



Matthias Maring (dir.)

Globale öffentliche Güter in interdisziplinären Perspektiven

KIT Scientific Publishing

Globale Stoffkreisläufe als Teil der natürlichen Lebensgrundlagen

Georg Schaub and Thomas Turek

Publisher: KIT Scientific Publishing
Place of publication: Karlsruhe
Year of publication: 2012
Published on OpenEdition Books: 31 mai 2017
Series: KIT Scientific Publishing
Electronic EAN: 9782821881563



<http://books.openedition.org>

Electronic reference

SCHAUB, Georg ; TUREK, Thomas. *Globale Stoffkreisläufe als Teil der natürlichen Lebensgrundlagen* In.: *Globale öffentliche Güter in interdisziplinären Perspektiven* [Online]. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2012 (Erstellungsdatum: 08 septembre 2023). Online verfügbar: <<http://books.openedition.org/ksp/3802>>. ISBN: 9782821881563.

Globale Stoffkreisläufe als Teil der natürlichen Lebensgrundlagen

Georg Schaub – Thomas Turek

Die Kreisläufe von einzelnen Stoffen oder chemischen Elementen (wie Wasser, Kohlenstoff, Sauerstoff) bestimmen maßgeblich die natürlichen Umweltbedingungen als globale öffentliche Güter auf der Erde. Das Verständnis dieser Kreisläufe wird umso wichtiger, je mehr zivilisatorisch verursachte Stoffströme die natürliche Situation in globalem Maßstab beeinflussen bzw. verändern (Schaub/Turek 2011). Der vorliegende Beitrag beschreibt anhand ausgewählter Beispiele die zugrunde liegenden Prinzipien. Die Sichtweise ist dabei geprägt durch die Disziplin der chemischen Reaktionstechnik, deren Aufgabe die quantitative Beschreibung von Stoffumwandlungen in (technischen) Systemen ist.

1. Globale Stoffkreisläufe

Die Erde als Gesamtsystem kann gesehen werden als Summe einzelner Teilsysteme, die Stoffe und Energie über verschiedenartige Prozesse austauschen (chemische oder biologische Umwandlungen, Transportprozesse u.a.). In den nachfolgenden bildlichen Darstellungen (Abb. 1 und 2) sind Teilsysteme mit Speichern als geschlossene Flächen dargestellt, stoffliche Komponenten in den Teilsystemen beinhalten stoffliche Spezies und/oder verschiedene physikalische Phasen (Dampf, Flüssigkeit, Feststoff). Ströme (oder Flüsse) von stofflichen Spezies, gegebenenfalls verbunden mit Energieflüssen, stellen als Pfeile (bio)chemische Reaktionen, Phasenübergänge oder Transportprozesse über die Grenzen der Teilsysteme dar. Jedes Teilsystem wird beschrieben durch eine Bilanz, in der die Summe der ein- und austretenden Ströme anzeigt, ob über längere Zeiträume die stofflichen Inventare konstant bleiben oder sich verändern. Zahlenwerte der einzelnen Stoffströme unterscheiden sich signifikant, abhängig von der kinetischen Charakteristik der einzelnen Prozesse (etwa chemische Reaktionen, Stofftransport, Phasenübergänge etc.). Die Kopplung von Stoff- und Energieströmen spielt eine Rolle für Prozesse mit deutlichen Wärmeeffekten (z.B. Verdunstung/Kondensation von Wasser, exotherme oder endotherme chemische Reaktionen).

Beispiel Wasser – Eis – Wasserdampf

Die chemische Spezies H_2O kommt dank der charakteristischen Temperatur-/Druckverhältnisse auf der Erdoberfläche (nahe $0\text{ }^\circ\text{C}$, Atmosphärendruck)

in drei Phasenzuständen vor: Dampf, Flüssigkeit, Feststoff.¹ Die Existenz von flüssigem Wasser war die Voraussetzung für die Evolution aller Formen von Leben, die für die heutige Biosphäre typisch sind. Wasser wirkt als Speicher- und Transportmedium für die an biologischen Stoffwechselfvorgängen beteiligten Komponenten, als Medium zur Temperierung und wird außerdem bei der Photosynthese chemisch eingebunden. Wegen der Wärmetönung von Verdunsten/Kondensieren und Schmelzen/Kristallisieren spielt der Stoff H₂O eine wichtige Rolle im Klimasystem (wo Wärme-Freisetzung bzw. -Einbindung an verschiedenen Orten stattfindet).

Der weitaus größte Speicher für H₂O auf der Erde ist flüssiges Wasser – 97 % –, von dem sich 99 % in den Ozeanen findet (Abb. 1). Die Anteile von Eis und Wasserdampf – in der Atmosphäre – repräsentieren nur 2 % bzw. 10 ppm der Gesamtmasse H₂O auf der Erde.

