

KREISLAUFWIRTSCHAFT — DEN KREISLAUF IN SCHWUNG BRINGEN

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 ₂ -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

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).

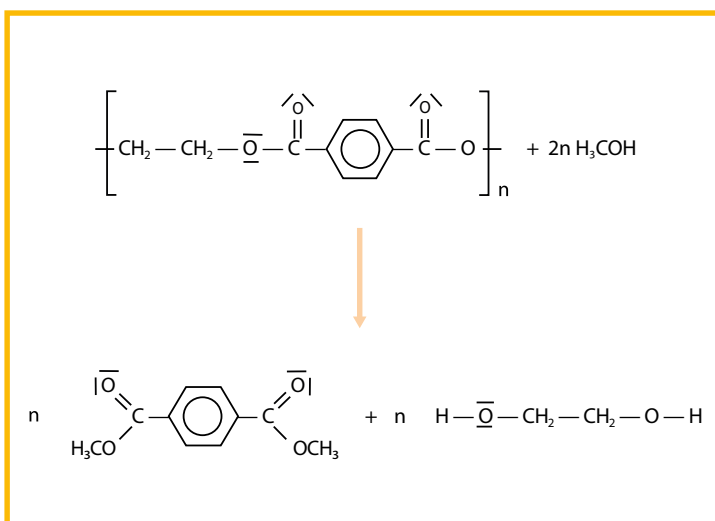
Information

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.

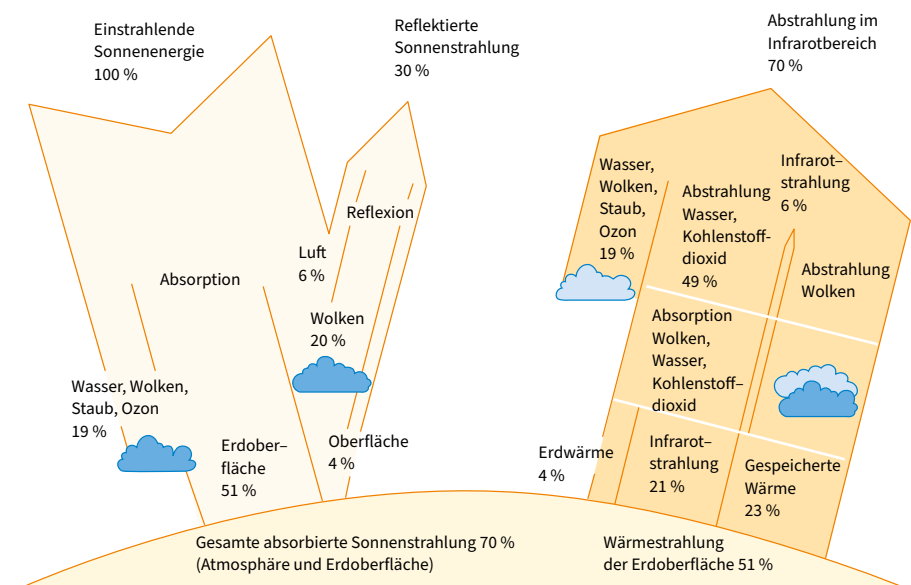
Der Strahlungshaushalt der Erde

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)



