

## Inhaltsverzeichnis

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



Das Inhaltsverzeichnis 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

## HINWEISE FÜR LEHRKRÄFTE

### Zu 1

Wofür stehen die Abkürzungen in der rechten Spalte der Tabelle?

Symbol, Kurzzeichen	Chemische Bezeichnung
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer(e)
PA	Polyamide
PUR	Polyurethane
Polyether-PUR EP	Polyether (z. B. Polyethylenglykol), Polyurethane Polyethylen/Polypropylen
Polyester-PUR UP PC	Polyester Polyurethane Ungesättigte Polyesterharze Polycarbonat
PMMA	Polymethylmethacrylat
PVC	Polyvinylchlorid

### Zu 2

Führen Sie an drei Beispielen die unterschiedliche Beständigkeit eines Kunststoffs auf seine molekulare Struktur zurück.

#### **Teflon® (PTFE):**

Hohe Beständigkeit gegen alle angeführten Einwirkungen aufgrund der starken Bindungen zwischen Kohlenstoffatomen und Fluoratomen und der vollständigen Abschirmung der Kohlenstoffkette durch die großen Fluoratome.

#### **Polyester (Estergruppe in der Hauptkette):**

Polyester (insbesondere aliphatische Polyester) können hydrolytisch gespalten werden und weisen deshalb eine geringe Beständigkeit gegen die Einwirkung von Laugen und heißem Wasser und eine nur mäßige Beständigkeit gegen Säuren auf. Die Beständigkeit gegenüber Sauerstoffeinwirkung ist hoch. Das Kohlenstoffatom der Estergruppe liegt bereits in Verbindung mit Sauerstoff und in der Oxidationsstufe + III vor.

#### **ABS (C = C-Doppelbindung in der Hauptkette):**

Ohne hydrolytisch spaltbare Atomgruppen in der Hauptkette ist die Beständigkeit gegen die Einwirkung von heißem Wasser, Säuren und Laugen gut. Die Beständigkeit gegen Hitzeeinwirkung ist wegen der geringen Gebrauchstemperatur des amorphen Thermoplastes gering. Die Doppelbindung ist empfindlich gegen Fotooxidation.



## BESTÄNDIGKEIT VON KUNSTSTOFFEN GEGEN HYDROLYSE UND BEWITTERUNG

## HINWEISE FÜR LEHRKRÄFTE

### Zu 3

Informieren Sie sich im Internet über den Einsatz von Kunststoffen im Automobilbau.

- 🟡 Einsatz von PUR-Schaum im Innenbereich (Polsterung, Armaturentafel ...),
- 🟡 lackierte PU-Kunststoffteile im Außenbereich (Karosserieteile),
- 🟡 PMMA im Außenbereich (Scheinwerferabdeckung, Rückleuchten, Blinkleuchten, Fahrzeugverglasungen ...),
- 🟡 ABS im Innen- und Außenbereich (Armlehnen, Mittelkonsolen, Kühlerblenden, Spoiler ...).

### Zu 4/5

Begründen Sie den bevorzugten Einsatz bestimmter Kunststoffe im Automobilbereich vor dem Hintergrund der Angaben in der Tabelle.

Begründen Sie, warum Kunststoffteile aus PUR im Außenbereich von Kfz grundsätzlich lackiert werden.

Der bevorzugte Einsatz von Polyurethan lässt sich mit den hervorragenden Gebrauchseigenschaften begründen. Im Innenraum ist ein Kunststoff vor Witterungseinflüssen geschützt. PUR-Kunststoffteile sind jedoch empfindlich gegen die Einwirkung von heißem Wasser und Witterungseinflüssen. Davor kann eine geeignete Lackierung schützen.

PMMA ist aufgrund der hervorragenden Witterungsbeständigkeit in Verbindung mit der leichten Anfärbbarkeit und hoher Transparenz für Beschichtungen besonders geeignet. Aufgrund der geringen mechanischen Beanspruchung dieser Bauteile ist auch die relativ niedrige Gebrauchstemperatur kein Nachteil. Für Verkleidungen und Formteile ohne hohe Temperaturbelastung können preiswerte ABS-Kunststoffe eingesetzt werden, die jedoch im Außenbereich gegen Bewitterung geschützt werden müssen.

### Zu 1

Recherchieren Sie, welche Kunststoffsorten für welche Verpackungsmaterialien Anwendung finden.

#### **Polyethen, zum Beispiel:**

Tragetaschen, Stretchfolien, Kleiderschutzfolien, Müllbeutel und Shampoo-Flaschen

#### **Polypropen, zum Beispiel:**

Klarsichttüten, Margarinebecher, kochfeste Folien und Schraubverschlüsse von Plastikflaschen

#### **Polystyrol, zum Beispiel:**

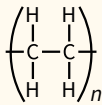
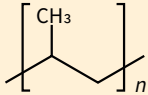
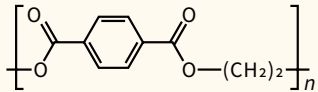
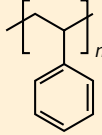
Joghurt- und Kaffeebecher

#### **Polyethylenterephthalat, zum Beispiel:**

Flaschen für Erfrischungsgetränke

### Zu 2

Geben Sie für alle im Text genannten Kunststoffe einen Ausschnitt aus der Strukturformel an.

Polyethylen (PE)		Folien, Tüten, Lebensmittelverpackungen, Milchflaschen, Shampoo-Flaschen, Spielzeug ...
Polypropylen (PP)		Verpackungen, Autoteile, Rohre ...
Polyethylenterephthalat (PET)		Getränkeflaschen, Textilfasern ...
Polystyrol (PS)		Schaumstoffe für Gebäudedämmung und Getränkebecher ...

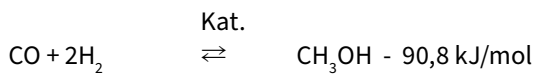
**Zu 1**

Stellen Sie den Prozess der Synthesegasgewinnung aus Kunststoffabfällen in einem einfachen Flussdiagramm dar.



**Zu 2**

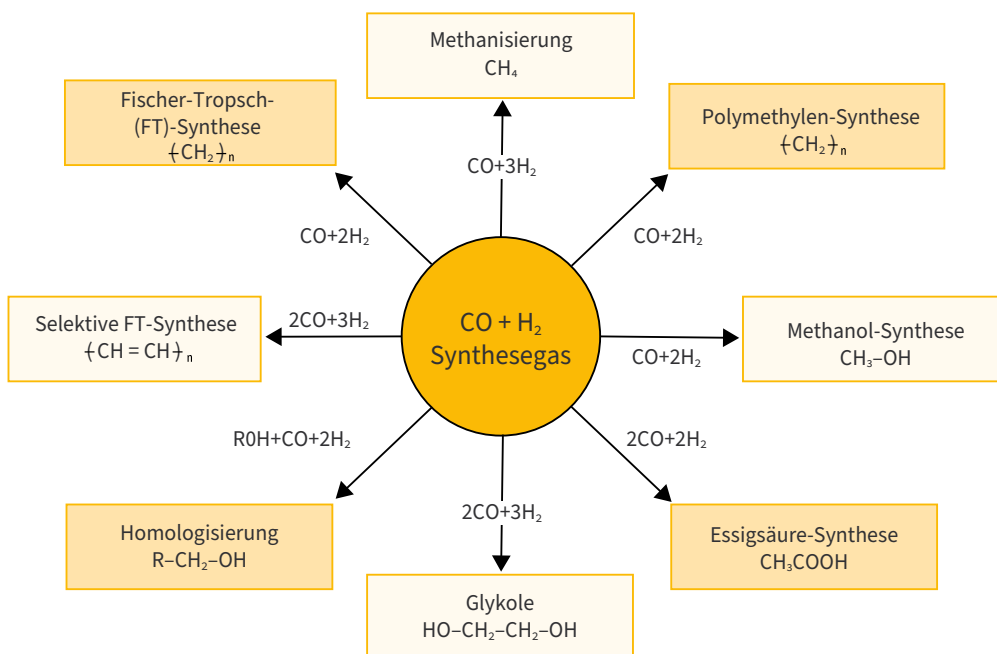
Formulieren Sie die Gewinnung von Methanol aus Synthesegas als Reaktionsgleichung.