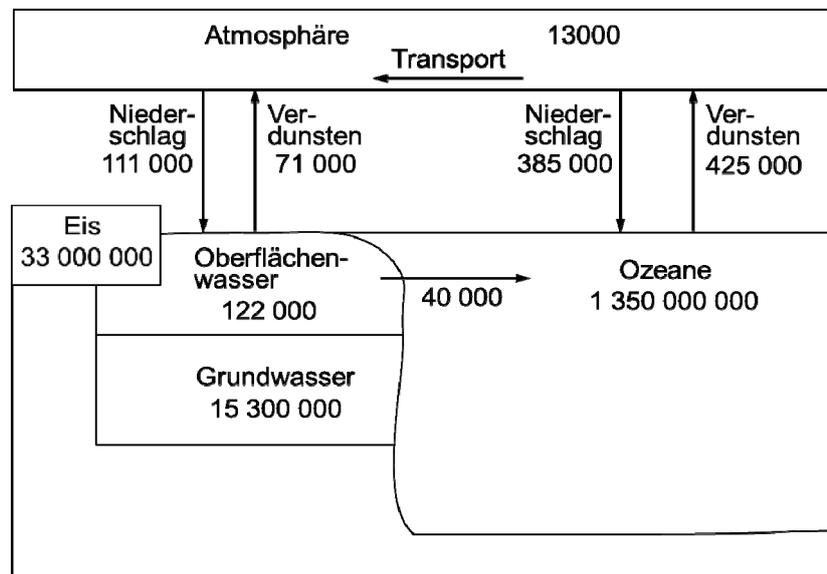


Abbildung 1: Globale Speicher für den Stoff H₂O (geschlossene Flächen mit Zahlenwerten in 10⁹ t) und jährliche Austauschströme (Pfeile mit Zahlenwerten in 10⁹ t/Jahr) – Daten: Schlesinger 1997.

Der Austausch zwischen Ozean, Oberflächenwasser und Atmosphäre (basierend auf Verdunsten/Niederschlag) ist der größte Stoffstrom, der auf der Erde auftritt. Innerhalb der Atmosphäre gibt es einen Netto-Strom von Wasserdampf über dem Ozean zum Land, der zusätzliche Niederschläge über dem Land erzeugt und die dortige wichtige Verfügbarkeit von Wasser erhöht. Der Verbrauch von H₂O bei der Photosynthese entspricht etwa 0,1 % des Niederschlages über dem Land. Aus den in Abbildung 1 genannten Zahlen ergeben sich für H₂O mittlere Verweilzeiten in den verschiedenen Spei-

¹ Vgl. zu den Abkürzungen das Ende des Beitrags.

chern von etwa 10 Tagen in der Atmosphäre (als Ganzes) entsprechend dem kleinen Inventar und den großen Strömen und etwa 3200 Jahre für die Ozeane (als Ganzes). Demnach bleiben H_2O Moleküle im Mittel nur wenige Tage in der Atmosphäre. Tatsächlich gibt es eine Verteilung von Verweilzeiten entsprechend der langsamen vertikalen Durchmischung in der Atmosphäre. Auch im Ozean führt die langsame vertikale Durchmischung zu einer breiten Verteilung von Verweilzeiten.

Die in Abbildung 1 gegebenen Niederschläge führen zu einem flächenbezogenen Mittelwert von 970 mm/Jahr, bezogen auf die Gesamtoberfläche der Erde von $5,1 \times 10^8 \text{ km}^2$ (Schönwiese 2008, Hupfer/Kuttler 2005). Der entsprechende Wert für die Landoberfläche ist 725 mm/Jahr, mit Extremwerten von nahe Null bis etwa 15.000 mm/Jahr (in Deutschland zwischen 350 und 2.500 mm/Jahr). In Deutschland, als ein Beispiel-Land für gemäßigte Breiten, beträgt der mittlere Niederschlag 840 mm/Jahr. Davon bleiben nach teilweiser Verdunstung 350 mm/Jahr an flüssigem Wasser zur Verfügung (entsprechend 1.520 t/Kopf und Jahr) von denen etwa 3 % für die öffentliche Wasserversorgung verteilt werden.

Seit der Ausbildung der ersten Siedlungen haben menschliche Gesellschaften versucht, sich den Wasser-Kreislauf zunutze zu machen. Brunnen, Entwässerungssysteme und Wasserleitungen für die landwirtschaftliche Bewässerung wurden bereits in frühen Gesellschaften gebaut, später ergänzt durch Dämme für Stauseen und komplexe Infrastruktur-Einrichtungen. Aufstieg und Niedergang früher Zivilisationen waren maßgeblich beeinflusst durch Veränderungen in der Verfügbarkeit von Wasser. Heute gibt es Landstriche z.B. in Afrika, Asien, Südamerika in den Subtropen, die wegen Wassermangel nur dünn besiedelt sind, die aber ein Potenzial für eine Wohlstandsentwicklung aufweisen.

In jüngerer Vergangenheit können globale Veränderungen des Wasser-Kreislaufs, d.h. eines globalen öffentlichen Guts, beobachtet werden, die mit Änderungen im globalen Energiesystem zusammenhängen, d.h. als Folge langsam steigender globaler Temperaturen. Beispiele dafür sind (IPCC 2007):

- Die Gesamtmasse an Eis nimmt ab durch das Schmelzen von Gletschern, der Polkappen und der Eismassen in Grönland und der Antarktis.
- Der Meeresspiegel steigt global an, mit einer mittleren Rate (Mittelwert im 20. Jahrhundert) von 1,7 mm/Jahr. Veränderungen im Meeresspiegel sind stark abhängig vom Ort, an manchen Stellen mit Raten, die mehrfach höher sind als die mittlere globale Rate, an manchen Orten wird auch ein sinkender Meeresspiegel beobachtet. Das Ansteigen des Mee-

resspiegels wird verursacht durch thermische Ausdehnung und den Verlust an Gletscher- und Land-Eisschichten.

