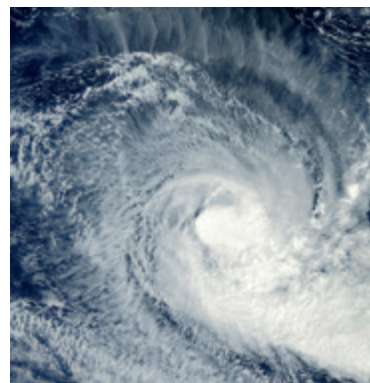


Feuerlöscher oder Klimakiller?

Kohlendioxid CO₂ – Facetten eines Moleküls



Internationales Jahr der
CHEMIE
2011



Vorwort

Kohlendioxid – CO₂ ist ein kleines Molekül, das im Zentrum der gegenwärtigen Debatte des vom Menschen verursachten Klimawandels steht. Was macht dieses Molekül so bedeutend, dass es internationale Konferenzen von Forschern und Politikern beschäftigt und zu völkerrechtlichen Verträgen führt?

Im Mittelpunkt der Diskussion steht die ansteigende Konzentration von CO₂ in der Atmosphäre. An dieser Entwicklung hat unsere Lebensweise einen wesentlichen Anteil: Unsere Energieversorgung beruht zu einem großen Teil auf der Verbrennung fossiler Energieträger, wobei in großen Mengen CO₂ in die Atmosphäre freigesetzt wird. Der Großteil der Emissionen entfällt dabei auf die Stromerzeugung, aber auch andere Sektoren haben signifikante Beiträge. So sind der Straßenverkehr und die privaten Haushalte für rund 17% bzw. 12% der CO₂-Emissionen in Deutschland verantwortlich [UBA, 2008]. Industrielle Prozesse, wie z. B. in der Stahl-, Zement- oder chemischen Industrie, tragen zu einer Erhöhung des CO₂-Eintrages in die Atmosphäre ebenso bei wie die Abholzung von Wäldern zur Gewinnung landwirtschaftlicher Nutzflächen oder zur Brennstoffversorgung.

Die Erhöhung der CO₂-Konzentration in der Erdatmosphäre ist eng verknüpft mit dem beobachteten Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur, dem sog. „Treibhauseffekt“. Er kann die klimatischen Muster der Erde verändern, mit der Gefahr einer Häufung extremer Wetterereignisse und Auswirkungen unter anderem auf das Niveau des Meeresspiegels, die Gletscher- und Eisbedeckung, die Vegetation sowie die zunehmende Ausbreitung von Dürreregionen.

Die Auswirkungen der durch CO₂ und andere Treibhausgase verursachten Klimaveränderungen können also die gesamte Menschheit in einem bisher nur schwer abschätzbaren Maße betreffen. Nur ein genaues Verständnis der verschiedenen Prozesse kann eine solide Basis für Handlungsempfehlungen bieten. Daher darf die Diskussion sich nicht auf den akademischen Bereich beschränken. Sie muss vielmehr in der breiten

Öffentlichkeit geführt werden. Es stellt sich die Frage, welche politischen, technischen und ökonomischen Handlungsoptionen für ein Gegensteuern zur Verfügung stehen und wie sie eingesetzt werden können.

Diese Handlungsoptionen betreffen den Umgang mit den Ressourcen unseres Planeten ganz allgemein und damit auch unseren Lebensstil. Die Folgen unseres Handelns oder dessen Unterlassung werden das Gesicht unseres Planeten unweigerlich für die kommenden Generationen prägen. Wir müssen uns zu der Verantwortung für unsere Zukunft bekennen.

Daher haben sich die Deutsche Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie (DBG), die Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh), die DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie sowie der Verband der Chemischen Industrie (VCI) entschlossen, gemeinsam die kommenden Herausforderungen und Handlungsoptionen in dieser Broschüre darzustellen, bei denen die Chemie unverzichtbare Beiträge zur Problemlösung und zur Umsetzung leistet.

Die Artikel dieser Broschüre decken inhaltlich die gesamte Breite von wissenschaftlichen Fakten bis hin zu gesellschaftlichen Handlungsoptionen ab. Sie sind als Beiträge zu einer aktiven gesellschaftlichen Diskussion zu verstehen. Sie spiegeln die Meinung des Autors wider und stimmen nicht notwendigerweise mit der Meinung der beteiligten Organisationen überein. Die beteiligten Trägerorganisationen wünschen sich, dass die Lektüre der Broschüre die Leser anregt, sich selbst einen Überblick über die Problematik zu verschaffen, sich ihre eigene Meinung zu bilden, diese in die öffentliche Diskussion einzubringen und ihr Handeln hiernach auszurichten.

Die Trägerorganisationen würden es begrüßen, wenn diese Broschüre dazu führt, dass die nachfolgenden notwendigen politischen Debatten mit einer informierten und interessierten allgemeinen Öffentlichkeit geführt werden.

Prof. Dr. Michael Dröscher
Präsident der Gesellschaft
Deutscher Chemiker

Wolfgang von Rybinski

Prof. Dr. Wolfgang von Rybinski
Erster Vorsitzender der Deutschen Bunsen-Gesellschaft
für Physikalische Chemie

Dr. Andreas Kreimeyer
Vorsitzender des Ausschusses Forschung, Wissenschaft und
Bildung im Verband der Chemischen Industrie

Dr. Hans Jürgen Wernicke
Vorsitzender der DECHEMA Gesellschaft für
Chemische Technik und Biotechnologie

VORWORT	3
1 DIE WECHSELWIRKUNG VON KOHLENDIOXID MIT DEM KLIMA	
1.1 Wie beeinflusst Kohlendioxid das Klima?	6
<i>Florian Ausfelder, Deutsche Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie und DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie, Frankfurt am Main</i>	
1.2 Der Einfluss der Ozeane	14
<i>Arne Körtzinger, Leibniz Institut für Meereswissenschaften (IFM-Geomar), Kiel</i>	
1.3 Die Bedeutung der Vegetation	18
<i>Volker Mosbrugger, Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung, Frankfurt am Main</i>	
1.4 Klimaveränderungen im historischen Kontext	21
<i>Meinolf Koßmann, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main</i>	
2 DIE CHEMISCHEN UND PHYSIKALISCHEN EIGENSCHAFTEN DES KOHLENDIOXIDS	
2.1 Chemische Eigenschaften	25
<i>Michael Röper, BASF SE, Ludwigshafen Walter Leitner, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen Arno Behr, Technische Universität Dortmund Martina Peters, Bayer Technology Services, Leverkusen</i>	
2.2 Physikalische Eigenschaften	27
<i>Eckhard Weidner, Ruhr Universität Bochum und Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Oberhausen</i>	
3 DIE TECHNISCHEN OPTIONEN FÜR DEN UMGANG MIT KOHLENDIOXID	
3.1 Abtrennung von Kohlendioxid	32
<i>Daniela Kruse, Evonik Degussa GmbH, Marl Wolfgang Arlt, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg</i>	
3.2 Membranen zur CO₂-Abtrennung	37
<i>Reinhold Kneer, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen Manfred Martin, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen Wilhelm A. Meulenbergh, Forschungszentrum Jülich</i>	
3.3 Abtrennung von Kohlendioxid in der Energieindustrie	40
<i>Klaus Görner, Universität Duisburg-Essen</i>	
3.4 Potenziale zur stofflichen Nutzung von Kohlendioxid	45
<i>Martina Peters, Bayer Technology Services, Leverkusen Michael Röper, BASF SE, Ludwigshafen Walter Leitner, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen Arno Behr, Technische Universität Dortmund</i>	
3.5 Carbon Capture and Storage (CCS): Anforderungen	49
<i>Michael Kühn, Deutsches Geoforschungszentrum (GFZ) der Helmholtz-Gemeinschaft, Potsdam</i>	
3.6 Carbon Capture and Storage (CCS): Speicherung in tiefen geologischen Formationen	51
<i>Franz May, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover</i>	
3.7 Verminderung von Kohlendioxid durch Biomassewachstum	60
<i>Aloys Hüttermann, Georg-August-Universität Göttingen</i>	

4	KOHLENDIOXID UND METHAN – QUELLEN UND VERMEIDUNG	
4.1	Fossile Energieversorgung als Quelle für Kohlendioxid	62
	<i>Hildegard Müller, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft, Berlin</i>	
4.2	Natürliche Kohlendioxid-Quellen	65
	<i>Manfred Ringpfeil, Biopract GmbH, Berlin</i>	
4.3	Quellen für Methan in der Atmosphäre	71
	<i>Manfred Ringpfeil, Biopract GmbH, Berlin</i>	
5	DIE ÖKONOMISCHEN UND SOZIALEN ASPEKTE IM UMGANG MIT KOHLENDIOXID	
5.1	Kohlendioxid, die politische Dimension	74
	<i>Jörg Rothermel, Verband der Chemischen Industrie, Frankfurt am Main</i>	
5.2	Emissionshandel als Instrument des Klimaschutzes	79
	<i>Uwe Lahl, Technische Universität Darmstadt</i>	
5.3	„Produktlinienanalyse“ – Mehr als ein Modewort	83
	<i>Marcel Polland, DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie, Frankfurt am Main</i>	
5.4	Klimawandel – Eine Herausforderung der Weltgemeinschaft	89
	<i>Hermann Pütter, Gesellschaft Deutscher Chemiker, Frankfurt am Main</i>	
6	GLOSSAR*	94

* Begriffe, die im Glossar erläutert werden sind im Fließtext farbig dargestellt.

1.1 Wie beeinflusst Kohlendioxid das Klima?

Wie kommt es, dass ein kleines Molekül, Kohlenstoffdioxid – CO₂, das nur in einer geringen Konzentration in der Atmosphäre vorkommt, für den Klimawandel verantwortlich gemacht wird?

Der Schlüssel zur Beantwortung dieser Frage liegt in einem klaren Verständnis der Funktion von CO₂ im Energiehaushalt unseres Planeten. Der Energiehaushalt ist wiederum ein komplexes Zusammenspiel verschiedener Einflüsse und Effekte. Um den Gesamtmechanismus „Einfluss von CO₂ auf das Klima“ beschreiben zu können, ist es hilfreich, diesen in seine Teile zu zerlegen, diese zu verstehen und sich erst dann an die Beschreibung des Gesamtsystems zu wagen. Stellen wir also die große Frage erst einmal zurück und versuchen wir uns stattdessen den einzelnen Teilen, ebenfalls über Fragen, zu nähern.

Wieso hat die Erde eine „lebens-taugliche“ Temperatur?

Um diese Frage zu beantworten, müssen wir vom Zentrum unseres Sonnensystems ausgehen. Die Sonne strahlt riesige Mengen an Energie (und auch Materie) in den Weltraum hinaus. Sie verhält sich dabei ähnlich wie ein „**schwarzer Körper**“. Ein „schwarzer Körper“ ist ein physikalisches Modell,

das in der Lage ist, jede elektromagnetische Strahlung (z. B. sichtbares Licht) vollständig aufzunehmen (absorbieren) und abzustrahlen (emittieren).

Max Planck gelang es, das **Strahlungsprofil**, d.h. die Intensität der Strahlung bei verschiedenen Wellenlängen des „schwarzen Körpers“ als Funktion seiner Temperatur zu beschreiben¹. Ein „schwarzer Körper“ hat bei einer bestimmten Temperatur ein spezifisches Strahlungsprofil: Je heißer er ist, desto mehr verschiebt sich das Maximum der Strahlung zu kurzen Wellenlängen, je kühler er ist, desto mehr zu langen Wellenlängen. Innerhalb des sichtbaren Spektralbereiches ist ein bläulich strahlender Körper wärmer als ein rötlich strahlender. So ist zum Beispiel ein rotglühendes Stück Eisen kälter als ein weißglühendes (dessen Licht mehr blaue und violette Anteile hat). Die Beobachtung der emittierten Strahlung lässt daher auf die Temperatur des „schwarzen Körpers“ schließen. Die Strahlungsfarbe in Abhängigkeit von der Temperatur ist in Abbildung 1 dargestellt.

Betrachtet man die Sonne als einen „schwarzen Körper“, so ergibt sich aus dem Strahlungsprofil für die Sonnenoberfläche eine mittlere Temperatur von 5780 K (5507 °C). Die damit verbundene elektromagnetische Strahlung wird von der Sonne in alle Richtungen ausgesandt. Ein kleiner Teil davon wird von der der Sonne zugewandten Seite der Erde abgefangen und erwärmt diese.

Der Grund dafür, dass sich die Erde nicht ständig weiter aufheizt, ist, dass sie auch wieder Energie abgibt. Sie agiert dabei ebenfalls als ein „schwarzer Körper“. Da sie nur einen kleinen Teil der Sonnenenergie absorbiert, muss sie auch nur diese Menge wieder abstrahlen. Wird die gleiche Energiemenge aufgenommen und wieder abgestrahlt, spricht man von einem **Strahlungsgleichgewicht**. Aus dieser Bedingung lässt sich prinzipiell die Temperatur des „schwarzen Körpers“ Erde berechnen.

Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass ein beträchtlicher Teil der abgefangenen Strahlung von der Erde nicht absorbiert wird, sondern gestreut und reflektiert wird, ohne zur Erderwärmung beizutragen. Dieser Effekt, der die Reflektivität insgesamt beschreibt, wird „**Albedo**“ genannt. Im Falle der Erde werden rund 29% der hereinkommenden Strahlung, hauptsächlich durch Wolken, aber u. a. auch durch Schnee und Eis in das Weltall zurückgeworfen, ohne dass eine Erwärmung der Erdoberfläche stattfindet.²

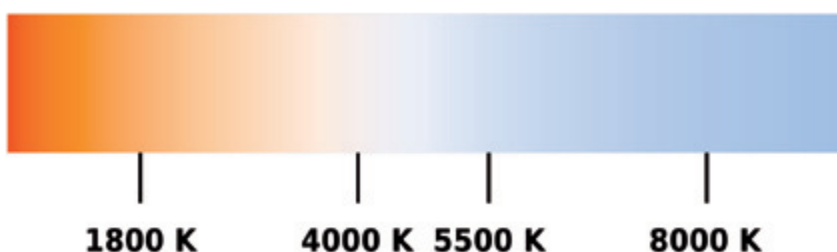


Abbildung 1: Farbtemperatur nach dem Planckschen Strahlungsgesetz.
(Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Color_temperature_sRGB.svg)

- 1 Gleichzeitig vollzog sich der Einstieg in die Quantenmechanik, da es Max Planck nur unter der Annahme diskreter Energiezustände gelang, den „schwarzen Körper“ korrekt zu beschreiben.
- 2 Auf Basis dieses Effektes wird u. a. diskutiert, ob ein weißes Anmalen von Dächern und Gebäuden einer Klimaveränderung entgegen wirken könnte.

1.1 WIE BEEINFLUSST KOHLENDIOXID DAS KLIMA?

Unter Berücksichtigung der **Albedo** errechnet sich für das Strahlungsgleichgewicht der Erde eine durchschnittliche Oberflächentemperatur von 256 K (-17°C). Dies wäre die „hypothetische“ Temperatur eines Planeten auf der Umlaufbahn der Erde, der die gleiche Reflektivität, aber keine Atmosphäre hat.

Die tatsächliche durchschnittliche Oberflächentemperatur der Erde beträgt jedoch 288 K (15°C) und erst dies ermöglicht die Existenz von flüssigem Wasser und Lebensformen wie wir sie kennen.

Während die Sonne ein Strahlungsprofil aufweist, das seine höchste Intensität im Bereich des sichtbaren Lichtes hat, liegt die elektromagnetische Strahlung der Erde außerhalb des sichtbaren, tief im langwelligigen infraroten (energieärmeren) Bereich des Strahlungsspektrums.

In Abbildung 2 sind die Strahlungsprofile für beide „schwarze Körper“, Sonne und Erde, dargestellt. Die Strahlung der Sonne ist rund 5 Millionen mal intensiver als die der Erde.

Welche Rolle spielt die Atmosphäre für die Oberflächentemperatur der Erde?

Würde sich die Erde vollständig wie ein berechneter „schwarzer Körper“ verhalten, wäre sie unbewohnbar. Ein Vergleich mit einigen anderen Planeten unseres Sonnensystems gibt einen Hinweis auf die mögliche Ursache der Abweichung von der gemessenen und berechneten Oberflächentemperatur. Im Falle des Mars (**Albedo**: 15%) ist die Vorhersage mit dem Modell des „schwarzen Körpers“ mit 217 K (-56°C) recht nahe am tatsächlich beobachteten Wert von 223 K (-50°C). Bei

der Venus (**Albedo**: 77%)³ aber versagt die Vorhersage vollständig: Statt berechneten 227 K (-46°C) werden 732 K (459°C) gemessen.

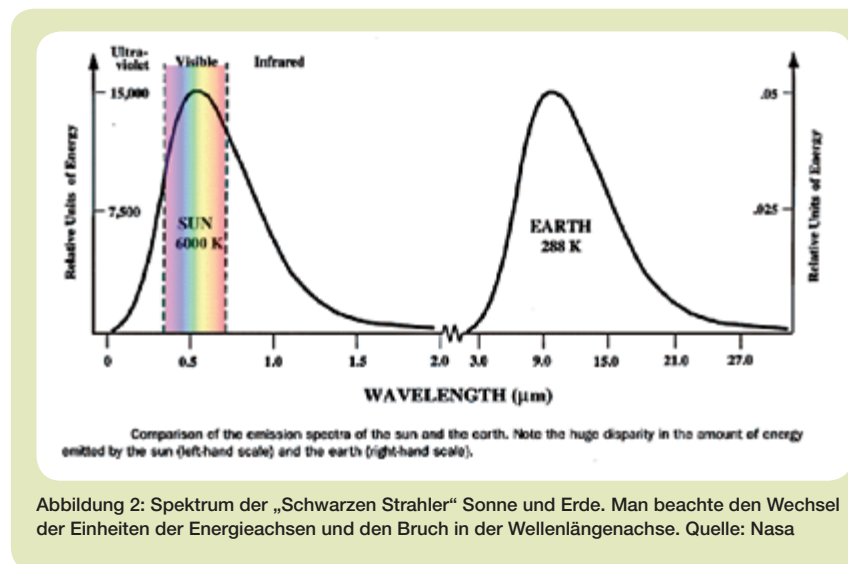
Neben Größe und Abstand zur Sonne unterscheiden sich diese Planeten ganz erheblich durch ihre **Atmosphären**. Der Mars hat nur eine sehr dünne Atmosphäre (der **Atmosphärendruck** auf der Marsoberfläche beträgt lediglich 0,6 % des Luftdrucks der Erde auf Meereshöhe), die zu über 95% aus CO₂ besteht. Die Venus verfügt ebenfalls über eine Atmosphäre, die im Wesentlichen aus CO₂ besteht. Allerdings ist der **Atmosphärendruck** rund 90 mal so hoch wie der auf der Erde.

Betrachten wir diese Planeten jedoch inklusive ihrer Atmosphären vom Weltall aus, so messen wir Temperaturen für Venus (230 K), Erde (250 K) und Mars (220 K), die sehr nahe an den berechneten Werten liegen.

Ein Blick in die Erdatmosphäre zeigt ein komplexeres Bild. Die Atmosphäre setzt sich aus verschiedenen Schichten zusammen. Die verschiedenen Schichten werden „Sphären“ genannt,

die Zone zwischen zwei Schichten „Pause“. Die Aufteilung der Schichten erfolgt gemäß ihres Temperaturprofils mit ansteigender Höhe (abfallender **Atmosphärendruck**). Dies ist in Abbildung 3 gezeigt.

Die unterste Atmosphärenschicht, die **Troposphäre**, erstreckt sich bis in eine Höhe von ungefähr 15 km über der Erdoberfläche. Innerhalb der Troposphäre fällt die Temperatur mit zunehmender Höhe ab. Das führt dazu, dass kältere Luft (mit größerer Dichte) über wärmerer (mit geringerer Dichte) liegt. Dieser Zustand ist **instabil**, was man bei dem Versuch, einen Eiswürfel (geringere Dichte) unter die Wasseroberfläche (höhere Dichte) zu drücken leicht feststellen kann: er drängt immer wieder an die Oberfläche. Diese Instabilität ist ein wesentlicher Grund für die ständigen Veränderungen in der Troposphäre, die wir als Wetter bezeichnen. Innerhalb der Troposphäre befindet sich ein Großteil (>85%) der Masse der Atmosphäre. Insbesondere führt der in der Troposphäre vorhandene Wasserdampf zur Wolkenbildung und hat einen wesentlichen Anteil am Wärmetransport innerhalb der Troposphäre.



3 Die Venus ist der Sonne näher als die Erde, was normalerweise zu einer höheren berechneten Oberflächentemperatur der Venus führen würde. Der entscheidende Unterschied in der Berechnung liegt in der höheren Albedo, die durch die geschlossene Bewölkung der Venus zustande kommt und nur einen geringen Teil der Strahlung auf die Oberfläche durchlässt.

Über der Troposphäre liegt die Stratosphäre, die sich durch eine stabile Konfiguration auszeichnet. Die Stratosphäre enthält wesentlich weniger Wasser als die Troposphäre, dennoch findet Wolkenbildung in begrenztem Umfang statt. In der Stratosphäre liegt die **Ozonschicht**, die uns vor der ultravioletten Strahlung der Sonne schützt.

Auch die höher liegenden Schichten der Atmosphäre bilden einen Teil jenes

Schutzschirmes, der das Leben auf der Erde ermöglicht und sind der Ursprung vielfältiger faszinierender Phänomene, auf die jedoch hier nicht weiter eingegangen werden soll.

Die Wege, über die die Atmosphäre die Energiebilanz der Erde beeinflusst, sind vielfältig und schematisch in Abbildung 4 dargestellt.

Die einfallende Sonnenstrahlung wird zu einem Teil direkt von der Oberflä-

che und von der Atmosphäre (Wolken, Gasmoleküle und **Aerosole**) reflektiert und gestreut. Dieser Effekt ist bereits als **Albedo** in der Berechnung der Oberflächentemperatur des „schwarzen Körpers“ berücksichtigt worden. Die restliche Energie wird von der Oberfläche, aber auch von atmosphärischen Gasen absorbiert, die sich dabei erwärmen. Die Erdoberfläche kann die Wärme auf verschiedene Weise wieder abgeben:

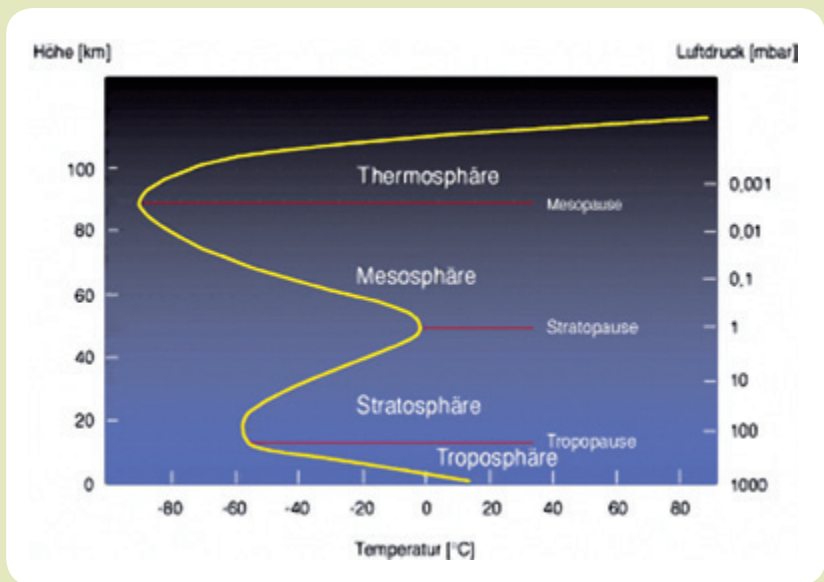


Abbildung 3: Aufbau der Atmosphäre. Copyright: DLR

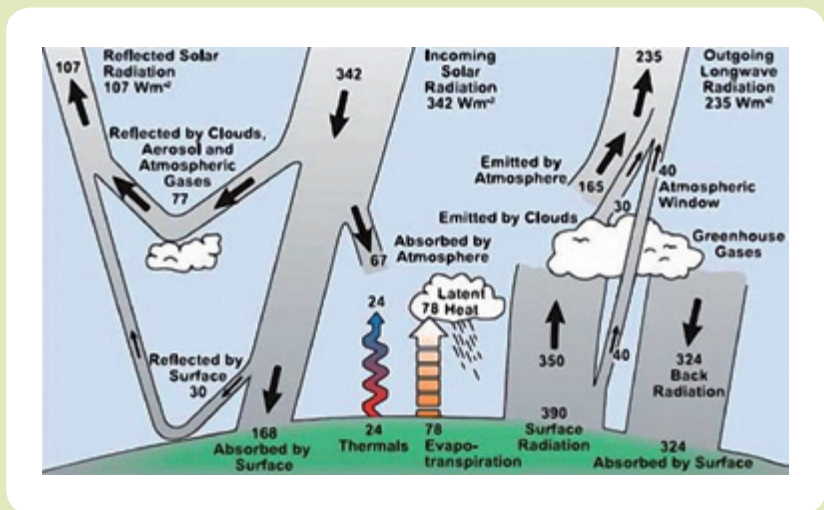


Abbildung 4: Energiebilanz der Erde, Einheiten in W/m^2 . Quelle IPCC.

- Durch Aufwärmen bodennaher Luftschichten und deren Konvektion in höhere Luftschichten (Thermals)⁴.
- Durch Verdampfen von Wasser, das in höheren Luftschichten kondensiert, diese erwärmt und das sich wieder als Regen oder Schnee niederschlägt (Evapotranspiration).
- Durch Abstrahlen von langwelliger **Infrarotstrahlung** von der Erdoberfläche gemäß den Bedingungen eines „schwarzen Körpers“ (Surface Radiation).
- Ein kleiner Teil dieser **Infrarotstrahlung** tritt nicht mit der Atmosphäre in Wechselwirkung und entkommt direkt in das Weltall (Atmospheric Window).
- Ein Großteil dieser langwelligenen **Infrarotstrahlung** tritt jedoch mit den Gasmolekülen (Greenhouse Gases) in Wechselwirkung und wird wieder auf die Erdoberfläche zurückgeworfen und dort absorbiert (Back Radiation).
- Die Atmosphäre und Wolken strahlen ebenfalls beachtliche Energiemengen in das Weltall ab (Emitted by Atmosphere, Emitted by Clouds).

4 Die englischen Ausdrücke in Klammern beziehen sich auf die graphische Darstellung in Abbildung 4.

Wie kann elektromagnetische Strahlung mit den Molekülen in der Atmosphäre wechselwirken?

Die Atmosphären von Planeten sind aus Molekülen aufgebaut, die in der Lage sind, **bestimmte Frequenzen elektromagnetischer Strahlung** zu absorbieren. Jedes Molekül hat dabei seinen eigenen „Fingerabdruck“ an Frequenzen, die es absorbieren und auch wieder emittieren kann. Jede dieser Frequenzen entspricht einem bestimmten Energiegehalt, der wiederum die **Differenzen zwischen energetischen Zuständen** (so genannten Quantenzuständen) des Moleküls wiedergibt. Diese Zustände können mit Bewegungen des Moleküls (Rotation, Schwingung) oder mit dessen elektronischer Energie verknüpft sein.

Eine **Absorption** der richtigen Strahlungsfrequenz bewirkt eine Veränderung des Energiezustandes des

Moleküls. An jenen Stellen im Strahlungsspektrum, an denen eine **Absorption** stattfindet, wird die **durchgehende Strahlung geschwächt** und im Extremfall wird die Atmosphäre für einen bestimmten Frequenzbereich undurchlässig.

Welche Energiedifferenzen absorbiert werden können, hängt mit der „Besetzung“ der Energiezustände im einzelnen Molekül zusammen. Je mehr Zustände besetzt sind, desto mehr Frequenzen können für eine Anregung genutzt werden. Bei höherer Temperatur stehen einem Molekül mehr Frequenzen für eine **Absorption** (und Emission) zur Verfügung als bei einer tieferen Temperatur.

Was passiert nun mit der absorbierten Strahlung? In den meisten Fällen (unter atmosphärischen Bedingungen) wird das Molekül spontan wieder in einen tieferen (z.B. den alten) Quantenzustand

zurückfallen und dabei eine **Strahlung der entsprechenden Frequenz emittieren**. Alternativ kann die Energie durch Stöße mit anderen Molekülen in Wärme umgewandelt werden (stärkere ungeordnete Bewegung einer Vielzahl von Molekülen). Dies führt zu einer Nettoerwärmung der Umgebung.

Welchen Effekt hat die chemische Zusammensetzung der Erdatmosphäre?

Die exakte Ausprägung der Wechselwirkung von elektromagnetischer Strahlung mit einer Planetenatmosphäre hängt neben anderen atmosphärischen Bedingungen (z. B. Druck, Temperatur, Phasengleichgewichte etc.) wesentlich von der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre ab. Die durchschnittliche Zusammensetzung der Erdatmosphäre ist in der mittleren Spalte von Tabelle 1 zusammengestellt.

Molekül	Konzentration in trockener Atmosphäre/Volumenprozent [ppm (V)]	Strahlungsantrieb (Radiative Forcing ⁵)
Stickstoff (N ₂)	78,08	Keinen Beitrag
Sauerstoff (O ₂)	20,95	
Argon (Ar)	0,93	
Weitere Edelgase	0,002369	
Wasserdampf (H ₂ O)	0-4 [0,1-40.000] (variabel)	+0,02 Wm ⁻² (Stratosphäre) Troposphäre: zu variabel um einen allgemeingültigen Wert anzugeben. ⁶
Kohlenstoffdioxid (CO ₂)	0,0379 [379]	+1,66 Wm ⁻²
Methan (CH ₄)	0,00018 [1,7]	+0,48 Wm ⁻²
Distickstoffoxid / Lachgas (N ₂ O)	0,00003 [0,3]	+0,16 Wm ⁻²
Ozon (O ₃)	0,000004 [0,04]	-0,15 Wm ⁻² (Stratosphäre) +0,35 Wm ⁻² (Troposphäre)
Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKWs)	0,00000001 [0,0001]	+0,34 Wm ⁻²

Tabelle 1: Durchschnittliche Zusammensetzung der irdischen Atmosphäre.

⁵ Werte für 2005, IPCC-Report 2007

⁶ Wasserdampf erfüllt verschiedene wesentliche Funktionen im Zusammenhang mit dem Wärmehaushalt der Erde: Wolkenbildung hat einen direkten Einfluss auf die Albedo der Erde. Mehr Wolken führen zu einer höheren Albedo und somit zu geringerer effektiver Sonneneinstrahlung auf die Erdoberfläche und damit geringerer Temperatur. Allerdings benehmen sich der Wasserdampf und auch die Wolken selber wie ein Treibhausgas und absorbieren die Abstrahlung der Erdoberfläche in einem großen relevanten infraroten Spektralbereich (Abbildung 5). Außerdem ist die Verdunstung und Kondensation von Wasser in der Atmosphäre und die Konvektion dieser Luftmassen von großer Bedeutung für den Wärmetransport innerhalb der Atmosphäre.

Ein Blick auf das Transmissionsspektrum der Erdatmosphäre (es misst die Durchlässigkeit der Atmosphäre in Abhängigkeit von der Wellenlänge der Strahlung), Abbildung 5, zeigt, an welchen Stellen des Spektrums eine **Absorption** durch Bestandteile der Atmosphäre auftritt.

Bei extrem kurzen Wellenlängen im ultravioletten Strahlungsbereich (linke Seite) findet eine **Absorption** durch die Ozonschicht statt. Im sichtbaren Bereich ist die Erdatmosphäre weitestgehend transparent. Im nahen und mittleren Infrarotbereich gibt es eine Reihe von Strukturen, auch Banden genannt, die auf Wasserdampf zurückzuführen sind und in deren Bereich die Atmosphäre undurchsichtig erscheint. Zusätzlich tauchen nun auch eine Reihe von Banden, hauptsächlich im thermischen Infrarotbereich auf, die auf **Absorption** durch CO_2 zurückzuführen sind. Zwischen 3-4 Mikrometer sowie zwischen 8-11 Mikrometer, (abgesehen von einer Ozonbande) ist die Atmosphäre aber wieder transparent. Letzterer Abschnitt wird auch atmosphärisches Fenster (atmospheric

window) genannt. Jenseits einer Wellenlänge von 15 Mikrometer ist die Atmosphäre wegen **Absorption** durch CO_2 wieder praktisch undurchsichtig⁷.

Ein Vergleich mit dem Spektrum des „schwarzen Strahlers“ Erde, Abbildung 2, zeigt, dass ein Großteil der von der Erdoberfläche emittierten elektromagnetischen Strahlung im langwelligen Infrarotbereich von der Atmosphäre absorbiert wird.

Was passiert mit der absorbierten Strahlung?

Gedanklich kann man sich die Erdatmosphäre in viele kleine Schichten eingeteilt vorstellen, die sich ähnlich wie die Schalen einer Zwiebel um den Planeten legen. Wird nur das Zentrum dieser Zwiebel erwärmt, so wandert die Wärme durch die verschiedenen Schichten nach außen und strahlt von dort ab. Die Temperatur der äußersten Schale wird dabei geringer sein als die der inneren Schalen. Die innersten Schalen werden eine Temperatur haben, die sehr nahe an der Temperatur des Zentrums liegt. Jede Schicht

isoliert ein wenig die darunterliegende gegen die darüberliegende. Der eigentliche Energieverlust der Zwiebel findet aber nur an der äußersten Schicht statt. Die Zwiebel verliert also nicht so schnell ihre Energie wie sie müsste, um die Erwärmung des Zentrums zu kompensieren. Das Zentrum erwärmt sich solange, bis sich ein Gleichgewicht mit dem Wärmeabfluss an der äußersten (kältesten) Schale eingestellt hat.

Übertragen auf die Vorgänge in der Atmosphäre stellt sich die Situation ähnlich dar. Die einstrahlende Sonnenenergie erwärmt die Erdoberfläche, die wiederum versucht, das Strahlungsgleichgewicht einzuhalten, und langwellige elektromagnetische Strahlung im Infrarotbereich nach außen abstrahlt. Diese Strahlung wird von den Molekülen in der Nähe der Oberfläche absorbiert und dann zum größten Teil wieder emittiert. Allerdings hat die Emission keine bevorzugte Richtung, und nur ungefähr die Hälfte der Strahlung dringt nach oben in höhere Bereiche der Atmosphäre vor, während die andere Hälfte nach unten in tiefere Bereiche der Atmosphäre oder zurück

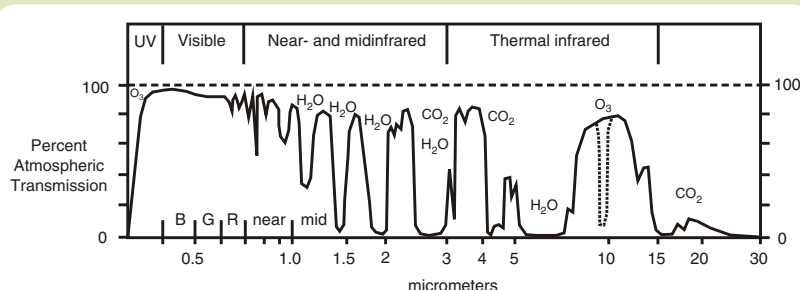


Abbildung 5: Transmissionsspektrum der Erdatmosphäre. Quelle: NASA.

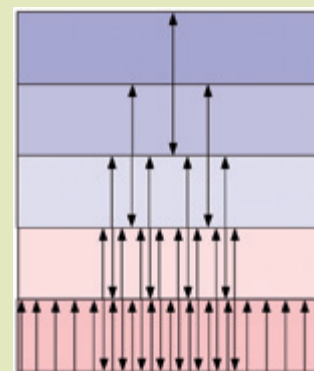


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Strahlungstransports der Infrarotstrahlung durch die Atmosphäre.

⁷ Kann eine zusätzliche Erhöhung der CO_2 -Konzentration überhaupt etwas verändern, da die CO_2 -Banden bei 15 Mikrometern ohnehin alle Strahlung absorbiert? Das Zentrum der Bande ist gesättigt, nicht aber ihre Ränder. Eine weitere Erhöhung der CO_2 -Konzentration führt also nicht zu einer Vertiefung, sondern zu einer Verbreiterung der Bande und damit zu einer Verkleinerung des atmosphärischen Fensters und erhöhter Absorption. Eine ausführliche Beschreibung, inklusive bildlicher Darstellung des Effektes ist unter www.dmg-ev.de/gesellschaft/aktivitaeten/pdf/reibhauseffekt.pdf zu finden.

auf die Erdoberfläche abgestrahlt wird. Dies ist schematisch in Abbildung 6 dargestellt.

Jener Teil der elektromagnetischen Strahlung der Erdoberfläche, der von Molekülen in der Atmosphäre absorbiert wird, entkommt daher erst mit Verzögerung und abgeschwächt der planetaren Atmosphäre. Aus dem Weltall betrachtet fehlen im Spektrum des „schwarzen Körpers“ Erde jene Bereiche, die durch **Absorption** durch Moleküle der Atmosphäre eingefangen werden. Zusätzlich wird ein Teil dieser Strahlung auf die Planetenoberfläche zurückgeworfen. In der Energiebilanz betrachtet, erwärmt sich die Planetenoberfläche wieder durch einen Teil der von ihr abgestrahlten Energie und benötigt daher die Abstrahlung auf einer erhöhten Temperatur, um das Strahlungsgleichgewicht wieder herzustellen.

Diesen Effekt, das „Einfangen“ der Strahlung, nennt man den **„Treibhauseffekt“**. Der Begriff ist allerdings irreführend: Ein Glastreibhaus, unterbindet die Konvektion der warmen Luft in die kühlere Atmosphäre (wie auch die Zwiebelschalen) und beeinflusst nicht das Strahlungsgleichgewicht. Im Englischen wird daher auch der Begriff von „trapped radiation“ (gefangene Strahlung) verwendet.

Wie groß ist der Einfluss der einzelnen Gase?

Die Gase, die in dem unteren Teil von Tabelle 1 aufgelistet sind, absorbieren die Strahlung der Erde im relevanten Infrarotbereich und werden deshalb auch als **Treibhausgase** bezeichnet. Unter dem **natürlichen Treibhauseffekt**

versteht man den Effekt, der durch eine Atmosphäre ohne menschlichen Einfluss zustande kommt. Er bildet die Grundlage für die Lebensbedingungen, wie sie auf der Erde vorgefunden werden. Menschliche Aktivitäten erhöhen jedoch die Konzentrationen der Spurengase und führen zu einem verstärkten, anthropogenen Treibhauseffekt.

Das bedeutendste Treibhausgas, der **Wasserdampf (H₂O)**, ist mit seinem komplexen Kreislauf und seinen Wechselwirkungen in der Atmosphäre dem unmittelbaren menschlichen Einfluss weitestgehend entzogen (Vgl. auch Fußnote 6). Allerdings kann wärmere Luft einen größeren Anteil Wasserdampf aufnehmen als kältere. Daher führt eine Erwärmung der Atmosphäre auch zu einer erhöhten Verdunstung und Konzentration an Wasserdampf, der wiederum als Treibhausgas agiert und zu einer weiteren Erwärmung führt. Dieser positive Rückkopplungsmechanismus wurde bereits von Arrhenius beschrieben⁸. Weitere Effekte, insbesondere die Konvektion von mit Wasserdampf gesättigter Luft, deren Abkühlung in kühleren Atmosphärenschichten, Wolkenbildung und Niederschlag, führen dazu, dass sich diese Rückkopplung nicht unendlich fortsetzt.

Im Gegensatz dazu sind die Konzentrationen der übrigen Treibhausgase in der Atmosphäre wesentlich von menschlichen Aktivitäten beeinflusst:

Kohlenstoffdioxid (CO₂) ist ein natürlich vorkommender Bestandteil der Atmosphäre und ist über die **Photosynthese** und Atmung eng mit der **Biosphäre** verknüpft. Es gibt auch einen starken Austausch zwischen den Ozeanen und der Atmosphäre, der im

Wesentlichen von der guten Löslichkeit von CO₂ in Wasser (als Kohlensäure) getrieben ist. Die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre ist historisch seit der industriellen Revolution um rund ein Drittel angestiegen. Der Anstieg ist insbesondere auf die intensive Nutzung fossiler Energieträger (Kohle, Öl, Gas) zurückzuführen sowie auch auf Änderungen der Landnutzung (Brandrodung und Umwandlung von Wald- in landwirtschaftliche Flächen).

Methan (CH₄) in der Atmosphäre hat sowohl natürliche als auch anthropogene Ursachen. Methan entsteht als bakterielles Stoffwechselprodukt **organischer** Substanz unter Sauerstoffausschluss, zum Beispiel in den Mägen von Wiederkäuern (Rinderzucht), im Nassreisbau, in Sumpfbereichen und unsachgemäß geführten Mülldeponien. Weiterhin führen Leckagen in Erdgas- und Biogasanlagen zu einem nicht unerheblichen Eintrag von Methan in die Atmosphäre.

Lachgas (N₂O) wird durch die intensive Verwendung von Stickstoffdünger in der Landwirtschaft sowie in kleinerem Umfang durch Verbrennung fossiler Energieträger freigesetzt.

Die Konzentration von **troposphärischem Ozon (O₃)** ist eng mit dem photochemischen Smog verbunden und damit stark abhängig von der lokalen Luftverschmutzung.

Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKWs) sind fast ausschließlich menschlichen Ursprungs und wurden als Kühlmittel eingesetzt. Sie sind in der Stratosphäre für die Zerstörung der Ozonschicht verantwortlich. Inzwischen sind sie weitestgehend durch weniger Ozon

⁸ Ein weiteres Beispiel für einen positiven Rückkopplungseffekt ist, dass ein Abschmelzen von Eismassen bei erhöhter Temperatur die Albedo der Erde reduziert, womit mehr Sonnenstrahlung von der Oberfläche absorbiert wird. Diese heizt sich verstärkt auf, was wiederum zu einer Temperaturerhöhung und verstärktem Abschmelzen führt. Dieser Effekt wirkt aber auch verstärkend in die andere Richtung: Eine Temperaturniedrigung führt zu verstärkter Eisbildung, damit zu höherer Albedo, abgeschwächter Sonneneinstrahlung auf die Oberfläche, Abkühlung der Temperatur, verstärkter Eisbildung....

schädigende teilhalogenierte Kühlmittel ersetzt. In der Troposphäre agieren beide Stoffklassen als potente Treibhausgase.

Zusätzlich gibt es noch eine Reihe anderer Gase die als Treibhausgase wirksam sind, wie zum Beispiel SF₆, welches als elektrisches Isoliergas im Hochspannungsbereich Verwendung findet.

Der Effekt der Treibhausgase ist lokal stark unterschiedlich und abhängig von deren spezifischen Konzentrationen. Auf globaler Ebene kann man aber versuchen, mit dem Konzept des **Strahlungsantriebs** (Radiative Forcing) den Einfluss der einzelnen Gase auf die Gesamtenergiebilanz der Erde zu quantifizieren: Man betrachtet den durchschnittlichen Gesamteffekt, den ein Gas in der Atmosphäre auf die Energiebilanz bezogen auf die Oberfläche der Atmosphäre hat. D.h. auf der einen Seite wird eine durchschnittliche Sonneneinstrahlung in die Bilanz eingerechnet. Auf der anderen Seite werden die Effekte der Moleküle wie Streuung, **Absorption** und Emission berücksichtigt. Ein positives Gesamtergebnis bedeutet, dass das Gas zu einer Erwärmung der Erde beiträgt, ein negatives ist ein Beitrag zu einer Abkühlung. Dabei handelt es sich um Werte für eine bestimmte angenommene Konzentration. Der Strahlungsantrieb der einzelnen Gase ist bereits in Tabelle 1 angegeben worden. Dabei zeigt sich, dass die Gase Methan, Lachgas, Ozon und die FCKWs einen, bezogen auf ihre Konzentration, sehr hohen Strahlungsantrieb aufweisen. Dies ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass die **Absorption** dieser Moleküle in Bereichen stattfindet, in denen die Haupttreibhausgase H₂O und CO₂ nicht absorbieren. Da diese

Treibhausgase überproportional, bezogen auf ihre Konzentration in der Atmosphäre, den Wärmehaushalt der Erde beeinflussen, hängt die zukünftige klimatische Entwicklung der Erde auch eng mit der Entwicklung der entsprechenden Konzentrationen zusammen. Wir können daher versuchen, durch Maßnahmen eine Verminderung des Eintrages dieser Gase zu erreichen. Nichtsdestotrotz ist aus Tabelle 1 auch deutlich zu erkennen, dass CO₂ den größten Strahlungsantrieb unter den Treibhausgasen aufweist. Um den Anstieg des von Menschen verursachten zusätzlichen Strahlungsantriebs zu begrenzen, muss daher versucht werden, den Eintrag von zusätzlichem CO₂ in die Atmosphäre zu vermeiden. Zusätzlich zu den Treibhausgasen wird gegenwärtig der Einfluss, den **Aerosole** auf die Energiebilanz der Erde haben, zum Beispiel die Abkühlung durch verstärkte Reflektion der Sonneneinstrahlung, intensiv diskutiert.

Gegenwärtig wird der Beitrag der menschlichen Aktivitäten vom IPCC auf den Strahlungsantrieb mit +1,6¹⁰ W/m² eingeschätzt. Dies bedeutet eine erhöhte Rückstrahlung auf die Erdoberfläche durch die menschlichen Beiträge zu den Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre. Die damit einhergehende Temperaturerhöhungen der Erdoberfläche und der Atmosphäre führen zu einer Veränderung der klimatischen Muster unseres Planeten.

Wie groß ist die zu erwartende Temperaturänderung bei einem weiteren Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen?

Der Vereinfachung halber werden die Effekte der verschiedenen Treibhausgase in **CO₂-Äquivalente** umgerech-

net. Das bedeutet, dass der Effekt der Konzentrationserhöhung eines Treibhausgases umgerechnet wird in die entsprechende Menge CO₂, die nötig wäre, um den gleichen Effekt hervorzurufen. In den weiteren Berechnungen spielt dann die chemische Natur des Gases keine Rolle mehr und es wird nur mit „CO₂-Konzentrationen“ gerechnet.

Als Bezugspunkt für eine zu erwartende Temperaturerhöhung, die mit einem Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen verknüpft ist, wird die vorindustrielle Atmosphäre gewählt [280 ppm (V)]. Im Falle einer hypothetischen, „plötzlichen“ Verdopplung der vorindustriellen CO₂-Konzentration (oder der entsprechenden Äquivalente) in der Atmosphäre und nach Einstellung der Gleichgewichte, wird je nach Klimamodell, eine durchschnittliche globale Temperaturerhöhung (Estimated Climate Sensitivity, ECS) von 1,5-4,5°C erwartet.

Eine andere Art, die zu erwartende Temperaturänderung zu beschreiben, ist die Transient Climate Response (TCR). Sie geht von einer langsamen Annäherung an die Zielkonzentration (verdoppelte vorindustrielle Konzentration) aus. Im Gegensatz zu den ECS-Werten wird dabei der Wärmetransport der Ozeane mitberücksichtigt. Für diesen Ansatz sagen die Klimamodelle eine Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur um 2,1 °C voraus.

Unabhängig von der Betrachtungsweise sind die zu erwartenden Temperaturerhöhungen besorgniserregend. Die Grundlagen für einen Klimawandel sind gelegt.

9 Diese Abkühlung wurde z.B. beim Ausbruch des Vulkans Pinatubo 1991 beobachtet. Dies ist die Grundlage für Vorschläge, SO₂-Partikel in die Stratosphäre einzubringen, die als Kondensationskeime für Wolken dienen und damit der Temperaturerhöhung entgegenzuwirken.

10 In den Grenzen von 0,6-2,4 mit 1,6 als dem wahrscheinlichsten Wert.

Wie kommt es, dass ein kleines Molekül, Kohlenstoffdioxid – CO₂, das nur in einer geringen Konzentration in der Atmosphäre vorkommt, für den Klimawandel verantwortlich gemacht wird?

Nun haben wir die verschiedenen Teilaspekte des Systems betrachtet und können die Zusammenhänge zur Beantwortung der Ausgangsfrage formulieren:

Der Energiehaushalt der Erde wird von einem Strahlungsgleichgewicht aus der eingestrahnten Sonnenenergie (kurzwellig, hauptsächlich im sichtbaren Bereich) und der abgestrahlten Energie der Erde (langwellig, im Infrarotbereich), dominiert. Dieses Strahlungsgleichgewicht wird durch das Vorhan-

densein der Erdatmosphäre verändert, was zu einer höheren Oberflächentemperatur führt, als von dem reinen Strahlungsgleichgewicht her zu erwarten wäre. Dieser Effekt ist darauf zurückzuführen, dass einige Gase, die so genannten Treibhausgase, in der Atmosphäre einen Teil der langwelligen infraroten Erdatmosphäre absorbieren und ihrerseits wieder in alle Richtungen emittieren. Im Weltall kommt nur ein winziger Bruchteil dieser Strahlung an, die stattdessen zum größten Teil wieder auf die Erdoberfläche zurückgeworfen wird. Dies entspricht nach dem Strahlungsgleichgewicht aber einem zusätzlichen Energieeintrag auf die Oberfläche, was durch Abstrahlung auf einem höheren Temperaturniveau der Erdoberfläche kompensiert wird. Als Treibhausgase kommen jene Gase

in Betracht, die in dem Frequenzbereich der langwelligen Erdatmosphäre absorbieren. Hierzu gehörten neben Wasserdampf auch Kohlenstoffdioxid sowie Methan, Lachgas und Fluorchlorkohlenwasserstoffe. Der Einfluss der einzelnen Gase wird mit dem Strahlungsantrieb beschrieben, der den Effekt dieser Gase auf das Strahlungsgleichgewicht beschreibt. Eine Erhöhung der Konzentration eines Treibhausgases, z.B. CO₂, führt zu einer Verstärkung des Strahlungsantriebs, damit zu einer Verschiebung des Strahlungsgleichgewichts zu einer erhöhten Temperatur sowohl der Erdoberfläche als auch der Luft, was wiederum eine Änderung der klimatischen Bedingungen führt, gemeinhin Klimawandel genannt.

AUTOR:

Florian Ausfelder ist Geschäftsführer der Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie und wissenschaftlicher Referent der Geschäftsführung der DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. in Frankfurt am Main.

LITERATUR

Schwarzer Strahler und Spektroskopie:
Lehrbücher der Physikalischen Chemie und Physik
Zum Beispiel: Gerd Wedler, Lehrbuch der Physikalischen Chemie, Wiley-VCH Weinheim, 5. Auflage

Atmosphärenchemie:
Lehrbücher der Atmosphärenchemie
Richard P. Wayne: Chemistry of Atmospheres, Oxford University Press, 3. Auflage

Aufbau der Atmosphäre:
Lehrbücher der Meteorologie
Zum Beispiel: C. Donald Ahrens, Meteorology Today, International Edition, Cengage Learning Services, 9. Auflage

Klimawandel:
IPCC-Report, The Physical Science Basis
www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/contents.html

1.2 Der Einfluss der Ozeane

Der Weltozean, der etwa 71 % der Oberfläche unseres Planeten bedeckt, stellt den größten der rasch miteinander austauschenden Kohlenstoffspeicher Atmosphäre – Landbiosphäre – **Hydrosphäre** dar (Abb. 1). Hierbei wird unter „rasch“ eine Zeitskala von weniger als einem Jahrtausend verstanden. Das sehr viel größere, aber nur über Jahrmillionen mit der Atmosphäre wechselwirkende Kohlenstoffreservoir der Erdkruste wird aus dieser Betrachtung also ausgeklammert. Mit einer Masse von 38.000 Milliarden Tonnen Kohlenstoff beinhaltet der Ozean gut 60 mal so viel Kohlenstoff wie die vorindustrielle Atmosphäre, die nur bei knapp 600 Milliarden Tonnen Kohlenstoff lag. Auch der Kohlenstoffinhalt der terrestrischen **Biosphäre**, die neben der Biomasse der Pflanzen auch die **organische** Humusschicht umfasst,

erreicht ebenfalls nur 6 % des marinen Kohlenstoffspeichers. Der Ozean ist somit der Gigant unter diesen Kohlenstoffreservoirs und bestimmt damit letztlich den atmosphärischen CO_2 -Gehalt. Diese Funktion kann er jedoch nur auf der Zeitskala seiner Wechselwirkung mit der Atmosphäre ausüben, welche aufgrund der vergleichsweise langsamen Durchmischung bei mehreren Jahrhunderten liegt.

Im Holozän, d.h. in den vergangenen 10.000 Jahren seit dem Ende der letzten Eiszeit, hat sich die atmosphärische CO_2 -Konzentration bis zum Anfang des 19. Jahrhunderts nur geringfügig von etwa 260 auf 280 ppm (ppm = Millionenstel Volumenanteil) erhöht. Diese vergleichsweise stabile CO_2 -Konzentration deutet darauf hin, dass der vorindustrielle **Kohlenstoffkreis-**

lauf sich in einem Fließgleichgewicht („steady state“) mit der Atmosphäre befand. Nach unserem heutigen Verständnis war der Weltozean in dieser Gleichgewichtssituation eine moderate Nettoquelle für atmosphärisches CO_2 im Umfang von etwa 0,6 Milliarden Tonnen Kohlenstoff jährlich. Dieses Ausgasen von CO_2 wird im Wesentlichen durch den Flusseintrag von (gelöstem und partikulärem) pflanzlichem Kohlenstoff von Land gespeist und findet auch heute vermutlich noch unverändert statt. Aufgrund der Emissionen von anthropogenem (d.h. vom Menschen verursachten) CO_2 aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe und der geänderten Landnutzung (kumulativ über 400 Milliarden Tonnen Kohlenstoff) befindet sich der heutige **Kohlenstoffkreislauf** in einem markanten Ungleichgewicht, das durch zusätzliche Nettoflüsse und Änderungen der Inventare gekennzeichnet ist (Abb. 1). Neben der beobachteten Akkumulation von anthropogenem CO_2 in der Atmosphäre kommt es zu einer ständigen Aufnahme durch den Ozean.

Aufgrund des Chemismus des marinen CO_2 -Systems ($\text{CO}_2(\text{aq}) - \text{HCO}_3^- - \text{CO}_3^{2-}$) besitzt Meerwasser eine sehr hohe Aufnahmekapazität für zusätzliches CO_2 , die im Wesentlichen auf die puffernde Wirkung von CO_3^{2-} zurückzuführen ist, welches etwa 10 % des gelösten **anorganischen** Kohlenstoffs ausmacht. Diese Kapazität führt dazu, dass in einem zukünftigen geochemischen Gleichgewicht zwischen Ozean und Atmosphäre etwa 80 % aller anthropogenen Emissionen in das ozeanische Reservoir aufgenommen werden. Berücksichtigt man zusätzlich die puffernde Wirkung der

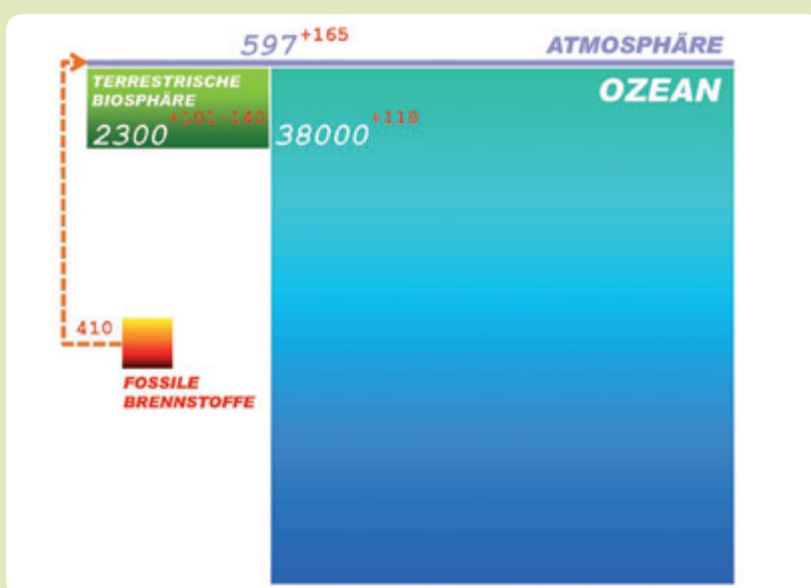


Abbildung 1: Schematische Darstellung der rasch austauschenden Reservoirs des globalen Kohlenstoffkreislaufs. Kursive Zahlen geben die Größe des betreffenden Kohlenstoffreservoirs an, rote Zahlen beziehen sich auf anthropogenes CO_2 . Alle Zahlen sind in Milliarden Tonnen Kohlenstoff (= Gt C). Die Kontaktfläche zwischen Atmosphäre und terrestrischer Biosphäre sowie Ozean spiegelt die Bedeckung unseres Planeten mit Land (29 %) und Meer (71 %) wider.

Tiefsee-Kalksedimente, die auf deren partielle Rücklösung zurückzuführen ist, so werden sogar etwa 95 % der anthropogenen Emissionen vom Ozean „verarbeitet“. Diese Kapazität kann der Ozean jedoch nur auf den recht langen Austauschzeitskalen wahrnehmen, welche bei etlichen Jahrhunderten und im Falle der Kalksedimente sogar bei vielen Jahrtausenden liegen. Die gegenwärtige Situation ist folglich durch ein Ungleichgewicht geprägt, in dem der Weltozean seiner chemischen Aufnahmekapazität noch stark hinterherhinkt und einen größeren Anteil des anthropogenen CO_2 in der Atmosphäre zurücklässt. Die Quantifizierung der aktuellen ozeanischen Senke für anthropogenes CO_2 ist daher für zuverlässige Klimaprognosen von entscheidender Bedeutung. Vor diesem Hintergrund wurden unabhängige Methoden entwickelt, mit deren Hilfe die Rolle des Ozeans im heutigen veränderten Kohlenstoffkreislauf auf der Basis von Beobachtungen quantifiziert werden konnte. Im Folgenden werden zwei prominente Beispiele vorgestellt, die unser gegenwärtiges Verständnis entscheidend geprägt haben und zu Ikonen der marinen Kohlenstoffforschung geworden sind.

Die erste Methode beruht auf der Messung der CO_2 -Partialdruckdifferenz zwischen Oberflächenozean und Atmosphäre. Diese stellt den thermodynamischen Antrieb des Gasaustauschs von CO_2 zwischen Atmosphäre und Ozean dar. Eine Integration der daraus berechneten CO_2 -Flussdichte ($\text{mol C m}^{-2} \text{ Jahr}^{-1}$) über den gesamten Weltozean erlaubt die Abschätzung der jährlichen Nettoaufnahme von CO_2 durch den Weltozean. Dieser Ansatz steht jedoch vor der kolossalen Aufgabe, die hohe natürliche Variabilität des marinen CO_2 -Systems in Raum und Zeit durch Beobachtungen adäquat zu erfassen. Diese

Aufgabe war und ist durch die weltweit verfügbare Flotte an Forschungsschiffen nicht einmal annähernd zu lösen. Erst durch die Etablierung eines weltweiten Netzes von Handelsschiffen, die freiwillig als Messplattformen („voluntary observing ships“) für CO_2 -Messungen fungieren, konnte eine ausreichende Datenbasis gewonnen werden. Die aktuelle Klimatologie der CO_2 -Nettoflüsse (Abb. 2, Takahashi et al., 2009) beruht auf etwa drei Millionen Messungen, die zwischen 1970 und 2007 gewonnen und auf das Referenzjahr 2000 korrigiert wurden. Der größte Datenbeitrag stammt aus dem

letzten Jahrzehnt, und dennoch ist die Klimatologie bei weitem noch nicht in allen Ozeanregionen auf eine adäquate Datenbasis gestützt. Allerdings sind die Schlüsselregionen wie subpolarer Nordatlantik, äquatorialer Pazifik und Südpolarmeer inzwischen trotz dieses allgemeinen „undersampling“ deutlich besser erfasst. Auf der Basis dieser Klimatologie konnte die CO_2 -Senke für den Weltozean auf 1,4 Milliarden Tonnen Kohlenstoff im Referenzjahr 2000 bestimmt werden. Diese Senke stellt eine Überlagerung der vorindustriellen Quelle von jährlich etwa 0,6 Milliarden Tonnen Kohlenstoff und der Senke für

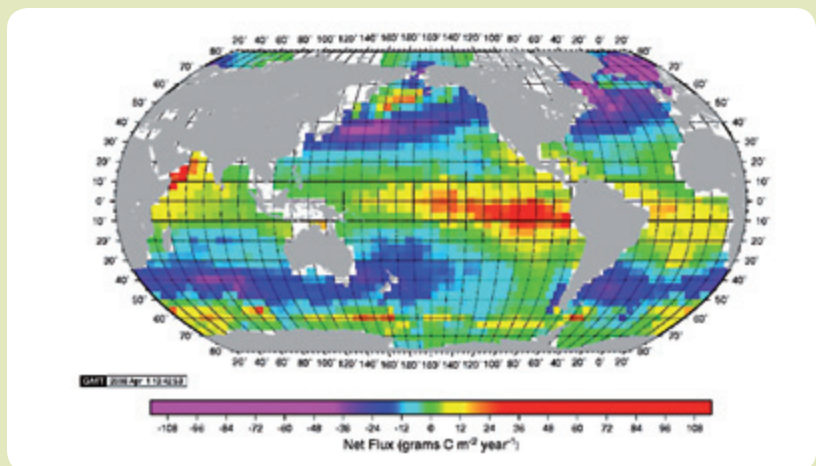


Abbildung 2: Mittlere klimatologische Ozean-Atmosphäre-Flussdichte von CO_2 (in $\text{g C m}^{-2} \text{ Jahr}^{-1}$) für das Referenzjahr 2000. Die Klimatologie beruht auf ca. 3 Millionen Messungen des CO_2 -Partialdrucks im Oberflächenwasser seit 1970. Die globale ozeanische CO_2 -Senke beträgt $1,42 \text{ Gt C Jahr}^{-1}$. (Abbildung aus Takahashi et al., 2009).

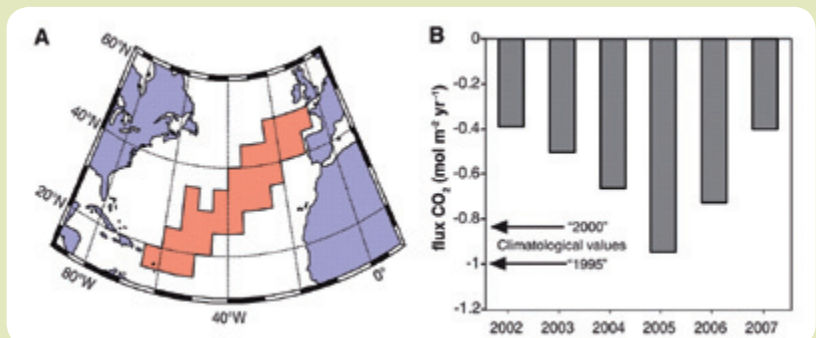


Abbildung 3: Jährlicher Ozean-Atmosphäre-Fluss von CO_2 im Zeitraum 2002-2007 (B) entlang eines besonders gut beprobten Korridors im Nordatlantik (A). Die korrespondierenden klimatologischen CO_2 -Senken in diesem Korridor für das Referenzjahr 1995 (Takahashi et al., 2002) und 2000 (Takahashi et al., 2009) sind ebenfalls angegeben. (Abbildung aus Watson et al., 2009)

anthropogenes CO_2 dar. Letztere liegt nach dieser Abschätzung somit etwa bei 2,0 Milliarden Tonnen Kohlenstoff pro Jahr. Aufgrund der immer noch prekären Datenlimitation musste sich diese Methode bisher auf den klimatologischen CO_2 -Fluss, das heißt ein langfristiges Mittel über den gesamte Beobachtungszeitraum, beschränken. Erst jetzt rücken Untersuchungen zur zwischenjährlichen Variabilität dieser CO_2 -Senke in besonders gut abgedeckten Regionen in greifbare Nähe. Ein erstes prominentes Beispiel für den Nordatlantik zeigt eine erhebliche zwischenjährige Variabilität, die vermutlich auf den Einfluss natürlicher Klimazyklen wie der Nordatlantischen Oszillation auf den natürlichen Kohlenstoffkreislauf zurückzuführen sind (Watson et al., 2009).

Die zweite Methode basiert auf einem komplizierten Auswerteverfahren, das eine Separation von natürlichem und anthropogenem Kohlenstoff im marinen Kohlenstoffreservoir erlaubt. Es stehen heute mehrere Verfahren zur Verfügung, die generell sehr konsistente Ergebnisse liefern, jedoch aufgrund

der verwendeten Annahmen und Näherungen durchaus im Detail (z.B. regional oder in der vertikalen Verteilung) voneinander abweichen. Ein besonders prominentes Ergebnis beruht auf dem globalen hydrographischen GLODAP-Datensatz, der durch große internationale Forschungsprogramme über den Zeitraum 1990-1998 gewonnen wurde. Dieser Datensatz umfasst Messungen einer Vielzahl von Messgrößen an mehr als 300.000 Proben von nahezu 10.000 hydrographischen Stationen aus fast 100 Expeditionen, die in einem sehr aufwändigen Prozess durch mehrere Stufen der Qualitätskontrolle und Nachkorrektur zu größtmöglicher interner Konsistenz geführt wurden und bis heute den genauesten und umfassendsten Blick auf den marinen Kohlenstoffkreislauf bieten (cdiac.ornl.gov/oceans/glodap/Glodap_home.htm). Auf der Basis des GLODAP-Datensatzes konnte erstmals eine robuste Abschätzung der kumulativen Senke von anthropogenem CO_2 im Weltozean gewonnen werden. Diese lieferte ein Gesamtinventar von 106 ± 17 Milliarden Tonnen Kohlenstoff für das Referenzjahr 1994 (Sabine et

al., 2004). Eine genauere Betrachtung der Verteilung von anthropogenem CO_2 im Ozean zeigt deutlich die dominanten Eintragswege vor allem über die Tiefenwasserbildung im subpolaren Nordatlantik sowie über die Bildung von Zwischenwasser in einem Gürtel von etwa 30° - 50° südlicher Breite (Abb. 4). Die Verteilungsmuster stellen gewissermaßen einen Schnappschuss eines transienten Ungleichgewichtszustands dar, in dem anthropogenes CO_2 kontinuierlich in das Ozeaninnere eindringt, aber noch sehr weit von einer kompletten räumlichen Durchdringung des Weltozeans entfernt ist. Es ist daher nicht überraschend, dass das ermittelte anthropogene CO_2 -Inventar nur bei gut 40 % der kumulativen CO_2 -Emissionen im Zeitraum 1800-1995 liegt und somit weit hinter seiner Aufnahmekapazität von >80 % zurückbleibt.

Gegenwärtig wird im Rahmen des internationalen „Repeat Hydrography Program“ die erste konzertierte hydrographische Aufnahme der Jahre 1990-1998 wiederholt. Dieses Programm ist zu etwa drei Vierteln absolviert. Die bisher gewonnenen Daten wurden einer nochmals verbesserten Qualitätskontrolle unterzogen und liegen nunmehr als CARINA-Referenzdatensatz vor (http://cdiac.ornl.gov/oceans/CARINA/about_carina.html). Sie ermöglichen systematische Einblicke in die Schwankungen des globalen ozeanischen Kohlenstoffinventars auf dekadischen Zeitskalen. Es ist anzunehmen, dass die im Oberflächenozean dokumentierte natürliche Variabilität sich auch in das Ozeaninnere fortsetzt. Ein solches besseres Verständnis der Dynamik der natürlichen Kohlenstoffreservoir- und -prozesse ist unabdingbar für zuverlässige Prognosen der Auswirkungen des sowie Rückkopplungen auf den globalen Wandel. Der natürliche Kohlenstoffkreislauf bewegt jährlich

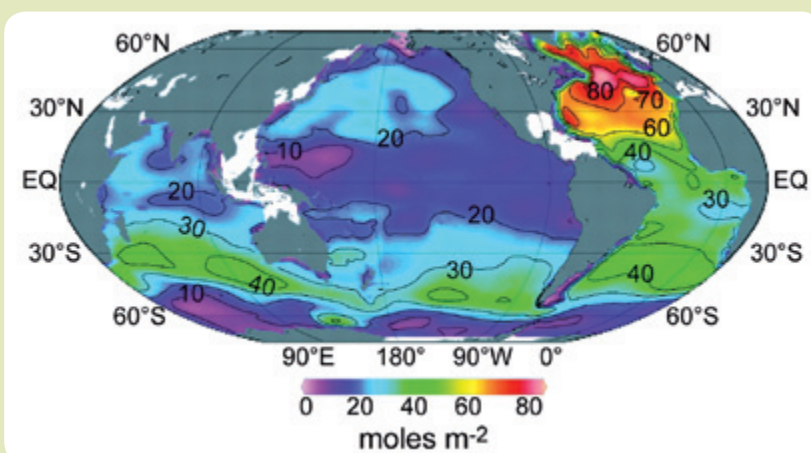


Abbildung 4: Säuuleninventar von anthropogenem CO_2 (in mol m^{-2}) über die gesamte Wassersäule. Besonders hohe Inventare werden in den Bildungsregionen von Tiefenwasser (Nordatlantik) und Zwischenwasser (30° - 50° S) vorgefunden. Das Gesamtinventar für das Referenzjahr 1994 liegt bei 106 ± 17 Gt C. (Abbildung aus Sabine et al., 2004).

viele Milliarden Tonnen Kohlenstoff – räumlich sowie durch biochemische Prozesse zwischen den verschiedenen Reservoiren (*organisch – anorganisch*, gelöst – partikulär). Diese großen Prozesse sind nicht zuletzt von den klimatischen Antriebsfaktoren abhängig und werden daher in bisher weitgehend unverstandener Weise auf den Klimawandel reagieren. Erste Indikatoren eines den gesamten Weltozean erfassenden Wandels sind nicht nur in Temperatur und Salzgehalt sondern auch im ozeanischen Sauerstoffinventar zu sehen (Keeling et al., 2010). Die bereits beobachtete generelle Sauerstoffabnahme ist vermutlich auf Veränderungen sowohl in den physikalischen als auch in biologischen Rahmenbedingungen zurückzuführen.

Für letztere gibt es nicht nur durch veränderte Strömungen und höhere Temperaturen Anlass sondern vermutlich auch durch den sinkenden *pH-Wert* (Riebesell et al., 2009), also den negativen dekadischen Logarithmus der Wasserstoffionen-Konzentration. Dieser liegt bei Meerwasser im Bereich

von 7,8 bis 8,2 und somit im leicht alkalischen Bereich. Trotz der puffernden Wirkung des Karbonatpuffers im Meerwasser sinkt der *pH-Wert* von Meerwasser in Folge der Aufnahme von anthropogenem CO_2 . Die Absenkung beträgt bisher nur etwas mehr als 0,1 pH-Einheiten, könnte aber bis zum Ende des 21. Jahrhunderts auf nahezu 0,4 steigen. Eine solche Änderung im chemischen Milieu (Zunahme der H^+ -Konzentration auf das 2,5-fache) und in der Speziation des marinen CO_2 -Systems (Abnahme der CO_3^{2-} -Konzentration auf die Hälfte) wäre erheblich und könnte durchaus signifikante Auswirkungen auf marine Organismen und Ökosysteme haben. Besonders betroffen wären hier marine Kalzifizierer, Organismen wie Korallen oder Kalkalgen also, die biogenen Kalk (Calcit, Aragonit, Ca/Mg-Karbonat) abscheiden. Negative Auswirkungen des pH-Stresses sind für Korallen bereits gut dokumentiert und auch bei anderen Kalzifizierern in Laborexperimenten beobachtet worden. Allerdings ist das Thema „Ozeanversauerung“ aktuell Gegenstand großer nationaler und in-

ternationaler Forschungsprogramme, und abschließende Aussagen über eine mögliche Rückkopplung des pH-Effektes auf das Klima sind noch nicht möglich. Ähnliches gilt für den Einfluss der Ozeanerwärmung. Auch hier gibt es genügend Hinweise auf erhebliches Rückkopplungspotential aber bisher zu wenig solide Erkenntnisse für quantitative Aussagen (Riebesell et al., 2009).

Es bleibt damit abzuwarten, welchen Einfluss der globale Wandel auf den natürlichen *Kohlenstoffkreislauf* des Ozeans haben wird. Es wäre naiv anzunehmen, dass dieser vernachlässigbar und für das zukünftige Klima auf unserem Planeten irrelevant sei. Vielmehr leitet sich aus unserem begrenzten Verständnis ein Mandat für bessere Ozeanbeobachtung ab, dem die Entwicklung zukünftiger Beobachtungsansätze und -methoden Rechnung tragen wird. Eine ausführliche Betrachtung des globalen *Kohlenstoffkreislaufs* im Zeitalter des Anthropozäns aus meereschemischer Perspektive findet sich bei Körtzinger (2010).

AUTOR:

Arne Körtzinger leitet am Kieler Leibniz Institut für Meereswissenschaften (IFM-GEOMAR) den Bereich Chemische Ozeanographie.

REFERENZEN

- Keeling, R., A. Körtzinger und N. Gruber (2010). Ocean deoxygenation in a warming world. *Annual Review of Marine Science* 2, 463-493.
- Körtzinger, A. (2010). Der globale Kohlenstoffkreislauf im Zeitalter des Anthropozäns – eine Betrachtung aus meereschemischer Perspektive. *Chemie in unserer Zeit* 44, 118-129.
- Riebesell, U., A. Körtzinger und A. Oschlies (2009). Sensitivities of marine carbon fluxes to ocean change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106, 20602-20609.
- Sabine, C.L., R.A. Feely, N. Gruber, R.M. Key, K. Lee, J.L. Bullister, R. Wanninkhof, C.S. Wong, D.W.R. Wallace, B. Tilbrook, F.J. Millero, T.-H. Peng, A. Kozyr, T. Ono und A.F. Rios (2004). The oceanic sink for anthropogenic CO_2 . *Science* 305, 367-371.
- Takahashi, T., S.C. Sutherland, C. Sweeney, A. Poisson, N. Metzl, B. Tilbrook, N. Bates, R. Wanninkhof, R.A. Feely, C. Sabine, J. Olafsson und Y. Nojiri (2002). Global sea-air CO_2 flux based on climatological surface ocean pCO_2 , and seasonal biological and temperature effects. *Deep-Sea Research II* 49, 1601-1622.
- Takahashi, T., S.C. Sutherland, R. Wanninkhof, C. Sweeney, R.A. Feely, D.W. Chipman, B. Hales, G. Friederich, F. Chavez, C. Sabine, A. Watson, D.C.E. Bakker, U. Schuster, N. Metzl, H. Yoshikawa-Inoue, M. Ishii, T. Midorikawa, Y. Nojiri, A. Körtzinger, T. Steinhoff, M. Hoppema, J. Olafsson, T.S. Arnarson, B. Tilbrook, T. Johannessen, A. Olsen, R. Bellerby, C.S. Wong, B. Delille, N.R. Bates und H.J.W. de Baar (2009). Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO_2 , and net sea-air CO_2 flux over the global oceans. *Deep-Sea Research II* 56, 554-577, doi:10.1016/j.dsr2.2008.12.009.
- Watson, A.J., U. Schuster, D.C.E. Bakker, N.R. Bates, A. Corbière, M. González-Dávila, T. Friedrich, J. Hauck, C. Heinze, T. Johannessen, A. Körtzinger, N. Metzl, J. Olafsson, A. Olsen, A. Oschlies, X.A. Padin, B. Pfeil, J.M. Santana-Casiano, T. Steinhoff, M. Telszewski, A.F. Rios, D.W.R. Wallace und R. Wanninkhof (2009). Tracking the variable North Atlantic sink for atmospheric CO_2 . *Science* 326, 1391-1393.

1.3 Die Bedeutung der Vegetation

Zusammenfassung

In der gegenwärtigen Diskussion um die Emission von Kohlendioxid und anderen Treibhausgasen wird die Rolle der Vegetation im Klimasystem allzu sehr vernachlässigt. Ohne Berücksichtigung einer dynamischen Vegetation und von Landnutzungsänderungen müssen Klimaprojektionen, insbesondere auf regionaler Skala, sehr unsicher bleiben. Als wichtiges Element im Klimasystem kann die Vegetation umgekehrt auch eine wichtige Rolle im Klimaschutz bei **Mitigations-** und **Adaptationsmaßnahmen** spielen.

Einführung

Nicht zuletzt seit der Veröffentlichung des 4. Assessment Reports des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2007) gelten durch den Menschen verursachte Kohlendioxid-Emissionen (gegenwärtig rund 8 Milliarden Tonnen Kohlenstoff pro Jahr) als einer der wichtigsten Treiber des Klimawandels. Bis zum Jahr 2100 soll – je nach Szenario – die atmosphärische Konzentration dieses Treibhausgases von heute knapp 400 ppm auf rund 500 bis 1200 ppm ansteigen, mit entsprechenden Konsequenzen für Klima und Meeresspiegel. So ist es nicht verwunderlich, dass sich weltweit und in der Bundesrepublik ein erheblicher Anteil der „Klimaschutzpolitik“ auf die **Mitigation**, also die Minimierung der Treibhausgasemissionen, insbesondere des Kohlendioxids, konzentriert. Auch das zur Vorbereitung des Kopenhagen-Gipfels erarbeitete Sondergutachten des „Wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung Globale Umweltverände-

rungen“ (WBGU) fokussiert vollständig auf das 2 Grad-Ziel und die sich daraus ableitbaren maximalen Emissionen von Treibhausgasen (Schellnhuber et al. 2009).

Vernachlässigt wird bei dieser auf die CO₂-Emission konzentrierte Diskussion, dass Kohlendioxid und weitere Treibhausgase nicht die einzigen Faktoren des durch den Menschen verursachten Klimawandels sind. Auch die Auswirkungen von Veränderungen der atmosphärischen Kohlendioxid-Konzentration auf das Klimageschehen sind bisher nicht voll verstanden. In diesem Beitrag soll daher die Rolle einer wichtigen Komponente des Klimasystems, nämlich der Vegetation, in dieser Diskussion um durch den Menschen verursachten Klimawandel und die Reduktion von Treibhausgasemissionen näher beleuchtet werden.

Die Vegetation im Klimasystem

Die Vegetation spielt im Klimasystem in der Tat eine wichtige, wenn auch bisher unterschätzte und nicht ausreichend verstandene Rolle. Sie beeinflusst sowohl Strahlungshaushalt als auch Stoffkreisläufe und Impulsaustausch zwischen Atmosphäre und Oberfläche. Im globalen Mittel beträgt die **Albedo**, also derjenige Anteil der ankommenden Sonnenstrahlung, der direkt an Oberflächen reflektiert wird, etwa 30 Prozent, doch variiert dieser Wert lokal mit der Art der Oberfläche. Gesteins-, Sand- oder Schneeflächen besitzen selbstverständlich eine viel höhere **Albedo** (bis zu 90 Prozent), während Wasserflächen wesentlich mehr Energie absorbieren können und daher eine vergleichsweise niedere

Albedo (je nach Einfallswinkel unter 10 Prozent) aufweisen. Laubwälder liegen mit einer **Albedo** von 15 bis 18 Prozent dabei durchaus in der Nähe von Wasserflächen. Auch für den Impulsaustausch zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre und damit für die oberflächennahen Windsysteme spielt die Landvegetation eine bedeutsame Rolle. So ist etwa die sogenannte **Rauhigkeitslänge** von Wäldern in der gleichen Größenordnung wie die von großen Städten.

Nicht weniger wichtig ist die Vegetation für die großen Stoffkreisläufe. Allein durch die **Photosynthese** der Landpflanzen werden jährlich etwa 120 Milliarden Tonnen Kohlenstoff aus der Atmosphäre entnommen (das entspricht etwa 20 Prozent des natürlichen atmosphärischen Kohlenstoffreservoirs) und in **organisches** Material umgewandelt. Im Vergleich dazu werden etwas geringere Mengen an Kohlenstoff durch die Atmung der Organismen der Atmosphäre wieder zugeführt, so dass die Erde betreffende **Biosphäre** gegenwärtig wohl als Netto-Senke für Kohlenstoff fungiert, in der das Element gespeichert werden kann. Ebenso bedeutsam ist die Vegetation für viele andere Stoffkreisläufe. Für den Wasserkreislauf gilt, dass in vielen Regionen 50 Prozent und mehr der regionalen Niederschläge aus der Abgabe von Wasserdampf durch die Spaltöffnungen der Landpflanzen stammen. Auch produziert die **Biosphäre** eine erhebliche Menge an weiteren **organischen** Substanzen, die in die Atmosphäre abgegeben werden und dort klimawirksam sind („volatile organic carbon“ – VOC), ohne dass wir deren Kreisläufe und Rolle im Klimasystem bisher kennen.

Auch wenn wir heute durchaus ein grundsätzliches Verständnis dieser wichtigsten Wechselwirkungsprozesse zwischen Biosphäre und Klima haben, ist deren Bedeutung für die Klimadynamik bisher kaum verstanden und entsprechend auch in den aktuellen Klimamodellen noch nicht integriert. Ausgewählte Beispiele mögen dies erläutern.

Klimawandel durch Vegetationswandel

Mehr und mehr Studien machen inzwischen deutlich, wie wichtig Landnutzungswandel und damit Vegetationsveränderungen für den aktuellen Klimawandel sind. Allein bei den durch den Menschen verursachten Kohlendioxidemissionen von rund 8 Milliarden Tonnen Kohlenstoff pro Jahr gehen rund 20 Prozent auf Landnutzungsänderungen zurück. Aber auch die anderen Effekte der Vegetation im Klimasystem spielen eine wichtige Rolle. So zeigt eine Klimamodellstudie, dass allein durch den Übergang von einer „potentiell natürlichen Vegetation“ zur real existierenden Vegetation in Europa sich die Sommer- und Winterniederschläge

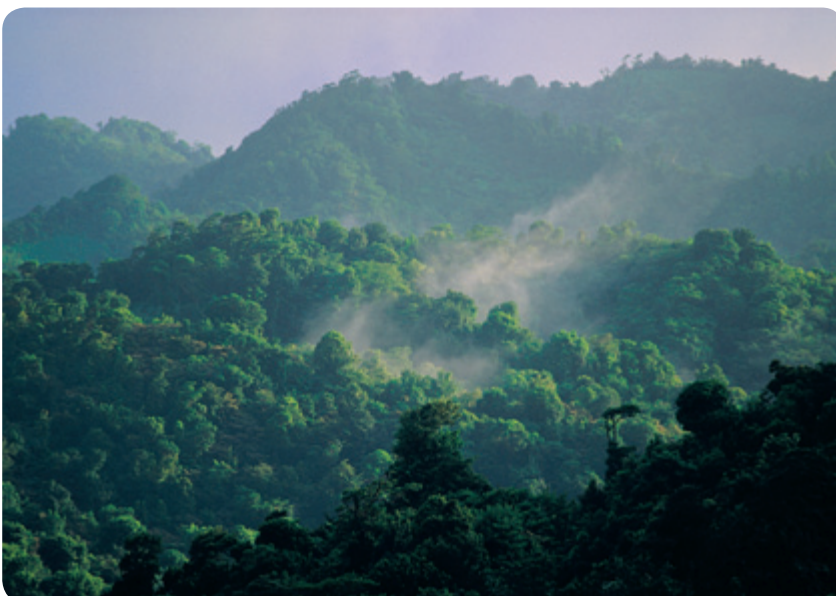
regional sehr unterschiedlich um bis zu 20 Prozent erhöht oder auch erniedrigt haben (Heck et al. 2001). Diese durch Landnutzungs- beziehungsweise Vegetationsänderungen erzeugten Klimaänderungen liegen damit durchaus in den Größenordnungen, die in den IPCC Szenarien als reine Folge von veränderten Treibhausgaskonzentrationen prognostiziert werden.

Ähnliche Studien wurden in unserer eigenen Arbeitsgruppe für Klimasystemzustände der erdgeschichtlichen Vergangenheit durchgeführt. (Micheels et al. 2007, 2009, Mosbrugger 2008). So waren vor 8 bis 10 Millionen Jahren die globalen Mitteltemperaturen um 3 bis 4 Grad höher als heute und auch die Niederschläge lagen insgesamt deutlich über den heutigen Werten. Entsprechend fehlten zu dieser Zeit die ausgedehnten Wüsten (etwa die Sahara), und Waldökosysteme waren deutlich weiter verbreitet als heute, insbesondere auch in den hohen Breiten. Über Modellexperimente konnte gezeigt werden, dass allein die veränderte Vegetation mit rund 25 Prozent mehr Wäldern zu einer globalen Erwärmung von rund einem Grad, regional (ins-

besondere in Sibirien) sogar zu einer Erwärmung von über 4 Grad geführt hat. Dabei treten auch deutliche Telekonnektionen auf, das heißt Veränderungen der Vegetation in einer Region können auch klimatische Veränderungen in anderen Regionen hervorrufen.

Dieses Phänomen wurde besonders deutlich bei den Niederschlägen. Durch die veränderte Vegetation mit rund 25 Prozent mehr Wäldern nahmen im Modellexperiment erwartungsgemäß insgesamt auch die Niederschläge zu, allerdings mit signifikanten regionalen Unterschieden und Telekonnektionen. So erhöhten sich im Modellexperiment durch die verstärkte Präsenz von Wäldern und Savannen die Niederschläge im Bereich von Nordafrika um mehr als 100 Millimeter pro Jahr, gleichzeitig nahmen aber im äquatorialen Atlantik die Verdunstung zu, im Nordatlantik dagegen die Niederschläge. Insgesamt führte also die veränderte Vegetation nicht nur zu einer Erhöhung der globalen Niederschläge mit starken regionalen Variationen, sondern induzierte ferner eine deutliche Erhöhung des latenten Wärmetransportes vom Äquator zu den Polen (das heißt ein Wärmetransport, der über den Verdunstungs- und Kondensationskreislauf des Wassers erfolgt). In ähnlicher Weise kann über Modellstudien gezeigt werden, dass die Entwicklung der Sahara ab etwa 5 Millionen Jahren vor heute weitreichende Konsequenzen für das gesamte Klimasystem nach sich gezogen hat.

Die Effekte von Vegetationsveränderungen auf das regionale und globale Klima (und selbst auf die Ozeane) sind also nicht zu vernachlässigen. Das betrifft insbesondere die Einflüsse der Vegetation auf den Strahlungshaushalt, auf den Kohlenstoff- und Wasserkreislauf (inklusive Bodenfeuchte und



Run-off). Wie kürzlich gezeigt wurde, gilt dies im übrigen auch für physiologische Reaktionen von Pflanzen auf veränderte Klimaverhältnisse und Kohlendioxidkonzentrationen. So steigt bei höheren CO₂-Konzentrationen die sogenannte „water use efficiency“ (Wassernutzungseffizienz) von Pflanzen: Der Wasserverlust der Pflanzen durch Transpiration pro assimiliertem CO₂-Molekül sinkt. In Modellstudien erhöhte allein dieser Effekt die Sensitivität des Klimasystems gegenüber einer Verdoppelung der CO₂-Konzentration von 2.8°C auf 3.2°C (Cao et al. 2010).

Realitätsnahe Klimamodelle sollten also nicht nur ein dynamisches Atmosphären-, Ozean- und Eismodell, sondern auch ein dynamisches Vegetations- bzw. Biosphärenmodell enthalten, das die komplexen Wechselwirkungen Biosphäre-Klimasystem adäquat abbildet – dieses existiert bisher noch nicht, doch wird daran intensiv gearbeitet. Das Fehlen eines komplexen dynamischen Vegetationsmodells mag teilweise auch erklären, warum es bisher noch nicht gelungen ist, extremes Treibhausklima der Erdgeschichte, in denen polares Eis weitgehend fehlt, realitätsnah zu modellieren (Yao et al. 2009).

AUTOR:

Volker Mosbrugger ist Generaldirektor der Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung in Frankfurt am Main.

Fazit

Alle bisherigen Studien zeigen, dass die Vegetation und damit Landnutzungsänderungen wichtige Komponenten im Klimasystem darstellen, die in ihrer Relevanz für Klimaveränderungen bisher weder umfassend verstanden noch adäquat in Klimamodellen berücksichtigt sind. Insbesondere im Hinblick auf Regionalisierungen und Aussagen zu Niederschlägen müssen daher Klimaprojektionen, die ohne ein adäquates dynamisches Vegetationsmodell erzeugt wurden, als unsicher gelten. Es sind verstärkte Anforderungen notwendig, derartige Vegetationsmodelle in Klimamodelle zu integrieren.

Die Bedeutung der Vegetation für das Klimageschehen macht aber ebenso deutlich, dass bei der Erstellung von Klimaprojektionen neben verschiedenen CO₂-Szenarien auch unterschiedliche Landnutzungsszenarien berücksichtigt werden müssen: Gerade auf regionaler Ebene kann - je nach Landnutzung – der globale Klimatrend entweder signifikant verstärkt oder aber auch abgeschwächt werden. Sind die Vegetation-Klima-Wechselwirkungen erst einmal umfassend quantitativ verstanden und modellierbar, dann

können Vegetation und Landnutzung gezielt für **Mitigations-** und **Adaptationsmaßnahmen** genutzt werden – ein Potential, das bisher noch kaum genutzt ist.

Diese Hinweise auf erhebliche Wissenslücken in unserem Verständnis des Klimasystems dürfen nicht missverstanden werden. Dass es einen wesentlich (wenn auch nicht ausschließlich) durch den Menschen verursachten Klimawandel gibt, muss als weitgehend gesichert angesehen werden. Die Aussage eines früheren Bundesumweltministers, die Wissenschaft habe inzwischen ihre Hausaufgaben gemacht, nun sei politisches Handeln gefragt, ist so aber sicher nicht richtig: Für mich steht außer Frage: es besteht großer **Forschungs- und Handlungsbedarf**. Ähnlich wie in der Medizin müssen unsicheres Wissen und unsichere Heilungschancen offen angesprochen und berücksichtigt werden, dürfen aber nicht zur Untätigkeit führen.

LITERATUR

CAO, L., BALA, G., CALDEIRA, K., NEMANI, R., BAN-WEISS, G. (2010): Importance of carbon dioxide physiological forcing to future climate change. - PNAS

HECK, P., D. LÜTHI, H. WERNLI, C. SCHÄR, 2001: Climate impacts of European-scale anthropogenic vegetation changes: A study with a regional climate model. *J. Geophys. Res. - Atmos.*, 106 (D8): 7817-7835.

MOSBRUGGER, V. (2008): Climate Change and Water Cycle – Some Lessons from the Geological Past, 3-13. - In: ZEREINI, F., HÖTZL, H. (Hsg.): Climatic Changes and Water Resources in the Middle East and North Africa. 552 S., Springer-Verlag.

MICHEELS, A., BRUCH, A.A., UHL, D., UTESCHER, T., MOSBRUGGER, V. (2007): A late Miocene climate model simulation with ECHAM4/ML and its quantitative validation with terrestrial proxy data. - *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 253, 251-270.

MICHEELS, A., ERONEN, J., MOSBRUGGER, V. (2009): The Late Miocene climate response to a modern Sahara desert. - *Global and Planetary Change* 67(3-4), 193-204.

Schellnhuber et al. 2009: Sondergutachten des WISSENSCHAFTLICHEN BEIRATS DER BUNDESREGIERUNG GLOBALE UMWELTVERÄNDERUNGEN: Kassensturz für den Weltklimavertrag. - Der Budgetansatz. Berlin 2009, ISBN 978-3-936191-26-4

YAO, Y.-F.; BERA, S.; FERGUSON, D.K.; MOSBRUGGER, V.; PAUDAYAL, K.N.; JIN, J.-H. AND LI, C.-S. (2009): Reconstruction of paleovegetation and paleoclimate in the Early and Middle Eocene, Hainan Island, China. *Climate Change* 92, 169-189.

1.4 Klimaveränderungen im historischen Kontext

Menschliches Verhalten und natürliche Ursachen verändern das Klima unserer Erde. Die vom Menschen verursachte Veränderung des Klimas ist vor allem auf die massive Freisetzung von Treibhausgasen wie Kohlendioxid (CO₂) und Aerosolen durch Verbrennung fossiler Rohstoffe zurückzuführen. Seit der industriellen Revolution ist der Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre erheblich angestiegen.

Veränderte Erdbahnparameter modifizieren die Sonneneinstrahlung und sind eine natürliche Ursache für den Klimawandel. Darüber hinaus variiert die Sonnenfleckenzahl, wie Astronomen

beobachten. Die Sonnenfleckenzahl ist ein Maß für die Sonnenaktivität und hat Einfluss auf die Strahlungsintensität der Sonne. Auch Vulkanausbrüche mit ihren Staubemissionen können die am Erdboden ankommende Sonneneinstrahlung verringern. Veränderungen des Klimas durch diese Vorgänge werden als natürlich verursachter Klimawandel bezeichnet.

Proxydaten sind indirekte Klimaanzeiger oder Klimazeugen. Unser Klima in der Vergangenheit kann aus der Kenntnis dieser Daten gewonnen werden. Wissenschaftler können mithilfe der Proxydaten die mittlere Lufttemperatur

oder den Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre über mehrere Millionen Jahre zurückverfolgen, indem sie beispielsweise Seesedimente oder Eisbohrkerne auswerten. Für die letzten etwa 1 Millionen Jahre ist ein periodischer Wechsel zwischen einer etwa 80.000 Jahre dauernden Eiszeit und einer etwa 20.000 Jahre dauernden Warmzeit nachgewiesen.

Seit etwas über 100 Jahren liegen genauere Trends der globalen Lufttemperatur vor. Netzwerke mit Messinstrumenten bauten die Meteorologen zu dieser Zeit auf. Inzwischen wissen wir, dass die Lufttemperatur im glo-

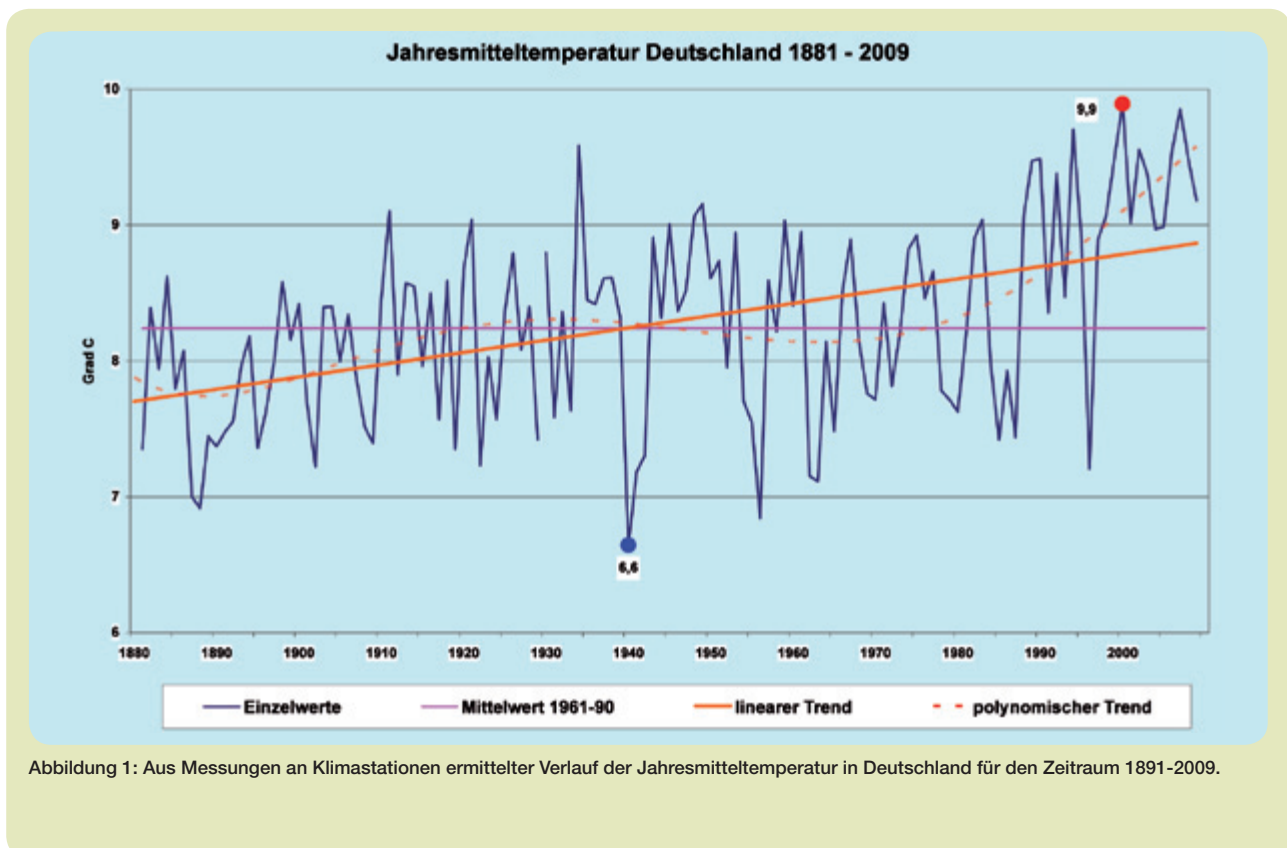


Abbildung 1: Aus Messungen an Klimastationen ermittelter Verlauf der Jahresmitteltemperatur in Deutschland für den Zeitraum 1891-2009.

balen Mittel zwischen 1906 und 2005 um 0,74 Grad Celsius zunahm. In Deutschland beobachteten wir einen Anstieg der mittleren Temperatur um 1,0 Grad Celsius in diesem Zeitraum. Die Messungen belegen, dass hierbei der mittlere Temperaturanstieg seit 1980 besonders stark ist. Ein Rückgang der Schneebedeckung sowie ein früherer Vegetationsbeginn begleiten diese Entwicklung. Der Meeresspiegel ist im vergangenen Jahrhundert um etwa 17 Zentimeter angestiegen, weil das Festlandeis schmilzt und das Meerwasservolumen sich bei der Erwärmung ausdehnt.

Klimamodelle, Emissions-szenarien und Klimaprojektionen

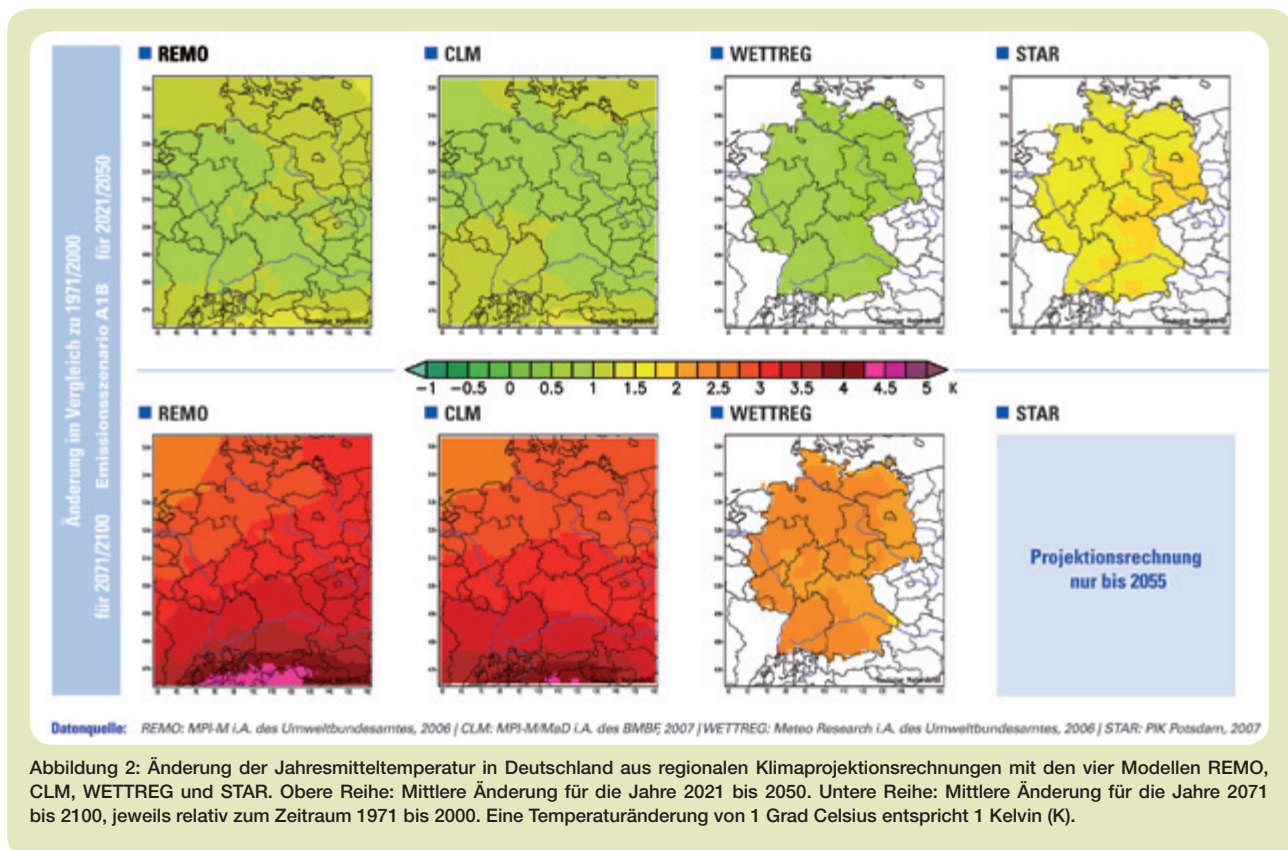
Mit computerbasierten Klimamodellen können Wissenschaftler Veränderungen des Klimas besser verstehen. Auch

Abschätzungen des zukünftig zu erwartenden Klimas sind so möglich. Für verschiedene Fragestellungen kommen unterschiedliche Klimamodelle zum Einsatz. Sie unterscheiden sich beispielsweise bezüglich der Größe des Simulationsgebietes, der räumlichen Auflösung des simulierten Klimas und auch im Detaillierungsgrad der simulierten Klimaprozesse. Für hoch auflösende Simulationen des Klimas über einen Zeitraum von mehreren hundert Jahren benötigen die Wissenschaftler besonders leistungsfähige Computer.

Zur Erforschung legen die Klimamodellierer ein dreidimensionales Gitternetz über das betrachtete Gebiet. Prognosegleichungen berechnen Änderungen des Klimas in jeder Gitterzelle. Die klimarelevanten Prozesse beeinflussen sich über große Entfernungen unserer Erde. Mögliche Klimaänderungen kön-

nen daher nur mit globalen Modellen vorhergesagt werden. Die horizontale Auflösung dieser Modelle beträgt derzeit 100 bis 200 km. Für die Untersuchung einer Region wie Deutschland ist dies ungenügend. Daher werden zusätzlich regionale Klimamodelle eingesetzt, die das Klima nur für eine bestimmte Region, zum Beispiel Europa, simulieren.

Die Auflösung von Regionalmodellen ist mit etwa 10 bis 20 Kilometer bedeutend besser. Für die Regionalmodell-simulationen werden die Ergebnisse der Globalmodelle als Eingangsdaten genutzt. Regionalmodelle können auch aus einzelnen kleineren Gitterzellen bestehen und in ihrer Funktion den globalen Klimamodellen ähneln. Darüber hinaus gibt es auch statistische Methoden zur regionalen Klimamodellierung. Aus den an Klimastationen gemessene-



nen Klimawerten der Vergangenheit werden hierbei Prognosen für die Zukunft erstellt.

Für Klimasimulationen werden den Klimamodellen mögliche zukünftige Treibhausgas- und Aerosolentwicklungen vorgegeben. Jedoch ist eine Abschätzung unserer Emissionen für die Zukunft schwierig. Es gilt die Bevölkerungsentwicklung, die Wirtschaftstrends und die Umsetzung von emissionsmindernden Techniken sowie Klimaschutzmaßnahmen zu prognostizieren.

Für Klimamodellrechnungen werden daher vom Weltklimarat (IPCC) verschiedene zukünftig mögliche Emissionsverläufe zur Verfügung gestellt, die Emissionsszenarien genannt werden. Die Klimasimulation für ein vorgegebenes Emissionsszenario wird Klimaprojektion genannt. Das heißt, wenn die tatsächlichen Emissionen gemäß dem Szenario verlaufen, gibt das Klimamodell eine Vorhersage über das Klima in der Zukunft.

Mit Unsicherheiten sind aber alle Klimasimulationen belegt. Sie stellen klimarelevante Prozesse nur vereinfacht dar. Diese Unsicherheiten müssen von Wissenschaftlern eingeschätzt werden können. Daher führen sie Klimasimulationen mit unterschiedlichen Modellen durch, die ein Ensemble von Klimaprojektionen bilden.

Als Ergebnisbeispiel eines solchen Ensembles zeigt die Abbildung 2 mögliche Änderungen der Jahresmitteltemperatur in Deutschland für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts. Die Daten wurden mit vier verschiedenen Regionalmodellen (REMO, CLM, WETTREG und STAR) berechnet. Als Eingangsdaten dienten das Emissionsszenario A1B des Weltklimarates und globale Klimasimulationen mit dem Modell

ECHAM5. Das Szenario A1B geht von einer moderaten Emissionsentwicklung der Treibhausgase aus.

Erwarteter Klimawandel und seine Folgen

Für Deutschland berechnen die vier in der Abbildung gezeigten Regionalmodelle bis zum Jahre 2050 eine Zunahme der Jahresmitteltemperatur zwischen 0,5 und 2,0 Grad Celsius. Bis zum Jahr 2100 müssen wir für Deutschland eine Erwärmung um etwa 2,0 bis 4,0 Grad Celsius befürchten.

Im Winter werden die Niederschläge zunehmen, und die Gefahr von Überflutungen steigt. Für den Sommer berechnen die Klimamodelle eine Abnahme der Niederschlagsmenge. In zukünftigen Sommern könnten somit auch längere Trockenperioden auftreten. Ernteverluste, Waldbrandgefahr, Unschiffbarkeit von Binnenwasserstraßen oder Probleme für die Wasserkühlung von Kraftwerken sind mögliche Auswirkungen

Auch die Gesundheit der Menschen kann durch die Klimaveränderungen

leiden, weil eine Zunahme der Tage mit Hitzebelastung möglich ist. Bis zur Mitte des Jahrhunderts sind nach den Modellrechnungen beispielsweise im Rheinland und in Südwestdeutschland zusätzlich zwischen 3 und 15 Tage mit Höchsttemperaturen über 30 Grad Celsius zu erwarten. Bis zum Ende des Jahrhunderts berechnen die Modelle in Süddeutschland verbreitet zwischen 12 und 30 zusätzliche Tage mit Höchsttemperaturen über 30°C. Die Zunahme heißer Tage kann in den Städten durch die starke Oberflächenversiegelung und die schlechte Durchlüftung noch höher ausfallen. Gerade hier leben viele Menschen. Überdies erwarten Klimawissenschaftler häufigere und stärkere Sommergewitter mit einer höheren Gefahr von Starkniederschlägen, Blitzschlägen und Gewitterböen. Winterstürme könnten nach derzeitigem Kenntnisstand seltener, aber intensiver werden. Da sich auch die typischen Zugbahnen von Winterstürmen wahrscheinlich ändern, ist das Schadenspotenzial in nicht vorbereiteten Regionen hoch.

Unser Ökosystem kann durch höhere Durchschnittstemperaturen und eine



jahreszeitliche Verschiebung des Niederschlags beeinflusst werden. Dabei befürchten Biologen, dass hitzeempfindliche Pflanzen und Tiere vom Aussterben bedroht sein werden – zumindest aber eine Verdrängung durch wärmeliebende Arten ist möglich. Auch Schädlingsbefall oder Krankheiten von Pflanzen, Tieren und Menschen, die bisher nur in wärmeren Regionen verbreitet sind, könnten durch den Klimawandel zukünftig in Deutschland auftreten. Dies erfordert beispielsweise im medizinischen Bereich andere Impfstoffe oder in der Land- und Forstwirtschaft die Nutzung oder auch Züchtung geeigneter Pflanzen- bzw. Baumarten.

Der Klimawandel wird in der Wirtschaft zu vielerlei Veränderungen mit Chancen und Risiken führen. So wird beispielsweise der Heizbedarf nach Angaben der Modellrechnungen sinken. Der Energiebedarf für Kühlung im Sommer steigt aber parallel an. Schäden an uns und unserer Umwelt können durch häufigere und intensivere Extremwetterereignisse zunehmen. Die Versicherungswirtschaft wird hierauf mit höheren Versicherungsbeiträgen reagieren. Auch Kündigungen von Versicherungspolicen sind im Bereich des Möglichen.

Klimapolitik

Das Ausmaß des zukünftigen Klimawandels kann durch Klimaschutz verringert werden. Hierbei steht im Mittelpunkt, weniger Treibhausgase wie Kohlendioxid zu emittieren. Dies kann erreicht werden, indem fossile Rohstoffe als Energieträger substituiert werden und der Energieverbrauch reduziert wird. Kohlendioxid kann aber auch aus der Atmosphäre entfernt werden. Hierzu können wir Kohlendioxid durch geotechnische Verfahren unterirdisch speichern oder auch neue Wälder anpflanzen.

Für einen erfolgreichen Klimaschutz müssen alle Nationen kooperieren. Hohe Treibhausgasemissionen pro Einwohner hängen von der Geographie, Wirtschaft und Infrastruktur des jeweils betrachteten Landes ab. Dabei sind die Ursachen vielfältig: hoher Industrialisierungsgrad, Agrarwirtschaft mit Viehzucht, Reisanbau und Brandrodung sowie auch hoher Heiz- oder Kühlbedarf führen zu hohen Treibhausgasemissionen.

Den Auftakt für eine ganze Reihe von internationalen Abkommen bildete die UN-Konferenz von Rio de Janeiro im Juni 1992. Im Abschlussdokument einigte sich die Weltgemeinschaft auf eine Klimarahmenkonvention zur Vermeidung gefährlicher Eingriffe ins Klimasystem. Diese verabschiedeten die Vertreter der Nationen als völkerrechtlich bindend. Inzwischen wurden weitere wichtige internationale Abkommen zum Klimaschutz vereinbart. Ein besonderer Meilenstein ist das im Dezember 1997 unterzeichnete Kyoto-Protokoll. Viele Länder verpflichteten sich zu einer freiwilligen Reduktion ihrer Treibhausgasemissionen. Darüber hinaus wurde der Handel mit Emissionsrechten beschlossen. Damit wollen die Verantwortlichen Maßnahmen fördern, die Treibhausgasemissionen reduzieren. Zur Umsetzung wird vom Staat an alle am Emissionshandel teilnehmenden Unternehmen pro Jahr eine vorher festgelegte Menge an Emissionszertifikaten ausgegeben oder versteigert. Die Unternehmen bekommen dabei weniger Zertifikate zugeteilt, als sie für den laufenden Betrieb ohne Modernisierungsmaßnahmen benötigen. Man hofft, dass Unternehmen in energieeffizientere Produktionsverfahren investieren, um den sonst notwendigen Zukauf von Emissionsrechten zu vermeiden.

Klimaschutz wird in der Literatur auch als Abschwächung des Klimawandels bezeichnet. Experten erwarten nämlich trotz erfolgreicher Schutzmaßnahmen eine weitere Zunahme der Treibhausgase in unserer Atmosphäre. Zur Vermeidung negativer Folgen des Klimawandels ist daher auch die Anpassung an den Klimawandel notwendig.

Beispiele zur Anpassung an den Klimawandel sind verbesserter Küstenschutz, klimagerechter Städtebau oder die Entwicklung wasser sparender Anbaumethoden in der Landwirtschaft. Die Bundesregierung hat im Dezember 2008 die deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel verabschiedet, um negative Folgen des Klimawandels in Deutschland zu verringern. Die Umsetzung der Strategie wird umfangreiche Investitionen erfordern. Doch spätestens seit der Publikation des Stern-Reports im Jahr 2007 ist klar, dass nach aller Voraussicht die Kosten der negativen Folgen des Klimawandels so hoch sein werden, dass gezielte Anpassungsmaßnahmen auch aus wirtschaftlicher Sicht dringend geboten sind.

AUTOR:

Meinolf Koßmann ist für den Deutschen Wetterdienst in Offenbach am Main im Bereich Klima- und Umweltberatung tätig.

2.1 Chemische Eigenschaften

Das Kohlendioxidmolekül besitzt im Zentrum ein Kohlenstoffatom. Aus Kohlenstoffatomketten können Kraft- und Chemierohstoffe aufgebaut werden. Daher müssen wir Kohlendioxid als potentielle Quelle für Kohlenstoffatome betrachten.

Bei der Verbrennung fossiler Energieträger wird Energie und Kohlendioxid freigesetzt. Könnte man diesen Prozess nicht umkehren? Bei der **Reduktion** genannten Kraftstoffherstellung aus Kohlendioxid muss mehr Energie aufgewendet werden, als bei der Verbrennung frei wurde. Diese Information liefert die **Thermodynamik**, ein Teilgebiet der Physikalischen Chemie. Die notwendige Energie zur Herstellung von Kraft- und Chemierohstoffen aus CO_2 könnte aus regenerativen Quellen zur Verfügung gestellt werden. Auch ein Prozess unter Ausnutzung der Energie des Sonnenlichtes ist eine Option, die sogenannte Photokatalyse, die die Chemiker bedenken. Die Natur kennt diese Reaktion bereits. Sie wird **Photosynthese** genannt und produziert mithilfe von Sonnenlicht in Pflanzen aus Kohlendioxid und Wasser Zucker und Sauerstoff. Alternativ kann die Kraft- und Rohstoffgewinnung auch durch die Umsetzung des Kohlendioxids mit Wasserstoff erfolgen. Aber auch hier gilt: der Wasserstoff muss zuvor auf einem regenerativen oder kohlendioxidfreien Weg hergestellt worden sein. Bei Missachtung dieser Bedingung führt die stoffliche Nutzung zu einer Zunahme der CO_2 -Emissionen.

Eine Betrachtung der Mengenverhältnisse zeigt auch: Selbst unter Berücksichtigung von Produktionsverfahren mit einem großen Bedarf an Kohlenstoffatomen wie bei der Herstellung

von Kunststoffen sind die Mengen zu klein, als dass hier bei CO_2 Einsatz in der Synthese eine erhebliche Reduktion des Kohlendioxidgehaltes unserer Atmosphäre zu erwarten wäre. Kohlendioxid als Chemierohstoff kann daher auch unter idealen Bedingungen die weltweit anfallenden Emissionen nur um wenige Prozentpunkte senken.

Bei der Synthese von Kraftstoffen aus CO_2 verbessert sich die Situation. Für die mobile Anwendung diskutieren Experten hier den Faktor 10 bezogen auf das Potenzial der Synthese sonstiger Chemieprodukte.

Die Chemiker sind auf der Suche nach Strategien, die es ermöglichen Kohlendioxid als Rohstoff zu nutzen. Kohlendioxid ist aber ein energiereicher Stoff, der nicht gern mit anderen Stoffen reagiert. Eine Möglichkeit wäre es, ihn mit energiereichen Chemikalien reagieren zu lassen. Alkenoxide sind solche Stoffe, die mit Kohlendioxid reagieren. Bei der Reaktion entstehen Karbonate, die wertvolle Bausteine für weitere Produkte der Chemieindustrie sein können. Aber auch Reaktionen mit reduzierenden Stoffen wie Wasserstoff, Methan oder Kohlenstoff werden geprüft.

Kohlendioxid reagiert äußerst langsam. Daher untersuchen Chemiker geeignete **Katalysatoren**. Ähnlich wie der **Katalysator** im Auto die Reini-

gung des Abgases fördert, sollen sie die Umwandlung des Kohlendioxids beschleunigen. Eine ganze Reihe von großtechnischen Reaktionen wird derzeit untersucht, mit dem Ziel, Kohlendioxid in Produkte der Chemieindustrie umzuwandeln.

Derzeitige technische Nutzung von CO_2

Nur ein verschwindender Anteil des anthropogen erzeugten Kohlendioxids wird bislang genutzt. In weitgehend reiner Form fällt es bei der Wasserstoffherzeugung, einigen Oxidationsverfahren und bei der alkoholischen Gärung an. Davon wurden 2002 rund 20 Millionen Tonnen als Industriegas verwendet. Wichtige Anwendungsgebiete finden sich bei der Erdölförderung, der Getränkeindustrie und bei der Verwendung als Reinigungs- oder Extraktionsmittel.

Chemisch wird Kohlendioxid in großem Maßstab durch Umsetzung mit Ammoniak genutzt. Rund 107 Millionen Tonnen wurden hierfür 2008 eingesetzt. Der so hergestellte **Harnstoff** wird hauptsächlich als Düngemittel verwendet. Durch Umsetzung mit Formaldehyd stellt man Kondensationsharze her, die beispielsweise zur Verleimung von Holz in Spanplatten oder Laminaten dienen.

Etwa 2 Millionen Tonnen Kohlendioxid werden unter anderem für die Herstel-

lung von Methanol eingesetzt. Methanol wird als Kraftstoffbeimischung verwendet. Ebenso werden aus Methanol wichtige Ausgangskemikalien für industrielle Prozesse gewonnen. Daneben gibt es noch weitere chemische Verfahren auf Basis von CO₂, allerdings mit deutlich geringeren Einsatzmengen. Zyklische Karbonate und Salicylsäure sind Spezialchemikalien und werden in der Größenordnung von 65 000 Tonnen pro Jahr aus Kohlendioxid hergestellt. Weitere Nutzungsmöglichkeiten werden gegenwärtig untersucht, stecken aber meist noch in den Kinderschuhen.

AUTOREN:

Michael Röper ist in der BASF in Ludwigshafen zuständig für Science Relations und Innovation Management.

Walter Leitner ist Professor für Technische Chemie und Petrochemie an der RWTH Aachen.

Arno Behr ist Professor für Technische Chemie und Chemische Prozessentwicklung an der TU Dortmund.

Martina Peters ist Forschungsmitarbeiterin bei Bayer Technology Services in Leverkusen.

2.2 Physikalische Eigenschaften

Eigenschaften und Herstellung

Das Wort „Kohlensäure“ ist eine Übersetzung des französischen Wortes *acide carbonique*. Dieser Name stammt von dem französischen Physiker Lavoisier. Er entdeckte 1780, dass Kohlendioxid (CO_2) aus einem Teil Kohlenstoff und zwei Teilen Sauerstoff besteht (Krinninger, 1996). Kohlendioxid ist unter Atmosphärenbedingungen ein farbloses, geruchs- und geschmacksneutrales, nicht brennbares Gas (Tabelle 1). Mit Wasser verbindet es sich zu Kohlensäure (H_2CO_3), die nicht isoliert existiert.

Kohlendioxid zählt zu den wichtigsten Substanzen unseres Lebens und der

Umwelt. Mit einer mittleren Konzentration von 0,038 Volumenprozenten ist Kohlendioxid ein natürlicher Bestandteil der Luft. Es entsteht durch vollständige *Oxidation* von Kohlenstoff. Dabei ist Kohlendioxid das wesentliche Abgas des Verbrennungsprozesses.

Menschen und Tiere produzieren in ihren Stoffwechseln Kohlendioxid und atmen das Gas aus. Auch Brauereien setzen Kohlendioxid als Produkt der alkoholischen Gärung frei. So entstehen pro Hektoliter gebrautes Bier 3,7 Kilogramm des Treibhausgases. Bezogen auf die Alkoholmenge sind dies ca. 1,35 Kilogramm Kohlensäure pro Kilogramm Alkohol.

Eine existenzielle Reaktion für das Leben auf unserer Erde ist die *Photosynthese*. Grüne Pflanzen wandeln bei dieser Reaktion Kohlendioxid und Wasser mithilfe des Sonnenlichtes in *Kohlenhydrate* und Sauerstoff um (Forst, 1993; Römpf, 2010).

Unsere Umwelt dient als gewaltiger Kohlendioxidsspeicher. So befinden sich in der irdischen Lufthülle ungefähr 2300 Milliarden Tonnen Kohlendioxid. Etwa die 50-fache Menge ist in den Weltmeeren enthalten. Ein großer Teil dieses Kohlendioxids wandelt sich in Karbonate um, die dann als Gestein vorliegen. Das Gleichgewicht des natürlichen Kohlendioxid-austausches zwischen den Ozeanen und der Luft, Assimilation und Dissimilation, und der freigesetzten Menge aus Vulkanen und Verwitterung der Urgesteine, wird vor allem durch die Verbrennung von Kohle, Öl und Erdgas gestört (Römpf, 2010).

Die Eigenschaften von Kohlendioxid sind zunächst nicht Besorgnis erregend. Als Gas ist es, wie schon erwähnt, farblos, geruchs- und geschmacksneutral. Wir können es mit unseren menschlichen Sinnesorganen nicht wahrnehmen. Auch gilt es als ungiftig und ist kein Gefahrstoff im Sinne der Gefahrstoffverordnung. Bei Konzentrationen von 3 bis 5 Volumenprozent in der Atemluft führt Kohlendioxid jedoch zu Kopfschmerzen, Atemstörungen und Unwohlsein. Die schädliche physiologische Wirkung derartiger CO_2 -Konzentrationen entsteht nicht allein durch Sauerstoffmangel, sondern auch durch direkte Wirkung des Kohlendioxids. Aus diesem Grund ist für Kohlendioxid ein Arbeitsplatzgrenzwert

Tabelle 1: Wichtige Daten des CO_2	
Chemische Formel	CO_2 (Atombindung $\text{O}=\text{C}=\text{O}$)
Namen	Kohlendioxid Kohlenstoffdioxid Kohlenstoff(IV)-oxid Dioxidkohlenstoff
CAS – Nummer	124-38-9
Molekulargewicht	44,011 kg/kmol
Molares Normvolumen	22,263 m^3/kmol
Gaskonstante [$R \text{ CO}_2$]	0,1889 kJ/(kg*K)
kritischer Punkt	31,03°C bei 73,83 bar
kritische Dichte	466 kg/ m^3
Tripelpunkt	-56,57 °C bei 5,18 bar,
Relative Dichte bei 15°C und 1bar bezogen auf trockene Luft	1,528 kg/ m^3
Brandverhalten	nicht brennbar, bekannt als Feuerlöschmittel
Farbe im Gaszustand	Farblos
Geruch	Geruchlos
Geschmack	Neutral
MAK-Wert /AGW-Wert	0,5 % _{Vol}
(maximale Arbeitskonzentration)	5000 ml/ m^3

(AGW), anders formuliert eine maximal zulässige Arbeitsplatzkonzentration (MAK-Wert) von 0,5 Volumenprozent, festgelegt (Linde, 2010).

Thermodynamische Daten

Kohlendioxid kann in Abhängigkeit von Druck und Temperatur in verschiedenen Aggregatzuständen (gasförmig, flüssig, fest) vorliegen. In Abbildung 1 ist ein p-v-T-Diagramm eines Reinstoffs dargestellt. p-v-T-Diagramme sind eine Darstellungsform für Aggregatzustandsänderungen von Stoffen in Abhängigkeit von Druck (p), spezifischem Volumen (v) und Temperatur (T). Dabei stellen sie in dreidimensionaler Darstellung die Phasengrenzen eines Stoffes oder Stoffgemisches dar. Die in dem p-v-T-Diagramm eingezeichneten Linien symbolisieren Zustandsänderungen zwischen verschiedenen

Aggregatzuständen, zum Beispiel die Verdampfung einer Flüssigkeit bei konstantem Druck (isobar) mit der Phasenumwandlung von der Flüssigkeit zu Gas durch das Nassdampfgebiet (von Punkt D nach Punkt E). Auch ohne Durchlaufen des Zweiphasengebietes ist es möglich, vom flüssigen in den gasförmigen Zustand zu gelangen. Dazu müssen Druck und Temperatur auf Werte oberhalb des so genannten kritischen Punktes eingestellt werden (Punkt L: flüssig \Rightarrow Punkt M: gasförmig).

Für praktische Zwecke sind zweidimensionale Projektionen des Diagramms besser geeignet. Beispielhaft ist in Abbildung 2 ein Druck-Temperaturdiagramm gezeigt.

Der Tripeldruck (Druck am Tripelpunkt) von Kohlendioxid liegt oberhalb des Atmosphärendrucks von 0,1013 MPa.

Damit ist es vergleichsweise einfach möglich durch Entspannung auf Atmosphärendruck festes Kohlendioxid zu erzeugen, das als Trockeneis bezeichnet wird.

Erfolgt die Entspannung in einer Düse mit nachgeschaltetem Schneerohr, werden feinteilige Partikel erhalten. Dieser Trockenschnee kann in speziellen Verdichtern zu Blöcken oder Tabletten geformt werden. Bei Wärmezufuhr sublimiert das feste Kohlendioxid. Dies erfolgt unter Atmosphärendruck bei einer konstanten Temperatur von ungefähr minus 78 Grad Celsius. Für die Berechnung der Referenzdaten des Kohlendioxids hat sich die Gleichung von Span und Wagner durchgesetzt (Span 1993; Wagner 2006).

Wissenschaftler und Techniker interessieren sich für diese Eigenschaften des

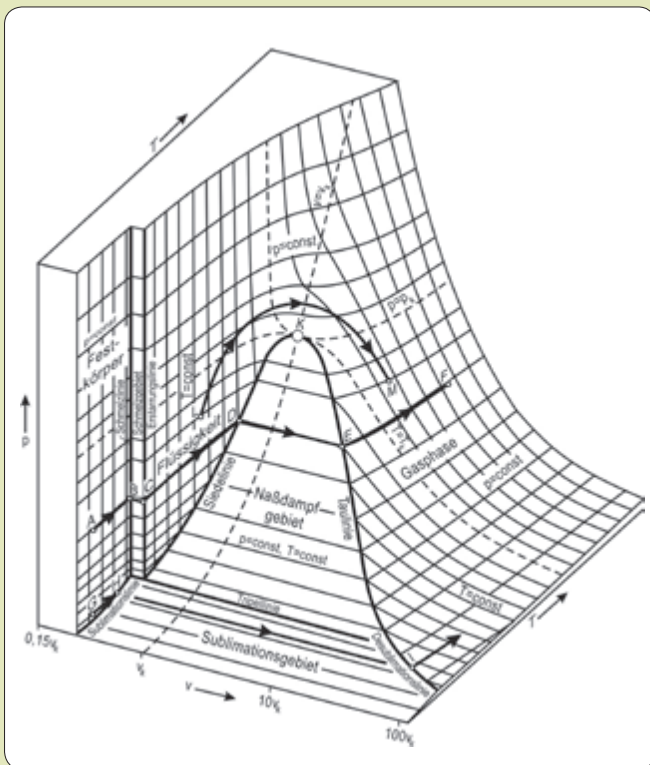


Abbildung 1: p-v-T-Diagramm eines Reinstoffs (Baehr, 1992)

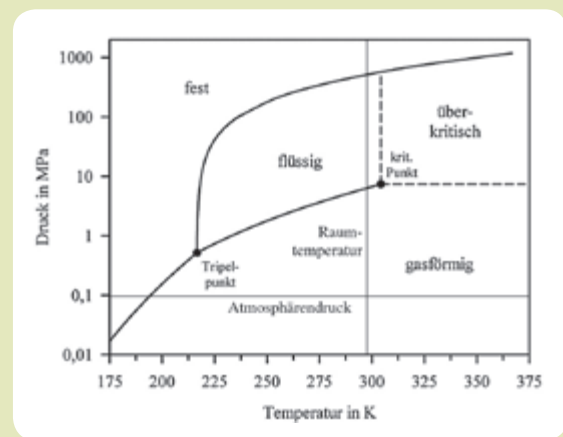


Abbildung 2: Phasendiagramm des CO₂ (Krininger, 1996)

Kohlendioxid und versuchen, praktische Anwendungen zu finden. Hierfür sind nicht nur die Eigenschaften des reinen Kohlendioxids von Interesse. Vielmehr bedarf es vertiefter Kenntnisse der Besonderheit von Mehrkomponentensystemen in Gegenwart von Kohlendioxid. Beispielhaft sei die Löslichkeit in wässrigen Systemen genannt. Für die Verwendung des Kohlendioxids in der Getränkeindustrie, zur Neutralisation sowie für den Transport in Pipelines und der Speicherung des Gases in Wasser ist die Kenntnis der Löslichkeit als Funktion von Druck und Temperatur unerlässlich.

Bei niedrigen Drücken steigt die Löslichkeit mit zunehmendem Druck und abnehmender Temperatur (Abbildung 3). Bei höheren Drücken (Abbildung 4) durchläuft die CO_2 -Löslichkeit in Wasser ein Minimum. Beispielsweise steigt bei einem Druck von 304 bar bei Temperaturen jenseits von 90 Grad Celsius die Löslichkeit mit steigender Temperatur. Dabei ist in diesen Diagrammen nicht berücksichtigt, dass Kohlendioxid bei niedrigen Temperaturen und moderaten Drücken von einigen -zig bar mit Wasser Hydrate bildet. Wassermoleküle lagern sich hierzu an das Kohlendioxidmolekül an und bilden einen Feststoff. Gerade im Zusammenhang mit der Förderung von Kohlendioxid in Pipelines und der Sequestrierung ist die Kenntnis der Hydratbildung und Stabilität von entscheidender Bedeutung.

Diese Beispiele zeigen anschaulich, dass sich das aus dem Niederdruckbereich bekannte Verhalten nicht immer auf den Hochdruckbereich übertragen lässt. Experimentelle Daten im Hochdruckbereich sind daher unerlässlich. Hier werden große Anstrengungen unternommen. Beispielsweise wurden in den Jahren 2000 bis 2004 über

700 Artikel zu Stoffdaten publiziert (Dohrn, 2004). Von 2005 bis 2008 stieg die Zahl der Artikel auf fast 800 an. Die Übersicht hierzu wurde von Fonseca, Peper und Dohrn erstellt.

Anwendungsgebiete

Da jeder Aggregatzustand des Kohlendioxids unterschiedliche Eigenschaften hat, ergeben sich überaus vielfältige Anwendungsgebiete.

Festes Kohlendioxid („Trockeneis“) hat eine hohe Kühlkapazität und wird zu unterschiedlichen Kühlzwecken, zum Beispiel zur Konservierung von Nahrungsmitteln, verwendet. Ein weiteres Anwendungsgebiet für Trockeneis in Form von Pellets oder Partikelstrahlen ist das Reinigen von Oberflächen mit dem so genannten Cold-Jet-Verfahren, das z. B. in der Automobil- und Flugzeugindustrie angewandt wird. Damit können weiche Schichten (Öle, Fette, Schmierstoffe), stark haftende Beschichtungen (Lacke, Wachse, Harze, Klebstoffe) und Schmutzschichten von festen Oberflächen schonend entfernt werden. Vorteilhaft ist dabei die Versprödung der abzutragenden Schichten aufgrund der niedrigen Temperatur des Trockeneises.

Gasförmiges Kohlendioxid besitzt eine gute Löslichkeit in Wasser. Bei 20 Grad Celsius und Atmosphärendruck löst Wasser fast 90 Prozent des eigenen Volumens und erhält dabei einen leicht säuerlichen Geschmack (Abbildung 3). Das Verfahren nutzt die Lebensmittelindustrie beispielsweise zur Karbonisierung von Getränken wie Mineralwasser und Bier. In der Verfahrens- und Energietechnik wird die gute Löslichkeit in Wasser zum Herauswaschen von Kohlendioxid aus Gasmischungen eingesetzt. Gasförmiges Kohlendioxid dient zum Abdecken und pneumatischen

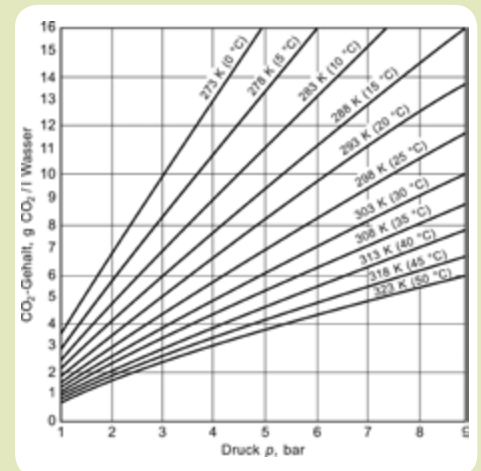


Abbildung 3: Löslichkeit von Kohlendioxid in Wasser bei niedrigen Drücken (Krininger, 1996)

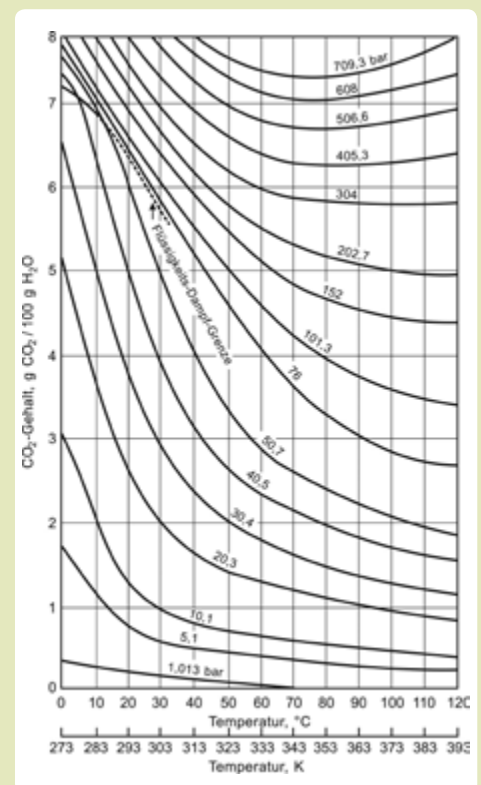


Abbildung 4: Löslichkeit von Kohlendioxid in Wasser bei hohen Drücken (Fachverband Kohlensäure-Industrie e.V., 1997)

Fördern von explosions- oder brandgefährdeten Siloschüttgütern, zur Wachstumsförderung in Gewächshäusern, als bakteriostatisches Mittel und Schutzgas bei der Verpackung von Lebensmitteln sowie zur Konservierung bei der Lagerung von Obst, Gemüse und Getreide. Die Schutzwirkung wird genutzt, um die Beteiligung von Fremdstoffen an chemischen Reaktionen zu vermeiden. Eine weitere praktische Anwendung ist der Aktivierungszusatz beim Schweißen. Kohlendioxid wird zur Brandbekämpfung genutzt, da es Sauerstoff verdrängende Eigenschaften besitzt. Vor allem kommt es in Handfeuerlöschern und automatischen Löschanlagen sowie in CO₂-Löschern zum Einsatz. Zu beachten ist hierbei, dass es beim Versprühen von CO₂ und der Bildung von Trockenschnee zu elektrostatischen Aufladungen kommt. Hier sind Vorbeugungs- und Gegenmaßnahmen unerlässlich. Kohlendioxid wird als Treibgas in Spraydosen und Treib- und Aufschäummitteln in der Kunststoffverarbeitung angewendet. Laser auf Basis von CO₂, deren Strahlung im infraroten Wellenlängenbereich liegt, kommen in der Metallverarbeitung sowie in der Medizintechnik zum Einsatz. CO₂-Injektionen werden in der Kältechirurgie gegen arterielle Verschlusskrankheiten und in natürlichen und künstlichen Bädern gegen Herz- und Kreislaufstörungen verwendet. Als saures Gas ist es zur Neutralisation alkalischer Abwässer, Aufhärtung von Trinkwasser und in der Wasserbehandlung im Einsatz.

Im **flüssigen Zustand** wird **Kohlendioxid** als Kältemittel unter der Bezeichnung R744 in Fahrzeug- und stationären Klimaanlageanlagen, bei industrieller Kältetechnik, Supermarkt- und Transportkühlung sowie in Getränkeautomaten gebraucht. Es hat eine große Kälteleistung pro Volumen, eine hohe

Umweltverträglichkeit (Treibhauspotenzial im Vergleich zu heute verwendeten Kältemitteln etwa 1/1000, kein Ozonabbau-Potenzial, Gewinnung aus industriellem Abfallgas ist möglich) und kann gleichzeitig in Wärmekreisläufen wie in Wärmepumpen und Fahrzeugheizungen genutzt werden.

Kohlendioxid im überkritischen Zustand löst **unpolare** Stoffe gut und kann **organische** Lösemittel ersetzen. Es hat für viele Substanzen ein erheblich besseres Lösungsverhalten als im flüssigen oder gasförmigen Zustand. Diese Eigenschaft macht das Kohlendioxid als Extraktionsmittel in Hochdruckprozessen interessant. Es wird zum Beispiel zur **Extraktion** von Naturstoffen wie Koffein (Herstellung von koffeinfreiem Kaffee oder Tee), ätherischen Essenzen, bioaktiven Wirkstoffen, Ölen oder **Tocopherolen** aus pflanzlichen Produkten verwendet (Martinez, 2007; DEHEMA, 2008). Insgesamt sind weltweit einige Hundert Extraktionsanlagen im industriellen Einsatz. Die meisten Anlagen sind inzwischen nicht mehr in Deutschland, sondern in China zu finden.

Hochdrucksprühverfahren wie „Rapid Expansion of Supercritical Solutions“ (RESS), „Particles from Gas Saturated Solutions“ (PGSS and PGSS-Drying), „Gas Anti-Solvent“ (GAS) und „Concentrated Powder Form“ (CPF) nutzen die besonderen Eigenschaften von überkritischem Kohlendioxid. Ein Beispiel ist die vermutlich „kleinste Praline der Welt“. In Gegenwart von Kohlendioxid unter Druck wird eine Dispersion aus Schokolade und Alkohol hergestellt. Das Kohlendioxid setzt **Grenzflächenspannung** und Viskosität herab, wodurch eine besonders effektive Durchmischung begünstigt wird. Diese Mischung wird in einer Düse entspannt. Dabei entlässt sich das Gas.

Mit der starken Volumenzunahme werden feine Tröpfchen aus Schokolade gebildet, in denen Alkohol **dispergiert** vorliegt. Wegen des **Joule-Thomson-Effekts** erstarren die Partikel so schnell, dass der Alkohol im Inneren der Partikel eingeschlossen wird. Die speziellen Eigenschaften des Kohlendioxids ermöglichen damit die Herstellung von Partikelsystemen, die mit klassischen Verfahren nicht oder nur mit sehr großem Aufwand erzielbar sind (Martinez, 2007; Weidner, 2009). Erste industrielle Anlagen mit Kapazitäten von einigen hundert Kilogramm pro Stunde sind im Einsatz.

Überkritisches Kohlendioxid wird auch als Lösemittel zum Reinigen und Entfetten, zum Beispiel von Wafern in der Halbleiterindustrie und von Textilien (chemische Reinigung, Ersatz chlorierter und fluorierter Kohlenwasserstoffe) angewendet. Ein neuartiges Verfahren, bei denen die gute Löslichkeit von Kohlendioxid in Wachsen und die anschließende schnelle Entspannung zur Reinigung komplexer Hohlräume in Werkstücken genutzt wird, ist seit kurzem im industriellen Einsatz, z.B. bei der Reinigung von Turbinenschaufeln.

Bei der Herstellung von **Aerogelen** werden **Lösungsmittel** aus dem **Sol-Gel-Prozess** durch Kohlendioxid ausgetauscht, das anschließend durch Entspannung abgetrennt wird. Im Vergleich zu konventionellen flüssigen **Lösungsmitteln** kann dabei durch geeignete Temperatur- und Druckführung das Zweiphasengebiet flüssig/gasförmig „umgangen“ werden. Die Bildung von Dampfblasen, die zur Zerstörung von Mikro- und Nanostrukturen führen, wird auf diese Weise vermieden. Eine der wichtigsten großtechnischen Anwendungen, bei denen das Kohlendioxid unter Druck bei Temperaturen oberhalb des kritischen Punktes

eingesetzt wird, ist die Reaktion mit Ammoniak zur Herstellung von **Harnstoff**. Überkritisches Kohlendioxid wird auch als Reaktionsmedium für die Naturstoffsynthese (Hartmann, 1999) und Feinchemikalienherstellung (z. B. für die Herstellung von Aromastoffen) verwendet. Es wurde herausgefunden, dass **Enzyme** in Gegenwart von flüssi-

gem oder überkritischem Kohlendioxid ihre Aktivität beibehalten. Damit eröffnet sich ein Weg zur lösemittelfreien Synthese und zur schonenden Aufreinigung der Produkte von enzymatisch katalysierten Reaktionen durch Hochdruckextraktion. Allerdings wird dieses Verfahren bis jetzt noch nicht technisch angewendet. Last but not least ist die

wichtige Rolle des Kohlendioxids bei der tertiären Ölförderung hervorzuheben. Durch Einpumpen von verdichtetem Kohlendioxid in nahezu erschöpfte Erdöllagerstätten wird die Viskosität des Öls durch Einlösen des Gases soweit herabgesetzt, dass die Mischung dem Bohrloch zufließt und damit die Ölausbeute erhöht werden kann.

AUTOR:

Eckhard Weidner

ist Professor für Verfahrenstechnische Transportprozesse an der Ruhr-Universität Bochum und leitet das Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheit und Energietechnik UMSICHT in Oberhausen sowie den ProcessNet-Fachausschuss Hochdruckverfahrenstechnik.

LITERATUR

Baehr D., 1992. Thermodynamik – eine Einführung in die Grundlagen und ihre technischen Anwendungen. 8. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

DECHEMA, 2008. CO₂ Applied CD-ROM. Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. Frankfurt am Main, Germany.

Dohrn. R., Peper, S., Fonseca, J., 2010. High-Pressure Fluid-Phase Equilibria: Experimental Methods and Systems Investigated (2000-2004). Fluid Phase Equilibria Vol 288. p. 1-54.

Fachverband Kohlensäure-Industrie e.V., 1997. Eigenschaften der Kohlensäure. Hydrogas Deutschland GmbH. 6. Auflage, Koblenz, Germany.

Forst, D. et al., 1993. Chemie für Ingenieure. VDI-Verlag, Düsseldorf, Germany.

Hartmann, T., 1999. Überkritisches Kohlendioxid als Reaktionsmedium für die Naturstoffsynthese – Die enantioselektive Hydrolyse von 3-Hydroxysäureestern. Hannover Uni. Diss., Germany.

Krinninger, K., 1996. Kohlendioxid – Kohlensäure – CO₂: Herstellung, Verteilung, Anwendung. Messer Griesheim GmbH. Verl. Moderne Industrie. Die Bibliothek der Technik; Bd.126. Landsberg/Lech, Germany.

Linde, 2010. Sicherheitshinweise. Umgang mit Kohlendioxid (CO₂). URL: www.aquasponder.de/Downloads/Kohlendioxid%20Daten%20und%20Sicherheit.pdf [Stand 3.03.2010].

Martinez, J., 2007. Supercritical Fluid Extraction of Nutraceuticals and Bioactive Compounds. CRC Press, Taylor & Francis Group. Florida, USA.

Römpp, 2010. Römpp Online Enzyklopädie, Thieme Chemistry, Stuttgart. URL: www.römp.com [Stand. 3.03.2010].

Span, R., 1993. Eine neue Fundamentalgleichung für das fluide Zustandsgebiet von Kohlendioxid bei Temperaturen bis zu 1100 K und Drücken bis zu 800 MPa. VDI-Verl. Düsseldorf (Fortschritt-Berichte VDI: Reihe 6, Energieerzeugung; 285) Zugl.: Bochum, Univ. Diss. 1992. Germany.

Renner, M., Weidner, E., Brandin, G., 2009. High-pressure carbon dioxide tanning, Chem. Eng. Res. and Design, Vol. 87, p. 987-996.

Wagner, W., Overhoff, U., 2006. Thermofluids. CD-ROM, ISBN: 978-3-540-21408-3

Weidner, E., 2009. High pressure micronization for food applications. The Journal of Supercritical Fluids, Vol. 47, p. 556-565.

3.1 Abtrennung von Kohlendioxid

Die CO₂-Abtrennung wird derzeit insbesondere im Kontext der geologischen CO₂-Speicherung diskutiert. In diesem Kapitel werden Grundoperationen der CO₂-Abtrennung und deren bestehende und neu zu entwickelnde Anwendungen der Chemie, der Petrochemie und der Energie gezeigt.

Membranen

Membranprozesse sind typische Ungleichgewichtsprozesse, deren Triebkraft die Unterschiede im **chemischen Potenzial** zwischen Zulauf (Feed) und dem durch die **Membran** getretenen Stoffstrom (Permeat) sind. Nimmt man die Druckdifferenz als wesentlichen Beitrag zum **chemischen Potenzial** in Gastrennprozessen, ist ein **Partialdruck** von ungefähr 100 Millibar Kohlendioxid (CO₂), wie er im Rauchgas fossiler Kraftwerke vorkommt, zu niedrig für ein Membranverfahren für Stickstoff (N₂) – Kohlendioxid. Die Flüsse wären gering und die Flächen beinahe unendlich.

Die Forschung konzentriert sich daher auf das IGCC-Verfahren (vergleiche auch Kapitel 3.3), in dem höhere Drücke (über 20 bar Gesamtdruck) und auch Temperaturen (über 200 Grad Celsius) als im Beispiel zuvor existieren. Das Trennproblem ist Kohlendioxid-Wasserstoff (H₂). Die Gastrennung wird meist hinter die **Wassergas-Shift-Reaktion**¹ platziert, in der der Wasserstoffanteil zuungunsten des Kohlenmonoxidanteils erhöht wird. Auch Wassergas-Membranreaktoren werden diskutiert. Wasserstoff ist die durch die **Membran** strömende Komponente, wobei allein der **Partialdruck** des Wasserstoffs und nicht der Ge-

samtdruck die treibende Kraft ist. Als Membranmaterialien werden sowohl **anorganische** (poröse **Membran**) als auch **metallische** (dichte **Membran**) diskutiert. Dichte **Membranen** trennen in erster Linie aufgrund von Löslichkeiten. Die Löslichkeit von Wasserstoff in Metallen ist hoch, während die Löslichkeit von Kohlendioxid und anderen Spurengasen in der Regel nicht messbar ist. Neben der Trennschärfe ist das wesentliche Kriterium der Fluss des Gases durch die **Membran**, um zu sinnvollen Flächen zu kommen. Die Forschung zielt hier auf die Erhöhung des Gasflusses durch in der porösen **Membran** gelöste Flüssigkeiten. Auch **mixed-matrix-Membranen** (dichte Polymermembranen mit **dispergiertem anorganischem** Material) werden diskutiert.

Adsorption

Die Trennschärfe der **Adsorption** beruht auf verschiedenen **Adsorptionsisothermen** der Adsorptive (Kohlendioxid-Stickstoff oder Kohlendioxid-Wasserstoff) am Adsorbens. Ein weiterer wichtiger Parameter ist die Kapazität, also die pro Gramm Adsorbens gebundene Gasmenge. Bei der Gasadsorption steigt die Kapazität immer mit dem **Partialdruck** des Adsorptivs. Die **Desorption** erfolgt durch Druckabsenkung, Temperaturerhöhung oder beides zugleich. Als Adsorbentien werden für trockene **Feedgase Metal-Organic-Frameworks** (MOF's) diskutiert. Bei den Bedingungen des Rauchgases werden bis 15 Gewichtsprozent Beladung an Kohlendioxid berichtet. Auch **Zeolithe** erreichen eine hohe Beladbarkeit bei Raumtemperatur und hohen Drücken. Die Kapazität nimmt ab,

wenn das zu trennende Gas wasserfeucht ist. Die Trennung von Kohlendioxid-Wasserstoff ist ein bereits heute technisch umgesetztes Verfahren nach der **Wassergas-Shift-Reaktion**, in dem Wasserstoffanteile größer 90 Prozent als nicht adsorbierte Komponenten erreicht werden. Um die Ströme nicht durch Hilfsstoffe zu verunreinigen, werden bevorzugt die Vacuum Pressure Swing **Adsorption** (VPSA) genannten Spezialverfahren eingesetzt. Wegen der Positionierung nach der Shiftreaktion ist auf die Wärmeintegration besonders zu achten. Als Sonderfall kann die chemische **Adsorption** betrachtet werden, bei der insbesondere für Kohlendioxid Erdalkalioxide bei etwa 500 Grad Celsius zu Carbonaten umgesetzt werden. Das Kohlendioxid wird auf diese Weise chemisch an das Erdalkalimetall gebunden. Bei etwa 1000 Grad Celsius wird das Kohlendioxid wieder freigesetzt und das Erdalkalioxid wieder hergestellt. Der größte Nachteil dieses Verfahrens ist die geringe Wiederholbarkeit. Schon nach wenigen Zyklen nimmt die Fähigkeit, Kohlendioxid aufzunehmen ab. Zudem sind auch hier erhebliche Feststoffmengen im Kreis zu führen, ohne deren mechanische Eigenschaften zu verändern.

Absorption

Die physikalische **Absorption** beschreibt ein Verfahren, in dem ein Absorptiv durch schwache **van-der-Waals-Kräfte** an ein flüssiges Absorbens gebunden wird. Durch Herabsetzung des Druckes und Veränderung der Temperatur (häufig: Temperaturerhöhung) kann das Absorbat abgetrieben werden, und das Absorbens steht für eine weitere Wäsche bereit.

¹ CO + H₂O = H₂+CO₂

Wassergas-Shift Reaktion: Kohlenmonoxid und Wasser stehen im Gleichgewicht mit Wasserstoff und Kohlendioxid

Die chemische **Absorption** beschreibt ein Verfahren, in dem ein Absorptiv im Absorbens gelöst und sofort einer chemischen Reaktion unterworfen wird. Dabei führt die chemische Absorption generell zu geringeren Absorptivkonzentrationen im Reingas der **Absorption** als die physikalische. **Reaktionswärmen** sind in aller Regel wesentlich größer als Absorptionswärmen. Aus thermodynamischen Gründen ist die **Absorption** immer **exotherm** und die **Desorption** immer **endotherm**. Die für die Energietechnik entscheidende Größe ist daher der Energiebedarf und die Temperatur der **Desorption**. Traditionell werden in der chemischen **Absorption** aliphatische **Amine** eingesetzt. Die Zersetzungstemperatur des gebildeten Produktes (Carbamat) liegt unter 120 Grad Celsius, was bereits einen exergetischen Nachteil bedeutet². Mit **Aminen** lassen sich auch die geringen **Partialdrücke** an Kohlendioxid im Abgas fossiler Kraftwerke behandeln. Doch der Preis ist hoch: Ungefähr ein Drittel bis ein Viertel der elektrischen Leistung geht durch diesen Prozess bei gleichem Brennstoffbedarf verloren. Da **Amine** flüchtig sind, sind sie immer in Spuren im Reingas trotz einer Zusatzwäsche vorhanden. Dieser Nachteil wird vermieden, wenn physikalisch oder chemisch mit Absorbentien gewaschen wird, deren **Dampfdruck** fast Null ist. Beispiele hierfür sind ionische Flüssigkeiten, **hyperverzweigte Polymere** und **Aminosäuren**. Durch den Einsatz dieser Stoffsysteme ist die Menge an umlaufendem Absorbens höher als in der üblichen chemischen **Absorption**, und bei hohen Abtrennraten wird das Verfahren unwirtschaftlich. Sind Abtrennraten geringer als 90 Prozent ausreichend, werden durch die genannten Stoffsysteme nur 30-50 Prozent der Energie der chemischen Wäsche benötigt.

Wird in einem Wäscher die Regeneration des Absorbens durch Mikroorganismen bewerkstelligt, spricht man von „Biówäsche“. In der Regel werden nur Ströme mit geringen Mengen an Absorptiv behandelt (kleiner 1000 ppm). Technisch umgesetzt ist dieses Verfahren für die **Absorption** von Schwefelwasserstoff, der im Regenerations-schritt zu elementarem Schwefel oder Sulfat umgesetzt wird. Forschung wurde für die Abtrennung von Kohlendioxid aus Biogas betrieben, um auf Erdgasqualitäten zu kommen. Das Kohlendioxid wird von Algen verstoffwechselt und diese durch Flockung als Biomasse abgetrennt. Dieses Verfahren kann mit anderen jedoch kostenmäßig nicht mithalten.

Chemical looping

Dieser Begriff ist doppelt besetzt; beide Varianten gehören zur reaktiven **Adsorption**.

Eine Verfahrensvariante gehört zu den Prozessen, die mit reinem Sauerstoff verbrennen. Sie beruht auf einer selektiven Reaktion (meist eines Metalles oder Metalloxides) mit dem zu übertragenden Stoff, in der Regel Sauerstoff aus Luft, zu einem höheren Metalloxid (Primärseite), das dann mehr Sauerstoff aufgenommen hat. Dies wird im Bereich der Verbrennung (Sekundärseite) zu Metall(oxid) und Sauerstoff gespalten. Der Sauerstoff wird der Verbrennung zugeführt.

Unter chemical looping versteht man auch die Reaktion eines Metalloxides zu Metallcarbonat in einem Fließbett. Dadurch wird Kohlendioxid aus dem Rauchgas entfernt. Das Metallcarbonat wird anschließend thermisch zu Metalloxid und zu relativ reinem Kohlendioxid regeneriert. Beim chemical looping müssen große Mengen an

Feststoffen im Kreis geführt werden, ohne deren mechanische Konsistenz (Korngrößenverteilung, Oberfläche) zu verändern. Zudem ist die Wiederholbarkeit der Beladung ein noch nicht gelöstes Problem. Verfahren sind in der Pilotierung.

Anwendungsfelder der CO₂-Abtrennung

CO₂-Abtrennung in chemischen Prozessen

Die CO₂-Abtrennung ist in einigen chemischen Verfahren prozessbedingt notwendig, so zum Beispiel in der Ammoniakherstellung oder bei der Synthesegasproduktion. Andere Prozesse würden sich für eine CO₂-Abscheidung zur Emissionsverringern anbieten, da Rauchgase mit sehr hoher CO₂-Konzentration anfallen. Hier sind insbesondere die Stahl- und Zementherstellung zu nennen.

Bei der **Ammoniakherstellung** reagieren Wasserstoff und Stickstoff an einem **Katalysator** miteinander. Der Wasserstoff wird seinerseits in einer Reaktion von Kohlenwasserstoffen wie Erdgas, Erdöl oder Kohle mit Wasserdampf oder Sauerstoff erzeugt. Als Nebenprodukt fällt Kohlendioxid an, das entfernt werden muss, da andernfalls der **Katalysator** zur Ammoniak-Erzeugung vergiftet wird [1]. Vergiftete **Katalysatoren** erfüllen ihre Funktion nicht mehr. Klassisch wird das Kohlendioxid daher durch eine Lösungsmittelwäsche entfernt [2]. Geeignet sind dafür wässrige Lösungen von **Kaliumcarbonat** oder **Aminen** wie Methyl-diethanolamin (MDEA). Bei diesem Prozess verbleiben jedoch geringe Mengen an Kohlendioxid im Wasserstoff. Da auch diese entfernt werden müssen, wird das restliche Kohlendioxid anschließend mit einem geringen Teil des Was-

² Bei physikalischen Absorbentien ist keine Mindesttemperatur einzuhalten, der Regenerationsgrad ist direkt mit der Temperatur verknüpft.

serstoffs zu Methan umgesetzt. So können in einer modernen Anlage über 70 Tonnen Kohlendioxid pro Stunde aus dem Gasgemisch abgetrennt werden.

Synthesegas ist eine Mischung variabler Zusammensetzung aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff, welches in der Regel aus fossilen Brennstoffen gewonnen und für die Herstellung von flüssigen Kohlenwasserstoffen, Diesel und Benzin, Methanol oder Alkoholen verwendet wird. Als Nebenprodukt entsteht bei der Synthesegasherstellung CO_2 , das für die nachfolgenden Synthesen abgetrennt werden muss. Dies kann zum Beispiel durch eine Druckwechseladsorption erreicht werden.

Die Stahl- und Zementherstellung sind mit einem Anteil von fast 5 beziehungsweise 7 Prozent an den weltweiten CO_2 -Emissionen wichtige

Punktquellen für Kohlendioxid. Bei der klassischen Roheisenherstellung im Hochofen wird Eisenerz mit Kohle und Luftsauerstoff unter Freisetzung von Wasser, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid zu elementarem Eisen reduziert. Dies führt zu **Gichtgasen** mit ungefähr 50 Prozent Stickstoff aus der Luft, 25 bis 30 Prozent Kohlenmonoxid und 15 bis 20 Prozent Kohlendioxid [3], aus denen sich das Kohlendioxid mittels Post-combustion-Technologien (vgl.: Kapitel 3.3) entfernen ließe. Darüber hinaus könnte als Alternative zum Luftsauerstoff reiner Sauerstoff verwendet werden. Dies würde zu einem stickstofffreien **Gichtgas** führen, aus dem die Abtrennung des Kohlendioxids gegenüber dem herkömmlichen **Gichtgas** vereinfacht wäre.

Bei der **Zementherstellung** wird Calciumcarbonat durch Erhitzen unter

Freisetzung von Kohlendioxid in Calciumoxid umgewandelt. Die dafür benötigte Energie wird größtenteils durch die Verbrennung von Kohle oder anderen fossilen Energieträgern geliefert. Da die CO_2 -Konzentrationen im Abgas mit 15 bis 30 Volumenprozent hoch sind, könnten die für Kraftwerke diskutierten post-combustion-Technologien an bereits bestehende Anlagen ergänzt werden. Bisher wird jedoch weder bei der Stahl- noch bei der Zementherstellung Kohlendioxid abgetrennt.

CO_2 -Abtrennung in der Petrochemie

In der Ölindustrie wird Kohlendioxid genutzt, um Erdöl zu fördern, das mit herkömmlichen Methoden nicht erreichbar ist. Neben primären Pumpmethoden werden Ölstätten auch sekundär mit Wasser geflutet, um die



Förderung zu erhöhen. Bei dem so genannten „**enhanced (tertiary) oil recovery**“ (EOR) wird Kohlendioxid in den Untergrund gepresst. Dies führt zu einer rein mechanischen Verdrängung des Erdöls, aber auch zu einer Viskositätsverminderung, da sich Kohlendioxid teilweise in dem Öl löst. Die geringere Viskosität erhöht die Mobilität und damit Förderung des Erdöls. Die Verpressung von Kohlendioxid erfolgt kontinuierlich oder abwechselnd mit Wassereinspritzungen. Das injizierte Kohlendioxid wird zu 50 bis 67 Prozent mit dem geförderten Erdöl wieder ausgetragen [4], üblicherweise vom Erdöl abgetrennt und wieder verpresst. Als Faustformel ermöglicht eine Tonne Kohlendioxid die Zusatzausbeute von 2 bis 3 Barrel (159 Liter) Öl.

Eine analoge Vorgehensweise ist für die Optimierung von Erdgasfördermengen angedacht. Das so genannte „enhanced gas recovery“ ist bisher allerdings nur im Pilotmaßstab realisiert.

CO₂-Abtrennung in der Energietechnik

Auf die deutsche Energiewirtschaft ließen sich 2007 etwa 380 Millionen Tonnen Kohlendioxid zurückführen und damit etwas mehr als 40 Prozent der gesamten deutschen Kohlendioxid-Emissionen. Als Hauptquellen sind dabei die zur Mittellastabdeckung notwendigen Kohlekraftwerke (Punktquellen) zu nennen, die 2007 etwa 51 Prozent des deutschen Strombedarfs deckten [5]. Zur Reduzierung dieser großen CO₂-Emissionen befindet sich derzeit eine Reihe von unterschiedlichen Verfahren in der Entwicklung. Diese können in drei Klassen unterschieden werden, die zu unterschiedlichen Wirkungsgradeinbußen in den Kraftwerken führen.

Die Bildung von Kohlendioxid und Wasser bei Verbrennungsprozessen ist nicht zufällig. Vielmehr ist sie durch eine thermodynamische Notwendigkeit gegeben. Dabei werden hochenergetische Stoffe in niederenergetische gewandelt, um den Energieunterschied als Wärme zu nutzen. Das Energieniveau wird durch die **Enthalpie** oder besser die **Freie Enthalpie** repräsentiert. Die **Freie Enthalpie** enthält im Gegensatz zur **Enthalpie** die Beiträge der **Entropie**. Die Befreiung der Energieproduktion von Kohlendioxid-Emissionen lässt sich prinzipiell durch drei Wege erreichen:

Entcarbonisierung des Brennstoffes:

Mit Blick auf mögliche niederenergetische Produkte kommen insbesondere Wasserstoff oder das Wasserstoff-Produkte in Betracht (Produkt ist Wasser). Allerdings sind die kontrollierte Verbrennung von Wasserstoff und die Werkstoffstabilität gegen hohe Wasserstoffpartialdrücke Herausforderungen. Wasserstoff hat hohe chemische und physikalische Löslichkeiten in vielen Metallen, die bei höheren Temperaturen in der Regel zunehmen. Bei diesen so genannten „**Pre-Combustion-Verfahren**“ wird der Brennstoff zunächst vergast (z.B. Kohlevergasung, IGCC: Integrated Gasification Combined Cycle) und Kohlendioxid vor der eigentlichen Verfeuerung des Brenngases im Kraftwerksprozess abgetrennt.

Verbrennung mit reinem Sauerstoff: „Oxyfuel-Verfahren“

Hierbei wird reiner Sauerstoff aus der Umgebungsluft vor der anschließenden Verbrennung in einer so genannten Luftzerlegung bereitgestellt oder über reaktive Metalle (vgl. Chemical Looping) erzeugt. Das bei der Verbrennung mit reinem Sauerstoff entstehende Rauchgas besteht hauptsächlich aus

Kohlendioxid. Dieses ließe sich dann aufgrund des hohen **Partialdrucks** einfach kondensieren. Zudem laufen die Verbrennungsreaktionen prinzipiell bei höheren Temperaturen ab, was im Hinblick auf den Kreisprozess bei fossilen Kraftwerken zu wünschenswerten Effizienzverbesserungen führt. Dieser Effekt ist jedoch nur schwierig zu realisieren. Dabei ist die Beherrschung der hohen Temperaturen eine noch zu lösende Frage an die Werkstoffwissenschaften. Eine weitere Aufgabe ist der hohe **Partialdruck** an Kohlendioxid.

Waschen des Rauchgases

Verfahren nach dem so genannten „Post-Combustion-Prinzip“ trennen Kohlendioxid nach dem Verbrennungsprozess aus dem Rauchgas ab. Hier bieten sich chemische Wäschen mit **Aminen** an, die bereits seit Jahren aus der **Sauergaswäsche** oder aus Wäschen für Schwefeldioxid bekannt sind und noch für Kraftwerksprozesse optimiert werden [6].

Die Mengen an Schwefeldioxid sind allerdings um Größenordnungen von denen an Kohlendioxid verschieden. Zudem wird hier ein chemisches Waschverfahren mit einem niedrigpreisigen Verkaufsprodukt (Gips) ohne Regeneration eingesetzt. Für Kohlendioxid ließen sich zwar auch Produkte finden, deren Menge aber jede bisher bekannte Vorstellung sprengen würde. Damit kann das CO₂-Endprodukt nur endgelagert werden. Die Nischenanwendung des „Kohlendioxids als Rohstoff der Chemie“ (vgl. Kapitel 3.4) wird gerade auf Machbarkeit untersucht. Zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes aus bestehenden Kraftwerken eignet sich am besten das „Post-Combustion-Verfahren“. Bei diesem Verfahren können der bestehende Kraftwerksprozess weiter genutzt und die CO₂-Abtrennung hinter den bestehenden

Kraftwerksprozess geschaltet werden. Unter Berücksichtigung des derzeitigen Stands der Technik ist bei dieser Methode mit Leistungseinbußen in Form von Wirkungsgradverlusten von über 10 Prozentpunkten zu rechnen [7]. Die Grundoperationen zur CO₂-Abtrennung sind zwar aus der Chemie bekannt, die neue Herausforderung gegenüber der Verfahrenstechnik der Vergangenheit ist die strenge Ausrichtung auf energetische Effizienz und die unbekannte Dimension der Apparate. Bei einem fossilen Kraftwerk mit einer elektrischen Leistung von 1000 Megawatt fallen Gasströme von etwa 1000 Kilogramm pro Sekunde an, für die Wäscher technisch unerprobter Dimension benötigt würden. Alle beschriebenen Verfahren zur CO₂-Abtrennung

aus Kraftwerken befinden sich daher derzeit noch in der Entwicklung und werden nicht im industriellen Maßstab eingesetzt. Erste Demonstrationskraftwerke zur CO₂-freien Stromerzeugung befinden sich in der Planung und sollen voraussichtlich ab 2015 den so produzierten Strom in das deutsche Stromnetz einspeisen.

Im industriellen Maßstab wird hingegen die Aufarbeitung von Erdgas betrieben. Hierbei werden mehr als 1000 Megatonnen Kohlendioxid im Jahr abgeschieden [8], was meistens durch Absorptionsverfahren erfolgt. Das hierbei abgetrennte Kohlendioxid wird größtenteils in der EOR (vgl. CO₂-Abtrennung in der Petrochemie) eingesetzt.

Um Biogas in bestehende Erdgasnetze einspeisen zu können, muss es den Spezifikationen des Erdgases angepasst werden. Zur Reduzierung des CO₂-Gehaltes im Biogas kommen Membranverfahren, Absorptionen und Druckwechseladsorptionen zum Einsatz. Für die selektive Abtrennung des Kohlendioxids muss je nach Verfahren Energie in Form von Kompressionsarbeit oder Wärme aufgewandt werden. Die benötigte Energiemenge variiert je nach Verfahren, beläuft sich jedoch auf bis zu 25 % des Energiegehaltes des Biogases.

Ergänzende Aspekte zur CO₂-Abtrennung in der Energietechnik werden in Kapitel 3.3 behandelt.

AUTOR:

Daniela Kruse ist Senior Project Manager im Science-to-Business Center Eco² bei Creavis Technology & Innovation der Evonik Degussa GmbH in Marl.

Wolfgang Artl ist Professor für Thermische Verfahrenstechnik an der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg.

LITERATUR

- [1] M. Appl., Ammonia, Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry, 2006.
- [2] IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Ed: B. Metz, O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos, L. Meyer, 2005.
- [3] U. Onken, A. Behr, Chemische Prozesskunde, Georg Thieme Verlag: Stuttgart, New York, 2006, S.528.
- [4] Bondor, P.L., 1992: Applications of carbon dioxide in enhanced oil recovery. Energy Conversion and Management, 33(5), 579-586.
- [5] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie; Zahlen und Fakten Energiedaten.
- [6] Kohl, A. L.; Nielsen, R. B., Gas Purification, 5th ed., Gulf Publishing Company, Houston 1997.
- [7] Oexmann, J.; Hensel, C. & Kather, A. Post-combustion CO₂-capture from coal-fired power plants: Preliminary evaluation of an integrated chemical absorption process with piperazine-promoted potassium carbonate International Journal of Greenhouse Gas Control, TCCS-4: The 4th Trondheim Conference on CO₂ Capture, Transport and Storage, 2008, 2, 539-552.
- [8] IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Ed: B. Metz, O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos, L. Meyer, 2005.

3.2 Membranen zur Abtrennung von Kohlendioxid

Die Politik hat in den vergangenen Jahren die Notwendigkeit einer signifikanten Reduktion der CO_2 -Emissionen erkannt und darauf basierend den Ausbau von Energiewandlung und Stromerzeugung aus regenerativen Quellen forciert. Während dieser Ausbau in Deutschland zügig voranschreitet, verbleibt selbst bei Erfüllung der gesteckten, ehrgeizigen Ziele ein Anteil von 70% an der Stromerzeugung, der – bei Wegfall der Kernkraft – aus fossilen Primärenergieträgern aufgebracht werden muss [1]. Da CO_2 sowohl bei der Energieumwandlung aus Biomasse als auch bei der Konversion von fossilen Brennstoffen entsteht, kommt zur Reduktion der CO_2 -Emissionen in die Atmosphäre lediglich der Weg der CO_2 -Abtrennung und nachfolgenden Speicherung in Frage. Während für die Speicherung noch nicht alle gesetz-

lichen Grundlagen geschaffen sind, verfolgen Wirtschaft und Wissenschaft derzeit intensiv verschiedene Technologiepfade, die in Abb. 1 schematisch dargestellt sind. In allen drei Routen wird zurzeit der Einsatz von **Membranen** intensiv untersucht.

Bei Route I (**Post-combustion**) erfolgt die Separierung von CO_2 nach der Verbrennung des Energieträgers aus dem so genannten Rauchgas, das im Wesentlichen aus CO_2 und Stickstoff besteht. Für Transport und Speicherung (siehe Kapitel 3.3) muss das CO_2 allerdings vom Stickstoff getrennt werden. Diese Trennaufgabe N_2/CO_2 hat den Nachteil, dass hohe Volumenströme an Rauchgas, die eine vergleichsweise geringe CO_2 -Konzentration haben, gereinigt werden müssen. Adaptierbar für Verbrennungskraftwerke erscheint

heute die aus der chemischen Prozesstechnik bekannte CO_2 -Wäschetchnik. Dabei nehmen Amine wie z. B. Mono-, Di- und Methyldiethanolamine (MEA, DEA, MDEA) oder Diglycolamine (DGA) das abzutrennende CO_2 bei 40°C auf und geben es bei 60 bis 80°C im Regenerator wieder ab. Das entfernte CO_2 wird komprimiert und abtransportiert. Hierbei müssen allerdings **Wirkungsgrade** einbußen von 10%-Punkten oder mehr in Kauf genommen werden. Eine Alternative stellen Membrantrennverfahren dar. So können z.B. CO_2 und N_2 durch Polymermembranen aufgrund ihrer unterschiedlichen Löslichkeit für beide Gase getrennt werden. Da die Abtrenngrade der Polymermembranen allerdings noch zu niedrig sind, müssen mindestens zweistufige Membrankaskaden für die Gastrennung eingesetzt werden. Dies ergibt **Wirkungsgrad**verluste, die nur geringfügig besser als die der Waschverfahren sind, so dass noch weiterer Entwicklungsbedarf besteht.

Bei Route II (**Oxyfuel**) wird Sauerstoff aus der Luft abgetrennt und dann zur direkten Verbrennung genutzt. Die Verbrennung in reinem Sauerstoff liefert als Verbrennungsprodukte nur CO_2 und Wasserdampf, der beim Abkühlen des Gasgemisches auf sehr einfache Weise durch Kondensation vom CO_2 getrennt werden kann. Für die Sauerstofferzeugung ist das Linde-Verfahren großtechnisch verfügbar. Bei diesem kryogenen Verfahren wird Sauerstoff mittels Tieftemperaturzerlegung aus Luft gewonnen, allerdings unter hohem Energieaufwand. Die Firma Vattenfall betreibt ein Demonstrationskraftwerk

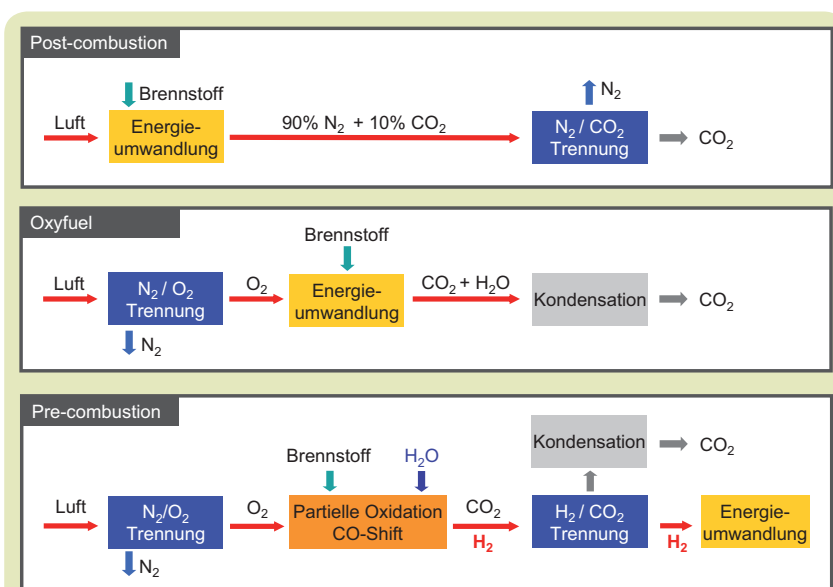


Abbildung 1: Drei Routen der CO_2 -Abtrennung bei der Energieumwandlung aus den Brennstoffen Kohle, Gas (fossile Energieträger) und Biomasse.

(30 MW_{th}) mit Sauerstofferzeugung nach dem Linde-Verfahren [2]. Als alternatives Konzept zur Sauerstoffabtrennung kann eine Membran verwendet werden, die nur für Sauerstoff permeabel ist. In einer solchen Sauerstoffpermeationsmembran erfolgt der Sauerstofftransport über Diffusion von Sauerstoffionen in einer kristallinen Oxidkeramik. Zum Ladungsausgleich muss gleichzeitig ein Elektronentransport in entgegengesetzter Richtung gewährleistet sein (Mischleiter, siehe Abb. 2). Dazu ist eine hohe Betriebstemperatur der Membran von ca. 800°C erforderlich. Hochtemperatur-Sauerstoffpermeationsmembranen versprechen geringeren Energieaufwand zur Bereitstellung von Sauerstoff bei höchsten O₂/N₂-Trennselektivitäten.

Eine weitere Optimierungsmöglichkeit ergibt sich durch teilweise Rückführung des Rauchgases, wodurch die Triebkraft für den Sauerstofftransport durch die Membran erhöht wird (siehe

Abb. 3). Zusätzlich fungiert das zurückgeführte Rauchgas als Wärmequelle zur Vorheizung der Luft und zur Beheizung der Membran. In diesem Betriebsmodus muss das Membranmaterial allerdings stabil gegenüber den Komponenten des Rauchgases sein. Besonders kritisch ist dabei der hohe CO₂-Anteil des Rauchgases, da viele Membranwerkstoffe zu einer Carbonatbildung neigen, die den Sauerstofftransport behindert oder die Membran zerstört.

Bei Route III (**Pre-combustion**) wird der Brennstoff (Kohle, Biomasse) zuerst vergast. Bei den bisher entwickelten Kohlevergasungsverfahren erfolgt zunächst eine Partialoxidation des Brennstoffes mit Sauerstoff oder angereicherter Luft zu Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H₂). Nach einer CO-Konvertierung zu CO₂ und H₂ mittels Wasserdampfzufuhr (CO-Shift) eröffnen sich zwei Optionen: (a) Abtrennung von CO₂ mit einer Wäsche wie bei Rou-

te I, oder (b) Abtrennung von H₂ mittels einer metallischen oder keramischen Membran, wobei ein CO₂-reiches Gas zurückbleibt, das nach einer Nachbehandlung für die Verflüssigung und unterirdische Lagerung geeignet ist.

Bei beiden Optionen wird der Wasserstoff anschließend verstromt. Alternativ bietet die Vergasungsrouten neben der reinen Stromerzeugung auch die Möglichkeit zur Produktion reinen Wasserstoffs, der (dezentral) in Brennstoffzellen oder bei der Herstellung flüssiger Treibstoffe über die Fischer-Tropsch-Synthese eingesetzt werden könnte.

Allen Abtrenntechnologien ist gemein, dass der für die CO₂-Abtrennung benötigte Energieaufwand den Gesamtwirkungsgrad der betroffenen Kraftwerke mindert. Deswegen werden neben den Prozessen, die eine relativ einfache Umrüstung existierender Anlagen erlauben, in den nachfolgend beschriebenen Forschungsvorhaben

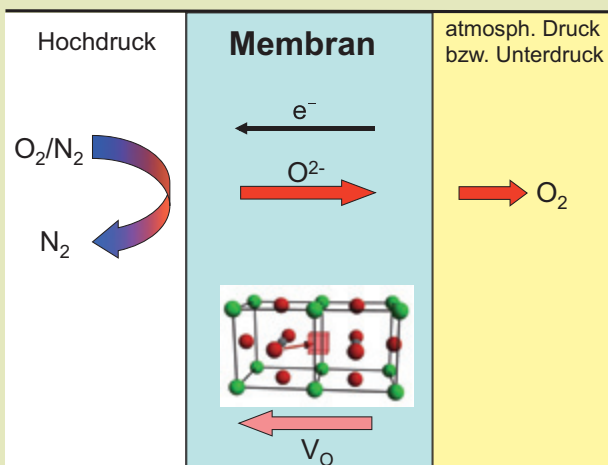


Abbildung 2: Schematische Funktionsweise einer Sauerstoffpermeationsmembran. Sauerstoff aus der Luft (links, hoher Druck) wird mit Elektronen (e^-) zu Sauerstoffionen (O^{2-}) reduziert. Getrieben durch die Partialdruckdifferenz von Sauerstoff laufen diese durch die Membran, werden an der rechten Seite oxidiert und bilden dort reinen Sauerstoff (O_2). Auf atomarer Ebene erfolgt der Transport der Sauerstoffionen über leere Gitterplätze (V_o) im Sauerstoffgitter der oxidkeramischen Membran (z.B. $Ba_{0,5}Sr_{0,5}Co_{0,8}Fe_{0,2}O_{3-\delta}$, wobei δ den Anteil leerer Sauerstoffplätze angibt) [3].

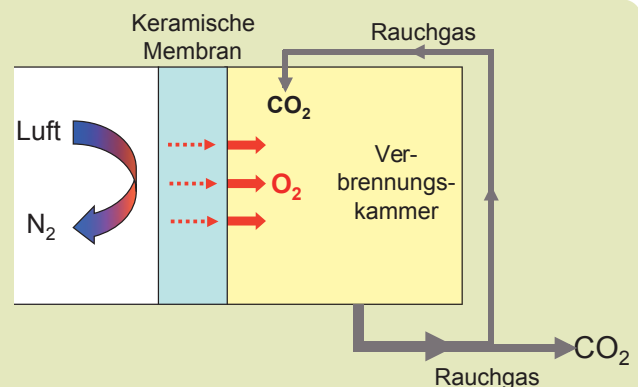


Abbildung 3: Schematischer Aufbau eines Oxyfuel-Prozesses mit Rückführung des Rauchgases.

auch solche Prozesse intensiv befor- scht, die eine möglichst hohe Ge- samteffizienz des Kraftwerksprozesses versprechen.

Ziel des Verbundvorhabens OXYCO- AL-AC an der RWTH Aachen ist die Entwicklung eines CO₂-emissionsar- men Kraftwerksprozesses mit mem- branbasierter Sauerstoffbereitstellung (Route II: Oxyfuel) [4]. Dieser Prozess baut auf einem Verfahren auf, bei dem Kohlenstaub mit reinem Sauerstoff un- ter Zumischung von gereinigtem, zu- rückgeführtem Rauchgas verbrannt wird. Dadurch besteht das Rauchgas weitgehend aus CO₂ und Wasser- dampf, wodurch sich die CO₂-Abtren- nung stark vereinfacht. Wesentlich für die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens ist ein niedriger Energieeinsatz für die Be- reitstellung des Sauerstoffs [5].

Das Verbundvorhaben MEM-OXYCOAL widmet sich der Aufgabe, keramische

Membranmaterialien für die Sauer- stoffseparation zu finden und zu op- timieren, die in einer Rauchgasatmo- sphäre, d.h. insbesondere in stark CO₂-haltiger Atmosphäre stabil sind und nicht durch Carbonatbildung degradieren. In dem Verbundvorha- ben arbeiten 9 Universitäts- und For- schungsinstitute aus ganz Deutsch- land zusammen [6].

