

# Der Einfluss des Menschen auf die biogeochemischen Kreisläufe der Erde

Ernst-Detlef Schulze

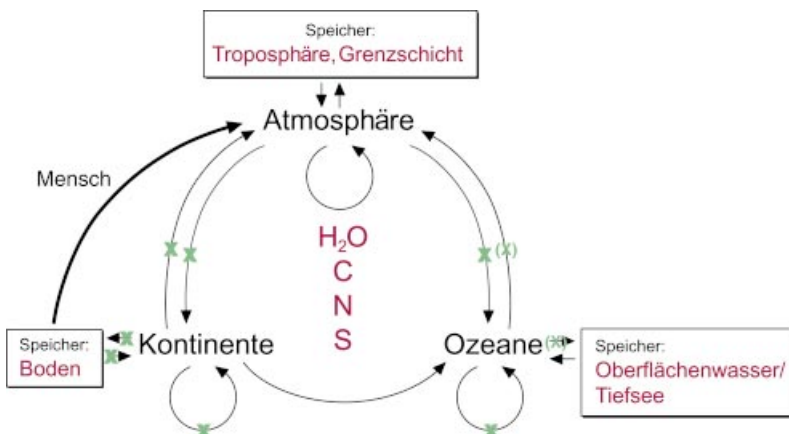
Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Jena

Die Biogeochemie ist eine junge naturwissenschaftliche Disziplin. Sie verknüpft biologische, geowissenschaftliche, physikalisch-chemische und sozioökonomische Wissenschaften miteinander:

- biologisch, weil Organismen die meisten Stoffkreisläufe der Erde steuern;
- geowissenschaftlich, da es sich um globale Prozesse handelt;
- physikalisch-chemisch, da die globalen Massentransporte auf physikalischen Gesetzen beruhen
- sozioökonomisch, weil der Mensch in zunehmendem Maße die Oberfläche der Erde verändert: Er greift durch Landnutzung, den Verbrauch fossiler Brennstoffe und die Produktion von oxidiertem und reduziertem Stickstoff in die Stoffkreisläufe der Erde ein.

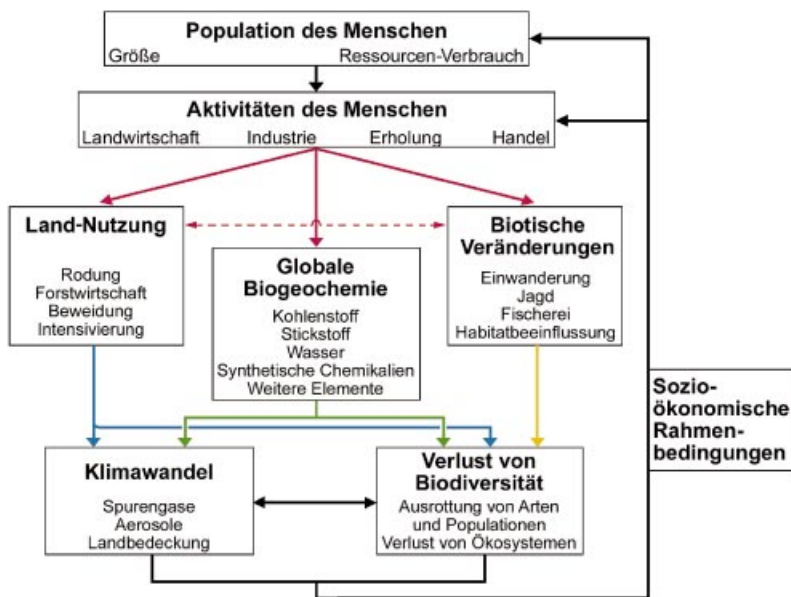
Bei ihren Untersuchungen der Landoberflächen, Atmosphäre und Ozeanen der Erde bestimmt die Biogeochemie vor allem die Größe der Speicher für verschiedene Stoffe und die Steuerung der so genannten Flüsse – das sind die umgesetzten Mengen zwischen den einzelnen Bereichen, den Kompartimenten (Abb. 1). An der Grenzfläche zwischen Atmosphäre und Erdoberfläche und bei den Umsetzungen auf der Erde bestimmen Organismen die Größe der Stoffflüsse. In Zukunft müssen sich daher prozessorientierte, globale Modelle mit der Biologie dieser Umsetzungen näher befassen.

Zunächst gebe ich einen Überblick über einige wichtige Stoffkreisläufe der Erde. Anschließend zeige ich am Beispiel des Kohlenstoff-Kreislaufs, wo der Mensch in diesen Kreislauf eingreift, welche Folgen das hinsichtlich des Klimas und der Biodiversität hat, und wie eine Bewirtschaftung dieses Kreislaufs geplant ist.