- Örtliche und zeitliche Verteilung des Niederschlags und der Oberflächenströme von Wasser zeigen Veränderungen. Starkregen verursachen Überflutungen, anderenorts kann Versteppung beobachtet werden.
- Grundwasserspiegel sinken, wenn in Regionen hoher Bevölkerungsdichte (wie in heutigen Mega-Städten) der Wasserverbrauch nicht durch die natürlichen Ströme aufgefüllt wird.

Beispiel Kohlenstoff

Das chemische Element Kohlenstoff tritt als verschiedene Spezies in den Speichern und Strömen auf der Erde auf: gasförmig (CO_2 , Methan), in fester Form (Carbonate, organisch-chemisch gebunden in Lebewesen und abgestorbener Biomasse) oder in flüssiger Form (CO_2 gelöst als Carbonate in Wasser). In sämtlichen Lebewesen ist Kohlenstoff das chemisch dominierende Element, insofern sind die Erzeugung und der Abbau von organischem Kohlenstoff ein Maß für den Zustand der Biosphäre, die ebenfalls ein globales öffentliches Gut darstellt. Die Photosynthese erzeugt den freien Sauerstoff in der Atmosphäre, der erforderlich ist für das Funktionieren der Stoffwechselfvorgänge.

Abbildung 2 zeigt die wichtigsten Speicher und Ströme von Kohlenstoff auf der Erde, mit Zahlenwerte für die Dekade 1990–2000 und unterschiedlichen Genauigkeiten der Ermittlung/Schätzung. Die Atmosphäre (mit aktuell etwa 800×10^9 t Inventar) stellt einen kleinen Speicher dar, im Vergleich zum organischen Kohlenstoff in Biomasse. Das Inventar der Ozeane ist unterteilt in Oberflächengewässer und mittlere/tiefe Ozeane. Den größten Speicher bilden die Sedimente, die sehr große Mengen an anorganischen Carbonaten enthalten sowie Minerale, die organischen Kohlenstoff in Form von Biomasse-Resten in einer mittleren Konzentration von 0,5 % enthalten. Darunter findet sich eine Fraktion mit hoher Konzentration organischen Kohlenstoffs, den fossilen organischen Rohstoffen Erdöl, Erdgas, Kohle. Diese fossilen Rohstoffe wurden über lange Zeitperioden der Erdgeschichte gebildet (etwa während der letzten 200 Millionen Jahre), ausgehend von Biomasse, die durch Luftabschluss chemisch und biochemisch umgewandelt wurde. Sie stellen gespeicherte chemische Energie dar.

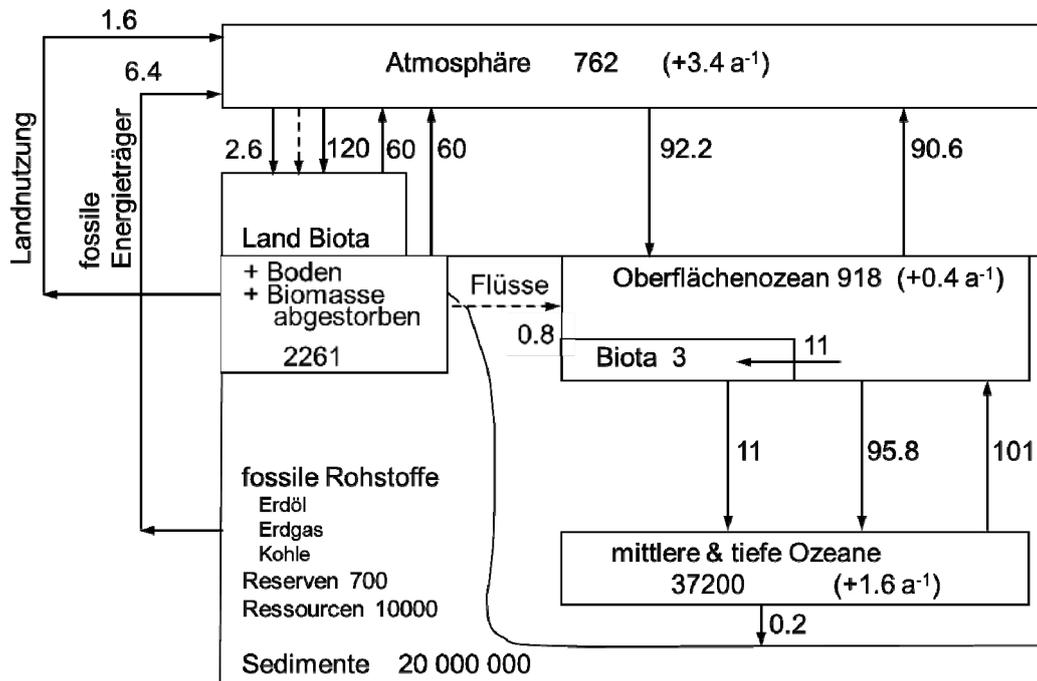


Abbildung 2: Globale Speicher für Kohlenstoff, die verschiedenen chemischen Spezies (geschlossene Flächen mit Zahlenwerten in 10^9 t) und jährliche Austauschströme (Pfeile mit Zahlenwerten in 10^9 t/Jahr), als Mittelwerte für die Periode 1990–2000 – Daten: Schlesinger 1997, IPCC 2007, Siegenthaler/Sarmiento 1993, Bolin 1970.