Beide Verbundvorhaben werden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) mit mehr als 10 Millionen Euro gefördert.

Die weiter gefasste Helmholtz Allianz MEM-BRAIN [7] hat die Entwicklung von selektiven Gastrennmembranen zur Abtrennung von CO₂, O₂ und H₂ für alle drei oben beschriebenen Routen (siehe Abb. 1) zum Ziel. In der Allianz, die von der Helmholtzgemeinschaft mit mehr als 10 Millionen Euro gefördert wird, arbeiten 4 Helmholtz-Zentren so-

wie eine Vielzahl von Universitäts- und Forschungsinstituten aus Deutschland und europäischen Nachbarstaaten zu- sammen. Die zu leistenden Arbeiten reichen von der Membranentwicklung und -herstellung, der Charakterisie- rung, der technischen Verfahrensana- lyse bis hin zur energiewirtschaftlichen und umweltseitigen Bewertung geeig- neter Kraftwerksprozesse.

Alle drei Forschungsvorhaben sind eng miteinander verzahnt, da nur durch diese Rückkopplung und den inten- siven Austausch der Projektpartner gewährleistet werden kann, dass die Entwicklungen von Beginn an auf die Anwendung im Kraftwerksbetrieb zie- len und zügig die Ergebnisse liefern, die angesichts der Dringlichkeit des Problems Klimawandel benötigt werden.

AUTOREN:

Reinhold Kneer, Lehrstuhl für Wärme- und Stoffübertragung, RWTH Aachen (OXYCOAL-AC)

Manfred Martin, Lehrstuhl für Physikali- sche Chemie I, RWTH Aachen (MEM-OXYCOAL)

Wilhelm A. Meulenber, IEF-1, For- schungszentrum Jülich (MEM-BRAIN)

LITERATUR

- [1] Forschungs- und Entwicklungskonzept für emissionsarme fossil befeuerte Kraftwerke, Bericht der COORETEC-Arbeitsgruppen, BMWA Dokumentation Nr. 527 (Berlin, 2003).
- [2] www.vattenfall.de/www/vf/vf_de/225583xberx/228407Klima/228587co2-f/index.jsp
- [3] J. Sunarso, S. Baumann, J.M. Serra, W.A. Meulenber, S. Liu, Y.S. Lin, J.C. Diniz da Costa, *Journal of Membrane Science* 320 (2008) 13–41.
- [4] www.oxycoal.de
- [5] R. Kneer, D. Toporov, M. Förster, D. Christ, C. Broeckmann, E. Pfaff, M. Zwick, S. M. Modigell, *Energy Environ. Sci.*, 3, (2010) 198–207.
- [6] M. Martin, Fourth International Conference on Clean Coal Technologies (CCT2009), Dresden, 2009, www.cct2009.org
- [7] www.MEM-BRAIN-Allianz.de

3.3 Abtrennung von Kohlendioxid in der Energieindustrie

Technische Möglichkeiten zur CO₂-Reduzierung

Wir stellen hohe Ansprüche an unsere Energieversorgung; sie muss ökologisch, sozialverträglich und wirtschaftlich sein und vor allem eine hohe Versorgungssicherheit gewährleisten. Dies ist durch einen breiten Energiemix unter Einbeziehung vieler Primärenergieträger möglich. In Zukunft werden die regenerativen Energien wie Wind, Sonne, Biomasse und andere dieses Spektrum noch stärker als bisher ergänzen, wobei Primärenergieträger wie Kohle und Erdgas in den nächsten Jahrzehnten einen wichtigen Platz behalten werden.

Gegenwärtig ist Kohleverstromung mit hohen CO₂-Emissionen verbunden. Die Kohlekraftwerksbetreiber müssen diese reduzieren, wenn das Ziel unserer Bundesregierung eingehalten werden soll, die CO₂-Emissionen sind bis 2020 um 40 Prozent gegenüber

1990 zu reduzieren. Hierfür gibt es verschiedene Möglichkeiten; Steigerung des **Wirkungsgrades** des Kraftwerks, Wechsel des Brennstoffs von Kohle zu Erdgas und Abtrennung und Speicherung des entstehenden Kohlendioxids (CO₂). Bei der **Wirkungsgradsteigerung** wird mehr Energie mit der gleichen Brennstoffmenge gewonnen. Erdgas setzt bei der Verbrennung im Vergleich mit den anderen fossilen Primärenergieträgern am wenigsten Kohlendioxid frei. Daher führt der Brennstoffwechsel von Kohle zu Erdgas zu einer geringeren Menge an CO₂-Emissionen bei gleicher erzeugter Menge elektrischer Energie.

Hinter der dritten Option verbirgt sich die CCS-Technik. CCS steht für Carbon Capture and Storage. In der Fachwelt versteht man darunter die CO₂-Abtrennung und Speicherung. Die dazugehörige Prozesskette ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt. Hierdurch kann die CO₂-Emission von

Kraftwerken um 90 Prozent und mehr reduziert werden.

Die **Wirkungsgraderhöhung** eines Kraftwerks – von derzeit 45 % auf 50 % – kann den Emissionswert um ca. 10 Prozent senken, der Brennstoffwechsel von Kohle auf Erdgas erbringt ca. 50 Prozent weniger CO₂-Emission. Im Vergleich mit den anderen Möglichkeiten ist CCS damit die Technologie, die die höchste Effizienz bei Reduzierung der CO₂-Emissionen besitzt. Allerdings muss für diese Technik mehr Brennstoff eingesetzt werden, wenn man die gleiche Menge elektrische Energie erhalten will. Die CCS-Technik besteht aus drei aufeinander folgenden Schritten einer Prozesskette: der CO₂-Abtrennung, dem CO₂-Transport und der CO₂-Speicherung. Mehrere Optionen sind für jeden dieser Schritte möglich. Aber eine breite Akzeptanz in der Öffentlichkeit und klare rechtliche Rahmenbedingungen sind Voraussetzungen für den erfolgreichen Einsatz der Technologie.

Die CO₂-Abtrennverfahren

Das bei der Kohleverstromung entstehende Kohlendioxid kann über verschiedene Verfahren abgetrennt werden, wobei die gleichen Prozesse auch bei Öl, Gas, Biomasse und anderen kohlenstoffhaltigen Brennstoffen denkbar sind. So ist die Entfernung von Kohlenstoff bzw. des daraus resultierenden CO₂ vor der Verbrennung praktikabel. Weitere Optionen sind die Verbrennung mit reinem Sauerstoff und eine Separation des Kohlendioxids nach der Verbrennung. Abbildung 2



Abbildung 1: CCS – technische Prozesskette

3.3 ABTRENnung VON KOHLENDIOXID IN DER ENERGIEINDUSTRIE

zeigt eine Übersicht der Verfahren vereinfacht im Blockschaltbild.

Alle drei Verfahren befinden sich in der Entwicklung und werden in Pilotanlagen erprobt. Noch benötigt die CO_2 -Abtrennung zu viel Energie, denn je nach eingesetzter Technik werden zwischen 6 bis 12 Prozentpunkte der Energie bei dem Verfahren verbraucht. Die Entwickler legen hierauf ihr Augenmerk und wollen diesen Bedarf an Energie reduzieren, weil es den Wirkungsgrad eines Kohlekraftwerks herabsetzt. Zurzeit haben die besten Kohlekraftwerke einen Wirkungsgrad um 46 Prozent.

CO_2 -Abtrennung vor der Verbrennung

Kohle wird bei diesem Verfahren unter Zugabe von Sauerstoff (O_2) vergast. Die dazugehörige Prozesskette ist schematisch in Abbildung 3 dargestellt.

Die Reaktionsbedingungen sind drastisch, so herrschen in einem Vergasungsreaktor Temperaturen zwischen 1000 und 1700 Grad Celsius bei erhöhtem Druck. Es entsteht ein so genanntes *Synthesegas*, das überwiegend aus Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H_2) besteht. Die weitere Aufbereitung überführt das Kohlenmonoxid unter Zugabe von Wasserdampf in Kohlendioxid und Wasserstoff. Das Kohlendioxid wird bei weiteren Verfahren in so genannte *Gaswäscher* geleitet. Eine Flüssigkeit löst in diesen Aggregaten das Treibhausgas heraus und Wasserstoff bleibt zurück. Alternativ filtern *Membranen* den Wasserstoff heraus. Die *Membran* ist mit einem Sieb zu vergleichen, das Wasserstoffmoleküle durchlässt und Kohlendioxidmoleküle zurückhält.

Für das „Nebenprodukt“ Wasserstoff finden sich vielfältige Verwendungen.

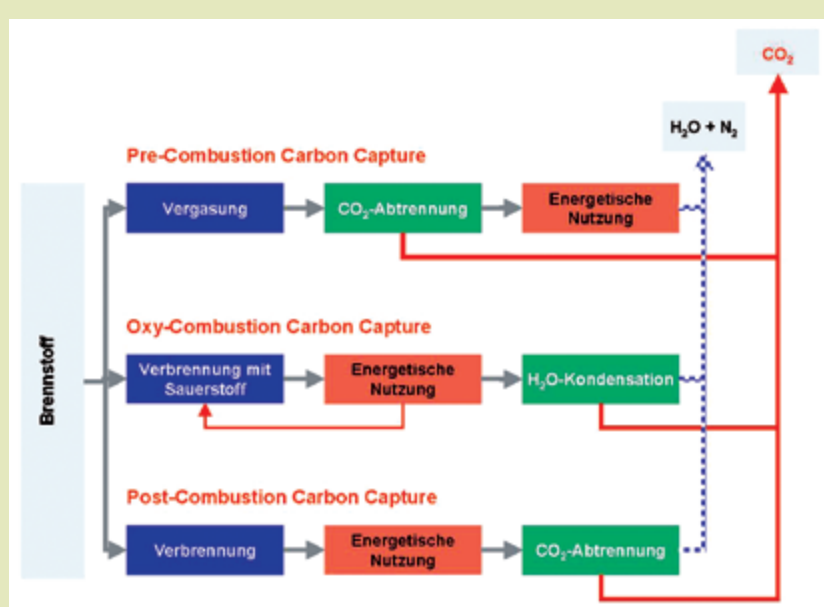


Abbildung 2: Die Verfahren vereinfacht im Blockschaltbild

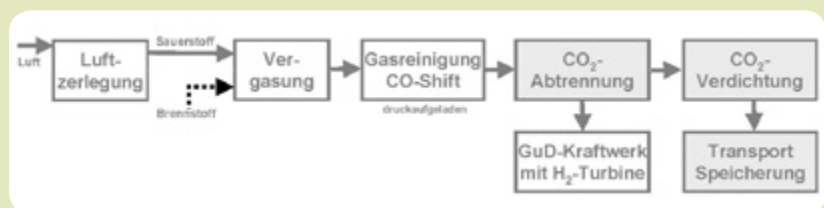


Abbildung 3: Vereinfachtes Schema der Pre-Combustion Carbon Capture

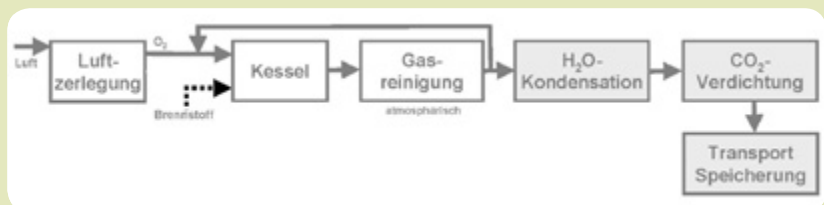


Abbildung 4: Vereinfachtes Schema der Oxy-Combustion Carbon Capture

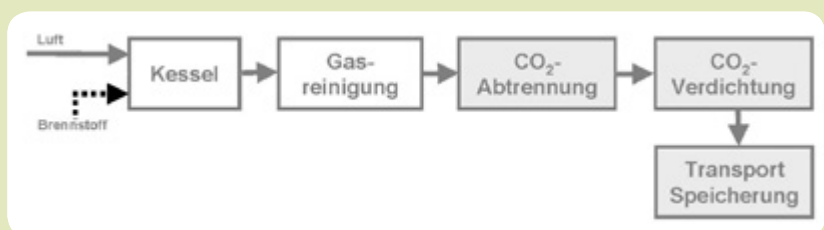


Abbildung 5: Vereinfachtes Schema der Post-Combustion Carbon Capture

Hocheffiziente Gas- und Dampfturbinen-Kombinationskraftwerke können Wasserstoff als Brennstoff zur Elektrizitätserzeugung nutzen. Diese Technik wird bereits in Buggenum, Niederlande sowie Puertollano, Spanien, genutzt.

CO₂-Abtrennung bei einer Verbrennung mit Sauerstoff

Das Verfahren ist unter dem Begriff Oxy-Combustion- oder OxyFuel-Verfahren bei den Fachleuten bekannt. Die Begriffe leiten sich aus dem Englischen ab. Oxy steht für das englische Wort oxygen und heißt in der deutschen Übersetzung Sauerstoff. Fuel ist die englische Übersetzung für Brennstoff. Kohle wird bei diesem Verfahren mit reinem Sauerstoff umgesetzt, wobei dies der Unterschied zum konventionellen Weg ist, die Kohle mit Luft zu verbrennen. Durch die Verbrennung der Kohle mit reinem Sauerstoff könnte die Temperatur unzulässig stark steigen. Zur Kühlung muss kohlendioxidreiches Rauch

gas, das aus der Verbrennung resultiert, im Kreis recirkuliert werden. Dabei besteht das Abgas des Prozesses aus Kohlendioxid und Wasserdampf.

Durch Abkühlung wird der Wasserdampf zu Wasser (H₂O) kondensiert und abgetrennt, das Kohlendioxid bleibt zurück. Es muss aber durch weitere Verfahrensschritte von Begleitstoffen wie Schwefeldioxid (SO₂) gereinigt werden. In Abbildung 4 ist das Verfahren dargestellt.

Der Vorteil des Oxyfuel-Verfahrens ist es, dass das Kohlendioxid zu nahezu 100 Prozent zurückgehalten werden kann. Bei dieser Methode muss mit einer **Wirkungsgradeinbuße** von 8-10 Prozentpunkten gerechnet werden. Besonders die Gewinnung des Sauerstoffs aus der Luft ist energieaufwändig. Dies ist der wesentliche Grund für Einbußen beim **Wirkungsgrad**. Die Oxy-Combustion-Technologie kann nur bedingt als Nachrüstvariante angesehen werden (Abbildung 4).

CO₂-Abtrennung nach der Verbrennung

Bei der Kohleverbrennung im Kraftwerk entsteht ein Rauchgas, in dem das Kohlendioxid mit einer Konzentration zwischen 14 und 16 Prozent vorliegt. Reinigungsverfahren entfernen Stäube, Schwefeldioxid (SO₂) und Stickoxide (NO_x). Schaltet man diesem Gesamtprozess einen weiteren Reinigungsschritt zur CO₂-Abtrennung nach, dann bezeichnet man diesen als Post-Combustion-Capture (Abbildung 5).

Die Reinigung kann mit verschiedensten Verfahren erfolgen (Abbildung 6). Großtechnisch werden für den Waschprozess verschiedene Chemikalien verwendet. So kommen **Amine**, **Aminosäuresalze**, ionische Flüssigkeiten, Karbonate und Ammoniak zum Einsatz.

Verfahrenstechnische Apparate zur Entfernung des CO₂ aus einem Gasgemisch werden **Gaswäscher** genannt. Dort verbindet sich das CO₂ aus dem Rauchgas mit einer Flüssigkeit, die auch Waschflüssigkeit genannt wird. Bei den nasschemischen Verfahren erfolgt die Gaswäsche in einem Absorber mit den oben genannten **Lösungsmitteln**, wobei das CO₂ aus dem Abgas an das Waschmittel gebunden wird. Wird diese Waschflüssigkeit in einem Desorber erhitzt, gibt sie das reine Kohlendioxid wieder ab. Das Waschmittel wird dadurch regeneriert und kann wieder im Kreislauf zurückgeführt werden (Abbildung 7).

Die Regenerierung und Umwälzung des Waschmittels benötigt relativ viel Energie. Daher reduziert sich der **Wirkungsgrad** um 9 bis 13 Prozentpunkte. Von Vorteil ist, dass dieses Verfahren bei bereits bestehenden Kraftwerken nachgerüstet werden kann. Voraussetzung ist, dass genügend Platz für die mehrere Hektar einnehmende

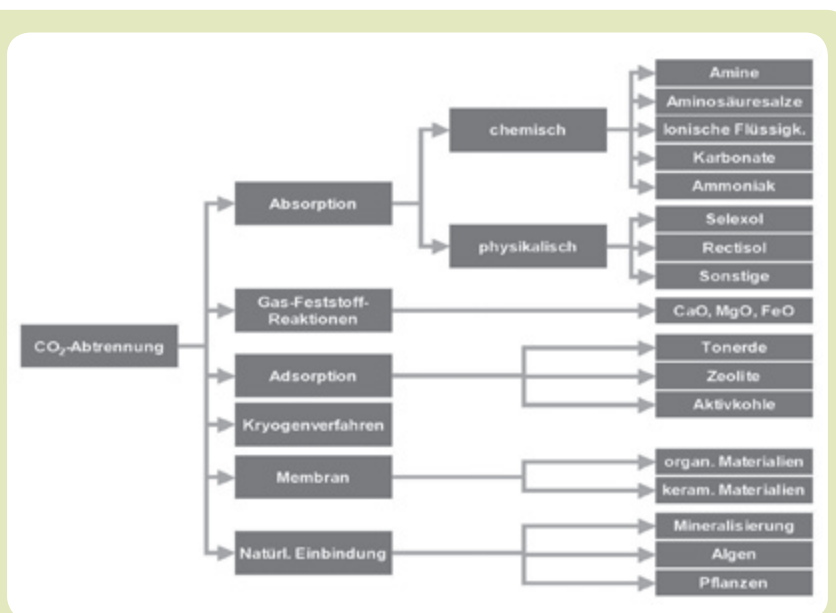


Abbildung 6: Prozessfamilien zur CO₂-Abtrennung aus dem Rauchgas beim Post-Combustion Carbon Capture-Verfahren

Anlagenteile zur Verfügung steht. Abbildung 8 gibt davon einen Eindruck. Viele bestehende Kraftwerke können damit nachgerüstet werden, bzw. im Bau befindliche oder geplante können für eine Nachrüstung vorbereitet werden, sie werden „capture ready“ ausgeführt.

CO₂-Verdichtung und Verflüssigung

Das mit den verschiedenen Verfahren abgetrennte Kohlendioxid wird für den Transport auf Drücke von über 100 bar verdichtet und damit verflüssigt. Damit wird sein spezifisches Volumen stark reduziert, was den Transport erleichtert und überhaupt erst wirtschaftlich werden lässt.

CO₂-Transport

Das im Kraftwerk abgeschiedene Kohlendioxid muss in einem nächsten Prozessschritt zu einem geeigneten Speicherort transportiert werden. Für den Transport kommen Varianten wie Tanklastwagen, Güterzüge, Schiffe oder Pipelines in Betracht. Alle Techniken stehen zur Verfügung und sind bereits

cherort transportiert werden. Für den Transport kommen Varianten wie Tanklastwagen, Güterzüge, Schiffe oder Pipelines in Betracht. Alle Techniken stehen zur Verfügung und sind bereits

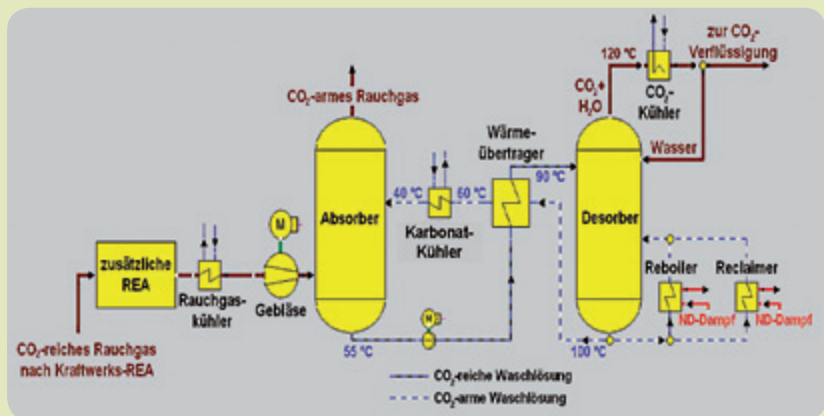


Abbildung 7: Vereinfachtes Schema zur CO₂-Abtrennung mit dem Post-Combustion Carbon Capture-Verfahren

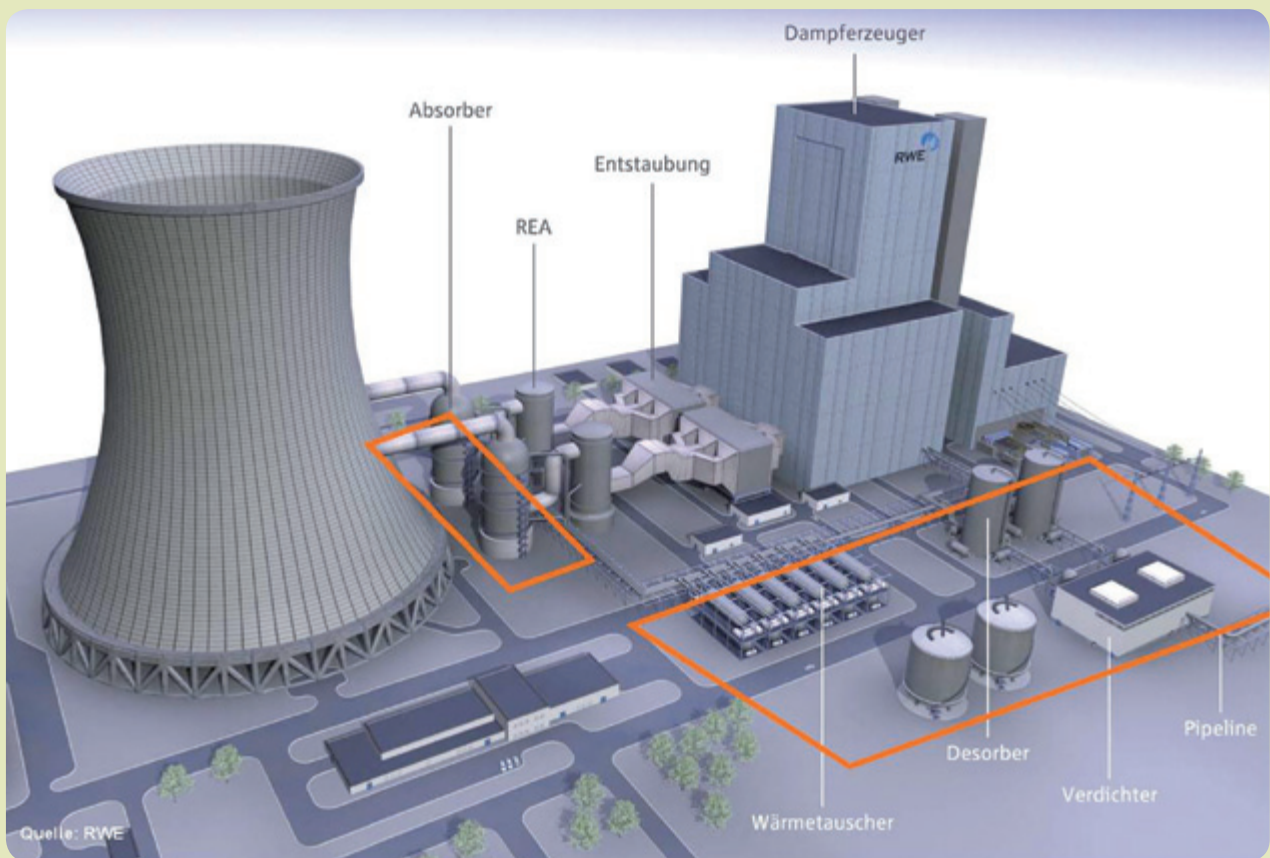


Abbildung 8: Zusätzlicher Platzbedarf für ein Kohlekraftwerk mit Post-Combustion Carbon Capture (Quelle: RWE)

erprobt. Daher besteht kein grundsätzlicher Entwicklungsbedarf mehr. Abbildung 9 zeigt, welche Anzahl an Lastkraftwagen, Bahnwaggons oder Schiffen notwendig wäre, um das Kohlendioxid eines Steinkohlekraftwerks zu transportieren. Ein typisches 600-Megawatt Kraftwerk setzt 4 Millionen Tonnen Kohlendioxid pro Jahr frei. Der Vergleich der verschiedenen Optionen macht deutlich: Aus wirtschaftlichen Gründen kommt nur ein Transport in Pipelines infrage. Um Korrosion in den Rohrleitungen zu verhindern, müssen Wasser und saure Bestandteile abgetrennt werden. Solche Rohrleitungen für Kohlendioxid gibt es bereits in den USA. Seit mehr als 30 Jahren wird es über ein gut 3000 Kilometer lan-

ges Netz zu Gas- und Ölförderstätten transportiert. Dort wird es eingepresst, um den Ertrag an Gas und Öl zu steigern. Man nennt diese Technik: Enhanced Gas and Oil Recovery.

Kosten einer CO₂-Abtrennung und -Speicherung

Die Bandbreite der errechneten Kosten für CCS in den derzeit vorliegenden wissenschaftlichen Veröffentlichungen ist sehr groß. Sehr viele Unbekannte erschweren die Prognosen. Auch gibt es noch keine Anlagen in großindustriellem Maßstab. Faktoren, die den Preis der Technik bestimmen werden, sind hauptsächlich der Markt für fossile Rohstoffe, Entfernung zwischen

Kraftwerk und CO₂-Speicherstätte, die CO₂-Speicherung und deren Monitoring sowie Haftungsfragen. Darüber hinaus spielt der Preis für die CO₂-Zertifikate eine zentrale Rolle. Unbestritten ist, dass die hohen Kosten für CCS im derzeitigen Anfangsstadium mit weiterer Einführung der Technik sinken werden. Eine McKinsey-Studie (Assessing the Economics, 2008) beziffert die Kosten der Demonstrationsanlage auf 60 bis 90 Euro je vermiedener Tonne CO₂. Bei einer großflächigen Verbreitung der Technik ist von einer Senkung auf 30 bis 45 Euro auszugehen.

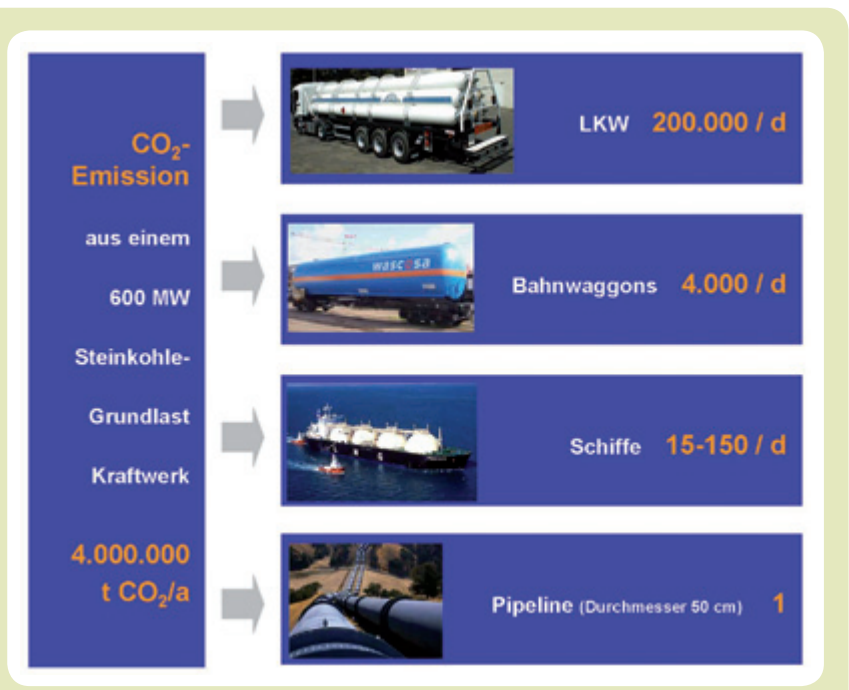


Abbildung 9: Vergleich der verschiedenen Transporttechnologien

AUTOR:
 Klaus Görner ist Professor für Umweltverfahrens- und Anlagentechnik an der Universität Duisburg-Essen.

3.4 Potenziale zur stofflichen Nutzung von Kohlendioxid

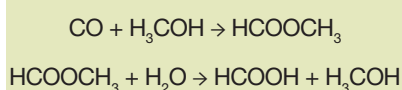
Die durch den Menschen verursachten Emissionen an Kohlendioxid (CO₂) werden derzeit auf 28 Milliarden Tonnen pro Jahr geschätzt. Demgegenüber liegt die derzeitige Nutzung von CO₂ als Industriegas bei ca. 20 Millionen Tonnen pro Jahr, als Chemierohstoff bei etwa 110 Millionen Tonnen pro Jahr. Beide Bereiche können nur einen begrenzten Beitrag zur direkten Reduktion der Kohlendioxidemission leisten, aber einen wichtigen Beitrag zum gesamten Carbon-Management. Mit CO₂ liegt ein potenzieller Wertstoff mit einem interessanten Anwendungsprofil und Wertschöpfungspotenzial vor, der bereits heute als Rohstoff in einer Reihe von bedeutenden chemischen Prozessen von sehr unterschiedlichem Volumen Anwendung findet.

Die bedeutendste industrielle Anwendung ist die Herstellung von Harnstoff mit ca. 107 Millionen Tonnen pro Jahr. Weiterhin wird CO₂ zur Produktion von Methanol (ca. 2 Millionen Tonnen pro Jahr), zyklischer Carbonate (0,04 Millionen Tonnen pro Jahr) und Salicylsäure (0,025 Millionen Tonnen pro Jahr) eingesetzt.

Die dem Kohlendioxid am nächsten stehende Industriechemikalie ist Ameisensäure. Wird Kohlendioxid mit Wasserstoff unter Rhodium- oder Rutheniumkatalyse umgesetzt, so erhält man Ameisensäure. Die Zugabe von Dimethylamin führt zur Bildung von Dimethylformamid (Abbildung 1).

Grundsätzlich kann diese Synthesemethode für Ameisensäure eine Alternative zu herkömmlichen Prozessen sein, bei denen mindestens zwei Reaktionsschritte benötigt werden.

So wird bei der Umsetzung von Kohlenmonoxid und Methanol zunächst Ameisensäuremethylester gebildet, der anschließend zu Ameisensäure und Methanol hydrolysiert wird.



Für beide in Abbildung 1 gezeigten Reaktionen könnte die „flüssig-flüssig-Zweiphasentechnik“ für eine einfache Produktabtrennung sowie für ein effizientes Katalysatorrecycling erfolgreich angewendet werden.

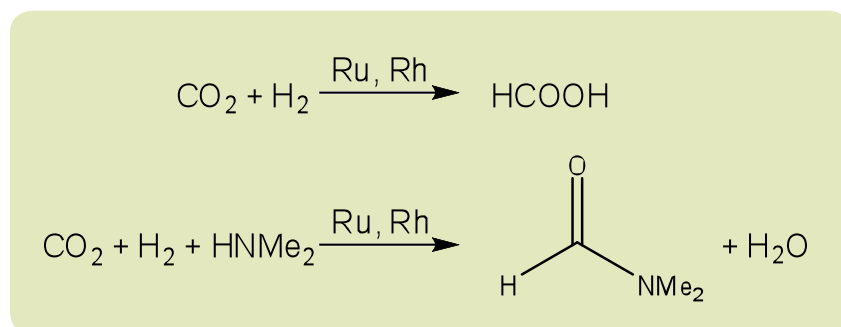


Abbildung 1: Synthese von Ameisensäure und Dimethylformamid

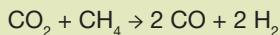
Die „Flüssig-flüssig-Zweiphasentechnik“ steht für chemische Prozesse mit einer wässrigen und einer organischen Phase, die nicht miteinander mischbar sind, wie Wasser und Benzin. Das ist ein bedeutender Verfahrensschritt, weil die Katalysatoren aus seltenen und teuren Edelmetallen bestehen. Für die Synthese von Ameisensäure wurde ein Verfahren mit Spezialchemikalien entwickelt. Das wasserlösliche Katalysatorsystem besteht aus Ruthenium und einem so genannten sulfonierten Phosphinliganden (Triphenylphosphintrisulfat (TPPTS)). Die organische Produktphase besteht aus einem Lösemitel (N, N-Dibutylformamid (DBF)). Das organische Reaktionsprodukt Ameisensäure löst sich in der organischen Phase nach dem Konzept „Gleiches löst Gleiches“, während der wertvolle Katalysator in der wässrigen Phase zurückbleibt.

Für die Synthese von Dimethylformamid (DMF) wird die Reaktion in einem organischen Lösungsmittel wie Toluol bei gleichzeitiger Extraktion des Dimethylformamids mit Wasser durchgeführt. Weitere interessante Zielprodukte sind Carbonsäuren, Ester, Lactone, Polyester, Polylactone, Polycarbonate, cyclische Carbonate sowie Harnstoffderivate.

Eine weitere zukunftssträchtige Option zur stofflichen Nutzung von CO₂ bietet die Herstellung und Weiterverarbeitung von Synthesegas, einer Mischung aus Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H₂). Zur Synthese werden drei Wege diskutiert:

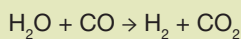
- **Trockene Reformierung** von Methan mit Kohlendioxid (katalytisches Hochtemperaturverfahren),
- **Reduktion** von Kohlendioxid mit Wasserstoff (Umkehr der **Wassergas-Shift-Reaktion**)
- Zusatz von Kohlendioxid zu wasserstoffreichen **Synthesegasen**, wie bereits heute bei der Methanolsynthese praktiziert.

Für großvolumige Anwendungen interessant ist die **trockene Reformierung**, bei der Kohlendioxid mit Methan zu **Synthesegas** umgesetzt wird:



Das Konzept stellt eine Möglichkeit zur Ausbeutung entlegener Erdgasfelder unter Herstellung von Methanol oder von GTL-Produkten (Gas-to-Liquid) dar. Prinzipiell könnte auch gereinigtes Biogas eingesetzt werden. Die derzeit bekannten **Katalysatoren** auf Basis von Edelmetallen sind jedoch zu teuer und neigen zur **Verkokung**.

Gegenwärtig wird die **Wassergas-Shift-Reaktion** zur Herstellung von Wasserstoff aus Kohlenmonoxid unter Freisetzung von Kohlendioxid genutzt:



Die Umkehrung dieser Reaktion ist daher nur sinnvoll, wenn Wasserstoff kostengünstig aus CO_2 -freien Quellen zur Verfügung steht. Das dabei erzeugte **Synthesegas** kann über die **Fischer-Tropsch-Synthese** zur Herstellung von Kraftstoffen (Diesel, Benzin) oder von Chemierohstoffen (Olefine, Paraffine) genutzt werden. Die hierfür benötigten **Katalysatoren** und Verfahrensschritte sind weitgehend verfügbar.

Stand der Technik sind bereits Methanolsynthesen unter Zusatz von Kohlendioxid zu wasserstoffreichen **Synthesegasen**. Kohlendioxid kann aber auch die alleinige Kohlenstoffquelle sein. Diese Prozesse sind ebenfalls nur dann sinnvoll, wenn Wasserstoff aus kohlendioxidfreien Quellen zur Verfügung steht. Methanol besitzt als Synthesegasfolgeprodukt Potenzial im Kraftstoffbereich, unter anderem in Form der Derivate, **Dimethylcarbonat** (DMC) und **Dimethylether** (DME). Über die zeolithkatalysierte **Dehydrierung** können Chemierohstoffe wie **Ethylen** oder **Propylen** (MTO-Verfahren) und Alkylaromaten hergestellt werden.

CO_2 kann ebenfalls zur Herstellung von **Polycarbonaten** eingesetzt werden und bietet damit Zugang zu Märkten im Chemie- und Kunststoffsektor. Polycarbonatkunststoffe werden auf Basis der Umsetzung von Alkenoxiden mit Kohlendioxid bereits industriell angeboten. **Polypropylencarbonat** kann durch **alternierende Copolymerisation** von Propylenoxid und Kohlendioxid mittels basischer Metalloxidkatalysatoren hergestellt werden. Eigenschaften wie Transparenz, Dehnbarkeit sowie biologische Abbaubarkeit lassen eine Anwendung im Bereich der Verpackungsfolien interessant erscheinen.

Im Folgenden werden ein paar Spezialanwendungen von Kohlendioxid in der Synthese dargestellt:

δ -Lacton

Die Telomerisation von Kohlendioxid mit 1,3-Butadien führt zum Beispiel selektiv zu einem δ -Lacton (Abbildung 2). Die Zahl der Nebenprodukte ist jedoch beträchtlich, da auch mehrere Butadien-Moleküle zu Di- und Trimeren miteinander verknüpft sowie Ester und **Säuren** gebildet werden können. Durch gezielte Steuerung der Reaktion mit homogener Palladium-Katalyse in Gegenwart von Phosphin-Liganden (PPh_3 , PCy_3) kann aber eine hohe Selektivität (bis zu 90 Prozent) zum δ -Lacton erreicht werden. Dieses Produkt ist deshalb so interessant, weil es eine umfangreiche Folgechemie ermöglicht. Die Reaktion wurde bereits erfolgreich aus dem Labor- in den Miniplantmaßstab überführt und könnte als nächstes in den Produktionsmaßstab übertragen werden.

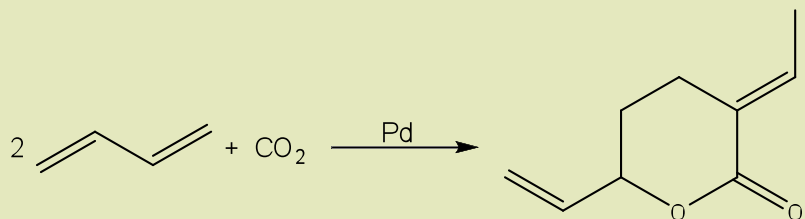


Abbildung 2: Palladium-katalysierte Telomerisation von CO_2 mit Butadien zum δ -Lacton.

Über das δ -Lacton sind weitere interessante Stoffklassen zugänglich, insbesondere Alkohole und Diole. Erstere können zur Herstellung von Weichmachern für PVC, letztere als Ausgangssubstanzen für Polyester und Polyurethane dienen.

Ein Beispiel für die Synthese cyclischer Carbonate ist das Glycerincarbonat. Glycerin fällt als Koppelprodukt bei der Herstellung von Biodiesel aus Raps an: Bis zum Jahr 2010 wird eine weltweite Produktion von 1,2 Millionen Tonnen vorhergesagt. Daher ist es sinnvoll, Glycerin für weitere chemische Umsetzungen zu verwenden. Durch eine direkte Umsetzung mit Kohlendioxid unter Verwendung von homogenen Übergangsmetallkatalysatoren wäre die Synthese von Glycerincarbonat möglich, wobei als Koppelprodukt lediglich Wasser anfällt (Abbildung 3).

Die Natur nutzt Kohlendioxid bei der **Photosynthese** zum Aufbau von Biomasse. In Gewächshäusern kann die CO_2 -Konzentration künstlich angehoben werden und die Biomassenbildung auf diese Weise beschleunigt werden. Hierzu verwenden die Treibhäuser als Kohlendioxidquelle die Abgase von Heizungen.

Darüber hinaus wird im Pilotmaßstab die Abtrennung von Kohlendioxid aus Kraftwerksrauchgasen erprobt. Aus Grünalgen soll per **Photosynthese** Biomasse aufgebaut werden, die wiederum zu Wertstoffen umgesetzt werden kann. Untersucht wird auch, ob durch

Einsatz von **C4-Pflanzen**, die gegenüber **C3-Pflanzen** erhöhte Effizienz zur CO_2 -Fixierung zeigen, Fortschritte zu erzielen sind.

Ferner gibt es bereits einige Ansätze, die **Photosynthese** der Natur zu imitieren. Die so genannte elektrokatalytische und photokatalytische **Reduktion** von Kohlendioxid ist eine elegante Form der Kohlendioxid-Umwandlung. Sowohl heterogene (unter anderem auf Basis von TiO_2 als **Photosensitizer**) als auch homogene (unter anderem auf Basis von Ruthenium und Rhenium-Bipyridyl-Komplexen) **Katalysatoren** wurden und werden intensiv erforscht.

Cyclische Carbonate

Ein Beispiel für die Synthese cyclischer Carbonate ist das *Glycerincarbonat*. Glycerin fällt als Koppelprodukt bei der Herstellung von Biodiesel aus Raps an: Bis zum Jahr 2010 wird eine weltweite Produktion von 1,2 Millionen Tonnen vorhergesagt. Daher ist es sinnvoll, Glycerin für weitere chemische Umsetzungen zu verwenden. Durch eine direkte Umsetzung mit Kohlendioxid unter Verwendung von homogenen Übergangsmetallkatalysatoren wäre die Synthese von Glycerincarbonat möglich, wobei als Koppelprodukt lediglich Wasser anfällt (Abbildung 3).

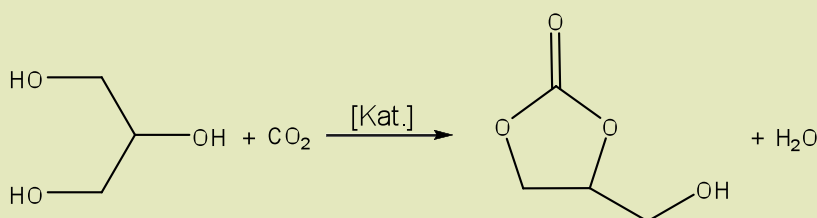


Abbildung 3: Direkte Carboxylierung von Glycerin

Glycerincarbonat kann wegen seiner Ungiftigkeit als Lösungsmittel für Farben und Lacke, in Kosmetika sowie als Basischemikalie für neuartige Polymere verwendet werden. Durch die Umsetzung von Glycerin mit Kohlendioxid kann also aus zwei „Abfall“-Chemikalien ein Wertprodukt erhalten werden. Bisherige Synthesen von Glycerincarbonat verlaufen über mehrere Stufen und gehen meistens von fossilen Rohstoffen aus. Die in Abbildung 3 gezeigte Reaktion ist derzeit Gegenstand der Forschung, und es gilt, geeignete Katalysatoren zu finden, die sowohl eine ausreichende Glycerin- wie auch CO_2 -Aktivierung besitzen.

„Dream reactions“ der modernen Katalyseforschung

Die direkte Carboxylierung von Kohlenwasserstoffen durch formale Insertion von Kohlendioxid in die C-H-Bindung von Alkanen, Aromaten oder Olefinen zählt zu den „dream reactions“ der modernen Katalyseforschung und würde einen eleganten Weg zur Herstellung von Feinchemikalien eröffnen. Unter anderem sind auf diese Weise die Umwandlungen von Methan und Kohlendioxid zu Essigsäure, von Benzol und Kohlendioxid zu Benzoesäure und von **Ethylen** und CO_2 zu Acrylsäure denkbar. Obwohl die Prozesse in vielen Fällen thermodynamisch prinzipiell möglich sind und zum Beispiel die metallorganische Grundlagenforschung wichtige Hinweise zur Möglichkeit katalytischer Kreisläufe geben konnte, existieren derzeit keine effizienten Lösungen für diese Probleme.

Bisherige Systeme erfordern aber noch erhebliche Verbesserungen, bevor eine technisch verwertbare Effizienz erreicht wird.

Herausforderungen und Forschungsbedarf:

Die technische und insbesondere chemische Nutzung von Kohlendioxid kann ein interessanter Ansatz sein, wegen der im Vergleich zu globalen CO₂-Emissionen unterschiedlichen Größenordnungen ist dies allerdings nur ein begrenzter Beitrag zur direkten Reduktion der globalen CO₂-Emissionen.

Die Nutzung von Kohlendioxid ist dennoch in der Gesamtstrategie des „Carbon-Managements“ eine wichtige

Option. Insbesondere bietet sich eine mengenmäßig begrenzte Umwandlung des Abfallstoffes Kohlendioxid in Wertstoffe an. Diese können in vielfältigen Anwendungen wirtschaftlich genutzt werden. Die Herausforderungen in der CO₂-Umsetzung zu Kraftstoffkomponenten und Chemierohstoffen liegen insbesondere im Bereich der Katalyse, der Reaktionstechnik und der Wasserstoffbereitstellung. Beispielsweise sind bei der **trockenen Reformierung** die Katalysatorkosten sowie die zu geringe Standzeit und die Verkokung der **Katalysatoren** ein noch nicht gelöstes Problem. Bei der Herstellung von **Dimethylcarbonat** (DMC) aus Methanol und Kohlendioxid sind die wesentlichen Aufgaben, aktivere **Katalysatoren** sowie Möglichkeiten zur Abtrennung von

Produktwasser aus dem Reaktionsgemisch zu entwickeln. Möglichkeiten bietet hier die **Membrantechnik**, die das Gleichgewicht verschiebt. Bei der Anlagerung von Wasserstoff an Kohlendioxid zu **Ameisensäure** sind die Produktaufarbeitung und die Katalysatorabtrennung großtechnisch noch nicht befriedigend gelöst.

Insgesamt ist die stoffliche Nutzung von Kohlendioxid ein strategisch wichtiges Konzept, das langfristig durch Kombination mit kostengünstigen CO₂-freien Methoden zur Wasserstoffherzeugung und der Nutzung nachwachsender Rohstoffe zu neuen Technologien zur Rohstoffsicherung führen kann.

AUTOR:

Martina Peters ist Forschungsmitarbeiterin bei Bayer Technology Services in Leverkusen.

Michael Röper ist in der BASF in Ludwigshafen zuständig für Science Relations und Innovation Management.

Walter Leitner ist Professor für Technische Chemie und Petrochemie an der RWTH Aachen.

Arno Behr ist Professor für Technische Chemie und Chemische Prozessentwicklung an der TU Dortmund.

3.5 Carbon Capture and Storage (CCS): Anforderungen

CCS ist die Abkürzung für Carbon Capture and Storage. In der Fachwelt versteht man darunter die CO₂-Abtrennung, dessen Transport und Lagerung. Experten untersuchen zurzeit das geowissenschaftliche Potenzial, um die Rahmenbedingungen für die Speicherung von Kohlendioxid (CO₂) in geologischen Formationen näher auszuleuchten.

Ziel der CO₂-Speicherung ist es, die durch den Menschen verursachten Treibhausgasemissionen über einen langen Zeitraum zu reduzieren. Aus Jahrmillionen alten natürlichen Kohlenwasserstoff- und CO₂-Lagerstätten in der Erdkruste lernen wir, dass es geologische Strukturen gibt, die über lange Zeiträume hinreichend dicht sind.

Das Einbringen des Kohlendioxids in geeignete Strukturen erfolgt über speziell dafür ausgerüstete Bohrungen. Bei der Speicherung werden die natürlich vorhandenen Poren in Gesteinen

des tieferen Untergrundes genutzt. Je höher die Dichte (Masse pro Volumen des Kohlendioxids) bei der Speicherung ist, desto größer ist die Menge des speicherbaren Treibhausgases. In Tiefen ab etwa 1000 Meter werden im Untergrund Druck- und Temperaturbedingungen erreicht, unter denen Kohlendioxid eine sehr hohe Dichte aufweist. Seine Dichte entspricht dann fast der von Wasser (Dichte von Kohlendioxid 0,7 Kilogramm pro Liter, Wasser 1,0 Kilogramm pro Liter).

Aus diesem Dichteunterschied resultiert eine Auftriebskraft. Das Kohlendioxid will ähnlich wie ein Holzkörper unter der Wasseroberfläche an die Oberfläche gelangen. Um einen Aufstieg aus der Tiefe an die Erdoberfläche zu verhindern, ist daher eine isolierende Deckschicht notwendig.

In Deutschland bestehen kurz- und mittelfristig nutzbare Möglichkeiten zur Speicherung von Kohlendioxid im in-

dustriellen Maßstab in erschöpften Erdgaslagerstätten. Darüber hinaus diskutieren Geologen die Speicherung in tiefen, Salzwasser führenden Grundwasserleitern von mehr als etwa 1000 Meter Tiefe. Das Speicherpotenzial deutscher Erdölfelder ist im Gegensatz zu anderen europäischen Ländern aufgrund ihres Umfangs und ihrer Größe sehr gering.

Nach den Abschätzungen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) stehen in diesem Rahmen Kapazitäten 20 plus/minus 8 Milliarden Tonnen Kohlendioxid für ein bis zwei Kraftwerksgenerationen, das heißt 40 bis 80 Jahre, zur Verfügung. Weltweit, so schätzen Experten, könnten bis zu 2.000 Milliarden Tonnen des Treibhausgases im Untergrund verbraucht werden. Optimistische Prognosen gehen gar von bis zu 11.000 Milliarden Tonnen aus. Zum Vergleich, im Jahr 2005 betrug die energiebedingten CO₂-Emissionen weltweit 27,3 Milliarden Tonnen (IPCC 2005).

Für den Einsatz von CCS ist es von entscheidender Bedeutung, die technische Dichtigkeit der Speicher zu betrachten. Zwei verschiedene Leckage-Szenarien müssen in diesem Zusammenhang unterschieden werden: zum einen der plötzliche Austritt von Kohlendioxid über die Brunnen an der Einspeisestelle oder noch vorhandene Altbrunnen. Das zweite Szenario ist der langsame Austritt von Kohlendioxid entlang von unbekanntem Störungs- und Bruchzonen oder Bohrungen (siehe Abbildung 1).

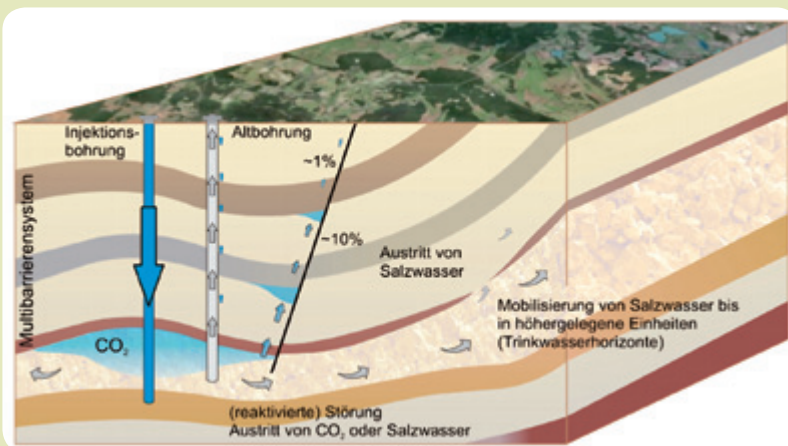


Abbildung 1: Risiken der CO₂-Speicherung. Ausbreitung des CO₂ im Untergrund mit möglichen Leckagewegen und der Möglichkeit der Mobilisierung von salzhaltigen Tiefenwässern

Bislang gibt es nur begrenzte Erfahrungen mit der geologischen CO₂-Speicherung. Umfangreiches theoretisches Wissen sowie praktische industrielle Erfahrung aus der Erdgasförderung und -speicherung sind aber bereits dokumentiert. Dies kann als Basis für das notwendige Risikomanagement und Sanierungsmaßnahmen dienen.

Techniker verwenden für Untersuchungen Analogien und wenden Modelle an. Diese Betrachtungen lassen vermuten, dass bei gründlich ausgewählten und nach Stand der Technik betriebenen geologischen Speichern mehr als 99 Prozent des eingebrachten Kohlendioxids länger als 100 Jahre zurückgehalten werden.

Auch längere Zeiträume ziehen die Experten ins Kalkül: Es spricht einiges dafür, dass der größte Teil des gespeicherten Kohlendioxids, gebunden durch verschiedene physikalische und chemische Mechanismen, für Millionen Jahre festgelegt wird (Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, IPCC, 2005). Gleichwohl gilt es, diese Annahmen durch umfangreiche Forschungsarbeiten zu verifizieren. So müssen für die prognostizierte Speicherdauer die Modellrechnungen und deren Randbedingungen überprüft werden. Manche geologische und hydrologische Faktoren werden in Modellen vereinfacht dargestellt. Aber entspricht dies in ausreichendem Maße der Realität?

Mögliche Gesundheits- und Umwelt Risiken der CO₂-Speicherung sind im Rahmen des Genehmigungsverfahrens für Speicherstätten auszuschließen. Hier ist ein gesellschaftlicher Konsens für die Sicherheitsstandards auszuhandeln. Dazu zählen unter anderem Überwachungsmethoden, die als Monitoring bezeichnet werden. Ein wichti-

ger Aspekt sind die Gegenmaßnahmen bei unzureichendem Abschluss des Kohlendioxids durch die Deckschichten sowie vorhandenen Bohrungen. Es muss weitestgehend ausgeschlossen werden, dass Grundwasserleiter zur Trinkwassergewinnung durch die CO₂-Einspeisungen beeinträchtigt werden.

Während der Einspeisung von Kohlendioxid in einen geologischen Speicher werden die vorhandenen Formationswässer verdrängt (Abbildung 1). Diese verdrängten Wässer könnten unter Umständen die Deckschichten durchdringen oder entlang von natürlichen Störungszonen in flachere Grundwasserleiter gelangen. Dabei ist die Einschätzung von möglichen Umweltrisiken derzeit Gegenstand von Forschungsarbeiten und muss mithilfe von zukünftigen Projekten auf die industrielle Anwendung übertragen werden. Letztlich hängt das Gefahrenpotenzial von den standortspezifischen geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen ab.

Kohlendioxid ist schwerer als Luft. Dies ist bei Leckagen problematisch, denn in Tälern oder Senken sind dadurch erhöhte CO₂-Konzentrationen möglich. Besonders bei der Abwesenheit von Luftbewegungen kann ein Gefährdungspotenzial entstehen. Dabei kann die erhöhte Konzentration des Treibhausgases zu Beeinträchtigungen von Lebewesen und der Umwelt führen. Solche Risiken erfordern ein Sicherheitsmanagement inklusive notwendiger Überwachungsmethoden. Natürliche Quellen bieten sich hier als Studienobjekt an. Sie ermöglichen es, das Gefährdungspotenzial abzuschätzen. Normalerweise wird das ausgetretene Kohlendioxid sofort durch Luftbewegungen verwirbelt und ist damit gänzlich unschädlich, so der Erkenntnisstand. Ein Studienobjekt hierfür ist

z.B. der Laacher See in der Eifel bzw. andere natürliche CO₂-Quellen.

Nur wenn sichergestellt ist, dass das abgeschiedene Kohlendioxid nicht wieder in die Umwelt gelangt, kann diese Technologie ihren Beitrag zur Reduktion der menschlich verursachten Treibhausgase leisten.

In welchem Umfang diese Speicheroptionen zukünftig genutzt werden, hängt unter anderem von den geografischen Rahmenbedingungen ab: Denn nur wenn Emissionsquellen und Speicherort in vertretbarer Entfernung zueinander liegen, lässt sich die Technologie auch wirtschaftlich realisieren.

AUTOR:

Michael Kühn ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Deutschen Geoforschungszentrum (GFZ) der Helmholtz-Gemeinschaft in Potsdam.

3.6 Carbon Capture and Storage (CCS): Speicherung in tiefen geologischen Formationen

Fossile Brennstoffe bleiben auch in den kommenden Jahrzehnten wichtig für die weltweite Energieversorgung, bis eine Versorgung aus alternativen Energiequellen in ausreichendem Maße möglich ist. Durch das Verbrennen fossiler Energieträger wird Kohlendioxid frei gesetzt und sorgt für eine Aufheizung des Klimas. Kohlendioxid (CO₂) fällt auch bei der Förderung von Erdgas und in Industrieprozessen an. In Norwegen, Kanada oder Algerien wird dieses Kohlendioxid in den Untergrund gepumpt und dort dauerhaft gespeichert.

Zurzeit werden die Abtrennung von Kohlendioxidemissionen aus Kohlekraftwerken und deren unterirdische Speicherung in zahlreichen Pilotprojekten untersucht. Das Verfahren ist Hoffnungsträger für die klimaschonende Beseitigung des Treibhausgases Kohlendioxid und trägt den Namen CCS: Carbon Capture Storage. Der Einsatz dieser Technik könnte in Zukunft dazu beitragen, einen Teil der Kohlendioxidemissionen aus der Verbrennung fossiler Rohstoffe zu vermeiden. Die Europäische Union (EU) fördert die Entwicklung der CCS-Technik und hat im Frühjahr 2009 mit dem Erlass der Richtlinie 2009/31/EG die rechtliche Voraussetzung für die unterirdische Treibhausgasspeicherung geschaffen.

im norddeutschen Sedimentbecken befinden sich auch noch in mehr als einem Kilometer Tiefe poröse Gesteine (Abbildung 1). Im Laufe der Erdge-

schichte wurden diese Gesteine noch nicht zu sehr verdichtet. Als Speichermöglichkeiten kommen in Deutschland tiefe, Salzwasser führende Gesteine

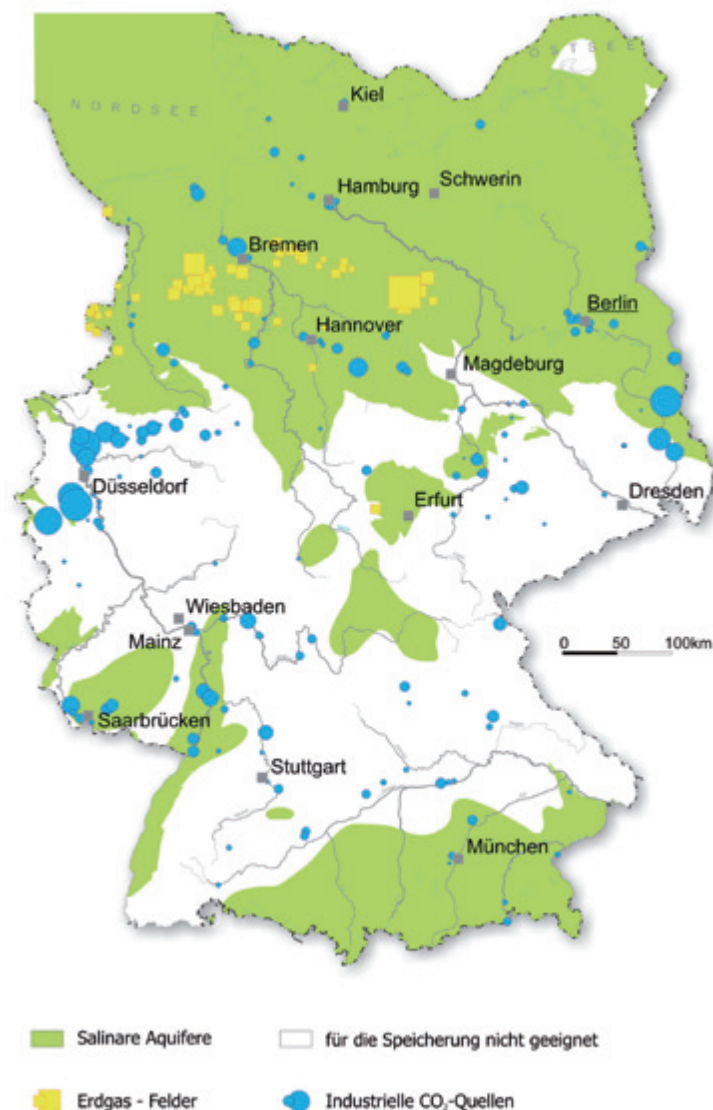


Abbildung 1: Verbreitung der Sedimentbecken sowie großer CO₂-Emittenten und Erdgaslagerstätten.

1. Speichermöglichkeiten

Für die Speicherung werden poröse Gesteinsschichten benötigt. Vor allem

und erschöpfte Öl- und Gaslagerstätten infrage.

Es wurden verschiedene weitere Optionen zur Speicherung von Kohlendioxid im Untergrund vorgeschlagen, die kaum einen wesentlichen Beitrag zur Minderung der Kohlendioxidemissionen leisten können. Zurzeit werden diese wegen befürchteter Umweltauswirkungen und Sicherheitsbedenken kritisch beurteilt. Teilweise sind sie Gegenstand der Grundlagenforschung. Ihre geotechnische Speicherfähigkeit für Treibhausgase kann erst in der Zukunft beurteilt werden. Ein Beispiel hierfür ist die Speicherung von Kohlendioxid in nicht abbaubaren Kohleflözen (Abbildung 2).

Die Eigenschaften des Kohlendioxids hängen von dem Druck und der Temperatur des Gases ab. In Tiefen von weniger als etwa 600 Metern ist das Treibhausgas gasförmig und besitzt nur eine geringe Dichte. Bei geringen Dichten befinden sich relativ wenige Gasmoleküle in einer Volumeneinheit. Mit zunehmender Tiefe nehmen Druck und Temperatur in der Erde zu, und der Zustand des Treibhausgases ändert sich. Bei etwa 700 bis 800 Meter Tiefe beobachten Geologen den Übergang von gasförmigem zu flüssigem oder überkritischem Kohlendioxid. Dabei nehmen die Dichte und damit die Menge des Treibhausgases pro Volumeneinheit stark zu. Mit einer größeren Dichte erhöht sich die Menge des Kohlendioxids pro Volumeneinheit. In

mehr als einem Kilometer Tiefe ist das Kohlendioxid nur noch wenig komprimierbar, weil es sich dann im flüssigen Zustand kaum noch verdichten lässt. Daher ändert sich auch die Dichte des Kohlendioxids mit zunehmender Tiefe nur noch wenig. Nebenbestandteile aus der Verbrennung oder aus der Abscheidung des Kohlendioxids verringern die Dichte, sodass der Übergang zu höherer Dichte erst bei etwas größerer Tiefe, also höheren Drücken, erfolgen wird. Deshalb können mögliche Untertagespeicher erst ab einer Tiefe von 800 Metern große Mengen Kohlendioxid speichern. Außerdem sollten sich über dem Speicher noch weitere Reservespeicher und undurchlässige Gesteinsschichten befinden. Sie ermöglichen Multibarrierenkonzepte für die sichere Speicherung von Kohlendioxid in Tiefen unterhalb 1000 Meter.

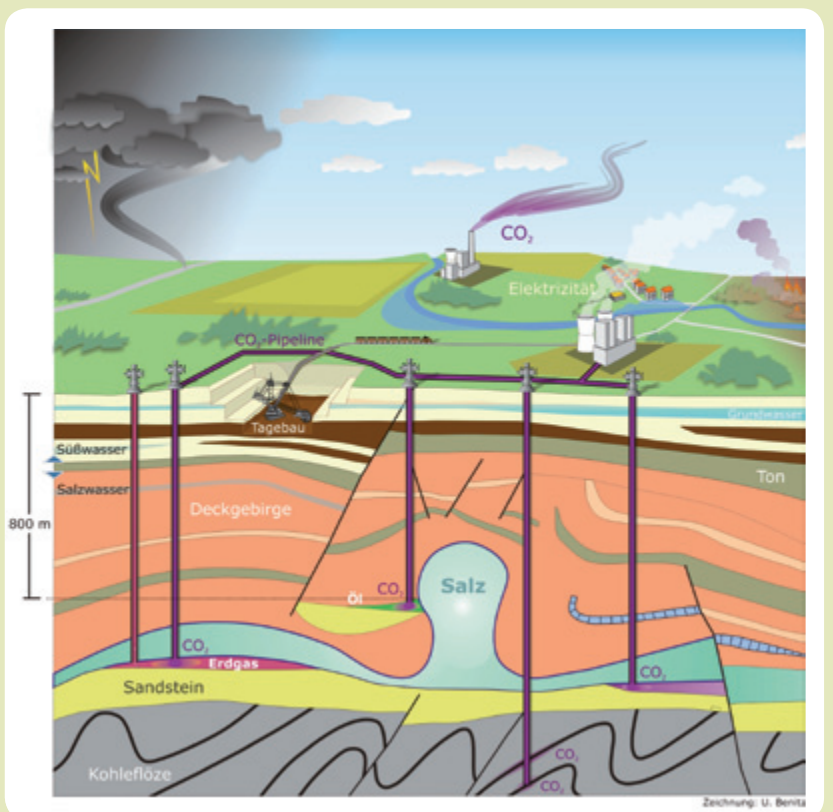


Abbildung 2: Förderung von Energierohstoffen zur Stromerzeugung in Verbindung mit der Speicherung von CO₂ in tiefen Gesteinsschichten.

Für die Lagerung des Treibhausgases kommen überwiegend Sandsteine infrage. Oberflächlich betrachtet erscheinen diese zwar massiv, jedoch besteht etwa ein Fünftel ihres Volumens aus den Porenräumen zwischen den Sandkörnern. Diese mikroskopisch kleinen Hohlräume sind häufig mit Salzwasser, seltener mit Erdgas oder auch mit Erdöl, gefüllt. Kohlendioxid wird bei hohem Druck über Tiefbohrungen in die Poren der Speichergesteine hineingepresst und verdrängt die ursprünglich enthaltenen Medien. Dabei werden aber keine unterirdischen Kohlendioxidseen gebildet, wie mitunter irrtümlich angenommen wird (Abbildung 4). So genannte Kapillarkräfte binden das Gas an die Porenwände des Speichergesteins. Undurchlässige Gesteine wie Steinsalz oder Ton verschließen den unterirdischen Kohlendioxidsspeicher, und das eingepresste Treibhausgas kann nicht entweichen.

3.6 CARBON CAPTURE AND STORAGE (CCS): SPEICHERUNG IN TIEFEN GEOLOGISCHEN FORMATIONEN

Kohlekraftwerke emittieren in Deutschland jährlich insgesamt etwa 300 Millionen Tonnen Kohlendioxid. Dabei setzt ein Kraftwerk je nach Leistung und Brennstoff etwa 1 bis 20 Millionen Kohlendioxid Tonnen pro Jahr frei. Daneben wird CO_2 auch in Zementwerken, Raffinerien, Eisenhütten und der chemischen Industrie freigesetzt. Die großen Mengen, die gespeichert werden sollen, überschreiten die Kapazität künstlicher Kavernen, wie sie für die Speicherung von Erdgas genutzt werden.

Leergeförderte Erdgaslagerstätten

Ehemalige Erdgaslagerstätten werden als bevorzugte Option für die Kohlendioxidspeicherung in Deutschland vorgeschlagen. Diese Lagerstätten haben naturgegeben die Fähigkeit, Gase über viele Millionen Jahre zurückzuhalten – sonst wären sie gar nicht vorhanden. Ein weiteres Argument für die Nutzung dieser Lagerstätten sind die vielen Informationen, die während der Erschließung und Ausbeutung der ein-

tigen Quellen des fossilen Rohstoffs gesammelt wurden. So sind die Gasdurchlässigkeit der Speichergesteine und das Speicherverhalten der Gesteine aus der Produktionsgeschichte der Lagerstätten bekannt. Anhand der Menge des geförderten Erdgases lässt sich die Speicherkapazität für Kohlendioxid gut abschätzen. Das Volumen des geförderten Gases ist proportional zum Porenvolumen, in dem CO_2 gespeichert werden kann. Die technische Infrastruktur der Felder ist bereits vorhanden und kann teilweise für die Speicherung weiter genutzt werden. Mit der CO_2 -Speicherung könnte schon in der Endphase der Erdgasförderung begonnen werden. Die Druckerhöhung durch die Kohlendioxidbefüllung des natürlichen Speichers könnte die Erdgasausbeute der Lagerstätte erhöhen, bevor die Förderung eingestellt wird. Dabei verdrängt Kohlendioxid das restliche Erdgas.

Allerdings sind die Produktionsbohrungen ehemaliger Erdgaslagerstätten ein

Problem, da sie teilweise schon verfüllt sind, ohne dass bei der Verfüllung eine dauerhafte Speicherung von CO_2 vorgesehen war.

Kohlendioxid bildet mit dem Lagerstättenwasser korrosionsfördernde Kohlensäure (H_2CO_3). Deshalb ist sicherzustellen, dass die Bohrungsmaterialien sowie die zur Verfüllung der Bohrungen eingesetzten Materialien der Korrosion widerstehen. Auch nach einigen tausend Jahren müssen die Bohrungen noch dicht sein. Kann das für bereits früher verfüllte Bohrungen nicht sichergestellt werden, sind diese aufwändig und anforderungsgerecht erneut zu verfüllen.

In den größten deutschen Erdgasfeldern könnten etwa 2.750 Millionen Tonnen Kohlendioxid gespeichert werden. Die Speicherkapazität könnte sich jedoch im Einzelfall durch die Einbeziehung zusätzlicher kleiner Lagerstätten im nahen Umfeld der großen Vorkommen erhöhen. Geeignete Lagerstätten

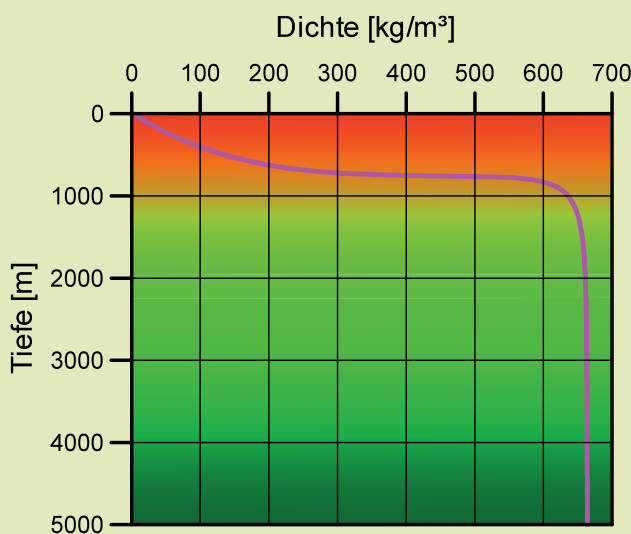


Abbildung 3: Dichte reinen Kohlenstoffdioxids unter typischen Druck- und Temperaturbedingungen im Untergrund.

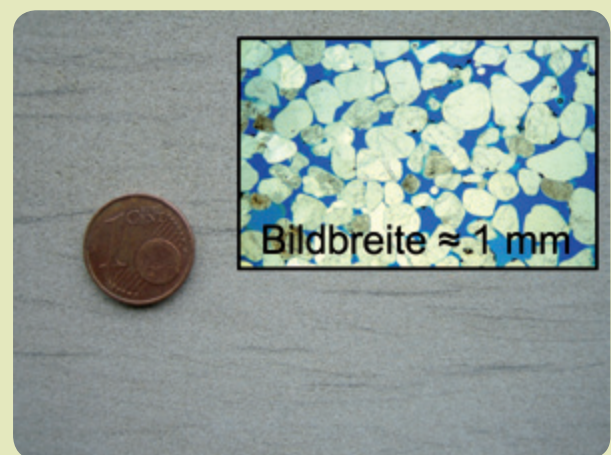


Abbildung 4: Sandstein der Stuttgart-Formation, in die bei Ketzin, nahe Potsdam, CO_2 für Forschungszwecke eingespeist wird. In der Dünnschliffaufnahme ist der Porenraum zwischen den Sandkörnern mit blauem Harz gefüllt.

finden sich im Norddeutschen Becken, in einem breiten Band, das sich zwischen Hannover und Hamburg vom Emsland im Westen bis zur Altmark im Osten erstreckt (Abbildung 1).

Ehemalige Erdöllagerstätten

Deutschland besitzt nur kleine Öllagerstätten, die nur wenig Kohlendioxid aufnehmen könnten. Größere Speichermöglichkeiten bieten die Öllagerstätten im Untergrund der norwegischen und britischen Nordseesektoren. Die Möglichkeit einer zusätzlichen Ölförderung durch CO₂-Injektion macht diese Lagerstätten als Speicher besonders interessant. Dieses Verfahren zur Steigerung der Ausbeute erschöpfter Öllagerstätten durch Einpressen von Kohlendioxid wird bereits seit etlichen Jahren in den Vereinigten Staaten eingesetzt oder auch in Kanada angewandt. Der Transport zu den Ölfeldern per Pipeline oder Schiff ist zwar technisch möglich, aber angesichts schwankender Ölpreise ein wirtschaft-

liches Risiko für die erforderlichen langfristigen Investitionen, besonders für die Rohrleitungen, die ortsfest installiert werden.

Tiefe Salzwasser führende Grundwasserleiter

Die porösen Sandsteine im Untergrund sind meistens mit Grundwasser gefüllt. Aus den flachen Grundwasserleitern, so genannten Aquiferen, in Tiefen von einigen Zehnermetern gewinnen wir unser Trinkwasser. Das Grundwasser in mehr als einem Kilometer Tiefe ist hingegen meist extrem salzig. Chemische Analysen bestimmen Salzgehalte von 100 bis 300 Gramm pro Liter. Besonders unter Norddeutschland befinden sich solche salzreichen (salinaren) Grundwässer. Abgesehen von einer begrenzten Nutzung dieser Solen in Thermal- und Heilbädern sind diese Wässer praktisch unbrauchbar.

Geologen prüfen die Speicherung von Kohlendioxid in tiefen Salzwasser

führenden Grundwasserleitern, so genannten Aquiferen. Die Kapazität salinärer Aquifere zur Aufnahme von CO₂ ist vermutlich wesentlich größer als die der Erdgaslagerstätten. Sie lässt sich aber nur schwer bestimmen. Bisher waren die tiefen salinaren Grundwasserleiter wirtschaftlich uninteressant und wurden daher kaum detailliert untersucht. Zudem ist die Speicherkapazität nicht nur von Gesteinseigenschaften abhängig, sondern auch von der Art der Einspeisung. Auch Qualitätsanforderungen an Speicher sind noch nicht definiert. Weitere Unbekannte der Zukunftsvision sind die Reaktion der Bevölkerung auf Speicherrisiken und der Kostenvergleich mit anderen Möglichkeiten zur Minderung von Kohlendioxidemissionen.

Natürliche Sandsteinschichten saugen das Kohlendioxid nicht auf wie ein Schwamm Wasser. Vielmehr sind sie komplexe Gebilde mit internen Strukturen. In ihnen befinden sich Schichten mit weniger gasdurchlässigen Ge-



Abbildung 5: Komplexe Wechsellagerung grob- und feinsandiger Schichten in einem Oberflächenaufschluss von Buntsandstein, einem unter Norddeutschland weit verbreiteten Speichergestein.



Abbildung 6: Ehemalige, noch nicht verfüllte Erdgasbohrung.

3.6 CARBON CAPTURE AND STORAGE (CCS): SPEICHERUNG IN TIEFEN GEOLOGISCHEN FORMATIONEN

steinen. Deshalb verbreitet sich das Kohlendioxid nur unregelmäßig in den Gesteinsschichten, und das Porenvolumen wird nur teilweise befüllt. Einige Bereiche der Gesteinsspeicher werden umflossen, und das Treibhausgas kann nicht in deren feinen Poren eindringen und die Sole verdrängen (Abbildung 5).

Aufgrund von Erfahrungen aus der Gas- und Ölförderung und der Erdgasspeicherung in porösen Gesteinen weiß man, dass der effektiv zugängliche Anteil der Speicher sich nicht genau vorhersagen lässt. Je mehr Bohrungen zur gezielten Dosierung und Injektion des Kohlendioxids in gut durchlässige Bereiche des Speichers verwendet werden, desto effizienter lassen sich die Speicher nutzen – aber desto höher sind auch die Kosten für die Speicherung.

Das Einbringen von Kohlendioxid in die Speichergesteine erhöht den natürlichen Druck im umgebenden salinaren Grundwasserleiter. Bei der Auswahl

geeigneter Gesteinsformationen ist zu beachten, dass die spezifische Dichte des flüssigen Kohlendioxids (CO_2) geringer ist als die des salzhaltigen Lagerstättenwassers. Das leichtere Kohlendioxid steigt der Auftriebskraft folgend nach oben. Dieser Effekt lässt sich beim Öffnen von Bier- oder Sektflaschen beobachten. Auch dort steigen Kohlendioxidblasen nach oben auf und sammeln sich an der Flüssigkeitsoberfläche an.

Als Speicher kommen daher nur geologische Strukturen infrage, die Fallen für das aufsteigende Kohlendioxid besitzen und undurchlässige Barrieren bilden, unter denen das aufsteigende Kohlendioxid zurückgehalten wird. Nur so ist eine ungewollte Ausbreitung des verflüssigten Gases im salinaren Grundwasserleiter begrenzt.

Das eingeleitete Kohlendioxid löst sich mit der Zeit im Lagerstättenwasser und kann mit Mineralien der Speichergesteine reagieren. Dabei bilden sich feste

Karbonate. Allerdings verlaufen diese Prozesse langsam, sodass zumindest während der CO_2 -Injektion der Poren- druck im Gestein erhöht wird. Dadurch werden das Lagerstättenwasser und das Gestein geringfügig zusammengedrückt. Es ist jedoch nicht zu vermeiden, dass Sole aus den Rändern des Speichers herausgepresst wird.

Für das verdrängte Lagerstättenwasser wird zusätzliches Volumen benötigt. Es soll durch die Kompression der Aquifere im Umfeld der Speicherstruktur entstehen.

Wissenschaftler halten nur solche Sandsteinschichten als Speicher geeignet, die durch regional verbreitete undurchlässige Gesteine überlagert sind, die sowohl das Kohlendioxid, als auch das im Umfeld der Speicher verdrängte Salzwasser zurückhalten können. Als Deckschichten für CO_2 - Speicher kommen Ton- und Steinsalzschiefer infrage, weil sie besonders dicht und häufig weit ausgedehnt sind.

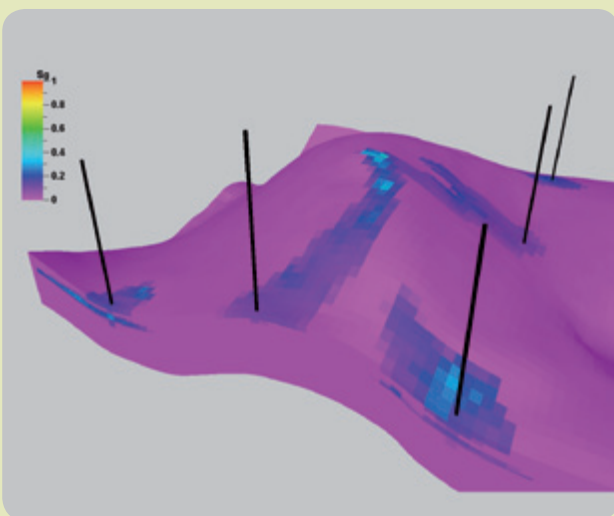


Abbildung 7: Simulation der CO_2 -Gassättigung (Sättigungsgrad, S_g) in einer salzwasserführenden, porösen Sandsteinformation (magenta). Das CO_2 (blau) wandert in der kissenförmig ausgeprägten Struktur von den fünf Injektionsbohrungen an den Flanken aufgrund von Dichteunterschieden zum höchsten Punkt.



Abbildung 8: Geotouristische Nutzung eines natürlichen CO_2 -Austritts in der Eifel.

Aufgrund des für die Salzwasserverdrängung und Kompression erforderlichen Volumens reduziert sich die Speicherkapazität der Aquifere. Nur ein Teil der insgesamt vorhandenen Kapazität im tiefen Untergrund kann für die CO₂-Speicherung genutzt werden. Geologen schätzen die Speicherkapazität der tiefen, mit Salzwasser gefüllten Aquifere in Deutschland auf mehrere Milliarden Tonnen. Dabei lässt sich der nutzbare Teil erst nach intensiver Erkundung genau ermitteln. Die Grundlagen dafür werden derzeit in dem Projekt „Speicherkataster von Deutschland“ gemeinsam von Bund und Ländern erarbeitet.

2. Sicherheit und Überwachung von CO₂-Speichern

Bedingung einer geologischen Speicherung von Kohlendioxid ist die dauerhafte und sichere Lagerung des Gases im Untergrund. Die Gesundheit und das Leben von Betriebspersonal und Bevölkerung über den Speicherstandorten dürfen nicht gefährdet werden. Darüber hinaus sind negative

Auswirkungen auf andere Umweltbereiche zu vermeiden.

Standortauswahl

Eine sorgfältige Standortauswahl ist die Grundvoraussetzung für einen sicheren Speicherbetrieb und vermeidet den ungewollten CO₂-Austritt. Die Standortauswahl muss auf einer detaillierten Untersuchung des Untergrundes beruhen. Sie liefert den Geologen die erforderlichen Daten zur Bewertung der Speichereignung. Dafür werden geowissenschaftliche Methoden wie bei der Erkundung von Öl- und Gaslagerstätten angewendet. Dies sind insbesondere seismische Verfahren. Ähnlich wie beim menschlichen Körper messen Geophysiker die Reflexionen langwelliger Schallwellen an Schichtgrenzen, um die Strukturen des Untergrundes abzubilden (Abbildung 10). In potenziell geeigneten Strukturen werden per Tiefbohrungen Proben der Gesteine und Fluide (Wasser, Gas, Öl) genommen. In den Bohrlöchern erfolgen hoch auflösende Messungen der Gesteinseigenschaften.

Deckschichten

Die Deckschichten von natürlichen Kohlendioxid- und Erdgaslagerstätten haben das Gas über mehrere Jahrmillionen zurückgehalten. Daher kommen sie auch für die Speicherung von abgetrenntem Kohlendioxid aus Industrieanlagen in Frage. Sie bestehen aus mächtigen Steinsalz- und Tonschichten. Ihre Mächtigkeit und Zusammensetzung sind in Deutschland aus vielen Bohrungen bekannt und erlauben eine Bewertung ihres Barriereverhaltens gegenüber Gasen. An möglichen Speicherstandorten werden Abdeckschichten detailliert untersucht. Geotechniker gehen der Frage nach: Wie hoch ist die maximale Gasdruckbelastung durch die Kohlendioxidverpressung – ohne, dass die Sicherheit der Deckschichten gefährdet wird? Bruchstrukturen in den Gesteinsschichten über dem Speicher müssen bei der Erkundung der Speicher erkannt werden. Auch deren Belastbarkeit bei Druckerhöhung muss ermittelt werden. Aus Sicherheitsgründen sollten CO₂-Speicher von mehreren undurchlässigen Schichten überla-



Abbildung 9: Erprobung neu entwickelter mobiler Messgeräte zur raschen Kartierung gasförmiger CO₂-Austritte.

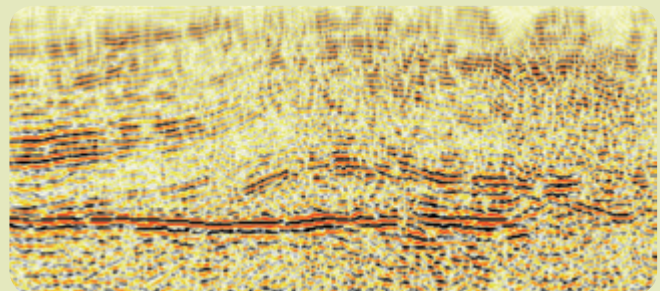


Abbildung 10: Seismische Abbildung einer möglichen Speicherstruktur im Untergrund.

gert werden, zwischen denen poröse Gesteine vorhanden sind. Unvorhergesehen entweichendes Gas könnte so aufgefangen werden. Die Wechselagerung von Speichergesteinen mit undurchlässigen Schichten ermöglicht Multibarriersysteme für die langfristig sichere Speicherung von Kohlendioxid.

Verwerfungen

Die Kräfte im Inneren der Erde, führen zu Brüchen und Bewegungen der Erdkruste, die unter anderem Vulkane oder Gebirge hervorrufen. Brüche, die zur Verstellung von Erdschichten führen, werden Verwerfungen genannt. Erdgeschichtlich junge Brüche, wie der Rand des Oberrheintals, sind natürliche Aufstiegswege für CO₂ und Mineralwässer aus der Tiefe. Verwerfungen, an denen Bewegungen stattfanden, verheilen im Lauf der Zeit durch Mineralausfällungen. Gase und Flüssigkeiten können diese Verwerfungen dann nicht mehr durchdringen. Solche Verwerfungen bilden auch Fallenstrukturen für Erdöl- oder Erdgaslagerstätten. An jungen Verwerfungen finden noch Bewegungen statt.

Hier sind daher Aufstiegsmöglichkeiten für Flüssigkeiten zur Erdoberfläche zu erwarten. CO₂-Speicher sollten daher ausschließlich in geologisch stabilen Gebieten eingerichtet werden, um das Risiko des Gas- und Salzwasseraufstiegs entlang von Verwerfungen zu minimieren.

Die Bestimmung der Durchlässigkeit von Störungen im Bereich des Speichers ist eine wichtige Aufgabe der Speichererkundung. Dabei ist nicht nur der Bereich der unmittelbaren Deckschichten, sondern auch die weitere Umgebung des Speichers zu untersuchen. Gerade der Austritt verdrängten Salzwassers an die Erdoberfläche wäre für das dortige Ökosystem problematisch. Eine zu starke Erhöhung des Speicherdrucks könnte auch alte, dichte Störungen wieder reaktivieren. Mit geomechanischen Berechnungen müssen Geologen die Belastbarkeit von Verwerfungen ermitteln. Die Ergebnisse sollen zulässige Drücke bei der Speicherung definieren.

Bohrungen

Ein Sicherheitsrisiko für die Speicherung von Kohlendioxid in erschöpften Erdöl- und Erdgaslagerstätten können die bereits verschlossenen, ehemaligen Produktionsbohrungen sein (Abbildung 6). Besonders bei Bohrungen, die in der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts geschlossen wurden, sind gelegentlich Leckagen aufgetreten. Derartige Leckagen können durch Zementzerfall des Füllmediums und Korrosion der Verrohrungen ausgelöst werden. Mittlerweile stehen bessere Materialien und Verfahren zum Verschluss von Bohrungen zur Verfügung. Ebenfalls konnten die Eigenschaften der Zemente gezielt verbessert werden. Deshalb sind die Häufigkeit und die Fließraten von Leckagen zurückgegangen. Ein Fortschritt, weil Aufbohren und Abdichten von Altbohrungen hohe Kosten verursachen kann. Zur Überprüfung der Zementation der Verrohrung von Bohrungen existieren seit 30 Jahren Messverfahren. Diese ermöglichen eine Beurteilung möglicher Schwachstellen bereits verfüllter, heute nicht mehr zugänglicher Bohrlöcher. Diese müssen nicht notwendigerweise undicht sein. Eine Überwachung oder Neuverfüllung könnte aber angebracht sein.

Zur Verfüllung von CO₂-Injektionsbohrungen stehen heute spezielle Materialien zur Verfügung. In neue Bohrungen lassen sich zudem Sensoren für Druck, Temperatur und Schallwellen im Bohrloch integrieren. Veränderungen während oder nach der Injektion können rechtzeitig erkannt, und Undichtigkeiten vermieden werden.

Simulationen

Computersimulationen visualisieren das zeitliche und räumliche Verhalten des eingebrachten Kohlendioxids.



Abbildung 11: Plastisches Steinsalz hat einen eingedrungenen Basaltgang völlig eingeschlossen und dessen Klüfte und Poren vollständig erfüllt (Kalibergwerk Merkes).

Wissenschaftler nutzen diese Werkzeuge um Szenarien zur Ausbreitung des Treibhausgases im Speicher zu berechnen. Sie können damit optimale Einleitstrategien entwickeln (Abbildung 7): Lage, Anzahl und Injektionsraten der Bohrungen müssen so ausgelegt sein, dass bei der Speicherung die Festigkeitsgrenzen der überlagernden Gesteinssäule nicht erreicht werden.

Ferner lassen sich Modelle für chemischen Veränderungen der Gesteine durch Reaktionen mit dem Kohlendioxid entwickeln. Diese könnten Auswirkungen auf die Porosität und die Durchlässigkeit der Speicher- und Barrieregesteine haben. Daraus können geotechnische Probleme oder Sicherheitsrisiken hervorgehen. Daher sind geochemische Modellierungen Teil standortspezifischer Risikoanalysen. Diese enthalten unter anderem Untersuchungen über mögliche Auswirkungen auf genutzte Grundwasservorkommen oder ökologische Auswirkungen an der Erdoberfläche im Fall eines CO₂-Austritts.

Natürliche Vorkommen

An natürlichen Austritten CO₂-reicher Gase und CO₂-führender Quellwässer lassen sich Prozesse untersuchen, die auch bei der Leckage von CO₂ aus unterirdischen Speichern auftreten können. So gibt es beispielsweise in der Eifel natürliche CO₂-Austritte. Dort können Verfahren zum Nachweis von möglichen Leckagen und Geräte zur Bestimmung der Gasflüsse erprobt werden. Forscher untersuchen die Auswirkungen der Kohlendioxidaustritte auf die umgebenden Ökosysteme. Die Erkenntnisse können für die Risikobewertung von CO₂-Speichern genutzt werden:

- Aufsteigende Gase müssen sich ihren Weg durch enge Klüfte und

Poren zur Oberfläche suchen. Daher sind die gemessenen Fließraten begrenzt. Eine plötzliche Entleerung des gesamten Speicherinhalts ist nicht möglich.

- Natürliche Austritte von Kohlendioxid sind üblicherweise auf einige Quadratmeter begrenzt, in deren Umfeld es bei hohen Gasflüssen zum Absterben der Vegetation kommt.
- Menschen wohnen oft in unmittelbarer Nähe natürlicher CO₂-Austritte, die häufig für Kuranwendungen oder touristisch genutzt werden. Problematische Gebiete sind durch Zäune oder Absperrungen gesichert (Abbildung 8).
- Es gibt auch natürliche Kohlendioxidlagerstätten, ohne Austritte an der Oberfläche, die als Beispiele für langfristig sichere Speicherbedingungen studiert werden.

Industrienerfahrung

Eine ganze Reihe von Regelungen und Erfahrungen liegt bereits vor: So könnten die vom Deutschen Institut für Normung für die Erdgasspeicherung erstellten Normen 1918-1 und 1918-2 als Vorbilder für ein Regelwerk zur Speicherung von Kohlendioxid (CO₂) dienen. Allerdings ist eine Anpassung an die Anforderungen der Kohlendioxid-speicherung notwendig. Bereits seit etwa 1904 spiegeln Verordnungen für die Ausführungen von Tiefbohrungen den Stand der Technik wider.

Der erste deutsche Untergrundspeicher für Stadtgas wurde schon 1953 in Betrieb genommen. Zurzeit befinden sich unter Deutschland 23 Erdgasspeicher in porösen Gesteinen, bei deren Betrieb es bisher zu keinen größeren Speicherhavarien mit schwer wie-

genden Folgen kam. In Nordamerika werden seit ungefähr 20 Jahren die aggressiveren und toxischeren Gas-mischungen aus Kohlendioxid und Schwefelwasserstoff (H₂S), sogenanntes Sauer gas, in tief liegende Gesteinsschichten verpresst. Seit 1996 findet die CO₂-Speicherung im Untergrund der Nordsee statt. Diese Erfahrungen zeigen, dass die Einspeicherung von Gasen im Untergrund beherrscht werden kann.

Überwachung von CO₂-Speichern

Die Überwachung von CO₂-Speichern und der technischen Anlagen an der Erdoberfläche kann sich zahlreicher bestehender geophysikalischer und geochemischer Methoden zum direkten, oder indirekten Nachweis von Kohlenstoffdioxid bedienen. Neuere Verfahren werden derzeit entwickelt. Zum Beispiel entwickeln Forscher Sonden für den Einsatz in Bohrungen und testen diese im deutschen Forschungsspeicher Ketzin bei Potsdam. Die Entwicklung zielt auf kostengünstigere, automatisierte Verfahren mit verbesserter Auflösung. Welche Überwachungsmaßnahmen für unterirdische CO₂-Speicher eingesetzt werden, orientiert sich an einem Zeitplan, der zwischen Planungs-, Betriebs- und Beobachtungsphase nach Abschluss der Gasinjektion unterscheidet.

Bevor Kohlendioxid in den Untergrund gespeichert werden kann, müssen die Ökosysteme im Umfeld des Speichers genau kartiert werden. Die variablen Kohlendioxid-Ströme aus dem Boden in die Atmosphäre müssen gemessen werden. Auch die unmerklichen, aber messbaren Bewegungen von Speicherschichten und Deckgebirge müssen beobachtet werden. Diese Bestimmung des Ausgangszustands vor der CO₂-Speicherung ermöglicht den

Wissenschaftlern die Beobachtung der CO₂-Ausbreitung im Untergrund und die Ortung und Messung möglicher Leckagen während und nach der Injektionsphase.

Die indirekte Beobachtung des Kohlendioxids im Speicherkörper ist durch 3D-Seismik möglich. Zeitliche und räumliche Veränderungen des Gasgehaltes lassen sich mithilfe von aufeinander folgenden seismischen Aufnahmen erkennen. Dreidimensionale geologische Modelle des Untergrundes sind zur Interpretation dieser Aufnahmen erforderlich. Je nach Untergrundbedingungen verursachen erst mehrere Tausend Tonnen gasförmigen Kohlen-

dioxids messbare Veränderungen der seismischen Geschwindigkeiten im Untergrund.

Geringere Mengen flüssigen oder gelösten Kohlendioxids könnten beispielsweise durch unerkannte Fehlstellen in den Deckschichten in höher gelegene Grundwasserleiter gelangen. Zum Nachweis von Salzwasser, welches in höher gelegene Schichten aufsteigen könnte, wenden die Wissenschaftler geoelektrische oder chemische Methoden an.

Je nach dem zu überwachenden Tiefenbereich werden unterschiedliche Verfahren benötigt. Eine umfassende

Überwachung des Speichers, seiner Umgebung, der Deckschichten und der Erdoberfläche ist für den sicheren Betrieb unumgänglich. In standortspezifischen Sicherheits- und Überwachungsplänen müssen Methoden und deren Einsatz festgelegt werden, damit Abweichungen vom erwarteten Speicherverhalten noch vor dem Austritt von Gas oder Sole an der Erdoberfläche erkannt werden können. Nur so können die Ursachen rechtzeitig ermittelt und eventuell entsprechende Gegenmaßnahmen eingeleitet werden.

AUTOR:

Franz May ist Leiter des Arbeitsbereiches Geologische CO₂-Speicherung der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Hannover.

3.7 Verminderung von Kohlendioxid durch Biomassewachstum

Aufforstung als Alternative zur chemisch-technischen Kohlendioxid Sequestrierung

Um dem Klimawandel entgegenzuwirken werden verschiedene technische Konzepte diskutiert, die auf eine Abtrennung und Lagerung des Kohlendioxids (CO_2) aus Kraftwerksabgasen abzielen. Zur Abtrennung werden Waschflüssigkeiten (z.B. *Amine*) eingesetzt, die das CO_2 chemisch binden. Die Aufarbeitung der Waschflüssigkeiten für den wiederholten Einsatz ist mit einem beträchtlichen Energieaufwand verbunden. Das abgetrennte CO_2 kann dann in geologischen Formationen oder in den Ozeanen eingelagert werden (Sequestrierung). Diese Verfahren befinden sich gegenwärtig in der Entwicklung.

Diese chemisch-technischen Konzepte zielen auf eine Minderung des zusätzlichen Eintrags von CO_2 in die Atmo-

sphäre ab. Eine wirkungsvolle Alternative stellt aber die direkte Abtrennung von CO_2 aus der Atmosphäre durch die Bildung von pflanzlicher Biomasse dar. Damit wird effektiv CO_2 aus der Atmosphäre in Biomasse gebunden und steht anschließend als Rohstoffquelle für Chemikalien zur Verfügung. Auf diese Möglichkeit, dass „das effizienteste und über Millionen Jahre erprobte System zur CO_2 -Sequestrierung die terrestrische *Biosphäre*“ ist, hat bereits frühzeitig die Fachgruppe Umweltchemie und Ökotoxikologie der Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh) in einem Positionspapier hingewiesen.

Am aussichtsreichsten ist dabei die großflächige Anpflanzung von Bäumen. So können z.B. in unseren Breiten mit einem Hektar Pappelholzleistungsklonen bis zu 20 Tonnen pro Jahr Holz produziert werden, was rund 37 pro Jahr gebundenem Tonnen CO_2

entspricht! Zusätzlich zur Bildung des Holzes werden rund 300 Tonnen Kohlenstoff (entspricht 1.100 Tonnen CO_2) im Laufe von 100 Jahren im Boden als Humus abgelegt. Insgesamt werden in diesem Zeitraum also rund 3.800 Tonnen CO_2 pro Hektar gebunden. Weltweit unterscheiden sich die erzielbaren Werte jedoch in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Klimazonen und Art der Bepflanzung (siehe Tabelle 1).

Im Laufe von 100 Jahren können beträchtliche Mengen CO_2 in aufgeforsteten Flächen gebunden werden. Aufwand und Ertrag stehen in einem angemessenen Verhältnis: Die Kosten pro sequestrierter Tonne CO_2 liegen bei 1-5 €. Bereits jetzt ist die Tonne CO_2 im Emissionshandel deutlich teurer (gegenwärtig rund 12 € pro Tonne CO_2). Demgegenüber werden die Kosten für die chemisch-technischen Verfahren auf rund 50 € pro sequestrierter Tonne CO_2 geschätzt.

Die gegenwärtige jährliche weltweite Emission von 26 Milliarden Tonnen CO_2 könnte daher rechnerisch durch Aufforstung und Humusbildung von 480 Millionen Hektar (tropischer Regenwald) oder 3 Milliarden Hektar (Halbwüste) komplett gebunden werden!

Die notwendigen Flächen existieren. Im Laufe des letzten Jahrhunderts sind durch Brandrodung in tropischen Regionen rund 1 Milliarde Hektar Ödflächen entstanden, die nicht mehr landwirtschaftlich genutzt werden können. In der gleichen Zeit hat sich die Sahara um etwa 100 km nach Süden aus-

	Biomasse ^a	Sättigungsmenge im Boden ^b
Tropischer Trockenwald	55	90
Bambuswald	47	100
Kurzumtriebsplantagen gem. Breiten	37	1.000
Wüstenaufforstung	9	90

a In Biomasse gebundene Tonnen CO_2 pro Hektar pro Jahr.

b Tonnen CO_2 pro Hektar, die im Boden als Humus und Wurzelwerk im Sättigungszustand dauerhaft gebunden werden können.

Tabelle 1: CO_2 -Sequestrierung durch Aufforstung auf unterschiedlichen Böden und in unterschiedlichen Regionen der Welt.

gedehnt. Gleichzeitig hat sich durch schlechte Anbaumethoden die Qualität von rund 1,1 Milliarden Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche drastisch verschlechtert.

Allerdings zeigen Erfahrungen z.B. aus Israel, dass es möglich ist, sogar Wüsten wieder aufzuforsten. Dies ist bei geeigneter Baumwahl und Pflanztechniken sogar ohne dauerhafte Bewässerung möglich. Selbst in Gegenden, in denen jahrzehntelange Erosion die Bodenstruktur völlig zerstört hat, können durch Einsatz von im Boden eingebrachten Wasserspeichern Bäume angepflanzt werden. Daher sollte es prinzipiell möglich sein, Gebiete, die durch menschliche Aktivitäten zu Wüsten verkommen sind, durch entsprechende Aufforstungsprogramme wieder zu begrünen.

Auch in gemäßigten europäischen Breiten ist noch Potential vorhanden. Eine Umstellung des Waldbaus auf optimale Ausnutzung der **Photosynthese** könnte in Deutschland alleine zusätzlich 11 Millionen Tonnen Kohlenstoff pro Jahr (entspricht 40 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr) auf bereits bestehenden Flächen binden.

CO₂-neutrale Nutzung der produzierten Biomasse

Die „biologische“ CO₂-Sequestrierung produziert den Rohstoff Biomasse (z.B. Holz), der ein enormes Potential entfalten kann. Der Rohstoff Holz kann als Grundlage für die Produktion von Werkstoffen, Energie, Kraftstoffen und

Chemikalien dienen. Kurz: All das was unsere Zivilisation braucht. Die hierzu nötigen Verfahren sind seit über 100 Jahren bekannt und bieten noch immer Entwicklungspotential.

Holz kann zur Energieerzeugung verbrannt werden. Moderne Kraftwerke können Holzpellets mit dem gleichen **Wirkungsgrad** wie schweres Heizöl einsetzen².

Eine Herstellung von Kraftstoffen aus Holz bedingt den Einsatz von Vergasungsprozessen. Hier bieten sich zwei verschiedene Prozesse an:

1. Niedrigtemperaturvergasung (500 °C) – Umwandlung in Teergas und Holzkohle
2. Hochtemperaturvergasung zu **Synthesegas**

Mit **Synthesegas** kann man die meisten Grundchemikalien herstellen. Eine Umstellung der chemischen Industrie auf nachwachsende Rohstoffe wäre daher möglich.

Der derzeitige Welt-Energieverbrauch beträgt 400 Trillionen Joule pro Jahr. Bei einem durchschnittlichen Energiegehalt von 17 Milliarden Joule pro Tonne Holz würden jährlich ca. 30 Milliarden Tonnen Holz benötigt. Dieser Holzbedarf kann durch gezielte Aufforstung auf nicht mehr für die Landwirtschaft nutzbaren Flächen abgedeckt werden. Der gesamte Energieverbrauch der Welt ließe sich also nur aus nachwachsenden Rohstoffen

decken!

Die globale Energieversorgung kann auf Basis von Biomasse sicher gestellt werden, ohne dass die Nahrungsmittelproduktion beeinträchtigt wird. Damit kann das CO₂-Problem nachhaltig gelöst werden. Im Gegensatz zu den technischen CO₂-Sequestrierungsverfahren bietet die biologische Lösung zusätzliche unschätzbare und unbezahlbare Vorteile:

- Sie stabilisiert nachhaltig das globale Klima und die globalen Wasser- und Trinkwasserressourcen.
- Sie ist die Grundlage für eine nachhaltige Versorgung der auf 9 Milliarden anwachsenden Weltbevölkerung mit Nahrungsmitteln.
- Sie ist die Grundlage für eine nachhaltige Energie-, Treibstoff-, Materialien- und Chemikalienversorgung.
- Aufwand und Ertrag stehen in einem angemessenen Verhältnis. Sie kann umgehend eingeleitet werden, wirkt sich in wenigen Jahren aus und ist innerhalb von wenigen Jahrzehnten umgesetzt.

Gegenwärtig ist eine Anrechnung von Emissionszertifikaten durch Aufforstung in der EU nicht vorgesehen. Dieses ist aber eine wesentliche Bedingung für die wirtschaftliche Realisierbarkeit und muss daher in den Kyoto-Prozess eingebracht werden.

AUTOR:

Aloys Hüttermann (verstorben) war Professor für technische Mykologie an der Georg-August-Universität Göttingen.

LITERATUR

- [1] <http://www.nachhaltigkeitsrat.de>
- [2] CO₂ – Emissionen, Mitteilungen der Fachgruppe Umweltchemie und Ökotoxikologie 10. Jahrg. 2004/ Nr.1, S. 4 – 5, <http://www.gdch.de/oearbeit/press/2004/18.htm>
- [3] R.Lal, Science 2004, 304, 1623-1627.
- [4] A. Hüttermann, M. Zomporodi; K. Reise, Soil Tillage Res. 1999, 50., 295 – 304.

4.1 Fossile Energieversorgung als Quelle für Kohlendioxid

Energieumwandlung und Emissionen

Das Wort Emission leitet sich von dem lateinischen „emittere“ ab; dies heißt in der deutschen Übersetzung heraus-schicken. Es bezeichnet die bei Verbrennungsprozessen entstehende Freisetzung. Hierzu gehören gasförmige und feste Stoffe. Sie gelangen in die Luft z.B. aus den Auspuffanlagen von Kraftfahrzeugen sowie aus Schornsteinen von Industrie- und Gewerbebetrieben, Kraftwerken oder Wohnhäusern. Zu den Emissionen zählen auch Lärm, Abwärme und Strahlung. Die gas- und staubförmigen Emissionen verteilen sich in der Luft. Ihre Konzentration, das heißt die Menge pro Volumeneinheit, nimmt dabei ab. Dieser Vorgang wird als Transmission bezeichnet. Das Wort „transmittere“; steht in der lateinischen Sprache für hinüberschicken.

Das Ausmaß der Transmission ist von meteorologischen und geografischen Bedingungen abhängig. Hohe Schornsteine bewirken zwar eine starke Verdünnung der Emissionen in der Atmosphäre, doch kann bei entsprechender Wetterlage ein Ferntransport über viele hundert Kilometer erfolgen. Einige Substanzen im Rauchgas verändern sich chemisch durch äußere Einflüsse während dieser Verdünnung.

Am Boden, auf Pflanzen und in Gewässern schlagen sich ein Teil der Verbrennungsprodukte sowie ihre Umwandlungsprodukte nieder. Es kommt zur „Deposition“ genannten trockenen oder nassen Ablagerung der Schadstoffe. Gas oder Stäube werden bei

geringer Luftfeuchtigkeit trocken angesetzt. Im Nebel bilden sich **Aerosole** in Form feinstverteilter Tröpfchen. Regen oder Schnee waschen oder fällen die Schadstoffe aus. Man spricht dann von Immissionen; vom lateinischen immittere: hineinschicken.

Kohlendioxid und Treibhauseffekt

Kohlendioxid (CO₂) ist ein natürlicher Bestandteil unserer Atmosphäre. Zu etwa 0,03 Prozent in der Luft enthalten, gehört es zu den so genannten Spurengasen. Vor der Klimadiskussion galt das für das Wachstum der Pflanzen lebenswichtige Kohlendioxid als unbedenkliches Produkt der Energieumwandlung und Energienutzung. Seit den 80er Jahren aber ist Kohlendioxid unter dem Schlagwort Treibhauseffekt in die öffentliche Diskussion geraten.

Kohlendioxid entsteht bei der Verbrennung kohlenstoffhaltiger Brennstoffe, insbesondere der fossilen Energieträger Kohle, Erdöl, Erdgas. Die umgesetzte Energiemenge ist für die erzeugte Kohlendioxidmenge verantwortlich. Dabei bestimmt die Brennstoffmasse die Energiemenge. Moderne Anlagen und Betriebsverfahren können zwar die im Brennstoff enthaltene Energie besser nutzen als früher, aber die Entstehung des Gases nicht verhindern. Neben der Nutzung fossiler Energieträger entsteht Kohlendioxid auch durch Landnutzungen, etwa Waldrodungen.

Der natürliche Treibhauseffekt ist eine wichtige Voraussetzung für das Leben auf der Erde, denn ohne diesen Effekt

würde die globale Durchschnittstemperatur nur minus 18 Grad Celsius betragen. Im Gegensatz dazu beträgt diese Temperatur aktuell 15 Grad Celsius.

Die Erde wäre dann nicht der „blaue Planet“, sondern eine Wüste aus ewigem Eis. Als Ursache des natürlichen Treibhauseffekts gilt vor allem Wasserdampf, der zu ein bis drei Prozent in der bodennahen Lufthülle enthalten ist. Wasserdampf, Kohlendioxid und andere Spurengase sind für den kurzwelligen und energiereichen Teil der Sonnenstrahlung keine Barriere: Die Strahlung tritt ungehindert durch und erwärmt die Erdoberfläche. Ein Teil der Strahlung wird vom Boden aufgenommen und als längerwellige energieärmere **Infrarotstrahlung** wieder zurückgeschickt.

Diese Wärmestrahlung ist im Gegensatz zum kurzwelligen, energiereichen Sonnenlicht nicht in der Lage, die Schicht aus Wasserdampf und Spurengasen zu durchdringen. Sie wird teilweise durch die Stoffe in der Atmosphäre aufgenommen und zum Teil zur Erdoberfläche zurückgeworfen. Die bodennahen Luftschichten erwärmen sich dabei um mehr als 30 Grad Celsius, indem sie den Vorgang nutzen. Gewächshäuser verwenden das gleiche Prinzip: Hier wirken die Scheiben als Sperrschicht – man spricht vom Treibhauseffekt.

Der Mensch verstärkt den natürlichen Treibhauseffekt durch die Verbrennung von Holz, Kohle, Erdgas und Erdölprodukten sowie die Freisetzung indus-

triell erzeugter Chemikalien. Intensive Landwirtschaft erzeugt Abgase aus Zersetzungstoffen der Düngemittel. Der Kohlendioxid- und Spurengasgehalt der Atmosphäre steigt durch diese Prozesse kontinuierlich an.

Für die reflektierte Wärmestrahlung der Erde wirken diese zusätzlichen Gase in der Atmosphäre wie eine Sperrschicht. Die Menschen verstärken den Treibhauseffekt. Der Anteil von Kohlendioxid in der Atmosphäre hat seit Mitte des 19. Jahrhundert bis zur Gegenwart signifikant zugenommen. Aufgrund von Eisbohrungen in der Antarktis ist bekannt, dass der heutige Kohlendioxidgehalt der Luft deutlich über den Werten vergangener Jahrtausende liegt. Offensichtlich nahm die Kohlendioxidkonzentration mit der Industrialisierung zu. Parallel dazu stieg die Verbrennung fossiler Rohstoffe enorm an.

Klimaaufzeichnungen dokumentieren einen Temperaturanstieg im globalen Mittel um 0,6 Grad Celsius seit 1861. Nach Ansicht der meisten Wissenschaftler ist diese Temperaturerhöhung im Wesentlichen auf den parallel verlaufenden Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre zurückzuführen. Eine weitere Zunahme der Spurengase lässt daher befürchten, dass der durch den Menschen verursachte Treibhauseffekt in den kommenden Jahrzehnten erheblichen Einfluss auf das Weltklima haben könnte. So werden für den Fall einer Verdopplung des Kohlendioxidgehaltes Temperaturerhöhungen zwischen 1,5 und 3 Grad Celsius erwartet. Unterschiedliche Hochrechnungen erwarten ein Schmelzen der landgebundenen Eismasse. Der Meeresspiegel könnte daher zwischen 15 und 150 Zentimeter ansteigen. Die möglichen Auswirkungen des Treibhauseffekts für die verschiedenen Regionen der Erde lassen sich nur ungefähr abschätzen.

Klimabedingte Veränderungen können Überschwemmungen und gravierende Störungen auslösen, so Prognosen.

Umbau der Energieversorgung

Die Zukunft der Energiewirtschaft ist entscheidend von den Anforderungen des Klimaschutzes geprägt. Dabei bekennt sich die deutsche Energiewirtschaft zu den klimapolitischen Zielen der Bundesregierung und strebt deren Umsetzung an. Auch die Kunden fordern zunehmend die Beachtung des Klimaschutzes. Die Ansprüche an die Versorgungsunternehmen steigen weiter. Parallel dazu werden Energiedienstleistungen stärker nachgefragt. So wird die Kundenberatung bedeutsamer. Dies ist ein wachsendes Marktfeld für die Energieversorgungsunternehmen. Dabei wird der Wettbewerb der Versorgungsunternehmen um Produktpaletten im Einklang mit klimapolitischen Forderungen steigen.

Im neuen Energiemix werden Energieberatung, Finanzierung, Installation, Wartung und Qualitätssicherung Teile einer neuen Wertschöpfungskette sein. Die Themen Wärme und Energie werden Dienstleistungen von Energieversorgern und ihren Partnern.

Gewerbe, Industrie und Privatkunden sowie vor allem auch Kommunen werden verstärkt moderne Energiedienstleistungen nachfragen. Auch öffentliche Haushalte werden in Energie und Energieversorgung investieren. Dies ist eine Herausforderung für die Energiewirtschaft. Ein Großteil des heutigen Endenergieverbrauchs entfällt auf Gebäude. Energieberatung zum Einsatz neuer Anwendungstechniken kann diesen Energieverbrauch maßgeblich senken. Möglich ist auch eine Nettoenergieerzeugung zum Beispiel durch den Einsatz von Solaranlagen.

Im Gebäudebereich sind große Klimaschutz-Potenziale vorhanden. Dabei können die energetischen Sanierungen von Altbeständen weiter ausgebaut werden; im Neubau sind diese Maßnahmen bereits Standard. Das Resultat wird ein deutlich geringerer Energieverbrauch pro Wohngebäude im Durchschnitt sein. Insbesondere der Brennstoffverbrauch für Heizzwecke wird sich reduzieren. Dies betrifft insbesondere Heizöl.

Auch die Heizsysteme für Gebäude am Wärmemarkt werden sich ändern, denn fossile Energieträger und regenerative Energien ergänzen sich in Zukunft. Der fossile Energieträger Erdgas ist aber über das Jahr 2020 hinaus ein entscheidender Bestandteil.

Der Energiemarkt wird bis 2020 durch eine wachsende Energieeffizienz geprägt. Dies betrifft die Erzeugung und den Verbrauch. Dagegen steht die Entwicklung der zunehmenden Ausstattung mit Geräten der Informations- und Kommunikationstechnik. Eine zu erwartende intensive Nutzung treibt den Energieverbrauch nach oben. Dezentrale Erzeugungs- und Anwendungstechniken werden nach Ansicht von Experten an Bedeutung gewinnen. Dies gilt für erneuerbare Energien, insbesondere für die **Kraft-Wärme-Kopplung mit Bioerdgas**.

Unsere Volkswirtschaft wird bis 2020 effizienter mit Energie in Gewerbe und Industrie umgehen. Die industrielle Produktion wird im Vergleich zu heute weniger Energie benötigen. In weiterhin energieintensiven Bereichen können erneuerbare Energien die Fertigung antreiben. Kohlendioxidemissionen reduzieren sich auf diese Weise. Auch werden Querschnitts-Techniken wie etwa Antriebe, Druckluft und Prozesswärme deutlich energieeffizienter.

Über das Jahr 2020 hinaus bleiben konventionelle Energieträger wie Erdöl, Erdgas, Kohle und Uran wichtige Eckpfeiler der Energieversorgung. Jedoch werden sich die Prioritäten ändern.

Der **Wirkungsgrad** moderner Kohlekraftwerkstechnik wird größer sein. Mit dem gleichen Kohleeinsatz können diese Kraftwerke mehr elektrische Energie erzeugen. Erfolgsfaktoren dieser Stromproduzenten sind die Abtrennung und Speicherung von Kohlendioxidemissionen im wirtschaftlichen Betrieb.

Alle Versorgungsunternehmen werden 2020 Geschäfte mit erneuerbaren Energien machen. Dies wird Tagesgeschäft sein. Auf einem **integrierten Strommarkt** gehören erneuerbare Energien dann zum Kerngeschäft.

An das Stromnetz werden veränderte Anforderungen gestellt. Eine Ursache ist das neue Zusammenspiel von dezentraler und zentraler Energieerzeugung. Die Wind- und Solarenergie unterliegt den Wetterbedingungen. Auch die regionale Verteilung der Erzeugung und Nachfrage auf den Stromautobahnen wird sich ändern. Dabei treffen die Marktteilnehmer auf einen integrierten europäischen Markt.

Die Stromproduktion und den Bedarf jederzeit in Deckung zu bringen, bleibt dabei die Kernaufgabe. Der Informationsaustausch zwischen der Energieerzeugung und den „intelligenten“ Stromnetzen und -anwendungen wird Bedarfsspitzen abmildern. Auf dem Weg zu diesem Energienetz der Zukunft entwickeln Experten Speicherlösungen für Energie. Infrage kommen vornehmlich Druckluft- und Pumpspeicher-Kraftwerke sowie Hochleistungsakkus und die Elektromobilität.

Der Einsatz von **Kraft-Wärme-Kopplung** (KWK) mit Wärmenutzung leistet bereits heute wichtige Beiträge zum Klimaschutz. Die Potenziale hierfür – unter anderem auf dem Gebiet der Fernwärme – sind noch nicht ausgeschöpft. Deshalb wird der Ausbau der **Kraft-Wärme-Kopplung** konsequent weiterentwickelt werden.

Erdgas wird eine wichtige Brückenfunktion in die Energiewelt des Jahres 2050 übernehmen. Die Versorgung mit Erdgas ist sicher und wettbewerbsfähig, und darüber hinaus ist es der umweltschonendste fossile Energieträger. Es kann bereits heute durch **Bioerdgas** auf Basis von nachwachsenden Rohstoffen substituiert werden. Ideal ist zurzeit schon die Kombination mit anderen erneuerbaren Energien wie der **Solarthermie**. Erdgas ist und bleibt unverzichtbar in der Stromerzeugung, im Wärmemarkt und in der Mobilität.

Im internationalen Rahmen werden die Pipeline-Projekte „Nord-Stream“ durch die Ostsee und „Nabucco“ zur Anbindung des kaspischen Raums weiter vorangetrieben. Der Anschluss an die Erdgasvorkommen Osteuropas soll dergestalt gesichert werden. Ein Einsatz von **Bioerdgas**, Investitionen für den Import von verflüssigtem Erdgas (Liquified Natural Gas – LNG) sowie der Ausbau von Speicheranlagen werden auch in der Zukunft eine sichere Versorgung mit der wichtigen Ressource gewährleisten.

Die wirtschaftlichen und ökologischen Trends des Klimaschutzes werden die Lebenswelt unserer Städte verändern. Dabei wird die Energiewirtschaft moderne, intelligente Techniken und Dienstleistungen einbringen.

Wer heute noch vom „**Smart Meter**“ als „intelligentem Stromzähler“ spricht,

der ist nicht weit von „Smart Grids“ als intelligenten Netzen entfernt. Bis 2020 könnte eine ganze Stadt als „Smart City“ Realität sein.

Der Verkehrssektor ist bereits ein wichtiger Teil der deutschen Energiewirtschaft. Weder lokale Straßenbahn noch der ICE rollen ohne Strom über Schienen. Die Verbreitung der Elektromobilität und Biokraftstoffe wird voranschreiten. Auch Erdgas hat als Kraftstoff eine günstige CO₂-Bilanz. Durch die Beimischung von **Bioerdgas** verbessert sich diese noch. Experten sehen hier ein hohes Ausbaupotenzial. Bei Elektrofahrzeugen hält die Energiewirtschaft die Zahl von rund einer Million Autos auf unseren Straßen im Jahr 2020 für realistisch. Dies entspricht den Zielen der Bundesregierung.

Die Energiewirtschaft braucht einen Ordnungsrahmen, der kurzfristig Investitionen fördert. Begleitet werden sollten diese Investitionen von Anstrengungen für mehr Energieeffizienz und mehr Strom aus erneuerbaren Energien.

AUTOR:

Hildegard Müller ist Vorsitzende der Hauptgeschäftsführung des Bundesverbandes der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) in Berlin.

4.2 Natürliche Kohlendioxid-Quellen

Kohlendioxid hat wesentlich an Aufmerksamkeit in der Öffentlichkeit gewonnen. Wir wissen, dass wenige hundertstel Prozent in der Atmosphäre den Wärmehaushalt unserer Erde beeinflussen. Durch Veränderungen dieser Konzentration können unübersehbare Klimaveränderungen ausgelöst werden. Eine Erhöhung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre findet gegenwärtig durch die industrielle Nutzung von **fossilem Kohlenstoff** statt.

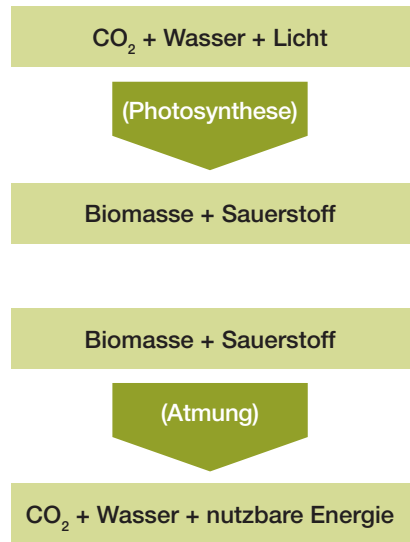
Damit hat die Industrie gezeigt, dass sie auf globale Naturvorgänge einzuwirken vermag, die bisher als unbeeinflussbar durch eine menschliche Tätigkeit erschienen. Problematisch daran ist, dass sich die dadurch ausgelösten Folgen wie der Klimawandel negativ für Mensch und Umwelt auswirken.

Diese Situation ist bedrohlich für den Fortbestand der Menschheit. Als Schlussfolgerung muss das Energieversorgungssystem auf der Erde tief greifend umgestellt werden. Dies stößt noch vielerorts auf Unverständnis und Widerstand. Eine Aufklärung über die naturwissenschaftlichen, technischen und ökonomischen Zusammenhänge tut Not.

Kohlenstoff ist ein weit verbreitetes Element auf der Erde. Der größte Teil des **anorganischen** Kohlenstoffs befindet sich gebunden als Karbonatgestein sowie als CO₂-Gehalt gelöst in den Ozeanen und gasförmig in der Atmosphäre. **Organisch** gebundener Kohlenstoff liegt in der Erdkruste fossil als Kohle, Öl und Gas vor. Darüber hinaus findet sich **organischer** Kohlenstoff in lebender und abgestorbener Biomasse und in der Humusfraktion des Bodens.

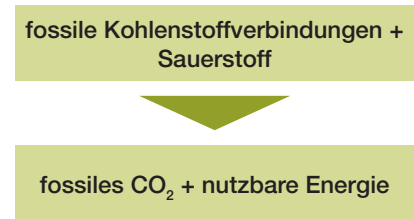
Der Kohlenstoff der Biomasse bildet zusammen mit dem des Kohlendioxids der Atmosphäre den mobilen Anteil des Kohlenstoffs. Gesteine, Kohle, Öl und Gas in ihren Lagerstätten sowie das Kohlendioxid der Meere bilden den immobilen Anteil (Abb. 1 Globale Kohlenstoffflüsse).

Der **mobile Kohlenstoff** nimmt an einem natürlichen Kreislauf auf der Erde teil. Dieser wird durch Sonnenenergie angetrieben und durch Sauerstoff geschlossen:



Der Kreislauf befand sich, historisch gesehen, lange in einem Gleichgewicht: Austrag und Eintrag von Kohlendioxid aus der beziehungsweise in die Atmosphäre hielten sich in etwa die Waage. Die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre blieb annähernd konstant. Erst mit dem Beginn der industriellen Revolution zeigten sich, wie wir heute wissen, deutlich Veränderungen in Richtung höherer Kohlendioxidkonzentrationen. Die Abhängigkeit der Wärmeabstrahlung der Erde von der

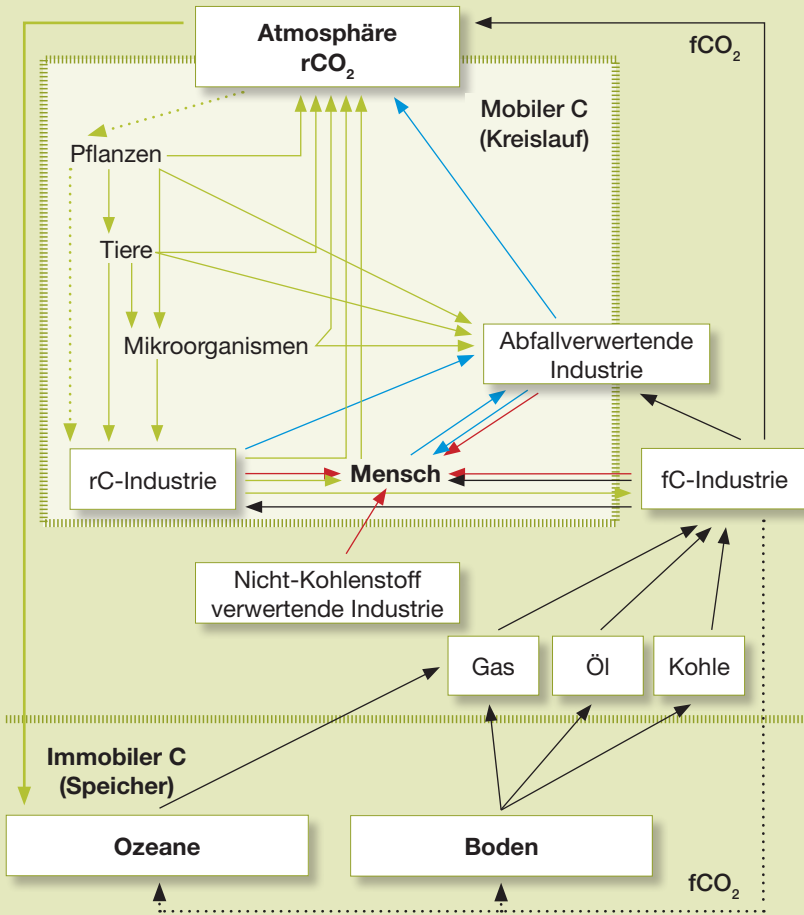
Konzentration des Kohlendioxids in der Atmosphäre wurde zwar früh erkannt, ihr aber keine praktische Bedeutung beigemessen. Erst in den letzten Jahren fielen permanente Klimaveränderungen auf. Diese wurden auf die Zunahme der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre zurückgeführt, deren Ursache wiederum in der intensiven Verwendung fossiler Energieträger erkannt wurde:



Die **Isotopenzusammensetzung** des Kohlenstoffs unterscheidet sich in Abhängigkeit von seiner Herkunft. So kann festgestellt werden, zu welchem Anteil der Kohlenstoff des Kohlendioxids aus der Verbrennung eines fossilen Energieträgers oder aus Biomasse entstammt [1]. Zurzeit soll der fossile Anteil am Kohlendioxid der Atmosphäre schon 30 Prozent betragen [2].

Früher, als der Anteil des **fossilen Kohlenstoffs** im Kohlendioxid der Atmosphäre noch keine Rolle spielte, war es leicht, **fossilen** und **rezentem Kohlenstoff** zu definieren. Fossiler war **alter Kohlenstoff** aus den Ablagerungen im Boden, **rezenter** war **junger Kohlenstoff** aus der Atmosphäre. Jetzt wird die Zumischung **alten Kohlenstoffs** aus fossilen Brennstoffen zum **jungen** der Atmosphäre signifikant. Der **rezente Kohlenstoff** verändert ständig sein Verhältnis zwischen **altem** und **jungem Kohlenstoff**. Für den Einfluss auf

Abbildung 1: Globale Kohlenstoffflüsse



LEGENDE:

- rC-Industrie:** rezenten Kohlenstoff einsetzende Industrie
- fC-Industrie:** fossilen Kohlenstoff einsetzende Industrie
- Linienfarben:**
 - Grün: rezenter Kohlenstoff
 - Schwarz: fossiler Kohlenstoff
 - Blau: fossiler und rezenter Kohlenstoff
 - Rot: Energieflüsse
- Linienarten:**
 - **Durchgehend:** Gegenwärtiger Fluss
 - **Gepunktet:** Zukünftige Flüsse, bzw. gegenwärtige Flüsse, die zukünftig zu verstärken sind
 - **Gestrichelte Linie:** Grenze zwischen mobilem und immobilem Kohlenstoff
 - **Gestrichelter Kasten:** Gebiet des Kohlenstoffkreislaufs

ABBILDUNGSBESCHREIBUNG:

- Situation:** Die Atmosphäre wird zunehmend mit fossilem Kohlendioxid beladen. Das Verhältnis jungen Kohlenstoffs zu fossilem Kohlenstoff verringert sich im rezenten Kohlenstoff ständig.
- Schlussfolgerungen:** Die fossile Kohlenstoffindustrie muss ihr fossiles Kohlendioxid in die Speicher bringen und/oder ihre Aufgaben an die rezente Kohlenstoffindustrie oder nicht-kohlenstoffverwertende Industrie übertragen.

das Klimageschehen spielt es jedoch offensichtlich keine Rolle, welche Qualität der Kohlenstoffzusammensetzung im Kohlendioxid der Atmosphäre herrscht, sondern nur, welche Mengen Kohlendioxid in der Zeiteinheit der Atmosphäre zugeführt und entnommen werden.

Kohlendioxid entsteht aber noch auf andere Weise. Die lebende Substanz produziert ständig Kohlendioxid als Endprodukt ihres **aeroben** Stoffwechsels, der der Gegenwart molekularen Sauerstoffs bedarf:

Organismen + organische Substanz + Sauerstoff

(viel) mehr Organismen + CO₂ + (viel) Energie

sowie ihres **anaeroben** Stoffwechsels, der die Abwesenheit von molekularem Sauerstoff voraussetzt:

Organismen + organische Substanz

mehr Organismen + CO₂ + wasserstoffreiche organische Substanz + (wenig) Energie

Das im Verlauf dieser Stoffwechsel gebildete Kohlendioxid enthält in der Regel Kohlenstoff rezenter Natur. Er ist aktuell, das heißt in der Jetztzeit, durch einen spezifischen Stoffwechselprozess, die **Photosynthese**, aus dem Kohlendioxid der Atmosphäre in die Ausgangsstoffe für den **aeroben** und **anaeroben** Stoffwechsel gebracht worden. Beide Arten des Stoffwechsels gewährleisten die Erhaltung und Vermehrung der beteiligten lebenden Substanz. Sie sind existenziell für das Leben auf unserem Planeten. Bis zu

4.2 NATÜRLICHE KOHLENDIOXID-QUELLEN

50 Prozent und sogar mehr des Ausgangsmaterials können beim **aeroben** Stoffwechsel in Organismenmasse gewandelt werden, im Fall des **anaeroben** Stoffwechsels um die 10 Prozent. Der wirtschaftlich interessante Anteil der resultierenden Energie ist beim **aeroben** Stoffwechsel in der neu gebildeten Organismenmasse, beim **anaeroben** Stoffwechsel in der entstandenen wasserstoffreichen **organischen** Substanz zu finden. Produkte des letzteren sind dabei Chemikalien wie Methan oder Ethanol. Die oben dargestellten Vorgänge sind als Endzustände des **aeroben** sowie des **anaeroben** Stoffwechsels **organischer** Substanz zu betrachten. Dazwischen gibt es eine große Zahl von Zwischenstufen, die die Vielfalt der lebenden und toten **organischen** Substanz bilden. Der Vollständigkeit halber sei angemerkt, dass es auch Übergänge zur **anorganischen** Substanz gibt.

Kohlendioxid stellt als ein Endprodukt des Energiestoffwechsels der Organismen in allen diesen natürlichen Vorgängen mengenmäßig ein Hauptprodukt dar. Sein Kohlenstoff enthält soviel fossilen, wie zum Zeitpunkt seiner Entnahme im Kohlendioxid der Atmosphäre enthalten war. Jedoch ist dazu einschränkend zu sagen, dass biologische Reaktionen bekannt sind, von denen nur **junger Kohlenstoff** angenommen wird und zur Verarbeitung kommt. Das Ganze ist noch wenig untersucht, weil bisher wenig beachtet. Erwähnt sei aber das Gegenteil. Es wurde bis vor kurzem vielfältig angenommen, dass jede biologische Reaktion automatisch zu Produkten mit **rezentem Kohlenstoff** führt. Das hat sich als Trugschluss erwiesen.

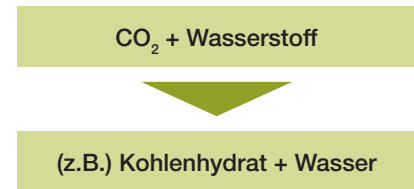
Wenn fossile Ausgangsstoffe in den Stoffwechsel eingehen, entstehen Produkte, die **fossilen Kohlenstoff** enthalten. Die Art des Rohstoffs entscheidet

über die Art des Produkts, nicht die Art seiner Wandlung. Deshalb kann auch auf diese Weise Kohlendioxid aus fossilen Quellen in die Atmosphäre gelangen. Gegenwärtig wird, vor allem in den USA, die Frage einer Zunahme des atmosphärischen Kohlendioxids durch Prozesse aus der Nutzungsänderung landwirtschaftlicher Flächen diskutiert. Die **organische** Substanz solcher Böden wird bei Zutritt von Sauerstoff aus ihrem **anaerob** bestimmten Zustand gerissen, mehr Kohlendioxid wird gebildet. Die Zuordnung dieses Kohlenstoffs bedarf noch einer Klärung.

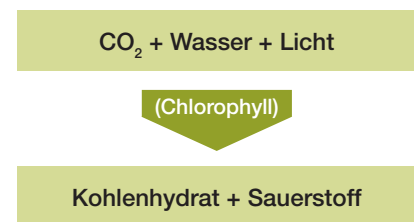
Es stellt sich aber nicht nur die Frage, wo das Kohlendioxid herkommt, sondern auch, wohin es geht. Die Erde ist ein geschlossenes System, alle Materie bleibt dem System erhalten. Im System bleibt die Menge des Kohlenstoffs konstant, aber die Mengen der Stoffe, in denen der Kohlenstoff gebunden ist, können sich durch die Aufnahme beziehungsweise Abgabe von Fremdatomen ändern.

Im Kohlendioxid hat der Kohlenstoff den Endzustand seiner Oxidationsfähigkeit erreicht. Veränderungen seiner Menge in der Atmosphäre entstehen durch Lösungsvorgänge und Salzbildungen, an denen die Ozeane wesentlich beteiligt sind sowie durch chemische Umwandlungen, die **Reduktionen** darstellen und den Kohlenstoff des Kohlendioxids in energetisch höherwertige Verbindungen einbringen

In der Natur ist die **Reduktion** von Kohlendioxid zu Kohlenhydraten die häufigste biochemische Reaktion. Die Bildung der **Kohlenhydrate** erfordert Reduktionsäquivalente beziehungsweise Energie, die Wasserstoff aus seinen Verbindungen, z.B. Wasser, freisetzt und für die **Reduktion** des Kohlendioxids verfügbar macht:



Eine besondere Reaktion ist die **Photosynthese**, die in den Chloroplasten der grünen Pflanzen stattfindet und zur Bildung von **Kohlenhydraten** und Sauerstoff führt. Dabei ermöglicht das Chlorophyll eine Umwandlung von Lichtenergie in biochemisch nutzbare Energie.



Durch Lichtenergie wird Wasser bei der **Photosynthese** in Wasserstoff und Sauerstoff zersetzt. Die Protonen und Elektronen werden zusammen mit dem durch die Elektronen reduzierten CO₂ zum Aufbau von **Kohlenhydraten** eingesetzt.

So entsteht bei dieser Reaktion neben dem Kohlenhydrat kein energetisch wertloses Wasser, sondern Sauerstoff.

Neben der Lösung von Kohlendioxid in den Ozeanen sorgt die **Photosynthese** für den Abfluss des Kohlendioxids aus der Atmosphäre. Während die Lösungsvorgänge jedoch nur das Kohlendioxid im Wasser speichern und damit unerwünschte Nebeneffekte wie die Versauerung der Ozeane hervorbringen, bewirkt die **Photosynthese** eine Umwandlung des Kohlendioxids in energetisch höherwertige, nutzbare Verbindungen. Ihre Intensivierung durch technische Maßnahmen erscheint da-

mit als eines der erstrebenswerten Mittel, die Kohlendioxidkonzentration der Atmosphäre konstant zu halten. Sie ist ein prominenter Lösungsweg bei der unvermeidlichen Umstellung des Energieversorgungssystems, der die Nutzung fossiler Rohstoffe verringern will und sich auf die Nutzung rezenter beziehungsweise regenerierbarer Rohstoffe hin orientiert, die geschlossene Stoffkreisläufe ermöglichen.

Kohlendioxid in der Atmosphäre – die durch den Menschen verursachten Einträge:

Die Erde ist ein geschlossenes System mit Gashülle. Keine bedeutenden Mengen an Gasmolekülen gehen an den Weltraum verloren. Deshalb bleibt auch aller ursprünglich vorhandene Kohlenstoff erhalten. In erdgeschichtlich früher Zeit gab es in der Gashülle der Erde eine derart hohe CO_2 -Konzentration, dass Leben in den heutigen Formen undenkbar gewesen wäre. Durch Lösevorgänge in Wasser, Gesteins- und Salzbildungen sowie chemische und biochemische Umwandlungen wurde die Konzentration des Kohlendioxids in der Atmosphäre verringert und schließlich sein Kohlenstoff durch Folgereaktionen mit anderen Elementen in immobil Form abgelagert. Gleichzeitig nahm die Konzentration des molekularen Sauerstoffs in der Atmosphäre zu. Bedingungen für das Auftreten von höheren Lebensformen entstanden.

Durch die bis jetzt noch kaum gebremste Mobilisierung, letztlich Verbrennung von abgelagertem, **fossilen Kohlenstoff** (zum Beispiel Kohle) beziehungsweise Kohlenstoffverbindungen (zum Beispiel Erdöl und Erdgas) zu Kohlendioxid, droht jetzt ein rückläufiger Prozess, der bis zur Unbewohnbarkeit unserer Erde und sogar zum Aussterben der höheren Lebensfor-

men führen könnte. Diese Gefahr wird noch verstärkt; in mittleren Meerestiefen befinden sich gewaltige Lager an fossilem Methan. Das Methan liegt in temperaturempfindlicher Form als **Methanhydrat**, auch Methan-Eis genannt, vor. Was aber, wenn die durch die Konzentrationserhöhung des Kohlendioxids in der Atmosphäre bewirkte Temperaturerhöhung bis auf diese Meerestiefen durchschlägt? Es drohen eine Zersetzung der **Methanhydrate** und ein Freisetzen gasförmigen Methans. Einen Namen für den Vorgang gibt es schon: blow out. Methan ist in seiner Wärmerückhaltung über 20-mal wirksamer als Kohlendioxid.

Seine Lebensdauer in der Atmosphäre ist zwar erheblich kürzer als die des Kohlendioxids. Dennoch scheint sie lang genug, um bei einer massiven Freisetzung von Methan in die Atmosphäre eine sich selbst beschleunigende weitere Erwärmung der Erde auszulösen. Bisher ist keine menschliche Aktivität bekannt, die dies aufhalten könnte. Es ist insofern ratsam, alles zu tun, dass die Erde in einem CO_2 -bestimmten Wärmehaushalt verbleibt und nicht in einen methanbestimmten gerät. Die sicherste Methode dafür ist, den weiteren Eintrag von fossilem Kohlendioxid in die Atmosphäre zu begrenzen. Dafür ist ein Zeitschema aufzustellen, das global befolgt werden muss. In diesem Zeitschema muss die sich aus naturwissenschaftlichen Gründen ergebende Geschwindigkeit der globalen Substitution von **fossilem Kohlenstoff** bei der Energieerzeugung die bestimmende Größe sein.

Von einigen Regierungen, auch und an führender Stelle der deutschen Bundesregierung, wurde eine solche Geschwindigkeit vorgegeben: 2020 20 Prozent, 2050 50 Prozent weniger fossiles Kohlendioxid, bezogen auf 1990. Die Er-

derwärmung soll 2 Grad Celsius nicht übersteigen [3]. Eine internationale Übereinkunft darüber ist noch nicht erzielt worden. Andeutungen von Entscheidungsträgern wie Präsident Obama lassen erkennen, dass das Problem des durch den Menschen ausgelösten Klimawandels dringend gelöst werden soll. Genauere Zielvorstellungen fehlen jedoch. Immer noch grassieren Überlegungen, ob eine alternative Energieversorgung überhaupt notwendig ist und ob sie sich denn rechnet. Die Verbrauchsprognosen für fossile Energieträger, die jetzt bis in die Mitte der 30er Jahre des 21. Jahrhunderts reichen, sprechen nicht für ein Verlassen des bisherigen Weges [4].

Der Energiebedarf der Menschheit steigt ständig. Dabei entsteht ein permanenter Netto-Kohlendioxidfluss in die Atmosphäre, der den Wärmehaushalt unserer Erde unumkehrbar stören kann. Über den Kohlendioxidstrom stehen Energieversorgung der Menschen und Wärmehaushalt der Erde im Zusammenhang. Eines der heute diskutierten, technisch geprägten Szenarien ist deshalb das einer kohlenstoffarmen (low carbon) Technik.

Zunehmend wird die Substitution der auf Kohlenstoff basierenden Energieversorgung durch kohlenstofffreie Methoden angestrebt wie Wind- und Wellenenergienutzung, **Solarthermie**, Photovoltaik, Gezeiten, Erdwärme und Kernenergie.

Zu wenig beachtet werden der natürliche **Kohlenstoffkreislauf** und seine technischen Intensivierungs- und Nutzungsmöglichkeiten. Dafür werden ziemlich einseitige Argumente ins Feld geführt. Der natürliche **Kohlenstoffkreislauf** könne in Zukunft nicht allein die Energieversorgung der Menschheit gewährleisten. Das entspricht den Tat-

sachen. Aber soll die künftige Energieversorgung mit einer einzigen Methode erreicht werden? Ist nicht vielmehr ein Energiemix die angestrebte Lösung?

Der biogene Antrieb des **Kohlenstoffkreislaufs** lässt im Vergleich zur Atomenergie oder **Solarthermie** nur mittlere Leistungsdichten (Energieflussdichten) bei der Energieerzeugung zu. Auch das entspricht den Tatsachen. Demgegenüber steht aber, dass Kreisläufe auf der Basis von biogenen Ressourcen nicht zeitlich endlich sind wie Prozesse auf der Basis begrenzter fossiler Ressourcen. Außerdem und grundsätzlich spricht für biogene Ressourcen, dass das Leben an Kohlenstoff gebunden ist. Kohlenstoff wird also immer eine Rolle in der Stoff- und Energieproduktion spielen. So wird es keine Nahrungsmittelproduktion ohne Inanspruchnahme von Kohlenstoff geben. Damit bietet sich eine dauerhafte Abstimmung solcher Stoffproduktionen mit der Energieproduktion im Rahmen des natürlichen **Kohlenstoffkreislaufs** geradezu an. Zentraler Punkt einer solchen Produktionsstrategie ist die **Photosynthese**, weil sie aus **anorganischen** Stoffen, Kohlendioxid und Wasser, die keine verwertbare Energie enthalten, Energie enthaltende **organische** Verbindungen wie **Kohlenhydrate** synthetisiert. Diese Reaktion fixiert Kohlendioxid mithilfe der Energie des eingestrahelten Sonnenlichtes.

Die Produktivität des Systems hängt von zwei Faktoren ab: den Eigenschaften der beteiligten Organismen und der zur Verfügung stehenden Bestrahlungsfläche. Damit sind die Reserven und die möglichen Wege zur Steigerung beziehungsweise die Ausschöpfung der Photosynthesekapazität auf der Erde und ihr möglicher Beitrag zur Stoff- und Energieversorgung grundsätzlich aufgezeigt. Die ein-

gestrahlte Sonnenenergie ist ungefähr 1500-mal größer als ihre gegenwärtige Inanspruchnahme. Das Potenzial der Sonnenenergieausnutzung kann gesteigert werden, wenn es gelingt, die Eigenschaften der an der Energieumwandlung beteiligten Organismen zu verbessern. Darüber hinaus sind größere Energieumwandlungen durch eine Vergrößerung der Bestrahlungsfläche möglich. Eine Möglichkeit ist es, Pflanzen durch die gentechnische Verbesserung der Photosynthesefähigkeit von Organismen zu optimieren. Auch die Intensivierung der Landnutzung sowie die Einführung einer systematischen Meeresnutzung können die Energiegewinnung über die **Photosynthese** fördern.

Ziel aller dieser Maßnahmen ist es, die CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre konstant zu halten und dabei den **Kohlenstoffkreislauf** zu beschleunigen, sodass in der Zeiteinheit mehr Sonnenenergie in nutzbare chemische Energie gewandelt wird. Eine Verdopplung der heutigen Photosyntheseleistung auf diesem Wege könnte ein Nahziel sein. Es würde bedeuten, dass mindestens die doppelte Menge Biomasse zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung steht. Diese Verarbeitung kann sich weitgehend an die bisherige, bei fossilen Rohstoffen eingeführte, anlehnen. Je wasserärmer die Biomasse anfällt bzw. durch Vortrocknungen verfügbar gemacht werden kann, umso mehr kann sie wie Kohle behandelt werden. Dabei führt die direkte Verbrennung zur Bildung von Kohlendioxid und Wasser sowie Wärme, die zur Elektrizitätserzeugung genutzt werden kann. Weitere Aufbereitungsprodukte der Biomasse können **Synthesegas** und Bioöle sein. Einige Verfahren sind bereits bekannt.

Fettreiche und kohlenhydratreiche Biomassen können in wässrigen Auf-

schwemmungen oder Lösungen mittels Hydrolyse und Gärung zu erdöl-äquivalenten Produkten wie Ethanol und Butanol verarbeitet werden. Biodiesel kann zum Beispiel aus ölreichen Pflanzen wie Raps oder Ölpalmen extrahiert werden.

Bei wasserreichen Biomassen macht man sich die Eigenschaft der freiwilligen Trennung des brennbaren Gases von seiner wässrigen Produktionsphase zunutze. Ein biotechnologischer Zwischenschritt, die **anaerobe** Spaltung zu Biogas, einem Gemisch von Methan und Kohlendioxid, wird eingeführt. Das Gasgemisch kann sowohl unmittelbar, allerdings nur in begrenzter Weise, als auch nach Abtrennung des Kohlendioxids vollständig wie Erdgas verwendet werden. Allen diesen Produkten ist gemeinsam, dass sie **rezenten Kohlenstoff** enthalten, ihre Kohlenstoffatome also aus dem Kohlendioxid der aktuellen Atmosphäre stammen. Damit verhalten sich ihre Verbrennungsprodukte klimaneutral. Das entstandene Kohlendioxid kann ohne weiteres in die Atmosphäre entlassen werden. Diese Tatsache findet jedoch wirtschaftlich noch keine Anerkennung, was die Einführung dieser Technologien über den Markt erschwert. Es gilt für ökonomische Aussagen immer noch der direkte Vergleich der Aufwendungen für Produkte aus **fossilem** und **rezentem Kohlenstoff**, der zumeist zugunsten der fossilstämmigen Produkte ausgeht:

**Aufwendungen
für rezente Produkte**

sind größer als

**Aufwendungen
für fossile Produkte**

Bezieht man aber die Aufwendungen ein, die für die Isolierung von Kohlen-

dioxid aus den Verbrennungsgasen fossiler Produkte und dessen Aufbewahrung abseits der Atmosphäre erforderlich werden, wird sich das Aufwandsverhältnis in den meisten Fällen umkehren, wenn dafür auch kaum relevante Zahlen erhältlich sind:

**Aufwendungen
für rezente Produkte**

sind kleiner als

**Aufwendungen
für fossile Produkte +
Aufwendungen für Isolierung
und Speicherung daraus
entstandenen Kohlendioxids**

In diesem Zusammenhang ist die Beschränkung auf den Einsatz klimaneutraler Rohstoffe und Energien bei der Energieerzeugung, ein ernstzunehmender

Anspruch. Er kann jedoch dann an Bedeutung verlieren, wenn es gelingt, wirtschaftlich vorteilhafte Methoden für die Aushaltung fossilen Kohlendioxids aus der Atmosphäre zu finden. Das wird für große stationäre Anlagen leichter zu verwirklichen sein als bei den mobilen Verbrauchern im Transportwesen und bei den zwar stationären, aber dezentralen Hausversorgungssystemen.

Historisch waren die Ursachen der Wechsel von der Biomasse zur Kohle und von der Kohle zum Erdöl beziehungsweise Erdgas durch die steigenden Energieinhalte des jeweils neuen Rohstoffs gegeben:

Verhältnis massebezogener Energieinhalte

Biomasse : Kohle : Erdöl : Erdgas = < 1 : 1 : 1,5 : 2

Unabhängig davon können beim Rückgriff auf Biomasse Aufwendungen zum Klimafolgenausgleich entfallen. Diese zweifellos richtige und gewichtige Annahme ist jedoch noch so unübersichtlich, dass ihre Realität bestreitbar ist. Es darf deshalb nochmals auf die Verantwortung der Entscheidungsträger hingewiesen werden, dafür Sorge zu tragen, dass die Eindämmung des CO₂-Abflusses in die Atmosphäre konsequent und zeitgerecht betrieben wird.

AUTOR:

Manfred Ringfeil ist Professor für Technische Chemie und Biotechnologie. Von 1955 bis 1991 arbeitete er auf dem Gebiet der technischen Mikrobiologie und Biotechnologie an der ehemaligen Akademie der Wissenschaften der DDR, von 1992 bis 2009 war er geschäftsführender Gesellschafter der Biopract GmbH, Berlin.

LITERATUR

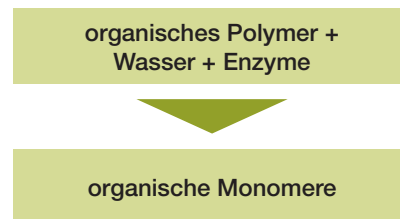
- [1] „Report of Biomass CO₂ Content Analysis using ASTM-D8688“ Beta Analytic Inc., 4985 SW 74 Court, Miami, FL 33155, USA
www.betalabservices.com
- [2] Rosenberg, N.J., Persönliche Mitteilung 2009
nj.Rosenberg@pnl.gov
- [3] REGIERUNG Online-Kyoto-Protokoll
www.bundesregierung.de/Webs/Breg/un-klimakonferenz/DE/Kyoto-Protokoll/kyoto-protokoll.html
- [4] “International Energy Outlook 2009”, May 2009, p. 1
www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/index.html

4.3 Quellen für Methan in der Atmosphäre

Methan (CH_4) kann sowohl fossilen als auch biologischen Ursprungs sein. In der Atmosphäre ist es ein den Klimawandel beschleunigendes Treibhausgas, unabhängig von seiner Herkunft. Kohlendioxid, das aus der Verbrennung von Methan entsteht, ist, abhängig von der Herkunft des Methans, klimaneutral, wenn das Methan rezenten Ursprungs war oder klimaschädlich, wenn das Methan aus fossilen Quellen stammte (Die Fackeln über den Erdölraffinerien haben also durchaus einen umweltförderlichen Sinn: Sie wandeln das stark klimabeeinflussende Methan in das etwa 20mal schwächer das Klima beeinflussende Kohlendioxid um). Methan wird in der Natur aus feuchter organischer Substanz unter Sauerstoffmangel durch bakterielle Konsortien gebildet. In der technischen Umsetzung muss Sorge dafür getragen werden, dass das Methan nicht in die Atmosphäre entweicht. Es steht dann als klimaneutraler Brenn- oder Synthesestoff zur Verfügung. Methan kann dabei aus fast allen organischen Verbindungen gebildet werden. Die beteiligten Bakterien sind dabei recht anspruchslos: Außer der Gegenwart von Wasser, der Abwesenheit von Sauerstoff, einer Temperatur zwischen 0 und etwa 80 Grad Celsius und einem pH-Wert um den Neutralpunkt gibt es kaum weitere Anforderungen an ihre Umgebung. Sogar Kohlendioxid kann als Ausgangsstoff dienen, wenn den beteiligten Mikroorganismen ein reduzierender Stoff in ihrer Umgebung zur Verfügung steht. In der Natur bildet in der Regel Biomasse mikrobieller, pflanzlicher und/oder tierischer Herkunft den Ausgangsstoff für die Me-

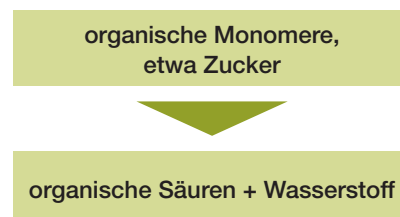
thansynthese. In der Regel besteht diese zu einem erheblichen Teil aus Polymeren oder zusammengesetzten Verbindungen. Diese wiederum setzen sich aus Monomeren, wie zum Beispiel Zuckern, Fettsäuren oder Aminosäuren zusammen. Zur Spaltung der Polymere und zusammengesetzten Verbindungen in ihre Monomere bzw. molekularen Einzelbestandteile dienen Enzyme als Biokatalysatoren. Da sie mit Wasser erfolgt, nennt man sie auch Hydrolyse:

Hydrolyse:



Dieser Schritt ist erforderlich, um die Ausgangsstoffe in die bakterielle Zelle zu bringen, wo die weitere Reaktion zur Bildung von organischen Säuren, hauptsächlich niederen Fettsäuren, aus den Hydrolyseprodukten stattfindet, die sogenannte Acidogenese oder Säurebildung:

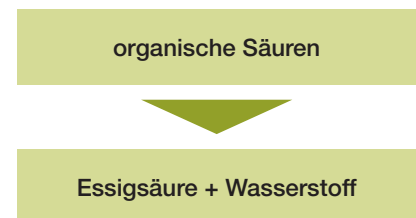
Acidogenese:



Die gebildeten Stoffe werden aus den Zellen ausgeschieden und von anderen Konsortien aufgenommen, in de-

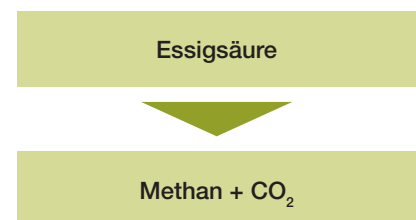
nen die Bildung von Essigsäure und Wasserstoff aus den organischen Säuren erfolgt, die sogenannte Acetogenese oder Essigsäurebildung:

Acetogenese:



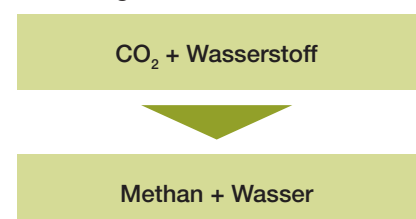
Wiederum werden die Reaktionsprodukte in das Medium ausgeschieden und in weitere bakterielle Konsortien aufgenommen zur Bildung von Methan und Kohlendioxid aus der Essigsäurebildung:

Methanogenese I:



sowie zur Reduktion des Kohlendioxids zu Methan unter Zuhilfenahme von Wasserstoff, der aus den Stufen der Säure- und Essigsäurebildung stammt:

Methanogenese II:



Wesentliche Erkenntnisse über die Vorgänge bei der Methanbildung stammen aus der Forschung der Bundesrepublik Deutschland. Diese Ergebnisse wurden bereits in den 80er Jahren des vergangenen Jahrhunderts publiziert. Damit begann man, die ungeheure Vielfalt an Reaktionswegen zu sortieren und zu klassifizieren. Mit den Erkenntnissen konnten die Bildungsgeschwindigkeit des Methans und die Reaktionsausbeute erhöht werden. Spezielle Zusätze wie externe **Enzyme**, Spurenelemente und Wirkstoffgaben optimierten die Methanbildungsreaktionen. Bei seiner biologischen Bildung befindet sich Methan immer im Gemisch mit Kohlendioxid. Dieses Gemisch wird als Biogas bezeichnet.

Als gasförmiges Produktgemisch trennt es sich freiwillig von der wässrigen Produktionsphase. Die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Methans sind von denen seines Begleitgases Kohlendioxid so verschieden, dass es leicht und vollständig von ihm getrennt werden kann. Die bei der Verbrennung von Biogas gebildete Stoffmischung verhält sich nicht unbedingt klimaneutral. Wie jüngste Ergebnisse zur biologischen Methanbildung aus Erdöl zeigen [1], muss man es vom verwendeten Rohstoff abhängig machen, ob Klimaneutralität oder Klimaschädlichkeit des resultierenden Kohlendioxids vorliegen.

Biogas aus der Landwirtschaft besteht in der Regel aus nachwachsenden Rohstoffen, daher kann die Klimaneutralität der Verbrennungsprodukte vorausgesetzt werden. Für Biogas aus der Wasser-, Abfall- und Deponiewirtschaft trifft die Klimaneutralität seiner Verbrennungsprodukte aufgrund der Zusammensetzung der Ausgangsstoffe auf den überwiegenden Anteil des gebildeten Gases zu. Für letzteres kann auch

in Anspruch genommen werden, dass eine kontrollierte Biogassynthese den Anteil an Methan verringert, der durch „wilde Gärung“, d.h. unkontrollierte Biogasbildung, direkt in die Atmosphäre gelangen könnte.

In der Abwassertechnik will man eine niedrige Konzentration von wasser-schädlichen Stoffen im gereinigten Abwasser erzielen. Die in die Abwasseranlage einströmenden Stoffe werden zunächst mikrobiologisch in Gegenwart von Sauerstoff behandelt. Dabei gelangt Kohlendioxid, gebildet aus dem Kohlenstoff der Abfallstoffe sowohl fossilen als auch rezenten Ursprungs, direkt in die Atmosphäre. Der verbleibende nicht wasserlösliche Anteil sowie die **aerob** gebildete Biomasse werden unter Sauerstoffausschluss mikrobiologisch zu Biogas umgesetzt.

Die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Methan aus Erdgas und Methan aus Biogas (Biomethan, in Deutschland auch **Bioerdgas** genannt) sind gleich. Erdgas ist mit Biomethan ohne Einfluss auf die chemischen und physikalischen Eigenschaften misch- und substituierbar.

Das kann genutzt werden, um Erdgas klimafreundlicher zu machen und zwar in dem Verhältnis, wie Biomethan dem Erdgas zugemischt wird. Positiv für das Klima könnte sich auswirken, dass Erdgas durch Biomethan substituiert werden kann. Heute erscheint dieses vielleicht noch jenseits realistischer Vorgehensweisen. Die Biogasproduktion wird wohl wegen der Flächenabhängigkeit der Rohstofferzeugung und der ebenfalls flächenabhängigen Kreislauf-führung der Reststoffe am günstigsten dezentral zu organisieren sein. Für eine schnelle Zunahme der auf dieser Basis zu erweiternden Biogasproduktion gibt es gegenwärtig weder in Deutschland

noch in anderen Ländern hinreichende Entscheidungen.

Die notwendig dezentrale Produktionsorganisation schafft jedoch nicht nur stabile Arbeitsplätze, sondern begünstigt auch ein schrittweises Vorgehen und Kompromisslösungen bezüglich der Ablösung von fossilen Ressourcen.

Der fortschreitende Klimawandel wird möglicherweise durch ein solches schrittweises Vorgehen und Kompromisslösungen nachhaltiger aufgehalten als durch Warten auf scheinbar perfekte Lösungen.

Biogas lässt sich wie Erdgas in Syntheseprozessen einsetzen.

Damit werden die Produkte, die auf der Ausgangsbasis einer Mischung von Biomethan und Erdgas hergestellt werden, wie zum Beispiel **Synthesegas**, Methanol, **Dimethylether**, Ethanol, Essigsäure oder Formaldehyd mit steigendem Biomethananteil klimafreundlicher. Die Klimaneutralität der synthetisierten Produkte hängt mit ihrer vom Einsatzzweck bestimmten Lebensdauer sowie ihrem Einsatzumfang zusammen. Bei kurzlebigen und großvolumigen Produkten wie Kraftstoffmischungs-komponenten (Methanol, Ethanol, **Dimethylether**) ist sie essenziell. Für langlebige und spezielle Produkte wie Kunststoffe aus Formaldehyd ist die Klimaneutralität von nicht so großer Bedeutung. Langlebige Produkte müssen deshalb nicht notwendig aus biologischen Rohstoffen hergestellt werden.

Die bereits installierten Biogasanlagen, rund 4000 in der Landwirtschaft und 1000 in der Wasserwirtschaft, arbeiten überwiegend am unteren Ende ihrer Leistungsfähigkeit, weil dort kaum

Aufwand für die Aufrechterhaltung der Stabilität des Prozesses erforderlich ist. Dadurch ist ihre Gesamtleistung gegenwärtig von nur geringem Gewicht für die aktuelle Energieversorgung. Sie entspricht zurzeit der von 1 1/2 Großkraftwerken auf Kohlebasis (1,2 Gigawatt).

Ihr potenzielles Leistungsvermögen ist jedoch um eine Größenordnung höher (>10 Gigawatt), wenn ihr biologisches Potenzial auf verfügbaren landwirtschaftlichen Flächen mit den heute vorhandenen Wissen und Mitteln voll in Anspruch genommen würde.

Eine Stärkung der Biogas- bzw. Biomethanproduktion in dem zukünftigen Energiemix Deutschlands hat auch eine große Bedeutung für die Chancen unseres Landes zum Technologieexport. Biogas und Biomethan lassen sich leicht in jedem Land produzieren, weil Rohstoffe und Bedingungen dafür beinahe überall verfügbar sind.

Für die Biogasroute zur Energieversorgung beginnt ein Wettbewerb: Ei-

nerseits mit der direkten Verbrennung geernteter und gegebenenfalls vortrockneter Biomasse und andererseits mit der chemisch-katalytischen Wandlung entsprechend aufbereiteter Biomasse zu **Synthesegas**. Beide Alternativen ergeben keine Unterschiede zur Biogasroute in Bezug auf die Klimaneutralität der resultierenden Verbrennungsprodukte. Die Biogasroute scheint einen Vorteil auf ihrer Seite zu haben: Biogas trennt sich freiwillig von seiner wässrigen Produktionsphase. So können auch verdünnte Rohstoffe aus wässrigen Suspensionen oder Lösungen ohne Vorbehandlungen genutzt werden. Die Infrastruktur für eine Logistik besteht schon: Biomethan lässt sich in Erdgasleitungen transportieren, auch im Gemisch mit Erdgas. Aber es gibt auch Nachteile: In der Biomasse befindet sich Lignin, ein Stoff, der sich nach dem gegenwärtigen Wissensstand biologisch nur langsam weiterverarbeiten lässt und den Umbau der Hauptstoffe der pflanzlichen Biomasse nur bremsen würde. Lignin ist ein Holzbestandteil und kann verbrannt oder per chemischer Katalyse weiter

verwendet werden. Aus heutiger Sicht würde Holz den chemischen Routen zufallen, Einjahrespflanzen, Algen, wässrige Industrie-, Landwirtschafts- und Haushaltsabfälle der Biogasroute. Bei der Biogassynthese ist Methan das Produkt, das etwa 90 Prozent des Energieinhaltes der Ausgangsstoffe in sich vereinigt. Kohlendioxid ist energetisch wertlos, enthält jedoch die Hälfte des Kohlenstoffs der Ausgangsstoffe. Dieses Kohlendioxid ist als klimaneutral zu betrachten und kann daher direkt in die Atmosphäre entlassen werden. Es birgt aber auch ein Potenzial für die Herstellung klimaneutraler Kohlenstoffverbindungen. Die chemische Umwandlung von Kohlendioxid in energetisch höherwertige Stoffe ist aufwendig. Biologische Prozesse über höhere Pflanzen und Algen könnten zukünftig aus diesem Kohlendioxid klimaneutralen Kohlenstoff einer Nutzung zuführen.

AUTOR:

Manfred Ringpfeil ist Professor für Technische Chemie und Biotechnologie. Von 1955 bis 1991 arbeitete er auf dem Gebiet der technischen Mikrobiologie und Biotechnologie an der ehemaligen Akademie der Wissenschaften der DDR, von 1992 bis 2009 war er geschäftsführender Gesellschafter der Biopract GmbH, Berlin.

LITERATUR

- [1] „Luca Technologies Confirms Real-Time Methane Generation“ Science Daily, 29 April 2005, 7 April 2010

www.sciencedaily.com/releases/2005/04/050429130056.htm

5.1 Kohlendioxid – Die politische Dimension

Wer hätte sich noch vor 20 Jahren vorstellen können, dass ein praktisch nicht wahrnehmbares, farb- und geruchloses Gas, das bis dato allenfalls als „Kohlensäure“ im Mineralwasser bekannt war, einmal eine solche herausragende Bedeutung in der politischen Diskussion erlangen wird. Nachdem die in den 70er Jahren noch befürchtete neue Eiszeit schnell abgehakt war und die Überzeugung wuchs, dass uns stattdessen eine nie dagewesene Aufheizung der Atmosphäre bevorsteht, war auch schnell der Hauptschuldige gefunden: Das sowohl bei allen natürlichen Stoffwechselfvorgängen als Endprodukt des Kohlenstoffwechsels aber natürlich auch bei der Verbrennung von fossilem Kohlenstoff entstehende Kohlendioxid. Und genau dieses zusätzliche, vom Menschen durch Verbrennung verursachte Kohlendioxid, das nicht, zumindest dem in menschlichen Zeitkategorien gemessenen, natürlichen Kohlenstoffkreislauf zugeordnet wird, war schnell nach der gängigen Lehrmeinung als der Hauptschuldige für den wachsenden Treibhauseffekt auf der Erde identifiziert. So wuchs auch schnell die Überzeugung in der Weltgemeinschaft für die Notwendigkeit, dem Ausstoß dieses klimaschädlichen Gases politisch etwas entgegen zu setzen.

Historie der Klimaschutzpolitik: Von Rio bis Kopenhagen

Bereits 1979 fand die erste Weltklimaschutzkonferenz statt, auf der erstmalig im internationalen Rahmen die Treibhausgasproblematik und die Notwendigkeit internationalen Handelns diskutiert wurden. Der 1988 gegründete

Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC) legte 1990 seinen ersten von inzwischen vier Sachstandsberichten¹ vor, in dem von eindeutigen Anzeichen, die Rede war, dass die anthropogen verursachten Treibhausgase (darunter CO₂ als wichtigstes Gas) im nächsten Jahrhundert (gemeint war bis 2100) eine bedrohliche Temperatursteigerung bis 5°C in der Atmosphäre hervorrufen werden. Eine dramatische Folge wäre z. B. der Anstieg des Meeresspiegels um bis zu zwei Meter aufgrund des Abschmelzens von Festlandeis in Grönland und in der Antarktis.

Die erste praktische politische Konsequenz hieraus war dann die Verabschiedung der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen auf der berühmten Nachhaltigkeitskonferenz in Rio im Jahre 1992. In dieser Konvention wurde zunächst anerkannt, dass die menschliche Tätigkeit zur Erhöhung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre und damit zu negativen Auswirkungen auf das Erdklima führt. Damit verbunden wurde dann die unverbindliche Absichtserklärung festgehalten, dass die Treibhausgaskonzentration auf einem Niveau zu stabilisieren sei, auf dem eine gefährliche, durch den Menschen verursachte Störung des Klimasystems verhindert wird. Wie hoch diese Konzentration konkret sein muss, ist trotz aller intensiven Forschung bis heute nicht geklärt. Es wird davon ausgegangen, dass bei der Stabilisierung der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre auf dem heute bereits erreichten Niveau (380 ppm für CO₂ alleine, über 400 ppm unter Ein-

beziehung auch anderer Treibhausgase, wie Methan, Lachgas und fluoridierte Gase) eine relativ hohe Wahrscheinlichkeit herrscht, dass die Temperatur nicht um mehr als 2°C über das Temperaturniveau vor der Industrialisierung steigt. Dies würde dann als das Niveau angesehen, bei dem zumindest eine gefährliche Störung des Klimasystems verhindert wird.

In einem ersten Schritt zur Erreichung dieser Zielsetzung haben sich die rund 180 Unterzeichnerstaaten in der Klimarahmenkonvention, die 1994 in Kraft getreten ist, auf eine, ebenfalls unverbindliche, Stabilisierung der anthropogenen Treibhausgasemissionen auf der Welt bis zum Jahre 2000 auf dem Niveau von 1990 geeinigt. Wie wenig solche politischen Absichtserklärungen, die in der Regel kaum etwas mit der politischen Realität zu tun haben, in der Praxis dann tatsächlich bewirken, zeigte die Tatsache, dass im Jahre 2000 dann die anthropogenen CO₂-Emissionen bereits um 10 Prozent und 2008 sogar um 37 Prozent über denen von 1990 lagen².

Jetzt liegt der berechtigte Verdacht nahe, dass eine eher unverbindliche Absichtserklärung in einer UN-Konvention natürlich nur wenig bewirken kann. Aber auch das dann 1997 bei der 3. Vertragsstaatenkonferenz zur Klimarahmenkonvention im japanischen Kyoto verabschiedete und völkerrechtlich verbindliche Kyoto-Protokoll hatte keine wirkliche Auswirkung auf die Emissionsentwicklung auf der Erde. Dies hatte mehrere Gründe: Der wichtigste ist wohl, dass es sich beim

Kyoto-Protokoll um gar kein, eigentlich notwendiges, globales Abkommen handelt. Zur Minderung verpflichtet werden darin nur ca. 40 Industrieländer und Transformationsländer des ehemaligen Ostblocks. Diese waren zu der Zeit zugegebenermaßen die größten Treibhausgas-Emittenten, mit den USA an der Spitze, die allein für ein Viertel der weltweiten Emissionen standen. Das Kyoto-Protokoll berücksichtigte aber nicht die damals schon sich abzeichnende Steigerung der Emissionen in den aufstrebenden Staaten vor allem Asiens, mit China an der Spitze, das heute die USA als größter Emittent weltweit abgelöst hat. Dies führte dazu, dass sich die USA auch offiziell im Jahre 2001 aus dem Kyoto-Protokoll zurückgezogen haben, mit der sicherlich berechtigten Begründung, dass nur ein globales Abkommen unter Einbezug aller großen Emittenten überhaupt etwas bewirken kann.

Von den im Kyoto-Protokoll verbliebenen Staaten werden bis zum Ende der sog. „Kyoto-Periode“ 2012 nur wenige Länder ihre damals zugesagten Zielsetzungen auch tatsächlich erreichen. Dazu gehören sicherlich die Transformationsländer des ehemaligen Ostblocks, aber weniger aufgrund vorbildlicher Reduktionsbemühungen sondern im Wesentlichen aufgrund des dramatischen wirtschaftlichen Zusammenbruchs. Dazu gehören auch wenige Länder der EU, darunter vor allem Deutschland und UK. Ob die EU als Ganzes ihr Minderungsziel von 8 Prozent (gerechnet auf die EU-15, die seinerzeit das Kyoto-Protokoll unterzeichnet hat) erreichen wird, ist noch fraglich, da sechs der EU-15-Staaten ihre Emissionen deutlich erhöht und nicht gesenkt haben³.

2012 werden die Verpflichtungen aus dem Kyoto-Protokoll enden. Schon

seit einigen Jahren bemüht sich die internationale Staatengemeinschaft intensiv um ein Nachfolgeabkommen, in dem die Zeit nach 2012 geregelt werden soll. Ein letzter negativer Höhepunkt in dieser Diskussion war die 15. Vertragsstaatenkonferenz zur Klimarahmenkonvention in Kopenhagen im Dezember 2009, bei der, so der Plan, ein Abkommen verabschiedet werden sollte. Dies gelang aus vielerlei Gründen nicht. Ein wichtiger Grund ist sicherlich, dass die Entwicklungsländer, darunter auch China und Indien, nicht bereit sind, eigene ambitionierte Klimaschutzverpflichtungen einzugehen. Sie sehen die Industrieländer nach wie vor in der Pflicht, mit entsprechenden starken Minderungen voranzuschreiten und sehen selbst ihren Entwicklungsbedarf, der zwangsläufig mit weiterem Energiebedarf und entsprechend höheren Emissionen verbunden sein wird. Die Entwicklungsländer zeigen heute schon so massive Emissionszuwächse, dass sämtliche Reduktionen in den Industrieländern mehrfach überkompensiert werden. Das ändert sich auch nicht dadurch, dass inzwischen auch von vielen Entwicklungsländern Minderungszusagen vorliegen. Diese sind nämlich durchgehend spezifischer Art. D.h. die Minderungen werden in der Regel auf das Bruttoinlandsprodukt (BIP) bezogen, mit dem Effekt, dass zwar die Emissionen pro Einheit des BIP sinken, aber aufgrund des hohen Wirtschaftswachstums auch die absoluten Emissionen stark ansteigen.

Ein anderer Grund ist aber sicherlich auch, dass außerhalb Europas kaum Staaten existieren, die tatsächlich in der Größenordnung ihre Emissionen reduzieren wollen, wie es der Weltklimarat empfiehlt. Im Vorfeld der Konferenz hatte der Weltklimarat empfohlen, dass die Industrieländer ein Minderungsziel bis 2020 von 25 bis 40% auf

Basis ihrer Emissionen von 1990 beschließen sollten⁴. Die meisten Industrieländer haben zwar inzwischen ihre Vorstellungen für Minderungsziele im Rahmen des sog. „Kopenhagen Accords“ formuliert⁵. Dabei liegt aber kein Land in dem von der Wissenschaft vorgeschlagenen Korridor. Selbst die EU hält zunächst zu Recht an ihrem Minderungsziel von 20% bis 2020 fest und will erst sinnvoller Weise auf 30% erhöhen, wenn die anderen Industrieländer entsprechende Zusagen machen, wozu es in absehbarer Zeit nicht kommen wird.

Bilanziert man über alle Zusagen der Entwicklungs- und Industrieländer, die jetzt vorliegen, so werden die Emissionen bis 2020 gegenüber 1990 nochmals deutlich ansteigen und nicht, wie eigentlich gefordert, absinken. Inzwischen erwartet die internationale Staatengemeinschaft auch schon nicht mehr, dass beim nächsten Klimagipfel im Dezember 2010 in Mexiko ein Abkommen zustande kommt. Die Erwartungen liegen dann auf der im Dezember 2011 stattfindenden COP17 in Südafrika, wobei aber auch hier schon viele Zweifel laut werden, ob dann ein Abkommen gelingen wird. An eine nahtlose Anknüpfung in 2013 an das Kyoto-Protokoll glaubt in Anbetracht der schon stark vorangeschrittenen Zeit niemand mehr.

Politische Instrumente zum Klimaschutz

Insbesondere in Europa und Deutschland werden bereits seit Jahren Instrumente zum Klimaschutz, d.h. zur Verminderung der Treibhausgasemissionen und hier vor allem von CO₂, entwickelt und eingeführt. Nachfolgend wird nur eine kleine Auswahl der wichtigsten Instrumente beschrieben.

Allen gemeinsam ist, dass sie hohe Kostenbelastungen für die Bürger und auch vor allem für die Wirtschaft mit sich bringen. Vor dem Hintergrund der Tatsache, dass Klimaschutz nicht umsonst zu haben ist, sondern Geld kostet, ist dies zunächst nachvollziehbar. Die Probleme entstehen jedoch für die Industrie dadurch, dass diese Belastungen regional, d.h. auf Europa bzw. Deutschland beschränkt sind. Da praktisch, wie zuvor bereits dargelegt, sonst kein Land und keine Region auf der Erde vergleichbare Minderungsverpflichtungen eingegangen ist, werden dort auch nicht die entsprechenden Instrumente eingeführt, um auch tatsächlich entsprechende Treibhausgasreduktionen zu initiieren. Durch die einseitigen Belastungen für die Industrie drohen den Unternehmen, die im internationalen Wettbewerb stehen, Nachteile, da sie in der Regel die Zusatzkosten aus den klimaschutzpolitischen Instrumenten nicht weitergeben können. Im schlimmsten Fall führt dies dazu, dass Produktionen in Länder ohne solche Belastungen abwandern oder zumindest Neuinvestitionen in entsprechend belastete Produktionen, und hier sind vor allem die energieintensiven Prozesse zu nennen, nicht mehr in Europa getätigt werden, sondern in Nordamerika, China oder anderswo auf der Welt. Ist dann in diesen Ländern die Energieeffizienz schlechter als in Europa, führt die Abwanderung von Produktionen aus Europa zu der kuriosen Konsequenz, dass am Ende trotz ehrgeiziger Klimaschutzziele und -Instrumente in Europa global gesehen sogar weniger Klimaschutz resultiert. Ein gutes Beispiel hierfür ist die chemische Industrie. Nirgendwo auf der Welt werden weniger Treibhausgase ausgestoßen bei der chemischen Produktion als in Westeuropa. In einer Studie des Weltchemieverbandes ICCA aus dem Jahr 2009⁶ wurde festgehalten, dass

in den USA fast doppelt so viele Treibhausgasemissionen und in China sogar fast dreimal so viele pro erwirtschaftetem US-Dollar ausgestoßen werden wie in Europa. Dies bedeutet, würde Chemieproduktion aus Europa nach China oder USA abwandern, würden sich insgesamt die Treibhausgasemissionen der chemischen Produktion erhöhen. Dem Aspekt der Bedrohung der Wettbewerbsfähigkeit durch Klimaschutzpolitische Instrumente für die Industrie wurde deshalb auch in den meisten Instrumenten Rechnung getragen, wenn auch nicht im eigentlich erforderlichen Umfang.

Das sicherlich wichtigste klimaschutzpolitische Instrument in Europa ist der Handel mit Berechtigungen für Treibhausgasemissionen, der sogenannte EU-Emissionshandel. Er wurde 2005 bereits vor Beginn der eigentlichen Kyoto-Periode (die streng genommen die Unterzeichnerstaaten erst in der Periode 2008 bis 2012 verpflichtet hat) eingeführt. Betroffen sind die europäische Energiewirtschaft und Industrie und ab 2011 auch die Fluggesellschaften. Theoretisch stellt der Emissionshandel das kosteneffizienteste Klimaschutzinstrument dar, da im Idealfall immer die kostengünstigsten Maßnahmen zur Treibhausgasminde rung durchgeführt werden. Damit ist das Instrument auch grundsätzlich dem Ordnungsrecht überlegen, da der Staat in der Regel nicht in der Lage ist, die kostengünstigsten Maßnahmen vorzugeben. Die Preise für die Tonne Kohlendioxid, also im Prinzip die Vermeidungskosten für diese Tonne lagen seit der Einführung des Instruments im Maximum bei ca. 30 Euro und im Minimum deutlich unter 10 Euro.

Das Besondere und damit auch das Problematische am europäischen Emissionshandel ist jedoch die Tatsa-

che, dass mit ihm für die europäische Wirtschaft als einziger Region in der Welt eine absolute Emissionsobergrenze eingeführt wurde. Diese war in der ersten Periode von 2005 bis 2007 noch vergleichsweise moderat, wurde aber bereits in der zweiten Handelsperiode (2008 bis 2012) deutlich unter den tatsächlichen Treibhausgasausstoß der betroffenen Unternehmen gesenkt und wird ab 2013 nochmals dramatisch auf einen Wert gesenkt, der im Jahre 2020 um 21% unter dem Emissionswert von 2005 liegt. D.h. die Wirtschaft muss bis 2020 ihre Emissionen zwangsläufig um 21% gegenüber dem Wert von 2005 senken⁷ und trägt damit die Hauptlast der Klimaschutzzielsetzung der EU⁸. Trotz der Tatsache, dass zum Erhalt der internationalen Wettbewerbsfähigkeit der Industrie für diese auch bis 2020 noch eine teilweise kostenlose Zuteilung der Emissionszertifikate vorgesehen ist, werden die finanziellen Belastungen aus diesem Instrument für die Industrieunternehmen aufgrund des notwendigen Zukaufs von Emissionszertifikaten, aber auch aufgrund steigender Strompreise (die Energieversorger wälzen ihrerseits ihre Kosten auf den Strompreis ab, da sie selbst nicht im Wettbewerb stehen) stark anwachsen. Alleine die chemische Industrie in Deutschland erwartet ab 2013 Zusatzkosten aus dem Emissionshandel von 800 Mio. Euro pro Jahr.

Auf den Emissionshandel hat Deutschland weitere Klimaschutzinstrumente aufgesetzt, ohne zu prüfen, ob diese Instrumente auch tatsächlich zusätzliche Treibhausgasemissionsminderungen bewirken oder nur zusätzliche Kosten verursachen. Beschrieben werden sollen hier nur exemplarisch das Erneuerbare-Energien-Gesetz und die Ökosteuer.

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) gibt vor, dass durch massive finanzielle

Förderung über eine garantierte Einspeisevergütung für den produzierten Strom der Ausbau von erneuerbaren Energien gefördert wird. Da die Fördermittel nicht aus dem Staatshaushalt stammen, sondern direkt vom Stromverbraucher kommen, der eine Umlage auf jede Kilowattstunde verbrauchten Strom zahlen muss, handelt es sich formaljuristisch nicht um eine Subvention, obwohl sie praktisch nichts anderes darstellt. Im Jahre 2010 beträgt die Erneuerbaren-Energien-Umlage aufgrund des massiven Ausbaus bereits über 2 Cent pro Kilowattstunde, also fast 10 Prozent des Strompreises von Haushaltskunden. In den nächsten Jahren wird eine weitere deutliche Erhöhung erwartet. Auch hier wurde bereits erkannt, dass durch die einseitige Belastung der Industrie in Deutschland durch die EEG-Umlage eine Bedrohung der Wettbewerbsfähigkeit einhergeht. Aus diesem Grunde wurden besonders stromintensive Unternehmen durch eine Härtefallregelung entlastet.

Das Instrument der Förderung Erneuerbarer Energien über eine Einspeisevergütung birgt einige Probleme, von denen nur zwei exemplarisch dargestellt werden sollen. Ein Problem ist, dass die Kosten, die das Instrument verursacht, in keinem sinnvollen Verhältnis zu den Treibhausgasemissionen stehen, die damit verbunden sind. Dies führt dazu, dass die spezifischen Vermeidungskosten hoch sind im Vergleich zu anderen Instrumenten. Im Falle der Photovoltaik betragen sie mehrere 100 Euro pro Tonne vermiedenen Kohlendioxid. Ein zweites Problem ist die Tatsache, dass zwar formal durch das EEG bei der Stromerzeugung Emissionen von fossilem Kohlendioxid vermieden werden, faktisch das Instrument EU-weit vor dem Hintergrund des Emissionshandels jedoch wirkungslos bleibt. Die Emissionen, die

in der Stromerzeugung in Deutschland vermieden werden, führen dazu, dass eine entsprechende Menge an Emissionsberechtigungen freigesetzt wird, die dann in der Industrie oder in der Energieerzeugung in anderen EU-Staaten zur Emission genutzt werden. Die Gesamtemission in der EU in der Energieerzeugung und Industrie wird einzig und alleine durch die Gesamtmenge der im Markt zur Verfügung stehenden Emissionsberechtigungen bestimmt.

Ein weiteres deutsches ökonomisches Instrument zur Minderung von Treibhausgasemissionen ist die 1999 eingeführte Ökosteuern. Absicht dabei war, Energieverbrauch durch eine Steuer zu verteuern und damit einen Anreiz zu setzen, Energie zu sparen bzw. effizienter damit umzugehen. Tatsache ist, dass Energie, vor allem Strom, deutlich verteuert wurde. Ob damit tatsächlich nennenswerte Mengen an Kohlendioxid-Emissionen verhindert wurden, ist zumindest umstritten. Insofern sind Vermeidungskosten bei diesem Instrument auch kaum zu bestimmen. Jedenfalls wurde auch bei diesem Instrument erkannt, dass durch eine solche Steuer auf Energie die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft belastet wird. Aus diesem Grund wurde eine weitgehende Entlastung des produzierenden Gewerbes vorgesehen. Im Gegenzug hat sich die deutsche Wirtschaft dazu verpflichtet, ihre spezifischen Treibhausgasemissionen bis 2012 um 35 Prozent zu reduzieren. Diese Verpflichtung hat wesentlich dazu beigetragen, dass Deutschland sein Minderungsziel im Kyoto-Protokoll einhält.

Klimaschutz im Alltag

Die Politik kann mit ihrer Zielsetzung und der Anwendung von Instrumen-

ten nur begrenzt zur Minderung der CO₂-Emissionen beitragen und damit Klimaschutz bewirken. Eine erhebliche Verantwortung verbleibt bei jedem Einzelnen, der durch sein persönliches Verhalten mehr oder weniger zum Klimaschutz beitragen kann.

Eine wichtige Rolle dabei spielen die Produkte, die das tägliche Leben eines jeden Einzelnen bestimmen. Die Industrie kann zu einem klimafreundlichen Konsum so beitragen, dass sie intelligente Produkte entwickelt und diese nicht nur so energie- und damit treibhausgas-effizient wie möglich produziert, sondern dass diese Produkte auch dabei helfen, im täglichen Leben die Treibhausgasemissionen so weit wie möglich zu minimieren.

Ein derzeit immer stärker diskutierter Ansatz, die Klimawirksamkeit von Produkten transparenter zu machen und damit den Verbraucher zu unterstützen, über seinen persönlichen Konsum zum Klimaschutz beizutragen, ist die Darstellung des sogenannten „CO₂-Fußabdrucks“ eines Produktes (PCF, Product Carbon Footprint). Supermarktketten in England haben als erste damit begonnen, auf ihren Produkten Zahlenwerte für den CO₂-Fußabdruck auszuweisen und damit über den CO₂-Ausstoß zu informieren, der mit der Herstellung des jeweiligen Produktes verbunden ist. Zweck dieses Vorgehens soll sein, dass der Kunde eine Entscheidungsmöglichkeit darüber hat, wie viel CO₂-Emission er mit dem jeweiligen Produkt „einkauft“. Problem dieses Vorgehens ist jedoch, und das wurde auch in einem deutschen Pilotprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes bestätigt, dass bislang keine allgemein anerkannten Methoden existieren, die tatsächlich eine Vergleichbarkeit der Angaben auf den Produkten ermöglichen. Das BMU kommt

deshalb zusammen mit der Wirtschaft zum Schluss, dass auf Basis der bisherigen Erkenntnisse und Erfahrungen die Angabe eines rein numerischen Wertes für den Product Carbon Footprint – also eines Labels, das lediglich eine bestimmte Menge CO₂ ausweist – auf einem Produkt kein sinnvolles und zuverlässiges Instrument für eine effektive Verbraucherkommunikation ist⁹.

Wichtig ist es, die CO₂-Bilanz eines Produktes über seinen ganzen Lebenszyklus zu ermitteln, um belastbare Aussagen über seine Klimawirksamkeit zu machen. Die Beschränkung der Betrachtung alleine auf die Produktion ist zu kurz gegriffen, da in den meisten Fällen der weitaus größte Teil der Treibhausgasemissionen in der Gebrauchsphase entsteht.

Diese Zusammenhänge hat die chemische Industrie für ihre Produkte in einer globalen Studie untersuchen lassen¹⁰. Betrachtet wurden in der Studie ca. 100 Chemieprodukte aus allen Bereichen der chemischen Industrie. Dazu gehörten unter anderem Dämmstoffe, Dünge- und Pflanzenschutzmittel, Kunststoffe für den Bau- und Transportbereich aber auch z.B. Produkte des täglichen Lebens wie Waschmittel. Es wurde berechnet, wie viele Emissionen durch Chemieprodukte bei der Rohstoffgewinnung, bei ihrer Produktion und bei ihrer späteren Entsorgung verursacht werden. Dann wurde gegengerechnet, wie viele Emissionen diese Produkte in allen möglichen Anwendungen einsparen. In der Studie wurde ermittelt, dass heute bereits durch die Anwendung dieser Produkte

mehr als doppelt so viele Treibhausgasemissionen eingespart werden, als bei ihrer Produktion erzeugt werden. Global würde das bedeuten, dass in einer Welt ohne Chemieprodukte der Treibhausgasausstoß um rund 5 Mrd. Tonnen oder mehr als 10 Prozent pro Jahr höher wäre als das heute der Fall ist. In Zukunft wird der Effekt noch größer werden, weil einerseits die Nutzung von Chemieprodukten zunehmen wird und ihre Produktion noch effizienter werden wird. Für das Jahr 2030 wird erwartet, dass die Chemieprodukte mindestens dreimal so viele Emissionen einsparen wie ihre Produktion verursacht.

AUTOR:

Dr. Jörg Rothermel ist beim Verband der Chemischen Industrie (VCI) zuständig für Energie und Klima, Recht und Steuern.

LITERATUR

- [1] Alle Sachstandsberichte des IPCC sind unter folgender Adresse verfügbar: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.htm
- [2] Hans-Joachim Ziesing: Differenzierte Entwicklung bei insgesamt weiter steigenden weltweiten CO₂-Emissionen, *Energiawirtschaftliche Tagesfragen* Nr. 9/2009
- [3] ebenda
- [4] 4. IPCC Sachstandsbericht, Bericht der Arbeitsgruppe III „Mitigation of Climate Change“, Kapitel 13, Seite 776
- [5] Die Meldungen an das Klimasekretariat können abgerufen werden unter <http://unfccc.int/home/items/5264.php>
- [6] Innovations for Greenhouse Gas Reductions: A life cycle quantification of carbon abatement solutions enabled by the chemical industry. ICCA 2009. Abrufbar unter www.icca-chem.org/ICCADocs/ICCA_A4_LR.pdf
- [7] Richtlinie 2009/29/EG des europäischen Parlamentes und des Rates zur Änderung der Richtlinie 2003/87/EG zwecks Verbesserung und Ausweitung des Gemeinschaftssystems für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten vom 23. April 2009
- [8] Entscheidung Nr. 406/2009/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates über die Anstrengungen der Mitgliedstaaten zur Reduktion ihrer Treibhausgasemissionen mit Blick auf die Erfüllung der Verpflichtungen der Gemeinschaft zur Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2020 vom 23. April 2009 Der Durchschnitt der Minderungsvorgaben an die Mitgliedsstaaten, die für die Emissionen außerhalb des Emissionshandels gelten, liegt bei 10 Prozent gegenüber 2005 und damit bei weniger als der Hälfte der Minderungsleistung von 21 Prozent gegenüber 2005, die der Emissionshandelssektor erbringen muss. Zusammen ergibt sich daraus das übergreifende Minderungsziel von 20 Prozent gegenüber 1990 bis zum Jahr 2020.
- [9] Zur Vertiefung siehe den gemeinsamen Leitfaden von BMU und BDI „Produktbezogene Klimaschutzstrategien – Product Carbon Footprint verstehen und nutzen“ von August 2010, abrufbar unter http://www.bdi.eu/download_content/KlimaUndUmwelt/PCF-Leitfaden_100810_Online.pdf
- [10] Innovations for Greenhouse Gas Reductions: A life cycle quantification of carbon abatement solutions enabled by the chemical industry. ICCA 2009. Abrufbar unter www.icca-chem.org/ICCADocs/ICCA_A4_LR.pdf

5.2 Emissionshandel als Instrument des Klimaschutzes

1. Klimaschutzziele

Umweltschutz benötigt Ziele, wie jeder anderer Bereich menschlicher Tätigkeiten. So ist für den Klimaschutz das 2-Grad-Ziel das Oberziel. Dieses Ziel wurde von deutschen Wissenschaftlern bereits Mitte der 1990er Jahre abgeleitet, hat sich zwischenzeitlich weltweit etabliert und wurde Ende letzten Jahres auch vom Weltklimagipfel in Kopenhagen von den dort anwesenden Regierungen als gemeinsames Ziel akzeptiert.

Das 2-Grad-Ziel, also die mittlere Erdtemperatur nicht mehr als um 2 Grad Celsius ansteigen lassen zu wollen, ist ein so genanntes Langfristziel. Daher benötigt man ein Programm, wie dieses Ziel erreicht werden kann, wobei die Grundzüge des Programms bereits weitgehend klar sind: Die Klimamodelle der führenden Forscher auf diesem Gebiet besagen, dass die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre nicht über 450 ppm ansteigen darf, ansonsten wäre nach Meinung führender Wissenschaftler das 2-Grad-Ziel nicht zu erreichen.

Bei Beibehaltung der heutigen CO₂-Emissionen inklusive der zu erwartenden Steigerungen in den Schwellen- und Entwicklungsländern würde für 2050 eine deutlich höhere CO₂-Konzentration als 450 ppm resultieren. Daher müssen, je nach unterstellten wirtschaftlichen Entwicklungsszenarien die Emissionen reduziert werden. Die weltweit 1990 emittierten globalen Treibhausgas-Emissionen sollten 2050

halbiert sein; für Industriestaaten folgen hieraus erforderliche Einsparungen oberhalb von 80 Prozent, wobei das Programm mit seinen Eckpunkten gegenwärtig sowohl in der Wissenschaft als auch in der Politik kontrovers diskutiert wird. Schließlich benötigt man politische Instrumente, die helfen, das Programm umzusetzen. Früher war ein probates und sehr erfolgreiches Instrument das Ordnungsrecht. Der Staat hatte in der Vergangenheit beispielsweise Grenzwerte für Luftschadstoffe festgelegt und von den relevanten Industriebetrieben deren Einhaltung verlangt. Die Einhaltung wurde kontrolliert, und bei Zuwiderhandlung erfolgten empfindliche Sanktionen bis hin zu strafrechtlichen Konsequenzen. Letztlich ein hochwirksames Instrument, aber ein Instrument, das von der Wirtschaft wenig geliebt und von vielen Fachleuten als inflexibel angesehen wurde.

2. Der Emissionshandel: ein Umsetzungsinstrument

Schon lange liebäugelten manche Experten und Interessenvertreter mit anderen Instrumenten, die über ökonomische Steuerung funktionieren sollten. Die Notwendigkeit, für den Klimaschutz ein gänzlich neues Instrumentarium etablieren zu müssen, brachte den Durchbruch.

Der Emissionshandel wurde zunächst über das Kyoto-Protokoll international entschieden und zwar als so genannter „flexible mechanism“, der von den USA gegen den erbitterten Widerstand der EU ins Protokoll eingebracht wurde.

Später kam es in Europa dann zu einer Positionsveränderung, und zum 1. Januar 2005 wurde der Emissionshandel in der EU verbindlich eingeführt. Europäische Rechtsgrundlage des Emissionshandels ist die Emissionshandelsrichtlinie (Richtlinie 2003/87/EG⁽¹⁾); diese Richtlinie musste von den EU-Mitgliedsstaaten in ihre jeweilige nationale Gesetzgebung umgesetzt werden.

Der Emissionshandel wurde den ordnungsrechtlichen Instrumenten vorgezogen, weil dieser Handel einfacher und flexibler sein sollte. Darüber hinaus sollte dort investiert werden, wo mit einer gegebenen Summe Geldes die höchsten Erfolge für den Klimaschutz zu erreichen wären. Also könnten die Klimaschutzziele mit minimalen volkswirtschaftlichen Kosten erreicht werden, so die Theorie.

Der Emissionshandel ist jetzt seit 2005 in der EU in Kraft. Er umfasst bisher nur den Energie- und Industriesektor. Genauer gesagt, sind alle thermischen Kraftwerke oberhalb 20 Megawatt sowie die folgenden fünf Industriebranchen dem Emissionshandel unterworfen:

1. Eisen- und Stahlverhüttung,
2. Zement- und Kalkherstellung,
3. Kokereien, Raffinerien und Cracker,
4. Glas-, Keramik- und Ziegelindustrie
5. Papier- und Zelluloseproduktion.

Der Emissionshandel wendet sich an den jeweiligen Anlagenbetreiber. Für die emittierte CO₂-Menge benötigt er Emissionszertifikate, und zwar in der exakten Höhe seiner Emissionen. Ab-

gerechnet wird jährlich zum 30. April. Nach Vorlage der Zertifikate werden diese von der zuständigen Behörde entwertet. Damit hat der Betreiber seine wesentliche Pflicht erfüllt. Kann der Betreiber keine ausreichende Menge an Zertifikaten vorlegen, erfolgen empfindliche Sanktionen. Aktuell erfasst der Emissionshandel in Europa rund 12.000 Anlagen in 30 europäischen Ländern, die zusammen etwas mehr als die Hälfte der CO₂-Emissionen in diesen Ländern ausmachen. Der Emissionshandel wurde gesetzlich für so genannte Handelsphasen abgewickelt, um die jeweiligen Festlegungen auch über einen mehrjährigen Zeitraum erproben und beobachten zu können. Wir unterscheiden gegenwärtig drei Handelsphasen.

Die Zertifikate erhielt der Betreiber in der 1. Phase des Emissionshandels in Europa (2005 – 2007) fast überall kostenlos, und zwar vom jeweiligen Nationalstaat und in der Höhe der Emissionen der Vorjahre vor dem Inkraftsetzen des Systems, also 2000

– 2002^[2]. Die erste Phase war eine Erprobung unter realen Bedingungen für das neue Instrument, daher entstand auch eine gewisse Überversorgung mit Emissionszertifikaten. Sofern der Betreiber CO₂-Einsparungen im Betrachtungszeitraum erreicht hat, kann er die überschüssigen Zertifikate verkaufen. Wenn ein Betreiber beispielsweise seine Produktion steigern möchte oder eine Erweiterung plant, kann er sich die zusätzlich benötigten Zertifikate dazu kaufen. Hierdurch entstehen ein Handel, ein Markt und natürlich ein Preis für die Emissionszertifikate. Wird nun die kostenfrei zugeteilte Zertifikatmenge über eine klimapolitisch festgelegte Obergrenze (cap) in den Folgejahren ständig reduziert, so gehen die Preise für die gehandelten Zertifikate in die Höhe. Dadurch erhöht sich der Anreiz für Anlagenbetreiber, in CO₂-Reduktion zu investieren und diese Einsparungen dann zu verkaufen. Gleichzeitig wird über das „cap“ erreicht, dass die politisch festgelegten Einsparungen auch erreicht werden.

Gegenwärtig läuft die zweite Phase des EU- Emissionshandels (2008 – 2012), die gleichzeitig auch die erste relevante Phase des Kyoto-Protokolls ist, für die es europäische und auch nationale verpflichtende Einsparziele gibt. So hat sich die EU im Kyoto-Protokoll verpflichtet, bis 2012 ihre Treibhausgasemissionen um 8 Prozent bezogen auf das Jahr 1990 zu senken, Deutschland hat eine Reduktion um 21 Prozent zu erreichen.

In der zweiten Phase wird daher das „cap“ für die gratis zu verteilenden Zertifikate entsprechend reduziert. Weiter haben die Mitgliedsstaaten die Möglichkeit, bis zu 10 Prozent der Zertifikate per Auktion zu verkaufen. Schließlich wurde für die zweite Phase auch die Möglichkeit eröffnet, Zertifikate über JI⁽³⁾ (Joint Implementation – Gemeinsame Umsetzung) und CDM⁽⁴⁾ (Clean Development Mechanism – Grüner Entwicklungsmechanismus) zu erzeugen beziehungsweise zu erwerben, also durch Finanzierung von Treibhausgas-Einsparungen in anderen Ländern,

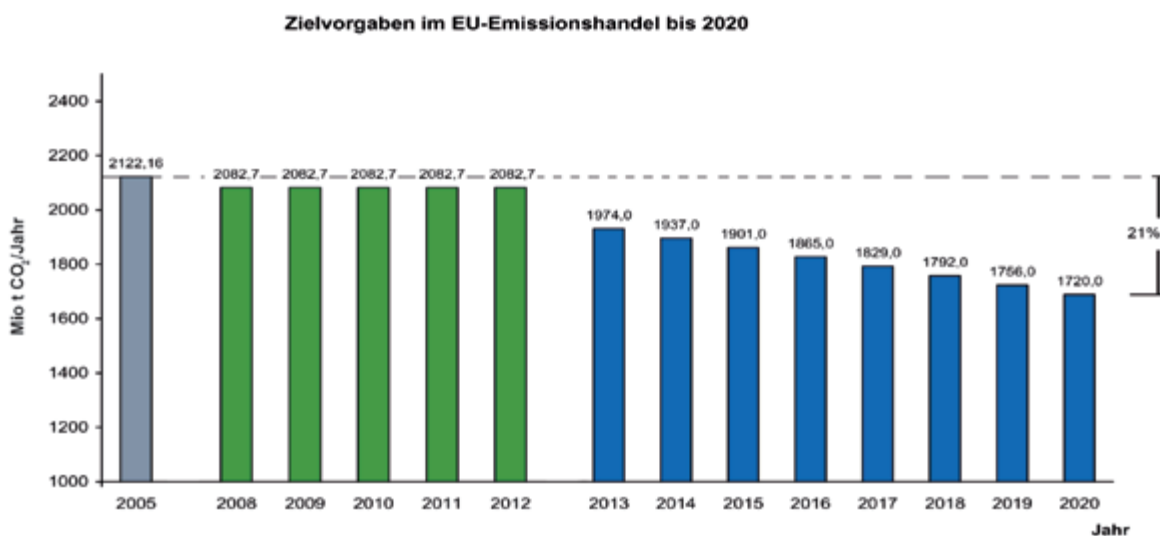


Abbildung 1: Zielvorgabe im EU-Emissionshandel^[6].

insbesondere in Schwellen- und Entwicklungsländern, nationale „Einsparungen“ zu erbringen. Die Nationalstaaten können den Beitrag dieser Option für die Zielerreichung begrenzen, was im Fall Deutschlands mit einer Begrenzung auf 22 Prozent erfolgt ist.

In der dritten Phase (2013 – 2020), deren Regeln in der EU bereits politisch festgelegt sind, wird das System weiter verschärft. Die Vergabe der Zertifikate wird in dieser Periode von der EU-Kommission auf europäischer Ebene harmonisiert. Basis für die Vergabe ist ein einheitliches „cap“ für die EU. Die zur Verfügung gestellten Zertifikate werden im Jahr 2013 nur noch 1,97 Milliarden Tonnen Kohlendioxid (CO₂) betragen.

Die Menge wird ab 2010 jährlich um 1,74 Prozent abgesenkt, um schließlich im Jahr 2020 1,72 Milliarden Tonnen unterschritten zu haben. Weiter wird der Emissionshandel auf Lachgas (N₂O) sowie Perfluorcarbone aus der Aluminiumproduktion ausgedehnt, und

der Anteil der Auktionierung steigt von 20 Prozent 2013 auf 70 Prozent im Jahr 2020. Die Elektrizitätswirtschaft muss bereits 2013 alle Zertifikate per Auktion beschaffen, wobei für Kohlekraftwerke in Osteuropa Ausnahmen festgelegt wurden. Abbildung 1 zeigt, wie sich das EU-cap, also die Zielvorgabe des EU-Emissionshandels, bis 2020 entwickeln soll.

3. Bisherige Erfahrungen mit dem Instrument Emissionshandel

Die bisherigen Erfahrungen mit dem Instrument Emissionshandel in Europa sind natürlich nach wie vor noch nicht gefestigt, da es immer noch ein junges Instrument ist.

Eine Erfahrung ist sicherlich, dass seine Einführung gelungen ist und das System in Europa im Grundsatz funktioniert^[6]. Abbildung 2 zeigt, wie sich die Zertifikatpreise entwickelt haben. Zunächst war in 2005 ein überraschend starker Preisanstieg zu beobachten,

der sich aus der mangelnden Transparenz bei der Preisbildung erklären dürfte. Als 2006 die Meinung entstand, dass in der EU wohl seitens der Mitgliedsstaaten eine Überversorgung mit Zertifikaten stattgefunden habe, brach der Markt ein. In der zweiten Handelsperiode ist eine Konsolidierung eingetreten.

Eine weitere Erfahrung aus der ersten Phase war die Handlungsweise der Energieversorger, die die Zertifikate trotz kostenloser Verteilung in ihre Bilanzen einpreisten und damit Zusatzgewinne (Windfall Profits) erzielten (2005 und 2006 immerhin rund 5 Milliarden Euro). Diese Gewinne werden zwischenzeitlich über Auktionierungen abgeschöpft. Eine weitere Erfahrung war die mangelhafte Datenlage, die einen störungsfreien Start des Handelssystems sehr erschwert hat ^[2, 3].

Dann hat sich herausgestellt, dass der Emissionshandel keinesfalls ein schlankes Instrument des Umweltschutzes darstellt. Die Regelungen und



Abbildung 2: Entwicklung der Zertifikatpreise (EUA) im EU-Emissionshandel in der 1. Handelsphase ^[8].

die Vollzugspraxis haben sich zu einem komplexen System entwickelt. Ob am Ende der Emissionshandel weniger Bürokratie verursacht als ein vergleichbares ordnungsrechtliches System, ist daher eine offene Frage. Ebenso ist noch offen, ob der Emissionshandel seine eigentliche Bewährungsprobe bestehen wird. Denn viele der Vorteile eines Systems, das ausschließlich elektronisch erfolgt, das auf Selbsterklärungen der Betreiber aufbaut und zur Kontrolle auf private Unternehmen zurückgreift, können sich dann, wenn demnächst viel Geld im Spiel ist, in ihr Gegenteil verkehren. Dies zeigen schon die kürzlich in Deutschland festgestellten Missbrauchsfälle^[7]. Und es werden nicht die letzten Problemfälle bleiben, denn der Hauptmangel des Systems ist die mangelnde behördliche Kontrolle auf Ebene der Einzelbetriebe. Zwar wurde in Deutschland den Immissionsschutzbehörden der Bundesländer diese Kontrollverantwortung aufgegeben. Aber diese Verantwortung wird nicht von allen Ländern akzeptiert und sehr unterschiedlich wahrgenommen.

4. Ausblick

In den nächsten Jahren wird sich der Emissionshandel bewähren müssen. Bei deutlich steigenden Zertifikatpreisen ist nicht auszuschließen, dass es verstärkt zu Regelverletzungen bis hin zu Betrug kommen kann. Das System kann natürlich über verbesserte Kontrollen und stärkere ordnungsrechtliche Durchgriffe gegenüber Missbrauch sicherer gemacht werden.

Weiter wird der Emissionshandel auf alle industriellen Sektoren ausgedehnt werden müssen. Mit der Integration des Flugverkehrs ist ein erster Schritt unternommen, auch den Mobilitätssektor einzubeziehen. In der Diskussion ist aktuell die Integration des Schiffsverkehrs in den Emissionshandel^[8]. Hierzu hat Deutschland zusammen mit anderen Ländern einen Vorschlag in die für Seeschifffahrt zuständige UN-Organisation IMO (International Maritime Organisation) eingebracht. Ob weitere Verkehrssektoren einbezogen werden können, hängt auch von konzeptionellen Fragen ab.

In welchem Umfang verbleibende Sektoren wie Wohnen, Landwirtschaft und ähnliche einbezogen werden können, oder ob man hier weiter mit ordnungsrechtlichen Instrumenten arbeiten will, ist gegenwärtig ebenfalls offen.

Schließlich wird in den nächsten Jahren auch zu entscheiden sein, ob man sich bei der Umsetzung der Klimaschutzprogramme auf die direkten Emissionen an Treibhausgasen beschränken will und kann. Heute gehen bereits 5 Prozent des aus Lagerstätten entnommenen fossilen Kohlenstoffs in die chemische Industrie, werden dort chemisch umgewandelt und in Form von Stoffen beziehungsweise chemischen Verbindungen als Produkte „emittiert“. Die Diskussion, ob und wie man in einem internationalen Klimaschutzregime zukünftig den **Stoffsektor** mit erfassen soll und kann, ist noch zu führen.

AUTOR:

Uwe Lahl ist Professor für Immissionsschutz und Abfallwirtschaft an der TU Darmstadt. Er war von 2000 bis 2009 Ministerialdirektor im Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

LITERATUR

- [1] In der aktuellen Fassung: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0063:0087:DE:PDF>
- [2] Uwe Lahl, Norbert Salomon, Camilla Bausch, Christine Lucha: Datengrundlage Emissionshandel in Deutschland. in: Wasser, Luft, Boden 48.2004, 3–4, S. 16–17, ISSN 0938-8303
- [3] Joint Implementation (JI, Gemeinschaftsreduktion) ist einer der im Kyoto-Protokoll vorgesehenen flexiblen Mechanismen zur Reduktion von Schadstoffemissionen. JI sind Reduktionen, die ein Annex B Staat (Liste der industrialisierten Länder) in einem anderen Annex B Staat erbringt.
- [4] Der Mechanismus für umweltverträgliche Entwicklung oder englisch Clean Development Mechanism (CDM) steht für einen weiteren flexiblen Mechanismus des Kyoto-Protokoll. Im Falle von CDM erbringt ein Industriestaat Reduktionsverpflichtungen in einem Entwicklungs- oder Schwellenland.
- [5] Benjamin Görlach: Das EU-Emissionshandelssystem: Erfahrungen, aktueller Stand und Ausblick, Ecologic Institute: http://ecologic.eu/download/vortrag/2009/Goerlach_EH_Energieakademie.pdf
- [6] Wissenschaftlicher Dienst des Deutschen Bundestages: Erfahrungen nach dem ersten Jahr des Europäischen Emissionshandels: http://www.bundestag.de/dokumente/analysen/2006/Erfahrungen_nach_dem_ersten_Jahr_des_europaeischen_Emissionshandels.pdf
- [7] <http://www.noows.de/umweltbundesamt-millionen-schaden-durch-betrueger-15164>
- [8] Uwe Lahl: Umweltpolitische Herausforderungen für Güterverkehr und Logistik: http://www.bzl-gmbh.de/de/sites/default/files/lahl_lotos2009.pdf
und: Workshop „Emissionshandel im Schiffsverkehr“
http://www.bmu.de/verkehr/schifffahrt_haefen/doc/44321.php

5.3 „Produktlinienanalyse“ – Mehr als ein Modewort

– Ein Tool zur Analyse der Ressourcenintensität/ Umweltbelastung eines Produktes –

Mit der Nachhaltigkeitsstrategie „Perspektiven für Deutschland“¹ hat die Bundesregierung ihren Anspruch für eine klimafreundliche Zukunft klar definiert. Im Wesentlichen liegt der Fokus auf der Befriedigung gegenwärtiger Bedürfnisse ohne die Chancen und Möglichkeiten zukünftiger Generationen zu beschränken. Das Leitbild adressiert folgerichtig Themengebiete wie die Ressourcenschonung, Erneuerbare Energien und Klimaschutz als Motor innovativer Unternehmensphilosophie. Eine nachhaltige „Dekarbonisierung“, also eine Minderung der CO₂ Emissionen, stellt somit eine nationale wie globale Kernherausforderung dar. Doch welche Ansätze der Einflussnahme – neben der politischen – auf eine nachhaltige Entwicklung bieten sich zum Beispiel Unternehmen und Konsumenten? Genau dieser Frage widmet sich die Produktlinienanalyse (PLA), auch bekannt als Produktlebenszyklusanalyse^{a)} oder „ökologischer Rucksack“. Sie basiert im Grundsatz auf dem Vergleich zwischen einer sogenannten herkömmlichen Produktion unter Verwendung fossiler Energieträger, dem „Business as usual“ Ansatz, und ihren Substitutionsalternativen. Dabei steht die PLA im Spannungsfeld der Nachhaltigkeit von Ökonomie, Ökologie sowie Sozialverträglichkeit.

Doch was genau verbirgt sich hinter dem Begriff Produktlinienanalyse?

Die PLA stellt eine Methode zur Beurteilung von Produkten und den damit

verbundenen Auswirkungen entlang des Lebensweges der Produktlinie. Innerhalb definierter Betrachtungs- bzw. Systemgrenzen werden Rohstoffbeschaffung, Wertschöpfung, Logistik, Verwendung und Recycling inklusive der Entsorgung auf den Prüfstand gestellt. Eine frühzeitige Integration des Tools in Forschung und Entwicklung kann dazu beitragen, neue Produkte und Verfahren hinsichtlich ihrer Zukunftsfähigkeit zu prüfen, um eine nachhaltige Wertschöpfung innerhalb der Produktionsstufen sicher zu stellen. Das daraus abgeleitete Ziel der Methode ist die Analyse von Produkten und Prozessen mit paralleler Suche nach einer „nachhaltigeren“ Produktions- und Nutzungsweise, welche die Chancengleichheit künftiger Generationen wahrt. Dies schließt ökologische, ökonomische sowie soziale Wirkungen der Produktlinie mit den damit verbundenen Stoffeinträgen in seine Umwelt ein. Folglich versteht sich die PLA als Weiterentwicklung der Ökobilanz nach DIN ISO 14040ff., welche sich ausschließlich auf ökologische Auswirkungen fokussiert.² Die zuvor genannten Indikatoren einer nachhaltigen Entwicklung lassen wie folgt kategorisieren:

Ökonomie:

- Preis/ Kosten/ Qualität
- Branchen- und Unternehmensdaten
- Außenhandel

Ökologie:

- Energie- und Materialaufwand
- Störfälle
- Abfälle und Schadstoffe in der Umwelt

Gesellschaft:

- Arbeitsbedingungen/ Arbeitssicherheit
- Individuelle soziale Auswirkungen
- Mensch und Umwelt

Die Zielgruppe der PLA bilden Unternehmen, Politiker, Verbraucherzentralen, Arbeitnehmer, Gewerkschaften und Konsumenten, die ihrerseits Interesse und Nutzen an Durchführung sowie Veröffentlichung der Ergebnisse von PLA haben.

Ihren Ursprung findet die Methode 1987 in der Projektgruppe Ökologische Wirtschaft des Ökoinstituts Freiburg.³ Seither wurde der Ansatz unter anderem auch vom *Verband der Chemischen Industrie (VCI)* in dem Programm *Responsible Care* weiter entwickelt.⁴ Abbildung 1 bietet einen Überblick über die im Kontext der PLA involvierten Stoff- und Energieströme.

Welche Tragweite könnte die kontinuierliche Anwendung der PLA für die chemische Industrie haben?

Am Beispiel der Produktion von Anilinfarben in der chemische Industrie lässt sich untersuchen, welche Auswirkungen die Verwendung fossiler Energieträger auf die Wertschöpfungskette

a) Nicht zu verwechseln mit dem Marketingbegriff „Produktlebenszyklusanalyse“.

hat. Dieser Farbtyp wurde gegen 1856 entwickelt, weil die Farben wesentlich lichtechter waren als solche, die auf nachwachsenden Rohstoffen basierten. Ausgehend von einem unverändert hohen Konsumanspruch wäre zunächst ein Vergleichsrohstoff zu erforschen, der ähnliche Produkteigenschaften gewährleistet. Nach Fischer kann die Herstellung von Farben aus dem Rohstoff Erdöl nicht zukunftsorientiert sein, weil Erdöl als fossiler Energieträger endlich ist. Folglich müsste bereits die Gewinnung sowie Verwendung der Ausgangsmaterialie substituiert werden. Da auch an dieser Stelle die Ganzheitlichkeit der Betrachtung gewahrt wird, ist zu ergänzen, dass der Rohstoff Erdöl sehr flexibel einsetzbar ist und die Grundlage einer breiten Produktpalette bildet. Wird er nicht für die Farbenherstellung genutzt, kann er vielleicht alternativ viel sinnvoller eingesetzt werden. Darüber hinaus muss auch der Energieaufwand einbezogen werden: In welchem Verhältnis steht die für den chemischen Prozess benötigte Umwandlungsenergie zur Gewinnung

eines auf Molekularbasis ebenbürtigen Rohstoffs?⁵ Neben dem Energieeintragsminimum, um den jeweiligen chemischen Prozess „fahren“ zu können, stellt sich die Frage der Nutzbarkeit von Koppelprodukten beziehungsweise des aus der Produktion resultierenden Abfallaufkommens. An dieser Stelle könnte eine Sensitivitätsanalyse aufschlussreiche Informationen innerhalb der Variation entscheidender Parameter liefern⁶. Bezogen auf katalytische Methoden könnten dies Parameter wie zum Beispiel der Austausch des **Katalysators**, der Energieeintrag und/ oder die Substitution von Problemstoffen sein. Die Entsorgung der Reststoffe birgt möglicherweise Umwelt- und Gesundheitsgefahren, denn diese Stoffe sind wegen ihrer Molekularstruktur nur unzureichend biologisch abbaubar.

Ist ein ökologischer Mehrwert für die Umwelt durch die chemische Industrie messbar?

Politik und Wissenschaft, insbesondere die Verfechter der +2 Grad-Ge-

sellschaft, sind sich mittlerweile einig, dass der Klimawandel zum größten Teil auf anthropogene Treibhausgasemissionen zurück zu führen ist. Mit einem Energieverbrauch von rund 185 Millionen Megawattstunden (ungefähr 8 Prozent des Gesamtenergieverbrauches Deutschlands)⁷ hat die chemische Industrie einen hohen Energiebedarf. In der chemischen Industrie ist die Entkopplung von Produktion und Energieverbrauch bereits nachweisbar. Von 1990 bis 2007 erzielte die chemischen Industrie eine Produktionssteigerung von 57,2 Prozent bei einem um 18,5 Prozent verminderten Energieeinsatzes. Dies bedeutet eine Einsparung von 36,4 Prozent emittierter Treibhausgase. Wie ist jedoch der nachhaltige Nutzen von Produkten, die auf chemischen Verbindungen wie z.B. Dämmstoffe, Leuchtmittel, Düngemittel zur Ertragssteigerung von Nutzpflanzen, Antifoulingfarben, Kunststoffe im Automobilbereich, Niedrigtemperaturwaschmittel, etc. basieren zu bewerten⁸? Abb. 2 zeigt das Ergebnis einer vom International Council of Chemical Associations (ICCA) durchgeführten Studie zur Messung der weltweiten Kohlendioxideinsparungen durch die chemischen Industrie. Die Nettoeinsparung wurde mittels PLA und Ökobilanzen in CO₂-Äquivalenten bestimmt.

Die chemische Industrie kommt demnach der Forderung nach einem nachhaltigen Umgang mit Rohstoffen, hier Prozessenergie, nach.

Genügen regional produzierte Waren im Vergleich zu Importgütern grundsätzlich eher dem Anspruch der Nachhaltigkeit?

Eine nachhaltige Entwicklung definiert sich nach allgemeiner Auffassung in besonderem Maße durch eine regionale Nachfragelandschaft. Das beruht

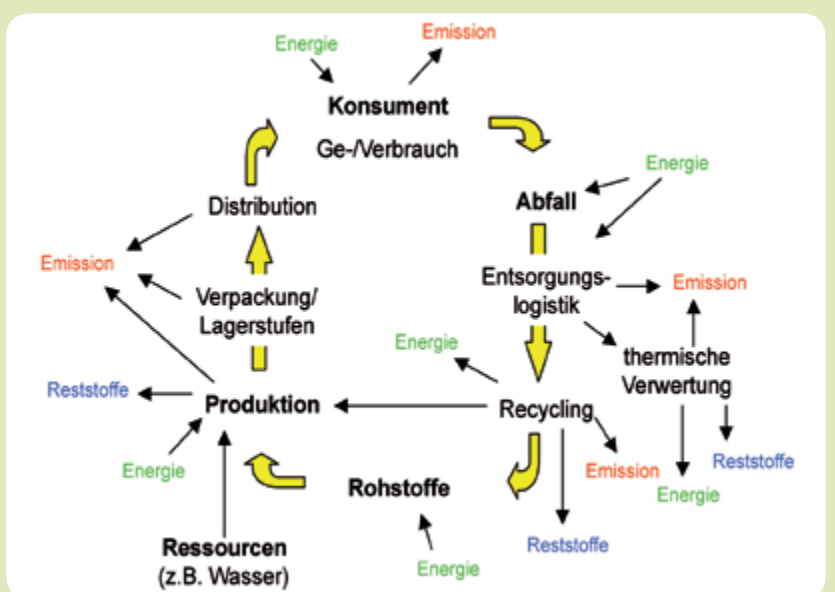


Abbildung 1: Schaubild zum Kontext der Produktlinienanalyse

5.3 „PRODUKTLINIENANLAYSE“ – MEHR ALS NUR EIN MODEWORT

auf der Annahme, dass ein regionaler Absatz gegenüber globalen Schwankungen resistenter ist, die Unternehmensliquidität erhält, Investitionen anregt und Arbeitsplätze sichert bzw. schafft. Abhängig von der Kaufkraft der Verbraucher bieten bewusste Konsumententscheidungen die Möglichkeit, die regionale Entwicklung aktiv zu beeinflussen. Diese Hypothese ist jedoch nur haltbar, wenn eine ganzheitliche Betrachtung im Sinne der Nachhaltigkeit zum gleichen Ergebnis kommt. Zur Verdeutlichung ist das Beispiel der saisonalen Apfelernte geeignet: Je nach Sorte erfolgt die Ernte während der Herbstmonate. Um eine Überflutung des Marktes zu vermeiden beziehungsweise die Preise zu stabilisieren, wird die Saisonerte bis zu acht Monate in *Controlled Atmosphere* (CA) Lagern aufbewahrt. Diese CA-Lager sind Kühlhäuser mit reduziertem Sauerstoffgehalt bei 2 - 6 Grad Celsius Lagertemperatur, um den Alterungsprozess der Apfelsorten zu verzögern. Das Luftgemisch der Langzeitlagerung enthält ca. 1,2 - 2 Prozent Sauerstoff und zwischen 1 - 3,5 Prozent Kohlenstoffdioxid. Der energetische Mehraufwand verursacht neben direkt zuzuordnenden Emissionen Kosten der Langzeitlagerung von ca. 0,08 - 0,1 Euro pro Kilogramm Apfel.¹⁰ Die Charakteristik einer PLA sorgt an dieser Stelle für die Vergleichbarkeit der regional produzierten Äpfel zu einem Importapfel mittels ganzheitlicher Betrachtung der CO₂-Bilanz entlang der Wertschöpfungskette der Produktlinie Apfel.

Wie lässt sich nun der betriebswirtschaftliche Bogen von der Produktökobilanz über die Produktlinienanalyse zum betrieblichen Stoffstrommanagement spannen?

Die Produktökobilanz (engl. *Life Cycle Assessment*)¹¹ ist ein Bilanzierungstool

zum Vergleich der Umweltauswirkungen von mindestens zwei Produkten. Gegenwärtig existieren hierfür noch keine international anerkannten Standards, so dass ein Vergleich über das betrachtete Produktionsverfahren hinaus (noch) nicht möglich ist. Im Kern dient sie der Offenlegung von Schwachstellen und bietet Optimierungsansätze innerhalb der Bereiche Umwelteigenschaften des Produktes sowie dem Beschaffungsmanagement. Darüber hinaus werden Handlungsempfehlungen entlang der Produkt-

linie aufgezeigt. Die Abgrenzung der Produktökobilanz zur Produktlinienanalyse definiert sich über die Erweiterung ökologischer Aspekte um ökonomische sowie soziale Auswirkungen einer Produktwahl. Neben den Rohstoffen bzw. Produkten, also den Stoffströmen, steht auch die Optimierung von Energieströmen entlang der Wertschöpfungskette im Fokus. Das betriebliche Stoffstrommanagement wiederum erweitert den umweltökonomischen Optimierungsansatz unter sozialen Gesichtspunkten um die Be-

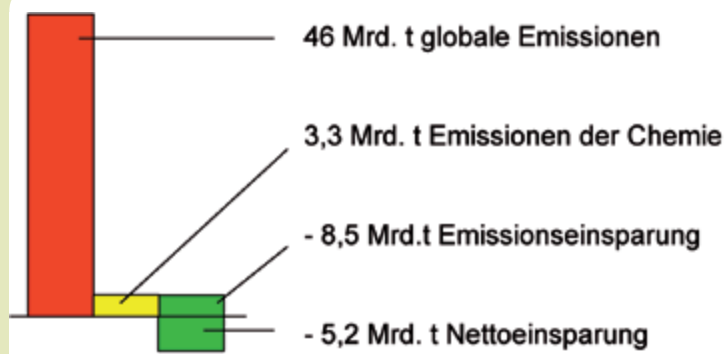


Abbildung 2: Treibhausgas-Bilanz der Chemie weltweit 2005⁹



Abbildung 3: Einordnung der Produktlinienanalyse in umweltökonomische Wechselwirkungen

trachtung der ganzheitlichen Unternehmertätigkeit (siehe Abb. 3).

Bezugnehmend auf Abb. 3 lassen sich die Ziele unter dem Leitbild der Nachhaltigkeit, deklariert von der *Enquête Kommission*¹² zu Beginn der 1990er Jahre in Einklang bringen. Diese sind:

- Vermeidung und Substitution von problematischen Stoffen,
- Verringerung des Rohstoff- und Energieverbrauchs,
- Verhinderung von Luft-, Wasser- und Bodenverschmutzung,
- Vermeidung von Lärmbelästigungen,
- Verringerung des Abfallaufkommen und
- Erhöhung der Recyclingquote.

Neben Übereinstimmungen von Produktökobilanz, Produktlinienanalyse und betrieblichem Stoffstrommanagement ergeben sich auch Zielkonflikte aus der Gleichbehandlung von ökonomischen, ökologischen und sozialen Zielen. So kann beispielsweise der kurzfristige Erfolg der Kostenminimierung

im Gegensatz zur Umweltverträglichkeit stehen. Sowohl wissenschaftliche und technische als auch politische Barrieren können eine nachhaltige Win-Win Situation verzögern oder gar verhindern. Die gemeinschaftliche Schnittmenge wächst jedoch, wenn man die Wechselwirkungen des Unternehmens mit seiner Umwelt langfristig betrachtet.

Warum könnte es auf Widerstand stoßen, wenn die Produktlinienanalyse im Rahmen der Auskunftspflicht des Erzeugers zu Gunsten einer wachsenden Markttransparenz rechtlich verankert würde?

Um sowohl Produktionsvorgänge unternehmensübergreifend vergleichbar zu machen als auch die Auskunftspflicht rechtlich zu verankern, muss ein allgemein anerkannter Standard definiert werden. Doch wie ist dieser Standard zu bestimmen, wenn insbesondere die Struktur der Wertschöpfungskette unternehmensindividuellen ökonomischen Vorgaben unterworfen ist? Des Weiteren sei auf das Beispiel

der Kennzeichnung von Lebensmitteln verwiesen. Während Verbraucherschützer das sog. „Ampelsystem“¹³ auf nationaler Basis fordern, trifft dies auf EU-Ebene auf eine breite Ablehnung. Auch die Argumente, die hinter dieser Ablehnung stehen, müssen berücksichtigt werden:

- Konsumselektion durch Käuferschicht
- Eventuell drohender Verlust von Marktanteilen
- Offenlegung der Beschaffungskanäle, Produktionsabläufe, etc.
- Mehrkosten durch Prüfung und Kennzeichnung

Berücksichtigt man Chancen und Risiken ebenso wie unterschiedliche Partizipationsindikatoren, lässt sich dennoch eine Antwort finden. Seit 1996 betreibt BASF Ökoeffizienz-Analysen, welche auch im Sinne einer positiven Außendarstellung betriebsinternen Anklang findet.¹⁴ Die PLA dient in diesem Zusammenhang als unternehmerisches Marketinginstrument. Ein echter Vergleich zwischen zwei Angeboten ist dem Verbraucher nicht möglich, denn ihm fehlt der Referenzwert zur Vergleichbarkeit bzw. der Nachvollziehbarkeit des Optimierungsansatzes.

Welche Software unterstützt die Erstellung von Produktlinienanalysen?

Grundsätzlich ist zu differenzieren, ob eine betriebsinterne Software zur Verfügung steht, welche in der Lage ist, sämtliche Belange zu erfüllen oder ob die zusätzliche Anschaffung eines Tools erforderlich ist. Da es sich bei der PLA um ein Analyse- und Bewertungstool handelt, bilden Informationen die Grundlage jedweder Entscheidung. Unternehmenssoftware wie zum Beispiel Prozessmanagementtools, Touren- und Standortplanung sowie

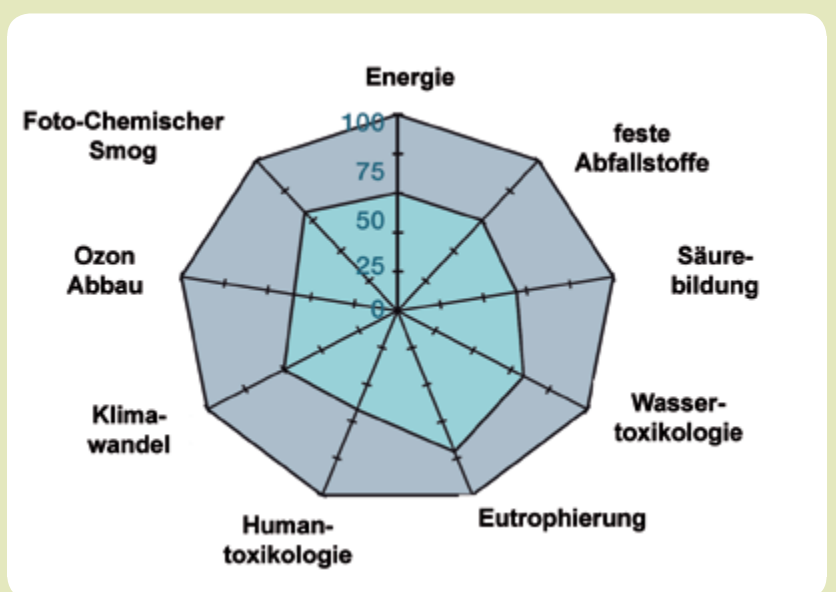


Abbildung 4: Optimierungspotential der Waschmittelproduktion¹⁷

betriebliche Simulationstools können dienlich sein. Sofern die betriebsinterne EDV den Ansprüchen nicht genügt, stehen mit betrieblichen Umweltinformationssystemen für softwarebasierte Darstellungen von Produktöko- und Umweltbilanzen geeignete Programme zur Verfügung.

Welche Anwendungsbeispiele sind bereits aus der Praxis bekannt?

Die Nachhaltigkeitsbetrachtungen „Cradle-to-Gate“¹⁵ und „Well-to-Wheel“¹⁶ stellen sowohl bekannte als auch anerkannte Arbeiten dar. Anwendung fanden diese unter anderem in dem EU-Projekt TOPCOMBI^{b)}. Der Forschungsschwerpunkt der Projektaktivität lag im Bereich der Hochdurchsatztechnologie und Katalyseverfahren in der Europäischen Prozessindustrie. Dabei lag der Fokus des Konsortiums auf der nachhaltigen Substitution bestehender Prozesse. 22 Partner aus Wissenschaft und Wirtschaft hatten es sich zur Aufgabe gemacht, neue Katalyseverfahren sowie Verfahren zur Umwandlung leichter Alkane zu nutzbaren chemischen Rohstoffen zu entwickeln. Neben weiteren Projektergebnissen ist es einem bekannten Waschmittelproduzenten durch Neuformulierungen gelungen, die Reinigungskraft pro Waschmittelmenge zu erhöhen, sodass statt der bisherigen Einzeldosierung von 95 Gramm pro Waschgang 50 Gramm genügen, um die gleiche Reinigungsleistung zu erzielen. Des Weiteren konnte die Wassertemperatur von 40 Grad Celsius auf 30 Grad Celsius gesenkt werden, ohne Einbußen der Waschkraft hinnehmen zu müssen. Die Gesamtheit der Optimierungspotentiale spiegelt sich in Abb. 4 wider. Während das Außennetz das Ausgangsprodukt, also den 100 Prozent-Ansatz beschreibt, stellt das Innennetz das Optimierungspotential dar.¹⁷

Wie lässt sich die Produktlinienanalyse als nachhaltiges Qualifizierungsmedium bewerten?

Die PLA kann mit ihrem ökonomischen, ökologischen sowie gesellschaftlichen Anspruch zu einer nachhaltigen Entwicklung beitragen, in dem sie durch Steigerung der Transparenz und als ein leicht verständliches Qualitätsmerkmal eingesetzt wird. Eine wesentliche Voraussetzung zur erfolgreichen Anwendung des Tools ist die allgemein anerkannte Definition von Standards. Des Weiteren ist die Frage nach dem Maßstab der Quantifizierbarkeit offen. An dieser Stelle ist lediglich die sinn-

volle Bestimmung von System- und Betrachtungsgrenzen hilfreich. Kriterien, wie der Energieverbrauch, Emissionen, Art und Menge der Reststoffe sind keine ausreichenden Parameter, um unterschiedliche Produktlinien miteinander vergleichen zu können, da ebenfalls Sozialstandards der Produktion, Arbeitssicherheit, etc. berücksichtigt werden. Deutlich wird dies an dem Vergleich der Produktion von Zucker aus Zuckerrohr (außer-europäische Bedingungen) und Zuckerrüben (europäische Bedingungen), um das nachhaltigere Produkt zu identifizieren. Die Produktlinienanalyse wird ihrem Anspruch als Kommunikationsmedium

Die Übertragung des auf Basis eines Waschmittels liegenden Optimierungspotentials in die PLA erlaubt nachstehende Schlüsse zu ziehen:

Kategorie	Produzent
Wirtschaftlichkeit	<ul style="list-style-type: none"> – größere Flexibilität im Beschaffungsmanagement (Lager vorhanden, geringere Bestellmengen sichern gleiche Produktionsquote) – geringere Logistikkosten (mehr Produkte bei gleicher Versandkapazität) – mehr Produkte bei gleicher Angebotsfläche im Einzelhandel
Umweltverträglichkeit	<ul style="list-style-type: none"> – Erhöhung der Ressourceneffizienz – geringeres Abfallaufkommen – Qualifizierungsmerkmal setzt Konkurrenzunternehmen unter Entwicklungsdruck
Sozialverträglichkeit	<ul style="list-style-type: none"> – profitiert von der Verbesserung der Umweltverträglichkeit – Senkung des CO₂ Ausstoßes entlang der Produktlinie
Kategorie	Verbraucher
Wirtschaftlichkeit	<ul style="list-style-type: none"> – Einsparung von Wasserkosten – Steigerung der Kaufkraft
Umweltverträglichkeit	<ul style="list-style-type: none"> – geringerer Energieverbrauch – Reduzierung der Umwelteinträge der Produktlinie (Eutrophierung, Säurebildung, Toxikologie, etc.)
Sozialverträglichkeit	<ul style="list-style-type: none"> – weniger Rückstände in der Kleidung (Allergierisiko) – Vereinfachung der Haushaltslogistik

Tabelle 1: Einflussnahme der PLA

b) Towards Optimised Chemical Processes and New Materials by Combinatorial Science (TOPCOMBI). Weitere Informationen sind veröffentlicht unter der Homepage <http://www.topcombi.org/content.php?pageId=2828&lang=en>.

einer nachhaltigen Entwicklung nur dann gerecht, wenn die Kommunikation leicht verständlich, fair und nicht irreführend ist. Dies betrifft im Besonderen die beiden Ziele der Kommunikation:

- Produktvergleiche vieler Produkte, die im Auftrag unterschiedlicher Auftraggeber und von unterschiedlichen Bearbeitern durchgeführt werden
- Öffentlicher und wettbewerbsrechtlich haltbarer Vergleich mit Konkurrenzprodukten (z.B. durch Ausweisung von CO₂e-Werten oder Co₂e-Label

AUTOR:

Marcel Polland war wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie in Frankfurt am Main.

LITERATUR

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, download: http://www.bmu.de/nachhaltige_entwicklung/strategie_und_umsetzung/nachhaltigkeitsstrategie/doc/38935.php, 21.09.2009.
- [2] Bundesministerium für Bildung und Forschung, download: <http://www.fona.de/de/3180>, 21.09.2009.
- [3] Ökoinstitut Freiburg, Produktlinienanalyse, Projektgruppe Ökologische Wirtschaft, „Wege aus der Krise“, Bd. 4., 1987.
- [4] Verband der Chemischen Industrie (VCI 1995), download: http://www.vci.de/Umwelt_Responsible_Care/default2~cmd~shr~docnr~114664~nd~~rub~739~ond~umw~c~7.htm, 21.09.2009.
- [5] Fischer, H., Hrsg. Heck, P./ Bemman, U., Praxishandbuch Stoffstrommanagement 2002/ 2003, „Stoffstrommanagement in der Chemischen Industrie: Optimierung der Stoffströme bei Farben und Lacken am Beispiel der AURO Pflanzenchemie, S. 236 – 261, Köln 2002.
- [6] IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Ökologische Optimierung regional erzeugter Lebensmittel: Energie- und Klimabilanzen, Heidelberg 2009, download: <http://www.ifeu.de/lebensmittel>, 03.11.2009.
- [7] Verband der Chemischen Industrie e.V., Energiepolitik stand 12.12.2009, download: <http://www.vci.de/showPDF/showPDF.asp?p=101&docnr=125681&type=xm1>, 21.01.2010.
- [8] CHE Manager 21/2009, Chemie rauf – CO₂ runter, download: www.chemanager.de, 13.11.2009.
- [9] ICCA, Innovations for Greenhouse Gas Reductions, A life cycle quantification of carbon abatement solutions enabled by the chemical industry, July 2009, download: http://www.icca-chem.org/ICCADocs/ICCA_A4_LR.pdf?epslanguage=en, 21.01.2010.
- [10] Firma Völkers, Herr Moje, Geschäftsführer, Telefonat vom 04.11.2009.
- [11] DIN ISO 14040:2006, Produktökobilanz zu engl. Life Cycle Assessment.
- [12] Enquête Kommission, download: <http://www.enquete-kommission.de/>, 21.09.2009.
- [13] Europäisches Verbraucherschutzzentrum Kiel, Gesünder Essen mit britischem „Ampel“-System, download: <http://www.evz.de/UNIQ125353367713015/doc1384A.html>, 21.09.2009.
- [14] P. Saling „Die Ökoeffizienz-Analyse als Instrument zur Bewertung nachhaltigerer Chemie“, download: <http://www.aktuelle-wochenschau.de/2008/woche2/woche2.html>, 23.09.2009.
- [15] P. H. Nielsen, K. M. Oenboll, H. Wenzel, Cradle-to-Gate Environmental Assessment of Enzyme Products Produced Industrially in Denmark by Novozymes A/S, download: <http://www.novozymes.com/NR/rdonlyres/398BFC2D-2017-411B-B99B-121EC6BA0BE1/0/lca2006082651.pdf>, 21.09.2009.
- [16] J. Schindler, W. Weindorf, Einordnung und Vergleich biogener Kraftstoffe – „Weel-to-Wheel“ – Betrachtung, download: <http://www.itas.fzk.de/tatup/061/scwe06a.pdf>, 21.09.2009.
D. Oertel, Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (Hrsg.), Industrielle stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe, Sachstandsbereich zum Monitoring nachwachsender Rohstoffe, Arbeitsbericht Nr. 114, S. 241 ff., 03/2007.
- [17] Procter & Gamble Ltd. Designed to Innovate... Sustainably, 2008 Sustainability Full Report, download: http://www.pg.com/innovatingsustainability/PG_2008_Sustainability_Report.pdf, 03.11.2009.
- [18] A. Chieffi, Procter & Gamble Ltd., Towards Optimised Chemical Processes and New Materials by Combinatorial Science – Case Studies, Newcastle Upon Tyne, UK 2009.

5.4 Klimawandel – Eine Herausforderung der Weltgemeinschaft

Begegnet die Weltgemeinschaft dem Klimawandel?

2007 erhielt Al Gore den Friedensnobelpreis für sein Engagement beim Klimaschutz. Auch ein Erdölpreis von 145 Dollar pro Barrel deutete auf die Endlichkeit der fossilen Ressource hin. Medien berichteten, Politiker diskutierten und viele Konzerne gaben sich ein grünes Image durch klimafreundliche Produkte. Die misslungene Klimakonferenz in Kopenhagen, das Fehlverhalten einiger führender Mitglieder des Weltklimarates IPCC und einige Fehler in dessen Berichten haben die weltweite öffentliche Diskussion abgeschwächt. Dabei ist der Klimawandel in der wissenschaftlichen Welt nahezu unbestritten: Die anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen, von denen das wichtigste Kohlendioxid (CO₂) ist, führen zu einer kritischen globalen Temperaturerhöhung. Deshalb müssen sich Volkswirtschaften verändern. Nur so können wir die drastischen Auswirkungen begrenzen.

Und manches spricht dafür, dass die Politik von der Weltöffentlichkeit schon bald wieder beim Wort genommen wird:

Auf dem UN-Klimagipfel im September 2009 erklärten die Repräsentanten der USA, Chinas und der wichtigsten Industrienationen, es müsse eine rasche Kehrtwende in unserer Wirtschaftsweise erfolgen. Dabei ist der Aufbau einer Low-Carbon-Economy die Nagelprobe globaler Kooperation, so der Premierminister Brown in einem Newsweek-Kommentar zum Gipfel. Ein Scheitern

hält der britische Staatschef für unverzeihlich: „Wenn wir diese Chance, unseren Planeten zu schützen, verpassen, werden wir keine zweite Chance haben, einen katastrophalen Schaden an unserer Umwelt zu verhindern,“ kommentierte der britische Regierungschef weiter.

Sind wir Zuschauer in einem irritierenden Politdrama oder Zeugen eines dramatischen Wandels unserer Zivilisation? Die Antwort lautet: Wir sind beides, und wir sind sogar die Hauptakteure!

Wie kann aber der Einzelne angesichts dieser Situation überhaupt Einfluss nehmen? Kann er den Verlauf von Konferenzen ändern, auf denen selbst die Kanzlerin und Staatspräsidenten machtlos sind? Und sein konkretes Handeln hat doch anscheinend nur einen unmessbar geringen Einfluss auf die Klimaveränderungen. Schon die Betrachtungsweise auf der Länderebene zeigt die Dimension der Aufgabe: Selbst Deutschlands gesamte Kohlendioxidreduktion kann die enormen Zuwächse der Schwellenländer nicht ausgleichen.

Haben nicht Industrie und Energiewirtschaft die Aufgabe, den technischen Wandel durch Innovationen herbeizuführen? Muss nicht die Politik den Übergang zu erneuerbaren Energien organisieren? Sind nicht Forschung und Entwicklung gefragt, um die nötige Effizienzrevolution herbeizuführen? Diese Fragen müssen gestellt werden. Und wenn die momentane Verwirrung

verfliegen ist, werden auch wieder Antworten sichtbar.

Erste Antworten gab der wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung globale Umweltveränderungen (WBGU). In seinem Sondergutachten vom Juli 2009, „Kassensturz für den Weltklimavertrag – der Budgetansatz“ heißt es: Die Bürger müssten sich aktiv einbringen können. Nur so hätten Politik, Wirtschaft und Technik den gewünschten Erfolg und könnten ihre Zielvorstellungen erreichen.

Gleiche Emissionsrechte für alle

Gleiche Emissionsrechte für alle forderten Bundeskanzlerin Merkel als Vertreterin der Industrienationen und der indische Ministerpräsident Sing für die Schwellenländer. Die beiden Regierungsspitzen zielen auf ein Gerechtigkeitspostulat. In dem Dokument soll eine langfristige Anpassung der noch unterschiedlichen Pro-Kopf-Emissionsraten fixiert werden.

Das Gutachten des Wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung für globale Umweltveränderungen (WBGU) geht von einer Tonne emittiertes Kohlendioxid (CO₂) pro Kopf aus. Andere Gutachten nennen als Zielgröße zwei Tonnen CO₂-Äquivalente – das heißt Kohlendioxid (CO₂) zusammen mit den anderen Treibhausgasen wie Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O). Dabei hat Kohlendioxid (CO₂) einen Anteil von 77 Prozent der gesamten Treibhausgasemissionen.

Je nach Blickwinkel liegen unterschiedliche Berechnungsgrundlagen vor. So rechnen einige Statistiken mit den gesamten Treibhausgasemissionen, andere berücksichtigen nur die Emission von Kohlendioxid (CO₂). Dies ist nicht der einzige Grund für die unterschiedlichen Zielgrößen.

Viele Statistiken erfassen ausschließlich den energiebedingten Anteil der Treibhausgasemissionen. Berechnungsgrundlage ist die weltweit aus fossilen Rohstoffen umgewandelte Energie. Diese lag 2005 bei 29 Milliarden Tonnen Kohlendioxid. Bezieht man aber weitere Kohlendioxidquellen mit ein wie Forstwirtschaft oder die Veränderung durch Waldrodungen, dann steigt dieser Wert auf 44 Milliarden Tonnen Kohlendioxid.

Die Unterschiede hängen auch von den Zielmarken ab, die wir bis 2050 erreichen wollen. Nicolas Stern erläutert dies in seinem Buch „Der globale Deal“ anhand einer Grafik, die in Abbildung 1 in veränderter Form wiedergegeben ist.

Das ehrgeizige Ziel ist, die Treibhausgaskonzentration auf 450 parts per million (ppm) zu begrenzen. Es lässt weltweite Emissionen von 10 bis 15 Milliarden Tonnen Kohlendioxidäquivalente oder, je nach Berechnungsgrundlage, 8 bis 10 Milliarden Tonnen Kohlendioxid pro Jahr zu. Voraussetzung ist eine Weltbevölkerung zwischen 9 bis 10 Milliarden Menschen, so die Zielvorgaben des WBGU-Gutachtens.

Bei einem weniger anspruchsvollen Wert von 550 parts per million (ppm) pro Erdbewohner dürfen zwischen 1,5 und 2 Tonnen Kohlendioxid freigesetzt werden.

Konsens besteht über zwei Aktivitäten der Industriestaaten: Die eigenen Kohlendioxidemissionen müssen sinken, und für die Entwicklungs- und Schwellenländer sind erhebliche Mittel bereitzustellen.

Beide Schritte erfolgen zwar auf der Ebene der Staaten, aber auch jeder Einzelne kann hier aktiv werden und

damit das Tempo erhöhen. Dabei können wir nicht von einem Tag auf den anderen unseren Lebensstil umkrempeln – das wäre technischer, ökonomischer und ökologischer Unsinn. Aber die Industrienationen können Treibhausgasemissionsrechte bei Entwicklungs- und Schwellenländern kaufen. Diese werden auf diese Weise in die Lage versetzt, schon heute einen „low-carbon“-Entwicklungspfad einzuschlagen.

Auch die Mitwirkung der Bürger ist nötig, denn die Zeit läuft uns davon, wie Abbildung 1 zeigt: Das Maximum der Treibhausgasemissionen muss in den nächsten Jahren durchschritten werden, wenn wir die Zielkonzentrationen 2050 nicht verfehlen wollen. Nobelpreisträger, Energie- und Klimaforscher haben dies im Mai 2009 in ihrem „St. James Palace Memorandum“ eingefordert. Ebenfalls nimmt die Wirtschaft den Klimawandel zunehmend ernst. So forderten 500 Industrieunternehmen rasch wirkende Maßnahmen der Politik gegen den Klimawandel in einem Appell. Städte und Gemeinden finden sich zu eindrucksvollen Klimaschutzbündnissen zusammen, die dem Zögern ein Ende bereiten wollen. Dabei bringen es die Autoren des Buches „Das Ende der Welt, wie wir sie kannten – Klima, Zukunft und die Chancen der Demokratie“, Claus Leggewie und Harald Welzer, auf den Punkt: „Die Bürgergesellschaft muss aus der bloß gefühlten Partizipation des Fernsehzuschauers in die Rolle des selbstbewussten Akteurs zurückfinden.“ Ein neues Gemeinschaftsgefühl tut Not, eine Wirkidentität, wie es die Autoren nennen. In seiner Rede zum deutschen Umweltpreis am 25. Oktober 2010 nimmt der ehemalige Bundespräsident Köhler Bezug auf dieses Buch und sagt: „Die Welt, wie wir sie kannten, geht zu Ende, heißt es. Vieles deutet darauf hin. Doch das ist kein Anlass zu Fatalismus und

Mögliche Entwicklungspfade der Treibhausgasemissionen

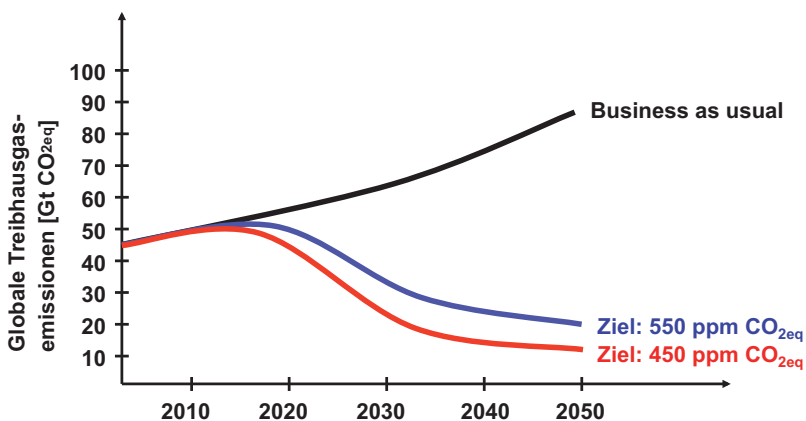


Abbildung 1: nach Nicolas Stern: „Der Global Deal“, C.H. Beck, München 2009, S. 58

Resignation. Denn an der Gestaltung einer neuen und besseren Welt kann jede und jeder von uns mitwirken.“

Viele kleine Schritte – der CO₂-Rechner des Bundesumweltamtes hilft

Wie vermag der Einzelne vorzugehen? Zunächst kann er sich eine Übersicht über seine CO₂-Emissionen machen. Hierbei hilft der CO₂-Rechner auf der Webseite des Bundesumweltamtes (<http://uba.klima-aktiv.de/?cat=start>). Mit dem Simulationsprogramm kann der Bediener seine Kohlendioxidemission ermitteln. Dabei gibt es die Rubriken: Personen, Zuhause, Unterwegs, Ernährung und Konsum. Der Bediener kann dort seine Daten eingeben und erhält eine errechnete Angabe über die von ihm emittierten Kohlendioxid-Äquivalente pro Jahr.

Diese Angabe in Tonnen Kohlendioxid (CO₂) berücksichtigt sämtliche Treibhausgase, also auch Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O). Üblicherweise spricht man von Treibhausgasäquivalenten; darauf verzichtet das Vokabular des Rechners und vereinfacht.

Der Durchschnittsdeutsche emittiert 11 Tonnen energiebedingter Kohlendioxidäquivalente pro Jahr. Das ist das Dreifache des Weltdurchschnitts, so der CO₂-Rechner. Die Struktur der CO₂-Emissionen eines durchschnittlichen Bundesbürgers ist in Abbildung 2 dargestellt.

Die Emissionsquellen teilen sich in drei große Gruppen: Mobilität, Wohnen (inklusive Ernährung) und Konsum. Der Bediener des Rechners kann Szenarien und Verhaltensänderungen simulieren, die seine Möglichkeiten zeigen, Treibhausgasemissionen zu vermeiden.

Zum Beispiel können die Emissionen um etwa 15 Prozent gesenkt werden, indem mögliche Einflussgrößen eines klimabewussten Verhaltens beachtet werden. Dies sind die Reduzierung von Fahrten mit dem Auto, angepasstes Fahren, Wechsel zu einem Ökostromanbieter, Umstellung der Ernährung auf regionale, fleischreduzierte Kost und Senkung des laufenden Konsums durch Kauf langlebiger Güter.

Zusätzliche Entscheidungen wie Umzug in ein energieeffizientes Mietshaus oder Kauf eines sparsamen Wagens können die Treibhausgasemissionen insgesamt um 30 Prozent senken. Diese Angaben sind kein Klimaratgeber, sondern ergeben sich einfach durch entsprechende Eingaben in den CO₂-Rechner. Die Zahlen deuten nur in groben Zügen Optionen an, die ohne große Einschränkungen möglich wären. Ob der Durchschnittsdeutsche sich in den kommenden Jahren so verhält, ist fraglich.

Den Durchschnittsdeutschen gibt es nicht. Das Rentnerhepaar, das in bescheidenen Verhältnissen lebt, erzeugt heute schon nur die Hälfte der durchschnittlichen Emissionen. Auch eine gut situierte, klimabewusste Familie erreicht solche Werte, wenn sie ein Nullenergiehaus in städtischer Umgebung bewohnt.

Umgekehrt verursacht die Gruppe der „sorgenfrei Reichen“, wie sie in der Statistik genannt werden, ein Vielfaches der durchschnittlichen Pro-Kopf-Emissionen aufgrund ihres großzügigen, kultur- und reiseorientierten Lebensstils. Auch viele Berufstätige sind eingezwängt in ein Korsett energieaufwändiger Aktionen, die dem Klima nicht zuträglich sind. Hier stoßen die Handlungsspielräume rasch an Grenzen, die das soziale und berufliche Umfeld setzt. Beispielsweise haben die Bereiche Reisen, Mobilität und großzügiges Wohnen einen hohen gesellschaftlichen Stellenwert. Aber es gibt Handlungsmöglichkeiten: Man

Wie viele Tonnen Treibhausgase „produziert“ ein Deutscher im Jahr?

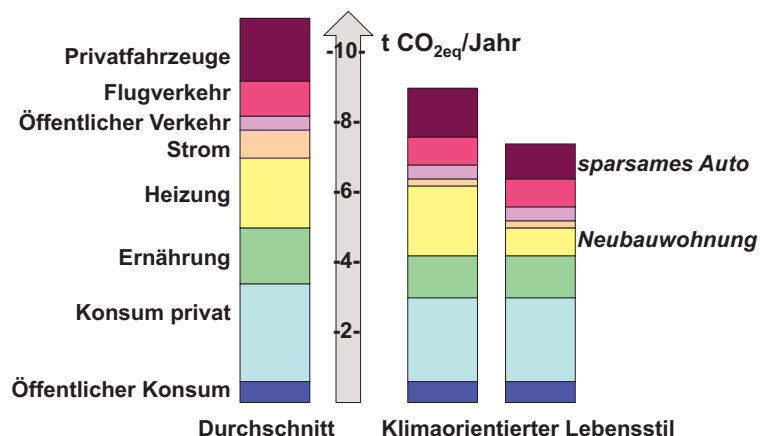


Abbildung 2: Berechnet mit dem CO₂-Rechner des Umweltbundesamtes (<http://uba.klima-aktiv.de/?cat=start>)

kann seinen eigenen hohen Verbrauch durch Finanzierung Klima schonender Projekte kompensieren.

Kompensation der eigenen CO₂-Emissionen: Carbon Trading

Wenn der Treibhausgas-Ausstoß der Menschheit pro Kopf auf 2 Tonnen begrenzt wird, dann muss der Durchschnittsdeutsche seinen bisherigen Verbrauch von 11 Tonnen um 9 Tonnen kompensieren. Sein Verhalten wäre dann „klimaneutral“. Erste Kalkulationen deuten auf einen Preis für die Vermeidung einer Tonne CO₂-Äquivalente in den kommenden Jahren von etwa 25 Euro hin.

Der WBGU geht von Kosten von 10-30 Euro pro Tonne emittiertes Kohlendioxid (CO₂) aus. Für den Bundesbürger errechnen sich dann Belastungen von 225 Euro, die für entsprechende Projekte zur Verfügung ständen. Dies entspricht etwa einem Prozent des deutschen Durchschnittseinkommens. Wer einen klimaorientierten Lebensstil pflegt, kann den Betrag auf 100 Euro reduzieren. Dies ist im Vergleich zur Tragweite des Problems eine bescheidene Summe.

Die Wohlhabenderen unter uns können sich ihre erhöhte Kompensation leisten und in ihrem Umfeld für den Klimaschutz werben. Auch mancher Berufstätige kann in seinem Unternehmen Türen für ein solches Vorgehen öffnen. Mittlerweile gibt es erste CO₂-Ausgleichssysteme. Beispielsweise kann man über Non-Profit-Organisationen wie Atmosfair oder Myclimate einen CO₂-Ausgleich erwerben. Auf dem Markt für den freiwilligen CO₂-Ausgleich haben sich auch andere Anbieter etabliert. Naturschutzorganisationen raten zu einer kritischen Auswahl, da die Kriterien

der Projektstandards nicht einheitlich sind. Darüber hinaus können Organisationen unterstützt werden, die auf dem Gebiet des Regenwaldschutzes engagiert sind. Vieles ist noch im Fluss; Politik, Industrie, Handel, Klimaschutz- und Verbraucherorganisationen entwickeln eine Fülle von Ideen unter dem Stichwort Carbon Trading.

Was sollte Priorität haben?

Welche Maßnahmen sollen den Vorrang haben; konkrete Einsparmaßnahmen im eigenen Umfeld oder indirekte Ausgleichsmaßnahmen? Welche Maßnahme erzielt den maximalen Effekt?

Zur Zeit spricht vieles für indirekte Ausgleichsmaßnahmen: Wer in Deutschland auf seinem Dach Photovoltaik oder Anlagen für Solarwärme installiert, hätte mit derselben Geldmenge in Nordafrika oder in Spanien den doppelten Energieertrag und damit den doppelten Einspareffekt erreicht. Aber bei der Wärmedämmung eines Hauses oder beim Umstieg auf ein sparsameres Auto gilt das Argument schon nicht mehr. Es ist auch offen, ob zusätzlicher Solarstrom in anderen Ländern konventionellen Strom substituieren wird. Bei Solarwärme kommt hinzu, dass der Bedarf in Deutschland anders geartet ist als in sonnenreichen Gegenden.

Betrachten wir das Problem rein wirtschaftlich, dann können wir die Veränderung der Einstellung übersehen. Wer sich um CO₂-Einsparung bemüht und das Problem erfasst hat, ändert seinen Lebensstil. Es gibt Lerneffekte und damit neue Ideen – also genau das, was unser energiearmes Land in dieser Situation braucht. Der Konsument wartet nicht auf die Innovationen der Industrie, er gibt vor, wo sie stattfinden sollen. Die Stimme der Baumärkte ist

sicher zielführender als theoretische Diskussionen von Klimaökonomern. Möglicherweise ist das unterm Strich sogar die Strategie mit den geringsten Gesamtkosten. Innovationen bei uns sind dem Zwang höchster Effizienz ausgesetzt, damit werden sie international die Benchmark und treiben so das Thema Energieeffizienz weltweit voran.

Umgekehrt dürfen wir die Ausgleichsmaßnahmen nicht als bloßen „Ablasshandel“ abtun. Die Bereitstellung finanzieller Mittel für die Entwicklungsländer ist ein Gebot der Gerechtigkeit. Effizient eingesetzt, können sie sogar rasch eine Trendumkehr bei den globalen Treibhausgasemissionen bewirken. Der Schutz der Regenwälder und Projekte zur Wiederbewaldung zählen zu den kosteneffizientesten Potenzialen des Klimaschutzes. Hier sind Transparenz und Information alles. Das Engagement vieler Umweltschutzgruppen und regionaler oder kirchlicher Initiativen macht nicht nur das Problem, sondern auch seine Lösungspfade anschaulich. Damit wird der Horizont der „Wir-Identität“ in der neuen Bürgergesellschaft sinnvoll erweitert.

Deshalb wäre eine Doppelstrategie gut, die praktische Veränderung des eigenen Lebensstils verknüpft mit einer großzügigen Finanzierung von globalem Klimaschutz.

Hindernisse überwinden

Diese Doppelstrategie scheint Erfolg versprechend. Bereits jetzt füllt die Zahl der Klimaratgeber ganze Regalwände. Bücher wie „Einfach die Welt verändern, 50 kleine Ideen mit großer Wirkung zur Eindämmung der Erderwärmung und des Treibhauseffektes“ haben Konjunktur. Auf regionalen Energie- und Hausbaumessen gibt es eine Fülle von Anregungen. Häufig sind

Stadtwerke kompetente Ansprechpartner. Auch für den Bereich Konsum und Ernährung bieten Ratgeber vielfältige Tipps.

Die praktische Umsetzung stößt allerdings auf erhebliche Hürden. KlimaökonomInnen weisen darauf hin, dass durch die Vielzahl der Regularien, die den Klimaschutz herbeiführen sollen, ein heilloses Durcheinander entstanden sei. Die Medien sind in dieser Situation wenig hilfreich. Sie feiern den Lifestyle der Konsumgesellschaft wie ein Naturgesetz. Dabei übersehen sie den gewaltigen Druck der Fakten. Klimapolitik wird noch kaum verstanden. Der WBGU stellt fest: Für die Men-

schen besitzen die Teilnehmer der internationalen Mammutkonferenzen keine nachvollziehbaren Legitimationen.

Er sieht dennoch einen Weg: Was Politik und Medien nicht erreichen, erzwingt die „wachsende Gruppe strategischer Konsumenten“. Die Bürger und Bürgerinnen etablieren so eine „neue, positive Kultur der Teilhabe“. Sie tun dies in dem Bewusstsein, etwas Nützliches und Gutes für Umwelt und Nachwelt zu tun, dafür anerkannt zu werden und damit eine neue kollektive Identität der Nachhaltigkeit zu schaffen. Diese Wir-Identität ist letztlich der Hebel, mit dem der Einzelne in die Klimapolitik eingreift.

AUTOR:

Hermann Pütter war langjähriger Mitarbeiter der BASF, zuletzt als wissenschaftlicher Direktor und Leiter der Forschungsgruppe Elektrochemische Prozesse. Seit 2007 ist er Energiekoordinator der Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh) in Frankfurt am Main.

Absorption: Im Fall der Absorption von elektromagnetischer Strahlung, wie z.B. Licht durch einen Körper oder ein Molekül wird die Energie, die dem Frequenzbereich der absorbierten Strahlung entspricht von dem Körper oder dem Molekül aufgenommen. Die Intensität der Strahlung wird in dem Frequenzbereich geschwächt. Dabei kann es bis zur kompletten Auslöschung der Intensität der Strahlung in dem Frequenzbereich kommen.

Die Aufnahme von Gasen oder Flüssigkeiten (der absorbierten Substanz) in festen oder flüssigen Stoffen (dem Absorbens) wird als Absorption bezeichnet. Dabei stellt sich ein Gleichgewicht zwischen der im Absorbens gelösten und der freien Substanz ein. Im Falle der Absorption liegt eine molekulare Vermischung der absorbierten Substanz und des Absorbens vor.

Adsorption (vgl. Desorption): Das Anlagern eines Gases oder einer Flüssigkeit auf der Oberfläche eines Feststoffes; die adsorbierte Substanz und die Moleküle der Oberfläche sind dabei nicht molekular vermischt.

Adsorptionsisothermen: Beschreiben den Gleichgewichtszustand der Aufnahme eines Gases oder einer Flüssigkeit durch einen festen oder flüssigen Stoff an einer Oberfläche bei konstanter Temperatur. Sie stellen die an der Oberfläche gebundene Stoffmenge (Beladung) in Abhängigkeit von der in der Gasphase bzw. in der Lösung befindlichen Stoffmenge dar. Da bei der Adsorption aus der Gasphase in der Regel Wärme freigesetzt wird ist, nimmt die Beladung mit zunehmender Temperatur ab.

Aerob (vgl. Anaerob): Lebewesen, die für ihren Stoffwechsel molekularen Sauerstoff (O_2) benötigen, bzw. chemische (Stoffwechsel-) Prozesse, die nur mit Sauerstoff ablaufen. Der Sauerstoff wird ganz überwiegend für oxidative Stoffumsetzungen im Energiestoffwechsel benötigt, wie zum Beispiel bei der Atmung der höheren Lebewesen.

Aerogele: Aerogele sind hochporöse Festkörper, bei denen bis zu 95 % des Volumens aus Poren bestehen.

Aerosole: Feinstverteilte feste oder flüssige Materie in Luft oder anderen Gasen. Typische Erscheinungsformen sind Rauch, Staub, Dunst oder Nebel.

Albedo: Die Albedo ist ein Maß für die Reflektivität einer Oberfläche.

alternierende Copolymerisation: Alternierende oder abwechselnde Copolymere mit einer regelmäßigen Anordnung der Bausteine entlang der Polymerkette, z.B. (ABABABABABABABABABAB...).

Ameisensäure: Ameisensäure ist die einfachste organische Säure. Sie enthält eine Carboxylgruppe ($-COOH$), die die funktionelle Gruppe organischer Säuren darstellt. Ameisensäure ist eine stechend riechende Flüssigkeit. Sie ist eine schwache Säure und kann wegen ihrer Funktionalität Ausgangsstoff für diverse Folgeprodukte sein.

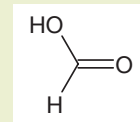


Abbildung 1: Chemische Struktur der Ameisensäure.

Amine (vgl. Aminosäuren): Organische Verbindungen, die sich formal vom Ammoniak durch den Ersatz eines, zweier oder aller Wasserstoffatome durch einen organischen Rest ableiten.

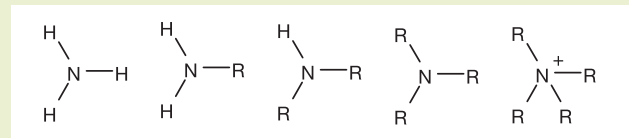


Abbildung 2: Chemische Struktur von Ammoniak und verschiedenen Aminen.

Aminosäuren (vgl. Amine, Ameisensäure): Eine Klasse organischer Verbindungen mit mindestens einer organischen Säuregruppe (auch Carboxygruppe) ($-COOH$) und einer Aminogruppe ($-NH_2$). Die Stellung der Aminogruppe zur Carboxygruppe teilt die Klasse der Aminosäuren in Gruppen auf. Die wichtigsten Aminosäuren haben eine endständige Carboxygruppe und in direkter Nachbarschaft die Aminogruppe. Dies nennt man *vicinal* oder α -ständig; diese Aminosäuren gehören zu den so genannten α -Aminosäuren. Sie bilden grundlegende biologische Bausteine.

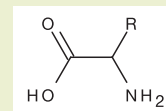


Abbildung 3: Chemische Struktur einer α -Aminosäure.

Anaerob (vgl. Aerob): Lebewesen, die für ihren Stoffwechsel ohne molekularen Sauerstoff (O_2) auskommen, bzw. chemische (Stoffwechsel-) Prozesse, die ohne Sauerstoff ablaufen. Der Stoffwechsel eines anaeroben Lebewesens wird häufig

durch die Anwesenheit von Sauerstoff gehemmt oder gar unterbunden.

Anorganisch: Die anorganische Chemie ist ein Teilgebiet der Chemie; sie befasst sich mit sämtlichen Elementen und allen Verbindungen, die keinen Kohlenstoff enthalten sowie mit einigen einfachen Kohlenstoffverbindungen.

Atmosphärendruck: Druck, den die Atmosphäre in Meereshöhe auf die Erdoberfläche ausübt: 1.013 bar.

Bioerdgas: Aus Biogas kann Bioerdgas mittels spezieller Anlagentechnik auf Erdgasqualität aufbereitet und in das Erdgasnetz eingespeist werden. Das Bioerdgas wird auch als Biomethan bezeichnet.

Biosphäre: Die Biosphäre beschreibt die Gesamtheit der belebten Natur.

C₃-Pflanzen (vgl. C₄-Pflanzen): C₃-Pflanzen arbeiten mit dem Grundtypus der Photosynthese. Sie zeigen aufgrund der Schließung der Spaltöffnungen bei heißem und trockenem Wetter eine verringerte Photosyntheseleistung im Vergleich zu C₄-Pflanzen. Sie sind jedoch unter normalen Temperatur- und Lichtverhältnissen effizienter.

C₄-Pflanzen (vgl. C₃-Pflanzen): Zu den C₄-Pflanzen werden Pflanzen gezählt, die im Vergleich zu den C₃-Pflanzen eine schnellere Photosynthese bei mehr Wärme und Licht durchführen und bei denen sich ein weiterer Weg zur Kohlenstoffdioxid-Fixierung entwickelt hat.

Chemisches Potenzial: Beschreibt die Triebkraft einer chemischen Reaktion oder physikalischen Umwandlung in Abhängigkeit der eingesetzten Stoffe. Im Falle eines Gleichgewichts ist das chemische Potenzial der Ausgangsstoffe identisch mit dem chemischen Potenzial der Produkte.

Dampfdruck: Der Dampfdruck einer Flüssigkeit ist der Gasdruck aus verdampften Molekülen der Flüssigkeit.

Dehydrierung (vgl. Hydrierung): Unter Dehydrierung versteht man die Abspaltung von Wasserstoff aus chemischen Verbindungen, entweder mithilfe eines Katalysators bei erhöhten Temperaturen, wobei elementarer Wasserstoff freigesetzt wird, oder mittels einer anderen chemischen Verbindung, auf die der Wasserstoff übertragen wird.

Desorption (vgl. Adsorption): Die Freisetzung eines adsor-

bierten Stoffes, zum Beispiel durch Erwärmen oder Druckverminderung.

Dimethylamin (vgl. Amine): Dimethylamin $\text{HN}(\text{CH}_3)_2$ ist ein farbloses, brennbares Gas mit intensivem Geruch. Es löst sich sehr gut in Wasser und bildet eine Base. Es kommt als wässrige Lösung und als druckverflüssigtes Gas in den Handel. Die großtechnische Herstellung von Dimethylamin erfolgt durch die Umsetzung von Methanol und Ammoniak bei Temperaturen von 370–430°C und Drücken von 20–30 bar.

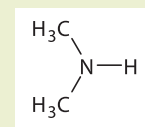


Abbildung 4: Chemische Struktur von Dimethylamin.

Dimethylcarbonat (DMC): Dimethylcarbonat ist eine leichtentzündliche chemische Verbindung, die bei Raumtemperatur als farblose Flüssigkeit vorliegt.

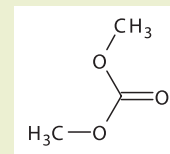


Abbildung 5: Chemische Struktur von Dimethylcarbonat.

Dimethylether (DME): Dimethylether ist der einfachste Ether (organische Verbindungen mit einer R-O-R Gruppe). Er hat 2 Methylgruppen als organische Reste. Dimethylether ist polar und findet in flüssiger Form als Lösemittel Verwendung.

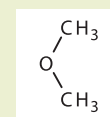


Abbildung 6: Chemische Struktur von Dimethylether.

Dimethylformamid (vgl. Amine, organische Säuren): Amide sind organische Verbindungen, die an einem Carbonylkohlenstoff die Gruppe $-\text{NH}_2$ enthalten. Ersetzt man bei Carbonsäuren eine Hydroxylgruppe ($-\text{OH}$) durch $-\text{NH}_2$ erhält man Säureamide. Bei Dimethylformamid sind die beiden Wasserstoffatome des Stickstoffs durch Methylgruppen substituiert.

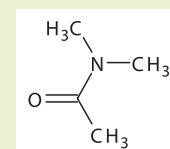


Abbildung 7: Chemische Struktur von Dimethylformamid.

Dispergieren: Unter dispergierten Systemen versteht man ein Stoffgemisch aus zwei oder mehreren Phasen. Ein Stoff liegt in einem anderen fein verteilt, als Dispersion vor.

Endotherm (vgl. Exotherm, Enthalpie): Eine chemische Reaktion ist endotherm, wenn sie in ihrem Verlauf bei konstantem Druck Energie aus der Umgebung aufnimmt. Die Reaktionsenthalpie hat ein positives Vorzeichen.

Enthalpie: Ist bei konstantem Druck ein Maß für den Energie-/ bzw. Wärmeinhalt eines thermodynamischen Systems.

Entropie: Ist ein Maß für Ordnung eines thermodynamischen Systems. Sie beschränkt die maximal gewinnbare Arbeit eines Systems.

Enzyme (vgl. Katalysatoren): Enzyme sind Biokatalysatoren mit sehr spezifischer Wirkung in Bezug auf den Reaktionstyp und die umgesetzte Substanz. Bislang sind weit mehr als 3000 Enzyme bekannt. Dabei setzen sie wie die Katalysatoren die Aktivierungsenergie herab und erhöhen die Reaktionsgeschwindigkeit.

Ethylen: Auch Ethen, einfachster gasförmiger Kohlenwasserstoff der Alkene. Ethylen ist sehr reaktionsfähig und Basis für den Massenkunststoff Polyethylen. Darüber hinaus ist es Ausgangsstoff für die Herstellung zahlreicher wichtiger organischer Verbindungen.

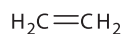


Abbildung 8: Chemische Struktur von Ethylen.

Exotherm (vgl. Endotherm, Enthalpie): Eine chemische Reaktion ist exotherm, wenn sie in ihrem Verlauf bei konstantem Druck Energie an die Umgebung abgibt. Die Reaktionsenthalpie hat ein negatives Vorzeichen.

Extraktion: Extraktion ist ein physikalisches Stofftrennverfahren, bei dem mithilfe eines Extraktionsmittels (ein Lösungsmittel) eine Komponente aus einem festen oder flüssigen Stoffgemisch herausgelöst wird.

Feedgase: Gase, die für einen chemischen Prozess in einen Apparat oder eine Anlage eingeführt werden.

Fettsäuren (vgl. Ameisensäure, Organische Säuren):

„Fettsäuren“ ist ein Sammelbegriff für Organische Säuren mit Kohlenwasserstoffkette. Dabei besteht die Kette aus gesättigten Kohlenwasserstoffketten ohne Doppelbindungen oder ungesättigten Kohlenwasserstoffketten mit Doppelbindungen.

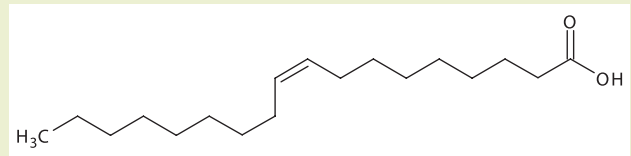


Abbildung 9: Chemische Struktur der Ölsäure ((Z)-9-Octadecensäure), einer ungesättigten Fettsäure.

Fischer-Tropsch-Synthese (vgl. Synthesegas): Die Synthese ist ein von F. Fischer und H. Tropsch 1922 bis 1926 entwickeltes Verfahren zur Synthese von Kohlenwasserstoffen (insbesondere von Benzin) durch katalytische Reduktion von Kohlenmonoxid. Ausgangsmaterial war damals ein auf Basis von Kohle erzeugtes Synthesegas, eine Mischung von Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H₂).

Freie Enthalpie (vgl. Enthalpie, Entropie): Beschreibt, ob eine chemische Reaktion freiwillig abläuft, nämlich dann wenn die Freie Enthalpie abnimmt. Die Freie Enthalpie setzt sich aus den Bestandteilen Enthalpie und Entropie zusammen.

Gaswäscher: Ein Gaswäscher ist ein Apparat, in dem ein Gasstrom mit einer Waschflüssigkeit in Kontakt gebracht wird, um Bestandteile des Gasstroms in der Flüssigkeit aufzunehmen. Bei den übergehenden Bestandteilen des Gasstromes kann es sich um feste, flüssige oder gasförmige Bestandteile handeln. Als Waschflüssigkeit können reine Lösungsmittel wie Wasser, aber auch Suspensionen wie Kalkmilch (Rauchgasentschwefelung) eingesetzt werden.

Gichtgas: Gichtgas (auch Hochofen-Gas) ist ein brennbares Gas, das aufgrund seines beträchtlichen Stickstoffgehaltes von etwa 45 bis 60 Prozent und einem Kohlenstoffmonoxid-Anteil von etwa 20 bis 30 Prozent nur einen geringen Heizwert aufweist. Gichtgas enthält außer Stickstoff (N₂) und Kohlenstoffmonoxid (CO) noch ungefähr 20 bis 25 Prozent Kohlenstoffdioxid (CO₂) und ungefähr 2 bis 4 Prozent Wasserstoff (H₂).

Grenzflächenspannung: Grenzflächenspannung tritt auf an der gemeinsamen Grenzfläche zweier, nicht miteinander mischbarer verschiedener Phasen. Ein Spezialfall der Grenzflächenspannung ist die Oberflächenspannung, wie sie z. B. einen Wassertropfen in Form hält.

Harnstoff: Harnstoff ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) ist ein wichtiges Endprodukt des Proteinstoffwechsels bei Säugetieren. Technisch wird Harnstoff aus Ammoniak (NH_3) und Kohlendioxid (CO_2) unter Druck hergestellt. Verwendung findet Harnstoff als Düngemittel sowie bei der Herstellung von Kunststoffen wie Amnoplacken.

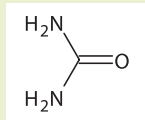


Abbildung 10: Chemische Struktur von Harnstoff.

Hauptsätze der Thermodynamik: Die Entwicklung der Aussagen der Thermodynamik basiert auf Hauptsätzen. Diese sind nicht beweisbar, aber bisher auch noch nicht widerlegte Axiome.

0. Hauptsatz der Thermodynamik: Postuliert die Temperatur und besagt, dass 2 Systeme die miteinander im thermischen Gleichgewicht stehen, dieselbe Temperatur haben.
1. Hauptsatz der Thermodynamik: Ist eine Ableitung aus dem Energieerhaltungssatz und besagt, dass in einem abgeschlossenen System Energie zwar in verschiedene Formen (Wärme, Arbeit, etc.) umgewandelt, nicht jedoch erzeugt oder vernichtet werden kann.
2. Hauptsatz der Thermodynamik: In einem abgeschlossenen System (kein Wärme- oder Stoffaustausch) nimmt die Entropie zu oder bleibt konstant (im Falle von reversiblen Prozessen). Dies hat u. a. zur Folge, dass Wärme nicht von selbst von einem kälteren zu einem wärmeren Körper übergehen kann.
3. Hauptsatz der Thermodynamik: Postuliert die Existenz der absoluten Temperatur (gemessen in Kelvin) und besagt, dass im absoluten Nullpunkt die Entropie eines idealen kristallisierten Festkörpers den Wert Null annimmt.

Hydrierung (vgl. Dehydrierung): Einführung von Wasserstoff in eine chemische Verbindung, im Allgemeinen durch Addition von Wasserstoff an ungesättigte Verbindungen wie Alkene, Alkine, Aldehyde und Ketone. Wird in der Regel bei erhöhter Temperatur und erhöhtem Druck unter Einsatz von Katalysatoren (meist Übergangsmetallen wie Platin, Nickel oder Kupfer) durchgeführt.

Hydrosphäre: Die Hydrosphäre ist jener Teil der Erde, der sämtliche ober- und unterirdische Wasservorkommen umfasst.

Integrierter Strommarkt: Strommarkt ohne künstliche Handelshindernisse.

Infrarot-Strahlung (auch IR-Strahlung): Es handelt sich um unsichtbare elektromagnetische Wellen, die sich an das rote Ende des sichtbaren Spektrums anschließen. Sie deckt den Wellenlängenbereich von etwa 0,8 bis 100 μm ab. Zu noch größeren Wellenlängen hin schließen sich an den Infrarotbereich die Mikrowellen an. Die Wärmestrahlung von Körpern mit alltäglichen Temperaturbereich liegt im Infraroten, weshalb häufig Infrarot auch als Wärmestrahlung bezeichnet wird.

Isopren: Zweifach ungesättigter Kohlenwasserstoff, der als monomere Bausteine vieler in der Natur vorkommender Substanzen auftritt.

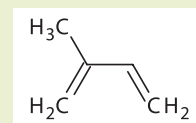


Abbildung 11: Chemische Struktur von Isopren.

Isotope: Als Isotope bezeichnet man Atomkerne, die die gleiche Menge Protonen (gleiche Ordnungszahl), aber unterschiedlich viele Neutronen enthalten. Die Isotope eines Elements haben verschiedene Massenzahlen, verhalten sich aber chemisch weitgehend identisch.

Joule-Thomson-Effekt: Lässt man ein Gas expandieren, so erhöhen sich das Volumen des Gases und der mittlere Teilchenabstand, wodurch sich die Temperatur des Gases ändert.

Kaliumcarbonat: Kaliumcarbonat (K_2CO_3), auch als Pottasche bekannt.

Katalysator: Ein Katalysator beschleunigt eine chemische Reaktion, indem er die Aktivierungsenergie der Reaktion herabsetzt, d. h. die Energie, die nötig ist um die chemische Reaktion einzuleiten. Dabei verändert der Katalysator den Ablauf der Reaktion. In der Regel führt der Einsatz von Katalysatoren dazu, dass eine chemische Reaktion bei milderen Bedingungen abläuft. Der Katalysator geht aus der Reaktion unverändert hervor und erscheint so in der chemischen Gleichung weder auf Seite der Eingangsstoffe noch der Produk-

te. Daher sind in der Regel geringe Mengen an Katalysator ausreichend. Katalysatoren finden breite Anwendung in der (petro-) chemischen Industrie. Die bekannteste technische Anwendung des Katalysators ist der 3-Wege Katalysator im Auto. Die Autoabgase werden durch platin- und palladium-verkleidete Keramik-Kanäle geströmt, wo die Stickoxide in Stickstoff umgewandelt werden.

Katalysator, heterogener (vgl. Katalysator, Katalysator, homogener): Ein heterogener Katalysator befindet sich nicht in der gleichen Phase wie die Reaktanten einer chemischen Reaktion. Er ist daher leicht von dem Reaktionsgemisch abzutrennen (z.B. Autokatalysator: Katalysator ist ein Feststoff, die Eingangsstoffe und Produkte liegen in der Gasphase vor).

Katalysator, homogener (vgl. Katalysator, Katalysator, heterogener): Im Falle der homogenen Katalyse liegen die Reaktanten der Reaktion und der Katalysator in der gleichen Phase vor. Dies ist z. B. bei den meisten natürlichen biochemischen Reaktionen der Fall.

Kohlenhydrate: Sammelbezeichnung für eine weit verbreitete Gruppe von Naturstoffen, zu der alle Zucker-, Stärke- und Cellulosearten gehören.

Kohlenstoff, alter: Hier: fossiler Kohlenstoff.

Kohlenstoff, fossiler: Hier: Kohlenstoff, der in frühen Perioden der Erdgeschichte aus dem Kohlendioxid der damaligen Atmosphäre entstanden ist und als organische Substanz außerhalb der Atmosphäre abgelagert wurde. Dazu zählen hauptsächlich Kohle, Erdöl und Erdgas.

Kohlenstoff, immobil: Hier: Kohlenstoff, der außerhalb des natürlichen Kohlenstoffkreislaufs festgelegt, bzw. abgelagert ist.

Kohlenstoff, junger: Hier: Kohlenstoff aus dem Kohlendioxid der Atmosphäre unmittelbar vor dem Beginn der Vermischung mit fossilem.

Kohlenstoff, mobiler: Hier: Kohlenstoff, der sich im natürlichen Kohlenstoffkreislauf der Erde befindet.

Kohlenstoff, rezenter: Hier: Kohlenstoff, der aus dem Kohlendioxid der aktuellen Atmosphäre stammt.

Kohlenstoffkreislauf: Unter dem Kohlenstoffkreislauf versteht man das System der chemischen Umwandlungen kohlenstoffhaltiger Verbindungen in den globalen Systemen der Lithosphäre, Hydrosphäre, Atmosphäre und Biosphäre sowie den Austausch dieser Verbindungen zwischen diesen Geosphären. Die Kenntnis dieses Kreislaufs einschließlich seiner Teilprozesse ermöglicht es unter anderem, die Eingriffe des Menschen in das Klima und damit ihre Auswirkungen auf die globale Erwärmung abzuschätzen und angemessen zu reagieren.

Kraft-Wärme-Kopplung: Ist die gleichzeitige Gewinnung von mechanischer Energie, die in der Regel unmittelbar in elektrischen Strom umgewandelt wird, und nutzbarer Wärme für Heizzwecke (Fernwärme) oder Produktionsprozesse (Prozesswärme) in einem Heizkraftwerk.

Kritischer Punkt: Der kritische Punkt ist die Bezeichnung für den Zustand eines Stoffes, in dem die Aggregatzustände flüssig und gasförmig nicht mehr voneinander unterscheidbar sind. Für den jeweiligen Stoff ist dieser Wert durch charakteristische Bedingungen an den Druck, das Volumen und die Temperatur fixiert.

Lösungsmittel: Unter einem Lösungsmittel (auch: Lösemittel) versteht man einen Stoff, der Gase, andere Flüssigkeiten oder Feststoffe lösen kann, ohne dass es dabei zu chemischen Reaktionen zwischen gelöstem Stoff und lösendem Stoff kommt. In der Regel werden Flüssigkeiten wie Wasser oder flüssige organische Stoffe zum Lösen anderer Stoffe eingesetzt.

Membran: Eine Membran ist eine Trennschicht. Sowohl in der Biologie als auch in der Technik treten Membranen in den vielfältigsten Anwendungen und Funktionen auf. Jede biologische Zelle ist von einer semipermeablen (teilweise durchlässigen) Membran umgeben. Das Leben in seiner heutigen Form wäre ohne Membranen als Trennschicht nicht denkbar.

Membrantechnik: Die Membrantechnik umfasst alle verfahrenstechnischen Maßnahmen zum Transport von Stoffen zwischen zwei Fraktionen unter Zuhilfenahme permeabler (durchlässiger) Membranen. Man meint damit in der Regel mechanische Trennverfahren zur Separation aus gasförmigen oder flüssigen Stoffströmen unter Verwendung technischer Membranen.

Metal-Organic-Frameworks: Metal-Organic-Frameworks (MOF) sind poröse Materialien mit geordneter kristalliner Struktur. Sie bestehen aus Stoffen mit Übergangsmetallen

(meistens Kupfer, Zink, Nickel oder Kobalt) als „Knoten“ und organischen Molekülen als Verbindungen zwischen den Knoten. Wegen ihrer porösen Eigenschaft können Metal-Organic-Frameworks zu Gasspeicherung, beispielsweise für Wasserstoff oder Methan, verwendet werden.

Methanhydrat: Methanhydrat besteht aus Methan, das in erstarrtem Wasser eingelagert ist, wobei die Wassermoleküle das Methanmolekül vollständig umschließen und daher auch Einlagerungsverbindung, Klathrat genannt.

Mitigation: Abschwächung oder Minderung. Unter CO₂-Mitigationsmaßnahmen versteht man Maßnahmen, die geeignet sind den CO₂-Anstieg in der Atmosphäre abzuschwächen.

Organisch (vgl. Anorganisch): Die organische Chemie ist ein umfangreiches Teilgebiet der Chemie, das sich mit den Verbindungen des Kohlenstoffs, den organischen Verbindungen, beschäftigt. Ausnahme sind lediglich einige einfache Verbindungen wie Kohlenmonoxid, Kohlendioxid sowie Carbonate. Im Jahr 2000 waren etwa 15 Millionen organische Verbindungen bekannt, und jährlich kommen zurzeit rund 2 Millionen hinzu. Weiterhin wird der Begriff im Sinne „auf Kohlenstoff basierend“ verwendet, z. B. in „organische Substanzen“.

Organische Säuren (vgl. Ameisensäure, Fettsäuren, Aminosäuren): Säuren, die in den Bereich der organischen Chemie fallen. Sie zeichnen sich durch COOH als funktionelle Gruppe aus.

Oxidation (vgl. Reduktion, Redoxreaktion): Die Oxidation ist eine chemische Reaktion, bei der Elektronen abgegeben werden. Die Oxidation tritt immer in Kombination mit einer Reduktion auf, bei der die Elektronen aufgenommen werden. Zusammen bilden beide Reaktionen eine Redoxreaktion.

Partialdruck: Der Partialdruck ist der Druck der von einer einzelnen gasförmigen Komponente in einem Gemisch von Gasen ausgeht.

Photosensitizer (Photosensibilisatoren): Lichtempfindliche Substanzen, die durch Lichteinstrahlung geeigneter Wellenlänge und Intensität angeregt werden und dann mit anderen Stoffen reagieren, was zur Umwandlung des betreffenden Stoffes führt.

Photosynthese: Die Photosynthese wird von Pflanzen sowie verschiedenen Algen- und Bakteriengruppen betrieben.

Bei diesem biochemischen Vorgang wird zunächst mit Licht absorbierenden Farbstoffen, meistens Chlorophyll, Licht-Energie in chemische Energie umgewandelt. Dies wird dann unter anderem zur Fixierung von Kohlendioxid verwendet: Aus energiearmen anorganischen Stoffen, hauptsächlich Kohlenstoffdioxid und Wasser, werden dabei energiereiche organische Verbindungen – Kohlenhydrate – synthetisiert.

pH-Wert: „negativer dekadischer Logarithmus der Wasserstoffionenkonzentration“. Er ermöglicht eine Unterscheidung zwischen Säuren und Laugen: Wässrige Lösungen mit pH-Werten kleiner 7 werden als Säuren bezeichnet. Lösungen mit pH-Werten größer 7 werden als Laugen bezeichnet.

Polycarbonate: Polyester, die aus Kohlensäurederivaten und zweiwertigen Alkoholen hergestellt werden. Aufgrund ihrer guten optischen Eigenschaften kommen Polycarbonate unter anderem als CD-Beschichtungen zur Anwendung.

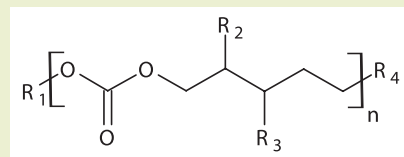


Abbildung 12: Chemische Struktur eines Polycarbonates.

Polymere, hyperverzweigte: Das sind kurzkettige Polymere, die eine annähernd kugelförmige Gestalt haben und in ihrem Gerüst oder auf der Oberfläche funktionelle Gruppen tragen. Die Gestalt ist dafür verantwortlich, dass hyperverzweigte Polymere vergleichsweise wenig viskos sind, einige sind bei Raumtemperatur flüssig. Der Dampfdruck von hyperverzweigten Polymeren ist unmessbar klein.

Polypropylencarbonat (vgl. Polycarbonat): Polypropylencarbonat ist ein Polycarbonat mit der handelsüblichen Abkürzung PPC.

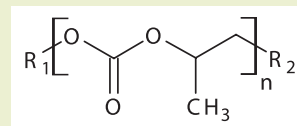


Abbildung 13: Chemische Struktur von Polypropylencarbonat (PPC).

ppm: 1 ppm (parts per million) entspricht einem Teilchen auf einer Million. Bezogen auf Gewicht entspricht dies einem Gramm pro Tonne. Bei Gasen wird in der Regel die Volumenkonzentration (ppmV) verwendet.

Propylen (vgl. Polypropylen, Ethylen): Auch Propen, gasförmiger ungesättigter Kohlenwasserstoff. Propylen wird bei

der katalytischen und thermischen Spaltung von Erdöl gewonnen. Es dient der Herstellung von Polypropylen und als Grundstoff in der chemischen Wertschöpfungskette.

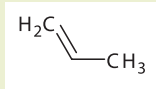


Abbildung 14: Chemische Struktur von Propylen (Propen).

Reaktionswärme, Reaktionsenthalpie (vgl. Enthalpie, exotherm, endotherm): Bei einer chemischen Reaktion umgesetzte Wärme. Sie entspricht im Falle einer Reaktion bei konstantem Druck der Reaktionsenthalpie. Wenn die Reaktion Wärme in die Umgebung freisetzt, spricht man von einer exothermen Reaktion, wenn die Reaktion Wärme aus der Umgebung benötigt, ist sie endotherm.

Redoxreaktion (vgl. Reduktion, Oxidation): Eine Redoxreaktion (vollständig: Reduktions-Oxidations-Reaktion) ist eine chemische Reaktion, bei der ein Reaktionspartner Elektronen auf einen anderen überträgt. Bei einer solchen Elektronenübertragungs-Reaktion finden also eine Elektronenabgabe (Oxidation) durch einen Stoff sowie eine Elektronenaufnahme (Reduktion) statt. Redoxreaktionen sind von grundlegender Bedeutung in der Chemie.

Reduktion (vgl. Oxidation, Redoxreaktion): Die Reduktion ist eine chemische Reaktion, bei der Elektronen aufgenommen werden. Die Reduktion tritt immer in Kombination mit einer Oxidation auf, bei der die Elektronen abgegeben werden. Zusammen bilden beide Reaktionen eine Redoxreaktion.

Reformierung, trockene: Bildung eines Synthesegasgemisches durch die Reaktion von Methan mit Kohlendioxid.

Salicylsäure: Salicylsäure kommt in ätherischen Ölen und als Pflanzenhormon in Blättern, Blüten und Wurzeln verschiedener Pflanzen vor und ist für die pflanzliche Abwehr von Krankheitserregern von Bedeutung. Ihren Namen bekam sie, da sie früher vor allem durch die oxidative Aufbereitung von Salicin, das in der Rinde verschiedener Weiden ist, gewonnen wurde. Sie bildet ein wichtiges Vorprodukt zur Herstellung eines bekannten Kopfschmerzmittels.

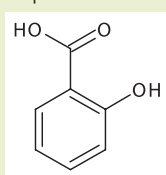


Abbildung 15: Chemische Struktur von Salicylsäure.

Sauergaswäsche (vgl. Säure): Sauergaswäsche ist ein Reinigungsverfahren zur Entfernung von sauren Gaskomponenten aus Gasgemischen, z. B. die Abtrennung von Kohlendioxid und Schwefelwasserstoff mit Natronlauge aus Gasgemischen.

Säuren: Chemische Verbindungen, die in wässrigen Lösungen einen pH-Wert kleiner als 7 aufweisen.

Smart Grid: Intelligente Netze (Smart Grids) gehen auf die veränderte Energieerzeugungsstruktur ein und berücksichtigen, dass ein Mix aus kleineren und größeren Verbrauchern und Produzenten entsteht. Integriert werden können dezentrale Windkraftanlagen, Solarzellen auf dem Dach öffentlicher Gebäude und Mehrfamilienhäuser mit eigenem Blockheizkraftwerk. Auch große Kraftwerke gehören dazu. Das Kraftwerksgemisch stellt ein virtuelles Kraftwerk da, dessen einzelne Komponenten durch ein Energie-Internet verbunden sind. Das Zusammenspiel der Komponenten wird zentral gesteuert.

Smart Meter: Ein Smart Meter ist ein intelligenter elektronischer Stromzähler, mit dem es möglich ist, Zählerstände von Energieversorgungsunternehmen über die Ferne auszulesen. Mit den Daten von vielen Verbrauchern kann das Energieversorgungsunternehmen das Netz nach Bedarf und Verfügbarkeit von elektrischer Energie steuern.

Solarthermie: Unter Solarthermie versteht man die Umwandlung der Sonnenenergie in nutzbare Wärmeenergie.

Sol-Gel-Prozess: Der Sol-Gel-Prozess ist ein Verfahren zur Herstellung nichtmetallischer oder anorganischer Materialien aus kolloidalen Dispersionen, den so genannten Solen. Aus ihnen entstehen in Lösung in ersten Grundreaktionen feinste Teilchen. Durch eine spezielle Weiterverarbeitung der Sole lassen sich Pulver, Fasern, Schichten oder Aergele erzeugen. Wegen der geringen Größe der zunächst erzeugten Solpartikel im Nanometerbereich lässt sich der Sol-Gel-Prozess als Teil der chemischen Nanotechnologie einordnen.

Sonnenflecken: Sonnenflecken sind dunkle Stellen auf der sichtbaren Sonnenoberfläche (Photosphäre), die kühler sind und daher weniger sichtbares Licht abstrahlen als der Rest der Oberfläche. Ihre Zahl und Größe ist das einfachste Maß für die Sonnenaktivität. Die Häufigkeit der Sonnenflecken unterliegt einer Periodizität von durchschnittlich 11 Jahren, was als Sonnenfleckenzyklus bezeichnet wird.

Synthesegas (vgl. Fischer-Tropsch Synthese): Synthesegas ist eine Mischung variabler Zusammensetzung aus den Hauptkomponenten Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H₂), das durch die Vergasung kohlenstoffhaltiger Substanzen entsteht. Das Synthesegas kann zur Synthese von Kohlenwasserstoffen, z.B. über die Fischer-Tropsch Synthese eingesetzt werden.

Thermodynamik (vgl. Hauptsätze der Thermodynamik, Thermodynamisches Gleichgewicht): Teilgebiet der Physik und der Physikalischen Chemie, das sich mit dem Energiegehalt von Stoffen, deren Umwandlungen und Eigenschaften beschäftigt. Die Beschreibung erfolgt, ausgehend von Hauptsätzen (Axiomen), anhand von Zustandsgrößen, die das System und die Umgebung beschreiben.

Thermodynamisches Gleichgewicht (vgl. Freie Enthalpie, Hauptsätze der Thermodynamik, Thermodynamik): Ein thermodynamisches Gleichgewicht liegt vor, wenn sich der thermodynamische Zustand nicht ändert. Für konstanten Druck bedeutet dies, dass die Freie Enthalpie sich in einem Minimum befindet (im Falle einer Reaktion auch chemisches Gleichgewicht genannt).

Tocopherol: Tocopherol ist unter dem Begriff Vitamin E bekannt. Es ist ein Sammelbegriff für eine Gruppe von sechzehn fettlöslichen Substanzen mit antioxidativen und nicht-antioxidativen Wirkungen. Vitamin E ist Bestandteil aller Membranen tierischer Zellen, wird jedoch nur von photosynthetisch aktiven Organismen wie Pflanzen und Cyanobakterien gebildet.

Toluol: Toluol ist eine farblose, brennbare, benzinartig riechende Flüssigkeit, die in Wasser schlecht, in organischen Lösungsmitteln dagegen gut löslich ist. Toluol wird als Lösungsmittel verwendet.

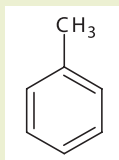


Abbildung 16: Chemische Struktur von Toluol.

Tripelpunkt: Der Tripelpunkt ist bezüglich Druck und Temperatur ein eindeutig bestimmter Punkt im Zustandsdiagramm (p, T-Diagramm) einer chemisch einheitlichen Substanz, in dem ihr fester, flüssiger und gasförmiger Aggregatzustand gleichzeitig nebeneinander bestehen und in dem alle drei Phasen in stabilem Gleichgewicht sind.

Unpolar: Unpolare Stoffe weisen kein permanentes elektrisches Dipolmoment (gemittelte Ladungsschwerpunktbildung) im Molekül auf.

Van-der-Waals-Kräfte: Van-der-Waals-Kräfte sind schwache Kräfte zwischen Atomen und Molekülen. Sie beruhen auf der Wechselwirkung von vorhandenen oder induzierten (abhängig von der Beweglichkeit der Elektronen) Ladungsverschiebungen in Atomen und Molekülen.

Verkokung: Ablagerung von organischen Materialien auf der Oberfläche des Katalysators.

Wassergas-Shift-Reaktion (vgl. Synthesegas): Die Wassergas-Shift-Reaktion ist ein Verfahren, um in einem Synthesegas den Kohlenmonoxid (CO)-Anteil zu minimieren und gleichzeitig den Wasserstoff (H₂)-Anteil zu erhöhen. Unter Zugabe von Wasserdampf reagiert das Kohlenmonoxid unter Energieabgabe zu Kohlendioxid und Wasserstoff. Die Reaktion läuft an einem Eisen(III)-oxid-Katalysator bei ungefähr 250 - 450 Grad Celsius ab.

Wirkungsgrad: Als Wirkungsgrad bezeichnet man den Anteil der Ausgangsenergie, der in die gewünschte Energieform umgewandelt wurde. Je höher der Wirkungsgrad ist, desto energieeffizienter arbeitet ein Aggregat. Ein Kohlekraftwerk hat dann einen hohen Wirkungsgrad, wenn es möglichst viel der in der Kohle gespeicherten chemischen Energie in elektrische Energie umwandelt.

Zeolithe: Zeolithe sind kristalline Alumosilikate, die sowohl natürlich vorkommen als auch technisch hergestellt werden. Durch eine ausgeprägte Porenstruktur können sie Wasser oder andere Stoffe aufnehmen. Technisch finden sie u. a. Anwendung als Substrat zum Aufbringen von Katalysatoren, als Trocknungsmittel, Ionentauscher, Bestandteil von Waschmitteln und Molekularsieb.



IMPRESSUM:

Herausgeber:

Deutsche Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie

Dr. Florian Ausfelder

Deutsche Bunsen-Gesellschaft

für Physikalische Chemie e.V.

Theodor-Heuss-Allee 25

60486 Frankfurt/Main

E-Mail: ausfelder@bunsen.de

Homepage: www.bunsen.de

Prof. Dr. Wolfgang von Rybinski

Deutsche Bunsen-Gesellschaft

für Physikalische Chemie e.V.

Theodor-Heuss-Allee 25

60486 Frankfurt/Main

Diese Veröffentlichung wurde mit Mitteln der Deutschen Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Das vorliegende Werk wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der

Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische

Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

© 2010 Deutsche Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie e.V., Frankfurt am Main

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Journalistische Bearbeitung:

Dr. Thomas Isenburg

Stockumer Str. 90

D-44892 Bochum

www.thomas-isenburg.de

Layout und Satz:

PM-GrafikDesign

Im alten Weg 7

63607 Wächtersbach

Druck:

Seltersdruck GmbH

65618 Selters/Ts

Printed in Germany

ISBN 978-3-9809691-4-7

Dezember 2010

KOHLENDIOXID CO₂ – FACETTEN EINES MOLEKÜLS



Herausgeber:

Deutsche Bunsen-Gesellschaft
für Physikalische Chemie
Theodor-Heuss-Allee 25
60486 Frankfurt am Main

unter Mitwirkung der DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie,
der Gesellschaft Deutscher Chemiker und des Verbandes der Chemischen Industrie