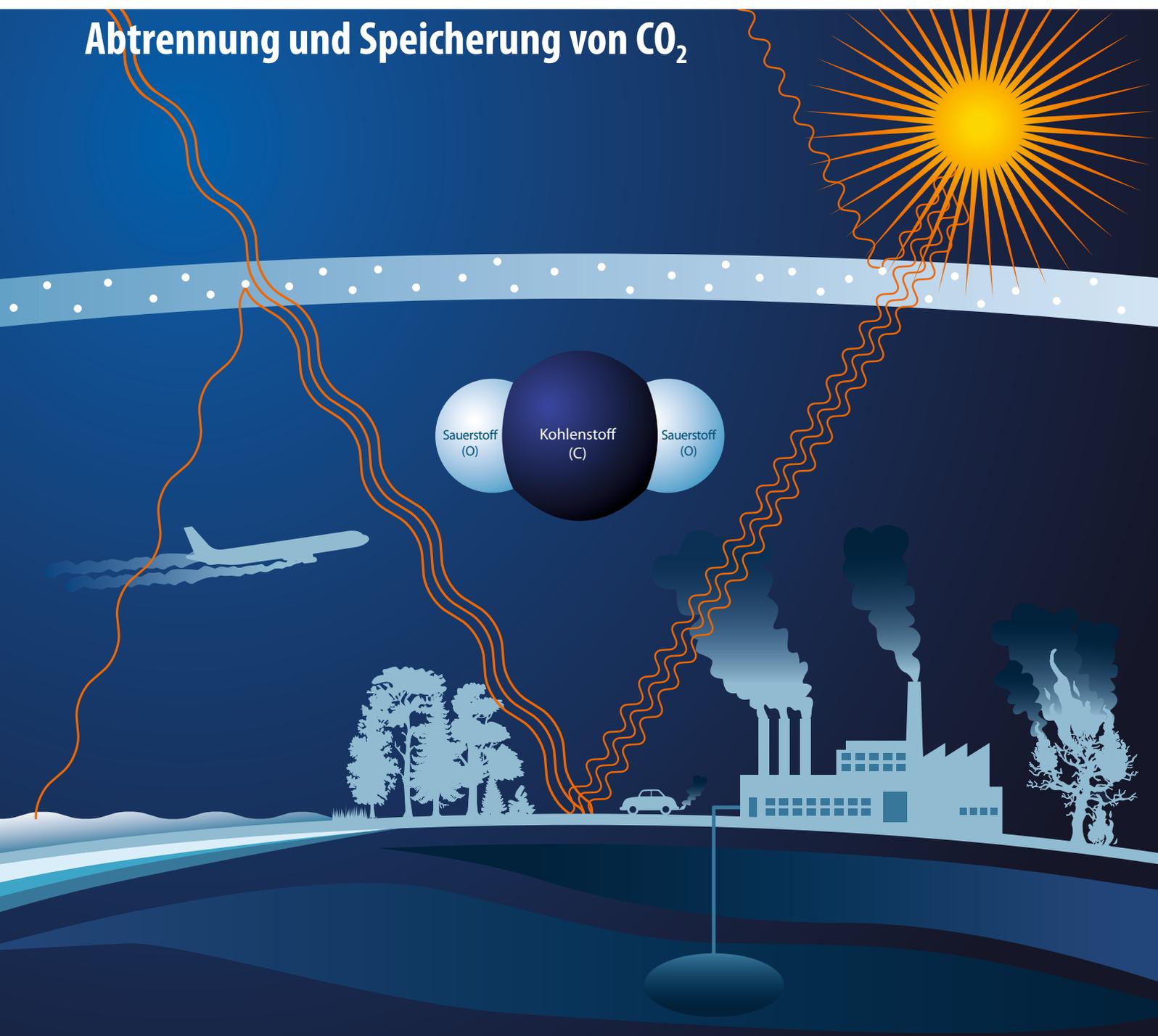


NATURWISSENSCHAFT UND TECHNIK IM UNTERRICHT

Klimaschutz und CCS

Abtrennung und Speicherung von CO₂



Inhalt

- 3 Einleitung
Weltklimarat IPCC
- 4 Wo ist hier der Klimaschutz versteckt?
- 6 Energiereserven der Welt
- 8 Weniger CO₂
- 10 CO₂-Kreislauf
- 12 CCS im Überblick
- 14 Abscheidung
Pre-Combustion, Oxyfuel,
Post-Combustion/Rauchgaswäsche
- 16 Transport
- 17 CO₂-Speicherung: Wie ein Schwamm
- 18 CO₂-Speicherung: Wo wird gespeichert?
- 19 CO₂-Speicherung: Aber sicher
- 20 CCS weltweit und in Deutschland
- 22 CO₂ und CCS in der Industrie
- 23 CCS und Nachhaltigkeit
- 24 Einsatz im Unterricht
Methodische und didaktische Hinweise
Lehrplananbindung
- 26–37 Arbeitsblätter/Kopiervorlagen
- 38 Lösungshinweise
- 39 Linksammlung
Impressum
- 40 Glossar



Einleitung. „Es gibt keinen Raum für Zweifel darüber, dass sich das Klima dieser Erde wandelt, es erwärmt sich. Wir haben auch ein bedeutendes Statement abgegeben, dass der Großteil der Erwärmung, die in den letzten 50 Jahren stattfand, sehr wahrscheinlich das Ergebnis menschlichen Handelns ist. Diese Erkenntnisse weisen klar darauf hin, dass die Erwärmung der letzten 50 Jahren mit 90-prozentiger Wahrscheinlichkeit das Ergebnis menschlichen Handelns ist.“

Ich denke, dass CO₂-Abscheidung und -Speicherung (CCS) äußerst wichtig sind, weil es einige Länder in der Welt gibt, in denen weiterhin über Jahrzehnte Kohle verwendet werden wird. Ich möchte nur die Tatsache hervorheben, dass Länder, in denen große Mengen an Kohle verwendet werden, dies nur tun können, indem sie die Effizienz der Kohleverbrennung verbessern. Darüber hinaus gibt es vielleicht keine andere Wahl, als Kohlenstoffdioxid abzuspalten und zu speichern. Ich denke daher, dass in Bezug auf die Kohleverbrennung CCS äußerst wichtig sein wird. In diesem Zusammenhang halte ich es für unbedingt notwendig, dass die Industrieländer sehr stark in die Schaffung technologischer Lösungen für CO₂-Abscheidung und -Speicherung investieren.“

Dr. Rajendra Pachauri

Auszug aus seiner Rede am 7. Mai 2008 anlässlich der IZ Klima-Veranstaltung „Herausforderung Klimawandel – Welchen Beitrag kann die CO₂-Abscheidung und -Speicherung leisten?“ in Berlin

IPCC

Der Weltklimarat IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) wurde 1988 von den Vereinten Nationen und der Weltmeteorologie-Organisation gegründet. Das in Genf ansässige Gremium sammelt und bewertet wissenschaftliche Daten zum Klimawandel sowie zu den zu erwartenden Folgen der Erderwärmung. Im Zentrum seiner Arbeit steht vor allem die Frage, wie die Menschheit sich den wandelnden Klimaverhältnissen anpassen kann.

Dabei forscht der IPCC nicht selbst, sondern bewertet die Ergebnisse von Klimaforschern aus aller Welt nach dem sogenannten Peer-Review-Verfahren, bei dem ver-

öffentlichte Fachartikel durch unabhängige Gutachter geprüft werden. So haben am vierten Sachstandsbericht des IPCC von 2007 mehr als 2.500 Wissenschaftler aus 130 Ländern mitgearbeitet.

2007 wurde der IPCC gemeinsam mit dem US-amerikanischen Politiker Al Gore mit dem Friedensnobelpreis ausgezeichnet.



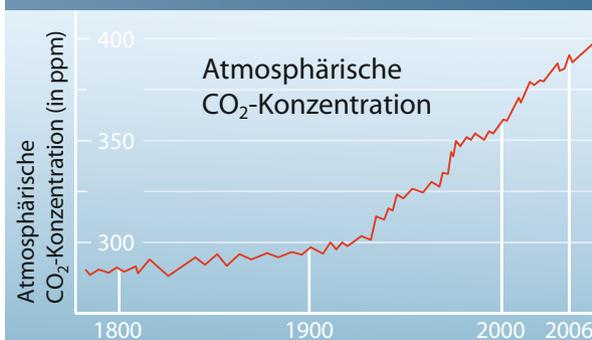


Wo ist hier der Klimaschutz versteckt?

Wissenschaftler und Forscher sind sich einig und auch die Daten sprechen eine klare Sprache: Wir erleben weltweit einen Anstieg der Temperatur und der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre. Um gravierende und unabsehbare Folgen des Klimawandels zu verhindern, halten die Wissenschaftler des IPCC eine Halbierung der weltweiten CO₂-Emissionen bis 2050 sowie eine Stabilisierung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre auf ungefähr 450 ppm (parts per million, hier: CO₂-Moleküle pro Million Luftmoleküle) für notwendig. Auf diese Weise könnte die globale Erwärmung bis zum Jahr 2100 auf etwa zwei Grad Celsius gegenüber der vorindustriellen

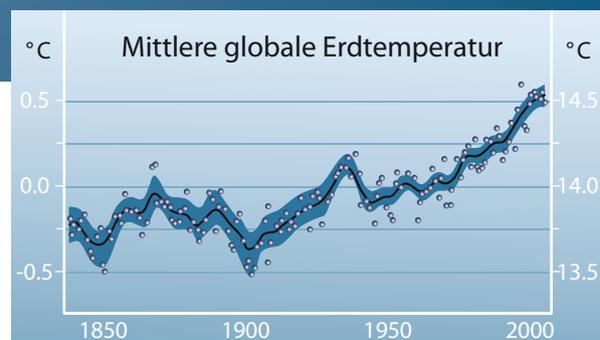
Zeit begrenzt werden. Aus diesem Grund wird häufig auch vom „2-Grad-Ziel“ gesprochen. Da keine Einzelmaßnahme zur Erreichung dieses Ziels ausreicht, muss ein ganzes Bündel an Maßnahmen umgesetzt werden, wie die Steigerung der Effizienz und der Ausbau regenerativer Energien. Von den vielen Lösungen heißt eine CCS – Carbon Capture and Storage, die Technologie zur Abscheidung und Speicherung von Kohlenstoffdioxid. Führende Klimawissenschaftler betonen das erhebliche Klimaschutzpotenzial dieser Technologie und sprechen sich daher für eine zügige Erforschung und Demonstration der innovativen CCS-Technologie aus.

Professor Hans Joachim Schellnhuber, Klimaberater der Bundesregierung und Chef des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung: „Global betrachtet wird man noch viel zu lange auf fossile Energieträger wie Kohle zurückgreifen. Das ist mit den notwendigen Klimaschutzzielen nicht vereinbar. Die EU sollte daher die Forschung zum Thema CCS, der Abscheidung und Speicherung von CO₂ – auch bei der Kohleverstromung – intensiv und umgehend vorantreiben. Bei bloßen Lippenbekenntnissen, Demonstrationsanlagen einzurichten, darf es nicht bleiben.“ (Interview im Germanwatch-Newsletter Klima-Kompakt Spezial Nr. 41/12. März 2008)



Seit 1958 wird auf Hawaii die atmosphärische CO₂-Konzentration kontinuierlich gemessen. Aus Luftproben, die in arktischem Eis eingeschlossen sind, lassen sich die Werte von vor 1958 ziemlich genau rekonstruieren.

Quelle: IPCC Fourth Assessment Report AR4 2007



Die Grafik stellt die beobachteten Änderungen der mittleren globalen Erdtemperatur dar, bezogen auf den Zeitraum 1961–1990. Die schwarze Linie zeigt die über ein Jahrzehnt gemittelten Werte, die schraffierten Bereiche die geschätzten Unsicherheitswerte und die Kreise die Jahreswerte.

Quelle: IPCC 2007: WG1-AR4/Grafik nach: Österreichisches Umweltbundesamt

Energiereserven der Welt

Nordamerika
213,9

Kanada
1,0 2,1

USA
5,7 7,8

Mexiko
2,4 0,5

Großbritannien
1,0 0,8

Algerien
2,4 5,9

Venezuela
8,0 6,6

Nigeria
7,0 6,9

Brasilien
2,4 0,5

Lateinamerika
10,4

Weltweite Kohlevorkommen*
(Weichbraun- und Hartkohle)

722,4



Weltweite Ölvorkommen*
(konventionelles Erdöl)

224,3



237,0

Weltweite Gasvorkommen*
(konventionelles Erdgas)

* Reserven in Milliarden Tonnen SKE (Steinkohleeinheit)

Der weltweite Energiebedarf steigt in den nächsten Jahren deutlich an. Berechnungen der Internationalen Energieagentur IEA gehen von einer Zunahme um 36 % bis 2035 aus, immerhin 1,2 % pro Jahr. Allerdings verschiebt sich die Energienachfrage regional stark: Indiens und Chinas Primärenergiebedarf wird stark zunehmen. Hierbei darf aber nicht übersehen werden, dass trotz energiesparenderer Geräte und Effizienzmaßnahmen auch in Deutschland der Energiebedarf von Jahr zu Jahr zunimmt.

Quelle: IEA, World Energy Outlook 2010
Zusammenfassung

Verfügbarkeit einzelner Energieträger

So lange reichen die Vorräte (weltweite Reserven bei statischer Betrachtung):

Braunkohle ca. 230 Jahre



Steinkohle ca. 170 Jahre



Erdöl ca. 40 Jahre



Erdgas ca. 65 Jahre



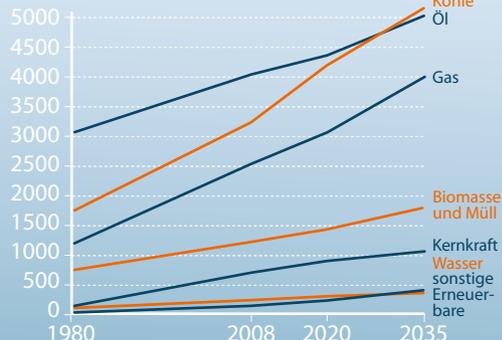
Uran 70 bis 140 Jahre



Quelle: Bundeswirtschaftsministerium (Kurzbericht: Verfügbarkeit und Versorgung mit Energierohstoffen, 2006)

Entwicklung des globalen Primärenergiebedarfs und wie er gedeckt wird

Mio. t RÖE 1 Mio. Tonnen Rohöleinheiten (RÖE) entsprechen rund 1,428 Mio. Tonnen SKE.



Quelle: IEA, World Energy Outlook 2010

Europa ohne GUS
42,5

GUS
141,6

INFO

Ein Mensch atmet täglich 0,9 bis 1,23 kg CO₂ aus.
Alle 82 Millionen Deutsche atmen also zwischen 26 und 36 Millionen Tonnen Kohlenstoffdioxid pro Jahr aus.

Norwegen
1,4 3,0

Aserbaidschan
1,9 1,7

Libyen
8,1 1,9

Turkmenistan
0,3 3,9

Kasachstan
6,8 4,4

Russland
14,7 61,9

Katar
3,0 33,2

Indien
1,1 1,4

China
3,0 3,2

Asien ohne GUS
235,3

Ägypten
0,8 2,7

Malaysia
1,0 3,2

Indonesien
0,8 3,9

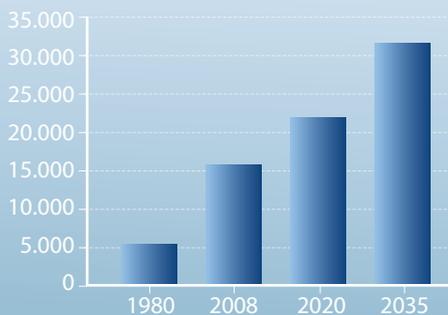
Angola
1,8 0,4

Australien
0,8 3,3 51,5

Afrika
27,6

Erwarteter Zuwachs der globalen Stromerzeugung

in Terawattstunden
1 TWh = 1 Mrd. kWh



Quelle: IEA, World Energy Outlook 2010

Irak
22,3 4,1

Iran
26,9 36,1

Kuwait
19,7 2,3

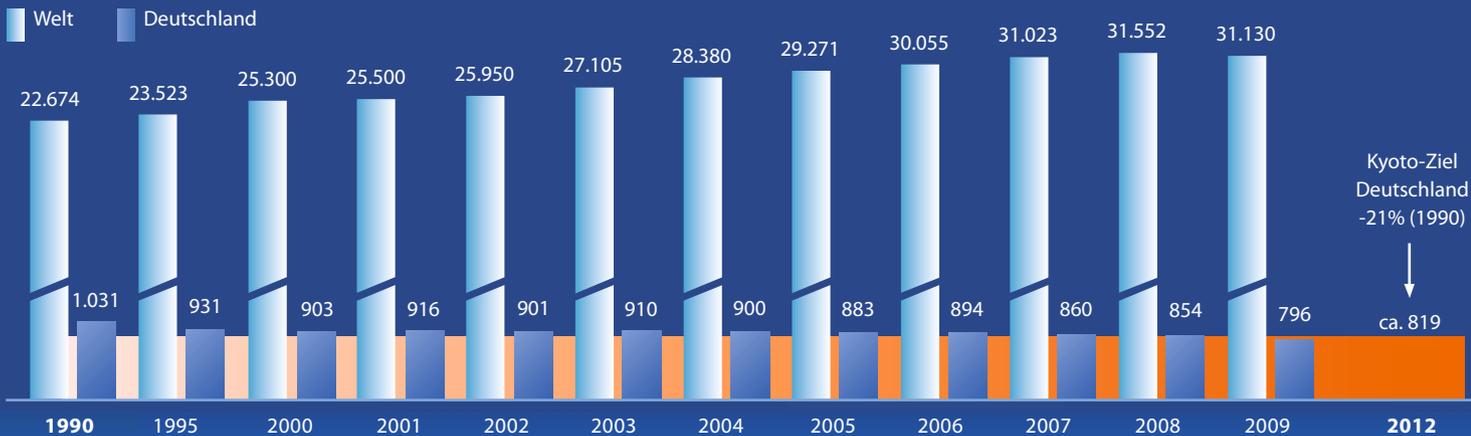
Oman
1,1 1,1

Saudi-Arabien
51,3 9,3

VAE
19,0 7,9

CO₂-Emissionen aus Öl-, Gas- und Kohleverbrauch

In Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr

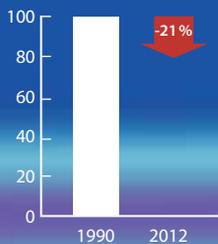


Quelle: BP Statistical Review of World Energy 2010

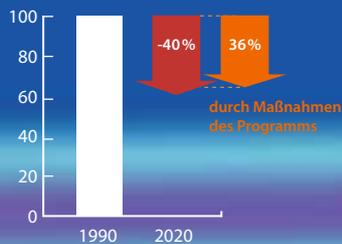
Internationale Klimaschutzabkommen (Minderungsziele in CO₂-Äquivalent)

Deutschlands Verpflichtungen aus ...

Kyoto-Protokoll
(Dezember 1997)

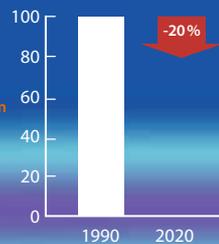


Integriertes Energie- und Klima-
programm der Bundesregierung
(Dezember 2007)



EU-Verpflichtungen aus ...

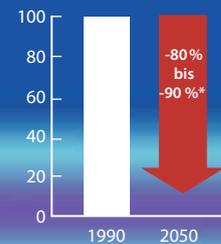
Energie- und Klimapaket der
Europäischen Kommission
(Januar 2008)



Weltweite Verpflichtungen aus ...

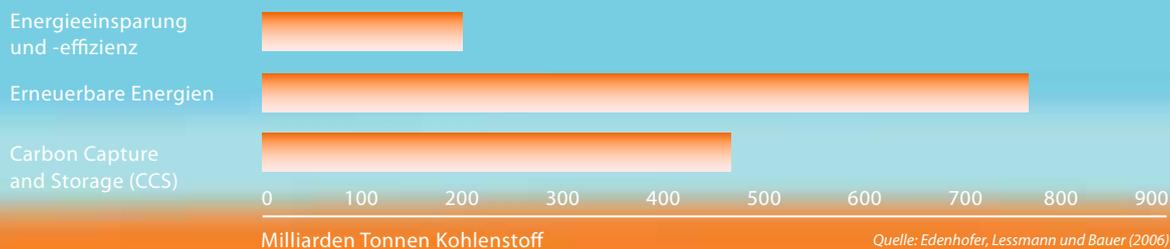
Kopenhagener Vereinbarung
(Dezember 2009, nicht verabschiedet,
nur zur Kenntnis genommen)

* für Industriestaaten



Beitrag verschiedener Klimaschutzoptionen zur CO₂-Emissionsminderung im Zeitraum 2000–2100

Die angegebenen Reduktionsmengen beziehen sich auf die Differenz zwischen „Business as usual“-Szenario und dem 450-ppm-Stabilisierungsszenario.



Quelle: Edenhofer, Lessmann und Bauer (2006)

Keine dieser Klimaschutzoptionen darf zum alleinigen Königsweg erklärt werden: Wollen wir die ehrgeizigen Minderungsziele erreichen, müssen wir alle zur Verfügung stehenden Potenziale ausschöpfen. Diese Aufgabe ist vor allem technologisch zu lösen, da allein durch Verhaltensänderungen und eine stärkere Nutzung erneuerbarer Energien nicht ausreichend CO₂ eingespart werden kann!

Troposphäre
bis 10 km
20

Weniger CO₂

Thermosphäre/
Ionosphäre
bis 400 km
bis 1.000 °C

Mesosphäre
50–90 km
0 °C bis -100 °C

Ozonschicht
20–40 km
0 °C

Stratosphäre
10–50 km
-56 °C bis 0 °C

Tropopause
in 10 km
-50 °C

ä
km
°C

Die Szenarien der IEA- und der IPCC-Wissenschaftler sowie das Gutachten des britischen Ökonomen Nicholas Stern – der sogenannte Stern-Report – machen unmissverständlich klar: Wir müssen dringend Gegenmaßnahmen ergreifen, um die Folgen des Klimawandels auf ein für die Menschheit beherrschbares Maß zu begrenzen.

Die Debatte um den Klimawandel und die notwendige Verminderung der globalen CO₂-Emissionen begann allerdings weit bevor das Thema 2007 durch die Verleihung des Friedensnobelpreises an Al Gore und den IPCC, durch Al Gores Film „Eine unbequeme Wahrheit“ sowie den Stern-Report ins Zentrum der öffentlichen Wahrnehmung rückte. Bereits zehn Jahre zuvor einigte sich die internationale Staatengemeinschaft erstmalig auf verbindliche Ziele und Maßnahmen für den Klimaschutz. Im Kyoto-Protokoll verpflichteten sich die Industriestaaten, ihren Treibhausgasausstoß bis 2012 durchschnittlich um 5,2 Prozent gegenüber dem Stand von 1990 zu senken.

Das Kyoto-Protokoll läuft 2012 aus. Ziel des Nachfolgeabkommens soll sein, alle großen Produzenten von Treibhausgasen wie die USA einzubinden und gleichzeitig die wirtschaftlich aufstrebenden Schwellen- und Entwicklungsländer schrittweise stärker in das Klimaschutzregime einzubeziehen. Erst auf der UN-Klimakonferenz im November 2010 in Cancún einigten sich die Delegierten auf wichtige Einzelmaßnahmen wie das Bekenntnis zum 2-Grad-Ziel und freiwillige Zusagen zur CO₂-Einsparung der Industrieländer. Deutschland und die EU haben sich mit eigenen Reduktionsverpflichtungen bis 2020 und darüber hinaus ehrgeizige Ziele im Kampf gegen den Klimawandel gesetzt (s. linke Seite). In den nächsten Verhandlungen müssen sich die Staaten jedoch auf weitere Schritte für einen verbindlichen Klimaschutzvertrag ab 2012 verständigen.

Der Stern-Report warnt vor den dramatischen Folgen des Klimawandels. Eine deutsche Zusammenfassung finden Sie unter www.britischebotschaft.de >> Suche: Nicholas Stern.

Die Aufgabe ist zu groß für nur eine Lösung. Erst in der Summe vieler Anstrengungen wird es möglich sein, die Emissionen um das notwendige Maß zu reduzieren. Zunächst kann man Energie sparen und gleichzeitig die Energieeffizienz in allen Bereichen, im Haushalt, im Verkehr ebenso wie in der Wirtschaft, erhöhen.

Bei der Stromproduktion muss eine CO₂-Reduzierung durch neue Technologien und den Wechsel im Energiemix erreicht werden. Erneuerbare Energien müssen weiter und schnellstmöglich zu einer tragenden Säule für die Stromproduktion werden. Gleichzeitig braucht es Technologien wie Carbon Capture and Storage (CCS), die den klimafreundlichen Einsatz fossiler Brennstoffe erlauben, denn noch basieren in Deutschland über 80 Prozent des Primärenergieverbrauchs auf fossilen Energieträgern. Erfreulich ist, dass die CCS-Technologie in Cancún in den Clean Development Mechanism (CDM) aufgenommen wurde, sodass Unternehmen in Zukunft für CCS-Projekte in Entwicklungs- und Schwellenländern Emissionshandelszertifikate erhalten.

Die jährlichen UN-Klimakonferenzen werden vom Sekretariat der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) organisiert. Die UNFCCC hat ihren Sitz in Bonn im Haus Carstanjen, in dem nach dem Zweiten Weltkrieg der Marshallplan für Westeuropa unterzeichnet wurde. www.unfccc.int

CO₂-Kreislauf



INFO

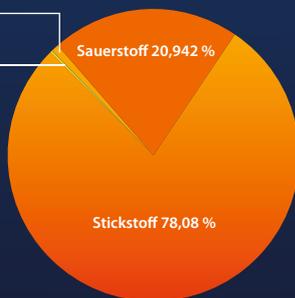
Das Internet (Computer, Server usw.) verursacht ebenso viel CO₂ wie der weltweite Flugverkehr.

Ein Mittelklassewagen mit einer jährlichen Fahrleistung von 13.000 Kilometern stößt so viel CO₂ aus, wie ein ausgewachsener Baum jährlich binden kann.

Zusammensetzung der Atmosphäre

Reine, trockene Luft in bodennahen Schichten setzt sich etwa wie folgt zusammen (in Volumenprozent):

Argon	0,934 %
Kohlenstoffdioxid	0,038 %
Wasserstoff	0,00005 %
Helium	0,0005 %
Methan	0,00017 %
Neon	0,0018 %
Lachgas	0,00003 %
Kohlenmonoxid	0,00002 %
Ozon	0,000007 %
Xenon	0,0000087 %
Krypton	0,00011 %
Schwefeldioxid	0,000000007 %
Stickstoffdioxid	0,00000003 %
Rest	0,003304263 %



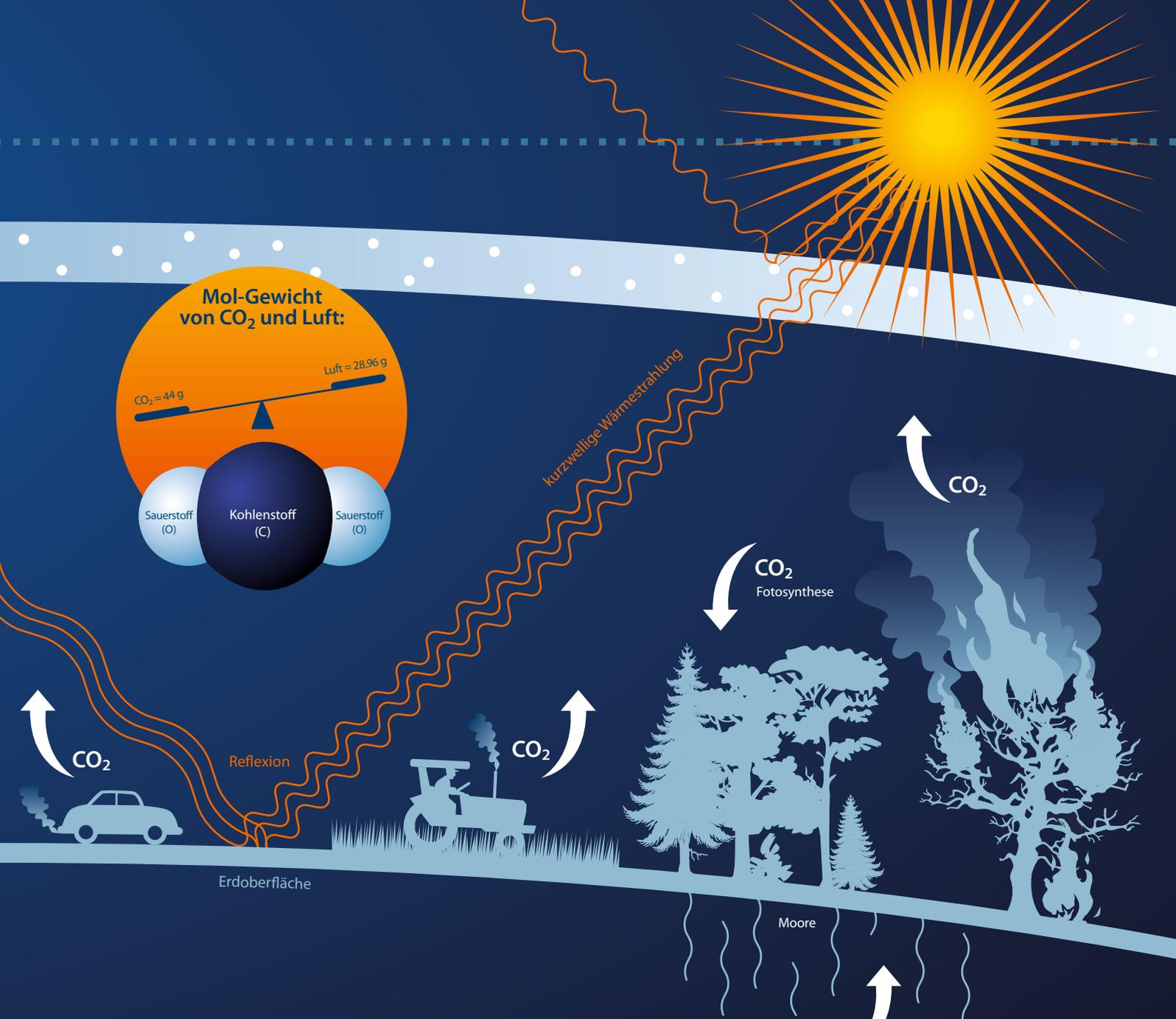
Die Formel CO₂ – und damit auch das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid, das sich dahinter verbirgt – ist zu einem Schlagwort für die bedrohliche Erderwärmung und den Klimawandel geworden. Die Ursache: Eine erhöhte CO₂-Konzentration erwärmt die Erdatmosphäre.

Das Klimagas CO₂ selbst ist für den natürlichen Treibhauseffekt jedoch unverzichtbar. Es absorbiert einen Teil der Wärmeeinstrahlung der Sonne und sorgt so für lebensfreundliche Temperaturen. Je mehr CO₂ in der Atmosphäre vorhanden ist, desto mehr Wärmestrahlung wird absorbiert und desto wärmer wird es.

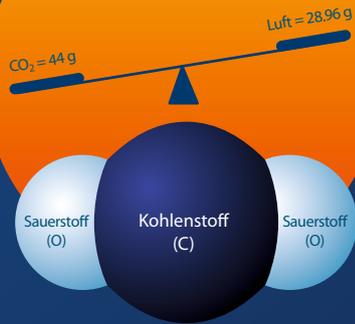
Die chemische Verbindung aus Kohlenstoff und Sauerstoff, kurz Kohlen(stoff)dioxid oder CO₂, ist ein farb- und geruchloses Gas. CO₂ ist nicht explosiv, brennbar oder giftig. Da Kohlenstoffdioxid schwerer als Luft ist, kann es jedoch in tiefliegenden Senken den Sauerstoff verdrängen.

Es ist aber ebenso ein natürlicher Stoff, der in einer Konzentration von 0,04 Prozent in der Erdatmosphäre vorkommt und Bestandteil des lebenswichtigen Kohlenstoffkreislaufs ist.

Quellen: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Nasa Earth Fact Sheet



Mol-Gewicht von CO₂ und Luft:



Erdoberfläche

Rund 400 Milliarden Tonnen CO₂ gelangen jedes Jahr auf natürlichem Wege in die Atmosphäre. Auch Lebewesen setzen Kohlenstoffdioxid frei – vier Prozent der Luft, die Menschen ausatmen, besteht aus CO₂.

Ein Großteil des natürlich emittierten Kohlenstoffdioxids wird der Atmosphäre auf natürlichem Weg wieder entzogen. So wird CO₂ bei der Fotosynthese von Pflanzen gebunden. Sie wandeln das Klimagas in Kohlenstoff um, den sie für ihr Wachstum benötigen, und erzeugen zugleich Sauerstoff. Wenn die Biomasse verbrennt, verrottet oder wieder von Lebewesen aufgenommen wird, gelangt das CO₂ schließlich zurück in die Atmosphäre. Für die Bindung von CO₂ spielen nicht zuletzt auch die Weltmeere eine wichtige Rolle.

Neben diesen natürlichen Emissionen verursachen die Menschen durch Straßenverkehr, Land-, Forst- und Energiewirtschaft gegenwärtig pro Jahr etwa 28 Milliarden Tonnen energiebedingtes CO₂ zusätzlich. Eine Menge, die über Fotosynthese oder natürliche Speicherung nicht vollständig abgebaut werden kann.

CO₂-Speicherung in Biosystemen

Obwohl Moore nur drei Prozent der Landfläche ausmachen, ist in ihnen 30 Prozent des an Land gespeicherten Kohlenstoffs gebunden. Die effektivsten Speicher sind tropische Moore, sie binden fast 3170 Tonnen CO₂ pro Hektar (ha). Tropische Waldböden erreichen nur ein Zehntel der Menge. In den Mooren der nördlichen Breiten sind 1120 Tonnen je Hektar (100 mal 100 Meter) gebunden.