Die Photosynthese wandelt CO_2 aus der Atmosphäre in Biomasse um (Brutto-Photosyntheseproduktivität 120×10^9 t/Jahr), daneben wird CO_2 im Oberflächenozean absorbiert. Entgegengerichtet sind Ströme in etwa entsprechender Höhe: Atmung/Abbau von Lebewesen/abgestorbener Biomasse sowie Freisetzung aus dem Ozean. Von Menschen verursachte Kohlenstoff-Ströme resultieren aus der Nutzung fossiler Rohstoffe und aus der Änderung von Landnutzung (links in Abbildung 2). Im Ozean ablaufende Prozesse beinhalten die Photosynthese, Carbonatbildung und Transportprozesse durch Konvektion, Diffusion, Sedimentation. Sämtliche beobachteten Ströme sind bestimmt durch charakteristische Geschwindigkeiten der ablaufenden Prozesse.

Gegenüber dem vorindustriellen Wert hat das CO_2 -Inventar in der Atmosphäre um etwa ein Drittel (200×10^9 t) zugenommen, entsprechend der kumulierten Differenz zwischen eintretenden und austretenden Strömen (zu messen als Erhöhung der CO_2 -Konzentration von 280 auf etwa 400 ppm). Die jährliche Rate des Anstiegs war in der ersten Dekade des 21. Jahrhunderts höher als der in Abbildung 2 gezeigte Wert für die letzte Dekade des 20. Jahrhunderts (etwa 4×10^9 t/Jahr gegenüber $3,2 \times 10^9$ t/Jahr, s. Abschnitt 3).

Das globale Kohlenstoffsystem zeigt, dass die Verbrennung fossiler Rohstoffe CO_2 -Emissionen in den kleinen Speicher der Atmosphäre freisetzt. Entsprechend den gezeigten Strömen verblieben in den 1990er Jahren etwa 50 % der fossilen CO_2 -Emissionen in der Atmosphäre und führten damit zu einem Konzentrationsanstieg von etwa 0,5 % pro Jahr. Die übrigen 50 % des emittierten CO_2 wurden von anderen Speichern aufgenommen (Ozeane, terrestrische Biomasse). Nach den geschilderten Mechanismen wird die Freisetzung von großen Mengen fossiler Rohstoffe zu signifikanten weiteren Anstiegen des Kohlenstoffspeichers der Atmosphäre führen. Die bekannten (und geschätzten) Vorräte fossiler Rohstoffe würden bei vollständiger Verbrennung zu einer extremen Erhöhung des Kohlenstoff-Speichers in der Atmosphäre führen. Ein Abklingen dieser Erhöhung würde nur über große Zeiträume erfolgen, entsprechend dem langsamen Transport von gelöstem CO_2 in die Tiefen der Ozeane.

2. Bedeutung der globalen Stoffkreisläufe H_2O und Kohlenstoff für das System Erde

Die globalen Stoffkreisläufe von H_2O und Kohlenstoff haben einen großen Einfluss auf die stofflichen und energetischen Umsetzungen auf der Erde. Sie sind beide a) Haupt-Konstituenten sämtlicher Lebensvorgänge (Photosynthese, Stoffwechselfvorgänge) und b) Haupt-Beitragende zum Treibhauseffekt, der für die lebensfreundlichen Temperaturen an der Erdoberfläche bestimmend ist.

Die in der Atmosphäre vorliegenden Konzentrationen von H_2O und CO_2 (Größenordnung 0,1 bis 1 Vol% bzw. 0,04 Vol%) bewirken, dass von der Erdoberfläche abgestrahlte Infrarot-Strahlung in der Atmosphäre teilweise absorbiert und wieder zurückgestrahlt wird. Dadurch erhöht sich die insgesamt von der Erdoberfläche abstrahlende Energiedichte und damit die Temperatur (Treibhauseffekt). Der Anteil der in der Atmosphäre absorbierten Strahlungsenergie wird beeinflusst durch Veränderungen in den Konzentrationen der absorbierenden Gaskomponenten. Neben den Haupt-Beitragenden H_2O und CO_2 sind als Spurenkomponenten O_3 , N_2O und CH_4 für den Treibhauseffekt von Bedeutung.

Als Haupt-Konstituenten der Lebensvorgänge sind H_2O und Kohlenstoff maßgeblich für die Erzeugung von Nahrungsmitteln für Mensch und Tier. Das Wachstum von Biomasse durch Photosynthese ist direkt korreliert mit der Verfügbarkeit von flüssigem Wasser (Larcher 2003). In Breiten mit gemäßigttem Klima (wie in Westeuropa) wird für die Erzeugung von 1 kg trockener Biomasse insgesamt etwa 200 bis 1.000 kg flüssiges Wasser benötigt. Der größte Teil davon wirkt zur Kühlung der Pflanzen (durch Verduns-

tung) und zum Transport von Spurenkomponenten aus dem Boden in die Pflanzen.