**Abb. 1:** Die Biogeochemie untersucht globale Flüsse und Speicher verschiedener Stoffe und Elemente zwischen Landoberflächen, Atmosphäre und Ozeanen. Grün markiert sind Flüsse, die stark oder schwach von der Biosphäre beeinflusst werden. (C = Kohlenstoff, N = Stickstoff, S = Schwefel).

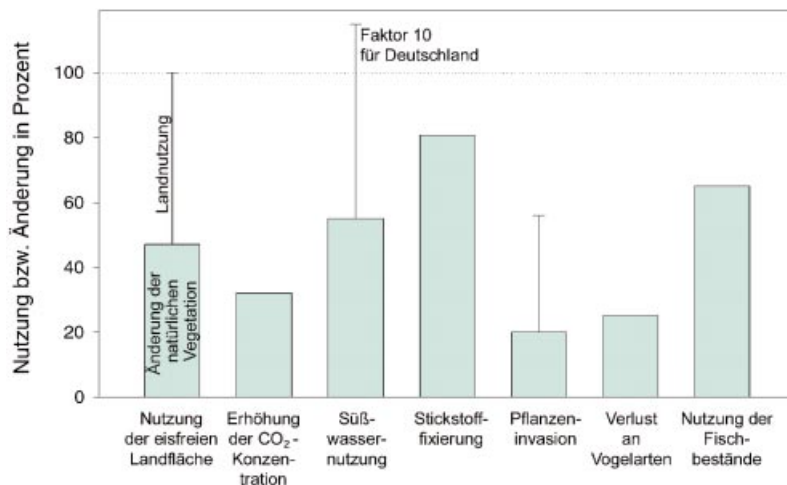
**Abb. 2:** Durch Landwirtschaft, industrielle Produktion, Welthandel und Tourismus greift der Mensch in die globalen Stoffkreisläufe ein (nach Vitousek et al. (1997) Science 277:494).

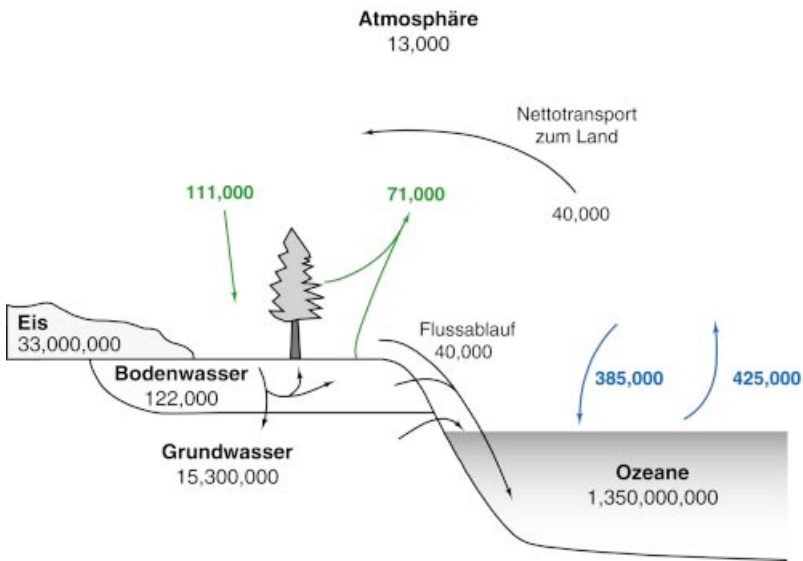


Der Einfluss des Menschen auf die natürlichen Stoffkreisläufe erfolgt über die Bevölkerungszahl und den Ressourcen-Verbrauch (Abb. 2). Diese werden als „Aktivitäten“ in Landwirtschaft, industrieller Produktion, Welthandel und Tourismus deutlich und äußern sich als Landnutzung, Veränderungen der Biologie und der globalen Stoffkreisläufe. Diese Bereiche beeinflussen ihrerseits das globale Klima und die Biodiversität – die beiden Faktoren sollten wiederum rückkoppelnd auf den Menschen wirken. In welcher Art und Weise diese Rückkopplung jedoch aktiv wird, hängt von den sozioökonomischen Rahmenbedingungen der Zukunft ab.

Das Ausmaß der bisherigen Nutzung natürlicher Ressourcen durch den Menschen wurde wiederholt diskutiert (Abb. 3). Es gibt im Augenblick keinen

**Abb. 3:** Ausmaß der Nutzung der natürlichen Ressourcen durch den Menschen (nach Vitousek et al. (1997) Science 277:494).