Quelle: abendblatt.de vom 13. 11. 2006
www.abendblatt.de/daten/2006/11/13/638694.html

CCS im Überblick

CCS steht für Carbon Capture and Storage (CO₂-Abscheidung und -Speicherung) und ist die Bezeichnung eines aus drei Schritten bestehenden Prozesses, um das CO₂, das bei der Verbrennung kohlenstoffhaltiger Materialien, wie z. B. Kohle, Gas, aber auch Biomasse, im Kraftwerk entsteht, abzuscheiden, zu transportieren und zu speichern.

1 Abscheidung

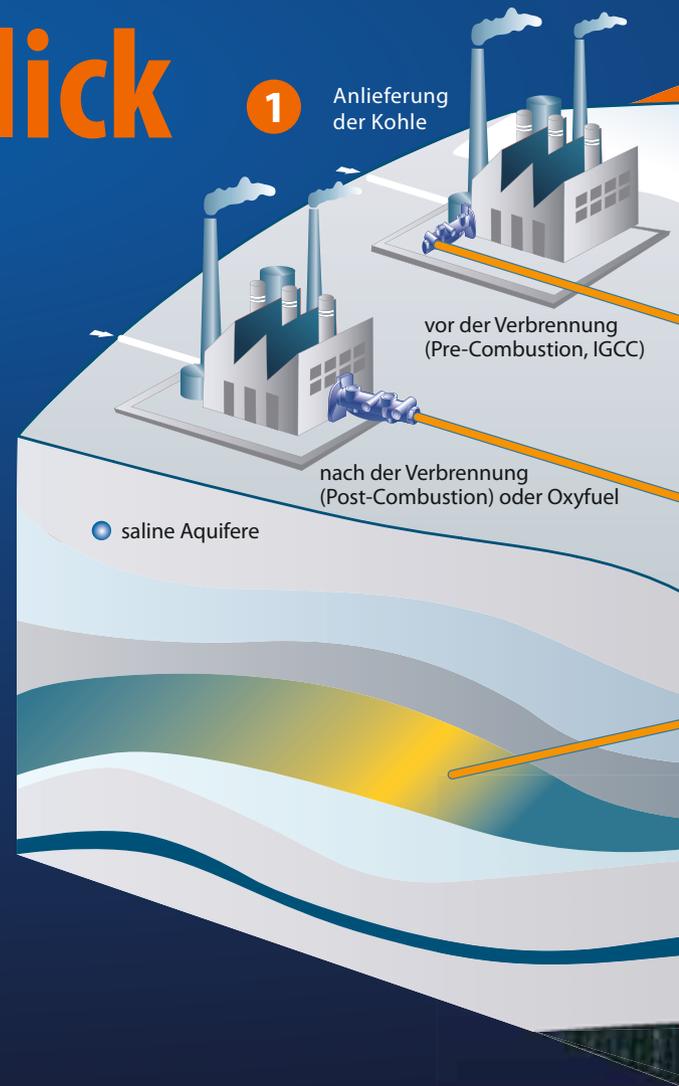
Unter Abscheidung versteht man das Auffangen von CO₂, das bislang beim Verbrennungsprozess vom Kraftwerk in die Atmosphäre entweicht. Dafür gibt es drei unterschiedliche Methoden, die derzeit parallel zueinander erforscht werden: die Abscheidung vor, nach und während der Verbrennung.

2 Transport

Nach dem Auffangen muss das abgeschiedene CO₂ zu einer Speicherstätte transportiert werden.

3 Speicherung

Das dritte Glied der Prozesskette ist die Speicherung des CO₂ im Untergrund. Dieser Prozessschritt ist von entscheidender Bedeutung, denn nur wenn das Gas nicht wieder in die Atmosphäre gelangt, ist dem Klimaschutz gedient.



Auswirkungen auf den Wirkungsgrad Alle drei Methoden der Abscheidung verbrauchen ihrerseits Energie, was den Wirkungsgrad der Kraftwerke verringert. Nach bisherigen Erkenntnissen belaufen sich die Wirkungsgradverluste durch die Anwendung der verschiedenen CO₂-Abscheidungsverfahren je nach Verfahren auf acht bis zwölf Prozentpunkte; d. h. es wird auch mehr Kohle verbraucht. In den letzten Jahren

wurden hier große Fortschritte erzielt. Besonders beim Post-Combustion-Verfahren (vgl. Seite 15) ist man auf einem guten Weg, die Wirkungsgradverluste weiter zu reduzieren und damit die Energieeffizienz zu erhöhen. Mit den Abscheidungsverfahren können 80 bis 90 Prozent des im Kraftwerksprozess anfallenden CO₂ abgeschieden und die CO₂-Bilanz fossiler Kraftwerke entscheidend verbessert werden.

Definition Wirkungsgrad

Wirkungsgrad = Verhältnis von abgeführter Leistung zu zugeführter Leistung oder Verhältnis Nutzen zu Aufwand.

Fahrplan zur Umsetzung der CCS-Technologie

Forschungsprogramme zur CO₂-Abscheidung

Pilotanlagen, Forschung



INFO

Die McKinsey-Studie aus dem Jahr 2009 schlüsselt die CO₂-Vermeidungskosten wie folgt auf:

Abscheidung: 25–35 €/t CO₂

Transport: 4–6 €/t CO₂

Speicherung und Überwachung: 4–12 €/t CO₂

Kosten Alle neuen Technologien für eine klimafreundliche Energieerzeugung verursachen zunächst hohe Kosten, unter anderem, weil neue Infrastruktur geschaffen werden muss. Dies betrifft die erneuerbaren Energien ebenso wie die CCS-Technologie. Auf längere Sicht werden sich diese Investitionen jedoch auszahlen – denn die Folgen und damit die Kosten des Klimawandels zu tragen, käme die Menschheit weitaus teurer zu stehen.

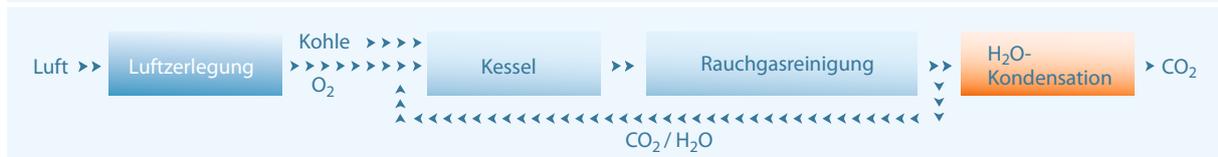
Eine aktuelle Studie der Unternehmensberatung McKinsey hat für den CCS-Gesamtprozess für 2030 durchschnittliche CO₂-Vermeidungskosten von 30–45 Euro je Tonne CO₂ ermittelt. Damit lägen die Kosten für CCS etwa in der Höhe des zu erwartenden Preises für CO₂-Emissionszertifikate (s. Glossar) – und der Einsatz von CCS wäre somit wirtschaftlich.

Erste Demonstrationskraftwerke in Europa

Marktreife des ersten Kraftwerks mit CCS-Technologie

2020

OXYFUEL | Merkmal: Verbrennung mit reinem Sauerstoff.



Methode 3 : CO₂-Abscheidung nach der Verbrennung (Post-Combustion), „Rauchgaswäsche“

Ließe sich nicht einfach das gesamte bei der Verstromung entstehende Rauchgas auffangen und speichern? Leider ist das zu aufwendig: Erstens müsste das gesamte Rauchgas komprimiert werden, was viel Energie kostete. Zweitens wäre das benötigte Volumen für eine unterirdische Speicherung viel zu groß, und man würde hauptsächlich unschädlichen Stickstoff speichern. Das Rauchgas sollte also besser in seine Bestandteile zerlegt und nur das klimawirksame CO₂ gespeichert werden. Bereits seit Jahrzehnten werden schädliche Schwefel- und Stickoxidverbindungen abgetrennt. Für die Abscheidung von CO₂ könnte die Rauchgasreinigung um eine weitere Reinigungsstufe ergänzt werden.

Das vorgereinigte Rauchgas wird durch eine wässrige Lösung geleitet, die Amine enthält. Die Amine binden das CO₂ an sich. Anschließend wird die gesamte Waschflüssigkeit erhitzt, wodurch sich das CO₂ wieder von den Aminen trennt. Das abgeschiedene Produktgas besteht ausschließlich aus CO₂ und Wasserdampf und kann nach intensiver Trocknung verdichtet und zum Speicher transportiert werden. Die Waschlösung ist nach Regeneration wieder verwendbar. Neben Aminen werden derzeit auch Waschverfahren mit Ammoniak, Aminosäuresalzen und Kalk erprobt. Ziel ist es, die CO₂-Abtrennung mit möglichst niedrigem Energieaufwand zu realisieren.

Das beschriebene Verfahren zur Abtrennung von CO₂ mit wässrigen Aminlösungen wird in der chemischen Industrie bereits häufig angewendet (z. B. zur Minderung des CO₂-Gehalts von Erdgas), muss aber noch auf die besonderen Anforderungen an die CO₂-Abtrennung aus dem Rauchgas eines Großkraftwerks angepasst werden. Derzeit verbraucht die Wäsche noch einen nennenswerten Anteil (etwa 20 Prozent) der Brennstoffenergie für die Regeneration des Waschmittels, wodurch der Brennstoffverbrauch für die Stromproduktion steigt. Eine großtechnische CO₂-Wäsche, die jedes Jahr etwa 2 Millionen Tonnen CO₂-Emissionen aus einem Kohlekraftwerk vermeiden kann, würde etwa so viel Platz in Anspruch nehmen wie ein Fußballfeld.

Ein bereits in Betrieb befindliches modernes, effizientes Kraftwerk, das über ausreichend Platz verfügt, lässt sich grundsätzlich mit einer CO₂-Waschanlage nachrüsten. Um möglichst vielen Kraftwerken die Umrüstung auf die klimafreundliche Technik wirtschaftlich zu ermöglichen, forscht die Wissenschaft an effizienten Gesamtprozessen mit verbesserten Waschmitteln und optimierter Abwärmenutzung. In Deutschland werden bereits Pilotanlagen in Kohlekraftwerken in Niederaußem nahe Köln und am Standort Staudinger in Großkrotzenburg betrieben. Weitere Pilotprojekte befinden sich im Bau und in der Planung.

POST-COMBUSTION | Merkmal: Kann – bei ausreichend Platz – bei bestehenden modernen und effizienten Kraftwerken nachgerüstet werden. Die CO₂-Abscheidung ist ein weiterer „Waschgang“ bei der Rauchgasreinigung.





INFO

Jeder Passagier verursacht auf einem Flug von Frankfurt nach Mallorca und zurück ca. 700 kg CO₂.

Transport

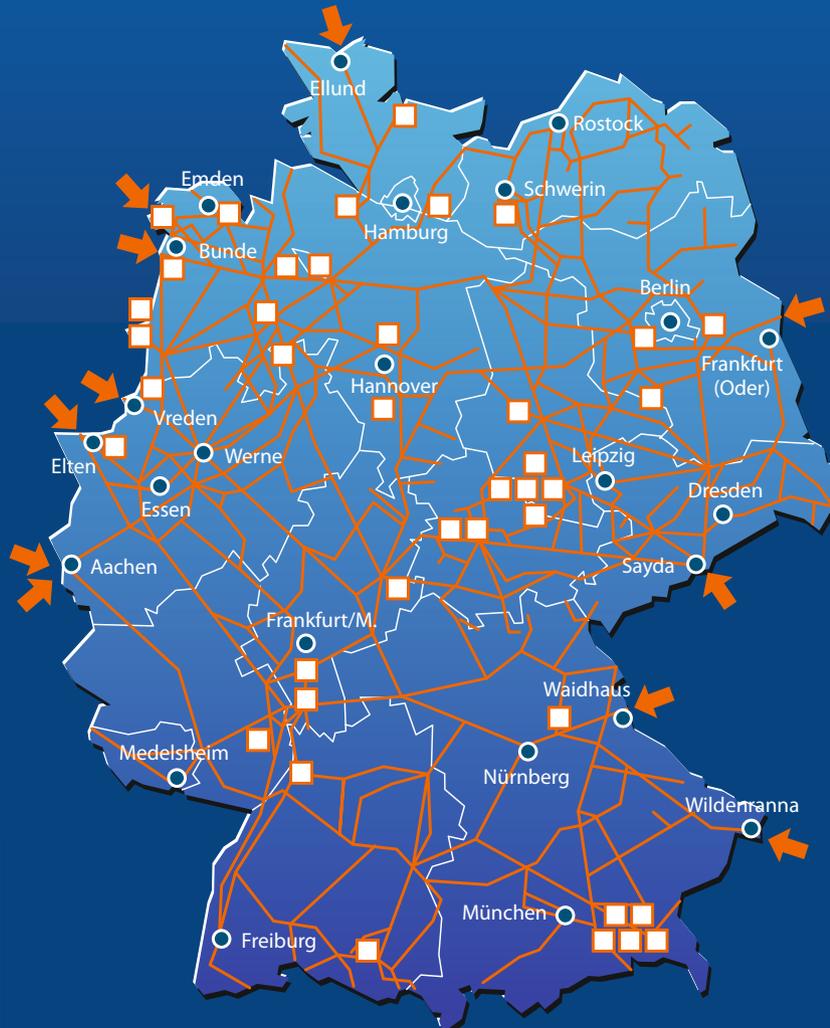
Das Pipeline-Leitungsnetz in Deutschland ist nach Auskunft des Bundesverbandes Energie- und Wasserwirtschaft fast 420.000 Kilometer lang.

Auf der Karte rechts sind überregionale Erdgasleitungen und Untergrundgasspeicher dargestellt.

Nach der Abscheidung am Kraftwerk muss das CO₂ zu seiner Speicherstätte transportiert werden. Der Transport ist möglich per LKW, Bahn oder über Pipelines. Diese Transportoptionen unterscheiden sich jedoch erheblich in puncto Sicherheit, Wirtschaftlichkeit und Effizienz.

Trotz des hohen Kapitaleinsatzes zum Aufbau einer Pipeline-Infrastruktur werden Pipelines aufgrund bestehender technischer Erfahrungen sowie ihrer hohen Wirtschaftlichkeit, Sicherheit und Umweltverträglichkeit das Transportmittel der Wahl sein.

Die Pipeline-Technik wird seit Ende des 19. Jahrhunderts eingesetzt und hat sich bewährt, egal ob für Erdgas und Erdöl, Wasser und Bier oder für Sauerstoff und Wasserstoff. In den USA wird CO₂ bereits seit 30 Jahren mittels Pipelines transportiert, und die Erfahrungen zeigen, dass der Pipeline-Transport sich auch bei CO₂ bewährt.



■ Untergrundgasspeicher

➔ Übergabepunkte aus dem Ausland

Quelle: VNG 2008

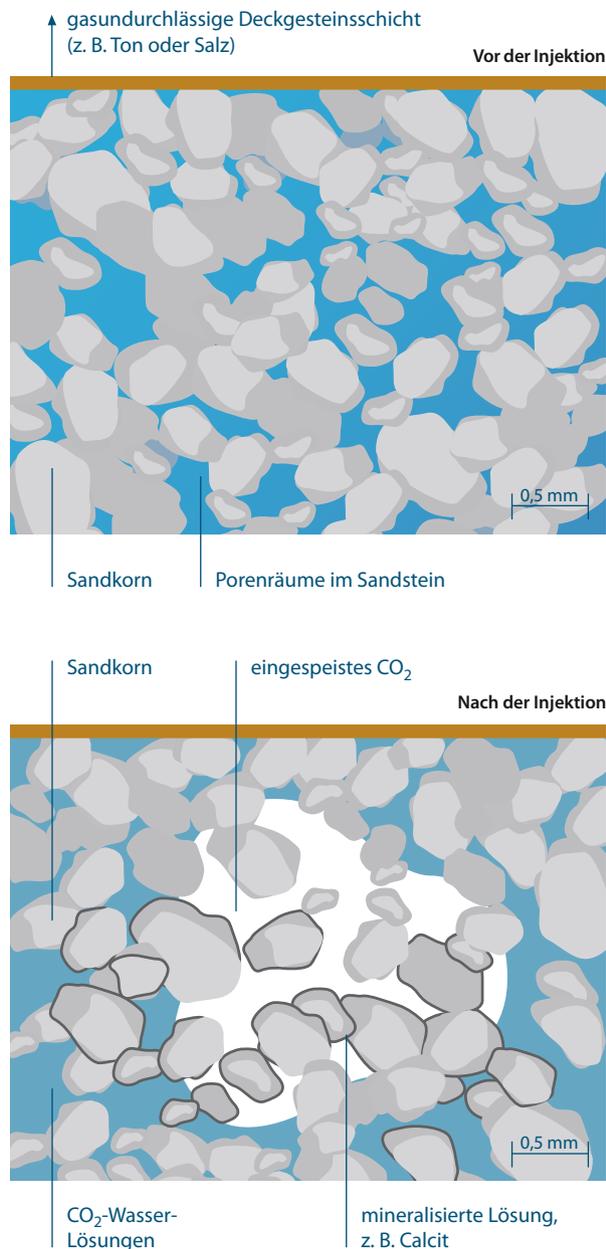
Um fünf Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr zu transportieren, benötigt man:

1 Pipeline (Durchmesser ca. 0,5 Meter)



CO₂-Speicherung: Wie ein Schwamm

Feinporöse Netzwerke durchziehen den Sandstein, der Wasser und andere Lösungen wie ein Schwamm aufsaugt und nur unter großem Druck wieder freigibt.



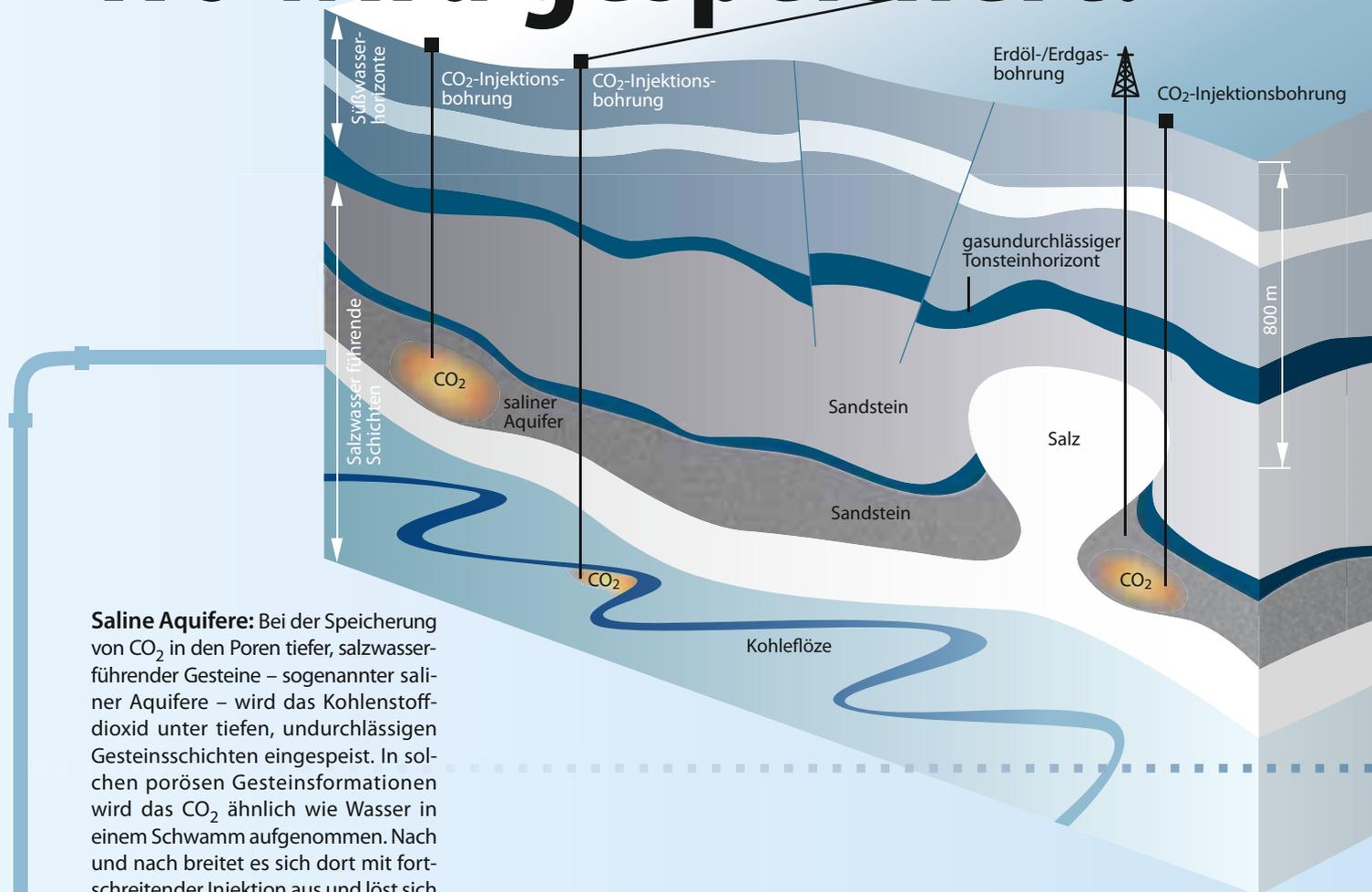
Verschiedene Speichermechanismen oder auch „Trapping“-Prozesse (von Englisch trap = Falle) sorgen in den Gesteinsschichten dafür, dass sich CO₂ mit der Zeit immer stärker ans Gestein bindet. Die geologische Speicherung macht nur dann Sinn, wenn möglichst wenig gespeichertes CO₂ wieder in die Atmosphäre gelangt. Experten des IPCC haben ausgerechnet, dass pro Jahr maximal 0,01 Prozent des eingespeisten CO₂ aus der Speicherstätte entweichen dürfen, damit auch nach 1000 Jahren noch über 90 Prozent des ursprünglich gespeicherten CO₂ im Gestein gebunden sind.

Es werden verschiedene Speichermechanismen unterschieden:

- 1. Freie Bindung:** CO₂-Moleküle und Wassermoleküle bewegen sich ungebunden in der Gesteinsschicht. Durch die gasundurchlässige Deckgesteinsschicht wird ein Aufstieg des CO₂ jedoch verhindert. Der Anteil der freien Bindung liegt schon nach wenigen Jahren bei nur noch rund 20 Prozent.
- 2. Lösung:** Ein Großteil der CO₂-Moleküle geht eine enge Bindung mit den Molekülen des salzhaltigen Wassers ein. Diese Lösung kann mit der Kohlensäure in einer Mineralwasserflasche verglichen werden. Die Bindung zwischen den Elementen bleibt so lange stabil, bis sich der Druck auf die Lösung verringert. Da das mit CO₂ gesättigte Wasser schwerer ist als das ungesättigte Wasser, sinkt das darin gebundene CO₂ nach unten ab.
- 3. Kapillare Bindung:** Das CO₂-Wasser-Gemisch wird durch kapillare Kräfte immobil in den Poren des Sedimentgesteins im salinen Aquifer gehalten. Wie ein Schwamm saugt das Gestein die Lösung auf und gibt sie nur wieder frei, wenn großer Druck auf das Gestein ausgelöst wird.
- 4. Mineralisierung:** Über viele Jahre hinweg mineralisiert ein Teil der Lösung und wird damit selbst zu festen Ablagerungen im Gestein, wie z. B. Calcit. Das CO₂ ist in diesen Mineralien dauerhaft gebunden.

Durch diese Trapping-Mechanismen wird das CO₂ im Verlauf der Zeit immer fester im Gestein eingeschlossen.

CO₂-Speicherung: Wo wird gespeichert?



Saline Aquifere: Bei der Speicherung von CO₂ in den Poren tiefer, salzwasserführender Gesteine – sogenannter saliner Aquifere – wird das Kohlenstoffdioxid unter tiefen, undurchlässigen Gesteinsschichten eingespeist. In solchen porösen Gesteinsformationen wird das CO₂ ähnlich wie Wasser in einem Schwamm aufgenommen. Nach und nach breitet es sich dort mit fortschreitender Injektion aus und löst sich langfristig im Wasser oder reagiert mit anderen Stoffen zu festen Mineralphasen, wie z. B. Calcit. Die geologischen Eigenschaften der salinen Aquifere sind bislang nicht abschließend erforscht, aufgrund ihrer Ausdehnung bieten sie jedoch das weltweit größte Speicherpotenzial für CO₂. Sie stellen neben Gaslagerstätten die aussichtsreichste Option zur sicheren CO₂-Speicherung dar. Dafür sprechen jahrelange internationale Erfahrungen. In Deutschland wird bereits seit 2008 in einem Forschungsprojekt im brandenburgischen Ketzin CO₂ gespeichert.

FAZIT: Weltweite Kapazitäten und aussichtsreiche Forschungen machen saline Aquifere zu einer bemerkenswerten Option für CO₂-Speicherung.

Ungenutzte Kohlevorkommen:

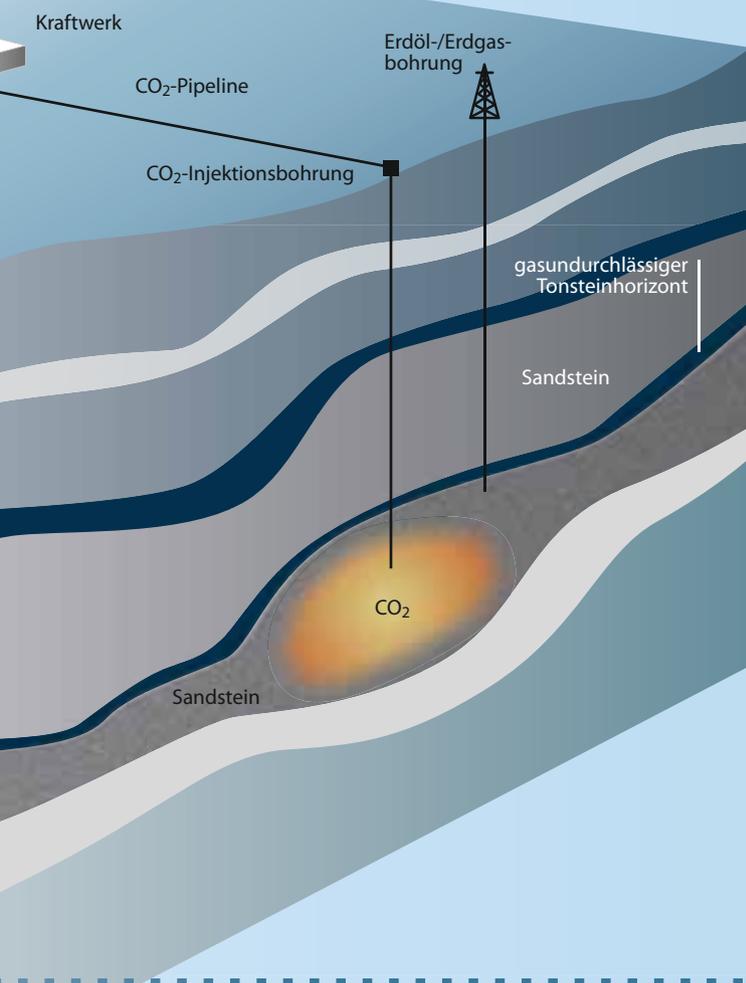
Kohlevorkommen, die tiefer als 1.500 Meter unter der Erdoberfläche liegen, werden heute nicht mehr abgebaut. Das Kohlenstoffdioxid könnte also in die Kohleflöze eingespeist werden und sich in großer Menge fest auf der Oberfläche der Kohlepartikel anlagern (Adsorption), da Kohle wegen ihrer internen Struktur gasförmige Stoffe ausgezeichnet bindet. Nachteil: Kohle quillt bei der Einspeisung von CO₂ auf, wodurch die Flöze ihre Durchlässigkeit verlieren und weniger CO₂ eingebracht werden kann.

FAZIT: Mittelfristig ist dies keine Option für die CO₂-Speicherung in Deutschland.

Ausgeförderte Erdölfelder:

Schon heute wird CO₂ während der Erdölförderung in Ölfelder gepumpt (Enhanced-Oil-Recovery-Verfahren [EOR]), um die Fördermenge zu erhöhen. Dieses Verfahren ist bereits Praxis. Aufgrund des hohen Aufwands zur Abdichtung der Bohrlöcher und der geringen Kapazitäten der Lagerstätten in Deutschland ist das Verfahren hierzulande jedoch wenig aussichtsreich.

FAZIT: Da nur geringes Speicherpotenzial in Deutschland vorhanden ist, wird diese Option eher nur international verfolgt.



Gaslagerstätten: Kohlenstoffdioxid kann auch in Erdgasfelder eingeleitet werden und gleichzeitig dazu beitragen, beim Enhanced-Gas-Recovery-Verfahren (EGR) den Förderdruck zu erhöhen. Gaslagerstätten sind für die CO₂-Lagerung ideal geeignet, da in diesen Reservoirs bereits Millionen Jahre Erdgas sicher zurückgehalten wurde. Allein in Deutschland könnten nach Schätzungen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe rund 2,75 Milliarden Tonnen CO₂ in nahezu ausgeförderten Feldern gespeichert werden. Große Vorteile bietet zudem die bereits vorhandene Infrastruktur, die auch zur Durchleitung von CO₂ verwendet werden könnte. Einzig die Abdichtung der ehemaligen Bohrlöcher ist aufwendig und kostenintensiv.

FAZIT: Bestehende Erfahrungswerte und aussichtsreiche weitere Forschungen machen diese Option auch in Deutschland attraktiv.

Aber sicher

Birgt die Speicherung von CO₂ Risiken für Mensch und Umwelt?

Langjährige Erfahrungen aus der Erdgasspeicherung zeigen, dass Gase sicher im Untergrund gespeichert werden können. Speicherstandorte für CO₂ werden nach den gleichen strengen Kriterien ausgewählt, die bereits bei der staatlichen Zulassung von Erdgasspeichern zur Anwendung kommen. Dabei gilt: keine Realisierung ohne umfassendes Monitoring, durch das potenzielle Risiken beobachtet werden.

Was passiert bei Erdbeben?

Auch die Befürchtung von Leckagen bei einem Erdbeben kann mit der Erfahrung aus der Erdgasspeicherung relativiert werden. So sind im Iran – einer der am stärksten erdbebengefährdeten Regionen der Welt – seit Jahrtausenden große Mengen Erdgas in natürlichen Speichern sicher verwahrt. Bei Erdbeben ist die Gefahr von Leckagen minimal, da sich die Speicher in großer Tiefe befinden. Darüber hinaus wird in Deutschland die CO₂-Speicherung ausschließlich in nicht erdbebengefährdeten Regionen erwogen.

Und wenn CO₂ austritt?

Im unwahrscheinlichen Fall eines Unfalls an einer Pipeline oder Speicherstätte wären die Risiken für Mensch und Natur deutlich geringer als vielfach angenommen. Würde durch ein Leck an einer Pipeline komprimiertes CO₂ austreten, entstünde lediglich eine große Menge Trockeneis. Auch gasförmiges CO₂ würde an der Oberfläche schnell verwehen, ohne dass eine Gefahr für die Umwelt bestünde. Da CO₂ schwerer als Luft ist, kann es sich jedoch in einer geografischen Senke sammeln und dort den Sauerstoff verdrängen: So entwich beim Brand in einer Lackfabrik in Mönchengladbach am 16. August 2008 CO₂ aus einer fehlerhaften Löschanlage und sammelte sich in der Umgebung. Erst durch einen Großeinsatz der Rettungskräfte und den Einsatz von Hubschraubern konnte das ausgeströmte CO₂ verwirbelt und wieder eine normale CO₂-Konzentration in der Senke hergestellt werden. Keller der umliegenden Häuser wurden mit großen Gebläsen belüftet. Es wurden 107 Personen verletzt, 19 Personen mussten ins Krankenhaus eingeliefert, drei Personen wiederbelebt werden.

CCS weltweit

Über CCS wird nicht nur in Deutschland geforscht, sondern weltweit. In zahlreichen multinationalen, grenzüberschreitenden Projekten wird die praktische Umsetzbarkeit von CCS erprobt.



Mountaineer Project, USA

In der weltweit ersten integrierten Anlage mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung an einem Steinkohlenkraftwerk sollen jährlich mehr als 100.000 Tonnen CO₂ abgetrennt und über eine Transportleitung direkt vor Ort in tiefliegenden salinen Aquiferen gespeichert werden. Für diese Demonstrationsan-

lage mit 20 Megawatt Leistung in West Virginia wurde der „Chilled Ammonia Process“ entwickelt. Hierbei wird das CO₂ nach der Verbrennung mit gekühltem Ammoniak aus dem Rauchgas gewaschen. Durch Erkundungsbohrungen und seismische Studien konnte nachgewiesen werden, dass Mountaineer für die CO₂-Speicherung geeignet ist.

Otway Basin Pilot Project, Australien

An der Südostküste Australiens, im Otway Basin, wollen Experten große Mengen CO₂ in ausgeförderte Erdgasfelder pressen. Im Auftrag der Provinzregierung von Victoria und der Industrie werden im Rahmen eines umfangreichen Monitoringprogramms Abscheidung, Transport und Speicherung von CO₂ erforscht.

Shenhua Group CCS Plant, China

Chinas größter Kohleproduzent, die Shenhua Group, will Anfang 2011 in Ordos (innere Mongolei) das erste großtechnische CCS-Kraftwerk in Betrieb nehmen. Mittels Pre-Combustion-Verfahrens sollen jährlich 100.000 Tonnen CO₂ in salinen Aquiferen gespeichert werden. Zwei weitere Anlagen sind geplant.

Speicherpotenziale ► weltweit:

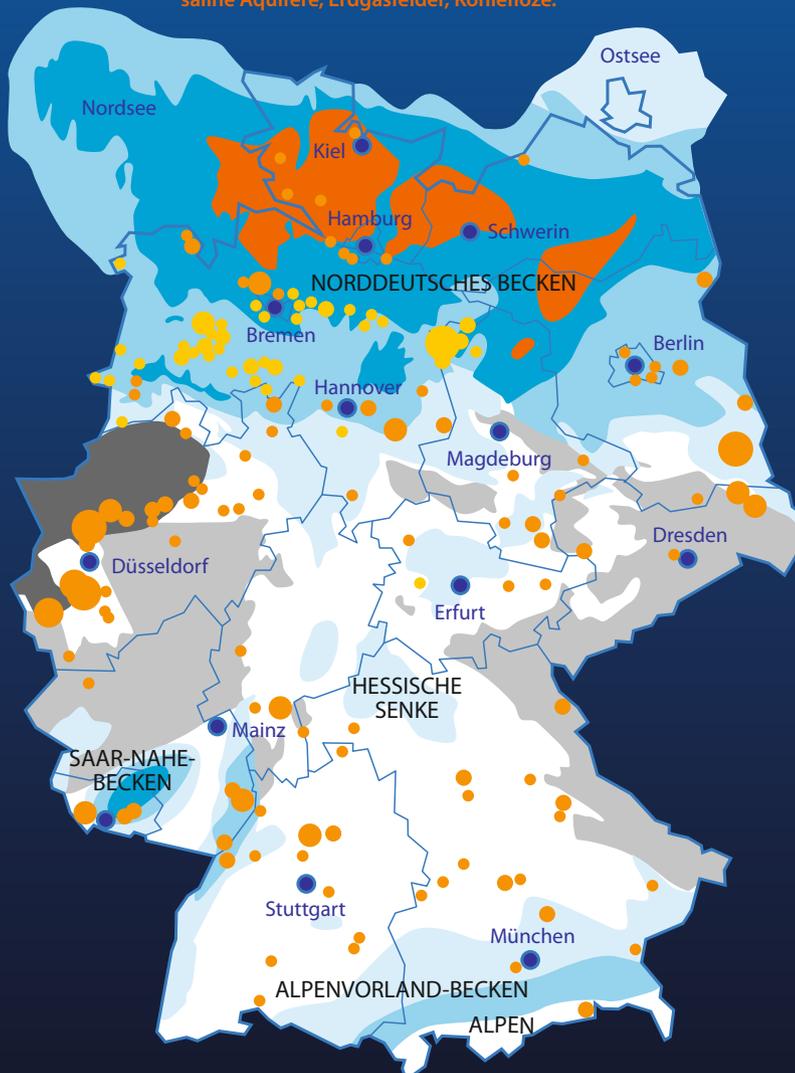
Der IPCC beziffert das technisch nutzbare weltweite Speicherpotenzial auf etwa 2.000 Milliarden Tonnen CO₂. Optimistische Prognosen gehen gar von 11.000 Milliarden Tonnen aus. Demgegenüber lag der globale energiebedingte CO₂-Ausstoß laut IPCC 2006 bei ungefähr 28 Milliarden Tonnen CO₂. Das Fraunhofer-Institut (ISI) geht davon aus, dass es weltweit für alle CO₂-Emissionen in ausgeförderten Öl- und Gasfeldern sowie in salzwasserführenden Gesteinsschichten (saline Aquifere) ausreichend Speicherpotenzial für ca. 80 Jahre gibt.

► in Deutschland:

Nach Untersuchungen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) bietet vor allem die Nordhälfte Deutschlands ausreichend Potenzial zur Speicherung von CO₂. Zum einen, weil dort bereits eine Vielzahl von Erdgaslagern erschlossen ist, die zur Speicherung von CO₂ genutzt werden könnten. Zum anderen liegen dort viele saline Aquifere, die ebenfalls als potenzielle Speicherstätten in Betracht kommen. Neueste Schätzungen der BGR gehen für Deutschland von einer Gesamtspeicherkapazität von circa zwölf Milliarden Tonnen CO₂ aus. Das tatsächliche Speicherpotenzial kann erst durch seismische Erkundungen gesichert festgestellt werden.

Große Potenziale

Wo in Deutschland Kohlenstoffdioxid gespeichert werden kann: saline Aquifere, Erdgasfelder, Kohleflöze.



Regionen mit Speichermöglichkeiten

tief liegende und Salzwasser führende Speichergesteine (Aquifere)



Steinkohleflöze

Erdgasfelder

Regionen ohne bedeutende Speichermöglichkeiten

Speichern aus geologischen Gründen nicht möglich

Speichergesteine nicht oder in zu geringen Tiefen vorhanden

Bedeutende CO₂-Quellen

Kraftwerke, Hütten- und Zementwerke, Raffinerien u. a.

0,2 → 20 Mt/a (Millionen Tonnen pro Jahr)

Quelle: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

CO₂-Pilotprojekte in Deutschland:

Forschungsspeicher des GFZ Potsdam in Ketzin nahe Berlin. Hier werden seit Juni 2008 bis zu 60.000 Tonnen CO₂ in einem salinen Aquifer in etwa 750 Meter Tiefe gespeichert; das erste Projekt seiner Art auf dem europäischen Festland.

Oxycoal AC Aachen. Das Forschungsvorhaben an der RWTH Aachen untersucht im Rahmen der COORETEC-Initiative die Entwicklung eines Kohleverbrennungsprozesses zur klimafreund-

lichen Stromerzeugung durch Kohlevergasung. Der Oxidator wird bei der Verbrennung nicht wie üblich durch die Verbrennungsluft, sondern durch ein Sauerstoff/Rauchgas-Gemisch bereitgestellt.

Lausitz: Pilotkraftwerk. Am Standort Schwarze Pumpe in der Lausitz wird in einem Pilotkraftwerk erstmals die gesamte Prozesskette umgesetzt, d. h. Abscheidung, Transport und Speicherung von CO₂ in geeigneten Gesteinsformationen.

Die BGR geht – aufgeschlüsselt nach Speicheroptionen – von folgenden Speicherkapazitäten in Deutschland aus:

• Ausgeförderte Erdgasfelder: 2,75 Milliarden Tonnen CO₂

• Saline Aquifere: 9,3 Milliarden Tonnen CO₂

CO₂ und CCS in der Industrie

INFO

CO₂-Anteil im Mineralwasser: 6 Gramm pro Liter

Als Lebensmittelzusatzstoff trägt Kohlenstoffdioxid die Bezeichnung E 290.

Der Anteil der Industrieprozesse am CO₂-Ausstoß in Deutschland liegt bei rund zehn Prozent oder 80 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten pro Jahr. Insbesondere bei der sehr energieintensiven Stahl- und Zementherstellung werden große Mengen CO₂ emittiert, die auch dann nicht vermieden werden können, wenn Stahl- und Zementwerke ausschließlich mit erneuerbaren Energie betrieben werden: Das meiste CO₂ entsteht während des Fertigungsprozesses. Da hier weitere Energieeffizienzsteigerungen demnächst ihre physikalischen Grenzen erreichen werden, hat die europäische Stahlindustrie begonnen, millionenschwere Forschungsaufträge zu vergeben, um völlig neue, CO₂-arme Produktionstechnologien zu entwickeln.

Erste Forschungsergebnisse zeigen, dass alle neuen Verfahren mit der CCS-Technologie kombiniert werden müssen, weswegen im Rahmen der Initiative ULCOS in Lothringen die Vorbereitungen zu einem Pilotprojekt mit CO₂-Abscheidung an einem Stahlwerk und Vor-Ort-Speicherung begonnen haben.

Im Vergleich zum Ausstoß ist der Einsatz von CO₂ als Rohstoff bisher gering: Die gesamte großindustrielle Nutzung beträgt aktuell weniger als 0,5 Prozent der weltweiten Kohlenstoffdioxidemissionen. Verwendung findet CO₂ etwa als Kohlensäure in Getränken, bei der Gefriertrocknung oder Brandbekämpfung, beim Konservieren von abgepackten Lebensmitteln wie Wurst und Käse, als Dünger in Gewächshäusern oder im Showbusiness als Trockeneisnebel. Bei diesen Verfahren wird CO₂ jedoch nur temporär gespeichert, da es schließlich wieder freigesetzt wird und somit in die Atmosphäre gelangt.

Nachhaltiger sind sogenannte negative Emissionen, also Verfahren, bei denen CO₂ aus der Atmosphäre gezogen wird, z. B. durch die Bindung von CO₂ via Photosynthese in schnell wachsender Biomasse. Wird diese Biomasse später in Kraftwerken zur Stromerzeugung genutzt, entsteht kein zusätzliches Kohlenstoffdioxid, da der Kreislauf geschlossen ist. Durch CCS kann dieses CO₂ dann dauerhaft unter der Erde gespeichert werden.

RWTH erforscht Synergieeffekte zwischen CCS und Geothermie

Die innovative Idee besteht hierbei insbesondere in der ökonomisch vielversprechenden Kombination der CO₂-Speicherung mit geothermischer Energiegewinnung. (...) Bei geothermischen Tiefbohrungen ab 1.500 Meter Tiefe wird ein Wasserkreislauf eingerichtet, der die Wärme des Untergrunds über obertägige Wärmetauscher etwa für die Heizung von Gebäuden verfügbar macht. Wenn das erkaltete Wasser wieder in die Tiefe gepumpt wird, kann es mit CO₂ angereichert werden. Da Kohlendioxid in Verbindung mit Wasser sauer reagiert, werden im unterirdi-

schen Reservoir Verwitterungsreaktionen ablaufen, welche die Säure zumindest teilweise neutralisieren. Zusammen mit Calciumionen kristallisiert dann das Kohlendioxid dort unten dauerhaft zu Calcit. Vergleichbare Kalkablagerungen, wenngleich in kleinem Maßstab und durch andere Prozesse hervorgerufen, erfolgen zum Beispiel in der Kaffeemaschine. Die Studien werden begleitet von umfangreichen Erhebungen verfügbarer Industriedaten, mit deren Hilfe geeignete Zielstandorte ermittelt werden.

Quelle: Pressemitteilung der RWTH Aachen vom 6. Juni 2005 (Auszug)

CCS und Nachhaltigkeit



Dr. Volker Hauff

Vorsitzender des Rates für Nachhaltige Entwicklung der Bundesregierung (April 2001 – Mai 2010) und Bundesminister a. D.

zeitbild WISSEN sprach mit Dr. Volker Hauff über die Herausforderungen der zukünftigen Energieversorgung und die Rolle von CCS.

zeitbild WISSEN: Herr Dr. Hauff, als Vorsitzender des Nachhaltigkeitsrats der Bundesregierung forderten Sie die weitere Verwendung von Kohle zur Energieerzeugung. Ist dies kein Widerspruch?

Dr. Hauff: Ich fordere ein völliges Umdenken in der Energiefrage. Priorität eins sind die Verbesserung der Energieeffizienz und der Ausbau der erneuerbaren Energien. Wir müssen aber auch vom Klimakiller Kohle weg und die Kohleverstromung sauber machen. Das muss global funktionieren, weil die Kohle in Indien, China, den USA und vielen weiteren Ländern unverzichtbar ist. Zwar kann Deutschland als reiches Land es sich unter Umständen leisten, auf Kohle im Energiemix zu verzichten, aber global ist das keine Option. Globaler Klimaschutz wird meines Erachtens nur dann erfolgreich sein, wenn wir hier in Deutschland Wege aufzeigen, wie wir aus diesem Widerspruch herauskommen.

Ist es denn gerecht, wenn wir heute CO₂ in den Untergrund pumpen, auf dem die künftigen Generationen leben müssen?

Zunächst: Dass wir mit Treibhausgasen die Gletscher abschmelzen und die Lebensräume verändern – das ist ganz und gar nicht gerecht. Und das ist das ungelöste Problem.

Die Verträglichkeit im Sinne einer Generationengerechtigkeit von Technologien allgemein, aber auch des CCS, muss durch klare Sicherheitsanforderungen und den Versuch der Minimierung von Risiken sichergestellt werden.

In 80 Jahren sind die Speicher voll. Was dann?

Auch hier gilt: Der wichtigste „Speicher“ für CO₂ ist die Atmosphäre. Und der ist schon voll. Es mehren sich sorgenvolle Stimmen aus der Wissenschaft, dass die Menschheit die Klimaerwärmung nicht auf die zwei Grad beschränken kann, die noch einigermaßen verträglich sind. Was dann – was, wenn wir schnurstracks in einen Klima-Notstand hineinlaufen? Das ist meine erste Frage. Ob und wie viele geologische Speicher dann für CCS-Techniken zur Verfügung stehen, muss wissenschaftlich untersucht werden. Natürlich sind die geologischen Speicher in der Bundesrepublik im Prinzip begrenzt. CCS-Technologie kann daher nur eine Übergangslösung sein. Langfristig brauchen wir eine vollständige Energieversorgung aus erneuerbaren Energien. Übergangslösungen schaffen Zeit, um das zu erreichen. Ich fordere eine sehr deutliche Ausdehnung der Energieforschung, um die wissenschaftlichen Grundlagen zu erarbeiten, damit wir langfristig eine CO₂-Kreislaufwirtschaft aufbauen können. Denn: Im Hinblick auf Hausmüll und Schadstoffe ist der Umbau der Wegwerfgesellschaft in Richtung auf eine Kreislaufwirtschaft erfolgreich angegangen worden. Den gleichen Versuch müssen wir beim Kohlenstoffdioxid auch machen.

Bis zur Marktreife von CCS vergehen noch ungefähr zehn Jahre, in denen neue Kraftwerke entstehen werden. Brauchen wir einen Zwang zur Nachrüstung bzw. eine Stilllegung alter Kraftwerke? Und wer soll die Kosten übernehmen?

Der Energiemarkt kann den notwendigen Wandel nicht alleine schaffen. Er braucht Richtlinien und Marksteine aus der Klimapolitik. Das fängt bei dem Ziel an, bis 2050 den ganz überwiegenden Teil unserer heutigen CO₂-Emissionen einzusparen, und das reicht ganz sicher hin bis zu einer hundertprozentigen Auktionierung der Emissionszertifikate*. Ich glaube, die Nachhaltigkeitspolitik wird hier noch eine wichtige, auch kreative Rolle spielen und wir werden neue Formen der Steuerung von Markt und Gesellschaft entwickeln müssen.

Vielen Dank für das Gespräch!

*Siehe Glossar

Einsatz im Unterricht

Methodische und didaktische Hinweise

Auf den folgenden Seiten finden Sie Arbeitsblätter, die Sie an der perforierten Linie heraustrennen und für den Einsatz im Unterricht nutzen können. Sie sind aber ebenso für Ihre persönliche Unterrichtsvorbereitung geeignet.

Die Schülerinnen und Schüler können sich in arbeitsteiliger Gruppenarbeit mit je einem Thema beschäftigen. Jede Kleingruppe erhält ein Arbeitsblatt mit ihrem Thema und arbeitet dieses Thema anhand der Informationen auf dem Arbeitsblatt, der zugehörigen Internetrecherche und weiterer möglicher Recherchen (entsprechende Kapitel im Physik- oder Chemieschulbuch, Zeitung etc.) auf. Dabei informieren sich die Jugendlichen gleichzeitig zu den einzelnen Themen, sammeln Informationen/Argumente und stellen ihre Position auf. Dies kann auch in Form einer Wochenhausaufgabe oder einer Hausarbeit geschehen. Nach der Bearbeitung der Arbeitsblätter präsentieren sie ihr Thema der ganzen Klasse. Die moderierende Lehrkraft führt die Klasse am Ende aller Präsentationen in eine offene Diskussion, in der die erarbeiteten Pro- und Kontra-Argumente ausgetauscht werden.

Die Arbeitsblätter vertiefen mit anschaulichen Beispielen und zahlreichen Arbeitsaufträgen die in diesem Magazin behandelten Themen und sollen die Schülerinnen und Schüler zur selbstständigen Auseinandersetzung mit den Themenkomplexen Klimawandel, CO₂ und CCS-Technologie anregen. Zudem dienen die Arbeitsblätter der Kontrolle des Erlernenen.

Ausgehend von grundlegenden Informationen über den weltweiten Energiebedarf und den CO₂-Kreislauf vertieft das Magazin die Thematik zur Technologie der CO₂-Abscheidung, das sogenannte CCS-Verfahren, die bestehende und neu ent-

stehende Kohlekraftwerke klimafreundlich macht. Das Magazin widmet sich auch den Fragen der Nachhaltigkeit der CCS-Technologie und deren Einsatzmöglichkeit in der Stahl- und Zementindustrie.

Im Folgenden geben wir Ihnen einige Anregungen zum Einsatz der Arbeitsblätter in Ihrem Unterricht. Alle Arbeitsblätter können unabhängig genutzt werden.

Die **Arbeitsblätter 1 und 2** eignen sich als Einstieg in die Thematik, da hier Wissen über die **Entstehung von Kohle** und über **Kohlenstoffdioxid** vermittelt bzw. aufgefrischt wird. Der **Lückentext zum CO₂-Molekül auf Arbeitsblatt 3** dient als kleine Lernkontrolle. **Arbeitsblatt 4** widmet sich der Frage der regionalen und zeitlichen **Verfügbarkeit einzelner Energieträger** und sieht Internetrecherchen der Schülerinnen und Schüler vor. Thema von **Arbeitsblatt 5** sind die **energiebedingten CO₂-Emissionen** ausgewählter Regionen. Die Aufgabenstellung orientiert sich an PISA und zielt auf die richtige Interpretation von Grafiken. Mithilfe von **Arbeitsblatt 6** können Sie eines der drei **Verfahren der CO₂-Abscheidung** im Chemie- oder Physikunterricht detailliert und anschaulich vermitteln, während Sie mit **Arbeitsblatt 7** das **Verständnis für Abscheidungsverfahren** abprüfen können. **Arbeitsblätter 8 und 9** sollen eine **Diskussion über die Pro- und Kontra-Argumente** der CO₂-Speicherung im Konkreten bzw. den Umgang mit neuen Technologien im Allgemeinen anregen. Die journalistischen Aufgabenstellungen ermöglichen allen Schülerinnen und Schüler, sich die Argumente aus der Diskussion noch einmal zu vergegenwärtigen und eine eigene Meinung zu formulieren. Auf den **Arbeitsblättern 10 und 11** werden zwei grundlegende Begriffe erläutert, denen Ihre Klasse in vielen Artikeln und Diskussionen über Energie und Klimaschutz begegnen. Wie eine **sichere CO₂-Speicherung** garantiert wird, steht auf **Arbeitsblatt 12**.

Lehrplananbindung

Das Molekül CO_2 ist ein sehr guter Ausgangspunkt für einen handlungsorientierten und fächerübergreifenden Unterricht. Während die Rolle von CO_2 als chemische Verbindung (beim Treibhauseffekt, beim Klimawandel oder in Industrie und Technik) in den Fächern **Chemie** und **Biologie** behandelt wird, fällt das Abscheiden von CO_2 aus dem Verbrennungsvorgang in den Bereich des **Physikunterrichts** (physikalische Wäsche) oder wieder des **Chemieunterrichts** (chemische Wäsche).

Die großen Themenkomplexe Kohle, Energieversorgung sowie Klimawandel und -politik stehen auf den Lehr- und Rahmenplänen für den **Politik-, Gemeinschaftskunde- und Geografieunterricht**. Eine weitere spannende, fächerübergreifende Querverbindung zur **Geografie** bietet der Themenbereich der CO_2 -Speicherung: In welchen Gesteinsschichten lässt sich das abgetrennte CO_2 speichern und wie müssen diese Gesteinsschichten überhaupt beschaffen sein?

Neben den technischen und geologischen Fragen zur Speicherung lässt sich in **Ethik, Religion** und auch im **Deutschunterricht** ideal über den gesellschaftlichen Aspekt der Speicherung diskutieren. Weitere Stichpunkte sind hier Nachhaltigkeit, Generationengerechtigkeit und Bürgerbeteiligung.

Nicht zuletzt bietet CCS ebenfalls eine gute Anknüpfung an den **Politik-, Wirtschafts- und Sozial- bzw. Gemeinschaftskundeunterricht** unter den Aspekten „Forschungsstandort Deutschland/Europa“, „Wissenstransfer in Schwellenländer“ oder „technologische Marktführerschaft“.

Übersicht der Arbeitsblätter

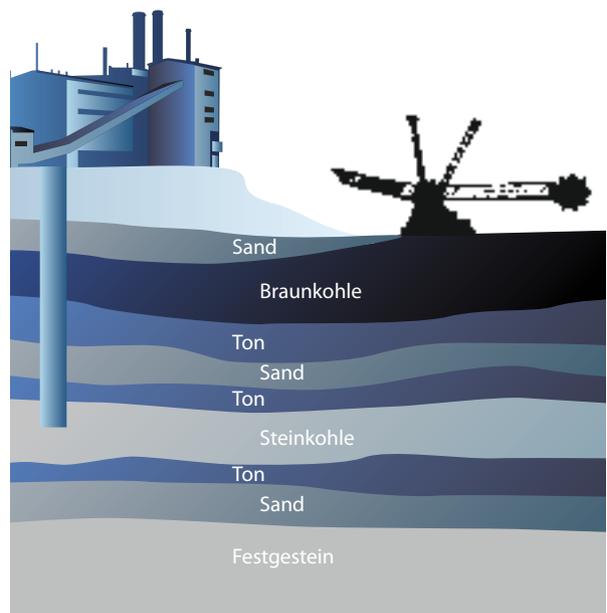
- 1 Wie entsteht Kohle?
- 2/3 Das CO_2 -Molekül
- 4 Woher kommt unsere Energie in der Zukunft?
- 5 Energiebedingte CO_2 -Emissionen nach Region
- 6 Abscheidung von CO_2 – Nach der Verbrennung
- 7 Abscheidung von CO_2 – Vor der Verbrennung
- 8 Unterirdische Speicherung
- 9 „Jede Tonne CO_2 , die nicht in die Atmosphäre gelangt, ist gut!“
- 10 Grundlast und Spitzenlast
- 11 Emissionshandel
- 12 Bodenerkundung



Auf <http://ccs.lehrerwink.de> gibt es regelmäßig neue Arbeitsblätter zum kostenlosen Download.

Wie entsteht Kohle?

Die Kohle, die heute abgebaut und zur Stromerzeugung oder in der Stahlindustrie verwendet wird, ist über mehrere Millionen Jahre entstanden. Dieser Vorgang wird Inkohlung genannt.



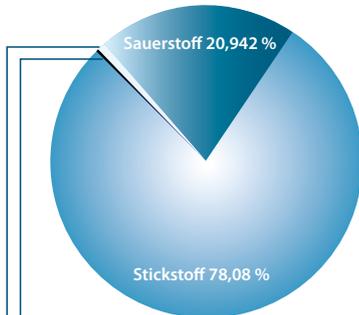
Aufgabe:

1. Beschreibe mit deinen eigenen Worten den oben abgebildeten Vorgang der Inkohlung.

Das CO₂-Molekül

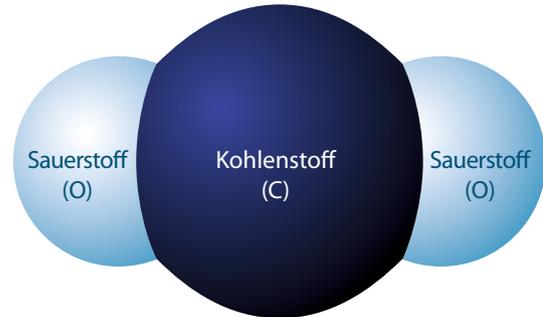
Zusammensetzung der Atmosphäre

Reine, trockene Luft in bodennahen Schichten setzt sich etwa wie folgt zusammen (in Volumenprozent):



Argon	0,934 %
Kohlenstoffdioxid	0,038 %
Wasserstoff	0,00005 %
Helium	0,0005 %
Methan	0,00017 %
Neon	0,0018 %
Lachgas	0,00003 %
Kohlenmonoxid	0,00002 %
Ozon	0,000007 %
Xenon	0,0000087 %
Krypton	0,00011 %
Schwefeldioxid	0,000000007 %
Stickstoffdioxid	0,00000003 %
Rest	0,003304263 %

Quellen: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie,
Nasa Earth Fact Sheet



Aufgaben:

- Berechne das Mol-Gewicht von CO₂ und von Luft* und trage die Werte auf die richtige Seite der Waage ein. Nimm dein Periodensystem zu Hilfe.
- Kreuze die richtigen Eigenschaften von CO₂ an:

a) CO ₂ ist	<input type="checkbox"/> brennbar	<input type="checkbox"/> nicht brennbar.
b) CO ₂ ist	<input type="checkbox"/> geruchlos	<input type="checkbox"/> stark riechend.
c) CO ₂ wird bei Raumtemperatur	<input type="checkbox"/> flüssig	<input type="checkbox"/> gasförmig.
d) Aus CO ₂ wird hergestellt:	<input type="checkbox"/> Trockeneis	<input type="checkbox"/> Kunstnebel.
e) Die CO ₂ -Konzentration in ausgeatmeter Luft beträgt	<input type="checkbox"/> ca. 0,04 %	<input type="checkbox"/> ca. 4 %.

* nur annäherungsweise mit den drei wichtigsten Bestandteilen

Das CO₂-Molekül

CO₂ ist eine chemische Verbindung aus Teil und Teilen
 Es ist ein farb- und geruchloses Gas. CO₂ ist nicht explosiv, brennbar oder giftig.

CO₂ ist als Luft und kann daher in tiefliegenden Senken den Sauerstoff

Die Formel CO₂ steht für das Treibhausgas

Es ist für den natürlichen unverzichtbar, denn es absorbiert einen Teil der
 Wärmeeinstrahlung der Sonne und sorgt so für lebensfreundliche Temperaturen.

Aber Achtung! Je mehr CO₂ in der Atmosphäre vorhanden ist, desto Wärmestrahlung
 wird absorbiert und desto wird es. Um gravierende und unabsehbare Folgen des

Klimawandels zu verhindern, darf die globale Erwärmung nicht mehr als Grad Celsius im Jahr
 2100 gegenüber der vorindustriellen Zeit betragen, so die Wissenschaftler des Weltklimarats

.....

Zur Erreichung dieses Ziels muss ein ganzes Bündel an Maßnahmen umgesetzt werden, da keine Ein-
 zelmaßnahme wie beispielsweise,

..... oder hierfür ausreicht.

Aufgaben:



1. Lies den Text oben aufmerksam durch und ergänze die Lücken mit den folgenden Worten:
 einem, IPCC, Kohlenstoff, Kohlenstoffdioxid, mehr, Sauerstoff, schwerer, Treibhauseffekt, verdrängen,
 wärmer, zwei, zwei.
2. Überlege dir drei Maßnahmen, die notwendig sind, um die Klimaschutzziele zu erreichen, und trage
 sie in die letzten drei Textlücken ein.

Woher kommt unsere Energie in der Zukunft?

Die Internationale Energieagentur IEA geht in neuesten Berechnungen davon aus, dass der weltweite Primärenergiebedarf zwischen 2006 und 2030 um 45 Prozent zunehmen wird. Im Vergleich zu heute wird es jedoch starke regionale Veränderungen in der Nachfrage geben: Vor allem bevölkerungsrei-

che Schwellenländer wie China und Indien werden in kurzer Zeit sehr viel mehr Energie benötigen. Dort wie hier in Europa wird die große Frage sein, wie zukünftig der Bedarf gedeckt wird. Dabei werden sowohl politische als auch Klimaschutzüberlegungen eine wichtige Rolle spielen.



Energieträger	Braunkohle	Steinkohle	Erdöl	Erdgas	Uran
... reicht noch ... Jahre (meine Vermutung)					
... reicht noch ... Jahre (recherchierte Zahlen)					



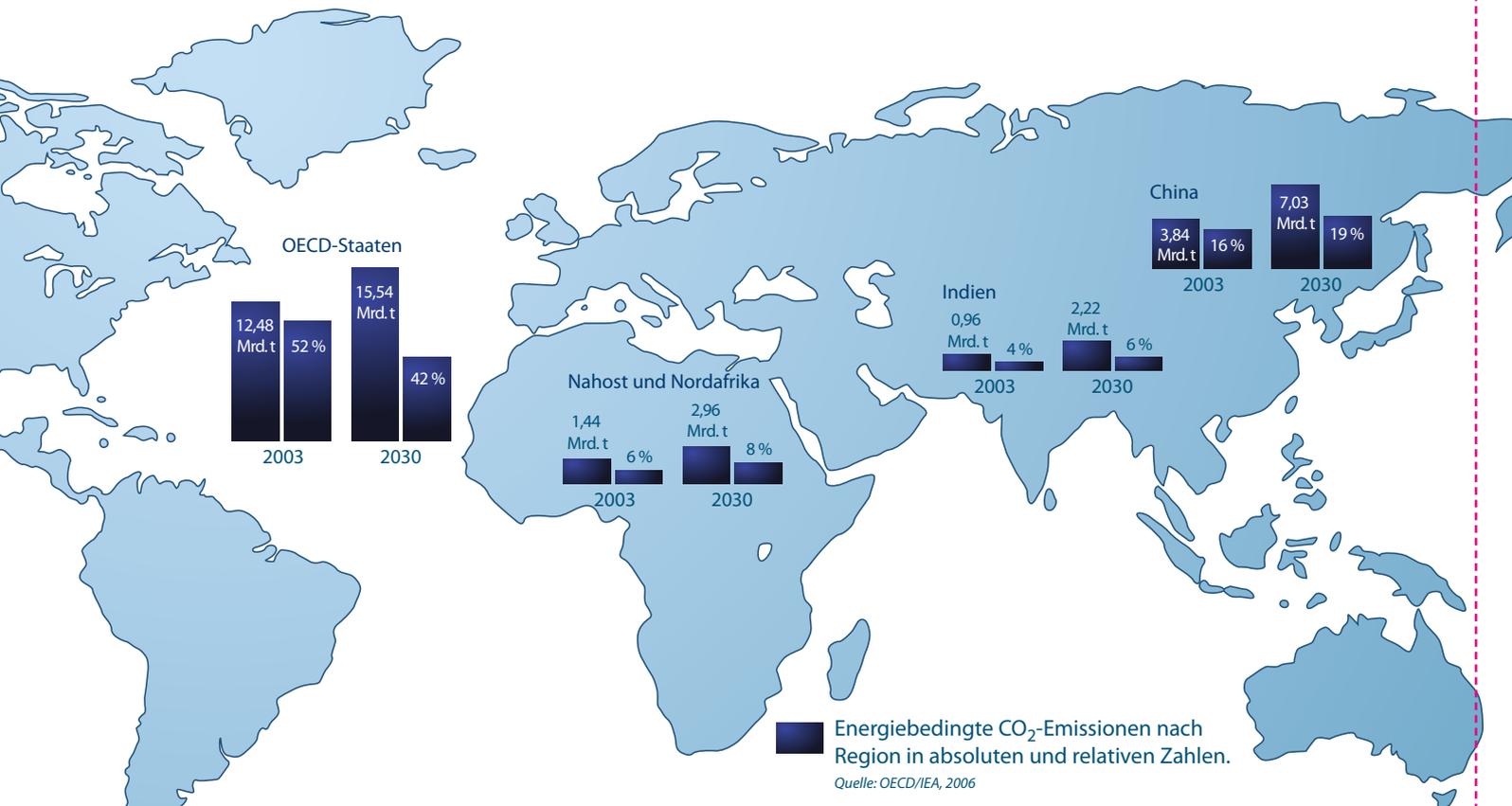
Aufgaben:

1. Trage in die Weltkarte ein, wo welche Energieträger verfügbar sind. Informationen findest du im Schulatlas bei den Themenkarten und im Internet.
2. Wie lange sind die verschiedenen Energieträger noch verfügbar? Trage zunächst deine Vermutung ein und recherchiere dann die tatsächlichen Zahlen.

Energiebedingte CO₂-Emissionen nach Region

Mit der Zunahme des weltweiten Energiebedarfs steigen auch die energiebedingten globalen CO₂-Emissionen von 28 Milliarden Tonnen im Jahr 2006 auf 41 Milliarden Tonnen 2030 (Berechnungen der Internationalen Energieagentur IEA). Das ist eine Steigerung um 45 %. Dabei entfallen drei Viertel der berechne-

ten Zunahme allein auf China, Indien sowie den Nahen und Mittleren Osten und 98 % auf die Nicht-OECD-Länder insgesamt (OECD = Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung). Lediglich in Europa und in Japan werden die energiebedingten CO₂-Emissionen 2030 niedriger liegen als heute.



Aufgabe:

Schau dir die Daten genau an. Welche der folgenden Interpretationen ist richtig, welche falsch?

- | | | |
|---|----------------------------------|---------------------------------|
| a) Der CO ₂ -Ausstoß der OECD-Staaten nimmt bis 2030 zu. | <input type="checkbox"/> richtig | <input type="checkbox"/> falsch |
| b) Der CO ₂ -Ausstoß der OECD-Staaten nimmt bis 2030 ab. | <input type="checkbox"/> richtig | <input type="checkbox"/> falsch |
| c) Da der absolute CO ₂ -Ausstoß weltweit bis 2030 zunimmt, nimmt der prozentuale Anteil der OECD-Staaten am weltweiten CO ₂ -Ausstoß ab. | <input type="checkbox"/> richtig | <input type="checkbox"/> falsch |
| d) Chinas prozentualer Anteil am weltweiten CO ₂ -Ausstoß nimmt zwischen 2003 und 2030 um 19 % zu. | <input type="checkbox"/> richtig | <input type="checkbox"/> falsch |
| e) Der absolute CO ₂ -Ausstoß von Indien und China steigt in den Jahren 2003 bis 2030 von einem Fünftel auf ein Viertel. | <input type="checkbox"/> richtig | <input type="checkbox"/> falsch |

Abscheidung von CO₂ – Nach der Verbrennung

Unter Abscheidung ist das Separieren von CO₂, das im Laufe des Verbrennungsprozesses von beispielsweise Kohle entsteht, gemeint. Das abgetrennte oder abgeschiedene (fast reine) CO₂ kann dann leicht abtransportiert und gelagert werden. Um das Kohlenstoffdioxid abzuscheiden, wird zurzeit an drei unterschiedlichen Verfahren geforscht, die sich haupt-

sächlich durch den Zeitpunkt der Abscheidung unterscheiden: vor, während oder nach der Verbrennung. Zum besseren Verständnis ist hier das sogenannte Post-Combustion-Verfahren, also die Abscheidung von CO₂ nach der Verbrennung, anschaulich dargestellt.



Aufgaben:

1. Was ist das Merkmal des Post-Combustion-Verfahrens?
2. Unter welchen zwei Bedingungen können bestehende Kraftwerke mit diesem Abscheide-Verfahren nachgerüstet werden?

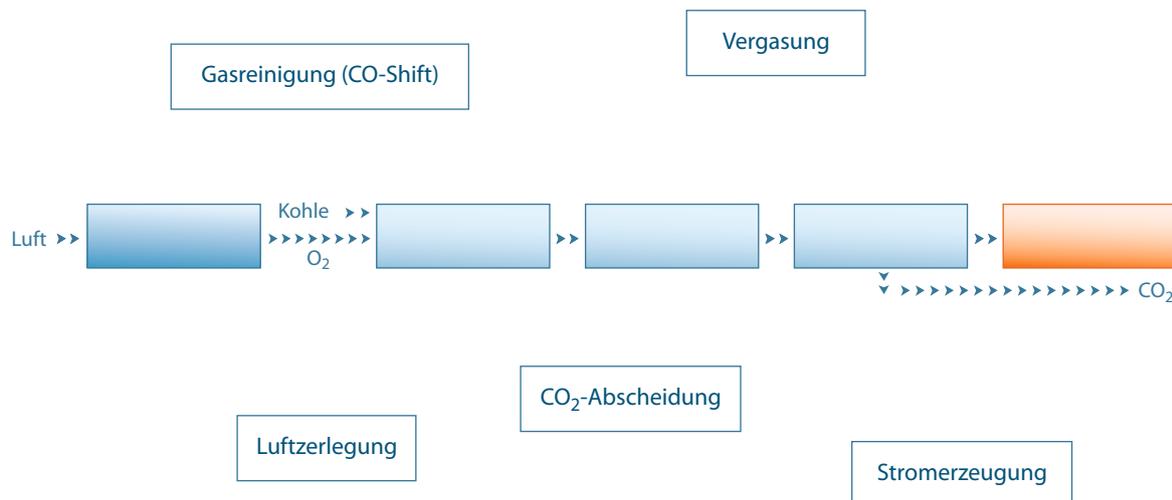
Abscheidung von CO₂ – Vor der Verbrennung

Einen Brennstoff kann man auch schon vor der Verfeuerung im Kraftwerk von CO₂ befreien. Dazu wird Kohle beispielsweise bei über 1000 °C durch die Zufuhr von Sauerstoff zu einem Synthesegas aus Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H₂) vergast.

einen flüssigen Zustand versetzt, der sich besonders gut zum Transport eignet. Der verbleibende, fast reine Wasserstoff wird in einer Gasturbine verbrannt, die einen Generator zur Stromerzeugung antreibt. Der Wasserstoff ist aber auch als Treibstoff – beispielsweise für Autos – nutzbar.

Im nächsten Schritt wird Kohlenmonoxid mittels Wasserdampf (H₂O) zu CO₂ umgewandelt, wobei weiterer Wasserstoff entsteht („CO-Shift“). Aus diesem Gasmisch lässt sich CO₂ relativ leicht mittels einer physikalischen Wäsche abtrennen. Das CO₂ wird im Weiteren verdichtet, dadurch in

Die Vergasung fester Brennstoffe in Kraftwerken heißt Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC). Dieses Verfahren befindet sich noch in der Entwicklung und soll in Deutschland erstmals ab 2014 in einem großtechnischen Kraftwerk zum Einsatz kommen.



Aufgabe:

Ordne die Begriffe in den Kästen den richtigen Stellen in der Grafik zu.

Unterirdische Speicherung

BERLINER GASSPEICHER EINER DER GRÖSSTEN DEUTSCHLANDS

Äußerlich sieht man im Berliner Grunewald außer einem aus dem Boden ragenden Rohr nichts. Aber in einer Tiefe von 800 Metern lagern die Gasvorräte der Hauptstadt unter dem Landschaftsschutzgebiet. Während des Kalten Krieges zur Versorgung West-Berlins geplant, sichert der Erdgasspeicher seit 1992 den erhöhten Gasbedarf im Winter.

(...) Unterirdische Gasspeicher gibt es in Deutschland seit mehr als 50 Jahren. Um saisonale Schwankungen im Bedarf aus-

zugleichen, wird Gas vor allem im Sommer über Bohrleitungen in tiefe Gesteinsschichten gepresst und eingelagert. (...) So (lassen) sich die niedrigen Gaspreise im Sommer nutzen. In den bundesweit 46 Untertage-Speichern lagern erhebliche Mengen Erdgas: Mit etwa 20 Milliarden Kubikmetern Gas ist immerhin fast ein Viertel des deutschen Jahresbedarfs abgesichert.

<http://wirtschaft.t-online.de>, 6. Januar 2009



Aufgaben:

1. Gas wird bereits seit vielen Jahren im Untergrund gespeichert. Nun ist geplant, auch CO₂ unterirdisch zu speichern. Wo siehst du Unterschiede? Was spricht dafür, was dagegen?
2. Schreibe einen Artikel über die CO₂-Speicherung für eine Zeitung im Jahr 2030 im Stil des hier abgedruckten Artikels.

„Jede Tonne CO₂, die nicht in die Atmosphäre gelangt, ist gut!“



Regine Günther ist Leiterin des Bereichs Klimaschutz und Energiepolitik beim WWF, dem World Wide Fund For Nature, einer der größten Naturschutzorganisationen der Welt.

zeitbild WISSEN: Frau Günther, renommierte Klimaforscherin wie Professor Schellnhuber vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung oder der Weltklimarat IPCC berücksichtigen in ihren Klimaszenarien immer schon die CCS-Technologie und die sich daraus ergebenden CO₂-Emissionsminderungen. Halten Sie es für verfrüht, CCS jetzt schon miteinzurechnen, obwohl die Technologie noch in der Erforschungs- und Erprobungsphase ist?

Regine Günther: Nein, es ist nicht verfrüht. Wir müssen uns heute schon Gedanken machen, welche Technologien wichtig für die Zukunft sind, und alle möglichen Optionen intensiv prüfen. Daher fordert der WWF den Bau von Demonstrations- und Pilotanlagen, um zu testen, ob CCS funktioniert. Natürlich müssen wir uns aber auch Gedanken darüber machen, was zu tun ist, wenn neue Technologien nicht funktionieren.

Kritiker bemängeln, dass durch CCS nicht weniger CO₂ entsteht, sondern lediglich vermieden wird, dass es in die Atmosphäre gelangt. Sieht der WWF in CCS trotzdem eine Klimaschutztechnologie?

Der WWF sieht in der CCS-Technologie eine Brückentechnologie, also eine Technologie, die solange zum Einsatz kommt, bis wir soweit sind, das gesamte anfallende CO₂ zu vermeiden. Wir müssen alle Chancen zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen nutzen, die zu akzeptablen Bedingungen eingesetzt werden können.

Es macht also durchaus Sinn, in eine Technologie zu investieren, obwohl die voraussichtlichen Kapazitäten möglicher CO₂-Speicher in Deutschland begrenzt sind?

Wie gesagt, CCS ist eine Brückentechnologie. Dabei dürfen wir nicht aus den Augen verlieren, worum es bei der unterirdischen Speicherung von CO₂ zuvorderst geht: Ziel muss es sein, die Erhöhung der Erderwärmung auf zwei Grad zu begrenzen. Und dabei ist jede Tonne CO₂, die nicht in die Atmosphäre gelangt, eine gute Tonne.

Die Deutschen bezeichnen sich ja selbst gern als „Weltmeister im Umweltschutz“. Benötigen wir CCS in Deutschland überhaupt oder können wir unsere Reduktionsziele nicht einfach durch energieeffizientere Kühlschränke und spritsparende Autos erreichen?

Es ist unklar, ob Deutschland im Stromsektor CCS benötigt. Der WWF sieht hier CCS mehr als Joker, falls die erneuerbaren Energien nicht so schnell am Start sind, wie es heute prognostiziert wird, oder gegebenenfalls zur Nachrüstung von bestehenden fossilen Kraftwerken. In der Industrie hingegen spielt CCS eine größere Rolle. Um die vielen Prozessemissionen beispielsweise bei der Eisen- und Stahlherstellung, die sehr energie- und CO₂-intensiv ist, zu reduzieren, wird es auch in Deutschland CCS brauchen.

Vor allem in China und Indien sollen in den nächsten Jahrzehnten zahlreiche neue Kohlekraftwerke entstehen, um dort den steigenden Energiebedarf zu decken. Hat CCS das Zeug für eine Exporttechnologie?

Wenn es funktioniert, vielleicht. Die Herausforderung ist, die globalen Treibhausgasemissionen bis 2050 um 80 Prozent gegenüber 1990 zu senken; die Industrieländer müssen sogar 95 Prozent machen.

In der aktuellen Debatte gibt es immer wieder Verunsicherung in der Bevölkerung, ob die Speicherung auch wirklich sicher ist. Wie sollte man auf die Bedenken der Öffentlichkeit reagieren?

Ernst nehmen. Aufklären. Transparente Forschung mit einer zeitnahen Beteiligung und Einbeziehung der Bevölkerung.

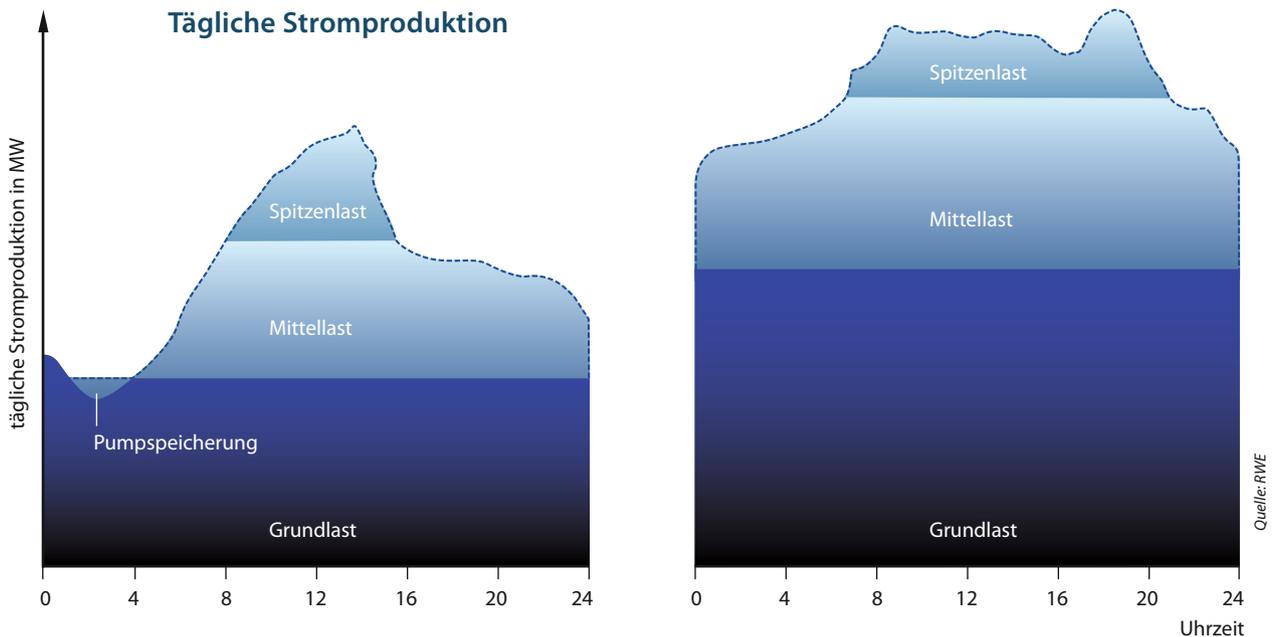
Vielen Dank für das Interview!



Aufgabe:

Führt selbst Interviews. Befragt eure Eltern, Nachbarn, Lehrkräfte und Fachleute zu CCS. Stellt die genannten Pro- und Kontra-Argumente gegenüber. Welche Argumente überzeugen euch, welche nicht?

Grundlast und Spitzenlast



Grundlast ist der Strom, der jeden Tag mindestens verbraucht wird, beispielsweise in Krankenhäusern, für Kühltruhen oder von rund um die Uhr arbeitenden Industriebetrieben. Diese gleichbleibende Grundlast wird von Braunkohle-, Kern- und in sehr geringem Umfang von Laufwasserkraftwerken gedeckt, die 365 Tage im Jahr in Betrieb sind. Grundlast macht ungefähr 50 % des täglichen maximalen Stromverbrauchs aus.

Mittellast bezeichnet die Strommenge, die regelmäßig und planbar über die Grundlast hinausgeht. So ist bekannt (und folglich planbar), dass tagsüber z. B. Millionen Bürocomputer eingeschaltet sind und mehr Züge fahren als nachts. Hierfür werden Steinkohle-, Gas- und Ölkraftwerke genutzt, deren Leistung flexibler angepasst werden kann.

Kurzfristige Bedarfsspitzen, die sogenannte **Spitzenlast**, müssen innerhalb weniger Minuten gedeckt werden können. Da Pumpspeicher- und Gasturbinenkraftwerke am schnellsten aktiviert werden können, werden diese zur Deckung kurzfristiger Bedarfsspitzen eingesetzt.

! Aufgaben:

1. Welche der beiden Kurven zeigt den Verlauf des täglichen Stromverbrauchs im Sommer, welchen den im Winter? Begründe deine Zuordnung und erläutere die verschiedenen Verbrauchsspitzen.
2. In Deutschland wird zunehmend mehr Strom aus erneuerbaren Energien wie Wind und Sonne produziert. Welche der folgenden Aussagen ist richtig?

a) Windkraftanlagen liefern Grundlast, da immer irgendwo der Wind weht.	<input type="checkbox"/> richtig	<input type="checkbox"/> falsch
b) Strom aus Fotovoltaikanlagen kann zur Mittellast gerechnet werden, da bekannt ist, dass tagsüber die Sonne scheint.	<input type="checkbox"/> richtig	<input type="checkbox"/> falsch
c) Da bei Windböen kurzfristig sehr viel Strom geliefert wird, gehört Windkraft zur Spitzenlast.	<input type="checkbox"/> richtig	<input type="checkbox"/> falsch
d) Solar- und Windkraftanlagen liefern abhängig von Tageszeit und Witterungsverhältnissen stark schwankende Mengen Strom; eine Zuordnung zu einer der drei Last-Ebenen ist daher nicht möglich.	<input type="checkbox"/> richtig	<input type="checkbox"/> falsch

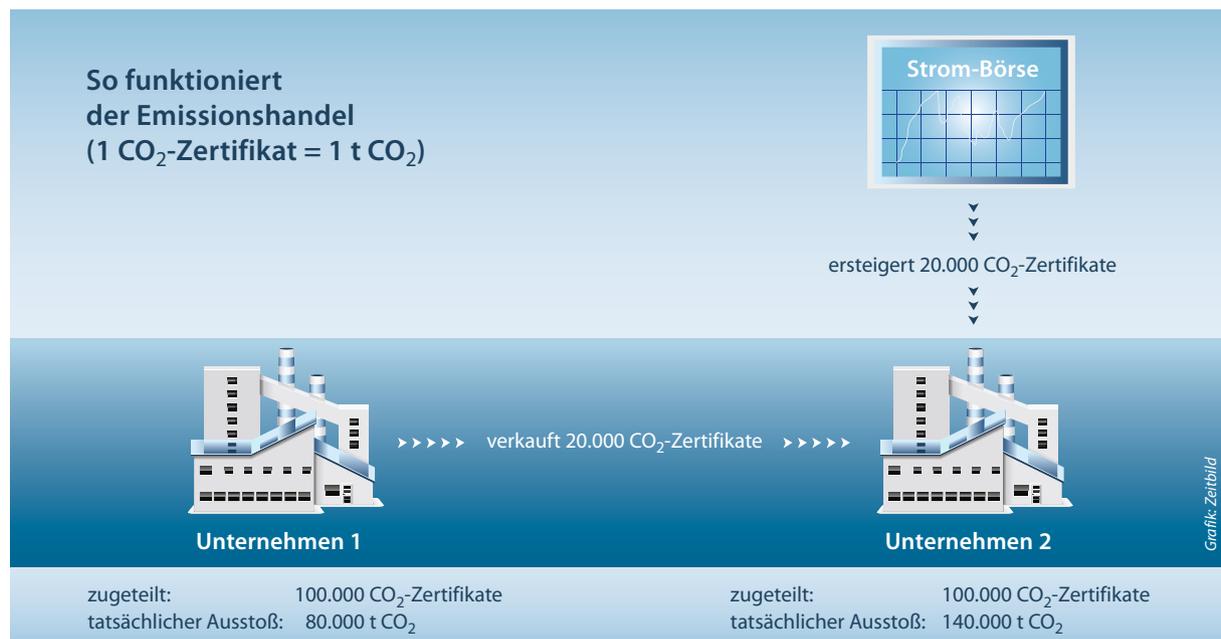
Emissionshandel

Die Mitgliedstaaten der Europäischen Union haben sich in verschiedenen Verträgen dazu verpflichtet, den CO₂-Ausstoß innerhalb der EU bis 2012 um acht Prozent und bis 2020 um 20 Prozent im Vergleich zu 1990 zu senken. Da dieses Ziel allein durch freiwillige Maßnahmen nicht erreicht wird, hat die EU den europaweiten Emissionshandel (*European Union Emission Trading Scheme*, EU ETS) eingeführt. Der Ausstoß von CO₂ wird damit erstmals zu einem Kostenfaktor und muss von Unternehmen einkalkuliert werden.

Die Idee ist simpel: Am Anfang eines Jahres erhält jedes der 12.000 Unternehmen, die EU-weit vom Emissionshandel erfasst sind, eine bestimmte Menge an CO₂-Emissionsberechtigungen (CO₂-Zertifikate; 1 Zertifikat = 1 t CO₂). Diese Menge CO₂ darf das Unternehmen dann im Jahr emittieren. Stößt

ein Anlagenbetreiber weniger CO₂ aus als es der zugeteilten Zertifikatsmenge entspricht, kann er Zertifikate an der Leipziger Strombörse EEX verkaufen. Im umgekehrten Fall muss das Unternehmen Zertifikate von anderen Unternehmen oder an der Strombörse kaufen bzw. ersteigern. Der Preis für die Zertifikate bildet sich dabei in Abhängigkeit von Angebot und Nachfrage. Kann ein Unternehmen seinen CO₂-Ausstoß nicht rechtzeitig durch CO₂-Zertifikate abdecken, muss es seit 2008 eine Strafe von 100 Euro pro Tonne CO₂ bezahlen.

Um 2020 das EU-weit vereinbarte Ziel von nur noch 1,72 Milliarden Tonnen CO₂ zu erreichen, wird ab 2013 die Menge an zugeteilten CO₂-Zertifikaten jährlich um 1,74 Prozent reduziert.



Aufgaben:

1. Welche Folgen hat die Verringerung der Menge an Emissionsberechtigungen auf die Unternehmen?
2. Was muss ein Unternehmen tun, um trotz sinkender Emissionsberechtigungen weiter produzieren zu können?
3. Informiert euch bei der Strombörse Leipzig über den tagesaktuellen Preis für ein CO₂-Zertifikat.

Bodenerkundung

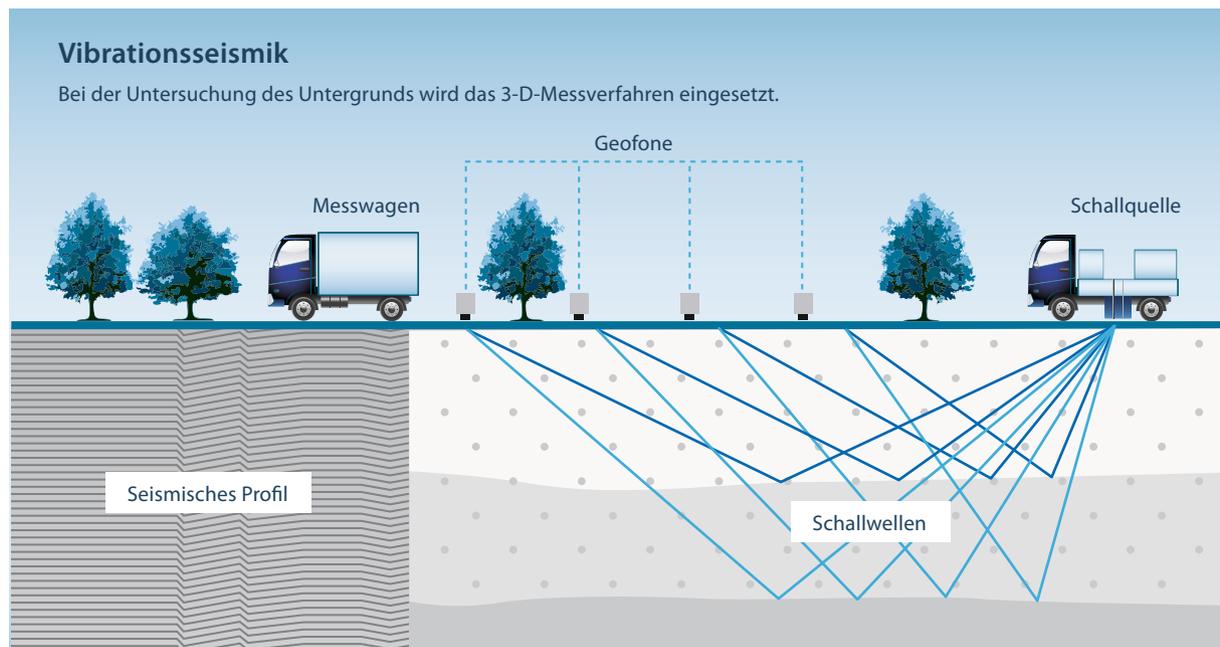
Bevor in Deutschland Gebäude, Straßen oder Tunnels gebaut werden, sind Baugrunduntersuchungen bzw. Bodenerkundungen vorgeschrieben. Solche geologischen Analysen werden auch zum Auffinden von Bodenschätzen (wie Kohlevorkommen oder Salzstöcken) angewandt oder aber bei der Exploration, also der Suche nach geeigneten Speicherstätten für Erdgas und CO₂.

Bodenerkundungen erlauben einen Blick unter die Erde: Aus welchen Schichten besteht der Untergrund, wie ist das Gestein aufgebaut, wo verlaufen unterirdische Flüsse oder Höhlen usw.? Erst auf Grundlage der Untersuchungsergebnisse können Pläne und Projekte konkret geplant und kalkuliert werden.

Ein solches Erkundungsverfahren ist die 2-D- bzw. 3-D-Seismik. Sie erstellt ein detailliertes Modell geologischer Gesteins-

schichten bis zu Tiefen von 10.000 Metern. Wie beim Ultraschall in der Medizin werden künstliche Schallwellen erzeugt, auf die jede Gesteinsart unterschiedlich reagiert und ein spezifisches Echo zurücksendet. Die so entstandenen zwei- oder dreidimensionalen Profile des Untergrunds geben Aufschluss über die geologische Schichtfolge sowie Länge, Breite und Tiefe jeder Schicht. So können geeignete Speicherstätten identifiziert oder – bei Störungen im Gestein – rechtzeitig ausgeschlossen werden. So kann ein Höchstmaß an Sicherheit gewährleistet werden.

Für eine abschließende Bewertung, ob Deckschichten tatsächlich gasundurchlässig sind, sind Erkundungs- bzw. Tiefbohrungen erforderlich. Durch die Analyse des Bohrkerns lässt sich so der genaue Aufbau des Untergrunds bis zu einer Tiefe von 1.000 Metern und mehr feststellen.



Aufgaben:

1. Welche Auswirkungen hat die Beschaffenheit des Untergrunds auf Bauvorhaben?
2. Recherchiert im Schulatlas oder auf der Webseite der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), in welchen Gegenden Deutschlands salzwasserführende Gesteinsschichten, sogenannte saline Aquifere, häufig vorkommen.

Lösungshinweise

Arbeitsblatt 2

Aufgabe 1: Berechnung des Mol-Gewichts von CO₂ und Luft:

CO₂:

$$1 \text{ mol} \times 12 \text{ g/mol} + 2 \text{ mol} \times 16 \text{ g/mol} = 44 \text{ g}$$

(1 x Kohlenstoff) (2 x Sauerstoff)

LUFT (vereinfacht):

$$0,78 \text{ mol} \times 28 \text{ g/mol} + 0,21 \text{ mol} \times 32 \text{ g/mol}$$

(78 % Stickstoff) (21 % Sauerstoff)

$$+ 0,01 \text{ mol} \times 40 \text{ g/mol} = 28,96 \text{ g}$$

(1 % Argon)

CO₂ ist also schwerer als Luft.

Aufgabe 2:

- a) CO₂ ist nicht brennbar.
- b) CO₂ ist geruchlos.
- c) CO₂ wird bei Raumtemperatur gasförmig.
- d) Aus CO₂ wird hergestellt: Trockeneis und Kunstnebel.
- e) Die CO₂-Konzentration in ausgeatmeter Luft beträgt ca. 4 %.

Arbeitsblatt 3

Aufgabe 1: Richtige Reihenfolge: einem, Kohlenstoff, zwei, Sauerstoff, schwerer, verdrängen, Kohlenstoffdioxid, Treibhauseffekt, mehr, wärmer, zwei, IPCC.

Aufgabe 2: Steigerung der Energieeffizienz, Ausbau der erneuerbaren Energien, CCS-Technologie, Strom-/Energieeinsparung, nachhaltiger Konsum.

Nutzen Sie diese Aufgabe für einen kleinen Exkurs zum Thema „nachhaltiger Konsum“, da viele Schülerinnen und Schüler den Begriff nicht kennen. Informationen finden Sie im Internet, z. B. auf www.nachhaltigkeit.info, www.umweltbundesamt.de/umweltbewusstsein, www.oekolandbau.de >> Suche: nachhaltiger Konsum.

Arbeitsblatt 4

Aufgabe 1: vgl. Seite 6/7 in dieser Broschüre

Aufgabe 2:

So lange reichen die Vorräte (weltweite Reserven bei statischer Betrachtung):

Braunkohle	ca. 230 Jahre
Steinkohle	ca. 170 Jahre
Erdöl	ca. 40 Jahre
Erdgas	ca. 65 Jahre
Uran	70 bis 140 Jahre

Quelle: Bundeswirtschaftsministerium (Kurzbericht: Verfügbarkeit und Versorgung mit Energierohstoffen, 2006)

Arbeitsblatt 5

Aufgabe: a) richtig; b) falsch; c) richtig; d) richtig; e) falsch

Arbeitsblatt 6

Aufgabe 1: Das CO₂ wird nach der Verbrennung durch eine chemische Wäsche aus dem Rauchgas gewaschen.

Aufgabe 2: Wenn ausreichend Platz vorhanden ist. Wenn trotz Wirkungsgradeinbußen durch CCS der Gesamtprozess noch wirtschaftlich ist.

Arbeitsblatt 7

Aufgabe: vgl. Seite 14, Pre-Combustion

Arbeitsblatt 10

Aufgabe 1: linke Kurve = Sommer; rechte Kurve = Winter (insgesamt höherer Verbrauch durch Heizung und mehr elektrisches Licht. Auffällig der Ausschlag zur Mittagszeit (Kochzeit) und im Winter noch zum Feierabend)

Aufgabe 2: a) falsch für Windparks an Land, richtig für Offshorewindparks; b) richtig; c) falsch (Windkraft kann nicht kurzfristig aktiviert werden, sondern ist witterungsabhängig); d) richtig

Arbeitsblatt 11

Aufgaben 1 und 2: Das Unternehmen muss z. B. seine Produktion energieeffizienter gestalten, auf Öko-Strom umstellen oder Ausgleichsprojekte schaffen. Je nach Preis der CO₂-Zertifikate kann es für ein Unternehmen auch wirtschaftlich sein, zusätzliche Zertifikate zu kaufen bzw. zu versteigern statt zu modernisieren.

Linksammlung

www.bgr.bund.de	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe	Webseiten zu CCS-Forschungsprojekten in Deutschland: www.tu-harburg.de/iet/forschungsprojekte.html www.co2sink.org www.cooretec.de
www.bmu.de	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit	
www.bmwi.de	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie	Webseiten zu CCS-Projekten in Europa: www.ccsnetwork.eu www.co2remove.eu
www.chemieundco2.de	CO ₂ NET	
www.gfz-potsdam.de	Helmholtz-Zentrum Potsdam/ Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ)	Datenbank mit CCS-Projekten weltweit: http://sequestration.mit.edu/index.html
www.iea.org	Internationale Energieagentur	
www.ipcc.ch	Weltklimarat	
www.iz-klima.de	Informationszentrum für CO ₂ -Technologien e. V.	
www.nachhaltigkeitsrat.de	Rat für Nachhaltige Entwicklung	
www.oecd.org	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung	
www.pik-potsdam.de	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)	

Impressum

Zeitbild Wissen „Klimaschutz und CCS“, herausgegeben von der Zeitbild Verlag und Agentur für Kommunikation GmbH, Kaiserdamm 20, 14057 Berlin, in Zusammenarbeit mit dem Informationszentrum für CO₂-Technologien e. V. · Gesamtherstellung: Zeitbild Verlag, Berlin, www.zeitbild.de · 2., aktualisierte und erweiterte Auflage, Januar 2011 · Verantwortlich für den Inhalt: Bernd Woischnik · Redaktion: Joachim Hummel, Frank J. Richter · Gestaltung: Reinsberg WA GmbH Berlin, www.reinsberg.de · Druck: Druck Center Meckenheim GmbH · Bildnachweis: Remy Steinegger, akg-images (S. 3); Rat für Nachhaltige Entwicklung (S. 23); WWF Bernd Lammel (S. 35) · Printed in Germany.

Wir erklären mit Hinblick auf die genannten Internet-Links, dass wir keinerlei Einfluss auf Gestaltung und Inhalte der Seiten haben und uns die Inhalte nicht zu eigen machen.

Glossar

Absorption: Aufnahme eines Stoffes in einen Festkörper oder eine Flüssigkeit

Adsorption: Bei der Adsorption lagern sich Stoffe auf der Oberfläche eines Festkörpers oder einer Flüssigkeit an (vgl. Englisch to add = anhängen).

anthropogen: vom Menschen beeinflusst oder verursacht

Aquifer: Grundwasserleiter. Teil der Erde aus Festgestein oder Sediment, der Grundwasser führen oder speichern kann. Er muss nicht zwingend mit Wasser gefüllt sein.

Emissionszertifikat/Emissionshandel: Die Europäische Emissionshandelsrichtlinie ermöglicht einen Handel mit sogenannten Emissionsberechtigungen. Unternehmen aus den Wirtschaftssektoren Energie und Industrie, die klimaschädliches Kohlenstoffdioxid (CO₂) ausstoßen, erhalten Emissionsberechtigungen. Hat ein Unternehmen einen höheren CO₂-Ausstoß, als es die zugeteilten Emissionsberechtigungen zulassen, gibt es zwei Möglichkeiten: Entweder reduziert das Unternehmen seinen CO₂-Ausstoß, indem es klimafreundliche Technologien und Brennstoffe nutzt – oder es muss zusätzliche Emissionsberechtigungen am Markt kaufen. Diese werden von Unternehmen angeboten, die durch eigene Emissionsreduzierungen weniger CO₂ ausstoßen, als sie eigentlich dürften. Der Handel mit Emissionsberechtigungen erfolgt europaweit. (Text nach: bundesregierung.de)

Fotosynthese: Bei der Fotosynthese wandeln Pflanzen durch Licht und einen Pflanzenfarbstoff (meist Chlorophyll) Kohlenstoffdioxid und Wasser in Traubenzucker und Sauerstoff um.

Grundlast ist der Strom, den beispielsweise Krankenhäuser, Kühltruhen oder rund um die Uhr arbeitende Industriebetriebe kontinuierlich benötigen. Darüber hinaus wird morgens, mittags und abends etwa zum Kochen, Waschen oder Fernsehen besonders viel Strom verbraucht. In diesem Fall spricht man von Mittel- und Spitzenlast. Zur Sicherung der Grundlast werden Braunkohle-, Laufwasser- und Kernkraftwerke eingesetzt, die ständig in Betrieb sind.

Hartkohle: Kohle mit einem Energiegehalt über 16.500 kJ/kg, wie Steinkohle, Anthrazit oder Hartbraunkohle

Leckage ist das Wort für ausströmende Flüssigkeiten oder Gase an undichten Stellen. Der Weltklimarat IPCC definiert Speicherstätten für die CO₂-Speicherung als geeignet, wenn sie CO₂ über 1000 Jahre zu 99 Prozent speichern können (vgl. Special Report on CCS, IPCC 2005).

ppm: Abkürzung für „parts per million“, zu Deutsch „Teilchen pro Million“. Mit der Einheit ppm beschreiben Fachleute die Konzentration eines Stoffes in der Luft, bei CO₂ also das Verhältnis von CO₂-Molekülen pro Millionen Luftmoleküle, 450 ppm entsprechen damit also 450 CO₂-Molekülen im Verhältnis zu einer Million Luftmoleküle. Seit Beginn der Industrialisierung ist dieser Wert von ca. 280 ppm auf heutzutage etwa 380 ppm angestiegen.

Primärenergieverbrauch ist die Menge an Energie, die zur Versorgung einer Volkswirtschaft nötig ist.

Reserven: nachgewiesene, mit heutiger Technik wirtschaftlich gewinnbare Menge einer Energierohstofflagerstätte

Ressourcen: nachgewiesene, mit heutiger Technik und/oder wirtschaftlich jedoch nicht gewinnbare Menge einer Energierohstofflagerstätte oder nicht nachgewiesene, geologisch aber mögliche, zukünftig gewinnbare Menge an Energierohstoffen

SKE: Steinkohleeinheit. 1 t SKE = 0,70 toe = 29,3 x 10⁹ J

toe: tons of oil equivalent, Tonnen Erdöläquivalent. 1 toe = 1,4286 t SKE = 41,8 x 10⁹ J

Weichbraunkohle: Rohkohle mit einem Energiegehalt unter 16.500 kJ/kg

Wirkungsgrad: Verhältnis von abgegebener Leistung zu zugeführter Leistung oder Verhältnis Nutzen zu Aufwand. Die Differenz zwischen zugeführter und abgegebener Leistung wird als (Wirkungsgrad-) Verlust(leistung) bezeichnet.