**Zu 3**

Synthesegas ist Ausgangsstoff für weitere Schlüsselchemikalien der chemischen Industrie. Nennen Sie drei Beispiele

**MÖGLICHKEITEN DER SYNTHESEGAS-CHEMIE**





#### Zu 4

Erläutern Sie, weshalb das beschriebene Verfahren zur Verwertung von Kunststoffabfällen nur eine Brückentechnologie sein kann.

Die Vergasungstechnologie ist die einzige, mit der die Brücke zur Kohlenstoffkreislaufwirtschaft geschlagen werden kann. Vergasungstechnologien ermöglichen nicht nur das chemische Recycling, sondern leisten durch die vermiedenen C-Emissionen der Müllverbrennung auch einen Beitrag zur Erreichung der CO<sub>2</sub>-Minderungsziele. Des Weiteren kann die Abhängigkeit der chemischen Industrie von importiertem Erdöl verringert werden.

Um die Abfallkrise und insbesondere das Kunststoffproblem zu meistern, ist jedoch ein ganzheitlicher Ansatz mit aufeinander abgestimmten Stufen der Abfallvermeidung gefragt. Diese beginnen bei der Vermeidung, werden gefolgt vom recyclinggerechten Design und setzen sich fort über die Stufen des mechanischen und des chemischen Recyclings. Plastikabfälle sollen schließlich nur noch im Ausnahmefall in die Müllverbrennung, praktisch nicht mehr in Deponien und grundsätzlich überhaupt nicht mehr in die Umwelt gelangen. Die Vergasung ist ein „Allesfresser“, mit dessen Hilfe es möglich ist, bisher verbrannte Kunststoffabfälle nicht mehr als thermisch zu entsorgende Abfälle zu begreifen, sondern als Rohstoff für die chemische Industrie.

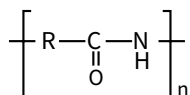
**Zu 1**

Diskutieren Sie, welche Polymertypen für den Prozess der Solvolyse infrage kommen und welche nicht.

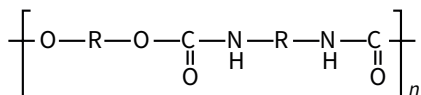
**Vgl. auch Experiment 1.5**

Die Zersetzung der Polymere in Oligomere oder Monomere in Lösungsmittel unter der Wirkung von diesen Lösungsmitteln oder den dort gelösten chemischen Reagenzien (Basen, Säuren, Alkohole usw.) wird als Solvolyse bezeichnet. Da bei der Solvolyse das Polymer Schritt für Schritt in Bestandteile abgebaut wird, wird diese Technologie fast ausschließlich bei den Polymeren angewendet, die durch Polykondensation entstehen und Heteroatome (etwa N oder O) in der Hauptkette beinhalten. An den funktionellen Struktureinheiten kann das Solvolyseagens angreifen, zum Beispiel.

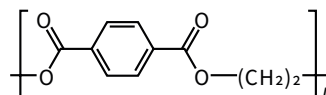
**Polyamide (PA)**



**Polyurethane (PU)**

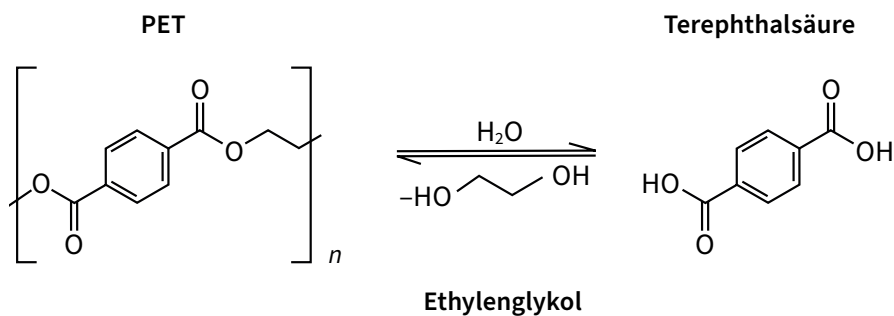


**Polyethylterephthalat (PET)**



**Zu 2**

Formulieren Sie die Reaktion der Solvolyse von Polyethylterephthalat mit Wasser (Hydrolyse).



## DER STRALUNGSHAUSHALT DER ERDE UND DER TREIBHAUSEFFEKT

## HINWEISE FÜR LEHRKRÄFTE

### Zu 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.

Ein Teil der Sonnenstrahlung wird durch Bestandteile der Erdatmosphäre absorbiert (etwa UV-Strahlung durch Ozon, IR-Strahlung durch Wasserdampf), ein anderer Teil wird reflektiert (zum Beispiel an Aerosolen und Wolken), sodass überwiegend sichtbare Strahlung auf den Erdboden gelangt. Diese führt dort zu einer Erwärmung und zur Emission von IR-Strahlung, die schließlich wieder von Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid und Spurengasen in der Atmosphäre absorbiert wird.

Die erneute Energieabgabe durch Stoß, Transport oder eben die Reemission von IR-Strahlung führt zu einer verstärkten Erwärmung des Erdbodens, sodass die Abstrahlung größer als 100 Prozent (bezogen auf die Sonneneinstrahlung) werden kann.

### Zu 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.

Erwartet wird die Erklärung entsprechend dem in Abbildung 1 (Schüler:innenarbeitsblatt 2.1) dargestellten Strahlungshaushalt und der hier dargestellten Abbildung: Die Absorption und die Reemission von IR-Strahlung zwischen Molekülen in der Atmosphäre und dem Erdboden führen zu einer verstärkten Erwärmung und damit zu dem sogenannten Treibhauseffekt, da die indirekte Abstrahlung zurück in den Weltraum verhindert wird. Der Abbau von Ozon in der Ozonschicht beruht auf vollkommen anderen Prozessen (photolytische Spaltung von CFKW-Molekülen, Folgereaktionen zwischen den entstehenden Radikalen und Sauerstoffradikalen, Beeinflussung des Gleichgewichts aus Ozonbildung und -abbau) und beeinflusst primär die gesundheitsschädigende Einstrahlung von UV-Strahlung.



**Zu 1**

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

Genannt werden könnten:

- die Verbrennung fossiler Brennstoffe verringern (Energie sparen),
- Nutzung von Wind- und Sonnenenergien,
- das Abholzen von Wäldern stoppen und stattdessen neue Wälder aufforsten,
- Kohlenstoffdioxid in tiefe Gesteinsschichten bzw. in das Tiefenwasser der Ozeane bringen und dort speichern,
- die biologische Fixierung durch Düngung fördern,
- Kohlenstoffdioxid als Rohstoffquelle in der chemischen Industrie nutzen.