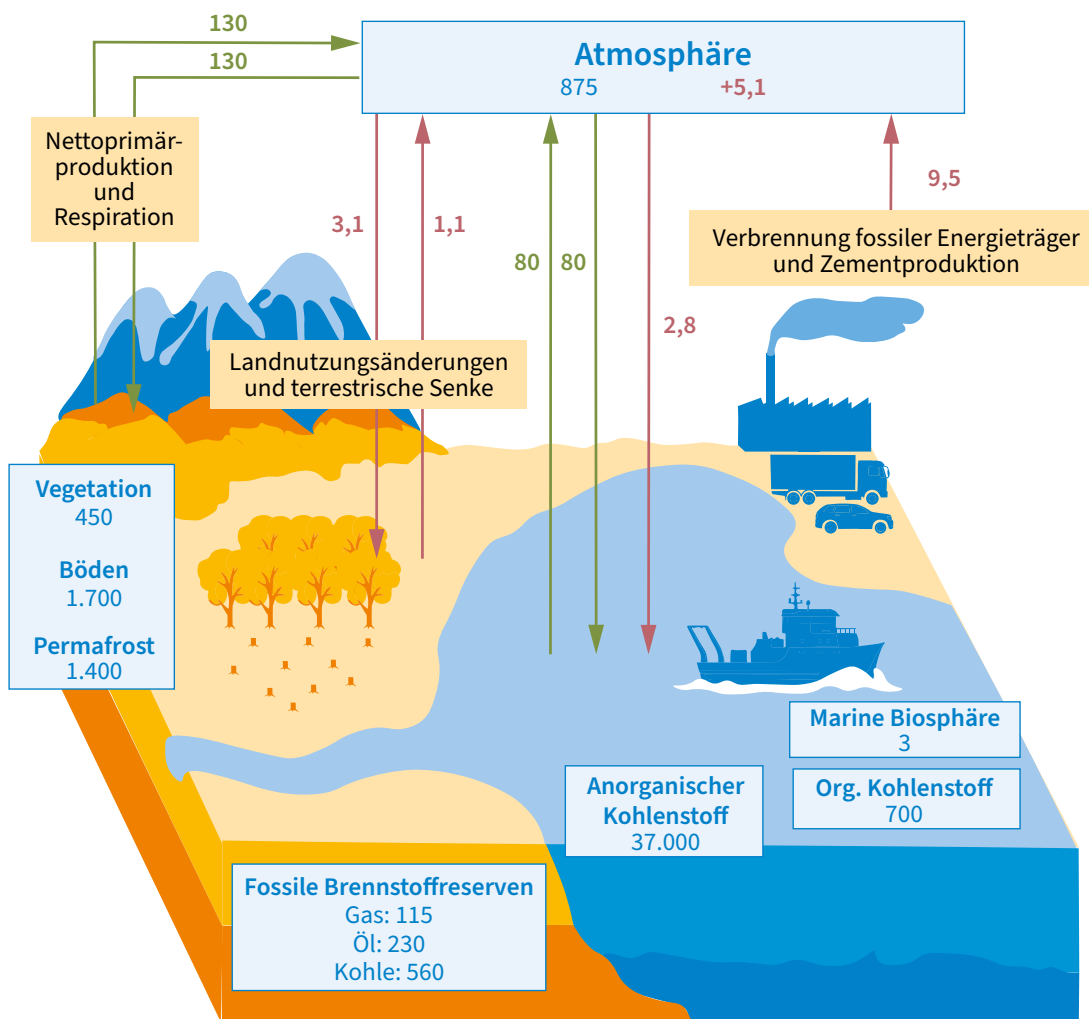
DER KOHLENSTOFFKREISLAUF

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 CO₂) 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.¹

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

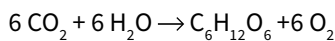
DER KOHLENSTOFFKREISLAUF

Information

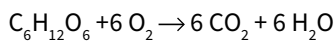
Kohlenstoffdioxid ist wie Wasser ein für das Leben auf der Erde unersetzlicher Stoff. Es ist in allen Sphären anzutreffen und in einen Kreislauf gewaltigen Ausmaßes, den Kohlenstoffkreislauf, eingebunden.

In der Atmosphäre befinden sich derzeit ca. 875 Gt (875×10^9 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:

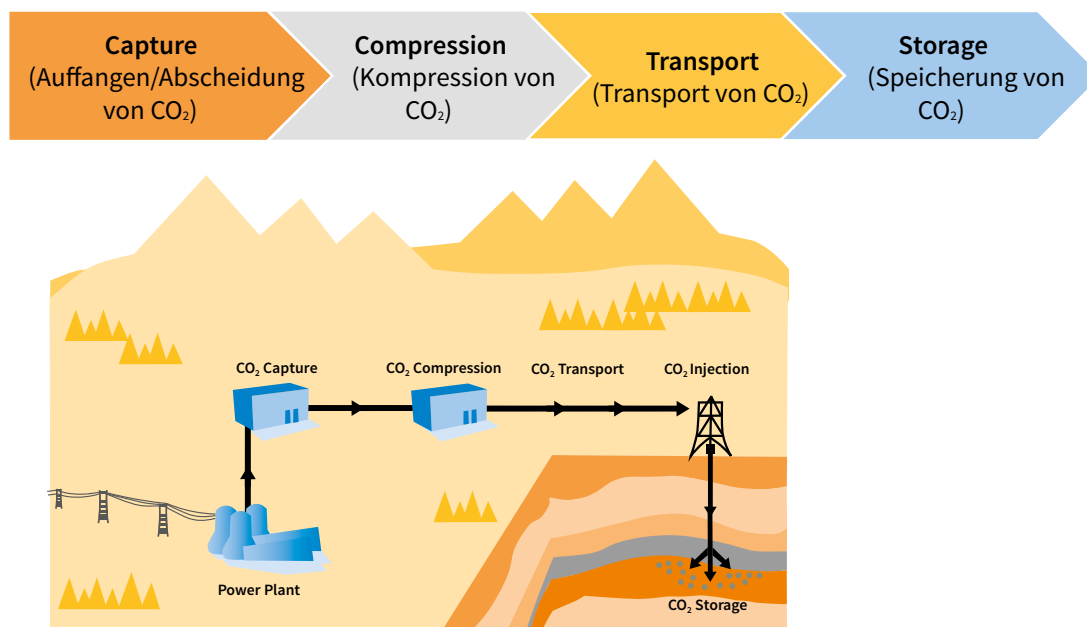
1. Einzelarbeit: Lesen Sie sich Material M1–M4 sorgfältig durch. Unterstreichen Sie wichtige Inhalte.
2. Formulieren Sie zu M1–M4 mindestens 5 Fragen, auf die die Materialien eine Antwort geben. Versuchen Sie, keine Fragen zu stellen, die allein mit Ja oder Nein beantwortet werden können.
3. Partnerarbeit: 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 (CO₂) an Kraftwerken oder Industrieanlagen und nachfolgende Speicherung in tief liegenden geologischen Gesteinsschichten.

Grundsätzlich gibt es bei den Kraftwerken verschiedene Wege, die Abgabe von CO₂ in die Atmosphäre zu verringern: Man kann Festbrennstoffe – etwa Stein- oder Braunkohle – vergasen und dabei das CO₂ 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 CO₂ befreit. Übrig bleibt fast ausschließlich Wasserstoff. Erst dieser wird dann in einer Gasturbine verbrannt. Der entsprechende Prozess wird als Pre-Combustion bezeichnet.

Ebenfalls zur CO₂-Abscheidung geeignet ist der sogenannte Oxyfuel-Prozess: Dabei werden fossile Brennstoffe mit reinem Sauerstoff verbrannt, anschließend wird das entstehende CO₂ 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 CO₂-Minderungen in den Abgasen der Kraftwerke von 80-98 Prozent erreichen.

Am Ende der CCS-Technologiekette steht die Speicherung des CO₂ 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).

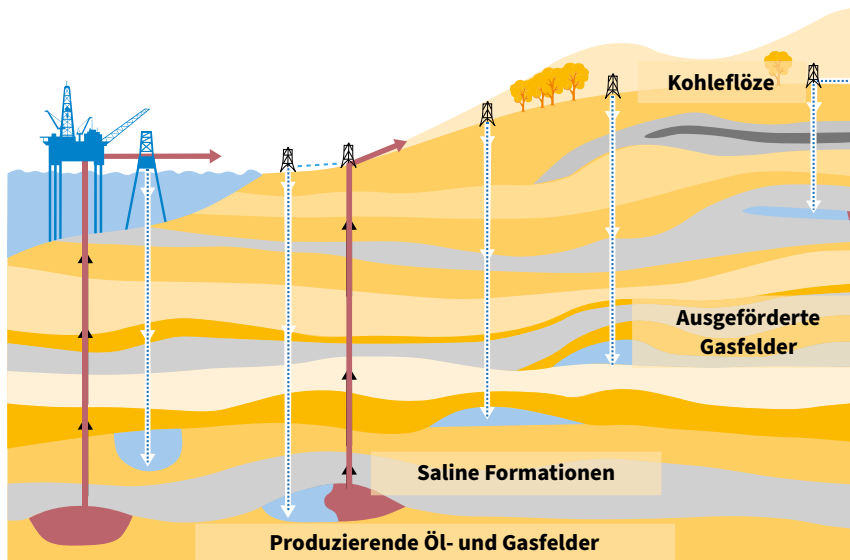
Die CCS-Technologie steht jedoch noch vor einigen Herausforderungen, etwa bei der Abtrennung des Kohlenstoffdioxids verbleiben noch erhebliche Entwicklungsaufgaben hinsichtlich der Steigerung von Effizienz und Umweltverträglichkeit der entsprechenden Verfahren. In der jetzigen Erprobungsphase soll die 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 CO₂-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 CO₂-Emissionsreduzierungen erbringen kann.

CARBON CAPTURE AND STORAGE (CCS)

M3:

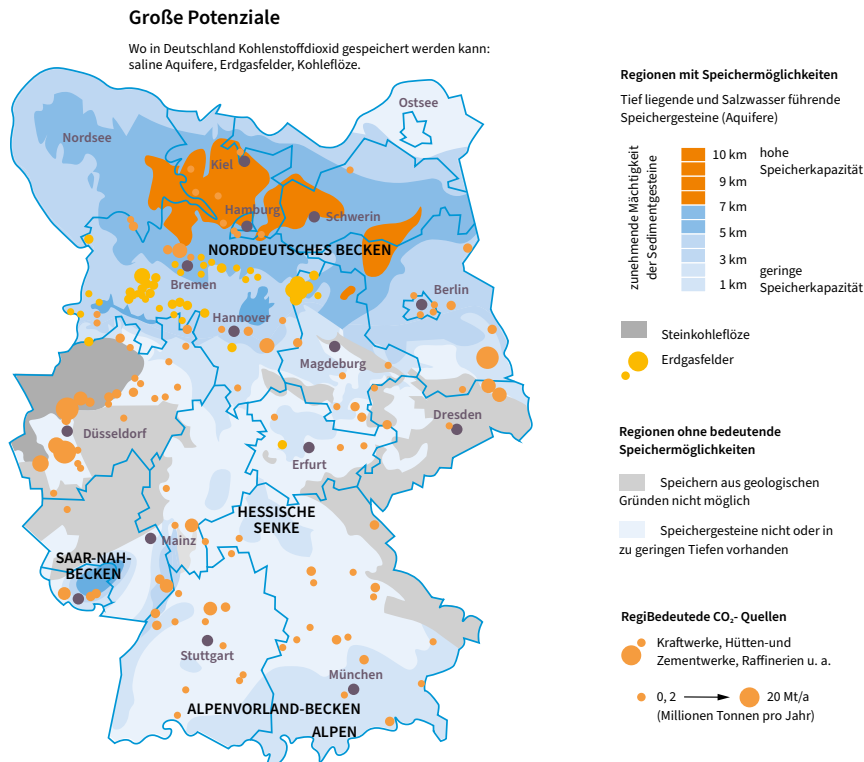
Geologische Speicheroptionen (Storage)



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 CO₂“ S.21, https://www.zeitbild.de/wp-content/uploads/2009/08/CCS_Brosch_2011Web.pdf (27.07.2024)

NEGATIVMISSIONSTECHNOLOGIEN

Aufgaben

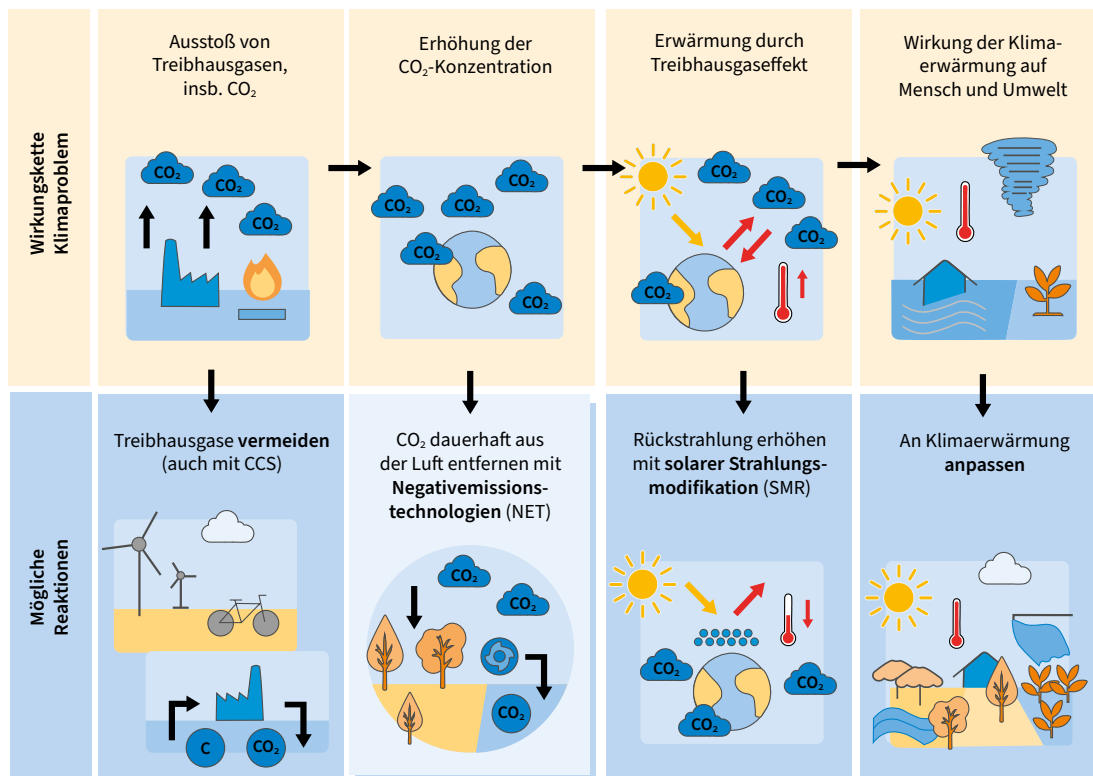
1. Erläutern Sie, was man unter Negativemissionstechnologien (NET) versteht.
2. Welche Voraussetzungen müssen gegeben sein, damit Negativemissionstechnologien einen signifikanten Einfluss auf den Erhalt des Weltklimas ausüben?
3. Welche Gefahren sehen Sie bei einem breiten Einsatz von NET?

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 CO₂-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)

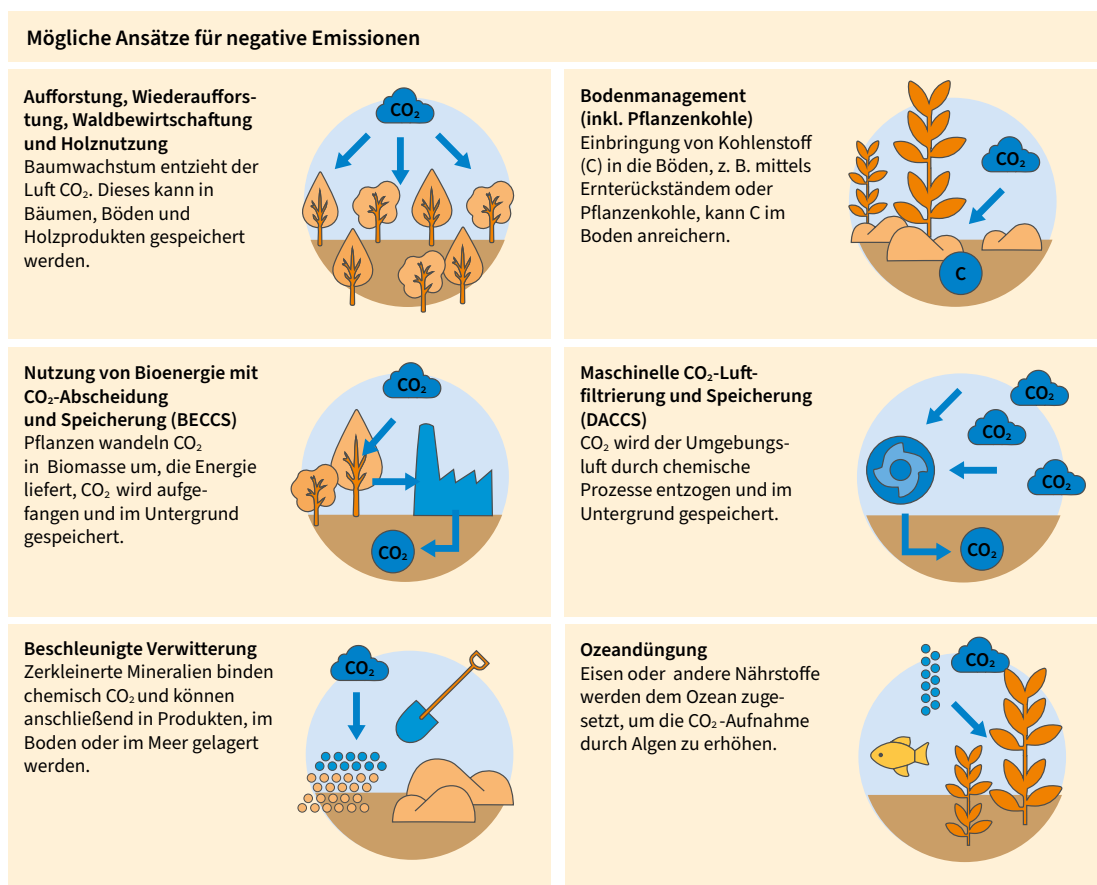
Negativemissionstechnologien sollen direkt in den Kohlenstoffkreislauf der Erde eingreifen und richten sich somit unmittelbar gegen die Grundursache des Klimawandels. Mit ihnen wird der Erdatmosphäre dauerhaft das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid (CO₂) entzogen.

NEGATIVEMISSIONSTECHNOLOGIEN

Abbildung 2 zeigt verschiedene NET-Ansätze. Es sind Maßnahmen bekannt, die mit biologischen oder technischen Ansätzen CO₂ aus der Atmosphäre entfernen und mehr oder weniger dauerhaft speichern können. Das CO₂ kann grundsätzlich mit Biomasse (Photosynthese) oder chemisch (via Luftfilter oder durch Bindung in Mineralien) eingefangen werden. Anschließend wird das CO₂, 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 CO₂ entziehen.



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

Damit die Verfahren klimawirksam negative Emissionen erzeugen, muss das CO₂ dauerhaft über mehrere Jahrzehnte – besser über Jahrhunderte – gespeichert werden. CO₂, 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 CO₂, 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**.

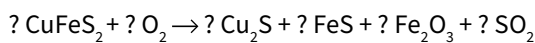
PYROMETALLURGISCHE ROHKUPFERGEWINNUNG IM ÜBERBLICK

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 CuFeS_2 . Im Schwebeschmelzofen kommt es zu einer Reaktion, die etwa wie folgt dargestellt werden kann:

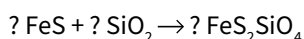
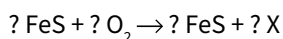


Es entsteht Kupferstein, eine Mischung aus Kupfersulfid, Eisensulfid und Eisenoxid. Das beim Schwebeschmelzen entstandene Eisenoxid verschlackt mit dem Begleitgestein der Kupfererze, und weil die Schlacke aufgrund geringerer Dichte auf dem geschmolzenen Kupferstein schwimmt, kann sie leicht vom Kupferstein 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

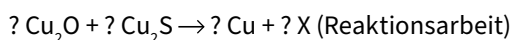
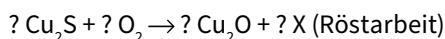
a) Schlackenblasen:

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.

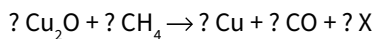
Der Einsatz der Leiterplatten im Konverterverfahren dient nicht nur dazu, die Leiterplatten zu entsorgen, sondern wirkt sich auch durchaus positiv auf die Prozessführung aus. Die metallischen Anteile der Leiterplatten stören den Prozess nicht, im Gegenteil: Die Edelmetalle gehen ebenfalls in die Kupferschmelze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

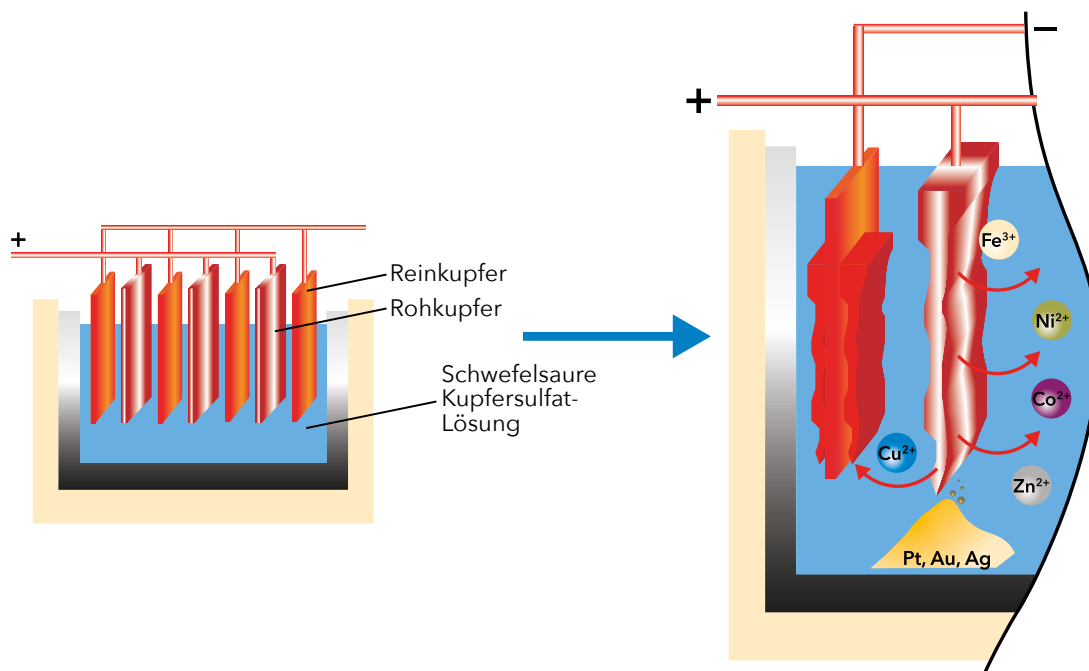
1. Die Abbildung zeigt schematisch den Aufbau einer Elektrolysezelle zur Kupferraffination. Formulieren Sie die Reaktionsgleichungen an den Elektroden.
2. Wie verhalten sich die Elemente mit einem geringeren bzw. höheren Elektrodenpotenzial als Kupfer bei der Elektrolyse?

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 CO₂-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.^{1,2}

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).

¹ 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.

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

BEWÄHRTE AKKUTECHNOLOGIE

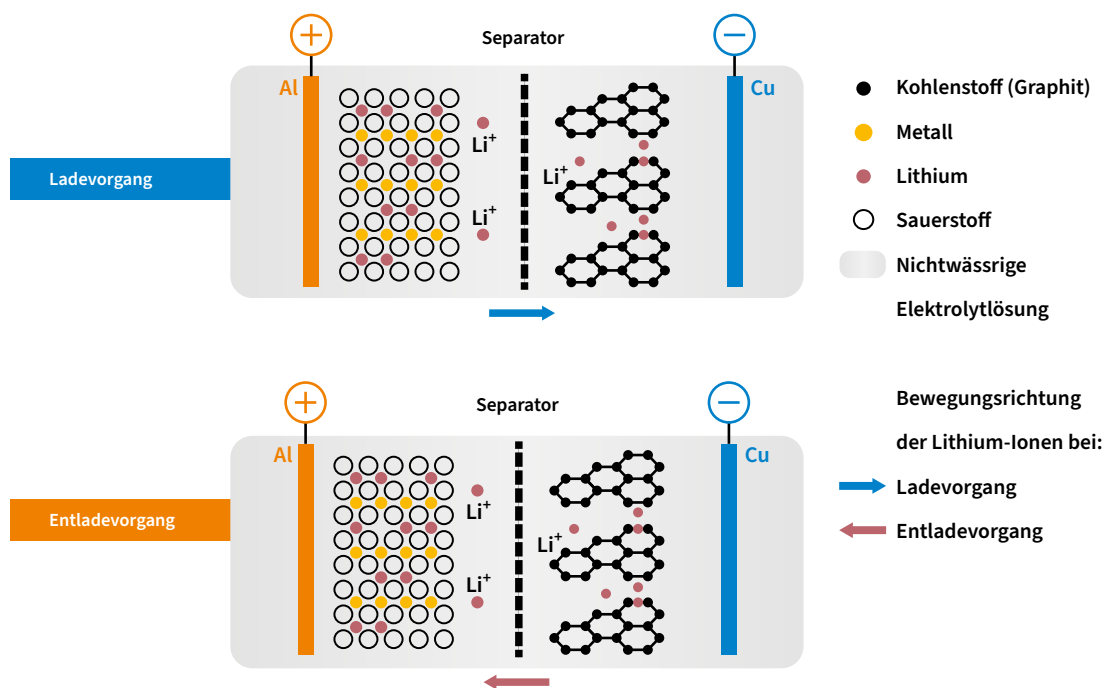
Aufgaben

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-Zelle¹



¹Quelle: [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_2O_4), Lithium-Nickeloxid (LiNiO_2) oder Lithium-Kobaltdioxid (LiCoO_2). Dazwischen befindet sich der Elektrolyt aus einem aprotischen, polaren Lösemittel (zum Beispiel Ethylencarbonat, Dimethylcarbonat) mit gelösten Li^+ -Ionen und ein Separator, der selektiv für Li^+ -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 CO₂-BILANZ DER BATTERIEPRODUKTION

Aufgabe

1. Wie viele Kilometer muss ein Pkw mit Verbrennungsmotor zurücklegen, um dieselbe Menge an CO₂ 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 CO₂-Äquivalente (CO_{2,e}) freigesetzt¹. 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 CO₂-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 CO₂-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.

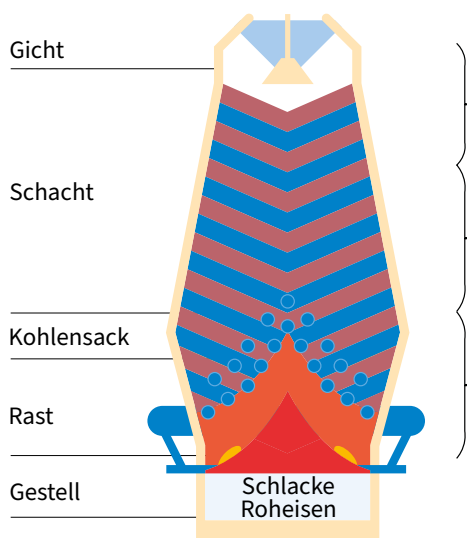
Fluor aus dem Elektrolytmaterial wird, wie auch emittierte Flugasche, aus den Verbrennungsgasen abgeschieden und als Sondermüll entsorgt. Darüber hinaus sorgt ein Hochtemperatur-Nachbrenner dafür, dass gefährliche Emissionen wie etwa Dioxine oder Furane vor der Freisetzung zu unproblematischen Substanzen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

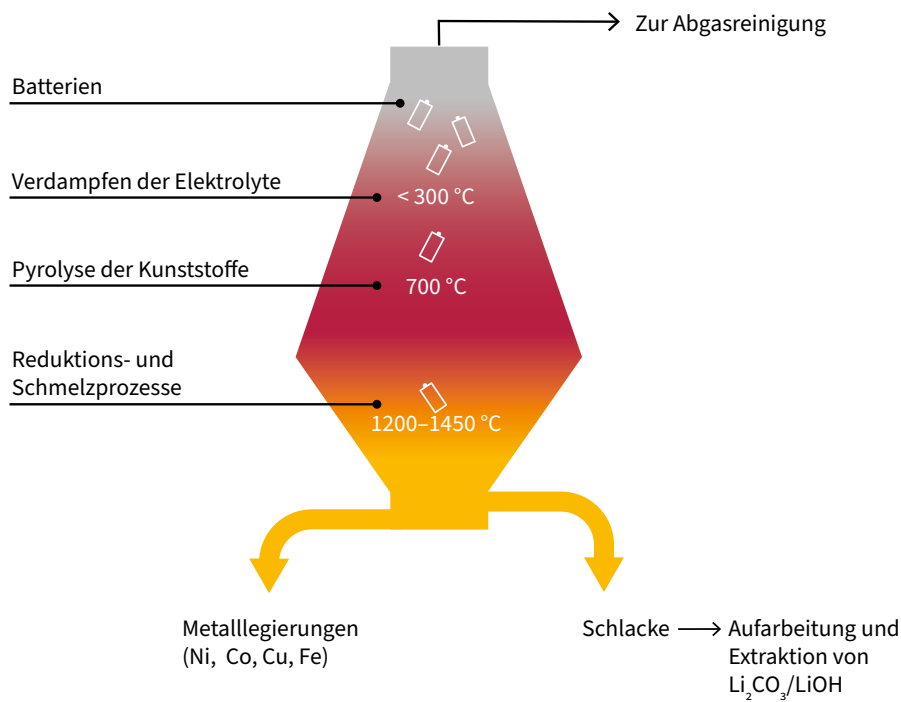
Chemische Reaktionen



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.