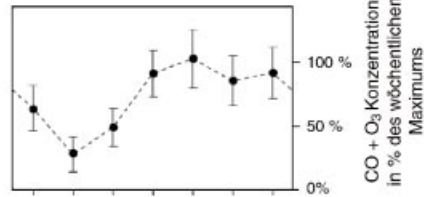
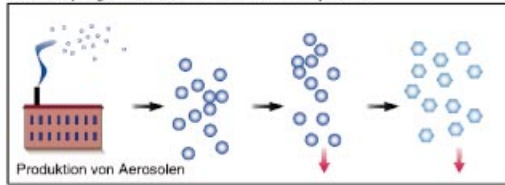
**Abb. 4:** Der globale Wasserkreislauf, Poolgrößen in  $\text{km}^3$ , Flüsse in  $\text{km}^3/\text{Jahr}$ , aus Schlesinger (1997) Biogeochemistry, S. 364.

Fleck der eisfreien Erdoberfläche, der nicht vom Menschen für Nahrungssuche, Holzgewinnung, Handel oder Tourismus genutzt wird. Das hat dazu geführt, dass der Mensch auf etwa 50% der Erdoberfläche die natürliche Vegetation verdrängt hat. Mit dieser vollständigen Landnahme erhöhte sich seit der Industrialisierung die Konzentration an Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) in der Atmosphäre um etwa ein Drittel. Die globalen Süßwasserflüsse werden zu etwa 50% genutzt. Die industrielle Fixierung von Stickstoff ( $\text{N}_2$ ) erreicht zurzeit fast dieselbe Größenordnung wie die natürliche  $\text{N}_2$ -Fixierung. Der Mensch greift somit in alle Bereiche der natürlichen Umwelt ein – und zwar ohne dass die natürlichen Ressourcen bisher bewertet worden wären, geschweige denn einer geplanten Bewirtschaftung unterlägen.

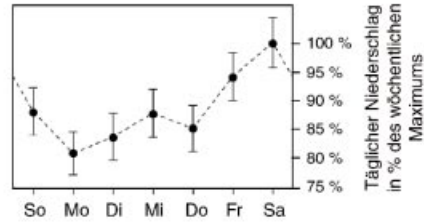
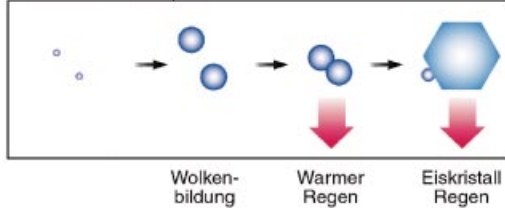
Zunächst erläutere ich das Grundprinzip der Stoffkreisläufe und untersuche anschließend die Aktivitäten des Menschen näher. Ein Beispiel ist der Kreislauf des Wassers (**Abb. 4**): Er ist geprägt durch das riesige Reservoir der Ozeane. Im Vergleich dazu ist die Menge an Wasserdampf in der Atmosphäre winzig und geringer als der Austausch zwischen Ozean und Land. Beachtlich ist jedoch die Zirkulation des Wassers über dem Land. Der Regen, der nahe der Küsten auf die Landoberfläche fällt, verdunstet dort in Abhängigkeit von der Vegetation unterschiedlich stark und bestimmt somit die Regenmengen im Landesinneren. Verstärkte Landnutzung könnte deshalb die kontinentale Zirkulation des Wassers beeinflussen.

Bei den riesigen Mengen an Wasserdampf, die auf natürliche Weise umgesetzt werden, mag es nicht erstaunen, dass der Einfluss des Menschen zunächst vernachlässigbar klein ist. Es gibt aber Hinweise, dass der Mensch in das Wettergeschehen eingreift (**Abb. 5**): Durch die industrielle Produktion von Aerosolen erhöht sich die Zahl der Kondensationskeime. Als Folge verringert sich die Tropfengröße, dies verzögert die Regenbildung. Statistisch kann man das im Wochenverlauf nachweisen. In den östlichen Teilen der USA erreichen die Konzentrationen von Ozon ( $\text{O}_3$ ) und Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ) am Montag ein Minimum und eine Sättigung am Mittwoch. Der Niederschlag wird dadurch verzögert