### Zu 1

Definieren Sie den Begriff „Kippelement“ im Zusammenhang mit dem Prozess des Klimawandels.

#### Weitere Informationen:

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

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

<https://www.bing.com/videos/search?view=detail&q=kippelement+im+Zusammenhang+mit+Klimawandel&mid=7DCB17FA9FB65DAE8DDE7DCB17FA9FB65DAE8DDE&mmscn=serpvidol&FORM=VIRE&ajaxhist=0&ajaxserp=0> (01.11.2024)

### Zu 2

Beschreiben Sie mögliche Folgen beim Überschreiten folgender Kippelemente:

#### a. Gletscher schmelzen

Die Eisflächen auf der Erde, in der Arktis oder Antarktis und in Hochgebirgen, reflektieren in hohem Maße das einstrahlende Sonnenlicht. Schmilzt das Eis, kommt meist ein dunklerer Untergrund zum Vorschein, sei es das felsige Bett eines Gletschers oder das Meer. Diese freigelegte dunkle Oberfläche nimmt mehr Sonnenwärme auf, die den Schwund des verbliebenen Eises beschleunigt. Dieser Mechanismus, die sogenannte Eis-Albedo-Rückkopplung, ist ein klassisches Beispiel eines selbstverstärkenden Prozesses, bei dem ein und dasselbe Phänomen, nämlich der Eisverlust, sowohl Folge als auch ein Teil der Ursache der lokalen Temperaturerhöhung ist.

Die Eisschilde der Erde reagieren nur langsam auf den Klimawandel, aber das heißt auch: Wenn das Schmelzen richtig im Gange ist, wird es nicht davon aufgehalten, dass die Erderwärmung in der Zukunft gestoppt wird. Der aktuelle Bericht des Weltklimarats warnt: Je nachdem, wie lange es bis dahin noch dauert, kann der Schmelzprozess auf lange Sicht unumkehrbar werden. Wenn der gesamte Eisschild dann im Verlauf der nächsten Jahrhunderte oder Jahrtausende vollständig abschmelzen würde, könnte das zu einem globalen Meeresspiegelanstieg von mehr als sieben Metern führen.

Aber auch die arktischen Perma- oder Dauerfrostböden in Sibirien und Nordamerika, die über Jahrhunderte bis Jahrtausende bis in tiefe Schichten gefroren sind, könnten beim Auftauen riesige Mengen an Kohlenstoffdioxid und Methan freisetzen und dadurch das Klimagleichgewicht entscheidend beeinflussen.

#### b. Abholzung und Brände der Urwälder

Im Amazonas-Regenwald und auch in den borealen Nadelwäldern in Kanada und Sibirien sind große Mengen Kohlenstoff gespeichert, die in die Atmosphäre entweichen, wenn die Bäume beispielsweise abbrennen oder an den Folgen von Dürreperioden sterben. In der Folge gehen die Photosyntheseleistungen in diesen Regionen stark zurück.

Neben den Treibhausgas-Emissionen hat der Verlust an Bäumen auch Auswirkungen auf das regionale Wetter: Der Pflanzenbestand in einem Regenwald hat unmittelbare Auswirkungen auf das Feuchtigkeitsgleichgewicht in der Region, weil weniger Wasser von den Pflanzen verdunstet wird und es in der Folge zu geringeren Niederschlagsmengen kommt. Der Boden wird trockener und der Regenwald verliert seine Widerstandskraft. Untersuchungen zeigen, dass Teile der Baumbestände den neuen Klimabedingungen nicht gewachsen sind und absterben. Das wiederum könnte die Umwandlung in einen an Trockenheit angepassten saisonalen Wald oder in eine Graslandschaft bewirken. Auch der boreale Nadelwald auf der Nordhalbkugel könnte durch Busch- und Grasland

schaften verdrängt werden. Schon jetzt stößt der Amazonas-Regenwald laut einer Studie mehr Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) aus, als er aufnimmt. Nach einer Studie der University of Oklahoma könnte der Kipppunkt schon erreicht sein. Die Forschenden bezogen sich dabei vor allem auf Satellitendaten, die Aufschluss über die pflanzliche Biomasse im Regenwald und dessen Abholzung geben. Zwischen 2010 und 2019 hat der Amazonas-Regenwald in Brasilien demnach etwa 18 Prozent mehr  $\text{CO}_2$  ausgestoßen als gespeichert. Rund 16,6 Milliarden Tonnen  $\text{CO}_2$  gab das Amazonas-Becken so in die Umwelt ab. Es nahm aber nur etwa 13,9 Milliarden Tonnen  $\text{CO}_2$  auf.

Wissenschaftler/innen schätzen, dass allein in der Amazonas-Region in lebendem und totem Pflanzenmaterial 80–120 Milliarden Tonnen Kohlenstoff gespeichert sind. Das ist mehr, als in den Jahren 2022–2024 auf der ganzen Welt freigesetzt wurde. Würde also im Extremfall dieser gespeicherte Kohlenstoff in die Atmosphäre gelangen, hätte das nicht nur regionale, sondern auch globale Folgen für das Klima.

### c. Kohlenstoffdioxid-Aufnahme des Meeres

Die Weltmeere nehmen große Mengen an Kohlenstoffdioxid auf – rund 40 Prozent der bisherigen anthropogenen  $\text{CO}_2$ -Emissionen wurden so der Atmosphäre wieder entzogen. Ein großer Teil davon wird von Algen zum Wachstum genutzt und sinkt nach deren Absterben in die Tiefsee. Die Funktion dieser sogenannten marinen biologischen Kohlenstoffpumpe könnte durch Erwärmung und Versauerung des Wassers sowie häufiger auftretende Sauerstoffarmut eingeschränkt werden. Damit haben die Meere einen großen Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf der Erde.

Doch durch die zunehmenden Temperaturen nimmt der Sauerstoffgehalt des Meeres ab, sodass weniger Algen wachsen. Die Folge: Das Meer nimmt deutlich weniger  $\text{CO}_2$  auf. Zudem sorgen die ansteigende Temperatur des Meerwassers und der mit dem Kohlenstoffdioxid-Eintrag verbundene sinkende pH-Wert ebenfalls für eine verminderte Aufnahme dieses Treibhausgases. Der aktuelle Bericht des Weltklimarats weist darauf hin, dass die Aufnahmefähigkeit des Meeres sinkt, je höher die Emissionen sind. Das bedeutet: Wenn es weiter hohe Emissionen gibt, können immer weniger davon von den Ozeanen aufgenommen werden. Im Ergebnis würden noch mehr Treibhausgase als bisher in der Atmosphäre verbleiben.

### d. Abschwächung des Golfstroms

Ohne den Golfstrom wäre es in Nord- und Westeuropa deutlich kälter, im Winter fast so eisig wie in Sibirien. Der Golfstrom ist eine Meereszirkulation im Atlantischen Ozean. Er führt warmes Wasser entlang der Meeresoberfläche von Süden nach Norden und gibt dort Wärme an die kühle Luft ab. Auf diese Weise wird der Nordatlantikraum bis nach Europa erwärmt. Seit Mitte des 20. Jahrhunderts ist das Wasser im subpolaren Nordatlantik jedoch auffällig abgekühlt. Die Klimaforschung vermutet, dass die erhöhte Süßwasserzufuhr durch Regenfälle und Eisschmelze dafür verantwortlich sein könnte. Süßwasser sinkt nicht ab, weil es leichter ist als Salzwasser.