3. Zivilisatorische Aktivitäten und Veränderungen des Kohlenstoff-Kreislaufs

Die Stoffströme, die ein Mensch biologisch verursacht, sind in Tabelle 1 zusammengestellt, ebenso Mittelwerte ausgewählter pro Kopf-Ströme von zivilisatorischen Stoffumsetzungen (für Deutschland als Beispiel für ein Industrieland sowie als Mittelwert der gesamten Erdbevölkerung). Die von den Menschen insgesamt verursachten Stoffströme waren unerheblich gegenüber den natürlichen globalen Stoffströmen, solange a) die biologischen Umsetzungen der Lebensvorgänge dominierten und b) die Bevölkerungszahl klein war (z.B. 10 Mio. bei 3000 v.u.Z., 300 Mio. bei 0 u.Z.). Mit der im 18. Jahrhundert einsetzenden Industrialisierung bei gleichzeitiger Zunahme der Bevölkerungszahl (bis auf etwa 7 Mrd. aktuell) haben die von Menschen insgesamt verursachten Ströme von Kohlenstoff Werte erreicht, die für das natürliche System Kohlenstoff bedeutsam sind (siehe Abbildung 2).

Die Entdeckung des Feuers erlaubte es dem Menschen, chemisch gebundene Energie durch Verbrennung in thermische Energie („Wärme“) umzuwandeln. Bestimmte in der Natur vorkommende organische Stoffe konnten nach Zündung zur Oxidationsreaktion mit Luft-Sauerstoff gebracht und die entstehende Wärme z.B. zur Garung von Nahrungsmitteln oder zur Bearbeitung von Metallen genutzt werden. Nach der technischen Erschließung des fossilen Rohstoffes Kohle (und später Erdöl, Erdgas) sollte dieser Vorgang zu einer wesentlichen Grundlage für die Industrialisierung werden und bis heute die zivilisatorische Energieversorgung dominieren. Entsprechend wird neben der früher üblichen Bezeichnung Brennstoffe heute zunehmend der Begriff Energieträger verwendet. Der Vorteil, Kohle anstelle von Biomasse als Rohstoff zu nutzen, liegt in der höheren Energiedichte pro Masse oder Volumen sowie in der Möglichkeit, große Mengenströme an einem Ort zur Verfügung stellen zu können (Tagebau, Bergbau).

	biologisch	zivilisatorisch	
		global	D
Nahrung ¹⁾	1 - 2	—	—
H ₂ O	1 - 10	100 ²⁾	200 ²⁾
Atemluft	15	—	—
CO ₂ -Emission	1 ³⁾	11 ⁴⁾	27 ⁴⁾
Erdöl-Verbrauch	—	1,8	4,4
Eisen-Produktion	—	0,4	1,5 ⁵⁾

¹⁾ Kohlenhydrate, Gemüse etc.

²⁾ ohne Landwirtschaft

³⁾ aus Oxidation von Nahrung

⁴⁾ aus fossilen Rohstoffen (Erdöl, Erdgas, Kohle)

⁵⁾ Rohstahl

Tabelle 1: Biologische Stoffströme für einen gesunden erwachsenen Menschen und Mittelwerte für ausgewählte pro Kopf-Ströme global und in Deutschland (als Beispiel für ein Industrieland) (in kg/(Kopf x Tag)), Werte geschätzt auf der Basis verschiedener Quellen.

Während der vergangenen 250 Jahre gab es einen stetigen Anstieg des Verbrauchs an fossilen Rohstoffen. Die resultierenden fossilen CO₂-Emissionen sind entsprechend angestiegen, wie in Abbildung 3 gezeigt (links, als Kohlenstoffstrom). Die Aufteilung auf die verschiedenen Rohstoffe ist bestimmt durch Marktkriterien (Verfügbarkeit, Preis) sowie durch spezielle Randbedingungen nationaler Ökonomien. Gegenüber dem in Abbildung 2 gegebenen Wert für 1995 (6,4 Gt/a) hat sich der CO₂-Strom (als C) erhöht auf über 8 Gt/a im Jahr 2011. Abbildung 3 (rechts) zeigt die Verteilung dieses fossilen CO₂-Stroms auf verschiedene Teilsysteme (Speicher).

Einen weiteren zivilisatorischen Effekt auf das globale Kohlenstoffsystem stellen die Änderungen der Landnutzung dar, die seit Beginn der ersten menschlichen Siedlungen stattgefunden haben. Zwei Beispiele sind in Abbildung 4 gezeigt. Die globalen Waldflächen haben während der letzten zwanzig Jahre abgenommen (links) mit einer Rate von etwa 100 Mio. Hektar pro Jahr, mit entsprechender Freisetzung von Kohlenstoff in die Atmosphäre. Die Anteile von Waldflächen und landwirtschaftlichen Flächen in Deutschland (als Beispiel-Land) zeigen im Zeitraum 650 bis 2000 u.Z. starke Variationen (Abbildung 4, rechts), verursacht durch Änderungen der Bevölkerungszahl und der Produktivität, d.h. durch den Bedarf an landwirtschaftlicher Fläche und der Nutzung von Holz (als Baumaterial oder Energieträger).

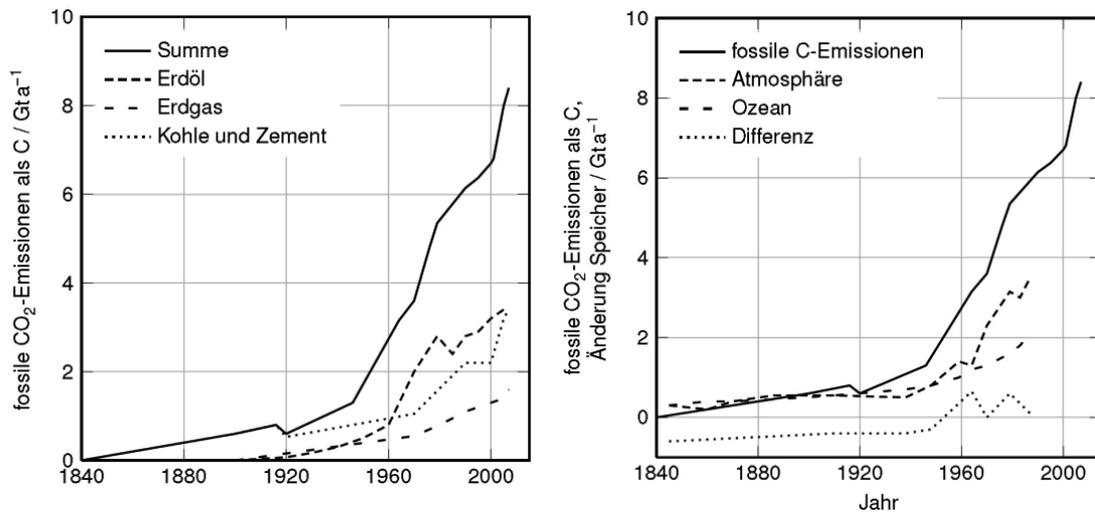


Abbildung 3: Historischer Verlauf der fossilen CO₂-Emissionen global (als Kohlenstoff), Trends und ausgewählte Daten sowie Verbleib in verschiedenen Speichern (Wigley/Schimel 2000, IPCC 2007, Hiller/Kehrer 2000, BP 2011).

Als leicht messbare Größe gibt die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre eine Schlüsselinformation über Veränderungen des globalen Kohlenstoff-Systems. Nach einer langen Periode mit CO₂-Konzentrationen unter 300 ppm (mehrere hunderttausend Jahre) ist die Konzentration seit 250 Jahren auf aktuell etwa 400 ppm angestiegen, parallel zur zivilisatorischen CO₂-Emission der fossilen Rohstoffnutzung.

Der zivilisatorische Einfluss auf den globalen H₂O-Kreislauf erfolgt nicht über die von Menschen verursachten H₂O-Ströme (da die natürlichen Speicher und Ströme im Vergleich dazu sehr groß sind). Eine Beeinflussung geschieht hier indirekt (z.B. über die durch zusätzlichen Treibhauseffekt verursachte Temperaturerhöhung).

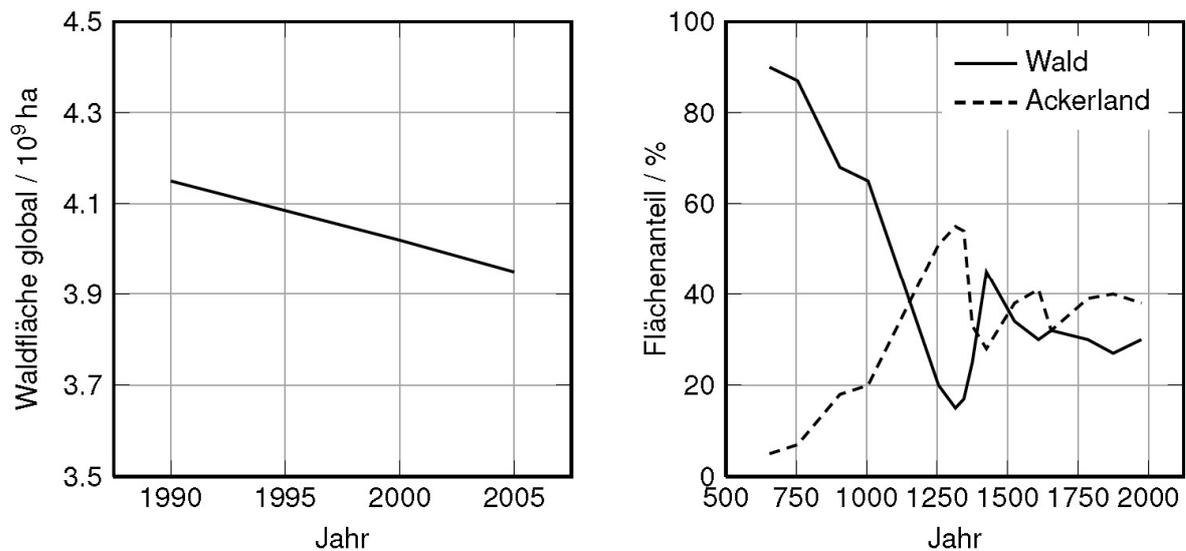


Abbildung 4: Geschätzte Veränderungen der weltweiten Waldflächen 1990 bis 2005 (links, IPCC 2007) und Landnutzung in Deutschland 675 bis 1975 (rechts, nach Schönwiese 2008, Bork 1998).