### Anthropogen beeinflusste Atmosphäre



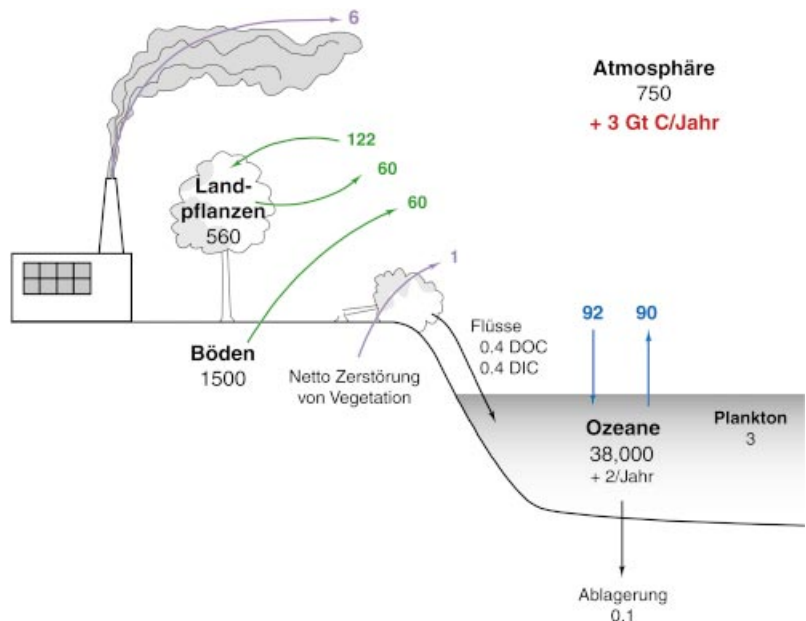
### Natürliche Atmosphäre



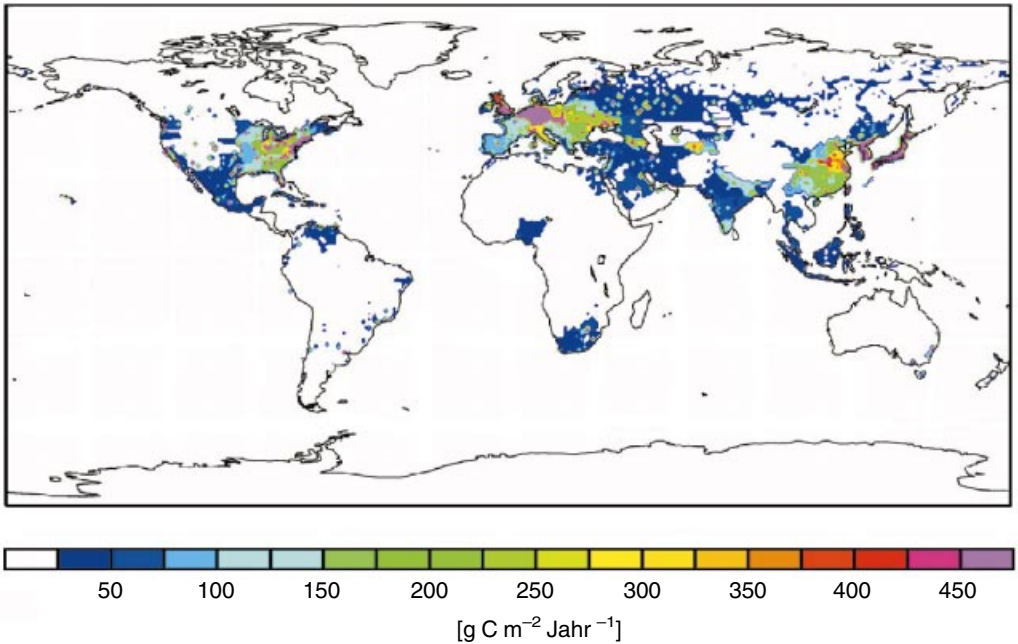
**Abb. 5:** Der Einfluss der Aerosole auf die Tropfenbildung in Wolken (links) und die wöchentlichen Schwankungen des Kohlenmonoxid(CO) und Ozon(O<sub>3</sub>)-Gehalts bzw. der Niederschlagsmenge (rechts). Links aus Toon (1997) Science 287:1763, rechts aus Cerveny et al. (1998) Nature 394:561.

und erreicht statistisch am Sonnabend ein Maximum und am Montag ein Minimum. Wir alle kennen verregnete Wochenenden: Eine Verkürzung der Wochenarbeitszeit auf vier Tage würde die Freizeit in das Regenmaximum rücken. Eine Verlängerung der Wochenarbeitszeit auf sechs Tage hingegen brächte eine um 20% höhere Wahrscheinlichkeit, dass am Sonntag die Sonne scheint.

Auch beim Kreislauf des Kohlenstoffs (C) ist der Ozean das größte Reservoir (**Abb. 6**). Die Menge in der Atmosphäre entspricht etwa den in der Biomasse von Pflanzen gespeicherten Kohlenstoffmengen. Die Böden sind das zweitgrößte Reservoir für Kohlenstoff. