Kobalt	55
4.3.3	Nickel	55
4.4	Wenn der Energiespeicher in die Jahre kommt	56
4.5	Stand des Recyclings von Lithium-Ionen-Akkus	57
4.5.1	Das Zerlegen	58
4.5.2	Ab in den Hochofen	58
4.5.3	Die eigentliche Trennung	59
4.5.4	Alternative Routen	60
4.6	Der gesetzliche Rahmen	60
4.7	Ausblick	61
	<b>Impressum</b>	<b>62</b>

## Den Kreislauf in Schwung bringen

Unsere bisherige Wirtschaftsweise hat vielen Menschen ein besseres Leben ermöglicht. Doch der wachsende Wohlstand hat seinen Preis: Der globale Ressourcenverbrauch hat sich seit 1970 mehr als verdreifacht, und der Klimawandel ist die größte Herausforderung, vor der wir momentan stehen. Um den Ausstoß von Treibhausgasen zu reduzieren, müssen wir viele unserer Gewohnheiten infrage stellen. Höchste Zeit also, etwas zu ändern. Ein wichtiger Teil der Lösung ist der Weg in die Kreislaufwirtschaft. Dabei geht es darum, bereits beim Design von Produkten und Werkstoffen anzusetzen, Güter möglichst ressourceneffizient zu produzieren, lange zu nutzen, zu reparieren und wiederverwenden. Und wenn sie letztlich doch zu Abfall werden, müssen die Rohstoffe zurückgewonnen werden. Das gelingt durch mehr Recycling und andere Wege der Kreislaufführung.

Der Wandel zur Kreislaufwirtschaft stellt eine gewaltige Herausforderung dar. Wir werden lieb gewonnene Verhaltensmuster hinterfragen und Abschied von der Wegwerfmentalität nehmen müssen. Auch der Verzicht spielt eine Rolle. Abfälle lassen sich durch optimierten Materialverbrauch reduzieren – und natürlich auch indem man auf das Produkt einfach verzichtet. Dass dies bei einer Gesamtbetrachtung aber nicht immer der nachhaltigste Weg ist, zeigt sich beispielsweise am Zankapfel Plastikverpackung: Einerseits lassen sich durch die Vermeidung von Verpackungen Ressourcen einsparen. Andererseits helfen Kunststoffverpackungen dabei, das verpackte Produkt zu schützen, so etwa Lebensmittel vor dem Verfall.

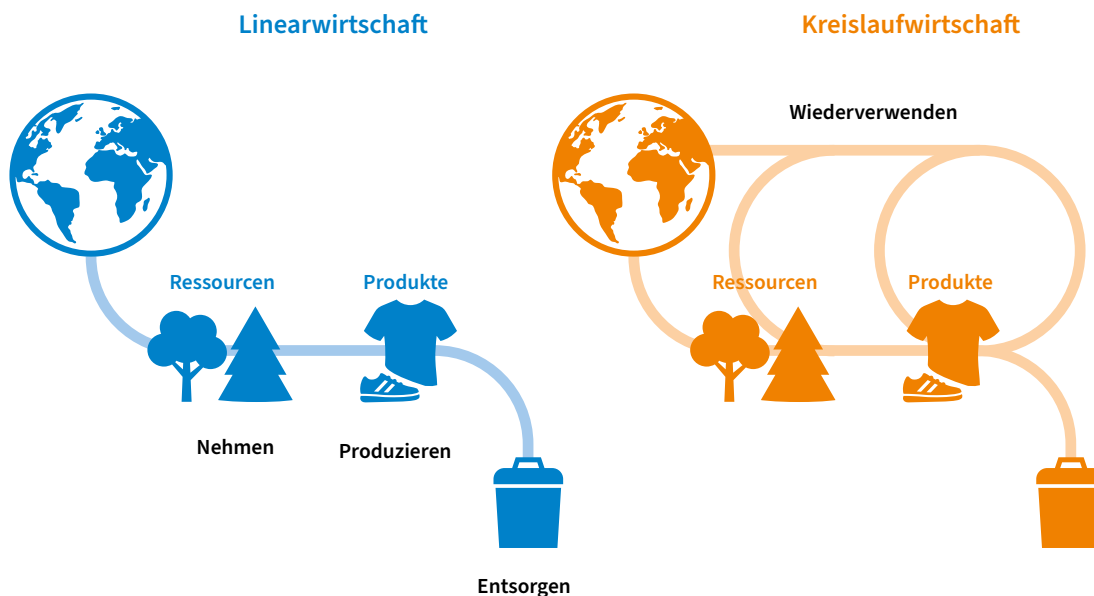
Die Wirtschaft ist gefordert, ihre Geschäftsmodelle neu auszurichten und die Produktionsmethoden von fossilen Rohstoffen zu entkoppeln. Das geht mit großen Investitionen einher. Die Politik muss den gesamten Prozess mit zielführenden Rahmenbedingungen begleiten und da-

ABBILDUNG 1

### Kreislaufwirtschaft



## Linearwirtschaft versus Kreislaufwirtschaft



bei die Wirtschafts- und Wettbewerbsfähigkeit und den globalen Rahmen im Blick behalten. Der Übergang von einer Linear- zu einer Kreislaufwirtschaft ist Gegenstand sowohl der UN -Nachhaltigkeitsziele als auch des Ende 2015 verabschiedeten Kreislaufwirtschaftspaketes der Europäischen Kommission sowie des im März 2020 veröffentlichten EU-Aktionsplans für die Kreislaufwirtschaft.

### Kreislaufwirtschaft: mehr als Recycling

Die Kreislaufwirtschaft ist der wichtigste Schlüssel zum Erreichen der Klimaneutralität, zur Schonung natürlicher Ressourcen und zum Umweltschutz. Die Kreislaufführung von Stoffen wird in diesem Unterrichtsmaterial anhand von vier Gruppen von Materialien, die in unser aller Alltag eine Rolle spielen, und die wichtige Wertstoffe enthalten, erläutert. Es wird außerdem beschrieben, an welchen neuen Recyclingverfahren derzeit geforscht wird.

**Kunststoffe** werden aus wertvollen Ressourcen hergestellt und sind damit selbst wichtige Rohstoffe. Sie sollten im Kreis geführt werden, um nach ihrer Nutzung wieder zu neuen Produkten zu werden. Die Chemie forscht intensiv nach alternativen Lösungen. Ergebnis: Das größte Zukunftspotenzial, fossile Rohstoffe in der Kunststoffproduktion zu ergänzen, haben

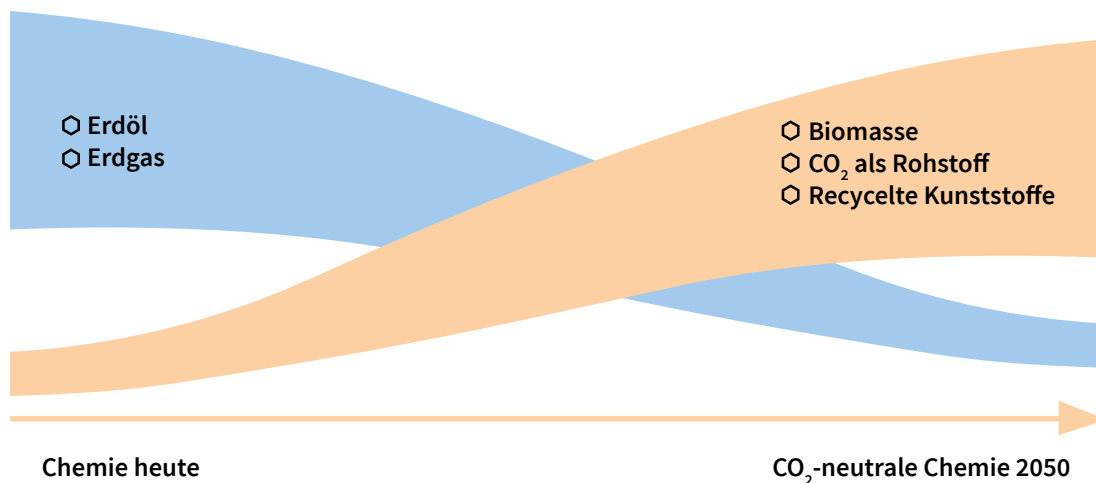
- ◊ recycelte Kunststoffe,
- ◊ nachwachsende Rohstoffe und
- ◊ das Treibhausgas CO<sub>2</sub>.

#### HINWEIS

Das Zukunftspotenzial der Kreislaufwirtschaft steht außer Frage, da mit ihrer Hilfe pro Jahr Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> eingespart werden könnten. Für die EU nimmt eine Studie der Europäischen Kommission eine Steigerung des BIP bis 2030 um 0,5 Prozent und 700.000 neue Arbeitsplätze durch den Umbau der Wirtschaftsweise an. Zudem könnte einer acatech-Studie zufolge allein in Deutschland die Menge an eingesetzten Primärrohstoffen bis 2050 um 68 Prozent gegenüber 2018 reduziert werden.

Raus aus der „Wegwerfgesellschaft“, hinein in eine Circular Economy Roadmap für Deutschland, acatech, 2021 <https://www.acatech.de/publikation/circular-economy-roadmap-fuer-deutschland/> (27.08.2024)

## Die Rohstoffe von morgen



Voraussetzungen: Kunststoffabfälle und Biomasse sind in ausreichender Menge verfügbar. Das gilt auch für den zur CO<sub>2</sub>-Nutzung notwendigen Wasserstoff, der zudem mithilfe von erneuerbaren Energien hergestellt werden und bezahlbar sein muss.

**Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>)** ist in großen Mengen überall vorhanden und kann durch innovative Technologien als Rohstoff nutzbar gemacht werden. So kann eine effiziente Kohlenstoffkreislaufwirtschaft aufgebaut und der Einsatz fossiler Ressourcen verringert werden.

Die Gesamtstrategie für das CO<sub>2</sub>-Management sollte auf den drei Elementen Vermeidung, stoffliche Verwertung und Speicherung basieren.

**Elektro- und Elektronikgeräte** landen derzeit immer noch zu einem großen Anteil als Elektroschrott auf dem Müll, obwohl sie viele Stoffe enthalten, die wertvoll sind und nur in begrenztem Maße zur Verfügung stehen. Moderne Recycling- und Wiederverwertungstechnologien werden für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft auch hier eine große Rolle spielen.

**E-Mobilität** und die dafür notwendigen **Akkumulatoren** werden in der Zukunft eine wachsende Bedeutung haben. Wie kann sichergestellt werden, dass die dafür verwendeten Materialien nicht auf der Müllhalde landen, sondern für die Wiederverwertung aufbereitet werden?

## HINWEIS

In der Chemie ist eine Reaktionsgleichung die Kurzschreibweise für eine chemische Reaktion. Sie gibt die Ausgangs- und Endstoffe (Reaktanten und Produkte) einer Stoffumwandlung in richtigem Verhältnis (stöchiometrisch) in Formelschreibweise wieder. Der Aggregatzustand der beteiligten Stoffe kann durch Zusätze angegeben werden: (g) = gasförmig, (l) = flüssig, (s) = fest, (aq) = gelöst.

Die Angabe der Aggregatzustände ergibt unter didaktischen Gesichtspunkten nur dann Sinn, wenn man Reaktionsangaben unter Standardbedingungen angibt und die Energiebilanzen berücksichtigen möchte. Daher sind die Aggregatzustände im Folgenden nur angegeben, wo es aus Sicht der Autoren sinnvoll erscheint.



## Sind die Alleskönner fit für den Kreislauf?

Ob Chipstüte, Nudelverpackung, Zahnbürstengriff, Handygehäuse, Fußbodenbelag, Windrad oder Outdoorbekleidung – Kunststoffe sind in unserem Alltag kaum verzichtbar. Überlegen Sie einmal, wie Ihr Haushalt ohne Kunststoffe aussähe. Oder wäre ein Auto ohne Kunststoffbestandteile heute denkbar?



Die Geschichte der Kunststoffe ist erst etwas mehr als 150 Jahre alt. Als erster Kunststoff gilt das 1869 eingeführte Celluloid. Vor allem in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts kamen viele weitere Polymerklassen hinzu.

Doch erst in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts entwickelten sich Kunststoffe zu unseren täglichen Begleitern. Noch im Jahr 1950 lag die jährliche Kunststoffproduktion bei knapp zwei Millionen Tonnen weltweit. Zur Jahrtausendwende waren es schon 213 Millionen Tonnen, und inzwischen steuern wir auf 400 Millionen Jahrestonnen zu<sup>1-3</sup>.

<sup>1</sup> Production, use, and fate of all plastics ever made, <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.1700782> (22.06.2024)

<sup>2</sup> Plastics – the Facts 2021, Plastics Europe, <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2021/> (06.02.2024)

<sup>3</sup> Diese wie auch alle weiteren Zahlen in diesem Kapitel enthalten üblicherweise nicht die Mengen für synthetische Kautschuke, wie sie etwa in Autoreifen verarbeitet werden. Die Jahresproduktion synthetischer Kautschuke liegt in der Größenordnung von 15 Millionen Tonnen. (Synthetic Rubber: Global Markets, BCC Research April 2021)

## INFO FÜR LEHRKRÄFTE

Arbeitsblatt 1.1:  
Beständigkeit von Kunststoffen gegen Hydrolyse und Bewitterung

Verglichen mit anderen Materialien bringen Kunststoffe aufgrund ihres geringen Gewichts mehr Leichtigkeit in unser Leben. Kunststoffe können – thermisch und elektrisch – isolierend wirken, wasserdicht sein und in transparenten Produkten für Durchblick sorgen. Sie sind korrosionsbeständig und witterungsfest und können chemisch so eingestellt werden, dass sie auch aggressiven Substanzen standhalten. In welcher Gestalt sie uns begegnen, unterliegt fast keinen Grenzen. Denn Kunststoffe sind frei form- und färbbar. Viele klimafreundliche Lösungen und Produkte beruhen auf Kunststoffen. Das betrifft etwa die Windkraftanlagen mit ihren Rotorblättern oder Leichtbaumaterialien, die den Verbrauch und den CO<sub>2</sub>-Ausstoß von Autos und Flugzeugen durch Gewichtsersparnis reduzieren, sowie Wärmedämmung, die den Energiehunger von Gebäuden, aber auch Kühl- und Gefrierschränken mindert. Kunststoffe sind außerdem Bestandteile von Batterien, Brennstoffzellen und Elektrolyseuren.

### 1.1 Großer Nutzen – unübersehbare Probleme

Doch auch die Erfolgsgeschichte der Kunststoffe hat Schattenseiten. Das sind vor allem

- ⬢ die Verschmutzung der Umwelt durch Kunststoffabfälle,
- ⬢ der Bedarf an fossilen Ressourcen für die Kunststoffherstellung und die daraus resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie der Ressourcenverbrauch.

ABBILDUNG 4

## Kunststoffe im Kreis führen



Quelle: Recycling & Chemie | Ihre Chemie (ihre-chemie.de) (01.11.2023)

Aber nicht im Material liegt das Problem, sondern in dessen Handling. Kunststoffe müssen konsequenter im Kreislauf geführt werden durch verstärktes Recycling und smartes Produktdesign.

Denn eine nachhaltige Kunststoffwirtschaft bezieht auch Aspekte ein, die weit vor und nach der Produktnutzung durch den Verbraucher liegen: von der Rohstoffquelle und der Gestaltung der Kunststoffprodukte über das bessere Sammeln und Sortieren der Plastikabfälle bis hin zu modernen und zukunftsfähigen Recyclingverfahren.

Wo dies gelingt, werden Kunststoffabfälle und CO<sub>2</sub>-Emissionen vermieden und zugleich fossile Rohstoffe eingespart.

## HINWEIS

8,3 Mrd. Tonnen Kunststoffprodukte hat die Menschheit allein in der Zeit von 1950 bis 2015 insgesamt produziert. Davon sind noch 2,6 Mrd. Tonnen in Gebrauch, darunter 0,1 Mrd. Tonnen nach Recycling. Dagegen wurden 0,8 Mrd. Tonnen verbrannt und 4,9 Mrd. Tonnen unkontrolliert an die Umwelt abgegeben.

Im Jahr 2022 wurden weltweit 400,3 Mio. Tonnen Kunststoff produziert, ein Anstieg von 2,5 Prozent gegenüber dem Vorjahr.<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Plastics – the fast Facts 2023, Plastics Europe <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2023/> (01.11.2024)

## 1.2 Die wichtigsten Polymerklassen

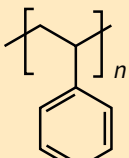
Das Reich der Kunststoffe ist riesig. Das Spektrum reicht von der hauchdünnen und weichen Polyethylen-Folie für die Lebensmittelverpackung bis zum harten, verschleißarmen Polyurethan-Rad für Einkaufswagen oder Achterbahnzüge. Die mengenmäßig größte Bedeutung unter den verschiedenen Polymertypen haben Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP), aus denen zum Beispiel Folien, Lebensmittelverpackungen, Autoteile, Shampoo-Flaschen, Rohre und vieles mehr gefertigt werden. Weitere wich-

tige Kunststoffklassen sind Polyvinylchlorid (PVC), Polyurethane (PU) und Polyethylenterephthalat (PET).



TABELLE 1

Die mengenmäßig wichtigsten Polymerklassen mit ihren charakteristischen Strukturmerkmalen, Beispielen für Anwendungsbereiche sowie ihrem Gewichtsanteil an der EU-weiten Kunststoffverarbeitung.

Polymer	Struktur	Anwendungsbeispiele	Mengenanteil unter allen 2020 in der EU hergestellten Kunststoffen (in Prozent)
Polyethylen (PE)	$\left[ \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \\ \text{---C---C---} \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array} \right]_n$	Folien, Tüten, Lebensmittelverpackungen, Milchflaschen, Shampoo-Flaschen, Spielzeug, ...	30,3
Polypropylen (PP)	$\left[ \begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ \text{---} \text{C} \text{---} \\   \\ \text{---} \end{array} \right]_n$	Verpackungen, Autoteile, Rohre, ...	19,7
Polyvinylchlorid (PVC)	$\left[ \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{Cl} \\   \quad   \\ \text{---C---C---} \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array} \right]_n$	Fensterrahmen, Fußböden, Rohre, Kabelummantelungen, Schallplatten, Regenkleidung, ...	9,6
Polyethylenterephthalat (PET)	$\left[ \text{---O---} \begin{array}{c} \text{O} \\    \\ \text{---} \end{array} \text{---} \text{C}_6\text{H}_4 \text{---} \begin{array}{c} \text{O} \\    \\ \text{---} \end{array} \text{---O---}(\text{CH}_2)_2 \right]_n$	Getränkeflaschen, Textilfasern, ...	8,4
Polyurethan (PU)	$\left[ \text{---R}^1\text{---O---} \begin{array}{c} \text{O} \\    \\ \text{---} \end{array} \text{---N---R}^2\text{---N---} \begin{array}{c} \text{H} \\   \\ \text{---} \end{array} \text{---C---O---} \right]_n$	Schaumstoffe für Matratzen und Polstermöbel, Dämmmaterial für Gebäude und Kühlschrankwände, Montageschaum, Lacke, Klebstoffe, ...	7,8
Polystyrol (PS)	$\left[ \begin{array}{c} \text{---} \text{C} \text{---} \\   \\ \text{---} \end{array} \right]_n$ 	Schaumstoffe für Gebäudedämmung und Getränkebecher, ...	6,1

**INFO FÜR LEHRKRÄFTE**

Arbeitsblatt 1.2:  
Kunststoffsorten im deutschen Hausmüll  
Experiment 1.1:  
Identifizierung verschiedener Kunststoffe

aus Rezyklat, also aus der Wiederverwertung von Kunststoffabfällen. Im selben Jahr lag der Verbrauch von Kunststoffen in Deutschland bei 12,4 Millionen Tonnen

**HINWEIS****Was ist Rezyklat?**

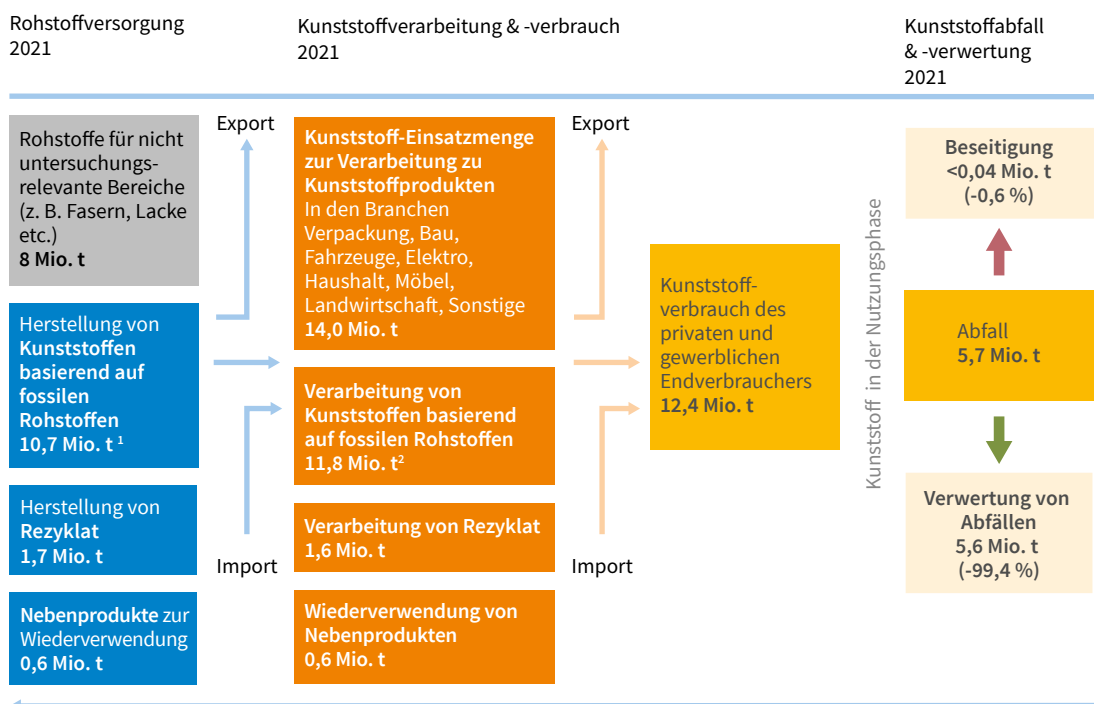
Laut Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) §3, Absatz 7b: Rezyklate im Sinne dieses Gesetzes sind sekundäre Rohstoffe, die durch die Verwertung von Abfällen gewonnen worden sind oder bei der Beseitigung von Abfällen anfallen und für die Herstellung von Erzeugnissen geeignet sind.

Das heißt, ein Rezyklat muss nicht zwingend genau so verwendet werden wie der Abfall, aus dem es gewonnen wurde. Wenn man alte PET-Flaschen stofflich verwertet und daraus eine Parkbank herstellt, ist auch das eine Verwendung als Rezyklat.

**1.3 Produktion und Verbrauch in Deutschland**

Mit 21 Millionen Tonnen (2021) produziert Deutschland gut fünf Prozent der globalen Polymer-Rohware. Im selben Jahr summierte sich die inländische Weiterverarbeitung zu Produkten (ohne Klebstoffe, Farben, Lacke, Fasern etc.) auf 14,0 Millionen Tonnen.

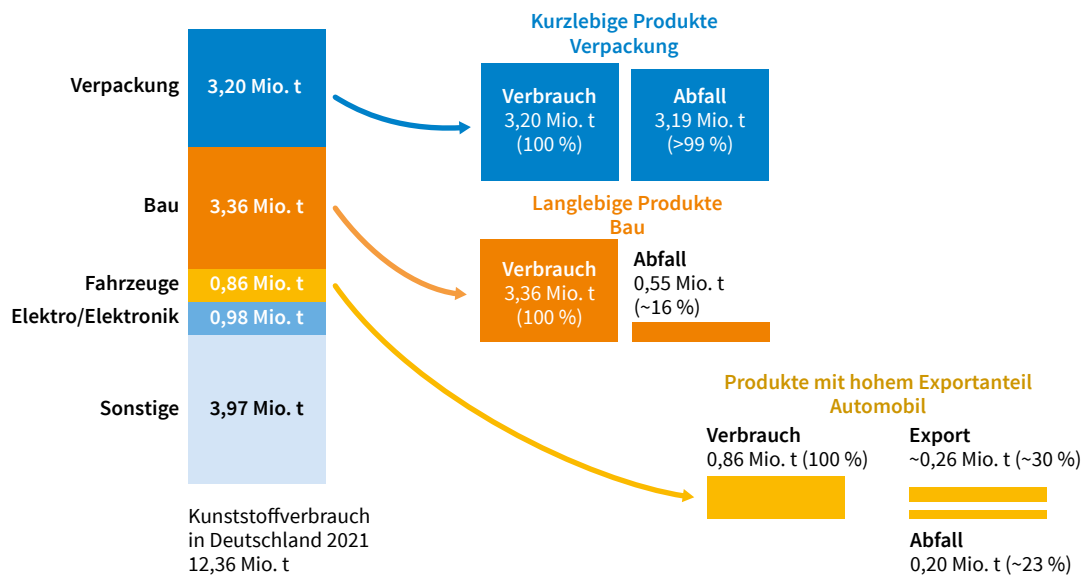
Davon wurden 11,8 Millionen Tonnen aus fossilen Rohstoffen neu hergestellt. Die übrigen 2,2 Millionen Tonnen stammten überwiegend

**ABBILDUNG 5****Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2021:**

<sup>1</sup> Kunststoffarten PE-LD/LLD, PE-HD/MD, PP, PVC, PS, PS-E, PA, PET, ABS, ASA, SAN, PMMA, Sonst. Thermoplaste, Sonst. Kunststoffe inkl. PUR

<sup>2</sup> inkludiert zu geringen Mengen biobasierte Rohstoffe

Gegenüberstellung von Verbrauchs- und Abfallmengen in Deutschland 2021



Quelle: Conversio, Stromstoffbild Kunststoffe in Deutschland 2021. (gerundete Mengen)

### 1.4 Was passiert mit Kunststoffabfällen in Deutschland

Der Deckel auf dem Coffee-to-go-Becher, die leere Weingummitüte und die Folie um die Paprika: Vor allem Kunststoffverpackungen haben nur eine kurze Nutzungsdauer. Und so wundert es nicht, dass den 3,20 Millionen Tonnen Kunststoff, die 2021 in den deutschen Verpackungssektor gingen, 3,19 Millionen Tonnen Plastikverpackungsmüll gegenüberstanden – fast 100 Prozent!

Schallplatten, Fensterrahmen oder Plastikrohre im Bauwesen sind dagegen mehrere Jahrzehnte im Einsatz. Doch für die allermeisten Polymerprodukte kommt irgendwann der Moment, in dem sie ihre Aufgabe erfüllt haben und zu Abfall werden.

2021 wurden fast 35 Prozent der Kunststoffabfälle von Endverbrauchern in Deutschland einem Recycling zugeführt, gut 65 Prozent wurden immer noch energetisch verwertet. Ein Teil

der Abfälle wird dabei verbrannt, um Energie in Form von Strom, Dampf oder Wärme zu gewinnen. Das heißt, sie liefern Energie, wo normalerweise andere (fossile) Brennstoffe zum Einsatz kommen, etwa bei der Herstellung von Zement. Das ist möglich und mitunter derzeit auch sinnvoll, weil viele Kunststoffe einen ähnlichen Heizwert wie etwa Erdöl und Erdgas haben (s. Tab. 2).

#### INFO FÜR LEHRKRÄFTE

Experiment 1.2:  
Reduktion von Metalloxiden mit Kunststoffabfällen

Als Rohstoff für neue Produkte geht der Kunststoff in diesen Fällen aber verloren. Ziel muss es deshalb sein, das Recycling zu stärken.

Beim Recycling unterscheidet man zwischen dem mechanischen und dem chemischen Recycling. Beim mechanischen Recycling überführt man die Kunststoffabfälle mit rein physikalischen Methoden in Sekundärrohstoffe, ohne

TABELLE 2

**Heizwerte verschiedener Energieträger bei 25 °C in MJ/kg  
(nach Martens and Goldmann 2016)<sup>5</sup>**

Hausmüll	2,5–12,0	Kohle	25,0–35,0	Polypropylen	44,0
Polyethylenterephthalat (PET)	4,2	Polyamid (PA)	31,0	Polyethylen	46,1
Papier	17,0	Erdgas	32,0–45,0	Propan	46,3
Holz	18,0	Polystyrol	40,2	Methan	50,0
Polyvinylchlorid (PVC)	18,0	Erdöl	42,8	Wasserstoff	120,0

dass man die chemische Struktur der Polymere ändert. Solche Rezyklate lassen sich dann direkt für die Produktion neuer Kunststoffprodukte verwenden. Man benötigt dafür allerdings möglichst sortenreine Abfälle, wie dies etwa bei PET-Flaschen der Fall ist. Man kann diese dann granulieren, einschmelzen und neu verarbeiten. Oft scheitert ein gleichwertiger Wiedereinsatz aber an schlecht abtrennbaren Verunreinigungen.

Das Einwegpfand- und Sammelsystem für PET-Flaschen hat zum Beispiel geholfen, sehr reines PET-Material zu bekommen und zugleich viel Material im Kreislauf zu halten. Auch im Baubereich gibt es aufgrund von etablierten Rücknahmesystemen, zum Beispiel für PVC-Teile wie Fußböden oder Fensterrahmen, Abfälle, die in der Regel deutlich reiner sind als etwa die Mischabfälle, die die privaten Haushalte in der gelben Tonne sammeln.



Das mechanische Recycling stößt aber auch an Grenzen. Es kann einerseits nur Anwendung finden für sortenrein und gereinigt vorliegende Kunststoffe. Andererseits lassen sich Kunststoffe nicht unendlich oft mechanisch recyceln, da mit jedem Zyklus graduelle Qualitätsminderungen verbunden sind. Beim PET-Recycling etwa verlieren die Polymere bei jedem Zyklus an Kettenlänge. Die Umlaufrate ist daher begrenzt.

**INFO FÜR LEHRKRÄFTE**

Experiment 1.3:  
Umschmelzen eines Thermoplasts

Anders als beim mechanischen Recycling wandelt man die Abfälle beim chemischen Recycling in chemische Grundbausteine um, also etwa in die Monomere der jeweiligen Polymere. Diese können dann für erneute Synthesen genutzt werden und liefern dabei hochqualitative reine Neuware. 2021 kam dieses Vorgehen allerdings erst bei lediglich 0,03 Millionen Tonnen Kunststoffmüll zur Anwendung.

<sup>5</sup> Lechleitner, A., Schwabl, D., Schubert, T., Bauer, M., & Lehner, M. (2020). Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 72(1), 47–60. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00506-019-00628-w> (05.09.2024)

#### HINWEIS

Mechanisches Recycling: Waschen, in kleine Teile schreddern, diese wieder einschmelzen (rein physikalische Verfahren).

Chemisches Recycling: Die Polymere werden in ihre chemischen Bausteine zerlegt oder in Ölphasen oder Synthesegas überführt. Diese sekundären Rohstoffe können für Synthesen von neuen Produkten genutzt werden. Die vollständige chemische Umsetzung (Verbrennung) der Polymere mit Luftsauerstoff fällt nicht unter diese Bezeichnung.

#### HINWEIS

Mülltrennung ist keine Raketenwissenschaft. Denn die Grundregel ist einfach: Geben Sie nur Kunststoffverpackungen in den Gelben Sack und die Gelbe Tonne – aber keine anderen Produkte aus Kunststoff!

### 1.5 Nur was man hat, kann man recyceln

Grundvoraussetzung für jegliche Form der Verwertung ist eine gut funktionierende Entsorgungsinfrastruktur, die das Sammeln und Sortieren der Kunststoffabfälle ermöglicht. Ein Baustein ist dabei auch die Aufklärung und Sensibilisierung der Verbraucher für die Vermeidung von Müll und dessen korrekte Entsorgung.



Ein Deponieverbot für Kunststoffabfälle ist eine wichtige Voraussetzung dafür, dass Recyclingkapazitäten ausgebaut werden. Und hier geht Deutschland mit gutem Beispiel voran. Durch die gesetzliche Vorgabe, Kunststoffabfälle in Deutschland nicht deponieren zu dürfen, werden diese zu fast 100 Prozent einer Verwertung zugeführt, also entweder recycelt oder energetisch verwertet.

Im Jahr 2021 bekam die Entsorgungswirtschaft 5,44 Millionen Tonnen Kunststoffabfälle von Endverbrauchern (Haushalte, Gewerbe, Industrie).

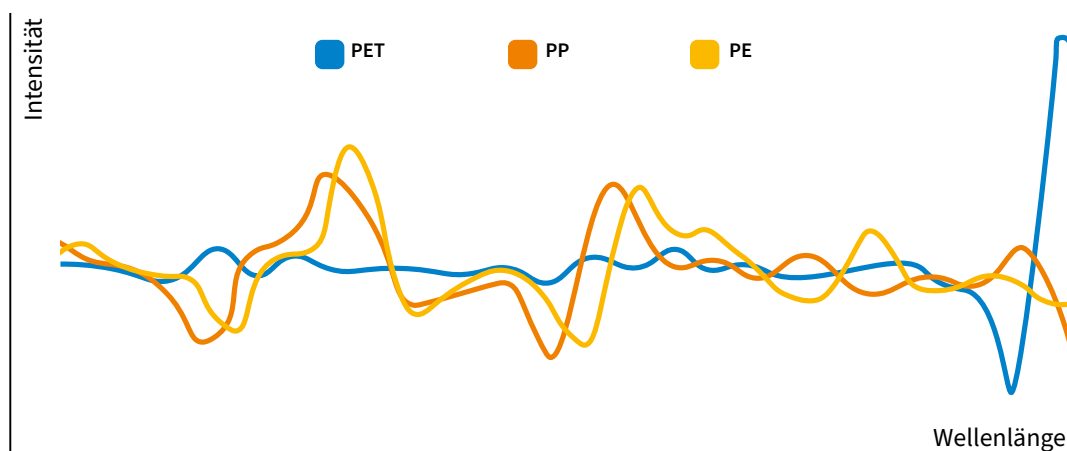
Schön für die Weiterverarbeiter wäre es natürlich, wenn diese Abfälle direkt nach Polymertypen sortiert wären, aber das würde noch einmal eine völlig andere Abfalllogistik erfordern. Und auch eine bessere Kennzeichnung von Produkten, denn welcher Normalverbraucher könnte schon Polypropylen und Polyethylenterephthalat auseinanderhalten?

Aber es gibt Maschinen, die genau das können. Und so können die Weiterverarbeiter den Abfall aus den Gelben Säcken und Gelben Tonnen auf Förderbänder geben und mit Nahinfrarotlicht (NIR) bestrahlen. Eine Kamera erfasst das reflektierte Licht und erkennt an dem, was in diesem Spektrum gegenüber dem eingestrahlt Licht fehlt, aus welchem Kunststoff ein Teil besteht.

Abbildung 7 zeigt die Unterschiede der Polymere im Reflexionsspektrum. Zum Trennen und Sortieren lassen sich einzelne Polymertypen mit einem kurzen Druckluftstoß vom Band in jeweilige Sammelbehälter pusten. Üblicherweise werden insbesondere Polyethylen, Polypropylen und Polyethylenterephthalat auf diese Weise abgetrennt, mitunter auch Polystyrol. Forscher arbei-

ABBILDUNG 7

### Die NIR-Reflexionsspektren der Polymere PE, PP und PET



Quelle: Steinert SCAN HSI-Technologie

ten derzeit an Spektralanalysen, die auch PVC, Polycarbonat, Polyamid, Polymethylmethacrylat und weitere Typen zweifelsfrei erkennen.<sup>6</sup>

Die jeweiligen Polymerfraktionen können dann gesondert weiterverarbeitet werden. Üblicherweise gehen sie, zu Ballen gepresst, von den Sortierfirmen an einen Verarbeiter. Dieser schreddert die Ballen und wäscht die entstandenen Schnipsel, um sie zum Beispiel von Etiketten oder Aufdrucken zu befreien. Das ist chemisch nicht immer einfach, und zum Teil wird auch noch an geeigneten Tensiden gearbeitet, die dabei helfen. Die gereinigten Kunststofflocken können dann wie ein „frisch“ synthetisiertes Polymer in der Produktion eingesetzt werden.

Für alle Kunststoffabfälle, die sich nicht sortenrein abtrennen und weiterverarbeiten lassen, bleibt am Ende nur ein sogenanntes Downcycling. Aus ihnen lassen sich dann zum Beispiel Eimer, Gartenmöbel oder die berühmte Parkbank herstellen.

Eine Polymerklasse, die sich gut recyceln lässt, wenn man sie sortenrein erfasst, sind Polycarbonate. Dabei handelt es sich um ein sehr temperaturstabilen und robustes Polymer, aus dem zum Beispiel CDs und DVDs, Autoscheinwerfergehäuse, Terrassenüberdachungen, große Wasserflaschen (5 L) sowie, in Kombination mit an-

deren Polymeren, auch Computer- und Bildschirmgehäuse gefertigt werden. Im Hausmüll spielt es mengenmäßig eine untergeordnete Rolle und wird darin auch bisher nicht gesondert abgetrennt. Bei geeigneten Sammelstellen abgegeben, lassen sich Polycarbonat-Artikel aber genauso schreddern, waschen, granulieren und wiederverwerten wie etwa Lebensmittelverpackungen oder Shampoo-Flaschen aus PE beziehungsweise PP. Die Industrie arbeitet mit daran, die Infrastruktur für entsprechende Kreisläufe aufzubauen.



## 1.6 Verbundstoffe

Das beschriebene spektroskopisch gesteuerte Trennverfahren funktioniert nicht für Produkte, in denen mehrere Materialien kombiniert werden – sogenannte Verbundmaterialien. Man den-

<sup>6</sup> M. Hinge et al., *Vibrational Spectroscopy*, 2022, 118, 103329  
*Plastic classification via in-line hyperspectral camera analysis and unsupervised machine learning - ScienceDirect*

ke nur an den Saftkarton, dessen mehrschichtige Wände aus Pappe, Aluminium und Polyethylen bestehen (s. Abb. 8). Oder an die handelsübliche Zahnbürste, deren Griff aus Polypropylen ist und deren Borsten aus Polyamid sind. In solchen Fällen bleibt derzeit nur die energetische Verwertung.

Es gibt aber auch Produktentwickler, die an neuen Konzepten arbeiten, bei denen nur ein Material zum Einsatz kommt. So gibt es bereits eine Zahnbürste aus einem einzigen Polymer. Auch Sportschuhe, die komplett aus einem einzigen thermoplastischen Polyurethan gefertigt werden, sind schon auf dem Markt. Ein Hersteller bietet Reißverschlüsse auf Monomaterialbasis. Um solche Konzepte im Verpackungssektor voranzutreiben, gibt es seit 2014 den „Runden Tisch EcoDesign“, der 2019 einen Management-Leitfaden für die Entwicklung von Kunststoffverpackungen herausgab.<sup>7</sup>



## 1.7 Hoffnungsträger chemisches Recycling

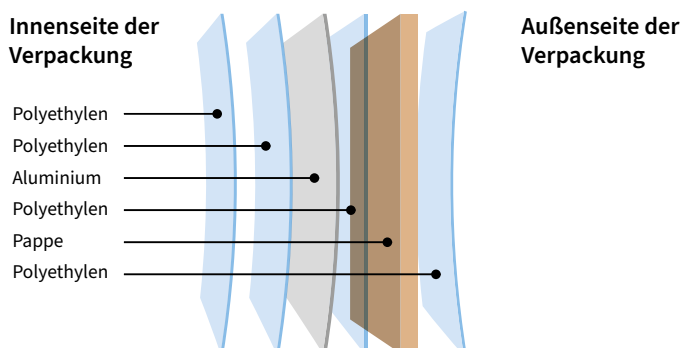
Auch wenn es gegenwärtig das Rückgrat unseres Recyclingsystems ist, stößt das mechanische Recycling in mehrfacher Hinsicht an seine Grenzen, denn damit gelingt es bisher nicht, alle Kunststoffabfälle im Kreislauf zu halten. Große Teile werden noch verbrannt. Außerdem ist mit dem Verfahren häufig ein Downcycling verbunden, das heißt, die Wiederverwertung gelingt nicht, indem gleichwertige Produkte hergestellt werden, sondern indem solche Produkte hergestellt werden, die geringere Anforderungen an den Kunststoff stellen.

Darüber hinaus gibt es Polymertypen, mit denen das klassische mechanische Recycling auch nach sortenreiner Vortrennung nicht möglich ist. So sind etwa viele Polyurethane keine Thermoplaste. Sie lassen sich also nicht einfach granulieren, einschmelzen und neu verarbeiten.

In Zukunft soll das chemische Recycling die mechanischen Verfahren ergänzen. Sobald es Marktreife erlangt, kann es die energetische Verwertung von Kunststoffabfällen spürbar verringern. Noch steht die Forschung am Anfang, und die Wirtschaftlichkeit der Verfahren muss opti-

ABBILDUNG 8

Getränkekartons haben häufig einen mehrlagigen Aufbau



<sup>7</sup> S. dazu auch Website, u. a. mit ersten Praxisbeispielen: <https://ecodesign-packaging.org/der-runde-tisch/> (24.07.2024)

miert werden. Allerdings nimmt die Technologie Fahrt auf. Anfang 2023 wurden weltweit 140 Projekte im Bereich des chemischen Recyclings identifiziert. Grundsätzlich kann das chemische Recycling aber deutliche Vorteile bieten, denn

- Forschungsergebnisse weisen auf die Anwendbarkeit für das Recycling nichtsortenreiner und verunreinigter Kunststoffe-Abfallströme hin und
- es werden Sekundärrohstoffe erzeugt, aus denen sich Kunststoffe in Neuausgangsmaterialqualität synthetisieren lassen.

Chemisches Recycling kann auf verschiedene Weisen erfolgen. Generelles Ziel ist es, die Polymere in ihre Monomere oder andere Basisbausteine zu zerlegen, aus denen sich dann wieder beliebige neue Polymere synthetisieren lassen.

### 1.7.1 Die Pyrolyse

Unter Luftabschluss zerfallen Kunststoffpolymere bei über 300 Grad Celsius mit der Zeit in kürzere Kettenbestandteile, mitunter auch in die Monomere. Dieses Verfahren der Pyrolyse eignet sich für Kunststoffgemische, die sich nicht sortenrein auftrennen oder anderweitig recyceln lassen. Es führt üblicherweise zu einem Öl, dem Pyrolyseöl, das in der Regel aus einem Gemisch unterschiedlich langer Kohlenwasserstoffketten besteht. Dieses Öl lässt sich prinzipiell wie Erdölprodukte behandeln – und kann also einen Teil der herkömmlichen, fossilen Rohstoffe ersetzen. Dementsprechend können daraus zum Beispiel Grundbausteine für die erneute Synthese von Kunststoffen oder andere Grundstoffe für die chemische Industrie gewonnen werden.