Im aktuellen Weltklimaratsbericht halten es die Autorinnen und Autoren daher für sehr wahrscheinlich, dass der Golfstrom im 21. Jahrhundert schwächer wird. Dass das passiert, gilt als recht sicher – unsicher ist dagegen, wie viel schwächer er genau wird. Sollte die Strömung tatsächlich kollabieren, hätte das schwere Folgen. Es könnte dann mehr Extremwetter in Europa geben, wichtige Ökosysteme im Nordatlantik könnten zusammenbrechen, und der Meeresspiegel an der Ostküste der USA würde stärker steigen als bisher angenommen. Die mögliche Ursache: die Abschwächung des Golfstroms. Eine internationale Studie kommt zu dem Ergebnis, dass der Strom bereits um bis zu 15 Prozent an Geschwindigkeit abgenommen hat. Das könnte die Atlantikzirkulation behindern, die durch das Absinken von kaltem Wasser und Aufsteigen von warmem Wasser angetrieben wird.

### Zu 1

Einzelarbeit: Lesen Sie sich Material M1–M4 sorgfältig durch. Unterstreichen Sie wichtige Inhalte.

Individuelle SuS-Lösung

### Zu 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.

Exemplarische Fragestellungen könnten sein:

- Zu M1: Welche Schritte umfasst die CCS-Prozesskette? (Die CCS-Prozesskette umfasst die Schritte Abscheidung, Kompression, Transport und Speicherung.)
- Zu M2: Vor welchen Herausforderungen steht die CCS-Technologie? Hoher Entwicklungs- und Forschungsbedarf bezüglich Effektivität und Umweltverträglichkeit der Technologie und die technische und wirtschaftliche Machbarkeit der Pilotprojekte.
- Zu M3: Welche geologischen Speicheroptionen werden in der Abbildung gezeigt? (Die Abbildung zeigt die Speicherung in produzierenden Öl- und Gasfeldern, salinen Formationen, ausgeförderten Gasfeldern und Kohleflözen.)
- Zu M4: Welche Regionen in Deutschland weisen ein hohes Speicherpotenzial auf? (Mit Bezug auf die Abbildung weisen besonders Regionen im Norden Deutschlands eine hohe Speicherkapazität in tief liegenden und Salzwasser führenden Speichergesteinen auf. Weiterhin sind im Raum Nordrhein-Westfalen Kohleflöze als Speicher vorhanden. Die größten Erdgasfelder finden sich in NRW und in Brandenburg.)

### Zu 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.

Individuelle SuS-Lösung zum Beispiel mit Fragestellungen aus 2.

#### Quellen:

M1-The Royal Society of Chemistry. *Carbon Capture and Storage: introductory lecture - Faraday Discussions* (RSC Publishing) (27.01.2024)

M2-gekürzt und angepasst nach: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Artikel „Die weitere Entwicklung von CCS Technologien“ <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/weitere-entwicklung-ccs-technologien.html> (27.01.24)

M3-CO<sub>2</sub> Speicherung: CO<sub>2</sub>-Speicherung | Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (niedersachsen.de) (27.07.2024)

M4-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)

#### Zu 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.

Mögliche Gründe/Motive protestierender Bürgerinnen und Bürger:

- Gesundheitsgefährdung durch Leckagen,
- Wut auf Energieversorger, deren Abfälle nun an diesen Standorten gelagert werden,
- Unsicherheit über die Dauer der geologischen Speicherung,
- Angst vor einer möglichen Enteignung von eigenem Grund und Boden,
- Angst vor einer möglichen Abwertung und Umweltschädigung der Region,
- Ängste um eine mögliche Verunreinigung des Trinkwassers,
- Unwirtschaftlichkeit und hohe Kosten der Technologie,
- Besetzung von Speicherplätzen durch CCS, die für andere Anwendungen genutzt werden sollen, zum Beispiel Druckluftspeicher.

#### Zu 5

Sprinterfrage: Diskutieren Sie, ob es sich bei CCS um eine Brückentechnologie oder um eine Zukunftstechnologie handelt.

Die SuS diskutieren, ob es sich bei CCS um eine Brückentechnologie oder eine Zukunftstechnologie handelt.

Argumente, die für CCS als Brückentechnologie sprechen:

- CCS kann einen Beitrag zur Reduktion der Emissionen leisten, um Reduktionsziele bis 2050 zu erreichen.
- Die Abscheidung der Emissionen kann zum Beispiel an bereits bestehenden Stein- und Braunkohle-kraftwerken vorgenommen werden.
- CCS kann bei der geologischen Nutzung in Öl- und Gaslagerstätten gleichzeitig zur Förderung von Erdöl und Erdgas genutzt werden (EOR-Technologie).

Argumente, die gegen CCS als Zukunftstechnologie sprechen:

- Die Abscheidung von CO<sub>2</sub> ist eine sehr energieintensive, teure und technologisch noch nicht vollständig erschlossene Technologie.
- Die Machbarkeit und die Funktionalität zum Beispiel hinsichtlich Umweltverträglichkeit werden noch in Pilotprojekten erforscht.
- Die Kompression des Gases und der Transport zur Lagerstätte benötigen eine Infrastruktur, die zusätzliche Emissionen verursachen kann.
- Die Dauer der Speicherung hängt sehr stark von der Lagerstätte ab (Schätzungen zufolge kommen zum Beispiel mit dem geförderten Erdöl circa 30 Prozent des EOR-CO<sub>2</sub> wieder an die Oberfläche).



### Zu 1

Erläutern Sie, was man unter Negativemissionstechnologien (NET) versteht.

Als Negativeemissionstechnologien bezeichnet man technologische Lösungen, die Treibhausgase, insbesondere CO<sub>2</sub>, aus der Luft absorbieren. Man unterscheidet grundsätzlich zwei Verfahrenstypen:

BECCS (Bioenergy and Carbon Capture and Storage): Das infolge der Photosyntheseleistung von biologischem Material (zum Teil gezielt angebaute Pflanzen) gespeicherte CO<sub>2</sub> wird in großem Maßstab durch Verbrennung freigesetzt, eingefangen und unter der Erde/dem Meer gespeichert. Die dabei gewonnene Energie wird genutzt.

DACCS (Direct Air Carbon Capture and Storage): CO<sub>2</sub> wird direkt aus der Atmosphäre gefiltert oder aus Großanlagen wie Kraftwerken oder Zementfabriken aufgefangen und gespeichert bzw. weiterverwendet.

### Zu 2

Welche Voraussetzungen müssen gegeben sein, damit Negativemissionstechnologien einen signifikanten Einfluss auf den Erhalt des Weltklimas ausüben?

Das CO<sub>2</sub> aus solchen Prozessen muss sicher und über lange Zeit gespeichert werden. Als Lagerstätten kommen bestimmte Gesteinsformationen oder ehemalige Erdgas- und Steinkohlelagerstätten infrage. Auch Speicherungen in den Tiefen der Meere werden geprüft. Über die Sicherheit solcher Lagerungen gibt es unterschiedliche Ansichten.

Ein entscheidendes Kriterium für die Schaffung von negativen Emissionen ist der dauerhafte Entzug des CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre (mindestens mehrere Jahrzehnte, besser Jahrhunderte). Wird das aus der Atmosphäre entnommene CO<sub>2</sub> etwa zur Herstellung von synthetischen Treibstoffen genutzt, werden temporäre Speicher erzeugt. In diesem Fall spricht man nicht von negativen Emissionen, da das Treibhausgas der Atmosphäre nur einen kurzen Zeitraum über entzogen bleibt. Dieses Vorgehen kann jedoch zum Aufbau einer klimaschonenden Kreislaufwirtschaft beitragen. Allen natürlichen Senken ist jedoch gemein, dass sie umkehrbar sind und das CO<sub>2</sub> schnell wieder freisetzen können. Dies muss bei der regulatorischen Ausgestaltung von Maßnahmen berücksichtigt werden, wenn in der Gesamtbetrachtung eine positive Klimawirkung sichergestellt werden soll.



### Zu 3

Welche Gefahren sehen Sie bei einem breiten Einsatz von NET?

Die Auseinandersetzung mit NET verläuft nicht ohne Spannungen. Einerseits wächst die Anerkennung ihrer Notwendigkeit, andererseits besteht die Gefahr, dass ihnen zu viel Potenzial zugeschrieben wird und deswegen dringend notwendige emissionsmindernde Maßnahmen aufgeschoben oder gar unterlassen werden. Letzteres wäre jedoch sehr riskant. Denn ausnahmslos alle vorgeschlagenen Verfahren sind entweder in der Praxis noch nicht erprobt oder nicht einsatzbereit in dem Umfang, der benötigt wird, um klimawirksam zu sein. Zudem sind viele grundlegende Fragen wie Kosten oder Zielkonflikte und damit die Umsetzungschancen im konkreten Fall nicht ausreichend geklärt.

NET stellen aus diesen Gründen keine Alternative zu umgehenden massiven Emissionsminderungen dar. Realistisch betrachtet können sie allenfalls als unterstützender Teil eines größeren Maßnahmenpakets zielführend und wirksam sein. Dies setzt jedoch voraus, dass ihre Erforschung und ihre Entwicklung zur Marktreife rasch vorangetrieben und gefördert werden.

**Zu 1**

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

**Dichtentrennung**

Die Trennung der Kunststoffe nach der Dichte ist ein wichtiger Schritt bei der Herstellung von hochwertigen Granulaten aus Mischungen. Dazu wird heute die Dichtentrennung mit Wasser eingesetzt. Nur der sortenreine Kunststoff ist für die weiterverarbeitende Industrie wertvoll. Die heute am häufigsten eingesetzte Technik zur Dichtentrennung ist der Trennbehälter. In dem mit einer wässrigen Flüssigkeit gefüllten Behälter treten durch die Rotation von Paddeln allerdings Strömungen und Turbulenzen auf die die Kräfte des Erdschwerefeldes überlagern und die Dichtentrennung erschweren. Neue Techniken wie die sogenannte Hydrozyklontechnik umgehen diesen Nachteil durch die im System herrschenden hohen Beschleunigungskräfte. (Abbildung 1)

**Abbildung 1**

Schematische Darstellung der Hydrozyklontechnik für die Dichtentrennung von Kunststoffgemischen (verändert nach <sup>1</sup>)



Ein weiteres, allerdings für diese Zwecke aufwendiges Verfahren zur Trennung von geschreddertem Elektronikschrott ist die Flotationstechnik, die von Schülerinnen und Schülern in diesem Zusammenhang recherchiert werden kann.<sup>2</sup> Sie ist ihnen möglicherweise aus der Erzaufbereitung bekannt. Die Trennung verschiedener Kunststoffsorten mittels Flotation geschieht in der Regel durch gezielte Beeinflussung der Partikeloberflächen mittels zugesetzter Reagenzien. Sogenannte Sammler sind Moleküle, deren aktive Gruppe so gestaltet ist, dass sie sich spezifisch an bestimmte Komponenten anlagert. Die aktive Gruppe bildet in der Regel den Kopf einer unpolaren Kohlenwasserstoffkette, welche hydrophob ist und den Mittler zwischen Partikel und Luftblase darstellt. Partikel, die nicht hydrophobiert werden und am Aufschwimmen gehindert werden sollen, werden

<sup>1</sup> [Pla.to\\_Dichtentrennung\\_2019.pdf \(plato-technology.de\)](#)

<sup>2</sup> Martens, H. & Goldmann, D. R. (2016). *Fachbuch für Lehre und Praxis*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 44 ff.

durch sogenannte Drücker beeinflusst. Regler, die etwa den pH-Wert einstellen, Beleber, die einmal gedrückte und damit hydrophile/hydrophilierte Partikel für eine zweite Trennstufe hydrophobieren, und Schäumer, die die Stabilität des aufschwimmenden Schaums bis zu dessen Abnahme verbessern, sind die wichtigsten weiteren Reagenziengruppen, die in der Flotation eingesetzt werden.

## 2. Magnetscheidung

Mit Hilfe der Magnetscheidung können magnetisierbare Materialien wie Weißblech, Eisen und Stahl aussortiert werden. Nichtmagnetisierbare Materialien sind beispielsweise Edelstahl, Aluminium und Kupfer. Bei der Sortierung von Leichtverpackungen wird die Magnetscheidung vor allem zur Gewinnung der Weißblechfraktion eingesetzt.

Entscheidend für die Wirksamkeit eines Magnetscheiders ist die erreichbare Feldstärke des Magnetfelds im Bereich des zu trennenden Materialstroms. Je weiter das auszusortierende Stück vom Magneten entfernt ist, desto geringer ist dort die Feldstärke und umso geringer sind damit die Anziehungskräfte auf das Sortiergut. Weiterhin maßgebend für den erfolgreichen Einsatz von Magnetscheidern sind der Verlauf der Feldlinien des magnetischen Feldes, die Fördergeschwindigkeit des Materials und die jeweiligen Eigenschaften des auszusortierenden Materials (unter anderem Stückgröße, Form, Füllgutanhaftungen).

Das notwendige magnetische Feld kann durch Elektro- oder Permanentmagnete erzeugt werden. Von Elektromagneten erzeugte Magnetfelder sind weitreichender als die von Permanentmagneten. Dagegen können Letztere mit geringem Aufwand recht hohe Feldstärken im Nahbereich erzielen.<sup>3</sup>

## 3. Elektrosortierung<sup>4</sup>

Für die Trennung von Kunststoffgemischen wird die stoffspezifische elektrostatische Aufladung von Kunststoffen genutzt. Die geladenen Kunststoffgranulate werden anschließend im elektrostatischen Feld separiert. Derzeit konzentriert sich die Verfahrensentwicklung insbesondere auf das Abtrennen von PVC aus Vielkomponentengemischen, was nicht nur für eine werkstoffliche sondern auch eine thermische Nutzung von Kunststoffabfällen von hoher wirtschaftlicher und ökologischer Bedeutung ist.

Des Weiteren zielen die Verfahren auf die sortenreine Trennung von Polyolefin-Gemischen ab, die als Massenkunststoffe einen sehr großen Anteil der Kunststoffabfälle ausmachen. Da dieses Verfahren für unbehandelte Polyolefin-Gemische ungeeignet ist, werden unterschiedliche physikalisch-chemische Modifizierungsverfahren eingesetzt, die die gezielte elektrische Aufladung ermöglichen und dadurch eine Separation in ihre Fraktionen ermöglichen. Mittlerweile sind Vorbehandlungen bekannt, die nicht nur eine sortenreine Trennung von Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP) ermöglichen, sondern auch eine Trennung von High-density- und Low-density-PE erlauben. Vorbehandlungen mittels Elektronenbestrahlung führen zu Aufladeerscheinungen, die durch Oberflächenkontaminationen nicht beeinflusst werden, so dass auch für Abfallprodukte eine hohe Trennsicherheit und -schärfe erreicht wird.

<sup>3</sup> Julia Gerth (2014). *Produktionswirtschaftliche Beschreibungs- und Optimierungsmodelle für die Wertstoffsartierung*, Universitätsverlag Ilmenau. [https://www.db-thueringen.de/servlets/MCRFileNodeServlet/dbt\\_derivate\\_00029534/ilm1-2013000703.pdf](https://www.db-thueringen.de/servlets/MCRFileNodeServlet/dbt_derivate_00029534/ilm1-2013000703.pdf) (21.07.2024)

<sup>4</sup> Reinsch, E., Frey, A., Peuker, U. A., Albrecht, V. & Simon, F. (2012). *Die Anwendung der Elektrosortierung beim Recycling von gefüllten und additivierten Kunststoffen*. *Chemie Ingenieur Technik*, 84(8), 1389–1390

#### 4. IR-gesteuerte Klaubung

Klauben ist ein Sortierverfahren, bei dem jedes einzelne Stück des Stoffstroms auf die ausgewählten Sortierkriterien hin geprüft und gegebenenfalls entnommen wird. Man unterscheidet Handklaubung (Handsortierung) und automatisches Klauben (automatische Sortierung), wozu die IR-gesteuerte Klaubung zählt. Klauben kommt vor allem für diejenigen Fraktionen infrage, die nicht eindeutig durch Materialeigenschaften wie Magnetisierbarkeit, elektrische Leitfähigkeit, Stückgröße oder Dichte zu identifizieren sind. Die hier betrachteten Verfahren zielen alle darauf ab, Wertstofffraktionen entsprechend den Produktspezifikationen zu gewinnen und dabei ein hohes Ausbringen an Wertstoffen zu gewährleisten.

Das Handklauben wird in den Sortieranlagen, die nach dem Stand der Technik zumindest mit einem NIR-Trennaggregat (s. u.) für Getränkekartons und Mischkunststoffe ausgestattet sind, nur noch zur Produktkontrolle herangezogen. Dabei werden die durch die verschiedenen Trennaggregate angereicherten Stoffströme auf Störstoffe kontrolliert.

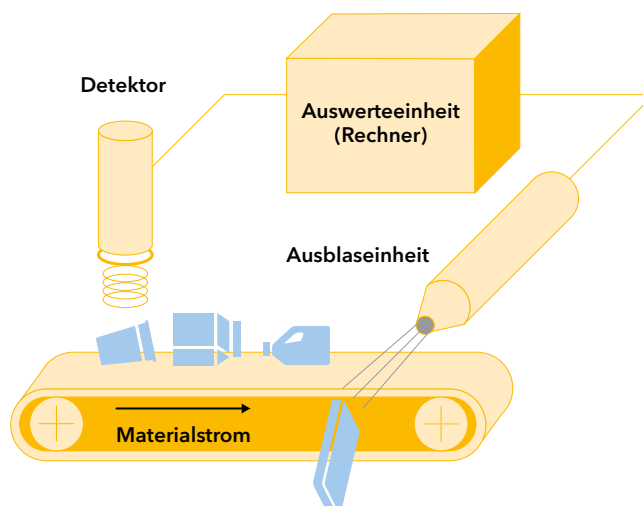
Das automatische Klauben als Ersatz für das manuelle Klauben verläuft genau wie die Arbeit des Menschen in den Teilschritten

- Erkennen,
- Bewerten,
- Aussortieren.

Nahinfrarot-(NIR)-Sensoren können zum Erkennen von Kunststoffsorten eingesetzt werden. Die Kunststoffe liefern bei der Bestrahlung mit Licht ein charakteristisches Spektrum im NIR-Bereich. Das gemessene Spektrum wird mit den in einer Datenbank gespeicherten Spektren verglichen. Auf dieser Grundlage erfolgt dann die Zuordnung zu einer bestimmten Kunststoffsorte (Abbildung 2). Die identifizierten Kunststoffe werden mithilfe einer Gebläsetechnik in verschiedene Behälter überführt.

#### Abbildung 2

Prinzip des NIR-basierten Trennverfahrens





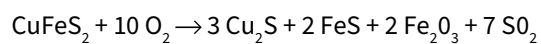
## PYROMETALLURGISCHE ROHKUPFERGEWINNUNG IM ÜBERBLICK

## HINWEISE FÜR LEHRKRÄFTE

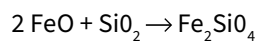
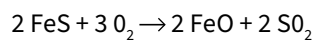
### Zu 1

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

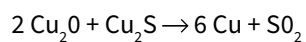
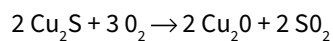
### Pyrometallurgische Kupfergewinnung am Beispiel des Kupfererzes $\text{CuFeS}_2$ :



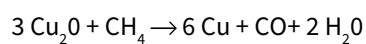
### Schlackenblasen:



### Garblasen:



### Vorgänge im Anodenofen:



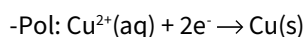
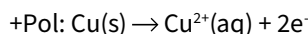
Es handelt sich in allen Teilschritten um Redoxreaktionen.



### Zu 1

Die Abbildung zeigt schematisch den Aufbau einer Elektrolysezelle zur Kupferraffination. Formulieren Sie die Reaktionsgleichungen an den Elektroden.

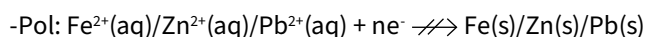
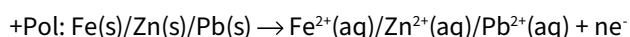
Am Pluspol werden Kupferatome zu Kupfer(II)-Ionen oxidiert. Am Minuspol kommt es zur Reduktion von Kupferionen aus der Lösung, die unter Aufnahme von je zwei Elektronen zu Kupferatomen werden. Die Kupferionen werden auf diese Weise sozusagen vom Pluspol zum Minuspol „transportiert“. Das wäre an sich nichts Besonderes, wenn beim Transport nicht alle Verunreinigungen, die sich noch im Anodenkupfer befunden haben, „verloren gingen“ und somit das am Minuspol abgeschiedene Kupfer wesentlich reiner wäre als das am Pluspol eingesetzte. Während das Anodenkupfer eine Reinheit von 99,6 Prozent hat, beträgt die Reinheit des Kathodenkupfers 99,99 Prozent.



### Zu 2

Wie verhalten sich die Elemente mit einem geringeren beziehungsweise höheren Elektrodenpotenzial als Kupfer bei der Elektrolyse?

Die metallischen Verunreinigungen aus den Leiterplatten, die ein geringeres Elektrodenpotenzial als Kupfer haben, wie zum Beispiel Blei und Zinn, gehen als positiv geladene Ionen vollständig in Lösung. Die unedleren Metallionen scheiden sich aber nicht am Minuspol ab, da ihr Elektrodenpotenzial kleiner ist als das von Kupfer.



Folglich werden zuerst die Kupferionen am Minuspol abgeschieden. Erst wenn die Konzentration der Kupferionen in der Lösung verschwindend gering beziehungsweise die der unedleren Metallionen viel größer als die der Kupferionen geworden ist, werden sich die unedlen Metalle ebenfalls abscheiden. Um dies zu verhindern, wird der Elektrolyt ständig gewechselt.

Was geschieht aber mit den Verunreinigungen mit höherem Elektrodenpotenzial, wie etwa den Edelmetallen Gold und Silber, die durch die Leiterplatten in den Prozess eingebracht wurden?

Edelmetalle wie Gold, Silber oder Platin, die ein höheres Elektrodenpotenzial als Kupfer haben, geben bei dem angelegten Potenzial ihre Elektronen nicht ab. Deshalb gehen die Edelmetalle nicht in Lösung, sondern setzen sich als Anodenschlamm am Boden der Elektrolysezelle ab. Dieser Anodenschlamm ist daher reich an Edelmetallen. Auf diese Weise werden auch die Edelmetalle, die sich auf den Leiterplatten befanden, zurückerhalten. Die Gewinnung dieser Edelmetalle trägt zur Wirtschaftlichkeit der Kupfergewinnung bei.

## GIBT ES AUSREICHEND GRÜNEN STROM FÜR DIE ELEKTROMOBILITÄT?

### HINWEIS FÜR LEHRKRÄFTE

#### Zu 1

Berechnen Sie die Summe der Kilometer, die alle Pkw in Deutschland zurücklegen. Berechnen Sie außerdem den dafür benötigten Kraftstoffverbrauch.

Bei einem durchschnittlichen Verbrauch von 7,4 Litern je 100 Kilometer beträgt die Reichweite mit einem Liter Kraftstoff also etwa 13,5 Kilometer ( $100/7,4$ ). Mit 47,01 Milliarden getankten Litern haben die Pkw in Deutschland 2019 also rund 635 Milliarden Kilometer zurückgelegt.

(Anm.: Das kann nur eine sehr grobe Schätzung sein, denn es ist ja gerade nicht bekannt, wie viele Kilometer das einzelne Fahrzeug im Jahr zurücklegt. Man weiß also nicht, ob zum Beispiel gerade die größeren Modelle mit einem höheren Verbrauch mehr genutzt werden und ihr Anteil am durchschnittlichen Verbrauch eventuell überproportional in die Kalkulation eingehen müsste. Aber: Es geht ja vor allem um die Größenordnung).

#### Zu 2/3

Wie viel Strom würde benötigt, wenn alle Pkw mit elektrischer Energie angetrieben werden? Ist es realistisch, diese Menge mittel- und langfristig CO<sub>2</sub>-neutral zu erzeugen?

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. Legt man der Einfachheit halber einmal 15 als Mittelwert zugrunde, so wären für 635 Milliarden Kilometer (= 6,35 Milliarden x 100) etwa (6,35 Milliarden x 15 kWh) 95 Milliarden kWh erforderlich. Das entspricht 95 Terawattstunden (TWh).

Die 95 Terawattstunden, die etwa notwendig wären, um die gesamte Pkw-Fahrleistung in Deutschland von 2019 mit Elektroantrieb zurückzulegen, brächten den deutschen Strombedarf nicht in eine völlig neue Größenordnung. Allerdings muss bedacht werden, dass es sich um einen zusätzlichen Bedarf handelt und die erneuerbaren Energien in Zukunft ohnehin schon weiter ausgebaut werden müssen, um etwa auch den Bedarf an Strom abzudecken, der bisher noch aus Kern- und Kohlekraftwerken stammt. 2019 waren das 230 TWh (71 aus Kernenergie und 159 aus Kohlekraftwerken).

Wichtig ist aber auch: Dies ist eine „Maximalkalkulation“ für die Annahme, dass die gesamte Pkw-Fahrleistung elektrisch erfolgt. Bis das in der Praxis so weit ist, wird es noch dauern. Schon das aktuelle politische Ziel, bis 2030 bis zu 14 Millionen E-Fahrzeuge auf die Straße zu bringen, gilt als ehrgeizig. Nimmt man einmal an, dass 13 Millionen davon auf den Pkw-Sektor entfielen und dieser bis 2030 mit gut 48 Millionen Fahrzeugen konstant bliebe, dann würden im Jahr 2030 lediglich 27 Prozent aller Pkw mit einem E-Motor fahren. Der zuvor kalkulierte zusätzliche Strombedarf läge dann also nicht bei 95 TWh, sondern etwa bei  $(0,27 \times 95) = 26$  TWh.

Zwar wird auch immer wieder vorhergesagt, dass das Interesse an motorisiertem Individualverkehr rückläufig sein könnte, weil Car-Sharing, das Fahrrad oder der öffentliche Nahverkehr an Bedeutung gewinnen, doch bisher schlagen sich diese Annahmen nicht in den Statistiken nieder. So stieg laut Statistischem Bundesamt der Energiebedarf von Privatpersonen im motorisierten Individualverkehr von 2003 bis 2018 um 4,1 Prozent. Auch der Zuwachs im Fahrzeugbestand in Deutschland hielt zuletzt unvermindert an.

**Zu 1**

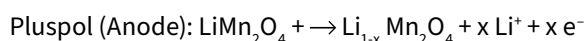
Erläutern Sie anhand der Abbildung den Aufbau und die Funktion eines Lithium-Ionen-Akkus.

**Aufbau des Akkus:**

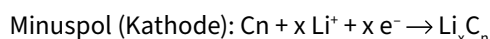
Die positive Elektrode besteht aus Aluminium, auf dem ein Übergangsmetalloxid (zum Beispiel Mangan- oder Kobaltoxide) aufgebracht ist. In dieses Metalloxid sind Lithium-Ionen eingebracht. Die negative Elektrode besteht aus Graphit, in das ebenfalls Lithium-Ionen eingelagert sind. Als Ableitungselektrode fungiert ein Kupferstab. Zwischen der positiven und der negativen Elektrode befinden sich ein Lithium-Ionen-haltiger, wasserfreier Elektrolyt und ein Separator.

**Funktionsweise des Akkus:**

Laden des Akkus: Beim Laden des Akkus werden am positiven Pol die Metallionen des Metalloxids oxidiert. Gleichzeitig wandern die Lithium-Ionen aus dem Metalloxidgitter durch den trennenden Separator in die Graphitelektrode.



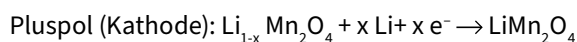
Am Minuspol wird die Graphitelektrode negativ aufgeladen. Die Lithium-Ionen werden in das Graphitgitter eingelagert.

**Entladen des Akkus:**

Die negative Graphitelektrode, in die Lithium-Ionen eingelagert sind, gibt beim Entladen Elektronen ab. Die Elektronen fließen über einen Verbraucher zum Pluspol. Gleichzeitig wandern die positiven Lithium-Ionen durch den Elektrolyten und den Separator zur positiven Elektrode.

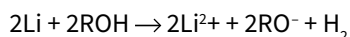
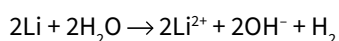


An der positiven Elektrode nehmen die Übergangsmetalloxide die Elektronen auf, die Lithium-Ionen werden in das Metalloxidgitter eingelagert.

**Zu 2**

Erklären Sie unter Angabe von Reaktionsgleichungen, warum das Lösemittel für den Elektrolyten aprotisch (ohne Wasser oder Alkohol) und polar sein muss.

Bei der Reaktion von metallischem Lithium mit Wasser oder Ethanol entsteht explosiver Wasserstoff.



Deshalb muss das Lösemittel aprotisch sein, das heißt es darf keine funktionelle Gruppe besitzen, aus der Protonen abgespalten werden können. Das Lösemittel muss allerdings polar sein, damit sich Lithiumsalze darin lösen können.



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

## HINWEISE FÜR LEHRKRÄFTE

### Zu 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?

Laut Umweltbundesamt lag der Pkw-Kraftstoffverbrauch 2019 bei 47,01 Milliarden Liter. Davon waren 26,593 Milliarden Liter Benzin und 20,417 Milliarden Liter Diesel. Ihr Mengenverhältnis betrug also 1,3/1. Wendet man diese Quote auf die durchschnittlichen 7,4 Liter Kraftstoffverbrauch je 100 Kilometer an, so setzen diese sich im Schnitt aus  $7,4 \times 1,3 / (1,3+1) = 4,2$  Litern Benzin und  $7,4 \times 1 / (1,3+1) = 3,2$  Litern Diesel zusammen. Legt man jetzt die CO<sub>2</sub>-Mengen zugrunde, die je Liter Benzin (2,33 kg) bzw. Diesel (2,64 kg) frei werden, dann wurden 2019 in Deutschland je 100 Kilometer Fahrstrecke  $9,79 + 8,45 = 18,24$  Kilogramm Kohlenstoffdioxid frei. Man müsste also knapp 33.000 Kilometer zurücklegen ( $(6000/18,24) \times 100$ ), um die sechs Tonnen CO<sub>2</sub> auszustoßen, die bei der Produktion des 70-kWh-Akkus emittiert werden.

Bei einem CO<sub>2</sub>-Ausstoß pro Liter Benzin von 2,33 kg bzw. pro Liter Diesel von 2,64 kg wurden 2019 in Deutschland je 100 Kilometer Fahrstrecke  $9,79 + 8,45 = 18,24$  Kilogramm Kohlenstoffdioxid frei.

Knapp 33.000 Kilometer müsste ein E-Mobil also zunächst zurücklegen, ehe sich Vorteile hinsichtlich der Treibhausgasbilanz erzielen lassen. Auch das ist letztlich eine Vereinfachung, denn natürlich unterscheiden sich E-Auto und herkömmlicher Pkw nicht nur durch die Traktionsbatterie des Ersteren, sondern auch bei anderen Bauteilen, deren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck man streng genommen ebenfalls betrachten müsste. Trotz dieser Vereinfachung kann die Rechnung dazu dienen, die Sensibilität dafür zu schärfen, was alles betrachtet werden muss, um zu validen Bewertungen zu kommen.

Ähnliche Betrachtungen, etwa auch dazu, wie sich Verbrennungsmotor und Batterieantrieb bei den betriebsbedingten Treibhausgasemissionen unterscheiden, finden sich in „Nachhaltigkeit der Batteriezellfertigung in Europa“.

## HOCHOFENVERGLEICH

## HINWEISE FÜR LEHRKRÄFTE

### Zu 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.

Im Hochofen für die Eisengewinnung wird Eisenerz mit Koks und Zuschlägen erhitzt. Der Koks wird mithilfe von Luftsauerstoff erhitzt, wobei  $\text{CO}_2$  und  $\text{CO}$  entstehen.

$\text{C} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons 2 \text{CO}$  (Boudouard-Gleichgewicht). Sowohl der Kohlenstoff als auch das Kohlenstoffmonooxid dienen als Reduktionsmittel für die Eisenoxide

Bei der pyrometallurgischen Behandlung von LIB-Modulen wird ebenfalls Koks als Reduktionsmittel für die Metallverbindungen eingesetzt. Das eingesetzte Material enthält in der Regel zusätzliche Reduktionsmittel in Form von Kunststoffen und Graphit.

Lithium als unedles Metall lässt sich auf diese Weise allerdings nicht gewinnen. Die in der Schlacke vorhandenen Lithiumverbindungen müssen auf hydrometallurgischem Wege isoliert werden.

### Zu 2

Formulieren Sie exemplarische chemische Reaktionen, die in den Öfen ablaufen.

Hochofenprozesse bei der Roheisengewinnung

The diagram shows a cross-section of a blast furnace with the following zones from top to bottom:

- Gicht**: Top inlet.
- Schacht**: The main shaft.
- Kohlensack**: A zone containing coke.
- Rast**: A resting zone.
- Gestell**: The base structure.

At the bottom, the products are labeled as **Schlacke** (slag) and **Roheisen** (pig iron).

**Vorwärmezone**

$$\text{H}_2\text{O}_{\text{on}} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_{\text{Gas}}$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + x\text{H}_2\text{O}$$

**Indirekte Reduktionsreaktion**  
beginnend bei 800 Grad

$$3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}_2$$

$$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO} \rightarrow 3\text{FeO} + \text{CO}_2$$

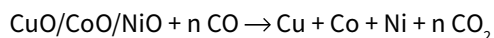
$$\text{FeO} + \text{CO} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}_2$$

**Direkte Reduktionsreaktionen**  
beginnend bei 100 Grad

$$\text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{C} \rightarrow 3\text{Fe} + 4\text{CO}$$

$$\text{FeO} + \text{C} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}$$

Bei der pyrometallurgischen Behandlung von LIB-Modulen werden die Metalloxide ebenfalls mit Kohlenstoff oder Kohlenstoffmonooxid reduziert.



Bei der Pyrolyse eines Gemisches von verschiedenen Kunststoffen wie Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) und Polystyrol (PS) entstehen beispielsweise 40 bis 60 Prozent Gas (Methan, Ethan, Ethen, Propen) und bis zu 50 Prozent Pyrolyseöl, eine Mischung aus Leichtbenzin und Steinkohlenteer, die zu einem großen Teil im Prozess als Reduktionsmittel weiter reagiert.



### Zu 3

Diskutieren Sie den Vorgang unter dem Gesichtspunkt der damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Sowohl bei der Gewinnung von Roheisen als auch bei der pyrometallurgischen Verwertung von Batterien entstehen große Mengen an CO<sub>2</sub>. Daher sind neue Verfahren in der Entwicklung, zum Beispiel durch den Einsatz von Wasserstoff als Reduktionsmittel bei der Eisengewinnung. Ökologisch nachhaltig ist das Verfahren allerdings nur beim Einsatz von „grünem“ Wasserstoff.

Bei Lithium-Ionenbatterien sind alternative Wege des Recyclings sehr aufwendig. Sie führen jedoch zu einem wesentlich höheren Recyclinggrad von über 80 Prozent der eingesetzten Materialien. Ausgehend vom mechanischen Zerlegen und elektronisch gesteuerten Isolieren der Bestandteile werden die Elektrodenmaterialien einer nachfolgenden hydrometallurgischen Behandlung unterzogen und der Wiederverwendung zugeführt.\*

\* Den Kreis beim Batterie Recycling optimieren. <https://www.de.endress.com/de/nachhaltigkeitsloesungen/wissenwertes-aufladbare-batterien/batterie-recycling#toc40>



### Zu 1

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

Lithium-Polymer-Akkus lassen sich im Vergleich zu einer Lithium-Ionen-Zelle flexibel an den vorhandenen Raum anpassen, da der Elektrolyt eines Lithium-Polymer-Akkus sich in so gut wie jede Form bringen lässt.

Akkus mit den Ausmaßen einer Kreditkarte oder einer Postkarte lassen sich vielfältig einsetzen, etwa in Spielzeugen, Smartphones oder tragbaren Computern.