4. Strategien und zukunftsfähige Techniken

Orientierung

Für die Gegenwart und Zukunft gibt es weltweit großen Entwicklungsbedarf von Ländern mit bisher geringerer Wirtschaftsaktivität. Wenn dazu Potenzial an Rohstoffen und Energie geboten werden soll, können im Hinblick auf die Erhaltung der natürlichen Lebensgrundlagen als globale öffentliche Güter auf der Erde aus dem Verständnis der globalen Stoffkreisläufe folgende Schlussfolgerungen gezogen werden (Schaub/Turek 2011):

- Die globalen Stoffkreisläufe stellen eine wichtige Voraussetzung für die Stabilität der natürlichen Lebensgrundlagen dar (Erhaltung der Photosynthese, Stabilität des Klimas etc., als Grundlage der Nahrungsmittelerzeugung, Erhaltung der biologischen Umwelt).
- Natürliche Flüsse und Kreisläufe von Stoffen (bzw. Energie) müssen verstärkt genutzt werden, d.h. „Einklinken“ in die natürlichen Energieströme der Strahlung sowie in die natürlichen Stoff- und Energieströme von Biomasse-Aufbau (Photosynthese) und -Abbau (Abb. 5), die Entleerung von Speichern mit bleibenden Auswirkungen auf die globale Umwelt (z.B. von fossilen Energierohstoffen im Hinblick auf Kohlenstoff) muss möglichst vermieden werden.
- Für die hoch entwickelten Industrieländer muss eine Kombination angestrebt werden von a) nachhaltigen Techniken bzgl. Rohstoffen und Energieflüssen, und b) Anpassung der Lebens- und Verbrauchskultur an sparsameren Einsatz von Stoffen und Energie („Dematerialisierung“).

Für die Energiebereitstellung sollten menschliche Gesellschaften zukünftig die natürlichen Ströme von solarer Strahlung und Photosynthese zur Biomasse-Erzeugung verstärkt nutzen. Diese Ströme beinhalten ein sehr großes Potenzial, das zurzeit weitgehend ungenutzt dissipiert.

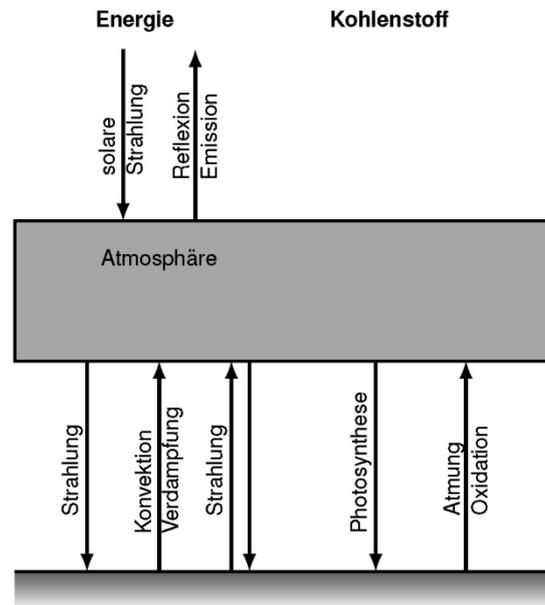


Abbildung 5: Natürliche Ströme von Energie und Kohlenstoff an der Erdoberfläche, als Basis für die zivilisatorische Bereitstellung von Energie („Einklinken in natürliche Kreisläufe“).

Im Hinblick auf diese Orientierung wurde vom wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen – WBGU – das Konzept der „Minderung und Konvergenz“ (der fossilen CO₂-Emissionen) formuliert, das fossile Kohlenstoff-Emissionsrechte pro Kopf entsprechend dem Zeitverlauf in Abbildung 6 vorschlägt (basierend auf einem Szenario für eine Temperaturerhöhung von 2°C bis 2100, WBGU 2003). Entsprechend diesem Konzept, das auch dem Schutz globaler öffentlicher Güter dienen soll, sollten die fossilen CO₂-Emissionsrechte in einem begrenzten Zeitrahmen gegen ähnliche Werte in den Ländern der Erde konvergieren. Heutige Industrieländer müssen die Emissionen dazu deutlich mindern, Länder im Stadium großer wirtschaftlicher Entwicklung können zunächst ihre CO₂-Emissionen erhöhen und später mindern. Der Zeitrahmen sollte stetige und undramatische Änderungen der nationalen und globalen Wirtschaften ermöglichen. Resultierende wirtschaftliche Probleme ärmerer Länder sollten durch die Weltgemeinschaft abgemildert werden.

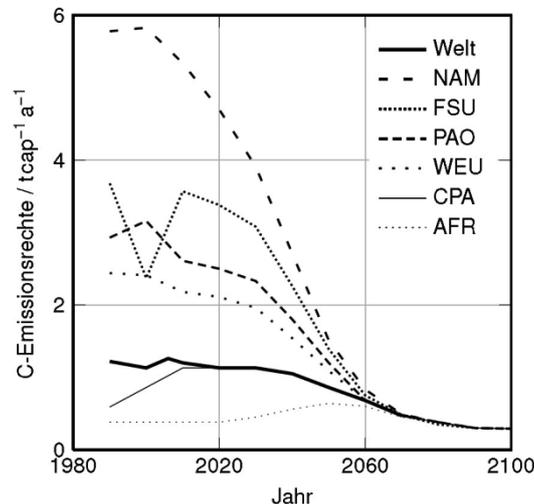


Abbildung 6: Szenarien für die fossilen CO₂-Emissionen pro Kopf und Jahr (Masse als Kohlenstoff) in verschiedenen Regionen der Erde, basierend auf dem vom WBGU vorgeschlagenen Konzept von Minderung und Konvergenz von Emissionsrechten bis 2100, nach Nakicenovic/Riahi (2003), zitiert in WBGU (2003).