Wie sich über die Pyrolysebedingungen die Produktzusammensetzung steuern lässt, ist zum Teil noch Gegenstand der Forschung. Je mehr Kunststoffe mit Halogen-, Schwefel- oder Stickstoffatomen sich im Ausgangsgemisch befinden, desto mehr zusätzliche Abtrennungsschritte sind erforderlich. Bei PVC etwa muss das entstehende Chlor als HCl gebunden und abgetrennt werden. PET-Anteile können zu Terephthalsäure führen, die ebenfalls die Produktqualität senkt. Und je mehr sauerstoffhalti-

ge Polymertypen pyrolysiert werden, desto mehr Wasser bildet sich. Der so gebundene Wasserstoff steht dann nicht für die Kohlenwasserstoffe zur Verfügung. Das kann dazu führen, dass sich mehr ungesättigte Kohlenwasserstoffe oder gar Koks bilden.



Eine weitere Herausforderung für die Pyrolyse von Kunststoffen ist die Zufuhr der benötigten Wärme. Weil Kunststoffe Wärme schlecht leiten, sind hier spezielle Reaktorkonzepte gefragt.

#### ○ INFO FÜR LEHRKRÄFTE

Experiment 1.4:  
Pyrolyse von Polyethen

### 1.7.2 Die Gasifizierung

Eine Alternative zur Pyrolyse ist die Gasifizierung, auch Vergasung genannt. Bei ihr setzt man dem Kunststoffabfallgemisch begrenzte Mengen Sauerstoff (Luft) und Wasserdampf hinzu und erhitzt das Ganze unter hohem Druck auf zum Teil über 1000 Grad Celsius. Dabei werden die Polymerketten in ein Gemisch vor allem aus Wasserstoff ( $H_2$ ), Kohlenmonoxid (CO), Kohlenstoffdioxid ( $CO_2$ ) und Wasser ( $H_2O$ ) zerlegt, also praktisch in Synthesegas. Sind Kunststoffe wie PVC oder Polyurethane im Spiel, die auch Chlor oder Stickstoff enthalten, werden diese in Chlorwasserstoff (HCl) und Ammoniak ( $NH_3$ ) überführt, die wiederum über geeignete Waschschritte abgetrennt werden können.

Prinzipiell sind mit dem Synthesegas eine ganze Reihe chemischer Grundstoffe und letztlich auch wieder Monomere für die Kunststoffsynthese zugänglich, so dass dieses Verfahren durchaus das Potenzial hat, Kohlenstoff im Kreislauf zu führen. Der Prozess bietet eine

Reihe von Vorteilen, ist aber auch nicht frei von Herausforderungen und daher bisher im Industriemaßstab noch nicht verbreitet. Diverse Unternehmen tüfteln aber an dem Prozess.

### INFO FÜR LEHRKRÄFTE

Arbeitsblatt 1.3:  
Herstellung von Methanol aus Kunststoffabfällen

#### 1.7.3 Die Chemolyse/Solvolyse

Bei der Chemolyse versucht man, die langen Polymermoleküle chemisch zu spalten und im besten Falle wieder in die Ausgangsmomere zu zerlegen. Üblicherweise geschieht dies mittels eines geeigneten Lösungsmittels, eines Katalysators, Wärme und mitunter auch unter erhöhtem Druck.

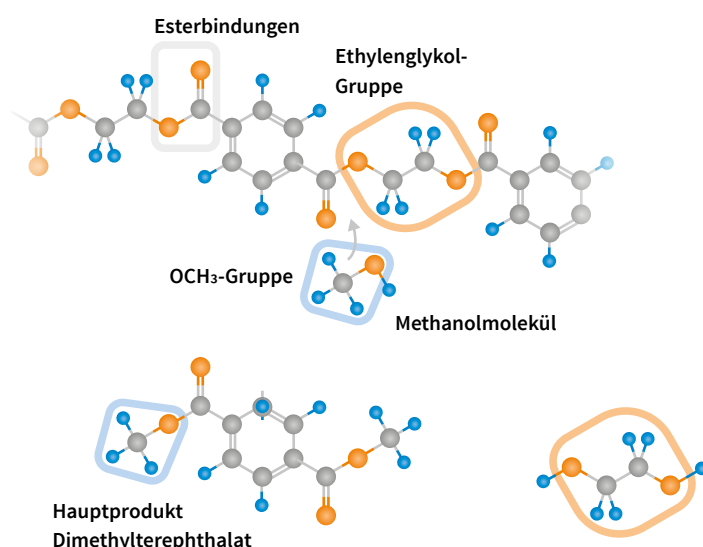
Man kann sich gut vorstellen, dass das am besten mit Polymeren funktioniert, die im Rahmen einer Polykondensation entstehen, also unter Abspaltung von Wasser. Das sind also zum Beispiel Polyamide und Polyester, aber eben nicht Polyolefine wie PE und PP. In der industriellen Praxis spielt die Chemolyse von PET bereits eine Rolle – und kann zum Beispiel

dort zum Einsatz kommen, wo PET-Müll zu verunreinigt für ein direktes Wiederverwerten ist. Genauer handelt es sich dabei um eine Methanolyse, denn die PET-Polymerketten werden mit Methanol und einem Katalysator aufgebrochen, wobei sich Ethylenglykol abspaltet und stattdessen Methylgruppen an die Terephthal-säure anlagern und Dimethylterephthalat (DMT) bilden (Abb. 9). Beide Substanzen lassen sich nun wieder in neue chemische Synthesen einspeisen, auch in die von neuem (reinem) PET.

Auch bei Polyurethanen laufen Versuche, die Polymere per Chemolyse in Polyole und Amine zu zerlegen. Aus Letzteren könnten dann wieder Isocyanate gewonnen werden, und damit die, neben den Polyolen, zweite wichtige Ausgangskomponente für die erneute Polyurethanherstellung. Derzeit widmet sich ein von der EU gefördertes Projekt dem Ziel, ausgediente Matratzen aus Polyurethan-Weichschaum einem solchen Recycling-Verfahren zu unterziehen.<sup>8</sup> Bei Polyamiden (PA) gibt es ebenfalls Ansätze für ein chemisches Recycling. Das ist unter anderem dort interessant, wo PA im Verbund mit anderen Komponenten eingesetzt wird, etwa in carbon- oder glasfaserverstärkten PA-Anwendungen.

### ABBILDUNG 9

#### Solvolyse von Polyethylenglycolterephthalat mittels Methanol



#### Methanolyse

PET wird mit Methanol und Natriummethylat versetzt. Dabei werden die Esterbindungen im PET-Kettenmolekül aufgespalten und die Ethylenglykol-Gruppen durch OCH<sub>3</sub>-Gruppen ersetzt.

#### Reaktionsprodukte

Das Hauptprodukt der PET-Methanolyse ist der kristalline Feststoff Dimethylterephthalat (DMT), das Nebenprodukt der flüssige zweiwertige Alkohol Ethylenglykol (EG).

### INFO FÜR LEHRKRÄFTE

Arbeitsblatt 1.4:  
Chemische Depolymerisation – Solvolyse  
Experiment 1.5:  
Hydrolyse von Polyethylenterephthalat

## 1.8 Sind biobasierte und bioabbaubare Kunststoffe eine Lösung?

Derzeit sind praktisch alle bedeutenden Kunststoffe erdölbasiert. Neben dem Bestreben, für die so produzierten Polymere möglichst eine Kreislaufwirtschaft zu etablieren, kann man auch versuchen, Kunststoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe herzustellen. Selbst wenn solche biobasierten Kunststoffe im Anschluss an ihre Nutzung verbrannt würden, wäre dieser Weg – zumindest was das Material angeht – immerhin auch CO<sub>2</sub>-neutral; den Energieaufwand für die Gewinnung müsste man dabei jedoch gesondert betrachten. In jedem Fall sind biobasierte Kunststoffe ein fester Bestandteil zur Entkopplung der Kunststoffproduktion von fossilen Ressourcen – neben der Nutzung von Rezyklaten und CO<sub>2</sub> als Rohstoff (Carbon Capture and Utilization, CCU).

Kunststoffe können auch bioabbaubar sein. Bioabbaubare Kunststoffe werden heute in erster Linie aus Stärke, Polymilchsäure (PLA) und Cellulose hergestellt. Sie spielen zum Beispiel bei der Produktion von Lebensmittelverpackungen eine Rolle. Allerdings ist die Haltbarkeit der Lebensmittel eingeschränkt,

da die Barriereigenschaften von bioabbaubaren Kunststoffen gegenüber Wasserdampf und Gasen unzureichend sind.

Wie aus nachwachsenden Rohstoffen Biopolymere werden, sei hier am Beispiel der Polymilchsäure dargestellt. Unmittelbarer Ausgangsstoff für die PLA-Synthese ist das ringförmige Lactid, das sich wiederum durch Fermentation aus Glukose darstellen lässt (Abb. 10).

### INFO FÜR LEHRKRÄFTE

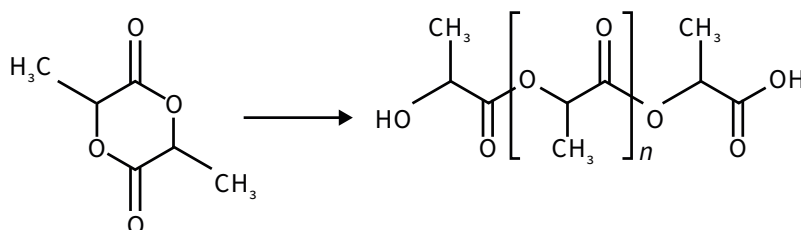
Experiment 1.6:  
Herstellen eines Kunststoffs aus Milchsäure

Darüber hinaus arbeiten viele Kunststoffhersteller daran, nachwachsende Rohstoffe in bestehenden Polymersynthesen einzubeziehen. Zum Beispiel laufen Versuche, den Polyamid-Rohstoff Adipinsäure biotechnologisch mithilfe funktionalisierter Mikroorganismen aus Lignin zu gewinnen.

Aber Vorsicht: Nachwachsende Rohstoffe mögen die Nachhaltigkeit von Syntheseprozessen verbessern. Doch nicht immer bedeutet der biobasierte Ansatz auch, dass die daraus gewonnenen Polymere biologisch abbaubar sind. Polymilchsäureprodukte etwa benötigen für ihre Zersetzung bestimmte Bedingungen, wie sie in einer Kompostieranlage herrschen. Einfach so in die Umwelt geworfen würde ein Getränkebecher aus Polymilchsäure Monate brauchen, um zu verrotten.

### ABBILDUNG 10

#### Polymilchsäure aus Lactid



Darüber hinaus suchen die Kunststoffherzeuger nach weiteren Wegen, fossile Energieträger durch alternative Rohstoffe zu ersetzen. So ist es bereits an verschiedenen Stellen etwa bei der Matratzen- oder Verpackungsherstellung gelungen, CO<sub>2</sub> als Polymer-Baustein einzusetzen.

In Deutschland werden derartige EU-Vorgaben in diversen Gesetzen umgesetzt, etwa dem Kreislaufwirtschaftsgesetz oder dem Verpackungsgesetz. Letzteres sieht für Verpackungskunststoffe seit 2022 eine Recyclingquote von 63 Prozent vor.

## 1.9 Der gesetzliche Rahmen

Auch die Politik nimmt Einfluss auf das Marktgeschehen. Seit Juli 2021 etwa dürfen etliche Wegwerfartikel wie Trinkhalme, Getränkebecher, Umrührstäbchen, Einweggeschirr und Fast-Food-Verpackungen in der Europäischen Union nicht mehr aus Kunststoff bestehen. Seit Anfang 2022 fallen auch Einkaufstüten unter dieses Verbot. Darüber hinaus gilt seit Januar 2024 Pfandpflicht für Einwegkunststoffgetränkeflaschen, in denen Milcherzeugnisse abgefüllt sind.

Die entsprechende EU-Richtlinie für Einwegkunststoffe verlangt, dass 77 Prozent aller Kunststoffflaschen bis 2025 getrennt gesammelt werden. 2029 sollen es dann 90 Prozent sein. Zugleich muss der Anteil von Rezyklat bei der Herstellung neuer PET-Flaschen bis 2025 bei 25 Prozent und bis 2030 bei 30 Prozent liegen.<sup>9</sup>

Einen weiteren Rahmen setzen die 2018 von der Europäischen Kommission entworfene Kunststoffstrategie<sup>10</sup> und die EU-Richtlinie für Verpackungen und Verpackungsabfälle.<sup>11</sup> Derzeit (Stand November 2023) befindet sich die Nachfolgeverordnung der letztgenannten Richtlinie im Gesetzgebungsprozess. Demnach müssen ab 2030 alle in der EU in Verkehr gebrachten Verpackungen recyclingfähig sein. Weiterhin werden anspruchsvolle Ziele für den Rezyklateinsatz in Kunststoffverpackungen festgeschrieben.

## 1.10 Ohne Kunststoffe geht es nicht

Nicht umsonst haben Kunststoffe sich in so vielen Anwendungen als Material der Wahl durchgesetzt. Sie sind leicht und relativ bruchfest, wahlweise transparent oder bunt, weich oder hart und einfach extrem vielseitig. Das geringe Gewicht hilft, Kraftstoff bei der Fortbewegung zu sparen. So benötigt etwa der Transport von Plastikgetränkeflaschen oder auch Getränkekartons weniger Treibstoff als der von Glasflaschen. Beim Boeing-Modell 787, auch als Dreamliner bekannt, helfen carbonfaserverstärkte Kunststoffe in der Rumpfkonstruktion dabei, rund 20 Prozent Gewicht einzusparen. Die Folge: weniger Kerosinverbrauch – und damit auch weniger CO<sub>2</sub>-Emissionen. Auch in anderer Hinsicht sind Kunststoffe wichtige Wegbereiter beim Klimaschutz, etwa als Materialien für den Bau von Windrädern und Photovoltaikmodulen.



<sup>9</sup> Einwegplastik: EU-Staaten geben grünes Licht für neue Regeln, [https://germany.representation.ec.europa.eu/news/einwegplastik-eu-staaten-geben-grunes-licht-fur-neue-regeln-2019-05-21\\_de](https://germany.representation.ec.europa.eu/news/einwegplastik-eu-staaten-geben-grunes-licht-fur-neue-regeln-2019-05-21_de) (01.10.2024)

<sup>10</sup> Kommission legt europäische Plastikstrategie vor [https://germany.representation.ec.europa.eu/news/kommission-legt-europaische-plastikstrategie-vor-2018-01-16\\_de](https://germany.representation.ec.europa.eu/news/kommission-legt-europaische-plastikstrategie-vor-2018-01-16_de) (01.10.2024)

<sup>11</sup> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0852&from=DE> (01.10.2024)

Auch Medizin und Gesundheitswesen sind ohne Kunststoffe nicht mehr denkbar. Egal ob als feine Schläuche für Herzkatheter, als biokompatible Implantatmaterial oder als Beutel für die Blutspende – immer sind Kunststoffe im Einsatz. Und weil keine Materialklasse ähnlich vielfältig ist, kommen immer wieder neue und innovative Anwendungen hinzu.



Umso wichtiger ist es, Kunststoffe so effizient und lange wie möglich im Kreis zu führen, damit sie nach ihrer Nutzung wieder zu neuen Produkten werden. Ein Ausbau der Kreislaufwirtschaft setzt Offenheit für neue Technologien wie das chemische Recycling voraus.

### 1.11 Ausblick

Es ist klar: Das Recycling von Kunststoffabfällen ist besser als die bisher dominierende energetische Verwertung. Viele Akteure sind dabei, die Ansätze für das chemische Recycling weiterzuentwickeln und Lösungen zu etablieren. Damit das in so vielen Anwendungsfällen wie möglich funktioniert, muss sich aber auch auf Herstellerseite noch

einiges ändern. Je sortenreiner Produkte sind, desto einfacher lassen diese sich nach der Nutzung recyceln. Und wenn der Einsatz von Verbundwerkstoffen aus mehreren Kunststoffarten nötig ist, dann im besten Fall so, dass sich diese am Lebensende des Produkts wieder trennen lassen. Hier wird das EcoDesign an Bedeutung gewinnen, also die Gestaltung neuer Produkte vor dem Hintergrund der Funktionalität und der Wiederverwertbarkeit der eingesetzten Materialien.

Und noch etwas ist wichtig: eine bessere Kennzeichnung von Produkten hinsichtlich der in ihnen verarbeiteten Kunststofftypen. Und auch den Verbrauchern in Industrie und Privathaushalten kommt eine wichtige Funktion zu: Sie sind es, die eine geeignete Entsorgung der Produkte sicherstellen müssen. Nur was korrekt gesammelt und in die richtigen Stoffströme eingespeist wird, kann auch optimal wiederverwendet werden. Sie sind es auch, die durch Änderung ihrer Verhaltensweisen dazu beitragen, dass die Wegwerfmentalität überwunden wird.

Mit diesen Maßnahmen werden sich Kunststoffe freilich nicht kurzfristig zu 100 Prozent im Kreislauf führen lassen. Noch für einige Zeit wird auch die Neuproduktion von Polymeren notwendig sein, um den Bedarf zu decken. Dabei gilt es, an so vielen Stellen wie möglich die bisher üblichen fossilen Rohstoffe durch natürlich nachwachsende zu ersetzen. Einen Beitrag kann zum Beispiel das Pyrolyse-Öl aus dem chemischen Recycling gemischter, nicht-sortenreiner Kunststoffe leisten. Es gilt, den Bedarf an Erdöl so stark zu reduzieren wie nur möglich.



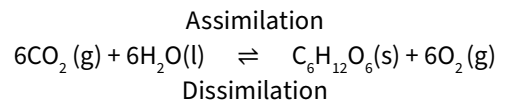
### Treibhausgas und Rohstoff für die chemische Industrie

Die fortschreitende Erwärmung der Erdatmosphäre bringt große Gefahren für die ökologischen Gleichgewichte auf der Erde mit sich. Starkregen mit Überschwemmungen wechseln sich mit heißen und trockenen Perioden ab und bedrohen die Zivilisation in vielen Ländern der Erde, auch bei uns in Mitteleuropa.

Vor wenigen Jahrzehnten waren es noch die begrenzten Vorkommen von Öl und anderen fossilen Energieträgern, die die Forderung nach einer Erneuerung von Energienutzung und Energieversorgung und auch unserer Ernährungsgewohnheiten begründeten.

Als weitaus dringlicher wird heute die Notwendigkeit gesehen, die mit der zunehmenden Erwärmung der Atmosphäre einhergehenden schlagartigen Klimaveränderungen im komplexen System Erde zu stoppen (Abb. 11). Es sind die vom Menschen verursachten Treibhausgasemissionen, die diese globale Herausforderung verursachen.<sup>12</sup>

Kohlenstoffdioxid stellt einen wichtigen Bestandteil des Kohlenstoffkreislaufes auf der Erde dar. Es ist am natürlichen Gleichgewicht aus Photosynthese der grünen Pflanzen (Assimilation) und Zellatmung der allermeisten Lebewesen (Dissimilation) beteiligt und damit für das Leben auf der Erde von zentraler Bedeutung.



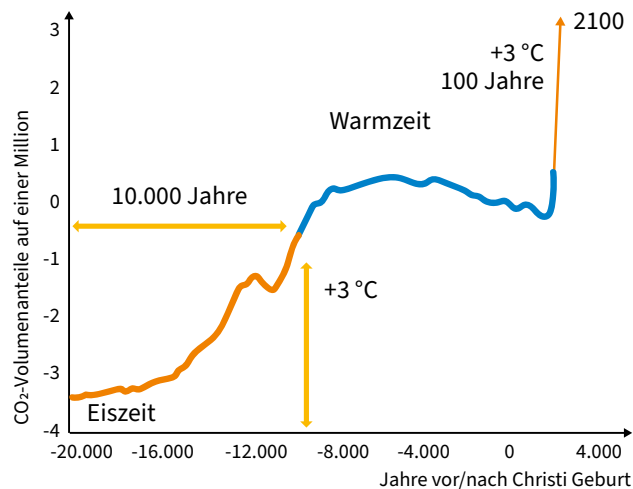
Allerdings wird dieses Gleichgewicht durch die Verbrennung fossiler Energieträger (Kohle, Erdöl, Erdgas), durch den wachsenden Energiebedarf in Haushalten, Verkehr und in der industriellen Produktion sowie durch Veränderungen der Landnutzung - vor allem der Entwaldung - zunehmend gestört. Es gelangt deutlich mehr Kohlenstoffdioxid in die Atmosphäre als ihr durch die globale Photosyntheseleistung entzogen werden kann.

#### INFO FÜR LEHRKRÄFTE

Die Experimente 2.1 • 2.3 veranschaulichen die Auswirkung der Temperatur, des Drucks und des pH-Wertes auf die Aufnahmekapazität der Ozeane für CO<sub>2</sub>.

#### ABBILDUNG 11

Globaler Temperaturverlauf seit der letzten Eiszeit vor 20.000 Jahren bis 2100 bei aktuellem Trend (RAHMSTORF, 2013)



<sup>12</sup> IPCC (2021). Klimawandel 2021 – Sechster Sachstandsbericht- Naturwissenschaftliche Grundlagen [https://www.de-ipcc.de/media/content/Hauptaussagen\\_AR6-WGI.pdf](https://www.de-ipcc.de/media/content/Hauptaussagen_AR6-WGI.pdf) (01.10.2024)

## 2.1 Treibhausgase in der Atmosphäre

Die internationale Staatengemeinschaft beschloss im Jahr 1992 ein globales Klimaschutzabkommen. Bisher (2023) haben 197 Vertragsparteien inklusive der EU die Klimarahmenkonvention ratifiziert und damit eine völkerrechtliche Basis für den weltweiten Klimaschutz geschaffen.<sup>13</sup>

1997 wurde in Kyoto ein Zusatz zur Klimarahmenkonvention aufgenommen, in dem erstmals rechtsverbindliche Minderungsverpflichtungen für die Industrieländer enthalten waren. Die Vertragsstaaten einigten sich 2015 im Übereinkommen von Paris auf das völkerrechtlich verbindliche Ziel, den Anstieg der globalen Mitteltemperatur auf deutlich unter 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Temperaturniveau zu begrenzen. Die Obergrenze von 1,5 °C soll angestrebt werden.

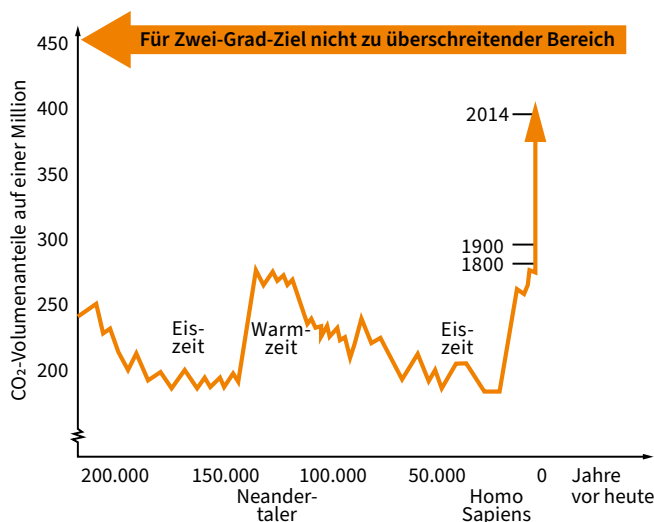
Es sind vor allem sechs Treibhausgase, die die Erwärmung der Erde verursachen: Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>) und Lachgas (N<sub>2</sub>O) sowie die fluorierten Treibhausgase (F-Gase): wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW), perfluorierte Kohlenwasserstoffe

(FKW) und Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>). Seit 2015 wird Stickstofftrifluorid (NF<sub>3</sub>) zusätzlich einbezogen, das hauptsächlich bei Industrieprozessen ausgestoßen wird, zum Beispiel bei der Produktion von Flachbildschirmen und Solarzellen. Diese treibhauswirksamen Bestandteile der Atmosphäre können durch Anwendung der sogenannten GWP-Werte (Global Warming Potential) normiert und verglichen werden. Beispielsweise beträgt das GWP für Methan bei einem Zeithorizont von 100 Jahren 28: Das bedeutet, dass ein Kilogramm Methan innerhalb der ersten 100 Jahre nach der Freisetzung 28-mal so stark zum Treibhauseffekt beiträgt wie ein Kilogramm CO<sub>2</sub>.

In Deutschland entfallen 87,1 Prozent des durch Freisetzung von Treibhausgasen erzeugten Klimaeffektes auf Kohlenstoffdioxid, 6,5 Prozent auf Methan, 4,6 Prozent auf Lachgas und rund 1,7 Prozent auf die F-Gase (2020).<sup>14</sup> Pro Tag werden durch menschliche Aktivitäten ca. 100 Millionen Tonnen Kohlenstoffdioxid in die Atmosphäre emittiert. Trotz seiner geringen Konzentration von derzeit ca. 0,04 Prozent stellt der zunehmende Anteil von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre die zentrale Ursache für den Klimawandel dar (Abb. 12).

ABBILDUNG 12

CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre in den letzten 250.000 Jahren



Quelle: Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages (Hrsg.): Mehr Zukunft für die Erde, *Economica* 1995, S. 13, aktuell ergänzt.

<sup>13</sup> <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/klimarahmenkonvention> (03.06.2024)

<sup>14</sup> <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase> (23.07.2024)

### INFO FÜR LEHRKRÄFTE

- Arbeitsblatt 2.1:  
Der Strahlungshaushalt der Erde und der Treibhauseffekt
- Arbeitsblatt 2.2:  
Der Kohlenstoffkreislauf
- Arbeitsblatt 2.3:  
Kippelemente
- Experiment 2.4:  
Modellexperiment zum Bau eines Treibhauses

Mit dem steigenden Treibhausgasgehalt verändert die Menschheit demnach schlagartig einen Parameter der Erdatmosphäre, von dem viele andere Variablen des Systems Erde direkt oder indirekt über andere betroffene Faktoren abhängen.

## 2.2 Rohstoff für die chemische Industrie

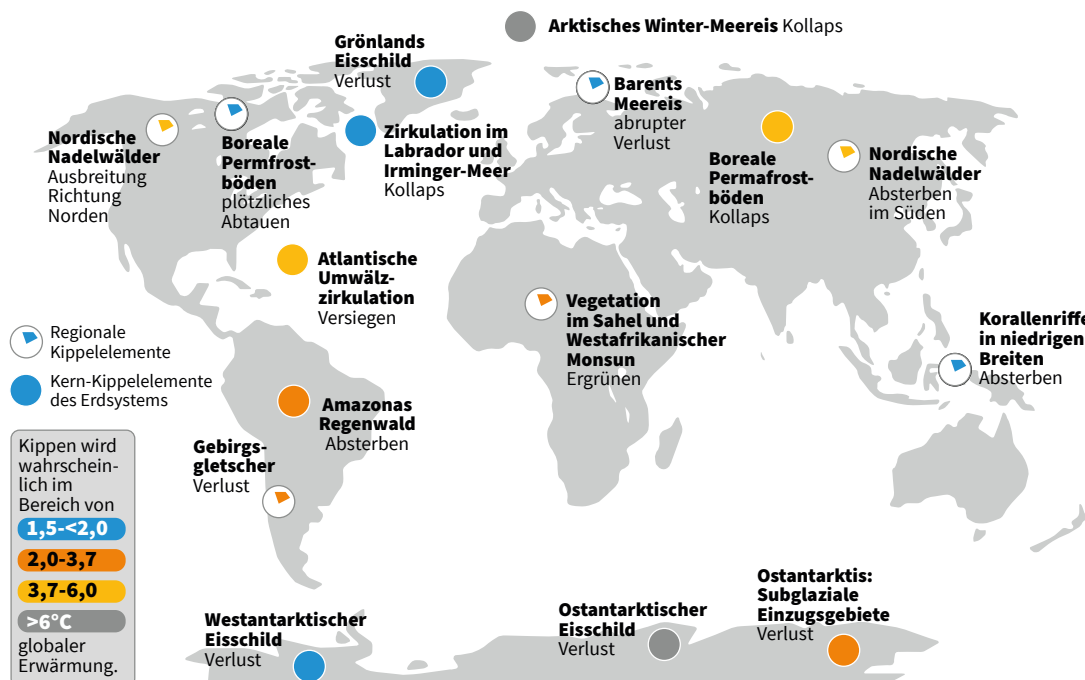
Die Beschlüsse der Klimarahmenkonferenz bedeuten umgerechnet nicht weniger, als dass von den derzeit bekannten wirtschaftlich nutzbaren fossilen Energievorräten an Kohle, Erdgas und Erdöl mehr als zwei Drittel gar nicht verbrannt werden dürfen.

Alle Staaten sind angehalten, die Emission von CO<sub>2</sub> deutlich zu reduzieren. So hat Deutschland sich verpflichtet, die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 stufenweise um 80 bis 95 Prozent zu reduzieren (bezogen auf das Basisjahr 1990). Die Europäische Union hat sich diesen Zielen angeschlossen. Europa soll bis 2050 klimaneutral werden.

In Deutschland hat die Bundesregierung mit dem Programm „Forschung und Innovation für die Menschen – Die Hightech-Strategie 2025“ ein Maßnahmenpaket auf den Weg gebracht.<sup>15</sup>

### ABBILDUNG 13

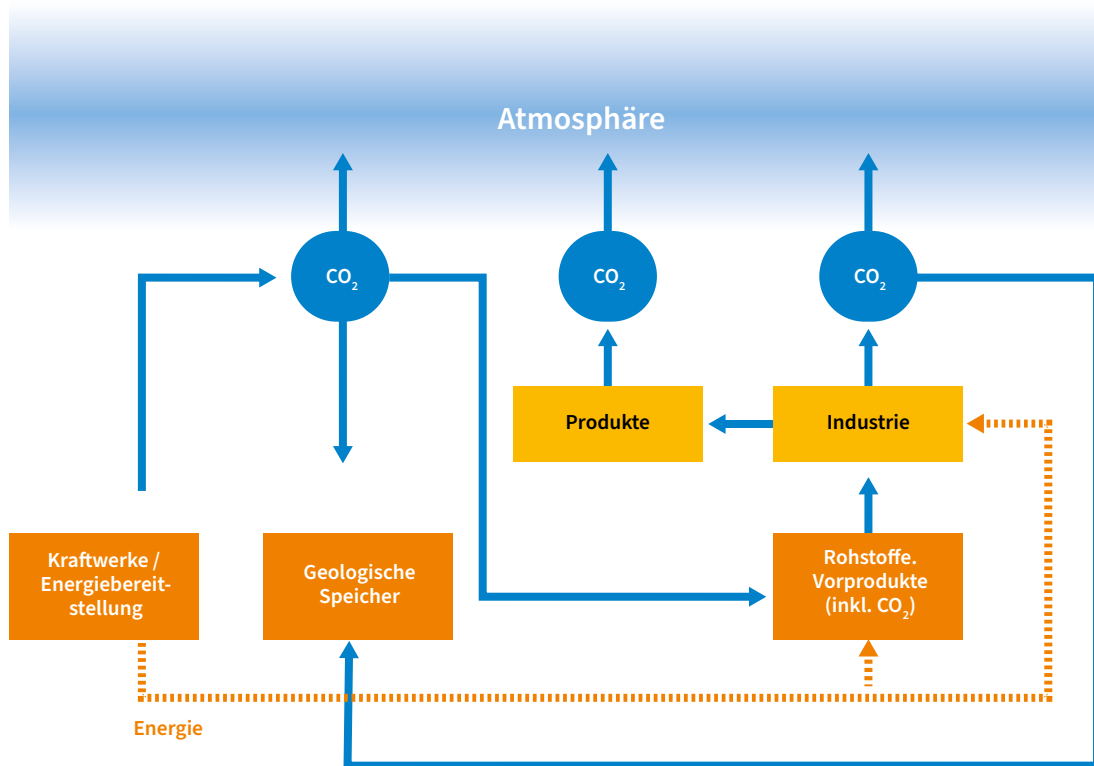
#### Kippelemente – Achillesfersen im System-Erde-Klima



Quelle: Potsdam Instiut für Klimafolgenforschung 2015

<sup>15</sup> Bundesregierung, D. (2019). *Forschung und Innovation für die Menschen. Die Hightech-Strategie 2025.*

Schematische Darstellung von CO<sub>2</sub>-Emission, -Abscheidung und -Speicherung sowie stofflicher Nutzung von CO<sub>2</sub><sup>16</sup>



Es soll untersucht werden, in welcher Weise Rohstoffeffizienz und Aspekte der Kreislaufwirtschaft wesentliche Beiträge für ein nachhaltiges Wirtschaften und eine klimaschonende Energiebereitstellung leisten können.

Die Gesamtstrategie für das CO<sub>2</sub>-Management beruht auf den drei Elementen Vermeidung, Speicherung (CCS = Carbon Capture and Storage) und stoffliche Verwertung (CCU = Carbon Capture and Utilization).

Jede Maßnahme zur Speicherung oder Verwertung von CO<sub>2</sub> erfordert Energie und trägt bei den aktuellen Energiebereitstellungsverfahren zur zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Freisetzung bei. Daher hat die Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen oberste Priorität und Vorrang vor allen Maßnahmen zur Speicherung und Verwertung. Allerdings stellt die Speicherung von CO<sub>2</sub> nur eine Übergangslösung dar. Vielmehr sollte CO<sub>2</sub> wo immer möglich nicht als „Abfall“ gelagert, sondern als „chemischer Baustein“ zur Herstellung von höherwertigen Produkten wie Kunststoffen genutzt werden.

INFO FÜR LEHRKRÄFTE

Arbeitsblatt 2.4:  
Carbon Capture and Storage

<sup>16</sup> Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Berlin (2010). Weltweite Innovationen bei der Entwicklung von CCS-Technologien und Möglichkeiten der Nutzung und des Recyclings von CO<sub>2</sub>. Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment Band / Volume 60 [https://user.fz-juelich.de/record/9640/files/EnergieUmwelt\\_60.pdf](https://user.fz-juelich.de/record/9640/files/EnergieUmwelt_60.pdf) (03.07.2024)

## 2.3 Bereitstellung von CO<sub>2</sub>

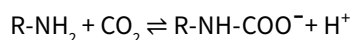
Der Einsatz von CO<sub>2</sub> in einem chemischen Produktionsprozess setzt meist voraus, dass dieses Gas in hoher Reinheit zur Verfügung steht. Die chemische Industrie hat hierfür verschiedene Varianten entwickelt. Im Folgenden sollen zwei Verfahren erläutert werden.

### 2.3.1 Aminwäsche

Eine häufig genutzte Variante für die CO<sub>2</sub>-Abtrennung im großtechnischen Maßstab ist die Aminwäsche. Sie wird eingesetzt, um CO<sub>2</sub> aus Abgasen abzutrennen, wie sie zum Beispiel bei der Ammoniaksynthese, in Kraftwerken oder etwa bei der Zementproduktion entstehen. Das Verfahren beruht auf dem Prinzip der Chemisorption und nutzt die temperatur- und druckabhängigen Absorptions- und Desorptionsprozesse von CO<sub>2</sub> an ausgewählten Aminverbindungen.

Als Absorptionsmittel für die CO<sub>2</sub>-Wäsche werden dabei leicht alkalische wässrige Lösungen von Aminen eingesetzt, zum Beispiel Ethanolamin-Derivate. Das Amin ist in der Lage, das CO<sub>2</sub>

bei leicht erhöhtem Druck bei ca. 40 °C im Absorber reversibel zu binden.

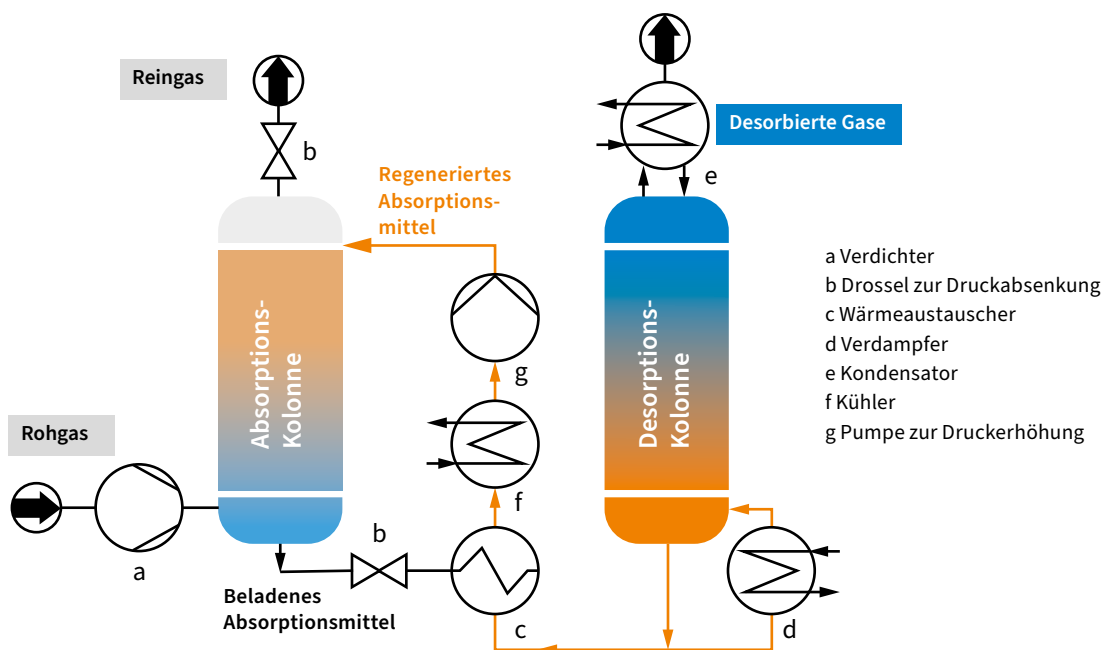


Das von CO<sub>2</sub> weitgehend befreite Reingas verlässt die Kolonne am Kopf, und das beladene Waschmittel (Aminlösung) gelangt in den Desorber, wo sich das chemische Gleichgewicht bei hoher Temperatur und niedrigem Druck umkehrt, CO<sub>2</sub> wird desorbiert. Nachdem das Gas im Kondensator von Restflüssigkeiten befreit worden ist, steht es für weitere Verwendungen zur Verfügung.

Da der Prozess der aminbasierten CO<sub>2</sub>-Wäsche vergleichsweise energieaufwendig ist, sind für bestimmte Anwendungen weitere Verfahren in der Entwicklung, die den Energieeinsatz bei großtechnischer Realisierung der CO<sub>2</sub>-Abtrennung sowie der Speicherung und Verwertung dieses Gases in zuverlässiger und ökonomisch vertretbarer Weise verringern sollen. Ein Beispiel ist das Chemical-Looping-Combustion-Verfahren (CLC).

ABBILDUNG 15

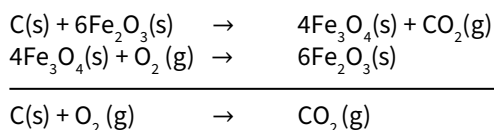
Absorptionsanlage für die Gaswäsche<sup>17</sup>



<sup>17</sup> Arno Behr, David W. Agar, Jakob Jörissen & Andreas J. Vorholt (2010). Einführung in die Technische Chemie. Spektrum, S. 95

### 2.3.2 Das CLC-Verfahren

Die Chemical-Looping-Combustion (CLC) ist eine recht junge und elegante chemietechnologische Entwicklung, bei der das Potenzial besteht, den Energieaufwand zur Abtrennung von CO<sub>2</sub> deutlich zu reduzieren.<sup>18</sup> Das Prinzip des Verfahrens beeindruckt dadurch, dass der Brennstoff, zum Beispiel Kohle oder Erdgas, in keinen direkten Kontakt mit der Luft gerät. Dies wird erreicht, indem als Oxidationsmittel für den Brennstoff ein hochoxidiertes Metalloxid als Sauerstofflieferant eingesetzt wird; in Abbildung 16 ist das Verfahren schematisch dargestellt: Das reduzierte Metall wird in einen zweiten Reaktor (Luftreaktor) überführt und mit einem Luft-/Dampf-Gemisch reoxidiert, bevor es wieder in den Brennstoffreaktor zurückgeführt wird und der Kreislauf sich schließt. Als Beispiel sei der Vorgang für die Verbrennung von Kohle mit Eisenoxiden als Redoxsystem angegeben.



Die Isolierung des Brennstoffs von der Luft verringert die Anzahl möglicher chemischer Reaktionen bei der Verbrennung. So eliminiert der Einsatz von Sauerstoff ohne Stickstoff und die in der Luft vorkommenden Spurengase die Hauptquelle für die Bildung von Stickoxiden (NO<sub>x</sub>), und es wird ein Rauchgas erzeugt, das hauptsächlich aus Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf besteht.

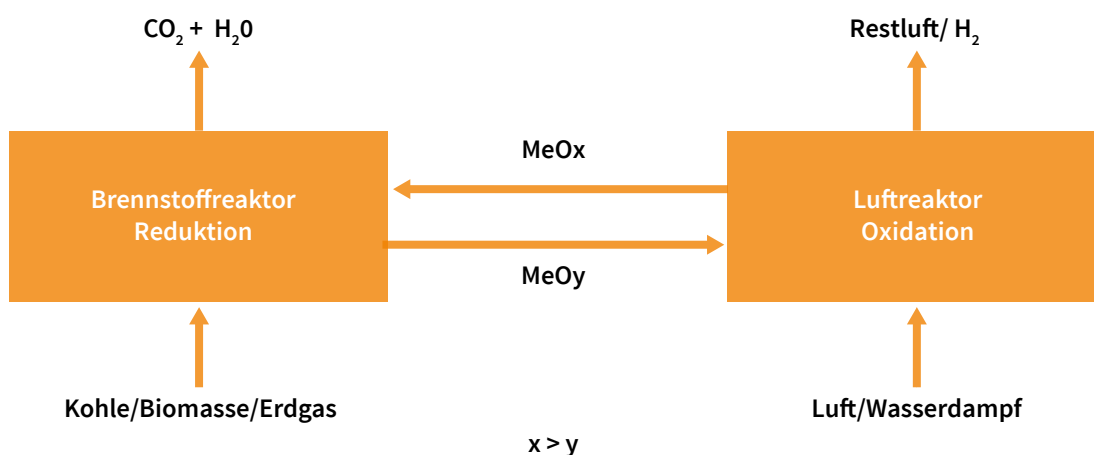
Auf diese Weise kann das CO<sub>2</sub> in guter Reinheit gewonnen und weiteren Verwendungszwecken zugeführt werden. Derzeit ist das Verfahren noch im Entwicklungsstadium. Eine Herausforderung stellen die Bereitstellung stabiler Redoxsysteme und deren Belastungsgrenzen dar.

### 2.4 Kohlenstoffquellen in der chemischen Synthese

Die intelligente Nutzung von Ressourcen ist für die deutsche chemische Industrie von besonderer Bedeutung. Sie beliefert einen großen Teil der verarbeitenden Industrie mit Vorprodukten und ist damit eine wichtige Basis der deutschen Wirtschaft und ihrer weiteren Entwicklung. Es verwundert nicht, dass die chemische Industrie

ABBILDUNG 16

Schematische Darstellung des CLC-Verfahrens



<sup>18</sup> Verändert nach: [https://en.wikipedia.org/wiki/Chemical\\_looping\\_combustion](https://en.wikipedia.org/wiki/Chemical_looping_combustion) (26.06.2024)

ABBILDUNG 17

### Zielprodukte CO<sub>2</sub>-basierter Synthesen<sup>19</sup>

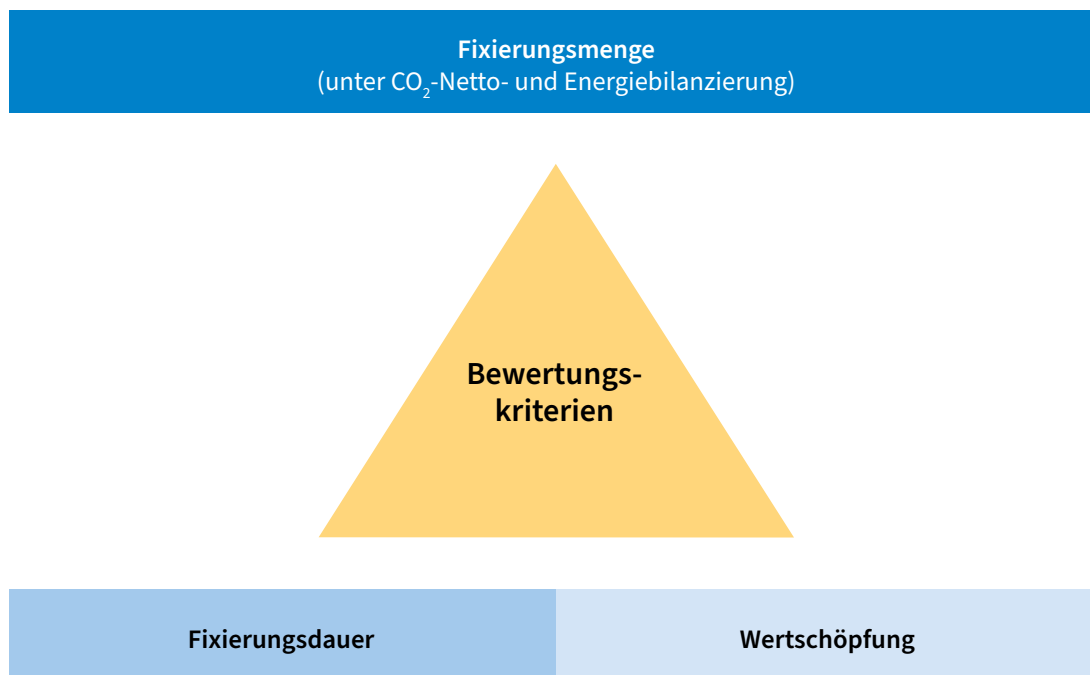
Methanol	Ameisensäure	Cyklische Carbonate	Anorganische Carbonate	Organische Carbonate
Essigsäure Ethylen, Propylen Polymer-Vorprodukte DME Treibstoffe	Konservierungsstoffe Klebstoffe Vorprodukte Brennstoff für Brennstoffzellen	Lösungsmittel Elektrolyte für Lithium-Ionen-Batterien Zwischenprodukte für die Polymer-synthese	Mineralfüllstoffe Zement/Beton Bodenverfestigung	Pestizid Polymer-Vorprodukte Isocyanat-Vorprodukte Agrochemikalien Konservierungsstoffe Kosmetika
<b>DME</b>				<b>Organische Säure</b>
Kraftstoffzusätze LPG-Substitut				Tenside Nahrungsmittel-ergänzung Pharmazie
<b>Aldehyde</b>				<b>Salicylsäure</b>
Polymere Lösungsmittel Farbstoffe Parfüme Inhaltsstoffe für Kosmetika				Aspirin
<b>Kommerziell</b>	<b>Alkohole</b>	<b>Harnstoff</b>	<b>Poly(propylen)carbonat</b>	<b>Polycarbonat-etherole</b>
<b>Labormaßstab</b>	Lösemittel Waschmittel	Düngemittel Kunstharze	Verpackungen Folien	Polyurethan-schäume
<b>Demonstration</b>				

zur nachhaltigen Sicherung der Rohstoffbasis bereits seit vielen Jahrzehnten auf die Nutzung von CO<sub>2</sub> als Rohstoff setzt und dafür die Entwicklung neuer Technologien und Verfahren vorantreibt (Abb. 16). Allerdings werden von den jährlich ca. 630 Millionen Tonnen anthropogener CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland (2020) bislang erst weniger als 0,5 Prozent einer stofflichen Nutzung zugeführt. Es ist davon auszugehen, dass die Potenziale zur Effizienzsteigerung und Kostensenkung bei den Verfahren noch nicht ausgeschöpft sind und der Umfang der stofflichen Nutzung von CO<sub>2</sub> deutlich zunehmen wird.<sup>20</sup>

Unter dem Gesichtspunkt des Klimaschutzes gilt es, die prinzipiell vorhandenen Zugänge zur CO<sub>2</sub>-Verwendung unter drei Gesichtspunkten zu betrachten. Die Fixierungsmenge ist dabei unter energetischen Aspekten sowie unter der Netto-CO<sub>2</sub>-Bilanz zu berücksichtigen. Die Fixierungsdauer ist grundsätzlich produktabhängig. So kann die Verwendung von CO<sub>2</sub> zur Herstellung von Kraftstoffen eine signifikante Reduzierung der mobilitätsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen bedeuten, wenn zur Herstellung „grüner Wasserstoff“ verwendet wird. Dies gilt in einem funktionierenden Stoffkreislauf unter Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen auch unter dem Gesichtspunkt, dass das CO<sub>2</sub> nur für relativ kurze Zeit in gebundener Form vorliegt, bevor

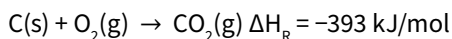
<sup>19</sup> Aus Bazzanella, A., & Krämer, D. (2017). *Technologien für Nachhaltigkeit und Klimaschutz-chemische Prozesse und stoffliche Nutzung von CO<sub>2</sub>: Ergebnisse der BMBF-Fördermaßnahme*. Frankfurt a. Main: DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V., S. 21 [https://dechema.de/dechema\\_media/Bilder/Publikationen/CO<sub>2</sub>\\_Buch\\_Online](https://dechema.de/dechema_media/Bilder/Publikationen/CO2_Buch_Online). (24.07.2024)

<sup>20</sup> Bringezu, Stefan; Kaiser, Simon; Turnau, Sebastian (2020). *Zukünftige Nutzung von CO<sub>2</sub> als Rohstoffbasis in der deutschen Chemie- und Kunststoffindustrie – Eine Roadmap*. Center for Environmental Systems Research, Universität Kassel.

Kriterien zur Bewertung der stofflichen Nutzung von CO<sub>2</sub> unter Klimaschutzaspekten<sup>21</sup>


es infolge des Verbrennungsprozesses der Treibstoffe wieder freigesetzt wird. Und schließlich muss die Wertschöpfung unter dem Gesichtspunkt der Entwicklung der globalen Märkte in Betracht gezogen werden.

Die größte Hürde für die industrielle Nutzung von CO<sub>2</sub> in der chemischen Synthese ist das niedrige Energieniveau dieses Moleküls. Deutlich wird das, wenn man sich klarmacht, dass bei der Verbrennung von fossilen Energieträgern viel Energie frei wird und das Produkt CO<sub>2</sub> eine sehr energiearme Verbindung ist.



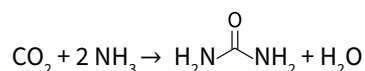
Um das CO<sub>2</sub> als Kohlenstoffquelle in chemischen Synthesen nutzen zu können, muss es daher in aller Regel reduziert und aktiviert werden.

### 2.4.1 Harnstoff

Die Harnstoffsynthese gilt als wichtiges industrielles Verfahren zur stofflichen Nutzung von CO<sub>2</sub>.

Die weltweite jährliche Produktion von Harnstoff liegt bei über 200 Millionen Tonnen. Dabei werden etwa 150 Millionen Tonnen Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) als Ausgangssubstanz zur Herstellung dieses Diamids der Kohlensäure eingesetzt. In Deutschland beträgt die jährliche Produktionsmenge von Harnstoff ca. 0,5 Millionen Tonnen (2020). Damit können ca. 370.000 Tonnen CO<sub>2</sub> in Harnstoff gebunden werden.<sup>22</sup>

Harnstoff wird industriell durch Umsetzung von Kohlenstoffdioxid mit Ammoniak bei ca. 150 bar hergestellt.



<sup>21</sup> <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgasemissionen/die-treibhausgase>, S. 64 (26.06.2024)

<sup>22</sup> RoadMap Chemie 2050. <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/2019-10-09-studie-roadmap-chemie-2050-treibhausgasneutralitaet.pdf> (26.06.2024)

Der Vorteil dieser Synthese ist, dass sie ohne den Einsatz von Katalysatoren abläuft und auch keine besonderen Reinheitsanforderungen an das  $\text{CO}_2$  stellt. Die Produktion findet häufig in der Nähe von Ammoniak-Produktionsstätten statt, da infolge der Erzeugung von Wasserstoff für die Ammoniaksynthese große Mengen  $\text{CO}_2$  zur Verfügung stehen. Für die Herstellung von einer Tonne Harnstoff werden 0,57 Tonnen Ammoniak und 0,73 Tonnen Kohlenstoffdioxid benötigt.

Aufgrund seines hohen Stickstoffgehaltes ist Harnstoff eines der wichtigsten Düngemittel weltweit. Als Grundlage für den AdBlue-Zusatz im Abgas der Kraftfahrzeuge mit Verbrennungsmotoren dient Harnstoff zur Reduktion von Stickoxiden. Auch in Kraftwerken wird es zu diesem Zweck eingesetzt. Vielfältige Anwendung findet Harnstoff zudem in der Medizin und in der Kosmetikindustrie. Des Weiteren ist Harnstoff ein gängiger Streusalzersatz an Flughäfen.

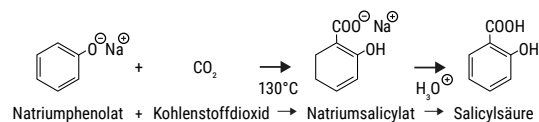


Harnstoff ist Ausgangsstoff für die Herstellung von Harnstoffharzen, die in verschiedenen Bereichen, zum Beispiel als Klebstoff, zur Imprägnierung oder auch zur Isolierung eingesetzt werden. In diesen Bereichen ist die Fixierdauer von  $\text{CO}_2$  deutlich höher als bei den anderen genannten Verwendungen, in denen das  $\text{CO}_2$  bereits kurz nach der Anwendung wieder frei wird.

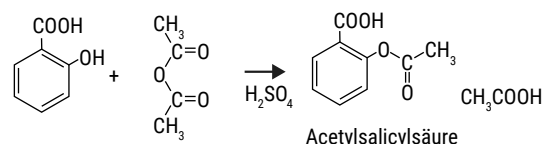
### 2.4.2 Salicylsäure

Ein weiteres Beispiel für eine lang bekannte chemische Fixierung von  $\text{CO}_2$  ist die Herstellung von Salicylsäure in der sogenannten Kolbe-Syn-

these. In dieser Reaktion wird Natriumphenolat mit  $\text{CO}_2$  unter hohem Druck zu Salicylsäure umgesetzt.<sup>23</sup>



Die jährliche Produktion von Salicylsäure beträgt ca. 70.000 Tonnen, wobei 25.000 Tonnen  $\text{CO}_2$  eingesetzt werden. Salicylsäure wird unter anderem zu Farb- und Riechstoffen weiterverarbeitet. Allgemein bekannt ist der Wirkstoff Acetylsalicylsäure, der als Analgetikum weite Anwendung findet und aus Salicylsäure und Essigsäureanhydrid hergestellt wird.



### 2.4.3 Methanolsynthese

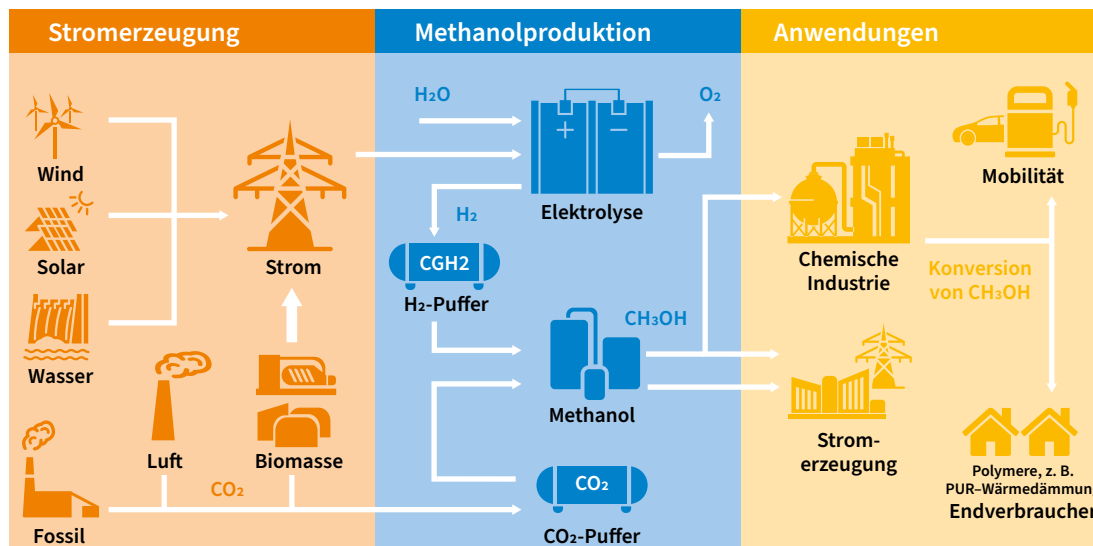
Das Potenzial einer Darstellung von Methanol aus  $\text{CO}_2$  wird deutlich, wenn man einige aktuelle und zukünftige Verwendungen von Methanol betrachtet.

Die weltweite Nachfrage nach Methanol liegt (Stand 2020) bei etwa 100 Millionen Tonnen. Davon wird ein Großteil direkt in der chemischen Synthese eingesetzt. In Abbildung 19 sind verschiedene Wege zur Produktion von Methanol sowie einige Anwendungsbereiche dieser Grundchemikalie aufgezeigt.

<sup>23</sup> Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Berlin (2010). Weltweite Innovationen bei der Entwicklung von CCS-Technologien und Möglichkeiten der Nutzung und des Recyclings von  $\text{CO}_2$ . Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Energie & Umwelt, Energy & Environment Band, Volume 60, S. 21 [https://user.fz-juelich.de/record/9640/files/EnergieUmwelt\\_60.pdf](https://user.fz-juelich.de/record/9640/files/EnergieUmwelt_60.pdf) (04.07.2024)

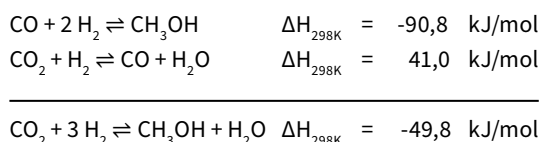
ABBILDUNG 19

Prozessketten von der Erzeugung erneuerbaren Stroms über die Methanolherstellung bis zum Einsatz von Methanol in den unterschiedlichen Märkten<sup>24</sup>



Methanol wird klassisch aus Synthesegas (Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff) hergestellt, das aktuell seinerseits aus Erdöl, Erdgas oder Kohle gewonnen wird.

Die Hauptreaktionen der Methanolsynthese aus Kohlenstoffmonoxid, Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff können wie folgt beschrieben werden:



Alle Reaktionen sind Gleichgewichtsreaktionen und damit abhängig von den Reaktionsbedingungen wie Druck, Temperatur und der Zusammensetzung des Synthesegases.

Betrachtet man die energetischen Aspekte der Reaktionen, so wird deutlich, dass die Methanolausbeute durch hohe Drücke und niedrige Temperaturen begünstigt wird.

Der eigentliche Mechanismus für die Bildung von Methanol ist ein aktives Forschungsgebiet. Erkenntnisse mit dem Einsatz von radioaktivem

CO<sub>2</sub> legen nahe, dass der größte Teil, wenn nicht sogar das gesamte Methanol aus CO<sub>2</sub> gewonnen wird. Es liegt daher nahe, für die Methanolproduktion direkt CO<sub>2</sub> zu verwenden, um dadurch die Atmosphäre zu entlasten.

### Methanoldirektsynthese aus CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>

Die direkte Reaktion von CO<sub>2</sub> mit Wasserstoff steht aus wirtschaftlicher Sicht vor zwei größeren Hürden. So ist die Synthese aus der Perspektive des Klimaschutzes nur sinnvoll, wenn der Wasserstoff mithilfe regenerativ erzeugter Energie – das heißt CO<sub>2</sub>-frei – mittels Elektrolyse von Wasser zur Verfügung gestellt wird. Die Produktionskapazität für „grünen Wasserstoff“ steht derzeit in Deutschland jedoch noch nicht zur Verfügung. Aus diesem Grunde werden wirtschaftliche Berechnungen angestellt, inwieweit das in Deutschland isolierte CO<sub>2</sub> vorübergehend in Länder transportiert werden kann, in denen Strom aus regenerativen Quellen (Wasser, Sonne) gewonnen werden kann, zum Beispiel Kanada oder Norwegen. An diesen Standorten kann über die Elektrolyse von Wasser der notwendige Wasserstoff für die Direktreduktion von CO<sub>2</sub> zur Verfügung gestellt werden, um vor Ort die Methanolsynthese durchzuführen.

<sup>24</sup> Nach: Nachhaltiger Chemischer Speicher: Konversion von CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> zu Methanol - Fraunhofer ISE <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/konversion-von-co2-und-h2-zu-methanol-als-nachhaltigem-chemischen-energiespeicher.html> (01.10.2024)

Das so gewonnene Methanol ließe sich gut nach Deutschland transportieren.

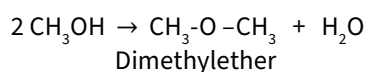
Die zweite Hürde betrifft die thermodynamischen und kinetischen Bedingungen der Direktsynthese. Da wie oben bereits erwähnt die Methanolsynthese ein exothermer Prozess ist und unter Volumenverringerung abläuft, sind geringe Temperaturen und ein hoher Druck für diese Reaktion thermodynamisch günstig. Die derzeit verwendeten Katalysatoren sind jedoch erst ab Temperaturen von etwa 250 °C ausreichend aktiv. Viele Forschergruppen sind dabei, aktivere Katalysatoren zu entwickeln, die den Einsatz bei geringeren Temperaturen erlauben. Ein wichtiges Forschungsfeld ist in diesem Zusammenhang die Weiterentwicklung des bei der klassischen Methanolgewinnung verwendeten Kupfer-Zinkoxid-Aluminiumoxid-Katalysators. So wird der Einfluss von Parametern wie Druck, Temperatur, Zusammensetzung und Dotierung des Katalysators in Bezug auf die Produktivität untersucht, um eine verbesserte Grundlage für die Nutzung von CO<sub>2</sub>-reichen Abgasen zu schaffen.

#### 2.4.4 Verwendung von Methanol

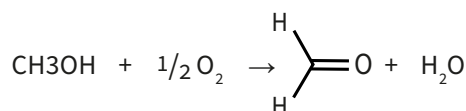
Für die Herstellung von Biokraftstoffen sind drei treibende Kräfte erkennbar:

- ⊕ Einsparung einer wertvollen endlichen Ressource – fossile Brennstoffe, die teurer werden, wenn sie knapper werden,
- ⊕ der Klimawandel – die Notwendigkeit, den Ausstoß von Kohlenstoffdioxid zu verringern,
- ⊕ Energiesicherheit – Länder mit Erdöl- und Erdgasknappheit wollen ihre eigene Kraftstoffversorgung aufbauen.

Treibstoffe werden hauptsächlich durch das katalytische Cracken von Erdöl gewonnen. Methanol kann direkt oder in Form des Dimethylethers als Kraftstoff für Verbrennungsmaschinen eingesetzt werden und damit die Abhängigkeit vom Rohöl reduzieren.

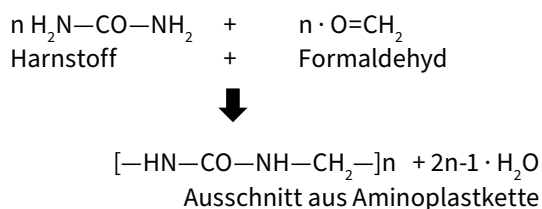


Eine längerfristige CO<sub>2</sub>-Fixierung erfolgt über Formaldehyd, das in großen Mengen in der chemischen Industrie aus Methanol hergestellt wird. Die Synthese erfolgt durch Luftoxidation von Methanol in einer exothermen Reaktion, so dass kein nennenswerter Energieverbrauch ausgehend von Methanol erfolgt.



Formaldehyd wird unter anderem als Ausgangsstoff zur Herstellung von Aminoplasten wie Harnstoff-Formaldehyd-Harz, Melamin-Formaldehyd- und Phenol-Formaldehyd-Harzen eingesetzt. Die daraus resultierenden Duomere haben als Lacke, Holzwerkstoffe, Komposite oder Schäume eine mehrjährige oder gar jahrzehntelange Lebensdauer. So werden Spanplatten für Holzkonstruktionen und Möbelbau vorwiegend unter Verwendung von Harnstoff-Formaldehyd-Harzen hergestellt.

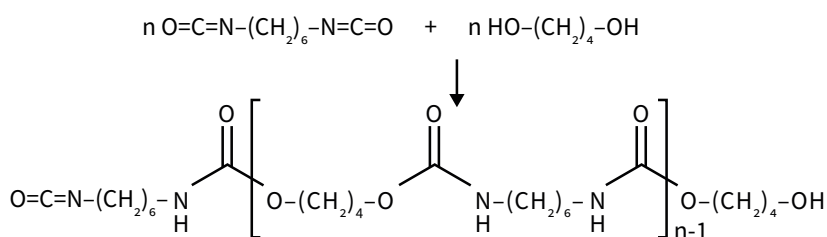
Die Reaktion von Harnstoff mit Formaldehyd vereinfacht:



Für die auf Formaldehyd basierenden Duomere ergeben sich im Rahmen der CO<sub>2</sub>-Fixierung neue Anwendungsmöglichkeiten. Die viel diskutierten Formaldehyd-Emissionen konnten aufgrund des Zusatzes von Additiven deutlich reduziert werden.

ABBILDUNG 20

### Klassische Polyaddition von 1,6-Hexandiisocyanat mit 1,4-Butandiol



## 2.5 Einsatz von CO<sub>2</sub> in der Kunststoffsynthese

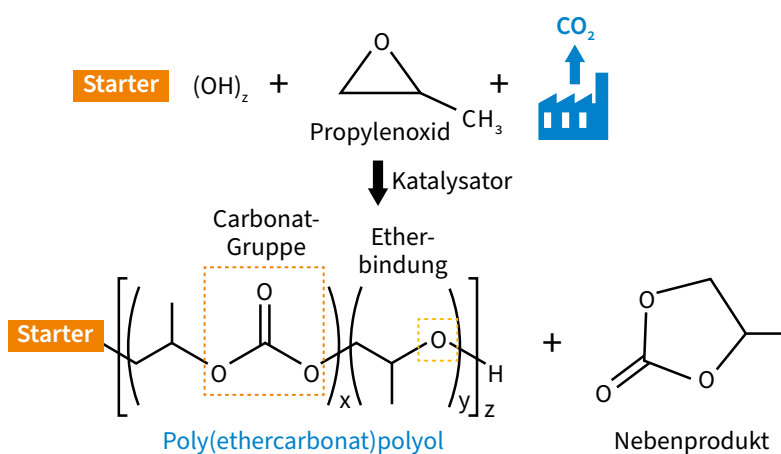
Die chemische Industrie stellt eine Vielzahl von Kunststoffen und anderen chemischen Komponenten her, die beim Automobilbau, im Bausektor, in Kosmetika, in pharmazeutischen Produkten und vielen anderen Bereichen Anwendung finden. Für diese Produkte der organischen Chemie ist das Element Kohlenstoff essenziell. Im Schlußschluss von anwendungsorientierter Wissenschaft und forschungsbasierter Industrie ist es gelungen, CO<sub>2</sub> als Kohlenstoffquelle in neue Synthesen einzubringen und einen neuen Weg zur Herstellung von Polyurethanen zu beschreiten.<sup>25</sup> Polyurethane sind äußerst

vielfältig einsetzbare Kunststoffe. Sie entstehen klassisch in einer Polyadditionsreaktion von Polyalkoholen und Diisocyanaten.

Polyole als eine Hauptkomponente zur Herstellung von Polyurethanen basieren auf petrochemischen Rohstoffen und letztlich auf Erdöl. Dem Team ist es gelungen, Polyethercarbonatpolyole durch katalytische Copolymerisation von CO<sub>2</sub> mit Alkylenoxiden herzustellen. In dem neuen Verfahren lassen sich nun bis zu 20 Prozent des Öls durch CO<sub>2</sub> ersetzen. Das CO<sub>2</sub> reagiert dabei mit Propylenoxid und wird chemisch fest in die neue Polymerkette eingebunden (Abb. 21).

ABBILDUNG 21

### Schematische Darstellung der Herstellung von CO<sub>2</sub>-basierten Poly(ethercarbonat)polyolen: Copolymerisation von Propylenoxid und CO<sub>2</sub><sup>26</sup>



<sup>25</sup> Mennicken, L., Janz, A. & Roth, S. (2016). The German R&D Program for CO<sub>2</sub> Utilization- Innovations for a Green Economy. *Environ Sci Pollut Res* 23, 11386–11392. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6641-1> (10.07.2024)

<sup>26</sup> Verändert nach: Dong Hyun Lee et al. (2020). Carbon Dioxide Based Poly(ether carbonate) Polyol in Bi-polyol Mixtures for Rigid Polyurethane Foams. *Journal of Polymers and the Environment*, 28:1161



## 2.6 Künstliche Photosynthese

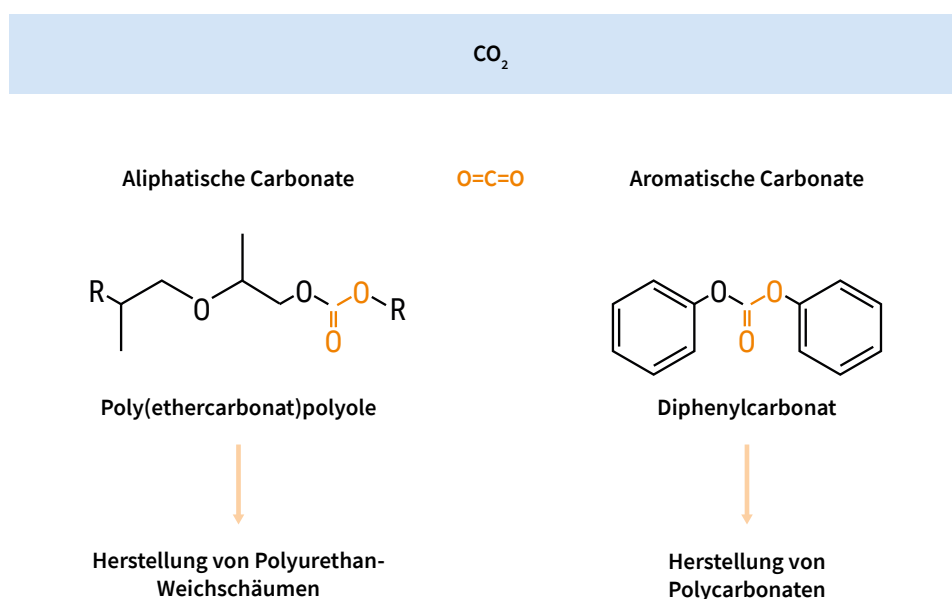
Der Wunsch und das Streben sind schon alt: Warum macht man es nicht den grünen Pflanzen nach und bindet  $\text{CO}_2$  photosynthetisch? In der Tat arbeiten Forscherinnen und Forscher weltweit an diesem Thema. Denn eine nachhaltige Produktionsmethode für Kraftstoffe und chemische Produkte muss auf Energien und Ressourcen zurückgreifen, die in der Natur reichlich vorkommen und leicht erneuerbar sind. Die künstliche Photosynthese nutzt die Sonnenenergie, um Rohstoffe wie Wasser und  $\text{CO}_2$  in nützliche Produkte wie  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ , Alkohole und Kohlenwasserstoffe umzuwandeln.

Die mit diesen Polyolen hergestellten Polyurethane eignen sich für verschiedene Anwendungen. Auf dem Markt befinden sich bereits weiche Schaumstoffe für die Herstellung von Matratzen und Polstermöbeln. Das Spektrum der Anwendungen wird kontinuierlich verbreitert, zum Beispiel als Vorprodukte für Bindemittel in Sportböden und verschiedene Materialien für die Textilindustrie und der Medizintechnik. Gegenüber der traditionellen Produktion werden keine Lösemittel eingesetzt. Zudem weisen die neuartigen Fasern eine bessere Ökobilanz auf.

Abbildung 23 zeigt schematisch den Aufbau einer elektrochemischen Zelle, in der photokatalytisch aus Wasser und  $\text{CO}_2$  zum Beispiel Kraftstoffe erzeugt werden können.

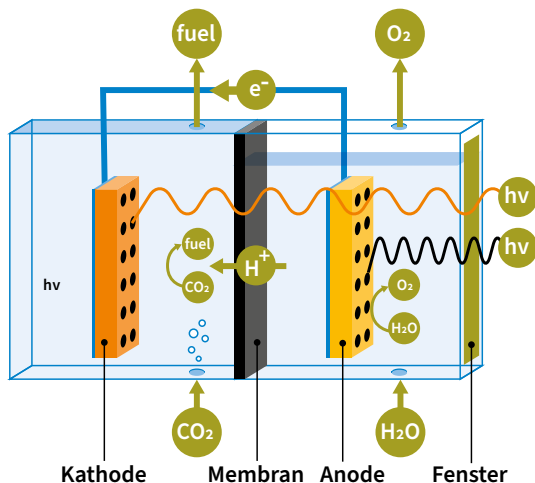
### ABBILDUNG 22

**Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) als C1-Synthesebaustein zur Herstellung von Polyether-Polycarbonat-Polyolen (PPP) zur weiteren Umsetzung zu Polyurethan-Weichschäumen und von Diphenylcarbonat zur Herstellung von Polycarbonaten<sup>27</sup>**



<sup>27</sup> *Mixtures for Rigid Polyurethane Foams. Journal of Polymers and the Environment, 28:1161 veränd. nach 4, S. 31*

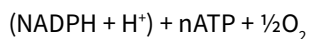
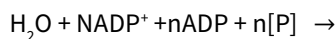
Konzeptzeichnung einer photoelektrochemischen Flüssigphasen-Zelle mit zwei Kammern.<sup>28</sup>



Die Wege von Licht, Reagenzien, Protonen, Elektronen und Reaktionsprodukten sind eingezeichnet.

Die Forschung konzentriert sich dabei auf zwei wichtige Voraussetzungen:

Zum einen muss es gelingen, die Sonnenenergie effizient aufzufangen und zu nutzen. In der natürlichen Photosynthese findet dies in der sogenannten Lichtreaktion statt. Hier werden die Reduktions- und Energieäquivalente in den Chloroplasten der grünen Pflanzen bereitgestellt, die aus der von Lichtenergie getriebenen Spaltung der Wassermoleküle stammen.

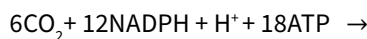


In der künstlichen Photosynthese wird dies mit Licht absorbierenden Halbleitermaterialien erforscht. Diese können ein Elektron-Loch-Paar erzeugen, dessen Unterschied in potenzieller Energie ausreicht, um Wasser an der Photo-

anode elektrochemisch zu  $\text{O}_2$  zu oxidieren und damit die Elektronen und Protonen für die Umsetzungen von  $\text{CO}_2$  an der Photokathode zu chemischen Kraftstoffen bereitzustellen.

Zum anderen bedarf es einer verbesserten katalytischen Umsetzung der Reduktion von  $\text{CO}_2$  und der Umwandlung zu chemischen Produkten wie zum Beispiel Methanol.

In der Natur finden diese Reduktionsprozesse in der sogenannten Dunkelreaktion der Photosynthese statt.



Hier werden die Reduktions- ( $\text{NADPH} + \text{H}^+$ ) und Energieäquivalente (ATP) genutzt, um  $\text{CO}_2$  zu reduzieren und Glukose aufzubauen.

<sup>28</sup> Rongé, J., Bosserez, T., Martel, D., Nervi, C., Boarino, L., Taulelle, F., Decher, G., Bordiga S. & Martens, J. A. (2014). Monolithic cells for solar fuels. *Chem. Soc. Rev.*, 43, 7963–7981 <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2014/cs/c3cs60424a> (03.07.2024)

Ist jedoch in der künstlichen Photosynthese schon die Wasseroxidation an der Photoanode noch mit vielen Problemen behaftet, so wird der Gesamtprozess noch viel schwieriger, wenn es sich beim Kathodenprozess um die Reduktion von  $\text{CO}_2$  handelt. Denn dort wird die katalytische Umwandlung von  $\text{CO}_2$  in Produkte wie Formaldehyd oder Methanol angestrebt. Eine Vielzahl von Katalysatoren sind für diesen Elektrodenprozess getestet worden. Der Nachweis ist erbracht, dass solche Systeme im Labormaßstab funktionieren. Noch sind sie jedoch zu teuer und auch nicht effizient genug für den großtechnischen Einsatz. Die Natur ist der Menschheit also vorerst noch voraus. Allerdings ist der Weg von der Energie der Sonne hin zum Kraftstoff für die Menschen faszinierend, und schon jetzt kann man erkennen, dass die Chemie einen entscheidenden Beitrag zur Wegbereitung liefern wird.

## 2.7 Ausblick

Da die stoffliche Verwertung von  $\text{CO}_2$  zum Klimaschutz rein mengenmäßig nur einen geringen Beitrag leisten kann, wird man nicht daran vorbeikommen, den  $\text{CO}_2$ -Ausstoß aus Emissionsquellen drastisch zu reduzieren und zusätzlich dieses Gas aktiv aus der Atmosphäre zu entfernen. Nur so wird es gelingen, die gesetzten Klimaschutzziele zu erreichen. Auf beiden Feldern wird intensiv geforscht.

Eine signifikante Verringerung der  $\text{CO}_2$ -Emissionen ist unmittelbar verbunden mit einer Wende in der Energiewirtschaft hin zu grünem Strom und einer damit verbundenen Perspektive für den Einsatz von Wasserstoff in vielen industriellen Bereichen.

Was die Speicherung von  $\text{CO}_2$  betrifft, sind an die sogenannten Negativemissionstechnologien große Erwartungen geknüpft.

Der Weltklimarat weist auf diesem Feld dem Verfahren „Bioenergy with Carbon Capture and Storage“ (BECCS) eine große Bedeutung zu. Hierfür wird Pflanzenbiomasse angebaut, die natürlicherweise  $\text{CO}_2$  anreichert, und anschließend in Anlagen verbrannt. Das dabei entstehende  $\text{CO}_2$  wird aufgefangen und geologisch gespeichert. Dieses Verfahren ist hinsichtlich des damit verbundenen Energieaufwands vorteilhafter, als  $\text{CO}_2$  direkt aus der Atmosphäre zu binden und zu speichern.

### INFO FÜR LEHRKRÄFTE

Arbeitsblatt 2.5  
Negativemissionstechnologien  
Experiment 2.5:  
Modellexperiment zur Speicherung  
von Kohlenstoffdioxid





Inwieweit sich Verfahren zum „Carbon Capture and Storage“ (CCS) jedoch durchsetzen werden, hängt von der Fähigkeit ab, CO<sub>2</sub> sicher und dauerhaft zu speichern. Nun hat eine Studie erstmals nachgewiesen, dass CO<sub>2</sub> dauerhaft in Basaltgesteinen gelagert werden kann. Über 95 Prozent des in Wasser gelösten CO<sub>2</sub>, das an einem Standort in Island in Brunnen injiziert wurde, konnte mineralisiert werden, indem es in Tiefen zwischen 400 und 800 Metern durch basaltisches Lavagestein und Sedimentgesteine geleitet wird. Der größte Teil des injizierten CO<sub>2</sub> wurde auf diese Weise in weniger als zwei Jahren gebunden. Carbonatminerale sind stabil, daher sollte dieser Ansatz das Risiko von CO<sub>2</sub>-Leckagen verringern. Die bisherige Ansicht, dass die Immobilisierung von CO<sub>2</sub> als Carbonatminerale in geologischen Lagerstätten meh-

rere Hundert bis Tausende Jahren dauert, konnte infrage gestellt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die sichere Langzeitspeicherung von anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Mineralisierung viel schneller erfolgen kann als bisher postuliert und daher weiter erforscht werden sollte. Denn es gibt noch viele Fragen, die vor einer größer dimensionierten Speicherung beantwortet werden müssen.<sup>29</sup>

Die einfach erscheinende Reaktion: Basalt + CO<sub>2</sub> + Wasser → Carbonatgestein ist offensichtlich deutlich komplexer als zunächst angenommen. So ist zum Beispiel noch nicht klar, was die Ursache für die vergleichsweise hohe Umwandlungsgeschwindigkeit zum Carbonatgestein ist und wie sich das Verfahren bei Verwendung von Salzwasser darstellt.

<sup>29</sup> Matter, J. M. et. al. (2016). Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions. *SCIENCE*, Vol 352, Issue 6291, pp. 1312–1314, DOI: 10.1126/science.aad8132

### Eine wachsende Herausforderung

Zu Elektroschrott wird früher oder später alles, was einen Stecker, ein Stromkabel oder eine Batterie hat – von Toastern, Zahnbürsten und Kühlschränken bis zu Smartphones, Laptops oder LED-Fernsehern – hinzu kommen die Komponenten, aus denen diese Produkte bestehen. Begrifflich unterscheidet man in diesem Zusammenhang zwischen *Elektroschrott* und *Elektronikschrott*. Da die Grenzen fließend sind, wird in diesem Kapitel ausschließlich der Begriff *Elektroschrott* verwendet.

Es ist interessant und aufschlussreich, einmal die Elektrogeräte im eigenen Haushalt zu zählen. Leicht kommt man dabei – auch ohne Leuchten – auf eine Anzahl von über 50. Und wie viele Elektrogeräte liegen in den Regalen, weil sie ausgedient haben oder nicht mehr funktionieren und eigentlich entsorgt werden müssten? Auf jeden Fall haben all diese Geräte eine begrenzte Lebensdauer und müssen entweder repariert oder gegen neue ausgetauscht werden. In Deutschland müssen ausgediente Elektrogeräte an entsprechenden Sammelstellen abgegeben werden.

Mit der Entwicklung der Computertechnologie und moderner Kommunikationsverfahren hat sich die Masse an Elektroschrott enorm erhöht; immer mehr ausgediente Mobiltelefone, Computer mit Bildschirmen und sonstigem Zubehör häufen sich an.

### 3.1 Die Mengen

Weltweit sind im Jahr 2022 schätzungsweise 62 Millionen Tonnen Elektroschrott angefallen.<sup>30</sup> Wenn die Entwicklungen so anhalten, sei im Jahr 2030 mit 82 Millionen Tonnen zu rechnen, so die Fachleute.

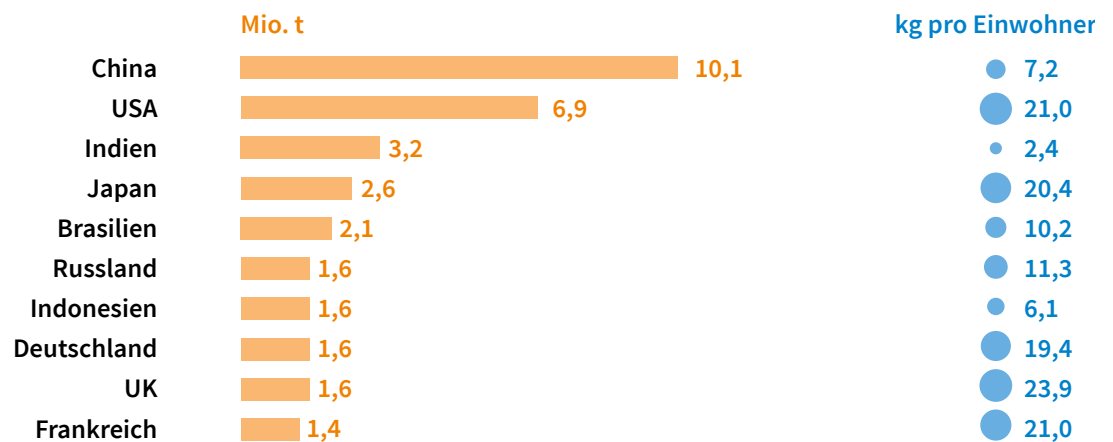
China ist mit 10,1 Millionen Tonnen der größte Produzent von Elektroschrott, allerdings sind die Chinesen gemessen am Pro-Kopf-Aufkommen mit 7,2 Kilogramm (noch) weit von der Weltspitze entfernt. Mit insgesamt 1,6 Millionen Tonnen tragen wir in Deutschland zum weltweiten Elektroschrott bei, was pro Einwohner etwa 19 Kilogramm bedeutet. Insgesamt erwarten Experten weltweit eine weitere Steigerung des Aufkommens.

ABBILDUNG 24

#### Elektroschrott pro Einwohner in ausgewählten Ländern

##### Jeder Deutsche produziert 19,4 kg Elektroschrott

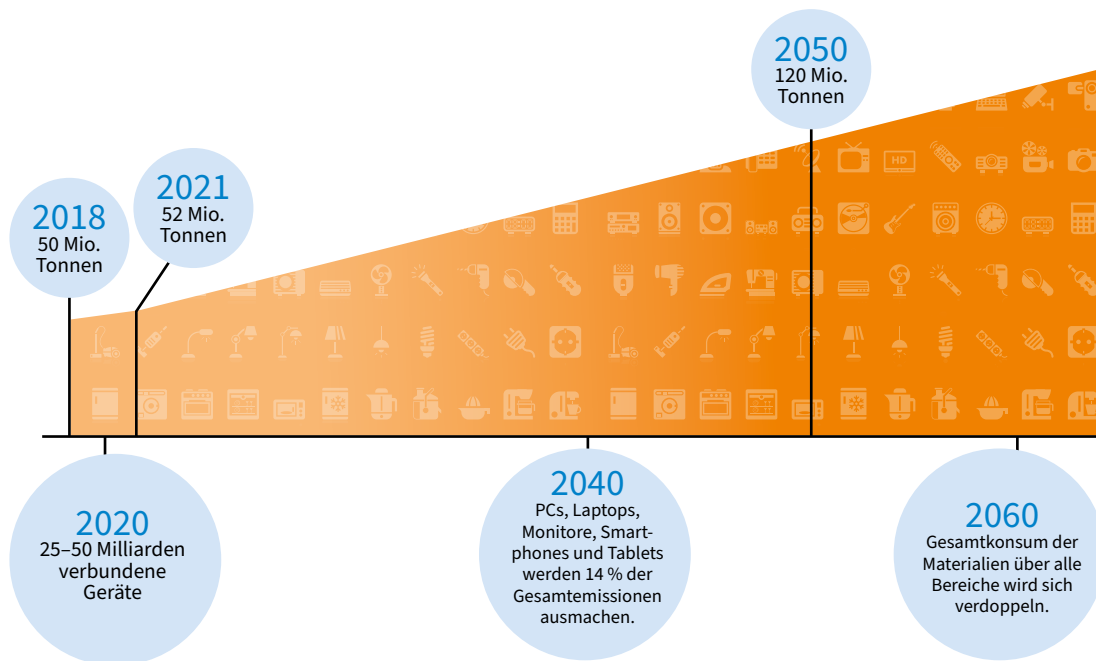
Die zehn Länder mit dem größten Elektroschrottaufkommens 2019



Quelle: <https://de.statista.com/infografik/12272/die-zehn-laender-mit-dem-groessen-elektroschrott-aufkommen/>

<sup>30</sup> Global E-waste Monitor 2024. Geneva/Bonn. <https://globalewaste.org/> (30.07.2024)

Die zukünftige Entwicklung des Elektroschrottaufkommens<sup>31</sup>



Derzeit haben nur wenige Länder eine einheitliche Methode zur Sortierung und zur Messung dieses Abfalls, zumal Elektroschrott aus vielen Quellen stammt, darunter Privathaushalte, Dienstleistungs- und Produktionsunternehmen oder auch Verwaltungen und Behörden.

In Deutschland gilt seit 2019 ein sogenannter Mindesteinsatzwert für gebrauchte Elektrogeräte von 65 Prozent.

Trotz dieser gesetzlichen Regelungen wird ein großer Teil des in Europa anfallenden Elektroschrotts in Länder Afrikas und Asiens exportiert, wo Menschen auf unregelmäßigen Müllkippen versuchen, an Wertstoffe wie Gold, Koltan oder Kupfer im Elektroschrott zu gelangen. Sie verbrennen Plastikverkleidungen von Gehäusen, Kabeln und Platinen, um an die begehrten

Rohstoffe zu kommen. Täglich atmen die Menschen, meist Kinder und Jugendliche, giftige Dämpfe ein und schädigen ihre Gesundheit durch Kontakt mit Metallen wie Blei, Cadmium, Quecksilber und Chrom.



<sup>31</sup> Coalition, E. W. (2019). A New Circular Vision for Electronics: Time for a Global Reboot. World Economic Forum. [http://www3.weforum.org/docs/WEF\\_A\\_New\\_Circular\\_Vision\\_for\\_Electronics.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_A_New_Circular_Vision_for_Electronics.pdf) (25.07.2024).

## ELEKTRONIKGERÄTEGESETZ

Grundlage für die Entsorgung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten in Deutschland ist das Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elektronikgerätegesetz – ElektroG) aus dem Jahre 2015. Die Ziele des ElektroG sind:

- Vermeidung von Abfällen aus Elektro-Altgeräten (EAG) und Stärkung der Vorbereitung zur Wiederverwendung,
- umweltgerechte Entsorgung von EAG,
- Kreislaufführung von Elektro- und Elektronikgeräten auf der Basis der Verantwortung der Hersteller (Produktverantwortung) und damit Steigerung der Ressourceneffizienz.

Seit 2021 werden Hersteller europaweit neben der genaueren Kennzeichnung des Energieverbrauchs erstmals dazu verpflichtet, die Reparierbarkeit und Funktionsdauer von elektronischen Geräten wie Waschmaschinen, Kühlgeräten, Spülmaschinen, Elektromotoren, Lichtquellen und LED-Bildschirmen zu verbessern. Außerdem müssen die Hersteller Ersatzteile noch mindestens zehn Jahre nach dem Kauf zur Verfügung stellen.

Zudem sind die Exporteure von Elektroschrott verpflichtet nachzuweisen, dass ihre Waren im Ausland wiederverwertet werden.



## 3.2 Wertvoller Schrott

Abbildung 26 zeigt die mittlere Zusammensetzung von Elektroschrott in Deutschland. Es wird deutlich, dass dieser eine wertvolle Ressource darstellt. Er kann Metalle wie Eisen und Stahl, aber auch Gold, Silber, Kupfer und Nickel sowie seltene Materialien, die besonders wertvoll für Zukunftstechnologien wie Computerchips oder Windkraftträder sind, enthalten, zum Beispiel Indium und Palladium sowie Seltenerdmetalle. Viele dieser Metalle lassen sich zurückgewinnen, recyceln und als Sekundärrohstoffe für neue Güter verwenden. Etwa 60 im Periodensystem gelistete Elemente stecken in diesem Schrott. So wird Gold zwar nur in geringen Mengen verbaut, weltweit jedoch summieren sich die kleinen Anteile auf mehrere Hundert Tonnen mit einem Gegenwert von etlichen Milliarden Euro.

Den Wert des Elektroschrotts haben die Autorinnen und Autoren des „Global E-Waste Monitor“ für 2022 auf 91 Milliarden US-Dollar geschätzt.<sup>32</sup> Sie betonen, dass dieser Geldbetrag in den richtigen Händen jedoch wesentlich mehr wert sein könne. Was ist damit gemeint?

## 3.3 Verwertung von Elektroschrott

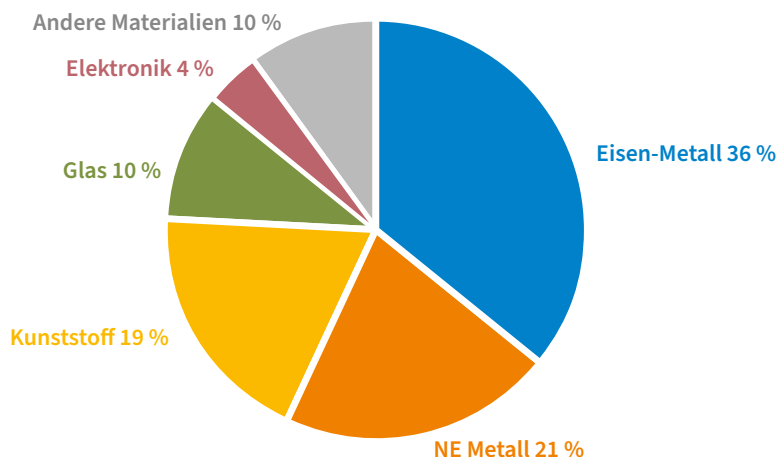
Die hohen Mengen von Elektroschrott in vielen Ländern führen zunehmend zu Überlegungen, auf welche Weise es gelingen kann, die vorhandenen Wertstoffe daraus zurückzugewinnen und wieder in den Kreislauf zurückzuführen. Untersuchungen zeigen, dass sich solche Bemühungen durchaus „rechnen“, also wirtschaftlich gestaltet werden können.<sup>33</sup> Man spricht in diesem Zusammenhang von „Urban Mining“ (Urbaner Bergbau) als einem wichtigen Beitrag für die Entwicklung einer zeitgemäßen Kreislaufwirtschaft.<sup>34</sup>

<sup>32</sup> Baldé, C.P., Forti V., Gray, V., Kuehr, R., Stegmann, P., et al. : *The Global E-waste Monitor – 2017*, United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Vienna. [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-d/opb/gen/D-GEN-E\\_WASTE.01-2017-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-d/opb/gen/D-GEN-E_WASTE.01-2017-PDF-E.pdf) (03.07.2023)

<sup>33</sup> Xianlai Zeng, John A. Mathews, and Jinhui Li (2018). *Environmental Science & Technology* 2018 52 (8), 4835-4841. DOI: 10.1021/acs.est.7b04909

<sup>34</sup> Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2020). *The promise and limits of Urban Mining* [https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccn/2020/Fraunhofer\\_ISI\\_Urban\\_Mining.pdf](https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccn/2020/Fraunhofer_ISI_Urban_Mining.pdf) (25.07.2024)

### Mittlere Zusammensetzung von Elektroschrott in Deutschland



Alle privaten Geräte wie Handys, Tablets, PCs und viele mehr können durch die Entsorgung an der richtigen Stelle wieder in Rohstoffe verwandelt werden. Damit ist Urban Mining ein wichtiger Bestandteil der anzustrebenden Kreislaufwirtschaft. Es führt zu einer steigenden Unabhängigkeit von natürlichen Ressourcen und erhöht die Versorgungssicherheit, gerade in Ländern, die über limitierte Vorkommen an entsprechenden Bodenschätzen verfügen.

Wie gut Bestandteile des Elektroschrotts wiederverwendet werden können, hängt in hohem Maße von der Trennfähigkeit der Komponenten ab. Bislang beschränkt sich das Recycling im Wesentlichen auf Massenmetalle wie Eisen, Stahl, Kupfer, Aluminium und Edelmetalle, die vergleichsweise leicht rückgewinnbar sind, sowie auf Kunststoffe. Verfahren zur Rückgewinnung von Seltenerdmetallen sind derzeit in der Erprobung.

Der prinzipielle Ablauf des Recyclings alter Elektrogeräte ist in den meisten Anlagen ähnlich. Nach der Sammlung und Sortierung der Geräte

vor Ort erfolgt deren Demontage und Zerlegung in verschiedene Fraktionen. Die wesentlichen Fraktionen sind:

- ⬢ Funktionsteile (Gebrauchtwaren),
- ⬢ sortenreine Metallschrotte (zum Beispiel Gehäuse aus Stahl, Kupferspulen),
- ⬢ magnetische Fraktion (zum Recycling im Stahlwerk),
- ⬢ Nichteisen (NE) – Metallfraktion (zum Recycling in Buntmetallhütten),
- ⬢ Aluminiumfraktion (zum Recycling in Aluminiumschmelzhütten/Gießereien),
- ⬢ Kunststoffe,
- ⬢ Gläser (zum Beispiel Bildröhren),
- ⬢ Abfälle/Schadstoffe,
- ⬢ Crossover-Produkte: hierzu zählen Teile, die fest verbaute elektrische oder elektronische Bestandteile aufweisen, wie sie zunehmend in Textilien oder Möbel Eingang finden. Sie gehören seit August 2018 ebenfalls zum Elektroschrott. Da damit für Elektroschrott unübliche Materialien in die Rücknahmeprozesse gelangen, wird das Sortieren und Recycling erheblich erschwert.<sup>35</sup>

<sup>35</sup> NABU (2021). Das zweite Leben von Elektrogeräten – Zehn Fakten zum Recycling von Elektroschrott <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/abfall-und-recycling/kreislaufwirtschaft/27249.html> (19.02.2024)

Zweifelsohne gewinnt die Prüfung auf Wiederverwertung der gebrauchten Teile im Elektroschrott an Bedeutung, stellt sie doch die beste Kreislaufalternative dar. Allerdings ist der Anteil der auf diesem Wege wieder in den Kreislauf zurückgeführten Materialien aus wirtschaftlichen und technischen Gründen noch gering. Der größte Teil der Stoffverbunde wird einer maschinellen Zerkleinerung und Trennung unterzogen.

Zur Trennung der nach der Zerkleinerung erhaltenen Partikelströme werden verschiedene physikalische Verfahren eingesetzt, bei denen die Eigenschaften der unterschiedlichen Partikel genutzt werden. Die wichtigsten in diesem Bereich angewendeten Prozesse sind Dichtentrennung, Magnetscheidung, Elektrosortierung und IR-gesteuerte Kläubung.

Allerdings lassen sich die im Elektroschrott enthaltenen Wertstoffe durch mechanische Verfahren nur begrenzt voneinander isolieren, eine 100-prozentige Trennung wird nicht erreicht. Zudem hat der Zerlegungsgrad einen wesentlichen Einfluss auf die Reinheit der erhaltenen Stofffraktionen. Je höher der Zerlegungsgrad ist, umso reiner sind die erhaltenen Stofffraktionen, was zu geringeren Weiterverarbeitungskosten wie zum Beispiel Schmelzkosten führt. Allerdings resultieren ein hoher Zerlegungsgrad und die daran anschließenden Trennstufen und Stoffströme in einem deutlichen Verlust an Edelmetallen. Ein geringerer Zerlegungsgrad bringt dagegen erhöhte Verluste an Basismetallen mit sich, da Metalle wie Eisen in diesem Fall den Weg gemeinsam mit den Edelmetallen über die pyrometallurgische Kupfergewinnung gehen, wo sie verschlackt werden (s. Abb. 29).

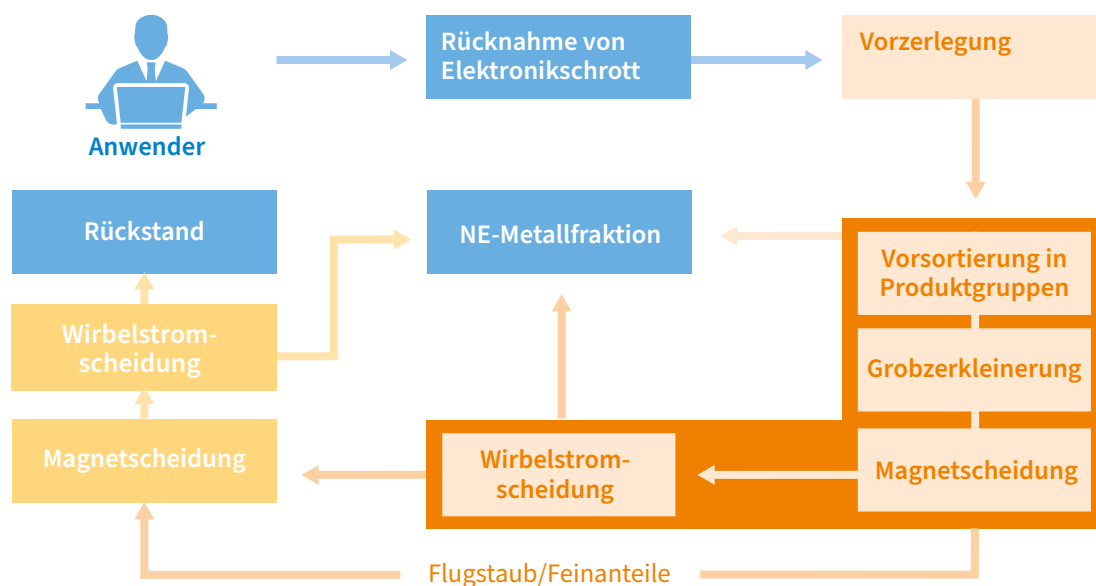
### INFO FÜR LEHRKRÄFTE

Arbeitsblatt 3.1  
Mechanische Aufbereitung von Elektroschrott

Wertvolle Komponenten im Elektroschrott sind Kunststoffe. Beim Recycling der darin verbauten Kunststoffe muss jedoch beachtet werden, dass aufgrund gesetzlicher Vorgaben nicht alle

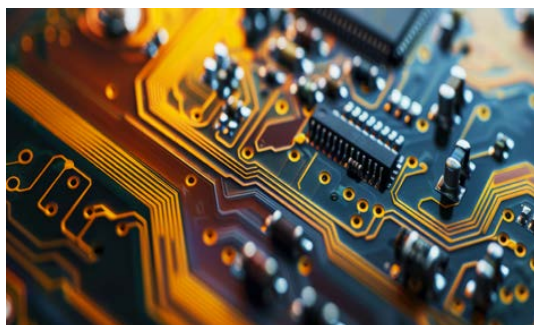
### ABBILDUNG 27

Schematische Darstellung der einzelnen Prozessschritte bei der mechanischen Aufbereitung von Elektronikschrott.<sup>36</sup>



<sup>36</sup> Stelter, M., & Raabe, L. (2009). Recycling von Nichteisenmetallen aus Elektronikschrott – Chance und Risiken. Chemie Ingenieur Technik, 81(7), 891–900.

Kunststoffe wieder in Verkehr gebracht werden dürfen. Darunter fallen flammgeschützte, bromhaltige Kunststoffe, die beim Kunststoffrecycling separat abgetrennt und thermisch verwertet werden müssen.



### 3.3.1 Kupferraffination

Ein besonderes Problem für die Rückgewinnung wertvoller Rohstoffe aus Computern, Handys und weiteren digital gesteuerten Geräten stellen die darin verbauten Leiterplatten dar. Schon mit bloßem Auge lässt sich erkennen, dass das Recycling problematisch ist, weil auf diesen Leiterplatten viele verschiedene Materialien eingesetzt werden. Da gibt es goldfarbene Anschlüsse, silbrig matte Verbindungen, Leiterbahnen unter einer grünlich durchsichtigen Schicht, vielerlei verschiedene elektronische Bauteile, wie Kondensatoren, Prozessoren oder Speicherchips, und nicht zuletzt das Material der Platine selbst.

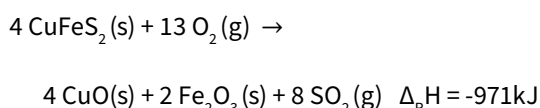
Die Platinen bestehen aus Kupfer. Dessen Wiedergewinnung ist rentabel, weil dabei auch die verschiedenen auf den Platinen verarbeiteten Edelmetalle zurückgewonnen werden können.

Beim „thermischen Verfahren zur Entsorgung von Leiterplatten werden die bestückten Platinen, die aus Kunststoffen, elektronischen Bau-

teilen und metallischen Leiterbahnen bestehen, sozusagen als „Kupfererz“ behandelt und dem Schmelzmetallurgischen Verfahren zur Kupfergewinnung als zusätzliches Ausgangsmaterial zugesetzt.

In Abbildung 28 ist die Schmelzmetallurgische Kupfergewinnung dargestellt. Die Ausgangsstoffe für die Kupfergewinnung sind angereicherte sulfidische und oxidische Kupfererze, zum Beispiel Kupferkies ( $\text{CuFeS}_2$ ), Kupferglanz ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), Buntkupferkies ( $\text{Cu}_3\text{FeS}_4$ ) oder Rotkupfererz ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ).

In einem ersten Schritt wird das Erz mit Heißluft, die auf einen Sauerstoffgehalt von 65 Prozent angereichert wird, geröstet. Dabei werden die sulfidischen Erze in Oxide umgewandelt, zum Beispiel:



Da dieser Prozess exotherm ist, heizt sich das Erzgemisch auf und schmilzt schließlich bei einer Temperatur von ca. 1.200 °C. Das so erhaltene Gemisch wird „Kupferstein“ genannt, es enthält bereits ca. 65 Prozent Kupfer und wird zur weiteren Verarbeitung in einen sogenannten Konverter überführt. Das beim Röstprozess erhaltene Eisenoxid verschlackt mit dem Begleitgestein der Kupfererze und wird zur Schlacke, die auf dem geschmolzenen Kupferstein schwimmt und abgetrennt wird.

Der Kupferstein wird nun zusammen mit zugegebenem Sand dem Konverter zugeführt und „verblasen“. Dabei wird mit Sauerstoff angereicherte Luft mit hohem Druck in die Schmelze eingeblasen, wodurch noch vorhandene Eisenanteile oxidiert werden und mit dem zugegebenen Sand verschlacken.

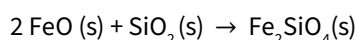
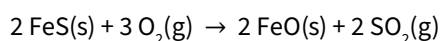
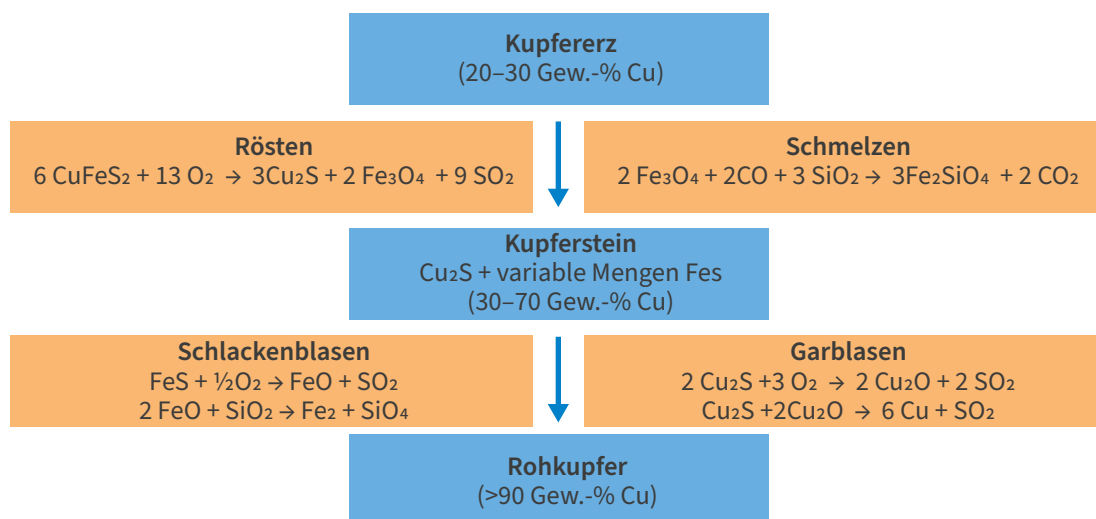
**TABELLE 3**

#### Durchschnittlicher Gehalt verschiedener Metalle an den Leiterplatten in Gewichtsprozent

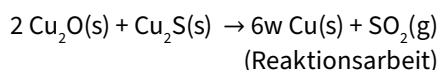
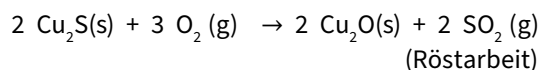
Cu	Sn	Fe	Pb	Ag
12,53	6,23	3,90	0,023	0,021



### Schmelzmetallurgische Kupfergewinnung



Das sulfidische Kupfer wird in Kupferoxid umgewandelt, das wiederum mit weiterem Kupfersulfid zu metallischem Kupfer reagiert.



Hier im Konverter kommen neben anderem Altkupfer aus dem Recycling nun auch die Leiterplatten aus dem Elektronikschrott zum Einsatz. Sie werden geschreddert und dann unter hohem Druck in den geschmolzenen Kupferstein eingeblasen. Dabei schmelzen die metallischen Bestandteile der Leiterplatten sofort auf und verhalten sich gerade so, als seien sie von Anfang an in den Erzen vorhanden gewesen. Die Kunststoffanteile verbrennen aufgrund der hohen Temperaturen und des hohen Sauerstoffgehaltes der eingeblasenen Luft so vollständig, dass auch aus den Flammschutzmitteln keine Dioxine entstehen können. Bei den Glasfaserbestandteilen der Platinen handelt es sich wie bei Sand um Siliciumdioxid.

Die Edelmetalle gehen ebenfalls in die Kupferschmelze über und können in weiteren Schritten wiedergewonnen werden. Durch die Verwendung von Leiterplatten im Konverterprozess kann also – zusätzlich zu den oben aufgeführten Vorteilen – Sand eingespart werden. Als Endprodukt des Konvertierens erhält man Rohkupfer. Es hat bereits einen Kupfergehalt von über 90 Prozent.

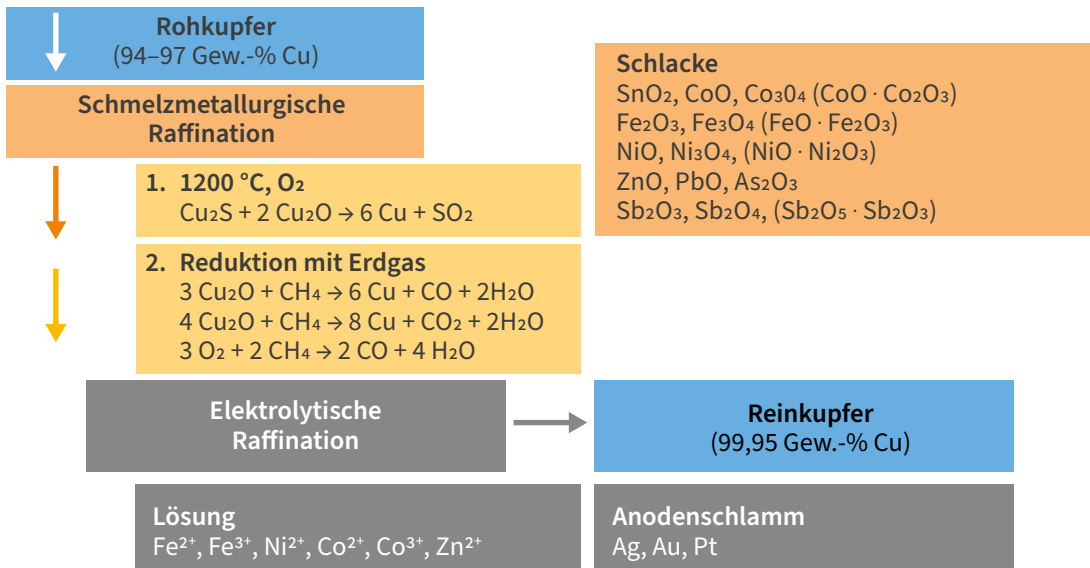
In einem nächsten Schritt wird das Rohkupfer weiter aufgereinigt, wobei das überoxidierte Kupfer mit Erdgas wieder zu metallischem Kupfer reduziert wird (Abb. 29). Der Kupfergehalt erhöht sich dadurch auf ca. 99,6 Prozent.

#### INFO FÜR LEHRKRÄFTE

Arbeitsblatt 3.2:  
Pyrometallurgische Rohkupfergewinnung im Überblick

Dieses Rohkupfer, das ja immer noch die wertvollen Edelmetalle aus den Leiterplatten enthält, wird zu Kupferplatten gegossen, die als Kathoden zur weiteren Aufreinigung der sogenannten „Raffinationselektrolyse“ unterzogen werden. Dabei werden neben hochreinem Kupfer auch wertvolle Edelmetalle zurückgewonnen.

### Kupferraffination



#### INFO FÜR LEHRKRÄFTE

- Arbeitsblatt 3.3: Raffinationselektrolyse
- Experiment 3.1: Elektrolytische Abscheidung von Kupfer aus einer Kupferlegierung
- Experiment 3.2: Direktelektrolyse von Leiterplatten

### 3.3.2 Seltenerdmetalle

Handy, Laptop, Elektromotor oder Windturbine haben eines gemeinsam: Will man sie herstellen, sind Metalle der Seltenen Erden ein unverzichtbarer Rohstoff.<sup>37</sup> So werden beispielsweise Neodym und Dysprosium benötigt, um leistungsfähige Permanentmagnete zu bauen, die in Motoren für Elektrofahrzeuge oder in Generatoren für Windkraftwerke eingesetzt werden. Im Smartphone sorgen diese Metalle dafür, dass der Vibrationsmotor Signale geben kann und Leuchtstoffe ein brillantes Display liefern.

Die Bezeichnung „Seltene Erden“ ist ein wenig irreführend. Sie sind gar nicht so selten. Die Bezeichnung rührt daher, dass diese Metalle in der Regel nicht in größeren Lagerstätten vorkommen, sondern breit verteilt als geringe Begleitbestandteile in anderen Erzen vorliegen. Die Förderung und die Aufbereitung sind daher sehr aufwendig. Da das Angebot auf dem Weltmarkt für diese Rohstoffe knapp bleiben wird, bezeichnet man sie auch als „kritische Rohstoffe“. Es ist nicht sicher, ob es mittel- bis langfristig genug davon geben wird. Aus diesem Grund

Kupfer wird dabei anodisch oxidiert und scheidet sich an der Kathode hochrein wieder ab. Die noch im Kupfer enthaltenen anderen Metalle werden auf diese Weise vom Kupfer getrennt. Dabei sammeln sich im sogenannten Anodenschlamm die Metalle mit einem höheren Standardpotenzial wie Silber, Gold oder Palladium.



<sup>37</sup> ISE Fact sheet (2019) Seltenen Erden – wichtige Ressourcen für Hochtechnologie. | Institut für Seltene Erden und Metalle <https://institut-seltene-erden.de/ise-fact-sheet-2019-seltenen-erden-wichtige-ressourcen-fuer-hochtechnologie/> (30.07.2024)

wird an Alternativen geforscht, die den Einsatz von Seltenerdmetallen reduzieren oder gänzlich überflüssig machen.

Aber auch an neuen Recyclingverfahren wird geforscht.

#### HINWEIS

Bislang haben Seltene Erden globale Recyclingraten von unter einem Prozent.

Für das Recycling aus Elektroschrott sind dabei besondere Herausforderungen zu meistern. Ein Grund ist, dass Seltenerdmetalle beispielsweise in Smartphones nur in geringen Mengen vorkommen und komplex verbaut sind, was ein Recycling aufwendig macht. Ein zentrales Forschungsziel ist es daher, in geschredderten Elektronikgeräten zielgenau verschiedene Komponenten zu erkennen und zu isolieren. Aufbauend auf bereits in der Praxis vorhandenen Systemen der Erkennung und Trennung von Komponenten, wie etwa der Nah-Infrarotspektroskopie (NiR) bei der Kunststoffsortierung, werden neue optische Sensoren entwickelt, die eine zerstörungsfreie Analyse und eine extrem schnelle Bildgebung ermöglichen. Der entscheidende Fortschritt soll jedoch dadurch erzielt werden, dass die erfassten Bilddaten mittels modernster Methoden des maschinellen Lernens und sogenannter „Deep-Learning-Ansätze“ integriert und interpretiert werden.

#### HINWEIS

Deep-Learning-Modelle sind in der Lage, von sich aus zu lernen. Das passiert, indem die Systeme das Erlernte immer wieder mit neuen Inhalten verknüpfen und dadurch erneut dazulernen. Beim eigentlichen Lernvorgang greift der Mensch nicht mehr ein, das Analysieren wird der Maschine überlassen.

Es wird erwartet, dass mittels dieser Verfahren in absehbarer Zeit hochkomplexe Stoffgemische wirtschaftlich getrennt und einer Wiederverwertung zugeführt werden können. So können Komponenten mit Anteilen an Seltenerd-

metallen besser abgetrennt und angereichert werden, was zu einer wirtschaftlich tragfähigen Wiedergewinnung dieser Metalle führt.

### 3.4 Beispiel Fernseher und Bildschirme

Bei der Verwertung von Bildschirmen und Monitoren sowie Gasentladungslampen ist besondere Sorgfalt geboten: Klassische CRT-Bildschirmröhren (Englisch: Cathode Ray Tube) enthalten Blei, Gasentladungslampen enthalten Quecksilber und sind häufig noch in Flachbildschirmen enthalten.

Während die in Verkehr gebrachte Menge an Gasentladungslampen und Fernsehbildschirmen kontinuierlich sinkt, erhöht sich die Zahl der verkauften Flachbildschirme und Computermonitore.

In den Abbildungen 30 und 31 ist aufgezeigt, aus welchen Fraktionen alte und neuere Bildschirme bestehen.<sup>38</sup>

Die Flachbildschirmtechniken haben die klassischen Röhrenfernsehgeräte mit Kathodenstrahlröhren abgelöst. CRT-Geräte werden in Deutschland nicht mehr auf den Markt gebracht.

Verwertungsaufbereitung und Recycling der verbauten Materialien sind bei allen Bildschirmtypen mit aufwendigen Prozessen verbunden, da eine Zerkleinerung der ausgedienten Geräte aufgrund der spezifischen Beladung mit Problemstoffen nicht möglich ist.

Mangels geeigneter Absatzwege für Glas aus dem Bildschirmrecycling werden große Teile des Glasbruchs aus der Behandlung von CRT-Geräten als Mischglas im Bergversatz, das heißt zur Auffüllung von Hohlräumen im Bergbau verwertet. Bleifreie reine Gläser werden zum Beispiel auch für Glasuren oder in der Keramikindustrie verwendet.

<sup>38</sup> Elektro-ade. Bildschirmgeräte. <https://www.elektro-ade.at/elektrogeraete-verwerten/bildschirmgeraete/> (06.07.2024)

Der Generationenwechsel von Röhrenbildschirmen hin zu LCD-Flachbildschirmen hat neue Herausforderungen an die Verwertungsindustrie gestellt. Kunden können beim Kauf eines Flachbild-Fernsehers aktuell zwischen drei bild erzeugenden Technologien wählen: Flüssigkristall (LCD), Leuchtdiode (LED) und organische Leuchtdiode (OLED). Die Varianten unterscheiden sich in den Materialien und als Folge davon auch in Aufbau und Herstellungsprozessen sowie in den Wegen der Verwertung.

So besteht die Hintergrundbeleuchtung von LCD-Geräten (englisch: Liquid Crystal Display, LCD) der ersten Generation aus kleinen Gasentladungslampen, die quecksilberhaltig sind und daher im Entsorgungsprozess nicht einfach zerkleinert werden können. Das in den Lampenröhren enthaltene Quecksilber muss vielmehr in speziellen Anlagen abdestilliert und zurückgewonnen werden.

Bei der heutzutage verkauften Generation von Geräten werden LEDs als Hintergrundbeleuchtung eingesetzt, diese enthalten kein Quecksilber.

ABBILDUNG 30

**Materialfraktionen aus Röhrengeräten**

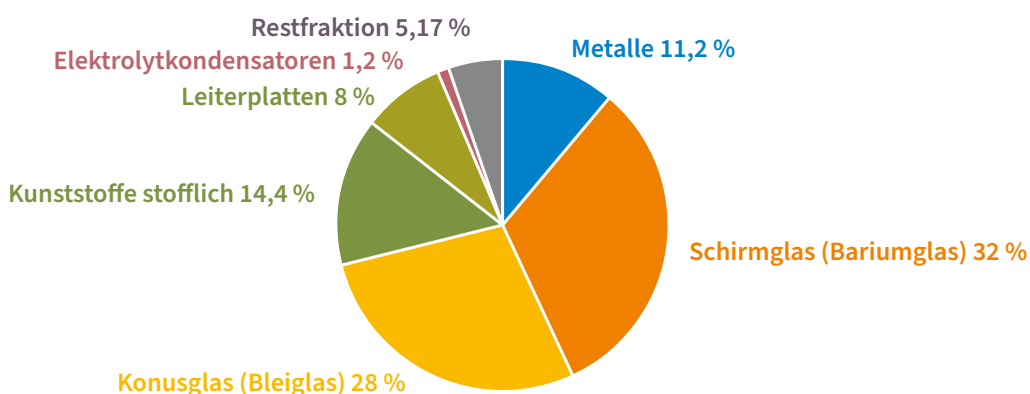
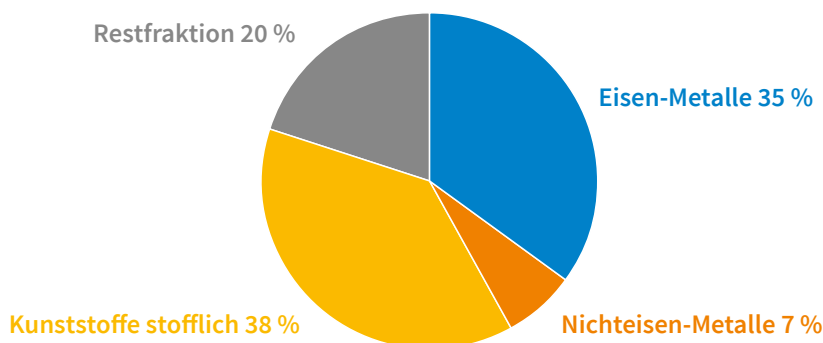


ABBILDUNG 31

**Materialfraktionen aus Flachbildschirmen**



### 3.5 Ausblick

Die bisherigen Ausführungen verdeutlichen, dass die enorme Zunahme von Elektroschrott aufwendige Recyclingprozesse erfordert. Ein Grund hierfür ist, dass viele elektronische Geräte nicht so konstruiert sind, dass sich eine Kreislaufwirtschaft etablieren kann. Aber welche Herausforderungen und Barrieren sind beim Übergang von linearen zu zirkulären Geschäftsmodellen (Circular Business Models, CBMs) zu überwinden?<sup>39, 40</sup>

So hat zum Beispiel ein moderner Fernseher Hightech-Komponenten, die eher kurze Innovationszyklen haben, während andere Komponenten sich langsam erneuern und daher langlebig sein sollten. Der Fernseher ist somit ein gutes Beispiel, um den Vorteil eines modularen Aufbaus von Elektrogeräten zu veranschaulichen, der die Voraussetzung für eine technologische Um- und Aufrüstung ermöglicht. Das modulare Produktdesign des Fernsehers kann den Austausch von sich schnell erneuernden Komponenten ermöglichen und damit die Betriebszeit des Gerätes verlängern. Zudem besteht bei modernen Fernsehern die Möglichkeit, die Technologie durch Software-Upgrades auf dem neuesten Stand zu halten, was generell ein sehr nützliches Instrument zur Erhöhung der Produktbetriebszeit darstellt.

In Zukunft wird Schritt 3 in dem in Abbildung 32 dargestellten Kreislauf eine deutlich größere Rolle spielen müssen. Eine Reihe von Firmen hat sich bereits darauf eingestellt. Sie bieten reparaturfreundliche Geräte an und nehmen gebrauchte und defekte Geräte wieder zurück. Auch etablieren sich zunehmend sogenannte Repair-Cafés, die defekte Komponenten gegen neue – oder gegen noch intakte aus ansonsten nicht reparierbaren Geräten – austauschen. Darauf aufbauend finden sich neue Geschäftsmodelle, bei denen die Elektrogeräte nicht gekauft, sondern gemietet werden. Auf diese Weise bleiben die Geräte Eigentum der Anbieter, werden zurückgenommen und repariert und gegebenenfalls geregelt entsorgt. Die Firmen weisen darauf hin, dass sie nur reparaturfreundliche Geräte im Angebot haben, die modular aufgebaut sind und gegebenenfalls aufgerüstet werden können, wenn der technologische Fortschritt dies notwendig macht.<sup>41</sup>

Betrachtet man für ein kleines Smartphone dessen „ökologischen Rucksack“, der den in Kilogramm gemessenen Materialbedarf eines Produktes über seinen gesamten Lebenszyklus hinweg beschreibt, so wird deutlich, wie wichtig ein Umdenken im Umgang mit elektronischem Gerät ist. So hat ein ca. 80 Gramm schweres Handy einen ökologischen Rucksack von 75,3 Kilogramm. Er übersteigt damit das Eigengewicht des Gerätes um fast das Tausendfache. Der Roh-

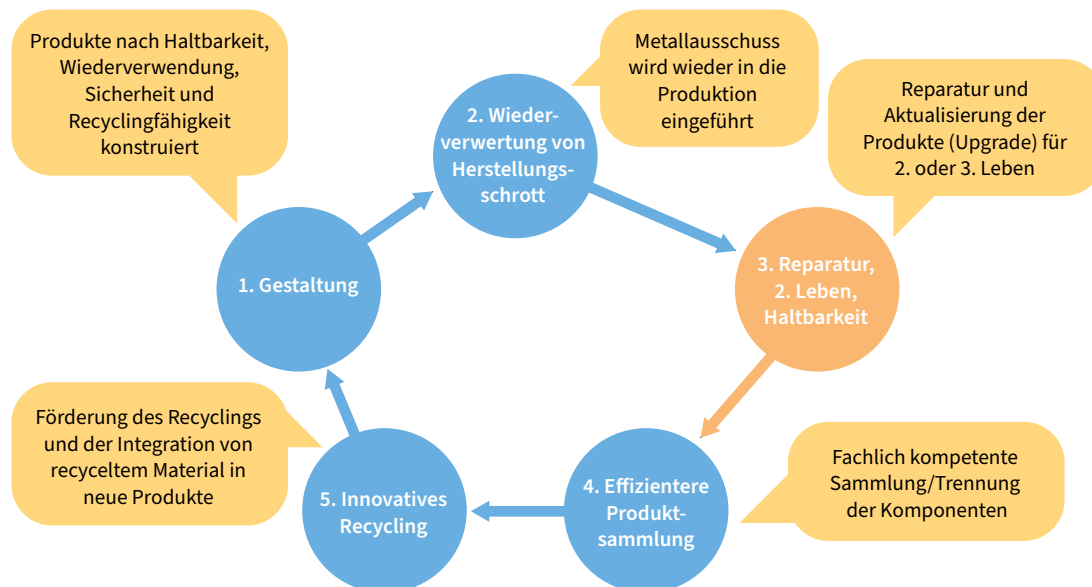


<sup>39</sup> acatech/Circular Economy Initiative Deutschland/SYSTEMIQ (Eds.) (2017). *Circular Business Models: Overcoming Barriers, Unleashing Potentials* – Kap. 8, S. 71–83. <https://en.acatech.de/publication/circular-business-models-overcoming-barriers-unleashing-potentials/> (30.07.2024)

<sup>40</sup> World Economic Forum (2019). *A New Circular Vision for Electronics – Time for a Global Reboot*. [https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_A\\_New\\_Circular\\_Vision\\_for\\_Electronics.pdf](https://www3.weforum.org/docs/WEF_A_New_Circular_Vision_for_Electronics.pdf) (30.07.2024)

<sup>41</sup> Die Kooperative für nachhaltige Elektronik. <https://commown.coop/de/> (06.07.2024)

## Anforderungen an eine Kreislaufwirtschaft für Elektrogeräte



stoffverbrauch für die Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Handys ist somit sehr hoch und führt zu Umweltbelastungen, die zum großen Teil vermeidbar wären.<sup>42</sup> Dazu beitragen können Geschäftsmodelle, die den Kreislaufgedanken in sich tragen.



<sup>42</sup> Informationszentrum Mobilfunk (2019). Rohstoffe und Lebenszyklus eines Mobiltelefons. <https://www.informationszentrum-mobilfunk.de/2023/05/09/oekologischer-rucksack/?highlight=Lebenszyklus> (03.06.2024)

## Batterie für die Elektromobilität

Im Juli 2021 war es so weit: Erstmals waren in Deutschland mehr als eine Million Fahrzeuge mit Elektroantrieb zugelassen, sogenannte Plug-in-Hybride eingeschlossen. Damit erreichte ihr Anteil am gesamten Kraftfahrzeugbestand etwa 1,7 Prozent. Was langsam begann, hat nun Fahrt aufgenommen. Die Politik forciert diesen Trend, und auch die Hersteller setzen verstärkt auf Fahrzeuge mit Elektroantrieb.

Auch in anderen Ländern und Weltregionen kommt die Elektromobilität zunehmend in Schwung. Besonders ehrgeizig bei den Ausbauplänen der E-Mobilität ist zum Beispiel Norwegen. Dort soll es ab 2025 überhaupt keine Zulassungen für Autos mit Verbrennungsmotor mehr geben.

### HINWEIS

Eine Million Kennzeichen mit dem charakteristischen „E“ gab es im Juli 2021 in Deutschland.



### HINWEIS

Bundesweit gibt es über 123.000 öffentliche Ladepunkte für die Nutzer von Elektroautos, davon über 25.000 sogenannte Schnellladepunkte (Stand: März 2024). Bis 2030 soll das Netz auf eine Million Ladepunkte steigen.

### INFO FÜR LEHRKRÄFTE

Arbeitsblatt 4.1  
Gibt es ausreichend grünen Strom für die Elektromobilität.