NAM: Nordamerika (USA, Kanada), FSU: Länder der früheren Sowjetunion, PAO: Pazifische OECD Länder (Japan, Neuseeland, Australien), WEU: Westeuropa, CPA: Staatsökonomien Asien und China, AFR: Afrika südlich der Sahara.

Beispiele für zukunftsfähige Techniken

Im Hinblick auf eine möglichst weitgehende Erhaltung des globalen Kohlenstoff-Systems sollten folgende Technologie-Optionen für die zukünftige Entwicklung mit Priorität verfolgt werden:

- Bereitstellung von Niedertemperaturwärme auf der Basis von Solarstrahlung (Kollektoren), sowie Nutzung thermischer Umwelt-Energie und kombinierter thermischer Prozesse (Kraft-Wärme-Kopplung), als Ersatz für die Verbrennung,
- Elektrizitätserzeugung basierend auf verschiedenen erneuerbaren Quellen. Diese werden für begrenzte Zeit ergänzt werden um Technologien auf Basis fossiler Rohstoffe, mit höchster Effizienz und gegebenenfalls Kohlenstoff-Sequestrierung,
- Fahrzeuge für die individuelle Mobilität mit höchster Energieeffizienz (z.B. elektrische Antriebe mit Rückgewinnung von Bremsenergie, niedrige Gewichte),
- Flüssige chemische Energieträger aus Biomasse für spezielle Anwendungen, bei denen eine hohe Energiedichte gefordert ist (z.B. Antriebe

von Flugzeugen, Lastkraftwagen, Schiffen), integriert in andere Nutzungen von Biomasse (Nahrungsmittel, Futtermittel, Chemikalien),

- Kombination groß- und klein-skaliger Technologien zur Nutzung von solaren Energieströmen.

Neben der Entwicklung von zukunftsfähigen Verfahren zur Stoff- und Energiewandlung werden heute Methoden des globalen Klima-Engineerings (Geo-Engineering) vorgeschlagen und untersucht. Die technischen Strategien dazu können unterteilt werden in a) Beeinflussung der auf die Erde auftreffenden Sonnenstrahlung (durch stratosphärische Aerosole, Erzeugung von Wolken, reflektiven Oberflächen und Vegetation) oder b) Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre (durch Carbon Capture and Storage – CCS, Aufforstung, Carbonisierung von Biomasse, Düngung und Alkalisierung des Ozeans). Ein Erfolg des globalen Klima-Engineerings ist allerdings angesichts der existierenden Risiken und internationalen Konfliktpotenziale fraglich (Ausnahme: Aufforstung auf der Basis einer globalen Forstpolitik). Deshalb sollte der Entwicklung der oben genannten zukunftsfähigen Technologien und sparsameren Lebens- und Verbrauchskulturen zum Schutz der globalen öffentlichen Güter Vorrang eingeräumt werden.

5. Literatur

- Bolin, B. (1970): The Carbon Cycle. S. 124–132 in Scientific American 223 (1970).
- BP (2011): BP Statistical Review of the World. <http://www.bp.com>. Zitiert April 2012.
- Hiller, K. – Kehrer, P. (2000): Erfahrungskurven bei der Suche nach und Förderung von Erdöl. S. 427–430 in Erdöl, Erdgas, Kohle 116 (2000).
- Hupfer, P. – Kuttler, W. (Hrsg.) (2005): Witterung und Klima. Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie. Stuttgart 2005.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2007): The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Chapter 7 – Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. Cambridge 2007.
- Larcher, W. (2003): Physiological Plant Ecology. Berlin ⁴2003.
- Nakicenovic, N. – Riahi, K. (2003): External Expertise for Graßl et al. (WBGU 2003) – unpublished manuscript.
- Schaub, G. – Turek, T. (2011) Energy Flows, Material Cycles and Global Development – A Process Engineering Approach to the Earth System. Berlin 2011.
- Schlesinger, W.H. (1997): Biogeochemistry: An Analysis of Global Change. San Diego ²1997.
- Schönwiese, C.-D. (2008): Klimatologie. Stuttgart 2008.
- Siegenthaler, U. – Sarmiento, I.L. (1993): Atmospheric carbon dioxide and the ocean. S. 119–125 in Nature 365 (1993).

WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung (2003): Globale Umweltveränderungen. Über Kyoto hinaus denken – Klimaschutzstrategien für das 21. Jahrhundert. Special Report. Graßl, H. – Kokott, J. – Kulessa, M. – Luther, J. – Nuscheler, F. – , R. – Schellnhuber, H.J. – Schubert, R. – Schulze, E.-D. <http://www.wbgu.de>. Zitiert Oktober 2009.

Wigley, T.M.L. – Schimel, D.S. (Hrsg.) (2000): The Carbon Cycle. Cambridge 2000.

Abkürzungen

CH₄ – Methan

CO₂ – Kohlenstoffdioxid

H₂O – Wasser, Wasserdampf, Eis

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

O₃ – Ozon

ppm – parts per million

N₂O – Distickstoffoxid (Lachgas)

u.Z. – unsere Zeitrechnung

v.u.Z. – vor unserer Zeitrechnung