## 4.1 Elektromobilität nimmt Fahrt auf

Der Trend zur E-Mobilität hat einen guten Grund: Die Emission von Treibhausgasen muss drastisch sinken. Im Verkehrssektor der, bezogen

auf CO<sub>2</sub>-Äquivalente, 2019 etwa ein Fünftel aller CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland verursachte, wird eine Reduktion um 42 Prozent bis 2030 angestrebt. Einen wichtigen Beitrag dazu muss die Elektromobilität leisten. Bis 2030 sollen dazu laut Bundesregierung 15 Millionen E-Autos auf die Straßen gebracht werden.



Das Herzstück jedes Elektrofahrzeugs ist die wiederaufladbare Antriebsbatterie, bei der möglichst hohe Energiedichten wichtig sind, um akzeptable Reichweiten zu ermöglichen. Aus diesem Grund haben sich recht schnell Lithium-Ionen-Batterien (LIB) durchgesetzt. Also dieselbe Technologie, die auch schon den Strom für Smartphones, Notebooks, Akkuschauber und viele andere Geräte speichert.

Die Vorteile von Lithium sind schnell zu verstehen. Mit einer Molmasse von 6,94 Gramm ist Lithium so leicht wie kein anderes für Redox-Reaktionen geeignetes Metall. Zudem beträgt das elektrochemische Standardpotenzial des Redox-Paars Li/Li<sup>+</sup> -3,05 Volt – und ermöglicht besonders hohe Zellspannungen. Entsprechend ist die in LIB speicherbare spezifische Energie mit über 250 Wattstunden je Kilogramm (Wh/kg) mehr als achtmal so groß wie etwa die von Blei-Akkus (30 Wh/kg).<sup>43</sup>

### HINWEIS

Lithium besteht aus kleinen Atomen; es ist das leichteste Metall. Außerdem ist das Standardpotenzial mit -3,05 Volt relativ groß. Das zusammen ermöglicht eine große spezifische Energie (also Energie pro kg) von Batterien auf Li-Ionen-Basis.

<sup>43</sup> Chemie in unserer Zeit 1/2016, S. 32

## 4.2 Nichts geht ohne Lithium-Ionen-Batterie

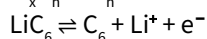
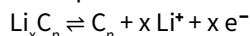
### Aufbau der derzeit gebräuchlichen Li-Ionen-Akkus

Eine Lithium-Ionen-Batterie (LIB) besteht aus zwei Halbzellen, in der Regel aus einer graphitischen Anode und einem Lithiummetalloxid als Kathode. Zwischen beiden Elektroden befindet sich eine poröse Membran, der Separator, üblicherweise aus einem Kunststoff, sowie als leitendes Medium ein Lithiumsalz in einem organischen Lösungsmittel als Elektrolyt.

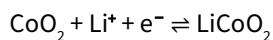
Vereinfacht können die Entlade- und Ladevorgänge wie folgt angegeben werden:

Entladung (→) und Ladung (←)

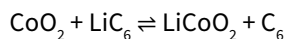
Minuspol



Pluspol (bei beispielhafter Verwendung von Kobaltoxid als Elektrodenmaterial):



Zusammengefasst als Redox-Gleichung:



Die LIB werden ständig weiterentwickelt, insbesondere was das Kathodenmaterial betrifft. Heute dominieren Mischoxide, die neben Kobalt auch Nickel und Mangan enthalten.

Für eine solche Version lässt sich die Redox-Gleichung zum Beispiel wie folgt formulieren:

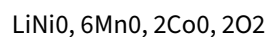
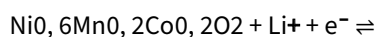
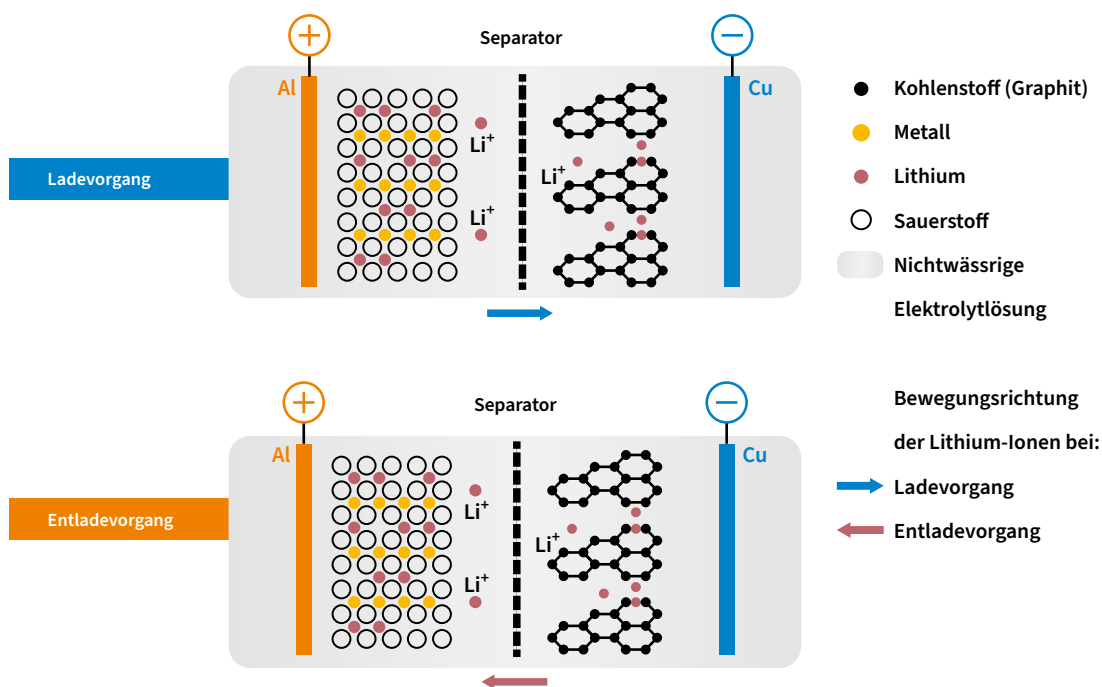


ABBILDUNG 33

### Aufbau einer Lithium-Ionen-Batterie<sup>44</sup>



<sup>44</sup> Aus: Chemie – Schlüssel zur Energie von morgen (Abbildung 7-1-5 (Seite 58)), FCI, 2020

**TABELLE 4**

**Gewichtsanteile der jeweiligen LIB-Komponenten und der dafür verwendeten Materialien<sup>45</sup>**

Batteriekomponenten	Material	Gew.-%
Gehäuse	Stahl oder Aluminium	20–25
Kathode	NMC, NCA, LFP oder LMO	25–35
Anode	Graphit	14–19
Elektrolyt	Lithiumsalz in einer organischen Lösung	10–15
Kathoden-Kollektorfolie	Aluminium	5–7
Anoden-Kollektorfolie	Kupfer	5–9
Separator	PP, PE-Kunststoff	1–4
Additiva	Carbon black, Silicium etc.	

(NMC: Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid, NCA: Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxide, LFP: Lithium-Ferrophosphat, LMO: Lithium-Manganoxid)

Weitere Metalle kommen als Träger für die jeweiligen Elektrodenmaterialien zum Einsatz. Eine Übersicht über die einzelnen Komponenten einer Batterie und die Gewichtsanteile der jeweils verwendeten Materialien findet sich in Tabelle 4.

### 4.3 Die Rohstoffe

Eine Batterie für die Elektromobilität sollte möglichst viel Energie speichern, über viele Lade- und Entladezyklen hinweg stabil und ohne Kapazitätsverlust arbeiten, sich schnell aufladen lassen, nicht zu schwer und voluminös sein, und die benötigten Rohstoffe sollten gut verfügbar sein.

Die Ereignisse im Jahr 2022 haben deutlich gemacht, wie sehr die Versorgungslage für einzelne Rohstoffe durch nicht immer vorhersehbare weltpolitische Entwicklungen auch sehr kurzfristig beeinträchtigt werden kann.

Angesichts der rasant steigenden Nachfrage nach E-Autos gewinnt die Verfügbarkeit der Rohstoffe stark an Bedeutung. Prognosen be-

sagen, dass im Jahr 2030 weltweit zehn bis zwanzigmal so viele Batterien für die Fahrzeugproduktion benötigt werden wie 2020.

Auch in Deutschland entstehen derzeit vielerorts Produktionsstätten für LIB. Die Deutsche Rohstoffagentur hat kalkuliert, dass allein diese deutschen Werke bei voller Auslastung im Jahr 2030 Lithium und Kobalt in Mengen benötigen, die 30 Prozent (Lithium) bzw. 41 Prozent (Kobalt) der gesamten globalen Fördermenge im Jahr 2018 entsprechen.

#### INFO FÜR LEHRKRÄFTE

In Elektroautos werden zurzeit nahezu ausschließlich Lithium-Ionen-Akkus eingesetzt.

Arbeitsblatt 4.2  
Bewährte Akkutechnologie

<sup>45</sup> DERA (2021): Batterierohstoffe für die Elektromobilität. – DERA Themenheft, Berlin. [https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/DERA%20Themenheft-01-21.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/DERA%20Themenheft-01-21.pdf?__blob=publicationFile&v=2) (01.08.2024)

### 4.3.1 Lithium

Große Lithiumsalzvorkommen gibt es derzeit vorwiegend in Australien und in Südamerika vorhanden. 2019 gingen 65 Prozent des gefördert Lithiums in die LIB-Produktion, wobei bereits ein erheblicher Teil auf die Elektromobilität entfiel. Doch gerade das Segment der Hochleistungsspeicher (mobil und stationär) wird Schätzungen zufolge so sehr die Nachfrage steigen, dass der Lithium-Bedarf allein für diese Speichertechnologien im Jahr 2030 beim Vier- bis Sechsfachen der Fördermenge von 2018 liegen könnte.<sup>46</sup>

Damit ist klar: Um die wachsende Nachfrage nach LIB sichern zu können, ist eine Kreislaufwirtschaft für das Metall unabdingbar.

#### HINWEIS

Auch in Deutschland werden derzeit Fördermöglichkeiten erkundet, so etwa im Erzgebirge und im Oberrheingraben. Die im sächsischen Zinnwald vermutete Lithium-Menge würde Schätzungen zufolge Rohstoff für 20 Millionen Fahrzeug-Batterien liefern<sup>47, 48</sup>. Im Oberrheingraben wiederum versucht man, Lithium aus dem von Geothermieanlagen geförderten Thermalwasser zu extrahieren. Damit könnte jährlich genug Lithium für 20.000 Batterien bereitstehen.<sup>49</sup> Weitere europäische Projekte zur Lithium-Förderung gibt es in Österreich, Finnland und Großbritannien.

### 4.3.2 Kobalt

Für Kobalt hat die Deutsche Rohstoffagentur schon vor einigen Jahren „hohe Versorgungsrisiken“ ausgemacht.<sup>50</sup> Diese haben ihre Ursache darin, dass Kobalterze nur in wenigen Ländern der Erde gefördert werden. So stammt derzeit die weltweit größte Fördermenge aus der Demokratischen Republik DR Kongo. Gerade in diesem Land gilt die Förderung als problema-

tisch, da es neben dem industriellen Bergbau auch Kleinbergbau mit oft schwer zu kontrollierenden Bedingungen und in einigen Fällen auch Menschenrechtsverletzungen gibt.



Auch die weitere Verarbeitung (Raffination) der Kobalterze ist auf wenige Länder konzentriert, was zu weiteren Abhängigkeiten und Preisinstabilitäten führen kann. Aus diesen Gründen ist die Batterieforschung bestrebt, Kobalt in LIB mittelfristig zu ersetzen. Schon die heutigen Batterien enthalten wesentlich weniger Kobalt als ältere Versionen.

### 4.3.3 Nickel

Bei Nickel ist die Versorgungssituation aufgrund der deutlich größeren weltweiten Produktionsmengen zumindest derzeit noch etwas entspannter. Bisher wird der größte Teil der weltweiten Fördermenge in Edelstahl und Legierungen verarbeitet, während 2018 nur ein Anteil von fünf Prozent in die Batterieproduktion ging. Aber die Nachfrage für die LIB-Produktion steigt rasant, so dass die Situation schon in wenigen Jahren anders sein könnte, zumal es einen Trend zu höheren Nickel- und geringeren Kobalt-Anteilen im Kathodenmaterial gibt. Derzeit wird bereits an vielen Lagerstätten die Fördermenge erhöht, und es gibt zahlreiche Pro-

<sup>46</sup> Marscheider-Weidemann, F. et al. (2021). *Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021*. – DERA 5RKVWRI;QIRUPDWLRQH 50: 366 S., Berlin. [https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Laufende-Projekte/Rohstoffwirtschaft/Zukunftstechnologien/lp-zukunftstechnologien\\_node.html](https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Laufende-Projekte/Rohstoffwirtschaft/Zukunftstechnologien/lp-zukunftstechnologien_node.html) (01.08.2024)

<sup>47</sup> Deutschlandfunk (2020). <https://www.deutschlandfunk.de/lithium-im-erzgebirge-goldgraberstimmung-in-sachsen-100.html> (01.08.2024)

<sup>48</sup> Taz (2022). *Lithiumabbau im sächsischen Zinnwald: Zukunft unter Tage*. <https://taz.de/Lithiumabbau-im-saechsischen-Zinnwald/!5823635/> (01.08.2024)

<sup>49</sup> [https://www.kit.edu/kit/pi\\_2020\\_118\\_nachhaltigkeit-im-blick-lithium-aus-dem-oberrheingraben-fur-batterien.php](https://www.kit.edu/kit/pi_2020_118_nachhaltigkeit-im-blick-lithium-aus-dem-oberrheingraben-fur-batterien.php) (01.08.2024)

<sup>50</sup> [https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/DERA%20Themenheft-01-21.pdf;jsessionid=159E2F06A-4F8528AEF4A66FCBFC2BBB0.2\\_cid284?\\_\\_blob=publication](https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/DERA%20Themenheft-01-21.pdf;jsessionid=159E2F06A-4F8528AEF4A66FCBFC2BBB0.2_cid284?__blob=publication) (01.08.2024)

jekte, um mögliche weitere Nickel-Vorkommen zu erkunden. Mit nennenswerten Beiträgen aus dem LIB-Recycling wird erst für die 2030er-Jahre gerechnet.



Bei Aluminium und Kupfer hat die batteriebedingte Nachfrage bisher keinen nennenswerten Anteil an der globalen Produktion.

#### INFO FÜR LEHRKRÄFTE

Arbeitsblatt 4.3  
Die CO<sub>2</sub>-Bilanz der Batterieproduktion

### 4.4 Wenn der Energiespeicher in die Jahre kommt

Irgendwann setzen die vielen Lade- und Entladezyklen dem Innenleben der einzelnen Zellen zu. Das liegt auch an den permanenten kleinen Volumenänderungen im Elektrodenmaterial. Sie werden dadurch hervorgerufen, dass Lithium-Ionen beim Entladen aus den Graphitschichten der Anode in den Elektrolyten wandern und sich in der anderen Halbzelle zugleich Lithium-Ionen zwischen den Metalloxidschichten einlagern. Während des Ladens verläuft es umgekehrt: Lithium-Ionen verlassen die Metalloxidschichten der Kathode und lagern sich zwischen die Graphitschichten der Anode. Mit der Zeit sorgen diese steten Volumenschwankungen für irreversible Strukturveränderungen in den Elektrodenmaterialien. Mit langsamen Ladegeschwindigkeiten kann man diesen Effekt abmildern und verzögern.

#### HINWEIS

##### Die CO<sub>2</sub>-Bilanz der Batterieproduktion

Auf den ersten Blick erscheint die Elektromobilität sauberer und nachhaltiger als das Benutzen von Fahrzeugen mit klassischem Verbrennungsmotor. Aber zur ganzheitlichen Betrachtung gehört auch, sich den ökologischen Fußabdruck anzuschauen, den einzelne für die Elektromobilität notwendige Komponenten verursachen. Wie das für die Lithium-Ionen-Batterien aussieht, damit hat sich das schwedische Umweltinstitut IVL befasst. Demnach wurden 2019 bei der LIB-Herstellung pro kWh Ladekapazität zwischen 61 und 106 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente freigesetzt.<sup>51</sup> Die Autoren weisen darauf hin, dass die Bilanz umso besser wird, je mehr erneuerbare Energien bei der Produktion zum Einsatz kommen.



#### TABELLE 5

Anteil der Batterieproduktion (einschließlich LIB) am Weltmarkt der jeweiligen Rohstoffe (2019)<sup>52</sup>

Lithium	Kobalt	Mangan	Nickel
65%	59%	3%	5%

<sup>51</sup> <https://www.ivl.se/download/18.694ca0617a1de98f473464/1628416191286/FULLTEXT01.pdf> (30.07.2024)

<sup>52</sup> Nach Angaben der Deutschen Rohstoffagentur 2021

Hinzu kommt, dass metallisches Lithium während des Ladevorgangs nicht nur zwischen den Graphitschichten wandert, sondern sich auch an der Oberfläche der Anode abgelagert und Dendriten bildet. Dieses Lithium steht dann nicht mehr für die Energiespeicherung zur Verfügung. Langfristig besteht sogar das Risiko, dass Dendriten in die andere Halbzelle hineinwachsen und einen Kurzschluss erzeugen.

Inzwischen helfen integrierte Managementsysteme, solche Alterungsphänomene zu verhindern oder hinauszuzögern – und so die Lebensdauer zu erhöhen. Doch trotz aller Managementsysteme und guter Behandlung: Irgendwann muss eine Batterie ausgetauscht werden.

#### 4.5 Stand des Recyclings von Lithium-Ionen-Akkus

Für viele Batterietypen existieren etablierte Recyclingverfahren. Nicht ohne Grund stehen in Supermärkten oder Drogerien Sammelbehälter, in die man kleine Altbatterien, etwa vom Typ AA oder AAA, geben kann. Auch der klassische Blei-Akku, der in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor als Starterbatterie fungiert, findet am Ende seiner Zeit unter der Motorhaube in der Regel seinen Weg ins Recycling. Die sogenannte Recyclingeffizienz liegt bei den Blei-Säure-Batterien mit 82 Prozent höher als bei anderen Batterietypen.

Ganz so ausgereift ist das Rücknahme- und Wiederverwertungsverfahren bei den LIB noch nicht. Zwar gibt es Unternehmen, die Altbatterien aus Laptops, Handys oder Akkuschraubern recyceln und dabei vor allem die Kathodenme-

talle zurückgewinnen. Für eine echte Kreislaufwirtschaft fehlt es bisher aber an einer ausreichenden Rücklaufquote. Alte Handys, Smartphones oder Notebooks bleiben häufig in Schubladen liegen, weil sie eigentlich noch intakt sind, aber von moderneren Gerätemodellen ins Abseits befördert wurden.

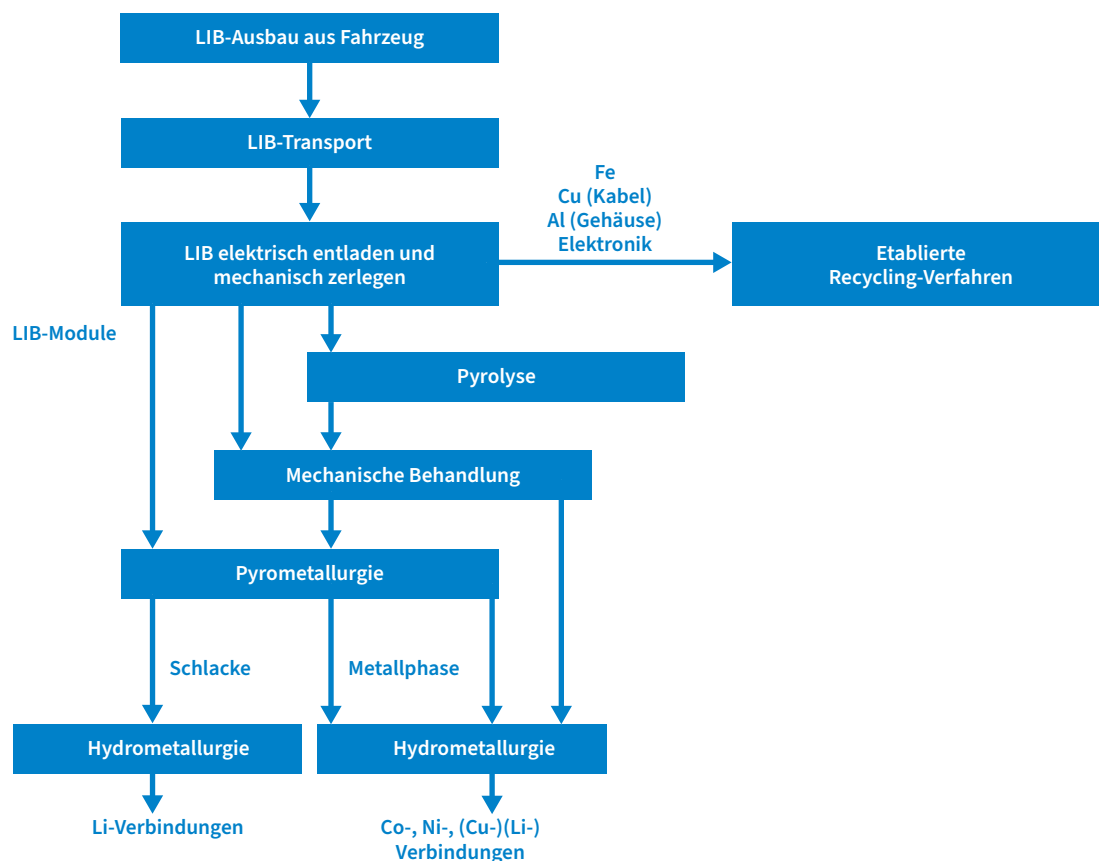
Mit einem nennenswerten Aufkommen an Altbatterien aus der Elektromobilität wird erst Ende der 2020er-Jahre gerechnet.

Noch ist nicht sicher, wie deren weiteres Schicksal dann genau aussieht und ob sie wirklich sofort einem Recycling zugeführt werden. Denkbar ist auch, dass sich viele dieser Batterien noch für andere Einsatzzwecke eignen. Wenn eine LIB im Laufe der Zeit 20 Prozent ihrer Speicherkapazität verloren hat, mag sie für das Fahrzeug uninteressant geworden sein. Dennoch können die verbliebenen 80 Prozent durchaus noch als Solarstromspeicher im Keller eines Ein- oder Mehrfamilienhauses dienen.

Dennoch: Irgendwann wird jede Batterie ausgedient haben. Dann stellt sich die Frage nach der Wiederverwertung.



## Schematischer Ablauf eines Recyclings von LIB aus der E-Mobilität



## 4.5.1 Das Zerlegen

Der industrielle Maßstab des Elektromobilitäts-LIB-Recyclings fehlt bisher aufgrund des (noch) begrenzten Bedarfs. Einige Firmen testen jedoch Laborverfahren oder Pilotanlagen, basierend auf kleineren Elektrogeräte-LIB-Recycling-Methoden. Doch diese sind für Fahrzeug-LIB nicht optimal vorbereitet. Größere Batteriemodule aus Fahrzeugen müssen zuerst zerlegt werden, indem sie von Gehäusen, Kühlleitungen, Managementsystemen und Kabeln getrennt werden. Dann werden die Zellmodule getrennt verarbeitet, oft durch Kombination von pyrometallurgischen und hydrometallurgischen Verfahren, um die enthaltenen Metalle voneinander zu trennen und in möglichst reiner Form zurückzugewinnen. Manche Verarbeiter behandeln das Material thermisch oder mechanisch, um organische Bestandteile zu entfer-

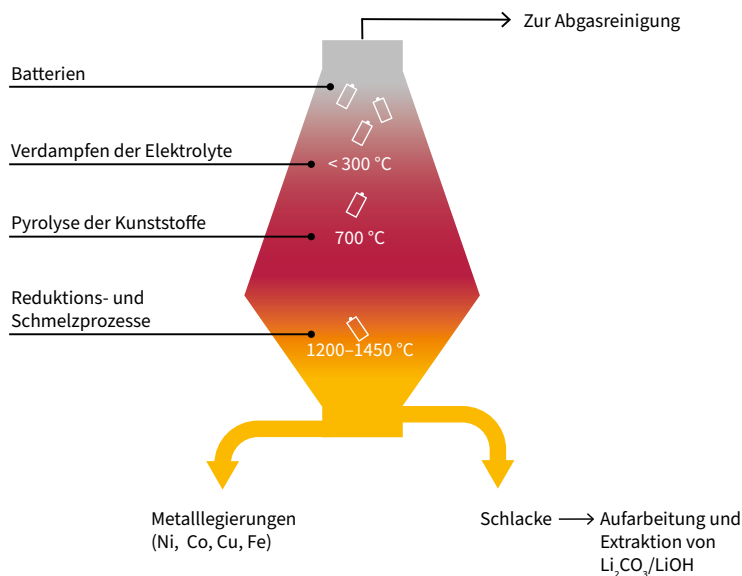
nen. Eine mögliche Prozessroute beginnt mit Pyrometallurgie, während „Alternative Routen“ Abweichungen beschreiben. Einen Überblick über die derzeit existierenden Ansätze gibt eine 2020 erschienene Vergleichsstudie.<sup>53</sup>

## 4.5.2 Ab in den Hochofen

Verwerter, die direkt mit dem pyrometallurgischen Prozess starten, geben die demontierten Zellen oder Module zunächst in eine Art Hochofen. Ein Kohlenstofflieferant wie Koks sorgt bei einer Temperatur von über 1000 Grad Celsius dafür, dass die Metalloxide aus dem Kathodenmaterial reduziert werden, bis die jeweiligen Metalle, also zum Beispiel Kobalt und Nickel, geschmolzen vorliegen. Wurden Komponenten wie Graphit, der organische Elektrolyt oder Kunststoffbauteile zuvor nicht pyrolytisch

<sup>53</sup> <https://accurec.de/wp-content/uploads/2021/04/Accurec-Comparative-study.pdf> (10.08.2024)

### Pyrometallurgische Behandlung von LIB-Modulen



oder mechanisch abgetrennt, verbrennen sie jetzt und liefern dabei noch Energie sowie Reduktionspotenzial und können so einen Teil des eingesetzten Kokes ersetzen. Fluor aus dem Elektrolytmaterial wird, wie auch emittierte Flugasche, aus den Verbrennungsgasen abgetrennt und als Sondermüll entsorgt. Darüber hinaus sorgt ein Hochtemperatur-Nachbrenner dafür, dass gefährliche Emissionen wie etwa Dioxine oder Furane vor der Freisetzung zu unproblematischen Substanzen verbrannt werden.

Im Ofen selbst bleibt eine metallische Phase zurück, die Kupfer, Kobalt und Nickel enthält. Daneben fällt Schlacke an, in der sich auch Lithium und Aluminium befinden. Die metallische Phase wird von der Schlacke getrennt und kann nun hydrometallurgisch, also nasschemisch, weiterbearbeitet werden.

#### HINWEIS

Metallurgie bezeichnet die Prozesstechnik zur Gewinnung und Veredelung (Raffination) von Metallen. Es gibt thermische (Pyro-) und nasschemische (Hydro-) Metallurgieverfahren.

#### 4.5.3 Die eigentliche Trennung

Die metallische Phase aus dem Hochofen wird nun mit starken Säuren wie Salz- und/oder Schwefelsäure versetzt, um die enthaltenen Metalle zu lösen. Diese lassen sich dann mit der sogenannten Flüssig-Flüssig-Extraktion voneinander trennen. Dabei kombiniert man zwei geeignete, nicht miteinander mischbare Flüssigkeiten, von denen eine besonders selektiv eines der gewünschten Metallionen löst – und damit von den übrigen Metallionen trennt, die in der anderen flüssigen Phase bleiben. Mit diesem Verfahren gelingt es, auch die chemisch einander sehr ähnlichen Nickel- und Kobaltionen voneinander zu trennen, so dass sie einer jeweiligen Wiederverwendung zugeführt werden können. Derartige Trennschritte sind nicht neu, sondern von der Erzverarbeitung bekannt.

#### INFO FÜR LEHRKRÄFTE

Arbeitsblatt 4.4  
Hochofenvergleich

Aus der Schlacke und auch aus dem Flugstaub kann in nachgeschalteten Prozessen Lithium extrahiert und schließlich in Form von Lithiumcarbonat oder Lithiumhydroxid abgeschieden – und wiederverwendet werden. Das Extraktionsverfahren dazu ist vergleichbar mit dem, mit dem man das Metall aus seinen natürlichen Vorkommen wie etwa dem Mineral Spodumen isoliert. Bisher wird diese Rückgewinnung beim LIB-Recycling allerdings so gut wie noch nicht angewendet. Bei steigender Nachfrage und entsprechenden politischen Vorgaben dürfte sich das aber in Zukunft ändern.

#### 4.5.4 Alternative Routen

Nicht jedes Unternehmen behandelt das komplette Modul- und Zellmaterial direkt metallurgisch. Mitunter werden auch mechanische Trennschritte vorgeschaltet, bei denen die Zellen in weitgehend automatisierten Prozessen bereits in einzelne Komponenten zerlegt werden. Dann lassen sich zum Beispiel die Elektrodenfolien aus Kupfer und Aluminium oder auch Zellgehäuseteile, mittlerweile aber auch Elektrolyt, Separatorfolie und Anoden-Graphit separieren und geeignet recyceln. Damit dies gelingt, verzichtet man zunächst auf thermische Prozessschritte. So wird nach dem Schreddern der Zellen (unter Inertgas) das Elektrolytgemisch (aus organischen Carbonaten) per Vakuumdestillation entfernt und wieder aufgefangen.

Eine weitere Möglichkeit ist es, das zerkleinerte Modulmaterial zunächst in eine Pyrolyse zu geben, also ein thermisches Verfahren unter Sauerstoffabschluss. Bei Temperaturen bis 600 Grad Celsius verdampfen organisches Elektrolytmaterial und Kunststoffteile. Die zurückbleibenden Metallkomponenten werden danach zerkleinert und den metallurgischen Prozessen zugeführt, um sie aufzutrennen und zu reinigen. Mangan (aus den NMC-Kathoden) wird derzeit noch nicht zurückgewonnen.

#### HINWEIS

Auch das LIB-Recycling hat einen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck. Es gibt Schätzungen, dass beim Recycling der pyrometallurgische Pfad mehr Emissionen je Tonne Batteriezellen verursacht als der hydrometallurgische.<sup>54</sup> Um die Verfahren überhaupt vergleichen zu können, ist es allerdings wichtig, immer die vollständige Prozesskette zu betrachten und die jeweils erzielten Metallausbeuten und -qualitäten sowie die Umweltauswirkungen zu berücksichtigen. Grundsätzlich gilt: Je höher die Metallkonzentration, desto CO<sub>2</sub>-effizienter die Metallgewinnung daraus.

#### 4.6 Der gesetzliche Rahmen

Die neue EU-Batterieverordnung ist am 17. August 2023 in Kraft getreten. Die Verordnung regelt den Umgang mit Batterien und Akkumulatoren in der gesamten EU und hat vier Hauptziele:

- Verankerung des Grundsatzes einer Kreislaufwirtschaft im Umgang mit Batterien und Akkumulatoren,
- Reduzierung der Schadstoffemissionen und anderer Umweltauswirkungen von Batterien und Akkumulatoren über ihren gesamten Lebenszyklus,
- Förderung der Verwendung umweltfreundlicherer Alternativen,
- Verbesserung der Information der Verbraucher und der Marktaufsicht.

Im Rahmen der Verordnung ist ein verpflichtender Mindestzyklatanteil für Industriebatterien, Starterbatterien und Traktionsbatterien vorgesehen. Dieser wurde zunächst auf 16 Prozent für Kobalt, 85 Prozent für Blei, 6 Prozent für Lithium und 6 Prozent für Nickel festgesetzt. Batterien müssen über einen Nachweis über den Rezyklatanteil verfügen. Für Nickel-Cadmium-Batterien wird ein Recyclingeffizienzziel von 80 Prozent bis Ende 2025 und für andere Altbatterien ein Recyclingeffizienzziel von 50 Prozent bis Ende 2025 festgelegt.

<sup>54</sup> Emilsson, E., & Dahllöf, L. (2019). *Lithium-Ion Vehicle Battery Production Status 2019 on Energy Use, CO<sub>2</sub> Emissions, Use of Metals, Products Environmental Footprint, and Recycling*. <https://www.ivl.se/english/ivl/publications/publications/lithium-ion-vehicle-battery-production----status-2019-on-energy-use-co2-emissions-use-of-metals-products-environmental-footprint-and-recycling.html> (06.08.2024)

## 4.7 Ausblick

Das Konzept der Lithium-Ionen-Batterie stammt aus den späten 1980er-Jahren. Es war damals eine Weiterentwicklung der zuvor entwickelten Lithium-Metall-Batterien. 1991 kamen die ersten LIB auf den Markt. Seither werden sie permanent weiterentwickelt. Dies betrifft insbesondere die Elektrodenmaterialien. So ist es inzwischen gelungen, die Kobaltmenge in der Kathode deutlich zu reduzieren. Forscher gehen davon aus, dass in einigen Jahren auch kobaltfreie Kathodenmaterialien mit stabilisierter Struktur verfügbar sind. Auch die LIB-Anode wird weiterentwickelt. So ist es inzwischen üblich, dem Graphit noch etwas Silicium beizumischen. Das erhöht die Aufnahmekapazität der Anode für Lithium – und damit die Speicherkapazität.

Die Lithium-Ionen-Technologie erfüllt derzeit am besten die Anforderungen an Speicherkapazität und Sicherheit im Elektromobilbereich. Weltweit wird aber intensiv an alternativen Batteriekonzepten geforscht. Eine mögliche Option sind Lithium-Metall-Batterien, insbesondere Lithium-Schwefel-Batterien, die vielversprechend sind, jedoch noch niedrige Energiedichten aufweisen.

Ein weiteres Konzept ist die Festkörperbatterie, bei der der Elektrolyt fest ist, was Vorteile in Sachen Lecksicherheit und Brandgefahr bringt. Die Verwendung von Festelektrolyten eröffnet auch Möglichkeiten für neue Anodenmaterialien wie Silizium oder Natrium. Schwankendes Elektrodenvolumen in Batterien mit festen Elektrolyten ist eine Herausforderung, an der Forschende arbeiten. Weitere Batteriekonzepte umfassen Metall-Luft-, Natrium-, Magnesium-, Zink- und Dual-Ionen-Batterien. Ökologisch interessant sind auch Arbeiten mit organischen Elektrodenmaterialien aus nachwachsenden Rohstoffen.<sup>55</sup>

### INFO FÜR LEHRKRÄFTE

Arbeitsblatt 4.5  
Lithium-Polymerzelle  
Experiment 4.1  
Lithium-Sauerstoff-Batterie

Der Ausbau der Elektromobilität wird in Zukunft zügig voranschreiten. Damit steigt auch die Nachfrage nach Antriebsbatterien weiter an. Um die Rohstoffe für deren Produktion zunehmend auch aus ausgedienten Altbatterien gewinnen zu können, entwickeln zahlreiche Unternehmen geeignete Verfahren und investieren in die nötige Infrastruktur, auch in Deutschland.

Doch ein effektiver Recyclingkreislauf erfordert auch einen geänderten Umgang mit gebrauchten Fahrzeugen. Der bisherige Export fahrtüchtiger Autos in Länder, in denen es keine Recyclinginfrastrukturen gibt, behindert ein geordnetes Batterie-Recycling. Eine Lösung könnte sein, ähnliche Recyclinginfrastrukturen in diesen Ländern aufzubauen oder den Batterieexport zu regulieren, um eine Wiederverwertung sicherzustellen.

### HINWEIS

Laut einer Studie des Wuppertal Instituts könnten bis 2030 „aus in Deutschland auf den Markt gebrachten E-Fahrzeugen“ 8.100 Tonnen Lithium, 27.800 Tonnen Kobalt und 25.700 Tonnen Nickel aus LIB zurückgewonnen werden.<sup>56</sup> Zum Vergleich: Die Lithium-Menge entspricht dem Zehnfachen dessen, was 2020 in Deutschland in Traktionsbatterien auf dem Markt war. Würden die Batterien in Deutschland recycelt, ergäbe das bis 2050 eine kumulierte Energieeinsparung von 308 Petajule, das war in etwa der Primärenergieverbrauch von Hamburg im Jahr 2019.

<sup>55</sup> Einen Einblick in aktuelle Themen der Batterieforschung geben zum Beispiel <https://www.uni-muenster.de/MEET/> und <https://batterie-2020.de/> (30.08.2024)

<sup>56</sup> Faktencheck-Batterien-fuer-E-Autos.pdf (fraunhofer.de) [https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccn/2020/Fraunhofer\\_ISI\\_Urban\\_Mining.pdf](https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccn/2020/Fraunhofer_ISI_Urban_Mining.pdf) (01.08.2024)

**Herausgeber**

Fonds der Chemischen Industrie im Verband  
der Chemischen Industrie e. V. (FCI)  
Mainzer Landstraße 55  
60329 Frankfurt am Main  
www.vci.de/fonds  
Tel. 069 2556-0

**Redaktion und Gesamtkoordination**

Birgit Kullmann, FCI, Frankfurt

**Autoren**

Dr. Karl Hübner, freier Autor, Köln  
Prof. Dr. Bernd Ralle, Technische Universität  
Dortmund

**Wissenschaftliche und fachdidaktische****Beratung**

Dr. Dominik Müller,  
Universität Erlangen-Nürnberg  
Prof. Dr. Bernd Ralle,  
Technische Universität Dortmund

**Fachliche Beratung**

Dr. Peter Bieker, Helmholtz-Institut Münster  
Dr. Christian Hagelüken, Umicore AG & Co. KG  
Dr. Simon Hilgendorf, Accurec-Recycling GmbH  
Jakob Julian, Felix Lesche, Verband der  
Chemischen Industrie e. V.  
Dr. Jan Blankenburg, Dr. Daniel Esken,  
Dr. Dirk Poppe, Dr. Georg Schick, Evonik  
Industries AG

**Bildquellen**

Adobe Stock: © ADDICTIVE STOCK CORE (S. 9),  
© ekaterinakebal (S. 12), © Di Studio (S. 15),  
© Michael-Eichhammer (S. 16), © nemo1963  
(S.16), © CHAVALIT (S. 17), © mipan (S.18),  
© luchschenF (S.19), © Song Johnhawk (S. 22),  
© Beate Panosch (S.23), © piyaset (S.24),  
© Michael (S.24), © WideAwake (S.24), © Fast  
Cyclone (S. 32), © Stefan Schurr (S. 32),  
© forenna (S. 34), © Larisa Lasebnaja (S. 36),  
© songwut (S. 38), © Creative Bringer (S. 41),  
© zlikovec (S. 42), © thanakrit (S. 45), © Vladimir  
(S. 47), © UMAR SALAM (S. 50), © jroballo (S.52),  
© Björn Wylezich (S.55), © Sebastian (S. 56),  
© danielskyphoto (S.57), © Sujid (S. 57)  
Fotolia: © pab\_map (S. 51)  
iStock: © Maica (Titelseite), © zentilia (S. 10)

Alle Abbildungen: FCI

**Gestaltung**

mon idée, Marketing/Kommunikation, Monika  
Nieth, Königstein  
zündung GmbH Werbeagentur, Frankfurt am  
Main

**Druck**

O.D.D. GmbH & Co. KG Print + Medien, Bad  
Kreuznach

Klimaneutral durch CO<sub>2</sub>-Kompensation, ge-  
druckt auf Papier aus nachhaltiger Waldwirt-  
schaft.

1. Auflage 2025  
7.000 Exemplare

Alle Rechte vorbehalten

Das gesamte Unterrichtsmaterial ist über das  
Internet abrufbar: [www.vci.de/fonds](http://www.vci.de/fonds)





**Fonds der Chemischen Industrie im  
Verband der Chemischen Industrie e. V.**

Mainzer Landstraße 55  
60329 Frankfurt am Main  
Telefon: + 49 69 2556-0  
E-Mail: [fonds@vci.de](mailto:fonds@vci.de)

Weitere Informationen auch im Internet:  
[www.vci.de/fonds](http://www.vci.de/fonds)



## KREISLAUFWIRTSCHAFT — DEN KREISLAUF IN SCHWUNG BRINGEN

Arbeitsblätter	Thema	Niveau	Kapitel
1.1	Beständigkeit von Kunststoffen gegen Hydrolyse und Bewitterung	SEK I/SEK II	1
1.2	Kunststoffsorten im deutschen Hausmüll	SEK I/SEK II	1.2
1.3	Herstellung von Methanol aus Kunststoffabfällen	SEK II	1.7.2
1.4	Chemische Depolymerisation – Solvolyse	SEK II	1.7.3
2.1	Der Strahlungshaushalt der Erde und der Treibhauseffekt	SEK I/SEK II	2.1
2.2	Der Kohlenstoffkreislauf	SEK I/SEK II	2.1
2.3	Kippelemente	SEK I/SEK II	2.1
2.4	Carbon Capture and Storage	SEK I/SEK II	2.2
2.5	Negativemissionstechnologien	SEK II	2.7
3.1	Mechanische Aufarbeitung von Elektroschrott	SEK I/SEK II	3.3
3.2	Pyrometallurgische Kupfergewinnung im Überblick	SEK I/SEK II	3.3.1
3.3	Raffinationselektrolyse	SEK I/SEK II	3.3.1
4.1	Strom für die Elektromobilität	SEK I	4
4.2	Bewährte Akkutechnologie	SEK I/SEK II	4.3
4.3	Die CO <sub>2</sub> -Bilanz der Batterieproduktion	SEK I/SEK II	4.3.3
4.4	Hochofenvergleich	SEK II	4.5.2
4.5	Lithium-Polymerzelle	SEK II	4.7



Die Übersicht ist verlinkt. Klicken Sie auf den gewünschten Inhalt und Sie gelangen direkt dorthin. Möchten Sie wieder zurück, klicken Sie rechts oben auf das Home-Icon.



## BESTÄNDIGKEIT VON KUNSTSTOFFEN GEGEN HYDROLYSE UND BEWITTERUNG

---

### Aufgaben

1. Wofür stehen die Abkürzungen in der rechten Spalte der Tabelle?
2. Führen Sie an drei Beispielen die unterschiedliche Beständigkeit eines Kunststoffs auf seine molekulare Struktur zurück.
3. Informieren Sie sich im Internet über den Einsatz von Kunststoffen im Automobilbau.
4. Begründen Sie den bevorzugten Einsatz bestimmter Kunststoffe im Automobilbereich vor dem Hintergrund der Angaben in der Tabelle.
5. Begründen Sie, warum Kunststoffteile aus PUR im Außenbereich von KFZ grundsätzlich lackiert werden.



## BESTÄNDIGKEIT VON KUNSTSTOFFEN GEGEN HYDROLYSE UND BEWITTERUNG

Schwachstelle im Makromolekül	Heißwasser	Säuren	Laugen	Hitze	Bewitterung	Maximale Gebrauchstemperatur ohne mechanische Beanspruchung in Luft in °C	Kunststoff
C=C-Doppelbindung in der Hauptkette	+	+	+	-	--	85-100	ABS
Carbamat- oder Amidgruppe in der Hauptkette	--	--	-	-	--	80-130	PA
Urethangruppe in der Hauptkette	-	0	-	-	0	80	PUR
Ethergruppe in der Hauptkette	-	--	0	+	0	80-100 90-100	
Estergruppe in der Hauptkette	-	0	--	0	+	80-100 50 135	Polyester-PUR UP PC
Estergruppe in der Seitenkette	0	0	0	0	+	50-60	PMMA
Halogenatom als Seitengruppe	-	+	0	-	+	65-85	PVC
Wasserstoffatom an tertiären C-Atomen	+	+	+	0	0	60-75	LDPE
Keine Schwachstelle; völlig fluoridierte Kohlenstoffkette	+	+	+	+	+	300	PTFE

+ beständig, 0 bedingt beständig, - unbeständig, -- sehr unbeständig



## KUNSTSTOFFSORTEN IM DEUTSCHEN HAUSMÜLL

---

### Aufgaben

1. Recherchieren Sie, welche Kunststoffsorten für welche Verpackungsmaterialien Anwendung finden.
2. Geben Sie für alle im Text genannten Kunststoffe einen Ausschnitt aus der Strukturformel an.

### Information

Die Vielfalt von Verkaufsverpackungen mit unterschiedlichen Materialspezifikationen stellt hohe Anforderungen an das Recycling. Nahezu 60 Prozent aller Verpackungen, die durch die dualen Systeme in der Gelben Tonne und im Gelben Sack gesammelt werden, werden bereits recycelt. Das Recycling von Kunststoffen ist dank moderner Recyclinganlagen heute effizient und nachhaltig möglich. Rohstoffe wie Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polystyrol (PS) und Polyethylenterephthalat (PET), wie es beispielsweise bei der Herstellung von Flaschen für Getränke verwendet wird, können so verwertet werden und bleiben dem Rohstoffkreislauf erhalten.



## HERSTELLUNG VON METHANOL AUS KUNSTSTOFFABFÄLLEN

### Aufgaben

1. Stellen Sie den Prozess der Synthesegasgewinnung aus Kunststoffabfällen in einem einfachen Flussdiagramm dar.
2. Formulieren Sie die Gewinnung von Methanol aus Synthesegas als Reaktionsgleichung.
3. Synthesegas ist Ausgangsstoff für weitere Schlüsselchemikalien der chemischen Industrie. Nennen Sie drei Beispiele.
4. Erläutern Sie, weshalb das beschriebene Verfahren zur Verwertung von Kunststoffabfällen nur eine Brückentechnologie sein kann.

### Information

Bei der Herstellung von Methanol aus Kunststoffabfällen besteht der erste Schritt in der Vergasung der Abfälle unter Druck und begrenzter Konzentration von Sauerstoff.

Die Abfälle werden bei 1.000 bis 1.600 °C und Drücken bis 60 bar bis auf Grundmoleküle aufgespalten. Die Sauerstoffzufuhr beträgt nur ein Drittel der Menge, die zur Verbrennung notwendig wäre, es wird daher nur partiell oxidiert. Es entstehen die Grundmoleküle Wasserstoff ( $H_2$ ), Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenstoffdioxid ( $CO_2$ ) und Wasserdampf ( $H_2O$ ). Dioxine, Furane und PCBs werden bei den hohen Temperaturen vollständig zerstört. Alle Verunreinigungen, seien es chlor-, stickstoff- oder schwefelhaltige Verbindungen, werden ebenfalls in Grundmoleküle wie Chlorwasserstoff (HCl), Ammoniak ( $NH_3$ ) oder Schwefelwasserstoff ( $H_2S$ ) umgewandelt und durch Waschen unter Druck quantitativ entfernt. Ziel ist es, am Ende des Prozesses Synthesegas zu erzeugen – eine Mischung aus Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff.

Im Vergleich zu Pyrolyse ist Vergasungstechnologie damit eine geeignete Variante für das chemische Recycling nahezu aller kohlenstoffhaltigen Abfälle. Daher ist sie für die Großchemie besonders geeignet. Fein gemahlene Kunststoffabfälle werden mit sogenannten Flugstromvergäsern zusammen mit Sauerstoff über einen oder mehrere Brenner in den Vergasungsraum geblasen. Ähnlich wie in einem Rührkessel erfolgt eine vollständige Vermischung der Einsatzstoffe und der sich bildenden Produktgase, die nach entsprechender Reinigung fast vollständig aus den Grundmolekülen CO und  $H_2$  – also Synthesegas – bestehen.



## CHEMISCHE DEPOLYMERISATION • SOLVOLYSE

### Aufgaben

1. Diskutieren Sie, welche Polymertypen für den Prozess der Solvolyse infrage kommen und welche nicht.
2. Formulieren Sie die Reaktion der Solvolyse von Polyethylenterephthalat mit Wasser (Hydrolyse).

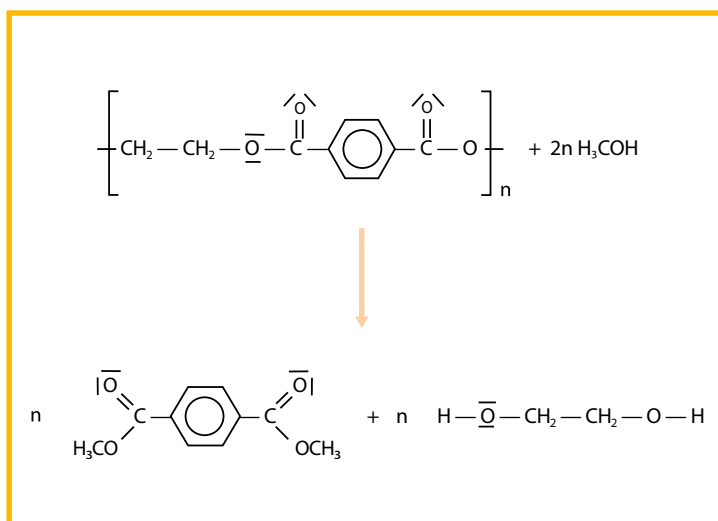
### Information

Im Gegensatz zum stofflichen Recycling, bei welchem lediglich physikalische Veränderungen an den Kunststoffen vorgenommen werden, sind bei der chemischen Depolymerisation chemische Umwandlungen notwendig. Eine Reihe hochwertiger Kunststoffe, aber auch synthetische Fasern sind auf sauerstoff- und stickstoffhaltigen Polymergerüsten aufgebaut. Wichtige Vertreter wie Polyester, Polyamide, Polyacetate enthalten einen Bindungstyp, der chemisch aktiv und leicht spaltbar ist. Hier gelingt es, im Gegensatz zur Pyrolyse oder zur Hydrierung, unter relativ milden Bedingungen einheitlich höherwertige Rohstoffe zurückzugewinnen. Diese können auf Rohstoffniveau erneut in den Herstellungsprozess von Kunststoffen zurückgeführt werden. Chemisch gesehen läuft bei der Solvolyse die Umkehrreaktion der Polykondensation durch Einbau von kleinen Molekülen ab.

So lassen sich Ester-, Amid- und Urethanbindungen mit Wasser spalten (Hydrolyse). Bei einer Alkoholyse werden Alkohole für die Spaltung eingesetzt, bei der selten angewandten Aminolyse Amine. Daraus folgt, dass diese Technologie ausschließlich für Polykondensationskunststoffe wie Polyester und Polyamide Anwendung finden kann, da diese durch Abspaltung von Wasser oder anderen Verbindungen synthetisiert werden. Das Reaktionsschema zeigt beispielhaft die Methanolyse von Polyethylenterephthalat. Die Produkte können entweder zur erneuten Erzeugung desselben Werkstoffs oder als Ausgangsstoff für andere chemische Synthesen dienen.

### Abbildung 1

Formelschema der Alkoholyse von Polyethylenterephthalat mit Methanol



Der Hauptteil der Kunststoffabfälle besteht jedoch aus Polyolefinen, welche sich nicht zur Chemolyse eignen und daher mit einer solchen Technologie nicht dem wertstofflichen Recycling zugeführt werden können.



## DER STRALUNGSHAUSHALT DER ERDE UND DER TREIBHAUSEFFEKT

### Aufgaben

1. Betrachten Sie das dargestellte Schema: Es stellt die wesentlichen Prozesse des Strahlungshaushalts der Erde mit den entsprechenden Größenverhältnissen dar. Ordnen Sie diesen Prozessen die Begriffe Absorption, Emission und Reflexion zu. Erklären Sie, warum die Bilanz der Abstrahlung der Erde größer als 100 Prozent sein kann.
2. Ein Schüler einer 11. Klasse hat die folgende Erklärung für den sogenannten Treibhauseffekt abgegeben: „Der Treibhauseffekt droht uns alle zu zerstören, das Ozon, das die Ozonschicht bildet, wird mit Chlor verbunden und zerstört. Diesen Vorgang nennt man Treibhauseffekt. Die Wärme- und Lichtstrahlungen können durch das Ozonloch besser auf die Erde gelangen, wodurch der Treibhauseffekt gefördert wird.“ Erklären Sie mithilfe des Schemas zum Strahlungshaushalt der Erde, wie der Effekt, den man Treibhauseffekt nennt, tatsächlich zustande kommt. Informieren Sie sich zusätzlich in der Fachliteratur oder im Internet über die chemischen Reaktionen, die zur Entstehung des sogenannten Ozonlochs führen.

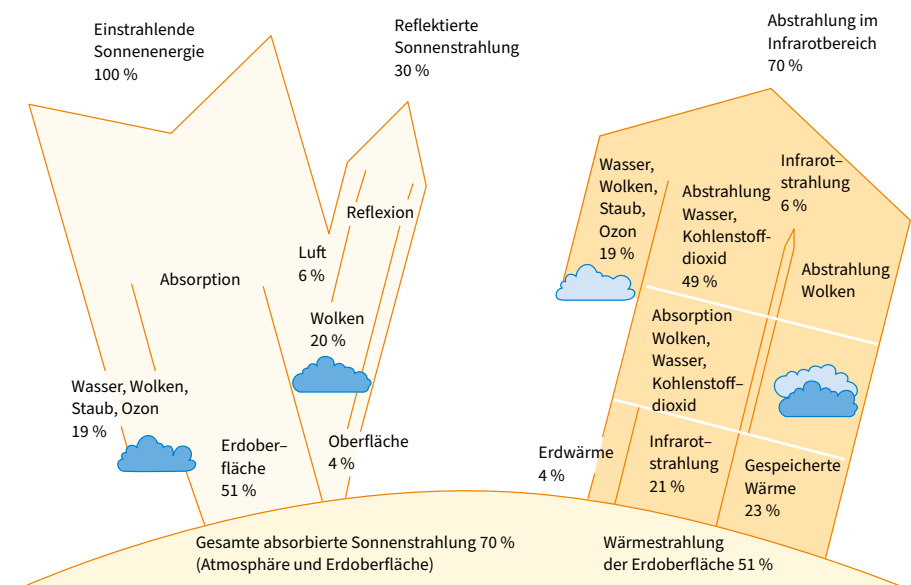
### Der Strahlungshaushalt der Erde

Die Erde ist zu praktisch 100 Prozent auf die Energiezufuhr durch die Sonne angewiesen. Davon werden etwa 30 Prozent direkt wieder in den Weltraum reflektiert. Da in der Atmosphäre weitere 19 Prozent absorbiert werden, gelangen nur etwa 51 Prozent dieser Strahlung auf die Erdoberfläche.

Die von der Erde absorbierte Sonnenstrahlung (insgesamt 51 Prozent) wird vollständig als Wärmestrahlung wieder abgegeben. Bis auf 6 Prozent der Infrarotstrahlung, die direkt in den Weltraum übergeht, wird die gesamte Wärmeabstrahlung von der Erdoberfläche zunächst durch Wolken und Gasteilchen der Atmosphäre absorbiert, bevor auch dieser Anteil als Infrarotstrahlung die Erde wieder verlässt.

### Abbildung 1

Strahlungshaushalt der Erde (aus Chemie im Kontext SII, Schülermaterial)





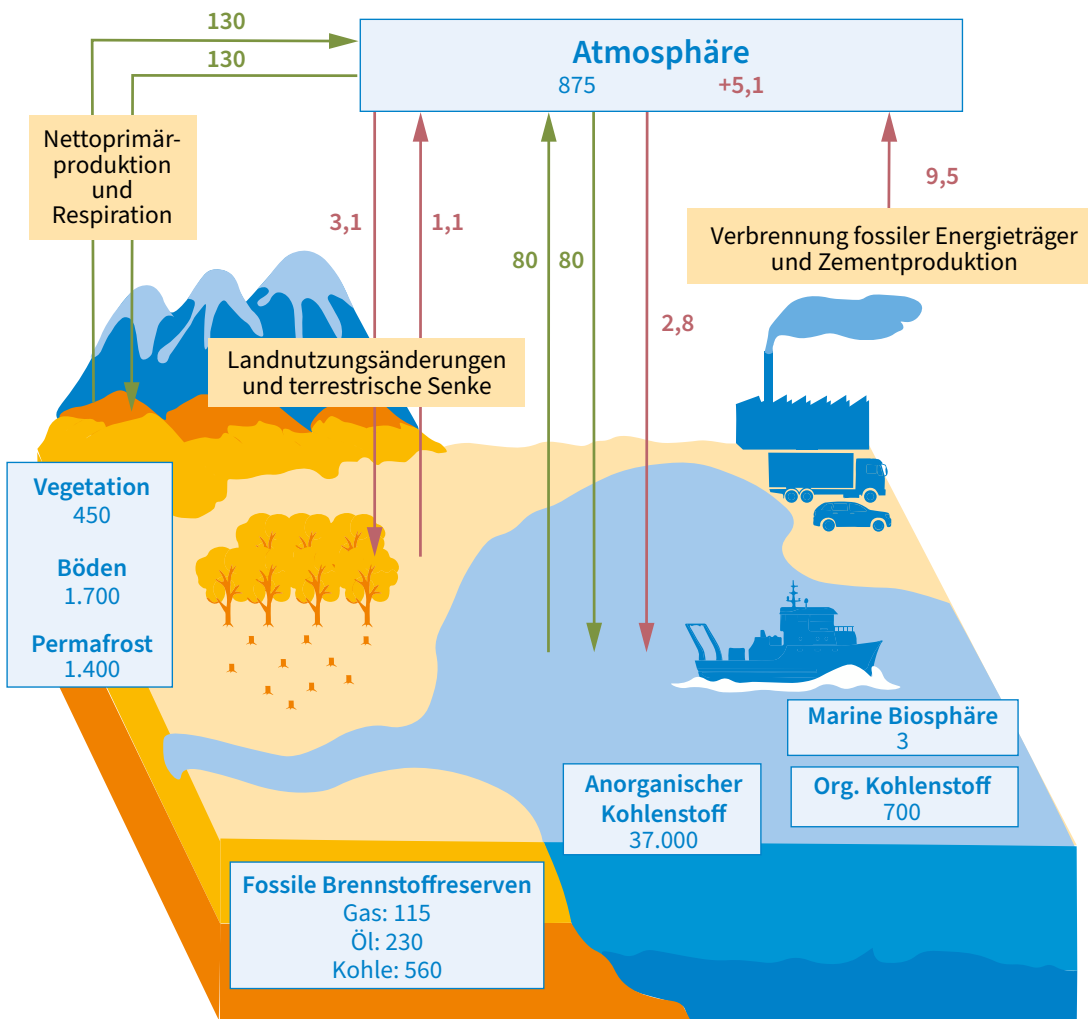
## DER KOHLENSTOFFKREISLAUF

### Aufgabe

1. Welche Flüsse/Kompartimente des Kohlenstoffkreislaufs könnte man gezielt beeinflussen, um den beschriebenen Anstieg der Kohlenstoffdioxidkonzentration in der Atmosphäre zu bremsen?

### Abbildung 1

Der Kohlenstoffkreislauf



Die Abbildung zeigt den Kohlenstoffaustausch zwischen Atmosphäre, Landvegetation und Ozean in GtC (Gigatonnen = Milliarden t; 1 t C entspricht 3,67 t CO<sub>2</sub>) pro Jahr sowie die Reservoirs in GtC. Die grünen Pfeile und Werte zeigen die natürlichen Austausche, und die blauen Werte (in den blauen Kästchen) zeigen die natürlichen Reservoirs vor 1750. Die roten Pfeile und Werte zeigen die jährlichen anthropogenen Flüsse, und der rote Wert in dem Reservoir Atmosphäre zeigt die jährliche Kohlenstoffzunahme in den 2010er Jahren.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Abbildung aus <https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Kohlenstoffkreislauf> (20.08.2024)

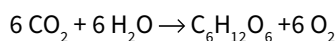
## DER KOHLENSTOFFKREISLAUF

### Information

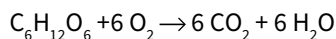
Kohlenstoffdioxid ist wie Wasser ein für das Leben auf der Erde unersetzlicher Stoff. Es ist in allen Sphären anzutreffen und in einen Kreislauf gewaltigen Ausmaßes, den Kohlenstoffkreislauf, eingebunden.

In der Atmosphäre befinden sich derzeit ca. 875 Gt ( $875 \times 10^9$  t) Kohlenstoff in Form von Kohlenstoffdioxid - und es wird immer mehr.

Die grünen Pflanzen entziehen der Atmosphäre über die Fotosynthese (Assimilation) pro Jahr ca. 100 Gt Kohlenstoff (davon 50 Gt durch marines Phytoplankton):



Die Hälfte des nun organisch gebundenen Kohlenstoffs wird von den Pflanzen zur Deckung des Energiebedarfs durch Atmung (Dissimilation) sogleich wieder abgebaut:



Die verbleibenden 50 Gt werden für den Aufbau der Biomasse verwendet und gelangen über weitere Dissimilationsprozesse in der Nahrungskette wieder in die Atmosphäre.

Nur ein sehr geringer Teil des Kohlenstoffs, etwa 0,9 Gt pro Jahr, wird der Atmosphäre entzogen und führt zu natürlichem Zuwachs der lebenden Biomasse. Gleichzeitig werden jedoch durch Wald- und Bodenzerstörung etwa 2 Gt Kohlenstoff und durch Verbrauch fossiler Brennstoffe 6 Gt Kohlenstoff pro Jahr zusätzlich als Kohlenstoffdioxid in die Atmosphäre eingebracht.

Weitgehend ausgeglichene Verhältnisse herrschen im direkten Kontakt zwischen Hydrosphäre und Atmosphäre. Bei Erwärmung wird Kohlenstoffdioxid aus dem Wasser freigesetzt, das dann mit dem Regen gelöst bzw. als Hydrogencarbonat wieder zurückkommt.

Das Kompartiment der Ozeane ist noch nicht voll ausgeschöpft, denn der Atmosphäre werden pro Jahr etwa 2 Gt Kohlenstoff entzogen und in den Ozeanen fixiert.



## KIPPELEMENTE

### Aufgaben

1. Definieren Sie den Begriff „Kippelement“ im Zusammenhang mit dem Prozess des Klimawandels.
2. Beschreiben Sie mögliche Folgen beim Überschreiten folgender Kippelemente:
  - a. Gletscher schmelzen,
  - b. Abholzung und Brände der Urwälder,
  - c. Kohlenstoffdioxidaufnahme des Meeres,
  - d. Abschwächung des Golfstroms.

### Information

Bestandteile des Erdsystems von überregionaler Größe, die ein Schwellenverhalten aufweisen, werden als Kippelemente bezeichnet. Wird der Schwellenwert erreicht oder überschritten, kann der betreffende Bestandteil durch sehr geringe weitere Störungen in einer Weise beeinflusst werden, dass sein ursprünglicher Zustand nicht mehr erreicht werden kann, es entsteht ein qualitativ neuer, unumkehrbarer Zustand.

Dem Schwellenverhalten im Erdsystem liegen oft selbstverstärkende Prozesse zugrunde, die – einmal angestoßen – auch ohne weiteren externen Einfluss weiterlaufen. Dadurch kann es passieren, dass der neue Zustand eines Kippelementes erhalten bleibt, selbst wenn das Hintergrundklima wieder hinter den Schwellenwert zurückfällt. Der Übergang nach dem Überschreiten eines systemspezifischen Kippunktes kann sprunghaft, aber auch langsam erfolgen. Bereits das Überschreiten einzelner Kippunkte hat weitreichende Umweltauswirkungen, die die Lebensgrundlage vieler Menschen gefährden.

Es besteht zudem das Risiko, dass durch Rückkopplungsprozesse weitere Kippunkte im Erdsystem überschritten werden und so eine dominoartige Kettenreaktion mit weitreichenden Folgen für das Klima ausgelöst wird.

### Hinweise:

<https://www.quarks.de/umwelt/klimawandel/diese-4-kippelemente-beschleunigen-die-klimaerwaermung/> (13.08.2024)

<https://www.pik-potsdam.de/de/produkte/infothek/kippelemente/kippelemente> (13.08.2024)



## CARBON CAPTURE AND STORAGE (CCS)

### Aufgaben:

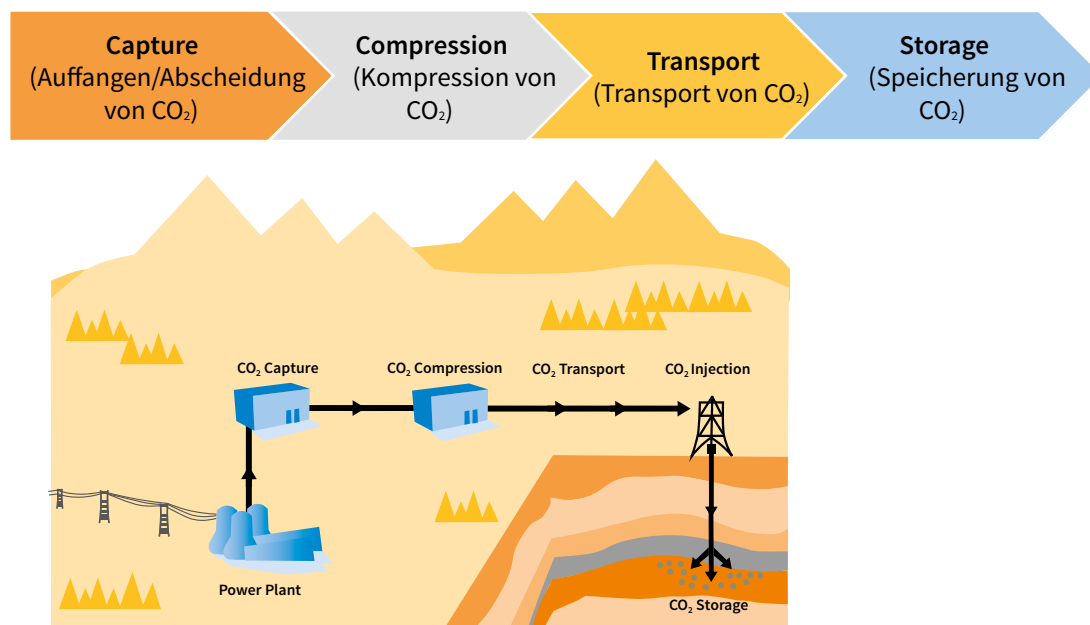
1. Einzelarbeit: Lesen Sie sich Material M1–M4 sorgfältig durch. Unterstreichen Sie wichtige Inhalte.
2. Formulieren Sie zu M1–M4 mindestens 5 Fragen, auf die die Materialien eine Antwort geben. Versuchen Sie, keine Fragen zu stellen, die allein mit Ja oder Nein beantwortet werden können.
3. Partnerarbeit: Stellen Sie sich abwechselnd Ihre Fragen vor und beantworten Sie sie mithilfe der Materialien. Notieren Sie sich Unklarheiten zur späteren Besprechung im Plenum.
4. Gegen die Pläne einer Etablierung von CCS-Standorten in Brandenburg und Schleswig-Holstein entstanden 2009 und 2010 vermehrt Bürgerproteste. Nennen Sie mögliche Gründe, die protestierende Bürgerinnen und Bürger vorbringen könnten.
5. Sprinteraufgabe: Diskutieren Sie, ob es sich bei CCS um eine Brückentechnologie oder um eine Zukunftstechnologie handelt.

### Information

Kohlenstoffdioxid ist ein Treibhausgas, das sich in den letzten Jahrzehnten durch anthropogene Einflüsse wie die Verbrennung von fossilen Energieträgern und die damit verbundenen Emissionen zunehmend in der Atmosphäre angereichert hat. Ein Ansatz, um diese Emissionen etwa von Kohlekraftwerken zu reduzieren, ist Carbon Capture and Storage. Ziel dieser Technologie ist es, Kohlenstoffdioxid in unterirdischen Lagerstätten beispielsweise im Meeresuntergrund, in ehemaligen Erdöllagerstätten oder Kohleflözen zu speichern.

### M1:

Die vereinfachte Prozesskette von Carbon Capture and Storage



Quelle: Faraday Discussions, 2016, Carbon Capture and Storage: introductory lecture  
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2016/fd/c6fd00148c>

## CARBON CAPTURE AND STORAGE (CCS)

### M2:

#### Informationstext zu CCS

CCS steht für Carbon Capture and Storage, das heißt die Abscheidung von Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) an Kraftwerken oder Industrieanlagen und nachfolgende Speicherung in tief liegenden geologischen Gesteinsschichten.

Grundsätzlich gibt es bei den Kraftwerken verschiedene Wege, die Abgabe von CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre zu verringern: Man kann Festbrennstoffe – etwa Stein- oder Braunkohle – vergasen und dabei das CO<sub>2</sub> im Zuge des Vergasungsprozesses abtrennen. Die Kohle wird dabei nicht wie im herkömmlichen Dampferzeuger verfeuert, sondern zunächst in einem Vergaser in ein Brenngas umgewandelt. Das unter Druck stehende Gas wird anschließend gereinigt und von CO<sub>2</sub> befreit. Übrig bleibt fast ausschließlich Wasserstoff. Erst dieser wird dann in einer Gasturbine verbrannt. Der entsprechende Prozess wird als Pre-Combustion bezeichnet.

Ebenfalls zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung geeignet ist der sogenannte Oxyfuel-Prozess: Dabei werden fossile Brennstoffe mit reinem Sauerstoff verbrannt, anschließend wird das entstehende CO<sub>2</sub> danach abgetrennt. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, Kohlenstoffdioxid am Ende des konventionellen Verbrennungsprozesses abzuscheiden. Dieses als Post-Combustion bezeichnete Verfahren basiert auf nachgeschalteten Rauchgaswäschen, bei denen zum Beispiel Amine oder Aminosäuresalze als „Wasch- beziehungsweise Lösemittel“ zum Einsatz kommen. Mit den drei Abscheideverfahren lassen sich CO<sub>2</sub>-Minderungen in den Abgasen der Kraftwerke von 80-98 Prozent erreichen.

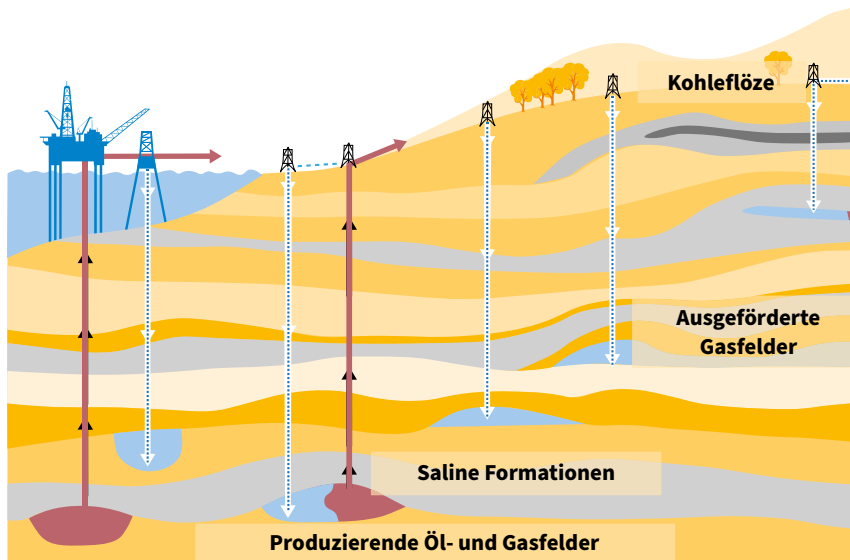
Am Ende der CCS-Technologiekette steht die Speicherung des CO<sub>2</sub> im tiefen geologischen Untergrund von etwa 1000 bis 4000 Metern. Geeignete Speichergesteine sind zum Beispiel ehemalige Öl- oder Gaslagerstätten, Kohleflöze und Salzwasser führende Gesteinsschichten (siehe M3). Bei Öl- und Gaslagerstätten kann das Kohlenstoffdioxid zusätzlich genutzt werden, um das bisher nicht aus den Lagerstätten förderbare Erdöl oder Erdgas zu gewinnen (sogenannte Enhanced Oil Recovery beziehungsweise Gas Recovery).

Die CCS-Technologie steht jedoch noch vor einigen Herausforderungen, etwa bei der Abtrennung des Kohlenstoffdioxids verbleiben noch erhebliche Entwicklungsaufgaben hinsichtlich der Steigerung von Effizienz und Umweltverträglichkeit der entsprechenden Verfahren. In der jetzigen Erprobungsphase soll die technische, wirtschaftliche und umweltgerechte Machbarkeit der CCS-Technologien mit entsprechenden Pilotprojekten umfassend nachgewiesen werden.

Nach überwiegender Meinung von Klimawissenschaftler\*innen und anderen wissenschaftlichen Expert:innen sind die CCS-Technologien neben dem verstärkten Ausbau der erneuerbaren Energien und der Steigerung der Energieeffizienz als weitere wichtige Klimaschutzsäule notwendig, um die CO<sub>2</sub>-Emissionsminderungsziele von 85-90 Prozent bis zum Jahre 2050 in den Industrienationen zu erreichen. Die International Energy Agency kommt in ihren jüngsten Energie- und Klimaschutzszenarien zu dem Schluss, dass die Anwendung der CCS-Technologien etwa 14 Prozent der global bis 2050 notwendigen CO<sub>2</sub>-Emissionsreduzierungen erbringen kann.

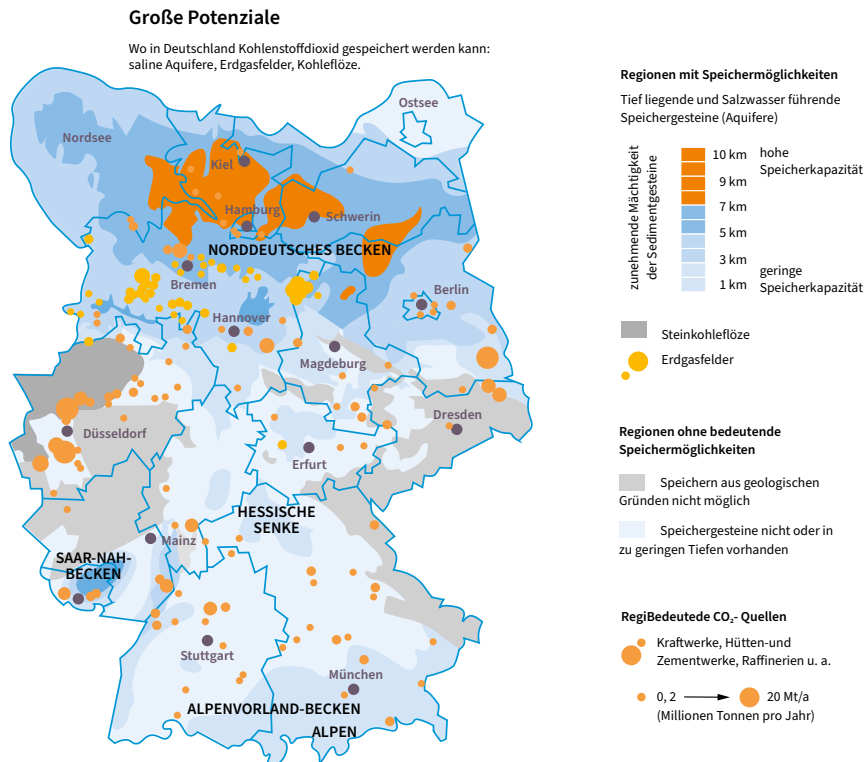
## CARBON CAPTURE AND STORAGE (CCS)

### M3: Geologische Speicheroptionen (Storage)



Quelle: Dahmke, Andreas. Institut für Geowissenschaften der Universität Kiel. Folie 15.

### M4: Geologische Speicheroptionen in Deutschland



Quelle: Zeitbild Wissen: Naturwissenschaft und Technik im Unterricht 2011 „Klimaschutz und CCS. Abtrennung und Speicherung von CO<sub>2</sub>“ S.21, [https://www.zeitbild.de/wp-content/uploads/2009/08/CCS\\_Brosch\\_2011Web.pdf](https://www.zeitbild.de/wp-content/uploads/2009/08/CCS_Brosch_2011Web.pdf) (27.07.2024)



## NEGATIVMISSIONSTECHNOLOGIEN

### Aufgaben

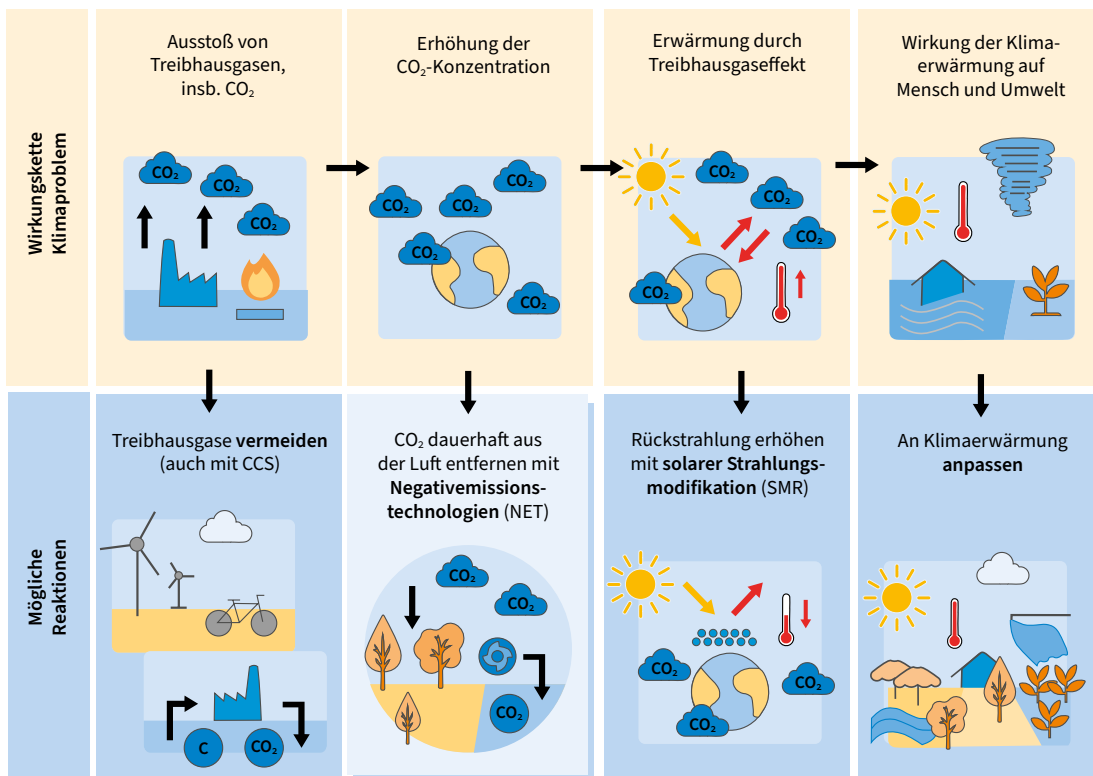
1. Erläutern Sie, was man unter Negativemissionstechnologien (NET) versteht.
2. Welche Voraussetzungen müssen gegeben sein, damit Negativemissionstechnologien einen signifikanten Einfluss auf den Erhalt des Weltklimas ausüben?
3. Welche Gefahren sehen Sie bei einem breiten Einsatz von NET?

### Information

Die ambitionierten Klimaziele erfordern deutliche Änderungen der Strategien zur Eindämmung des Klimawandels. So wird es nicht ausreichen, allein die Emissionen von Kohlenstoffdioxid zu verringern. Prinzipiell lassen sich weitere Maßnahmen denken, um den CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre zu senken, darunter die sogenannte Negativemissionstechnologien (Abbildung 1).

### Abbildung 1

Der Mensch kann entlang der Wirkungskette des Klimaproblems unterschiedliche Maßnahmen ergreifen.



Quelle: Schweizer Bundesamt für Umwelt (BAFU). (2020)

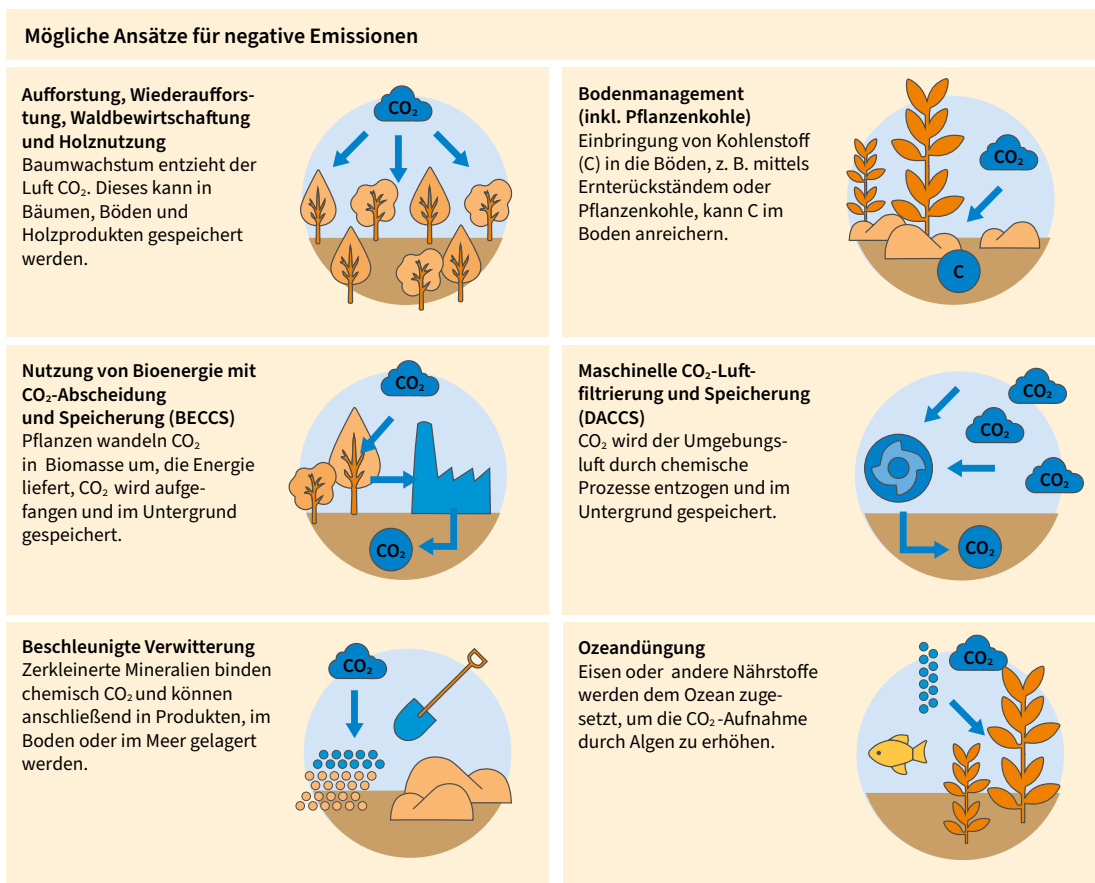
Negativemissionstechnologien sollen direkt in den Kohlenstoffkreislauf der Erde eingreifen und richten sich somit unmittelbar gegen die Grundursache des Klimawandels. Mit ihnen wird der Erdatmosphäre dauerhaft das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) entzogen.

## NEGATIVEMISSIONSTECHNOLOGIEN

Abbildung 2 zeigt verschiedene NET-Ansätze. Es sind Maßnahmen bekannt, die mit biologischen oder technischen Ansätzen CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre entfernen und mehr oder weniger dauerhaft speichern können. Das CO<sub>2</sub> kann grundsätzlich mit Biomasse (Photosynthese) oder chemisch (via Luftfilter oder durch Bindung in Mineralien) eingefangen werden. Anschließend wird das CO<sub>2</sub>, oder je nach Verfahren nur der Kohlenstoff (C), in Biomasse auf der Erdoberfläche (zum Beispiel Holz), im Erdboden, im geologischen Untergrund, in Mineralien oder im Meeresboden gespeichert.

### Abbildung 2

Verschiedene Ansätze können der Atmosphäre CO<sub>2</sub> entziehen.



Quelle: Schweizer Umweltbundesamt (BAFU) (2022). *Negativemissionstechnologien*.

Damit die Verfahren klimawirksam negative Emissionen erzeugen, muss das CO<sub>2</sub> dauerhaft über mehrere Jahrzehnte – besser über Jahrhunderte – gespeichert werden. CO<sub>2</sub>, das in der Waldbiomasse oder im Humus im Erdboden gespeichert ist, kann zum Beispiel durch außergewöhnliche Ereignisse (wie Waldbrände) oder durch intensive Bodenbearbeitung eher wieder in die Luft gelangen als CO<sub>2</sub>, das im tiefen Untergrund oder in Mineralien gespeichert wird.



## MECHANISCHE AUFBEREITUNG VON ELEKTROSCHROTT

### Aufgabe

1. Recherchieren und erläutern Sie die im Text genannten verschiedenen Methoden der Stofftrennung.

### Information

Bei der mechanischen Aufbereitung von Elektronikschrott fällt ein Stoffgemisch an, das für die weitere Verarbeitung aufbereitet werden muss. Zur Trennung der nach der Zerkleinerung erhaltenen Partikelströme werden verschiedene physikalische Verfahren eingesetzt, bei denen die Eigenschaften der unterschiedlichen Partikel genutzt werden. Lange Zeit waren dabei vor allem Eisen-, Nichteisen- und Edelmetall-Fraktionen im Fokus. Mittlerweile spielt jedoch auch die Rückgewinnung und stoffliche Verwertung von Kunststoffen in der Praxis eine große Rolle. Der Grund: Die aufwendigen Verfahrenstechniken sind weiterentwickelt worden, sodass sie in der Praxis zur Anwendung kommen können.

Nach Abtrennung der Metallfraktionen aus dem Stoffgemisch bleibt eine Fraktion übrig, die nicht nur aus verschiedensten Kunststoffen besteht, sondern darüber hinaus durch Staub, Holz, Glasstückchen, Restmetalle, Elastomere und andere unerwünschte Verunreinigungen verschmutzt ist. Diese gilt es ab- und möglichst noch weiter aufzutrennen.

Die wichtigsten in diesem Bereich angewendeten Prozesse sind **Dichtentrennung, Magnetscheidung, Elektrosortierung** und **IR-gesteuerte Kläubung**.



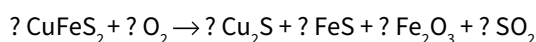
## PYROMETALLURGISCHE ROHKUPFERGEWINNUNG IM ÜBERBLICK

### Aufgabe

- Übertragen Sie die Reaktionsgleichungen in Ihre Unterlagen, vervollständigen Sie diese und setzen Sie die richtigen Koeffizienten ein. Geben Sie jeweils den Reaktionstyp an.

### Teilrösten

Ein wichtiges Kupfererz ist Kupferkies  $\text{CuFeS}_2$ . Im Schwebeschmelzofen kommt es zu einer Reaktion, die etwa wie folgt dargestellt werden kann:

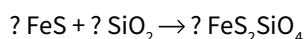
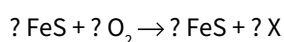


Es entsteht Kupferstein, eine Mischung aus Kupfersulfid, Eisensulfid und Eisenoxid. Das beim Schwebeschmelzen entstandene Eisenoxid verschlackt mit dem Begleitgestein der Kupfererze, und weil die Schlacke aufgrund geringerer Dichte auf dem geschmolzenen Kupferstein schwimmt, kann sie leicht vom Kupferstein getrennt werden. Da sie noch einen Massenanteil von ca. 1,5 Prozent Kupfer enthält, wird sie in einem Elektroofen nochmals getrennt, sodass dort neben zusätzlichem Kupferstein eine Schlacke mit einem Kupfergehalt von ca. 0,3 Prozent anfällt, die zum Straßenbau, als Uferbefestigung oder als Spurendünger benutzt werden kann.

### Vorgänge im Konverter

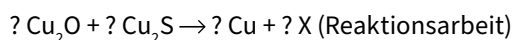
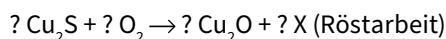
a) Schlackenblasen:

Der Kupferstein wird zusammen mit zugegebenem Sand dem Konverter zugeführt, in dem er verblasen wird. Dabei wird mit Sauerstoff angereicherte Luft mit hohem Druck in die Schmelze eingeblasen, wodurch noch vorhandene Eisenanteile oxidiert werden und mit dem zugegebenen Sand verschlacken:



b) Garblasen:

Das sulfidische Kupfer wird in Kupferoxid umgewandelt, das wiederum mit weiterem Kupfersulfid zu metallischem Kupfer reagiert. Kupfer ist so edel, dass die Zugabe eines Reduktionsmittels für die Kupfergewinnung nicht erforderlich ist:



Hier im Konverter kommen, neben anderem Altkupfer aus dem Recycling, auch Leiterplatten zum Einsatz.

Der Einsatz der Leiterplatten im Konverterverfahren dient nicht nur dazu, die Leiterplatten zu entsorgen, sondern wirkt sich auch durchaus positiv auf die Prozessführung aus. Die metallischen Anteile der Leiterplatten stören den Prozess nicht, im Gegenteil: Die Edelmetalle gehen ebenfalls in die Kupferschmelze über und können bei der Raffinationselektrolyse wiedergewonnen werden.

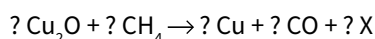


## PYROMETALLURGISCHE ROHKUPFERGEWINNUNG IM ÜBERBLICK

Das metallische Kupfer, das mit den Leiterplatten in das Gemisch gelangt, dient außerdem der Kühlung des Prozesses, da es erst aufgeschmolzen werden muss und dadurch der Schmelze, die sich durch die exothermen Reaktionen aufheizt, Energie entzieht. So kann die Temperatur in einem vernünftigen Bereich eingeregelt werden, der dennoch die vollständige Verbrennung der Kunststoffe und vor allem der Flammenschutzmittel gewährleistet, ohne dass die Gefahr von Dioxinbildung gegeben ist. Das Trägermaterial aus Glasfasern verhält sich identisch zu dem Sand, der extra dem Kupferstein zugegeben wird, um eine gute Verschlackung des Eisens zu ermöglichen. Durch die Verwendung von Leiterplatten im Konverterprozess kann also – zusätzlich zu den oben aufgeführten Vorteilen – Sand eingespart werden.

### Vorgänge im Anodenofen

Beim Einblasen der sauerstoffreichen Luft lassen sich die beiden oben geschilderten Reaktionen nicht genau voneinander abtrennen, sodass es zu einer „Überoxidation“ kommt. Das heißt, dass auch metallisches Kupfer zu einem gewissen Teil oxidiert wird. In einem nächsten Schritt wird dieses Blisterkupfer nun im Anodenofen raffiniert, dabei muss das überoxidierte Kupfer wieder zu metallischem Kupfer reduziert werden. Dies geschah früher, indem man feuchte Baumstämme in das geschmolzene Blisterkupfer geworfen hat. Der entweichende Wasserdampf sorgte für eine gute Durchmischung, und die Zersetzungsprodukte des Holzes entzogen dem Kupfer den Sauerstoff. Heute werden reduzierende Gase, beispielsweise Erdgas, in den Blisterkupfer eingeblasen, so wird dieser reduziert. Man erhält Rohkupfer mit einem Kupfergehalt von ca. 99,6 Prozent.



## RAFFINATIONSELEKTROLYSE

### Aufgaben

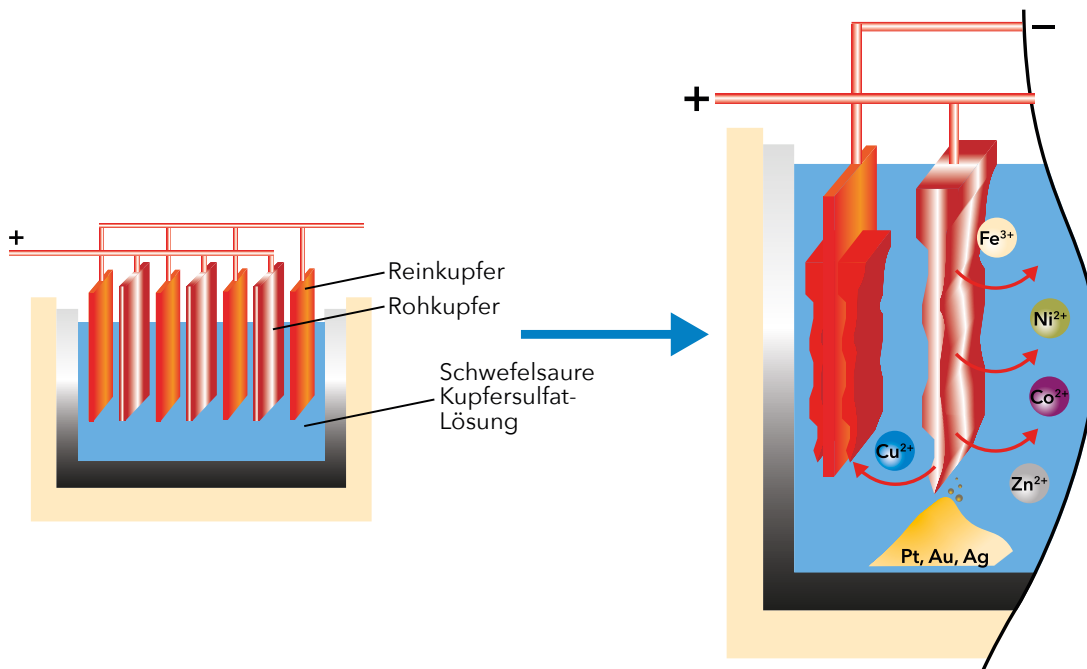
1. Die Abbildung zeigt schematisch den Aufbau einer Elektrolysezelle zur Kupferraffination. Formulieren Sie die Reaktionsgleichungen an den Elektroden.
2. Wie verhalten sich die Elemente mit einem geringeren bzw. höheren Elektrodenpotenzial als Kupfer bei der Elektrolyse?

Bei der Raffinationselektrolyse werden die Anodenplatten (Pluspol) in ein Elektrolysebad aus schwefelsaurer Kupfersulfatlösung getaucht. Als Minuspol oder Kathode (Startblech) dient entweder Elektrolytkupfer oder Edelstahl.

Beim Anlegen einer Spannung von etwa 3 bis 3,5 V findet am Pluspol die Oxidation von Kupferatomen zu Kupferionen statt. Diese wandern in den Elektrolyten und werden dort hydratisiert.

### Abbildung 1

Schematische Darstellung der Vorgänge bei der Raffinationselektrolyse von Kupfer





## GIBT ES AUSREICHEND GRÜNEN STROM FÜR DIE ELEKTROMOBILITÄT?

### Aufgaben

1. Berechnen Sie die Summe der Kilometer, die alle Pkw in Deutschland zurücklegen.  
Berechnen Sie außerdem den dafür benötigten Kraftstoffverbrauch.
2. Wie viel Strom würde benötigt, wenn alle Pkw mit elektrischer Energie angetrieben werden?
3. Ist es realistisch, diese Menge mittel- und langfristig CO<sub>2</sub>-neutral zu erzeugen?

Die Elektromobilität kann nur dann zur Reduktion von Treibhausgasemissionen wirklich beitragen, wenn der für sie benötigte Strom möglichst emissionsneutral zur Verfügung gestellt werden kann und im besten Falle aus erneuerbaren Energien stammt.

Für die Einschätzung des Strombedarfs kann eine Übersichtsrechnung ausgehend vom durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch der Pkw helfen. So gibt das Umweltbundesamt (UBA) den Kraftstoffverbrauch der Pkw in Deutschland für 2019 mit 47,01 Milliarden Litern an. Das UBA beziffert für 2019 zudem den durchschnittlichen Verbrauch eines Pkw mit 7,4 Litern Kraftstoff je 100 Kilometer.<sup>1,2</sup>

Der Strombedarf kann ebenfalls nur grob kalkuliert werden, da die benötigte Menge Strom je 100 Kilometer von E-Mobil zu E-Mobil deutlich variiert. Ganz grob kann jedoch angenommen werden, dass heutige E-Mobile zwischen 10 und 20 Kilowattstunden (kWh) elektrische Energie für 100 Kilometer benötigen.

Um den Strombedarf der Elektromobilität von Pkw einzuordnen, hilft ein Blick auf die gesamte Stromproduktion in Deutschland. Laut Statistischem Bundesamt wurden 2019 534 Terawattstunden (TWh) Bruttostrom erzeugt und in das Netz eingespeist. Davon stammten 42,3 Prozent (226 TWh) aus erneuerbaren Energien wie Wind (22,8 Prozent), Photovoltaik (7,8 Prozent) und sonstigen Quellen (Biogas, Wasserkraft...) (11,7 Prozent).

<sup>1</sup> Es wird im Folgenden nicht zwischen Otto- und Dieselfahrzeugen unterschieden. Zudem basiert dieser Wert laut UBA auf der Fahrleistung inländischer Fahrzeuge im In- und Ausland und enthält nicht die in Deutschland zurückgelegten Strecken ausländischer Fahrzeuge. Die folgende Kalkulation ist also mit einer gewissen Ungenauigkeit behaftet, doch die Größenordnung sollte davon unberührt bleiben.

<sup>2</sup> <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/verkehr-in-zahlen.html> (20.08.2024)



### BEWÄHRTE AKKUTECHNOLOGIE

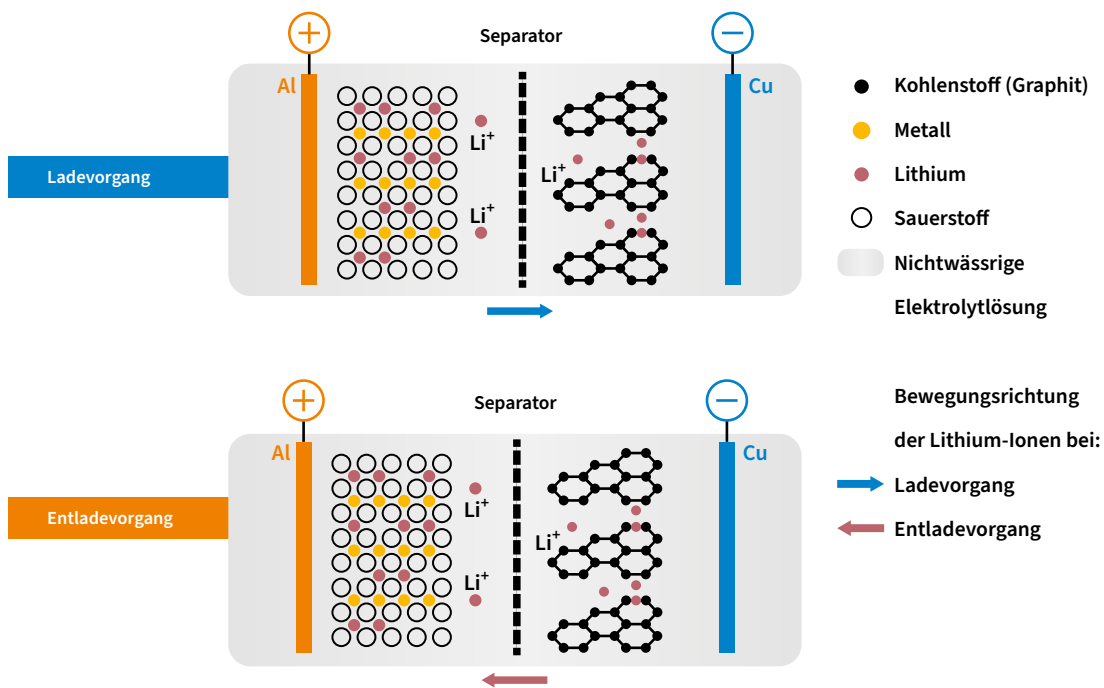
#### Aufgaben

1. Erläutern Sie anhand der Abbildung den Aufbau und die Funktion eines Lithium-Ionen-Akkus.
2. Erklären Sie unter Angabe von Reaktionsgleichungen, warum das Lösemittel für den Elektrolyten aprotisch (ohne Wasser oder Alkohol) und polar sein muss.

In Elektroautos werden zurzeit nahezu ausschließlich Lithium-Ionen-Akkus eingesetzt, denn sie besitzen eine hohe Energiedichte, vertragen viele Ladezyklen und weisen keinen nennenswerten Memory-Effekt auf.

#### Abbildung

Funktionsweise einer Lithium-Ionen-Zelle<sup>1</sup>



<sup>1</sup>Quelle: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Li-Ion-Zelle\\_\(CoO2-Carbon,\\_Schema\).svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Li-Ion-Zelle_(CoO2-Carbon,_Schema).svg) (20.08.2024)

Eine Lithium-Ionen-Zelle besteht in der Regel aus einer Graphitelektrode (negativ) und einer Lithium-Metalloxid-Elektrode (positiv), zum Beispiel Lithium-Manganoxid (LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), Lithium-Nickeloxid (LiNiO<sub>2</sub>) oder Lithium-Kobaltdioxid (LiCoO<sub>2</sub>). Dazwischen befindet sich der Elektrolyt aus einem aprotischen, polaren Lösemittel (zum Beispiel Ethylencarbonat, Dimethylcarbonat) mit gelösten Li<sup>+</sup>-Ionen und ein Separator, der selektiv für Li<sup>+</sup>-Ionen durchlässig ist. Beim Laden des Akkus wird an der negativen Elektrode metallisches Lithium in die einzelnen Graphitschichten eingelagert, an der positiven Elektrode werden Lithium-Ionen aus der Oxidschicht freigesetzt.



## DIE CO<sub>2</sub>-BILANZ DER BATTERIEPRODUKTION

### Aufgabe

1. Wie viele Kilometer muss ein Pkw mit Verbrennungsmotor zurücklegen, um dieselbe Menge an CO<sub>2</sub> freizusetzen, die bei der Produktion eines durchschnittlichen Akkus mit einer Kapazität von 70 kWh entsteht?

Die Elektromobilität erscheint sauberer und nachhaltiger als das Benutzen von Fahrzeugen mit klassischem Verbrennungsmotor. Aber zur ganzheitlichen Betrachtung gehört auch, sich den ökologischen Fußabdruck anzuschauen, den einzelne für die Elektromobilität notwendige Komponenten verursachen. Wie das für die Lithium-Ionen-Batterien aussieht, damit hat sich das schwedische Umweltinstitut IVL befasst. Demnach wurden 2019 bei der LIB-Herstellung pro kWh Ladekapazität zwischen 61 und 106 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente (CO<sub>2,e</sub>) freigesetzt<sup>1</sup>. Die Autoren weisen darauf hin, dass die Bilanz umso besser wird, je mehr erneuerbare Energien bei der Produktion zum Einsatz kommen.

Wie ist dieser Fußabdruck einzuschätzen? Legt man der Einfachheit halber den groben Mittelwert von 85 kg CO<sub>2</sub>-Emissionen je kWh Batteriekapazität zugrunde, dann würden für die Produktion eines Akkus mit 70 kWh Speicherkapazität knapp 6.000 kg Kohlenstoffdioxid-Äquivalente emittiert.



## HOCHOFENVERGLEICH

### Aufgaben

1. Vergleichen Sie den Einsatz eines Schachtofens beim pyrometallurgischen Recycling von Batterien mit dem klassischen Hochofen zur Eisengewinnung, indem Sie die Vorgänge in den Öfen beschreiben.
2. Formulieren Sie exemplarische chemische Reaktionen, die in den Öfen ablaufen.
3. Diskutieren Sie den Vorgang unter dem Gesichtspunkt der damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Verwerter von Elektrotraktionsbatterien, die direkt mit dem pyrometallurgischen Prozess starten, geben die demontierten Zellen oder Module zunächst in eine Art Hochofen. Ein Kohlenstofflieferant wie Koks sorgt bei einer Temperatur von über 1000 Grad Celsius dafür, dass flüchtige Bestandteile wie Elektrolyte verdampfen und Kunststoffbestandteile pyrolytisch zersetzt werden, wobei die Reaktionen zusätzliche Energie liefern.

Die Metalloxide aus dem Kathodenmaterial werden bei hohen Temperaturen reduziert, bis die jeweiligen Metalle, also zum Beispiel Kobalt und Nickel, geschmolzen vorliegen.

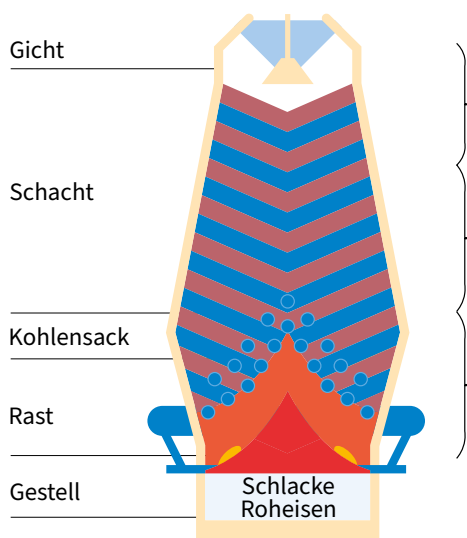
Fluor aus dem Elektrolytmaterial wird, wie auch emittierte Flugasche, aus den Verbrennungsgasen abgeschieden und als Sondermüll entsorgt. Darüber hinaus sorgt ein Hochtemperatur-Nachbrenner dafür, dass gefährliche Emissionen wie etwa Dioxine oder Furane vor der Freisetzung zu unproblematischen Substanzen verbrannt werden.

Im Ofen selbst bleibt eine metallische Phase zurück, die Kupfer, Kobalt, Nickel und Mangan enthält. Daneben fällt Schlacke an, in der sich auch Lithium und Aluminium befinden. Die metallische Phase wird von der Schlacke getrennt und kann nun hydrometallurgisch, also nasschemisch, weiterbearbeitet werden.

### Abbildung 1

Hochofen zur Eisengewinnung

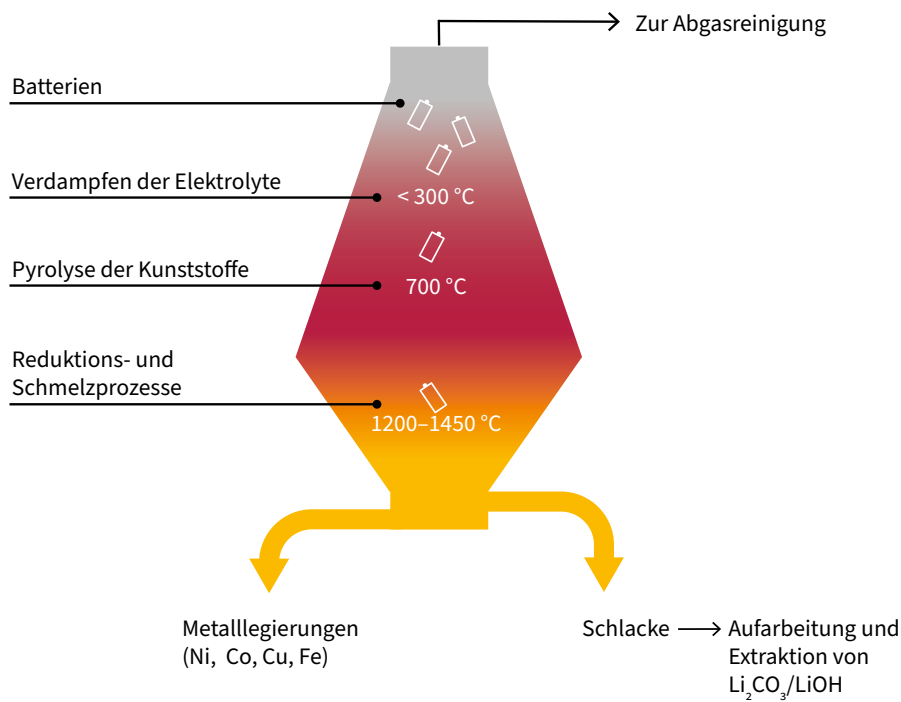
### Chemische Reaktionen



## HOCHOFENVERGLEICH

### Abbildung 2

Schematische Darstellung der pyrometallurgischen Behandlung von LIB-Modulen in einem Schachtofen





## LITHIUM-POLYMERZELLE

### Aufgabe

1. Überlegen Sie, für welche Anwendungen sich die flexiblen Polymer-Akkumulatoren besonders eignen.

Die Lithium-Polymer-Batterie ist eine besondere Art der Lithium-Ionen-Zelle und sollte daher korrekterweise als Lithium-Ionen-Polymer-Zelle bezeichnet werden. Sie ist in gleicher Weise aufgebaut und funktioniert nach demselben Prinzip wie diese. Analog werden auch die gleichen Einlagerungselektroden für den Plus- und den Minuspol verwendet.

Der entscheidende Unterschied zwischen beiden Varianten ist der verwendete Elektrolyt. Während im klassischen Lithium-Ionen-Akkumulator flüssige organische Elektrolytlösungen Verwendung finden, ist der Elektrolyt in der Polymerzelle ein Feststoff. Von diesen festen Polymerelektrolyten leitet sich auch der Name ab. Die Verwendung fester Elektrolyte hat eine Reihe von Vorteilen:

- Es sind keine aufwendigen, auslaufsicheren Gehäuse mehr notwendig.
- Durch Verwendung flexibler Folienelektroden lassen sich beliebige Bauformen realisieren. Damit lässt sich eine bessere Anpassung an die Geräteabmessungen erreichen.
- Es lassen sich Arbeitsschritte bei der Fertigung sparen (keine nachträgliche Elektrolytbetankung).

Beim gegenwärtigen Stand der Technik sind die Lithium-Ionen-Polymer-Akkumulatoren allerdings dem klassischen Ionen-Akkumulator in den elektrischen Eigenschaften noch unterlegen: Es werden etwas geringere Energiedichten erreicht, und aufgrund der geringeren Leitfähigkeit der Polymerelektrolyte im Vergleich zu flüssigen Elektrolytlösungen ist auch die Strombelastbarkeit geringer. Da zurzeit auch die Herstellungskosten für den klassischen Ionen-Akkumulator geringer sind, wird dieser bisher sehr viel häufiger eingesetzt als der Polymer-Akkumulator: Es ist aber gut möglich, dass die Kosten für den Polymer-Akkumulator nochmals deutlich sinken, wenn diese in entsprechend großer Stückzahl produziert werden.



## KREISLAUFWIRTSCHAFT — DEN KREISLAUF IN SCHWUNG BRINGEN

Experimente	Thema	Niveau	Kapitel
1.1	Identifizierung verschiedener Kunststoffe	SEK II	1.2
1.2	Reduktion von Metalloxiden mit Kunststoffabfällen	SEK I/SEK II	1.4
1.3	Umschmelzen eines Thermoplasts	SEK II	1.4
1.4	Pyrolyse von Polyethen	SEK II	1.7.1
1.5	Hydrolyse von Polyethylenterephthalat	SEK II (Demonstrationsexperiment)	1.7.3
1.6	Herstellen eines Kunststoffs aus Milchsäure	SEK I/SEK II	1.8
2.1	Einfluss der Temperatur auf das Gleichgewichtssystem	SEK II	2
2.2	Einfluss des Druckes auf das Gleichgewichtssystem	SEK II	2
2.3	Einfluss des pH-Werts auf das Gleichgewichtssystem	SEK II	2
2.4	Modellexperiment zum Bau eines Treibhauses	SEK II	2.1
2.5	Modellversuch zur Speicherung von CO <sub>2</sub>	SEK II	2.7
3.1	Elektrolytische Abscheidung von Kupfer an Kohle aus einer Kupferlegierung	SEK II	3.3.1
3.2	Direktelektrolyse von Leiterplatten	SEK II	3.3.1
4.1	Lithium-Sauerstoff-Batterie	SEKI/SEK II	4.7



Die Übersicht ist verlinkt. Klicken Sie auf den gewünschten Inhalt und Sie gelangen direkt dorthin. Möchten Sie wieder zurück, klicken Sie rechts oben auf das Home-Icon.

**EXPERIMENT 1.1****IDENTIFIZIERUNG VERSCHIEDENER KUNSTSTOFFE**

In den gebräuchlichen Kunststoffprodukten werden ganz unterschiedliche Kunststoffsorten verwendet, die sich hinsichtlich ihres chemischen und physikalischen Verhaltens unterscheiden. Diese Unterschiede können zur Identifizierung dieser Kunststoffsorten genutzt werden, indem man die Eigenschaften mit denen bekannter Proben vergleicht.






**Aufgabe**

Fertigen Sie eine Tabelle mit den unterschiedlichen Eigenschaften der verschiedenen Kunststoffe an.

Kunststoff	Eigenschaften

**Geräte**

Heizplatte, Bechergläser (50 ml), Tiegelflange, Stahlblech, Bunsenbrenner, Thermoelement, Waage, Aluminiumfolie

Chemikalien	Gefahrensymbole	H-Sätze	P-Sätze	Signalwort
Aceton (F, Xi)	 	225-319-336	210-240-305+351 +338-403+233	Gefahr
Kunststoffabfälle aus dem Haushalt	-	-	-	-
Proben einiger bekannter Kunststoffe zum Vergleich	-	-	-	-
Produkte	  	Bei hohen Temperaturen zersetzen sich die Makromoleküle zu vielfältigen, teils giftigen Produkten, die je nach funktioneller Gruppe sauer oder alkalisch reagieren.		Gefahr



## IDENTIFIZIERUNG VERSCHIEDENER KUNSTSTOFFE

### Durchführung

- Die Bruchfestigkeit prüfen Sie durch mehrmaliges Abknicken der Kunststoffteile.
- Halten Sie zur Überprüfung der Brennbarkeit die Kunststoffstreifen in die Flamme eines Brenners. Beobachten Sie auch, ob die Flamme stark rußt und ob der Kunststoff außerhalb der Brennerflamme weiterbrennt (Abzug!).
- Für die Feststellung der Erweichungstemperatur legen Sie ein Stahlblech auf die Heizplatte, die Kunststoffstreifen werden nebeneinander auf dem Blech platziert. Nun wird die Heizplatte langsam erwärmt, wobei mithilfe des Thermoelements die Temperatur des Bleches verfolgt wird.
- Überprüfen Sie das Verhalten der Kunststoffteile in Aceton, indem Sie diese genau wiegen und das Gewicht notieren. Die Kunststoffteile danach in Bechergläser geben, mit Aceton übergießen die Gläser mit Alufolie abdecken. Nach einigen Stunden nimmt man die Proben aus der Flüssigkeit, trocknet sie gut ab und überprüft das Gewicht. Gewichtszunahme bedeutet „Quellbarkeit“, Gewichtsabnahme „Löslichkeit“ des Kunststoffs in Aceton.

### Entsorgung

Reste der Kunststoffe in den Hausmüll, Lösungen in Sammelbehälter für organische Reste – halogenfrei.

**EXPERIMENT 1.2****REDUKTION VON METALLOXIDEN MIT KUNSTSTOFFABFÄLLEN**

Kunststoffabfälle lassen sich in manchen Bereichen als Alternative zu Erdöl, Kohle oder anderen organischen Substanzen einsetzen. Eine solche Verwendungsmöglichkeit ist die Metaldarstellung durch Reduktion aus den Metalloxiden mithilfe von Kunststoffen.

**Aufgabe**

Notieren Sie Ihre Beobachtungen und diskutieren Sie den Sinn des Einsatzes von Kunststoffen für die Reduktion von Metalloxiden.

**Geräte**

Reagenzglas, Reagenzlashalter Magnet, Bunsenbrenner

Chemikalien	Gefahrensymbole	H-Sätze	P-Sätze	Signalwort
Eisen(III)-oxid	-	-	-	-
Polyethylenpulver	-	-	-	-
Kupfer(II)-oxid		410 302	273 260	Achtung

**Durchführung**

- Mischen Sie trockenes Eisen(III)-oxid mit der doppelten Menge an Kunststoffpulver und erhitzen Sie es über der Bunsenbrennerflamme, bis das Gemisch im unteren Bereich einmal gut durchgeglüht ist.
- Lassen Sie das Gemisch im Reagenzglas abkühlen und untersuchen Sie den Inhalt dann mit einem Magneten.
- Statt des Eisen(III)-oxids kann Kupfer(II)-oxid eingesetzt werden.

**Entsorgung**

Reste in Sammelbehälter für Hausmüll



## EXPERIMENT 1.3

### UMSCHMELZEN EINES THERMOPLASTS

Einige Kunststoffe lassen sich schmelzen, ohne dass sie sich zersetzen, sodass man sie auf diese Weise in eine neue Form bringen und somit wiederverwenden kann.

#### Aufgabe

Geben Sie Beispiele für geeignete und ungeeignete Kunststoffe für diese Art der Wiederverwertung.

#### Geräte

Bunsenbrenner, Plätzchenform aus Metall, Aluminiumfolie, Schere, Dreifuß mit Keramikplatte.

Chemikalien	Gefahrensymbole	H-Sätze	P-Sätze	Signalwort
Polyethen (PE) oder Polypropen (PP) (z. B. gebrauchte Spülmittelflaschen)	-	-	-	-

#### Sicherheitsvorschriften

Durch das Schmelzen von PE oder PP können ggf. bei zu großer Hitze Dämpfe entstehen, die Gesundheitsgefährdend bez. selbstentzündliche sein können. Zudem sind die Schmelzen sehr heiß.

#### Durchführung

- Reinigen Sie zunächst die alten Kunststoffteile und sortieren Sie sie sortenrein.
- Schneiden Sie die Kunststoffteile mit der Schere in kleine Stücke.
- Kleiden Sie die Metallform doppelt mit Aluminiumfolie aus und füllen Sie sie 0,5 cm hoch mit den Kunststoffschnipseln.
- Erhitzen Sie nun langsam die gefüllte Form.

#### Entsorgung

Die geschmolzenen Kunststoffreste im Hausabfall entsorgen.

**EXPERIMENT 1.4****PYROLYSE VON POLYETHEN**

Eine Möglichkeit des Recyclings von Kunststoffen ist die Pyrolyse, ein Verfahren, das in gewisser Weise dem Cracken von Erdöl vergleichbar ist.

**Aufgabe**

Führen Sie das Experiment durch und notieren Sie Ihre Beobachtungen.

**Geräte**

Reagenzglas mit durchbohrtem Stopfen, gewinkeltes Glasrohr, Reagenzglas mit angesetztem Glasrohr und durchbohrtem Stopfen, Schlauchstücke, Glasspitze, Becherglas, Bunsenbrenner

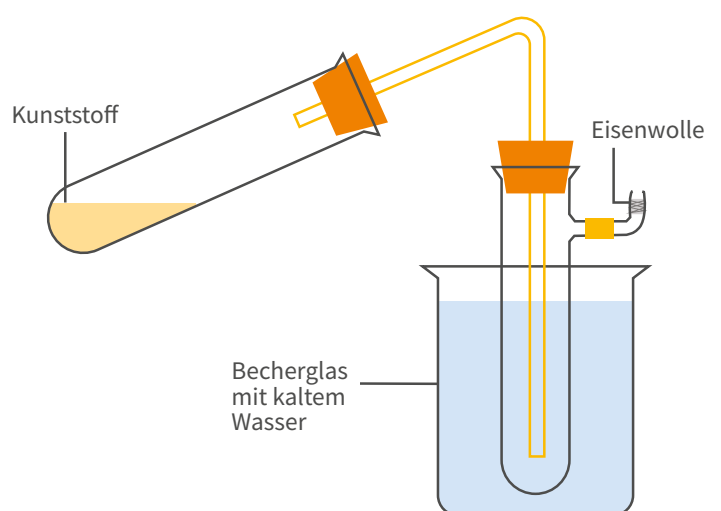
Chemikalien	Gefahrensymbole	H-Sätze	P-Sätze	Signalwort
Polyethen (PE, aus Spülmittelflaschen)	-	-	-	-
Bromwasser (3,4%, gesättigt)		302+332 314	304+340 305+351+338 310	Gefahr
Eisenwolle		228	370+378b	Gefahr

**Sicherheitsvorschriften**

Mit Bromwasser unbedingt im Abzug arbeiten. Eisenwolle kann sich selbst entzünden. Die gebildeten Pyrolyseprodukte (Ethen, Ethin, Methan und Wasserstoff) sind brennbar und können bei entsprechenden Luft-Gas-Gemischen explosionsartig reagieren.

**Durchführung**

- Bauen Sie den Versuch wie in der Abbildung gezeigt auf.
- Erhitzen Sie einige Stücke Polyethen in einem Reagenzglas mit heißer Brennerflamme.
- Die entstehenden Dämpfe werden in einer Kühlfalle kondensiert, und die entweichenden Gase werden an der mit Eisenwolle gesicherten Glasrohrspitze entzündet, nachdem Sie zuvor eine Knallgasprobe durchgeführt haben.
- Geben Sie einige Tropfen Bromwasser zu dem Kondensat.

**Entsorgung**

Rückstände des pyrolysierten Kunststoffs im Feststoffabfall entsorgen. Kondensationsprodukte werden im halogenierten organischen Abfall entsorgt.



## EXPERIMENT 1.5

## HYDROLYSE VON POLYETHYLENTEREPHTHALAT











Polyethylenterephthalat (Kurzzeichen PET) ist ein durch Polykondensation hergestellter thermoplastischer Kunststoff aus der Familie der Polyester. PET hat vielfältige Einsatzbereiche und wird unter anderem zur Herstellung von Kunststoffflaschen (PET-Flaschen), Folien und Textilfasern verwendet. Die Monomere, aus denen PET hergestellt wird, sind Terephthalsäure (1,4-Benzoldicarbonsäure) und Ethylenglykol (1,2-Dihydroxyethan, 1,2-Ethandiol). Die großtechnische Herstellung erfolgt teilweise noch durch Umesterung von Dimethylterephthalat mit Ethandiol.

## Aufgabe

Führen Sie das Experiment durch und notieren Sie Ihre Beobachtungen.

## Geräte

Rundkolben (250 ml), Zweihalsaufsatz, Schliffstopfen, Rückflusskühler, Magnetrührer, Heizpilz, Bechergläser (400 ml), Saugflasche mit Nutsche, Filtriervorrichtung, Sublimationsvorrichtung, Glasstab, Schliiffett.

Chemikalien	Gefahrensymbole	H-Sätze	P-Sätze	Signalwort
Polyethylenterephthalat (PET, Stücke von Getränkeflasche)	-	-	-	-
NaOH, 40%		290 340	280, 305+351+338 308+310 303+361+353	Gefahr
HCl, 37%	 	314 335 290	260, 280 305+351+338 303+361+353 304+340	Gefahr
HNO <sub>3</sub> , 50%, farblos	 	290 314 331	260, 280, 310 303+361+353 305+351+338 EH071	Gefahr
Cerammoniumnitrat-Reagenz (1 g Ce(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> oder (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> [Ce(NO <sub>3</sub> ) <sub>6</sub> ] in 2,5 ml HNO <sub>3</sub> (c(HNO <sub>3</sub> )=2M	  	272 302 314	221, 280 305+351+338 301+330+331 308+310	Gefahr
Cer(IV)-sulfat		315 319 335	305+351+338	Achtung
HNO <sub>3</sub> , 2M		314 219	260, 280 303+361+353 305+351+338	Gefahr

## HYDROLYSE VON POLYETHYLENTEREPHTHALAT

### Sicherheitsvorschriften

Abweichend vom technischen Verfahren wird hier nicht mit alkoholischer Natronlauge gearbeitet. Auf den Alkoholzusatz wird verzichtet, damit das Reaktionsprodukt Ethylenglykol nachgewiesen werden kann.

### Durchführung

#### 1. Hydrolyse von Polyethylenterephthalat:

In der Rückfluss-Apparatur mit gut gefetteten Schlifften bringen Sie 100 ml Natronlauge zum Sieden. Anschließend füllen Sie etwa 5g kleingeschnittene Polyethylenterephthalat-Stücke ein und verschließen die Apparatur. Rühren Sie gut um.

Nach wenigen Minuten beginnt der Kunststoff sich aufzulösen. Ein Teil des Natriumsalzes der Terephthalsäure scheidet sich als weißer Schlamm ab. Weitere 20 Minuten sieden lassen, dann die Heizquelle entfernen und abkühlen lassen.

#### 2. Nachweis der Produkte:

Filtrieren Sie für die Nachweise einige Milliliter der abgekühlten Reaktionsmischung und verteilen Sie sie auf zwei Reagenzgläser.

##### ○ Terephthalsäure

Säuern Sie eine Probe des Filtrats vorsichtig mit konzentrierter Salzsäure an (Schutzbrille). Es scheidet sich ein milchiger oder weißer Brei ab. Bei Zugabe von Natronlauge geht der Niederschlag wieder in Lösung. Dies ist ein Hinweis auf das Vorliegen einer schwerlöslichen Säure, die mit Natronlauge unter Bildung löslicher Salze reagiert.

##### ○ Ethylenglykol

Die zweite Probe wird mit halbkonz. Salpetersäure deutlich sauer eingestellt. (Nicht Salzsäure nehmen, da diese mit dem Nachweisreagenz für Alkohole ebenfalls farbige Komplexe bildet.) Mit pH-Papier prüfen. Die ausfallende Terephthalsäure wird abfiltriert. Zum Nachweis muss die Lösung gekühlt werden.

Tropfen Sie dann Cerammoniumnitrat-Reagenz im Überschuss (!) zu. Die Lösung färbt sich unter Bildung eines Cer(IV)-Alkohol-Komplexes deutlich tiefrot. Die Farbe ist nicht lange stabil. Zum besseren Erkennen wird in einer Blindprobe das Reagenz zu der gleichen Menge destilliertem Wasser gegeben.

#### 3. Isolierung der Terephthalsäure:

10 ml der Reaktionsmischung werden in 50 ml Wasser gegossen und gerührt. Dann wird filtriert. Säuern Sie das Filtrat mit Salzsäure an. Die ausflockende Terephthalsäure wird abfiltriert, gewaschen und anschließend getrocknet. Die Säure kann durch Sublimation gereinigt werden. Das in der Mutterlauge befindliche Ethylenglykol wird im Schulversuch nicht isoliert.

### Entsorgung

Isolierte Terephthalsäure, Ethylenglycol wird im organischen nicht-halogenierten Abfall entsorgt. Vorgelegte Salpeter- und Salzsäure werden mit NaOH (40%) neutralisiert und im Abfluss entsorgt.

**EXPERIMENT 1.6****HERSTELLEN EINES KUNSTSTOFFES  
AUS MILCHSÄURE (POLYMILCHSÄURE)**

Milchsäure wird technisch durch Vergärung von Milch oder Molke mithilfe besonderer Lactobazillen hergestellt. Die Verwendung ist vielfältig und reicht vom Einsatz als Säuerungsmittel und Konservierungsmittel bis zum biologisch abbaubaren Kunststoff (Polylactid). Dieses auch als Polymilchsäure bezeichnete thermoplastische Polymer eignet sich sowohl für Verpackungen als auch für chirurgisches Nahtmaterial, das vom Körper nach einiger Zeit resorbiert wird. Für die Herstellung von Polymilchsäure lässt man Milchsäure (2-Hydroxypropansäure) unter Wasserabspaltung zunächst zu einem Oligomer reagieren. Bei Zugabe eines geeigneten Katalysators ist auch eine Weiterreaktion zum Polymer möglich. Im folgenden Versuch wird sich aus Zeitgründen auf die Darstellung des Oligomers beschränkt.

**Aufgabe**

Führen Sie das Experiment durch und notieren Sie Ihre Beobachtungen.

**Geräte**

Reagenzgläser, Reagenzglashalter, Bunsenbrenner, Kunststoffschälchen, Siedesteinchen, Mikrospatel, Glasstab

Chemikalien	Gefahrensymbole	H-Sätze	P-Sätze	Signalwort
Zinn(II)-chlorid		290 302+332 314, 317 335, 373 412	280 301+330+331 304+340 303+361+353 305+351+338 310	Gefahr
Milchsäure (2-Hydroxypropansäure)		318 315	280, 305+351+338	Gefahr
Kupfersulfat-Papier (CuSO <sub>4</sub> )		302 315 319 410	273, 305+351+338 302+352	Achtung



## HERSTELLEN EINES KUNSTSTOFFES AUS MILCHSÄURE (POLYMILCHSÄURE)

### Sicherheitsvorschriften

Milchsäure wird erhitzt; die Lösung ist sehr heiß und kann bei Siedeverzug herauspritzen.

### Durchführung

In ein Reagenzglas werden 5 ml Milchsäure, eine Mikrospatelspitze Zinn(II)-chlorid-Kristalle und ein Siedesteinchen gegeben. Circa zehn Minuten unter Schütteln kräftig erhitzen (Vorsicht: Siedeverzüge!). Ein Kupfersulfatpapier wird in den entweichenden Dampf gehalten. Bei Einsetzen einer orangebraunen Färbung wird die noch heiße, flüssige Lösung in ein Kunststoffschälchen gegossen. Nach etwa einer halben bis einer Minute lassen sich aus der Lösung mit dem Glasstab Fäden ziehen.

### Entsorgung

Polymilchsäure kann nach dem Erhärten in den Restmüll gegeben werden. Zinn(II)-chlorid-Lösung wird in dem anorganischen, alkalischen Abfallbehälter entsorgt. Kupfersulfat-Papier wird in den Feststoffabfall gegeben.

**EXPERIMENT 2.1****EINFLUSS DER TEMPERATUR  
AUF DAS GLEICHGEWICHTSSYSTEM**


Das chemische Gleichgewicht ist ein dynamisches Gleichgewicht. Hin- und Rückreaktionen erfolgen in einem bestimmten Verhältnis. Die Lage des Gleichgewichtes gibt die Gleichgewichtskonstante  $K$  wider. Ändert man die Parameter (Temperatur  $T$ , Druck  $p$ , Konzentration  $c$ ) so verschiebt sich das Gleichgewicht. Es gilt nach Henry Le Chatellier das Prinzip des kleinsten Zwanges!

**Aufgaben**

1. Führen Sie das Experiment durch und notieren Sie ihre Beobachtungen.
2. Überlegen Sie sich, warum man zwei Versuchsansätze wählen muss.
3. Stellen Sie das Reaktionsschema für die Gleichgewichtsreaktion auf und erklären Sie damit Ihre Beobachtung.
4. Diskutieren Sie auf der Basis Ihrer Ergebnisse über die mögliche Verteilung von Kohlenstoffdioxid in den Ozeanen. Welches Fazit lässt sich formulieren?

**Geräte**

2 Erlenmeyerkolben (300 ml), 2 Luftballons, Wanne mit Eis, Bunsenbrenner

Chemikalien	Gefahrensymbole	H-Sätze	P-Sätze	Signalwort
Mischindikatorlösung (pH = 5)		225-319	210 233 305+351+338	Gefahr
Mineralwasser („kohlenensäurehaltig“)	-	-	-	-

**Durchführung**

- Füllen Sie die beiden Erlenmeyerkolben mit je 100 ml Mineralwasser und geben Sie einige Tropfen des Indikators hinzu.
- Verschließen Sie die Erlenmeyerkolben mit den zuvor gedehnten Luftballons.
- Schütteln Sie nun gleichzeitig beide Erlenmeyerkolben kräftig.
- Erhitzen Sie einen der beiden Kolben unter Schwenken über der Bunsenbrennerflamme.
- Lassen Sie diesen Kolben etwas abkühlen und stellen Sie ihn anschließend in ein Eisbad.
- Wiederholen Sie ggf. den Vorgang des Erhitzens und des Abkühlens.
- Der andere Ansatz wird bei Raumtemperatur aufbewahrt.

**Entsorgung**

Lösungen in den Sammelbehälter für Abwasser.

**EXPERIMENT 2.2****EINFLUSS DES DRUCKES AUF  
DAS GLEICHGEWICHTSSYSTEM**





Verschiedene äußere Bedingungen haben Einfluss auf das Gleichgewicht einer chemischen Reaktion. Für die realen Bedingungen in den Tiefen des Ozeans ist der Druck von entscheidender Bedeutung.

**Aufgaben**

1. Führen Sie das Experiment in einer der Varianten durch und notieren Sie Ihre Beobachtungen.
2. Erklären Sie Ihre Beobachtungen mithilfe von Reaktionsgleichungen.
3. Diskutieren Sie auf der Basis Ihrer Ergebnisse über die mögliche Verteilung von Kohlenstoffdioxid in den Ozeanen. Welches Fazit lässt sich formulieren?

**Geräte**

Kolbenprober mit Hahn, Becherglas (250 ml), 2 Kolbenpipetten, Becherglas (100 ml), Pasteurpipette

Chemikalien	Gefahrensymbole	H-Sätze	P-Sätze	Signalwort
Kohlenstoffdioxid		280	403	Achtung
Mischindikatorlösung (pH = 5)		226	210, 280, 303+361+353 305+351+338	Gefahr
Universalindikator-Lsg.		225	210, 233 370+378a 403+235	Gefahr
Ammoniak-Lsg. (w=1%)	 	290, 314, 335, 400	260-273-280- 301+330+331- 303+361+353- 305+351+338	Gefahr
Leitungswasser	-	-	-	-
Mineralwasser (kohlenensäurehaltig)	-	-	-	-



## EINFLUSS DER TEMPERATUR AUF DAS GLEICHGEWICHTSSYSTEM

---

### Durchführung

#### Variante 1:

- Füllen Sie ein Becherglas mit Mineralwasser, und geben Sie einige Tropfen des Indikators hinzu, sodass die Lösung eine violette Farbe annimmt.
- Saugen Sie etwa 20 ml der angesetzten Lösung in den Kolbenprober und schließen Sie den Hahn.
- Schütteln Sie den Kolbenprober und ziehen Sie dabei den Kolben heraus.
- Drücken Sie anschließend den Kolben unter Schütteln kräftig wieder hinein.
- Wiederholen Sie den Vorgang einige Male.

#### Variante 2:

- Geben Sie in das Becherglas 100 ml Leitungswasser und etwa 2 ml Universalindikatorlösung, sodass die Lösung kräftig grün gefärbt ist (ggf. mit Ammoniaklösung einstellen).
- Füllen Sie in den Kolbenprober 10 ml Kohlenstoffdioxid ein.
- Saugen Sie aus dem Becherglas 20 ml der grün gefärbten Lösung in den Kolbenprober ein. Dabei darf keine Luft aufgenommen werden.
- Schütteln Sie den Kolbenprober bei geschlossenem Hahn und drücken Sie den Kolben kräftig hinein.
- Anschließend ziehen Sie den Kolben kräftig zurück, sodass ein Unterdruck entsteht.

### Entsorgung

Lösungen in Sammelbehälter für Abwasser.

**EXPERIMENT 2.3****DER EINFLUSS DES PH-WERTS  
AUF DAS GLEICHGEWICHTSSYSTEM**





Wird Kohlenstoffdioxid in Wasser eingeleitet, so wird es zunächst gelöst (hydratisiert). Ein Teil dieses hydratisierten Kohlenstoffdioxids reagiert mit Wasser. Auch in der Natur spielt diese Reaktion bei der Aufnahme von atmosphärischem Kohlenstoffdioxid in Oberflächengewässern eine bedeutende Rolle. Mit diesem Experiment können Sie erarbeiten, welchen Einfluss der pH-Wert auf die Gleichgewichtsreaktion ausübt.

**Aufgaben**

1. Führen Sie das Experiment durch und notieren Sie Ihre Beobachtungen.
2. Erklären Sie Ihre Beobachtungen mithilfe der zuvor aufgestellten Reaktionsgleichungen.
3. Diskutieren Sie auf der Basis Ihrer Ergebnisse die mögliche Verteilung von Kohlenstoffdioxid in Gewässern, z. B. in den Ozeanen. Welches Fazit lässt sich formulieren?

**Geräte**

Erlenmeyerkolben (100 ml) mit durchbohrtem Stopfen, Einwegspritzen (10 ml) mit Kanülen, Zange zum Durchstechen des Stopfens mit der Kanüle, Kolbenprober mit Hahn, Magnetrührer mit Rührfisch, Schlauchmaterial

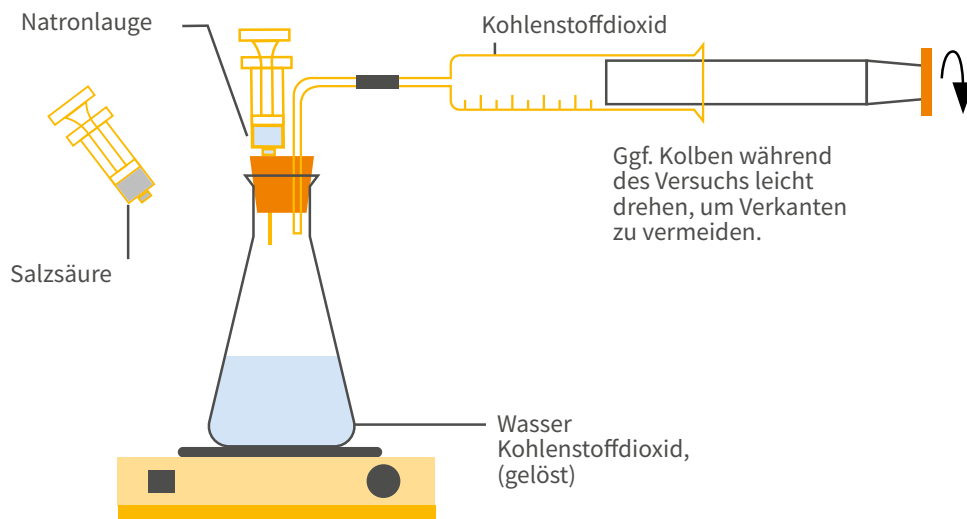
Chemikalien	Gefahrensymbole	H-Sätze	P-Sätze	Signalwort
Natronlauge (c= 0,5 mol/l)		290-314	280-301, 330+331, 305-338, 308, 310	Gefahr
Salzsäure (c= 0,5 mol/l)		290	-	Achtung
Universalindikator- Lsg.		225	210, 233 370+378a 403+235	Gefahr
Kohlenstoffdioxid		280	403	Achtung

**Sicherheitsvorschriften**

Achtung bei Druckgasflaschen; diese müssen immer in entsprechender Transportsicherung transportiert werden. Zudem muss die Flasche am Pult sicher festgemacht werden.

## DER EINFLUSS DES PH-WERTS AUF DAS GLEICHGEWICHTSSYSTEM

### Versuchsaufbau



### Durchführung

- ⦿ Stechen Sie die Kanüle mithilfe der Zange durch den Gummistopfen.
- ⦿ Geben Sie 200 ml destilliertes Wasser in eine Waschflasche und leiten Sie für einige Zeit Kohlenstoffdioxid hindurch.
- ⦿ Geben Sie 10 ml der Kohlenstoffdioxidlösung in den Erlenmeyerkolben, versetzen Sie diese mit 4 Tropfen Universalindikatorlösung und geben Sie den Rührfisch hinein.
- ⦿ Füllen Sie den Kolbenprober mit 100 ml Kohlenstoffdioxid.
- ⦿ Spülen Sie den Gasraum über der Lösung mit Kohlenstoffdioxid.
- ⦿ Verschließen Sie den Erlenmeyerkolben mit dem Stopfen.
- ⦿ Schließen Sie den Kolbenprober an und öffnen Sie den Hahn (Magnetrührer starten).
- ⦿ Geben Sie mit einer Spritze durch die Kanüle 10 ml Natronlauge hinzu.
- ⦿ Drehen Sie den Stempel des Kolbenprobers und beobachten Sie so lange, bis keine Veränderung mehr eintritt.
- ⦿ Geben Sie nun durch die Kanüle mit der zweiten Spritze 10 ml der Salzsäure zu.
- ⦿ Wenn wiederum keine Veränderung mehr am Kolbenprober zu beobachten ist, geben Sie erneut 10 ml Natronlauge durch die erste Kanüle hinzu.
- ⦿ Wiederholen Sie den Vorgang mehrmals.

### Entsorgung

Saure/alkalische Lösungen werden mit der entsprechenden Lauge bzw. Säure neutralisiert und im Ausguss entsorgt.



## EXPERIMENT 2.4

### MODELLEXPERIMENT ZUM BAU EINES TREIBHAUSES

#### Aufgaben

1. Führen Sie das Modellexperiment durch und stellen Sie Analogien zwischen den Bauteilen der Apparatur und der Erdatmosphäre her.
2. Interpretieren Sie die Vorgänge in diesem Modelltreibhaus ebenfalls mithilfe der zentralen Begriffe Absorption, Emission, Reflexion.

#### Geräte

Halogenglühlampe mit Fassung (250 W), Kristallisierschale (Ø= 22 cm), PE-Flasche (700 ml), mit abgeschnittenen Oberteil und seitlicher Öffnung für Thermoelement, Styroporgefäß, Thermoelement mit Messgerät (bzw. Digitalthermometer mit Außenfühler), Pappkarton (schwarz), PE-Folie, Knetmasse.

#### Sicherheitsvorschriften

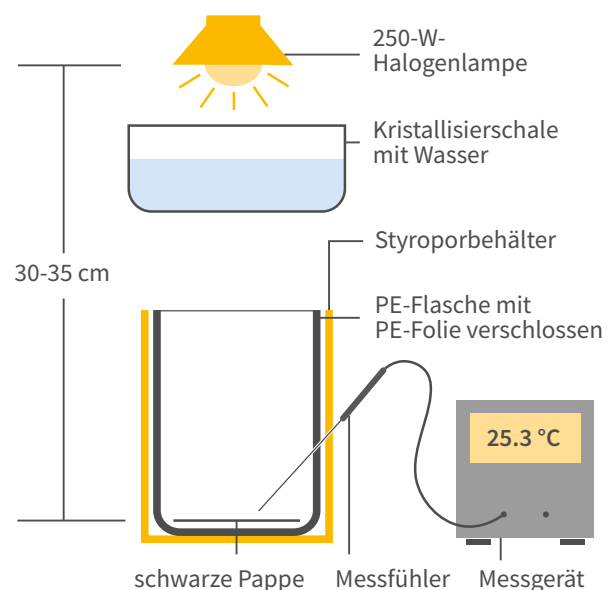
Achtung bei der Arbeit mit Druckgasflaschen. Diese müssen in entsprechenden Transportwägen transportiert werden; die Flaschen müssen entweder im Transportbehälter fixiert sein oder am Lehrerpult festgemacht werden.

Chemikalien	Gefahrensymbole	H-Sätze	P-Sätze	Signalwort
Kohlenstoffdioxid		280	403	Achtung

#### Durchführung

- Bauen Sie die Apparatur wie in der Abbildung angegeben auf.
- Die Kunststoffflasche wird mit PE-Folie verschlossen und zur zusätzlichen Isolierung in einen Styroporbehälter gestellt.
- Das Thermoelement bzw. Thermometer wird nun durch die seitliche Öffnung eingeführt, sodass es sich mit seiner Spitze etwa 1–2 cm oberhalb der Pappe befindet.
- Die seitliche Öffnung wird mit Knetmasse abgedichtet.
- Die Lampe wird eingeschaltet, und der Temperaturanstieg in der Flasche wird nach 1–2 Minuten ermittelt. Anschließend wird Kohlenstoffdioxid in die Kunststoffflasche gefüllt, und die Messung wird wiederholt.

#### Versuchsaufbau



**EXPERIMENT 2.5****MODELLVERSUCH ZUR SPEICHERUNG  
VON KOHLENSTOFFDIOXID IN KOHLEFLÖZEN**

Die Notwendigkeit der Reduktion der Kohlenstoffdioxidemissionen hat in den letzten Jahren viele verschiedene Ansätze hervorgebracht. Eine davon beschäftigt sich mit der Speicherung des Stoffes unter der Erde in verschiedenen geologischen Formationen (Carbon Capture and Storage). Mit diesem Modellexperiment können Sie erarbeiten, ob eine Injektion von (überkritischem) Kohlenstoffdioxid in Kohleflöze und eine dortige adsorptive Speicherung möglich ist.

**Aufgaben**

1. Führen Sie das Experiment durch und notieren Sie Ihre Beobachtungen in der Tabelle.

Kolbenprober	Volumen zu Beginn des Versuchs (in ml) Schritt 2	Volumen nach Überleitung in (in ml) Schritt 3	Volumen nach Druckausübung in (in ml) Schritt 4
Links	-	-	-
Rechts	-	-	-

2. Erläutern Sie die Volumenveränderungen nach dem Überleiten des Gases über die Aktivkohle (Schritt 2 zu Schritt 3). Nutzen Sie die Informationen zu Aktivkohle und beziehen Sie die Adsorptionseigenschaften der Aktivkohlenoberfläche in Ihre Schilderungen mit ein.
3. Die Ausübung von Druck in Schritt 4 simuliert die Hochdruckverpressung von  $\text{CO}_2$  unter der Erde. Erläutern Sie, welchen Einfluss die Druckerhöhung auf das Volumen von  $\text{CO}_2$  hat.
4. Beurteilen Sie das Potenzial der geologischen Speicherung von  $\text{CO}_2$  in Kohleflözen anhand Ihrer Versuchsergebnisse.

**INFORMATIONEN ZUR AKTIVKOHLE**

Aktivkohle besteht zu über 90% aus Kohlenstoff. Sie hat eine hochporöse Struktur, die ähnlich wie bei einem Schwamm strukturiert ist. Dadurch entsteht eine sehr große Oberfläche, die pro Gramm Aktivkohle bis zu 2000  $\text{m}^2$  groß sein kann. Zwei Gramm Aktivkohle hätten dann in etwa eine Oberfläche, die der Fläche eines kleinen Fußballfeldes entspräche. Aktivkohle ist in Form von Pulver, Granulat oder Pellets oder auf Gewebe aufgebracht verfügbar.

Das Haupteinsatzgebiet von Aktivkohle ist die Verwendung als Adsorptionsmittel. An der Oberfläche können verschiedenste Stoffe, z.B. Farb-, Geschmacks- oder Geruchsstoffe aus Flüssigkeiten oder Gasen haften, d.h. von der Aktivkohle adsorbiert werden. Umgekehrt ist es auch möglich, Aktivkohle durch Erhitzen zu reaktivieren, wobei die adsorbierten Stoffe wieder freigesetzt werden. Aktivkohle wird u.a. in der Wasseraufbereitung, als Luftfilter oder in der Automobilindustrie und Medizin eingesetzt.

## MODELLVERSUCH ZUR SPEICHERUNG VON KOHLENSTOFFDIOXID IN KOHLEFLÖZEN

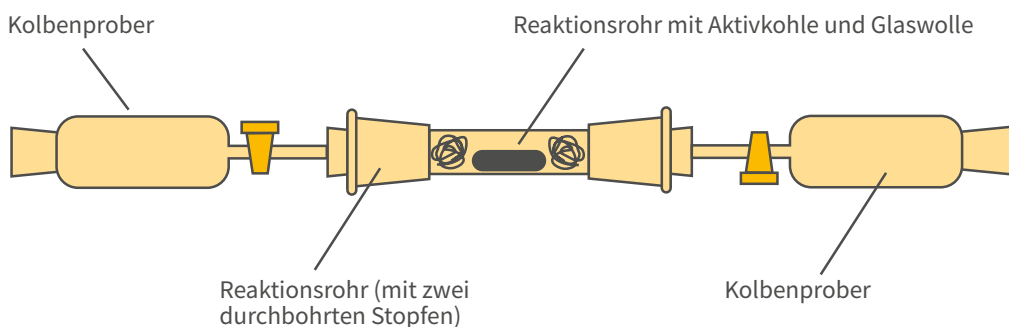
### Geräte

Stativmaterial, 2 Kolbenprober, Reaktionsrohr, 2 durchbohrte Stopfen, Parafilm, Waage, Spatel, Glaswolle

Chemikalien	Gefahrensymbole	H-Sätze	P-Sätze	Signalwort
Kohlenstoffdioxid (entfällt bei in Infusionsbeutel abgefülltem Gas)		280	403	Achtung
Aktivkohle (gepulvert)	-	-	-	-

### Versuchsaufbau

Der linke Kolbenprober ist zu Beginn mit 100 ml Gas befüllt, der rechte ist leer.



### Durchführung

- Füllen Sie einen Kolbenprober mit 100 ml Kohlenstoffdioxid. Wiegen Sie 3,2 g Aktivkohle ab und verteilen Sie sie möglichst großflächig in einem Reaktionsrohr. Platzieren Sie an beiden Enden etwas Glaswolle.
- Bauen Sie die Apparatur auf, indem Sie die zwei Kolbenprober mit Stativmaterial befestigen (siehe Skizze). Achten Sie darauf, dass die Skalierung der Kolben so platziert ist, dass Sie später Messwerte ablesen können. Verbinden Sie nun die Kolbenprober über die Stopfen mit dem befüllten Reaktionsrohr. Dichten Sie die Übergangsstellen abschließend mit Parafilm ab. Notieren Sie die Volumina der Kolbenprober. Versuchsaufbau (der linke Kolbenprober ist zu Beginn mit 100ml Gas befüllt, der rechte ist leer)
- Leiten Sie aus dem befüllten Kolbenprober langsam zunächst 20 ml  $\text{CO}_2$  über die Aktivkohle, ohne diese zu verwirbeln. Warten Sie 30 Sekunden, bevor Sie erneut 20 ml  $\text{CO}_2$  über die Aktivkohle strömen lassen. Wiederholen Sie diesen Vorgang, bis der Kolbenprober leer ist. Notieren Sie die Volumina beider Kolbenprober.
- Verschließen Sie den nun „leeren“ Kolbenprober mit dem Dreiwegehahn. Üben Sie anschließend sanften Druck (um ca. 5–10 ml) auf den Stempel des nun gefüllten Kolbenprobers aus.
- Halten Sie den Druck für ca. 10 Sekunden konstant. Notieren Sie die Volumina der Kolbenprober.

### Entsorgung

Aktivkohlereste im Feststoffabfall entsorgen. Kohlenstoffdioxid wird in die Umgebungsluft entlassen.

**EXPERIMENT 3.1****ELEKTROLYTISCHE ABSCHIEDUNG VON KUPFER  
AUS EINER KUPFERLEGIERUNG**

Die Raffinationselektrolyse von Rohkupfer dient der Gewinnung von hochreinem Kupfer, das für Stromleitungen und elektronische Bauteile benötigt wird. Die Grundzüge dieses Verfahrens lassen sich in einem Experiment veranschaulichen.

**Aufgaben**

1. Informieren Sie sich über die Zusammensetzung von 1-Euro- und 2-Euromünzen.
2. Überlegen Sie, was bei einer Elektrolyse einer solchen Münze als Anode und einer Kohlelektrode als Katode zu beobachten sein wird.
3. Erläutern Sie die chemischen Vorgänge, die zur Kupferabscheidung führen.
4. Was geschieht mit Legierungsbestandteilen, die edler bzw. unedler als Kupfer sind?

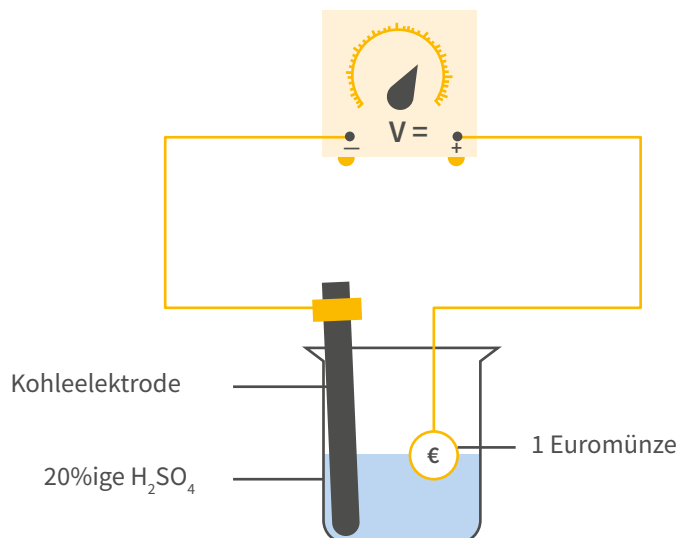
**Geräte**

Gleichstromquelle, Strommessgerät, Spannungsmessgerät, Verbindungskabel, Krokodilklemmen, Scheuerpulver, 1- oder 2-Euromünze, Kohlelektrode, Becherglas, 100 ml.

Chemikalien	Gefahrensymbole	H-Sätze	P-Sätze	Signalwort
Schwefelsäure (w = 20%)		290-314	280-301+330+331-303+361+ 353-305+351+338+310	Gefahr
verd. Ammoniakwasser	  	290, 314, 335, 400	260-273-280-301+330+331- 303+361+353-305+351+338	Gefahr
Diacetyldioxim		228	210-240-241-280-370+378	Achtung

## ELEKTROLYTISCHE ABSCHIEDUNG VON KUPFER AUS EINER KUPFERLEGIERUNG

### Schaltplan



### Durchführung

- Die Münze wird mit etwas Scheuerpulver gereinigt.
- Die Elektrolysezelle wird gemäß der Abbildung aufgebaut, wobei die Kohleelektrode als Minuspol, die Münze als Pluspol geschaltet wird. Der Kontakt wird mit einer Krokodilklemme hergestellt.
- Nun elektrolysiert man in 20%iger Schwefelsäure so lange bei ca. 4,5 V, bis eine Blaufärbung des Elektrolyten zu erkennen ist.
- Bereits nach kurzer Zeit erkennt man am Minuspol Veränderungen, die mit zunehmender Dauer der Elektrolyse an Deutlichkeit gewinnen.
- Stoppen Sie die Elektrolyse und fügen Sie einige ml Ammoniak-Lösung hinzu.

### Entsorgung

Elektrolyt in Sammelbehälter für anorganische Chemikalienreste. Elektroden nach Reinigung wiederverwenden.

**EXPERIMENT 3.2****DIREKTELEKTROLYSE VON LEITERPLATINEN**

Da Leiterplatten sehr reines Kupfer enthalten, kann man sich fragen, ob es auch möglich ist, sie direkt als „Anoden“ im Rahmen einer Raffinationselektrolyse einzusetzen.

Das im Folgenden beschriebene Experiment zeigt, dass eine solche direkte Elektrolyse durchaus denkbar ist, dass aber störende Einflüsse ihre großtechnische Umsetzung unmöglich machen.

**Aufgaben**

1. Formulieren Sie vor dem Versuchsstart, welche Beobachtungen Sie bei der Direktelektrolyse erwarten.
2. Leiterplatten enthalten neben Kupfer vor allem große Mengen an Lötzinn, eine Legierung, die als Hauptbestandteile vor allem Zinn und Blei enthält. Da beide Metalle unedler als Kupfer sind, werden sie zu Beginn der Elektrolyse bevorzugt oxidiert. Erläutern Sie mithilfe dieser Information die Vorgänge bei der Direktelektrolyse.

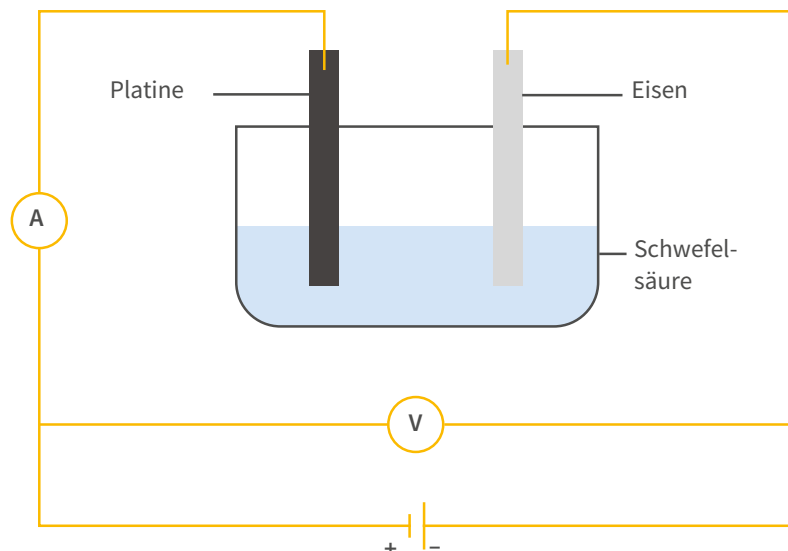
**Geräte**

Gleichstromquelle, Strommessgerät, Spannungsmessgerät, Schmirgelpapier, 2 Stücke Edelstahl oder Eisen mit möglichst großer Oberfläche (z. B. Gitter, Blech oder aufgedrehter Draht), Leiterplatte mit möglichst großen Leiterbahnen, Kristallisierschale oder DC-Kammer.

Chemikalien	Gefahrensymbole	H-Sätze	P-Sätze	Signalwort
Schwefelsäure (w = 20%)		290-314	280-301+330+331-303+361+ 353-305+351+338+310	Gefahr

## DIREKTELEKTROLYSE VON LEITERPLATINEN

### Schaltplan der Direktelektrolyse



### Durchführung

- ⦿ Die Platine wird zur Entfernung der Kunststoffschicht zunächst vorsichtig geschmirgelt, bis die Leiterbahnen sichtbar werden.
- ⦿ Die Elektrolysezelle wird gemäß der Abbildung aufgebaut, wobei das Eisen- bzw. Edelstahlstück als Minuspol geschaltet wird. Es ist darauf zu achten, dass die Leiterbahnen der Platine auch mit der Spannungsquelle in Berührung kommen. Der Kontakt wird mit einer Krokodilklemme hergestellt.
- ⦿ Nun elektrolysiert man in 20%iger Schwefelsäure so lange bei ca. 3,5 V, bis eine Blaufärbung des Elektrolyten zu erkennen ist.
- ⦿ Die äußere Spannung wird abgeschaltet, und das Eisen- bzw. Edelstahlblech wird durch ein neues ersetzt. (Vorsicht! Abscheidungen an der Elektrode nicht berühren!). Nach Einführen des neuen Bleches in die Elektrolysezelle wird eine Spannung von nicht mehr als 0,5 V angelegt.
- ⦿ Bereits nach kurzer Zeit erkennt man am Minuspol Veränderungen, die mit zunehmender Dauer der Elektrolyse an Deutlichkeit gewinnen.

### Entsorgung

Elektrolyt und erste Edelstahlelektrode in Sammelbehälter für anorganische Chemikalienreste. Weitere Elektroden wiederverwenden.

**EXPERIMENT 4.1****LITHIUM-SAUERSTOFF-BATTERIE**





Batterien auf Lithium-Ionen-Basis sind in der heutigen Zeit die meistverwendeten Energiespeicher für Elektronikgeräte wie Tablets, Smartphones und Co. Auch in der Automobilbranche, im Bereich der Elektro- und Hybridfahrzeuge sowie bei der Energiewende gelten sie als Hoffnungsträger zur Energiespeicherung. Dabei wird vor allem an verschiedenen Elektrolyten und Elektrodenmaterialien der Lithium-Ionen-Technologie geforscht. Eine leistungsstärkere Alternative könnte die Lithium-Sauerstoff-Batterie sein.

**a. Lithium-Sauerstoff-Batterie****Aufgabe**

Führen Sie die Messung durch.

**Geräte**

Multimeter als Volt- und Amperemeter, Kabelmaterial sowie Krokodilklemmen, 150-mL-Becherglas, Siebhülse  $\varnothing=16$  mm und L=5 mm (Baumarkt), Bleistiftmine  $\varnothing = 65$  mm (Faber-Castell Art.-Nr. TK 9071)

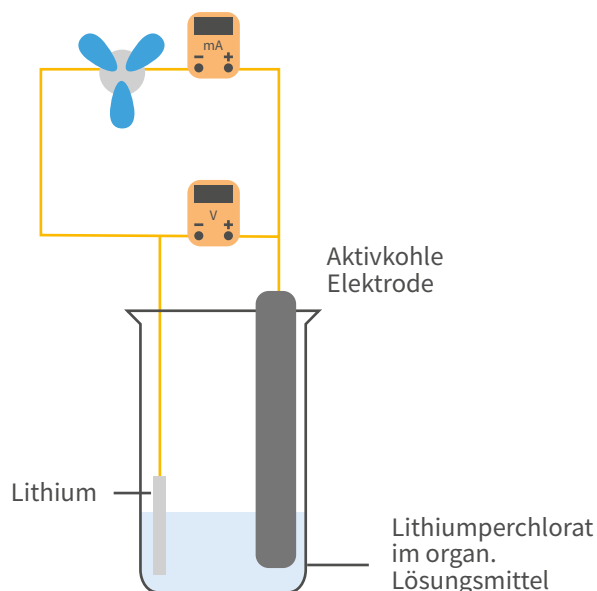
Chemikalien	Gefahrensymbole	H-Sätze	P-Sätze	Signalwort
Lithium (z.B. Draht)		260, 314	223, 280 231+232 305+351+338 370+378b 422a EUH014	Achtung
Dimethylcarbonat		225	210, 240 403+233	Gefahr
Propylencarbonat		319	305+351+338	Achtung
Lithiumperchlorat		271, 315, 319, 335	220 261 305+351+338	Gefahr
Aktivkohle, grobe Körnung (1-3mm)	-	-	-	-

**Sicherheitsvorschriften**

Lithiumperchlorat ist stoßempfindlich. Vorsichtige Handhabung! Lithium ist als Alkalimetall reaktiv und reagiert mit Luftsauerstoff spontan.

## LITHIUM-SAUERSTOFF-BATTERIE

Abbildung 1



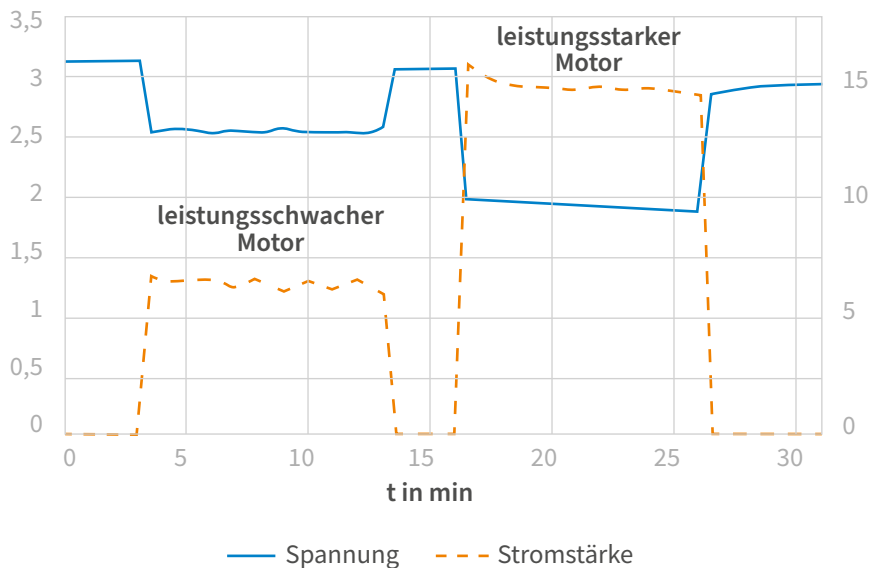
## Durchführung

In einer Lösung von 40 ml Dimethylcarbonat und 60 ml Propylencarbonat werden 10 g Lithiumperchlorat unter Umrühren gelöst. Etwa 80 ml dieser Lösung werden in das Becherglas gegeben. Ein Stück Lithiumdraht von etwa 3 cm Länge wird an einem Ende platt geklopft und mit einem feinen Schmirgelpapier abgerieben. Das platt geklopft Ende wird mit Hilfe einer Krokodilklemme an einem Kabel befestigt und in die Lösung eingetaucht. In der Siebhülse wird die Bleistiftmine in der Mitte als Ableitelektrode eingebracht, sodass sie etwa 1 bis 2 cm aus der Siebhülse herausragt, dann wird mit der nicht vorbehandelten Aktivkohle befüllt. Die Siebhülse wird oben mit etwas Knete abgedichtet und ebenfalls in das Becherglas eingestellt. Die elektrische Schaltung wird wie in Abbildung 1 gezeigt vorgenommen. Nun wird für 3 Minuten die Ruheklemmenspannung gemessen.

In unseren Experimenten beträgt diese 2,95 bis 3,15 V. In der Literatur wird ein Wert von 2,96 V angegeben. Nun schaltet man für einige Minuten den leistungsschwachen Motor in den Stromkreis. Der Propeller des Motors dreht sich lebhaft. In den Versuchen fällt die Spannung auf etwa 2,55 V ab und die Stromstärke beträgt etwa 6,5 mA. Danach wird der Motor wieder aus dem Stromkreis entfernt und für einige Minuten erneut die Ruheklemmenspannung gemessen. Abschließend wird noch einmal ein leistungsstärkerer Motor in den Stromkreis geschaltet. Auch hier dreht sich der Propeller des Motors bei einer Stromstärke von etwa 15 mA zügig und die Spannung fällt auf etwa 1,95 V ab. Die gesamten Versuchsergebnisse sind aus Abbildung 2 ersichtlich.

LITHIUM-SAUERSTOFF-BATTERIE

Abbildung 2



b. Lithium-Sauerstoff-Batterie mit Potenzialmessung

Aufgabe

Führen Sie die Messung durch.

Geräte

wie in Experiment a., zusätzlich zwei 100-ml-Bechergläser, Silber/Silberchlorid-Elektrode und zwei weitere Multimeter für die Potenzialmessung.

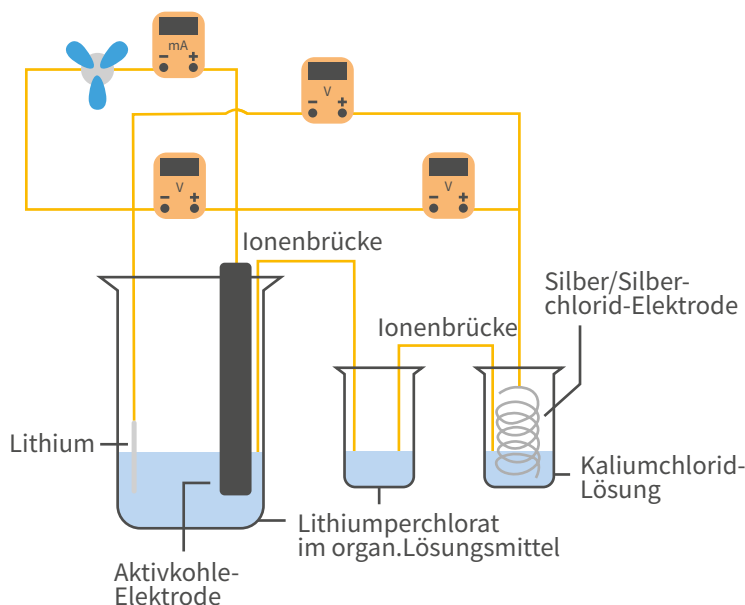
Chemikalien

wie in Experiment a., zusätzlich

Chemikalien	Gefahrensymbole	H-Sätze	P-Sätze	Signalwort
Kaliumchlorid-Lösung (c(KCl) = 1M)	-	-	-	-

## LITHIUM-SAUERSTOFF-BATTERIE

Abbildung 3



## Durchführung

Um die Potenziale der Elektroden gegen die Silber/Silberchlorid-Elektrode zu messen, werden zunächst zwei Filterpapierstücke mit der organischen Carbonat-Lösung (Elektrolyt aus Dimethylcarbonat und Propylencarbonat) befeuchtet. Sie dienen als Ionenbrücken. Die erste Ionenbrücke wird mit dem einen Ende in das Becherglas mit der Silber/Silberchlorid-Elektrode in die Kaliumchlorid-Lösung getaucht, und das andere Ende wird in ein weiteres kleines Becherglas mit etwa 20 mL organischer Carbonat-Lösung gegeben. Die zweite Ionenbrücke geht von dem kleineren Becherglas mit organischer Carbonat-Lösung in das Becherglas mit den beiden Elektroden. Die Elektrolytlösung mit den Elektroden wird somit vor Wasserzutritt geschützt. Der Versuchsaufbau sowie die Schaltung der Multimeter zur Messung der Potenziale sind in Abbildung 3 dargestellt. Das Potenzial der Silber/Silberchlorid-Elektrode beträgt in der 1-molaren Kaliumchlorid-Lösung +0,234 V.

## c. Wiederaufladen der Lithium-Sauerstoff-Batterie

## Aufgabe

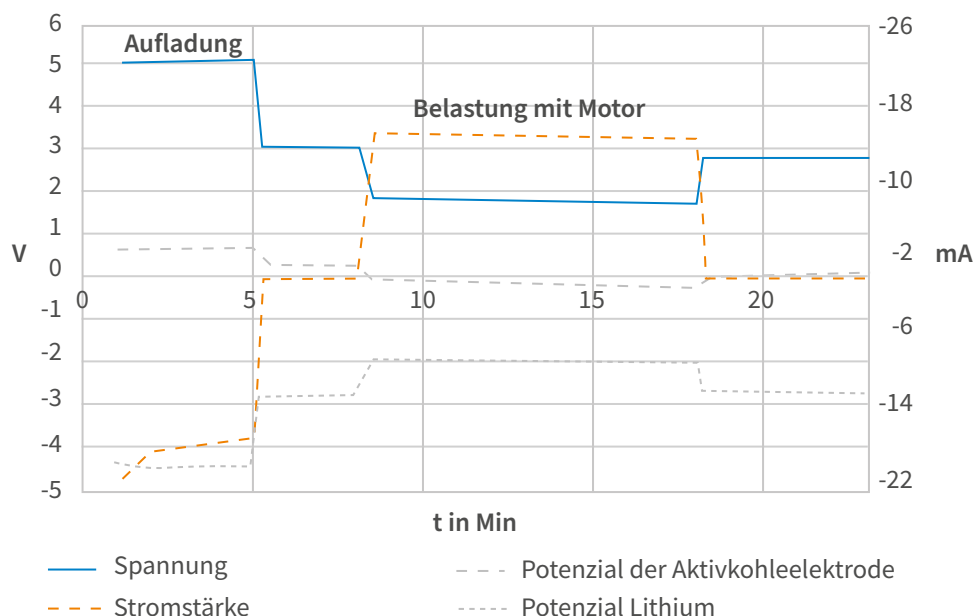
Führen Sie die Messung durch.

## Geräte

wie in Experiment b., zusätzlich eine Spannungsquelle.

## Chemikalien

wie in Experiment b.

**LITHIUM-SAUERSTOFF-BATTERIE**
**Abbildung 4**

**Durchführung**

Der Versuchsaufbau kann aus dem Vorversuch übernommen werden. Anstelle des Elektromotors wird nun nach Betrieb der Batterie in Experiment b die Spannungsquelle in den Stromkreis geschaltet. Die Aufladung der Batterie erfolgt fünf Minuten mit einer Spannung von 5,16 V. Dabei beträgt in unseren Versuchen das Potenzial der Aktivkohle-Elektrode während der Aufladung etwa +0,7 V und das der Lithium-Elektrode etwa -4,4 V. Es ist eine Stromstärke von etwa 18 mA zu verzeichnen.

Nach dem Aufladen liegt die Ruheklemmenspannung der Zelle bei 3,09 V und das Potenzial der Lithium-Elektrode beträgt -2,736 V, und das der Aktivkohlelektrode liegt bei +0,344 V. Unter Belastung mit einem leistungsstarken Motor zeigen sich ähnliche Spannungs- und Potenzialverläufe wie in Experiment b. Die Ergebnisse sind aus Abbildung 4 ersichtlich. Damit zeigt sich, dass die Lithium-Sauerstoff-Batterie wieder aufladbar ist.

**d. Lithium-Sauerstoff-Batterie mit getrockneter Aktivkohle**
**Aufgabe**

Führen Sie die Messung durch.

**Geräte**

wie in Experiment c.

**Chemikalien**

wie in Experiment c.



## LITHIUM-SAUERSTOFF-BATTERIE

---

### Durchführung

Für das Wiederaufladen wird ebenfalls eine Spannungsquelle verwendet, die eine separate Einstellung der beiden Ladungspotenziale der Elektroden ermöglicht. Die verwendete Aktivkohle wird ein bis zwei Tage im Trockenschrank bei 200°C vorgetrocknet und kurz vor Gebrauch in einer Porzellanschale zehn Minuten lang mit einem Bunsenbrenner stark erhitzt. Nach Abkühlung wird diese Aktivkohle dann in die Siebhülse eingefüllt und die fertige Elektrode in die Elektrolytlösung eingetaucht. Die Versuchsdurchführung erfolgt zunächst wie in Experiment b und für eine anschließende Aufladung wie in Experiment c.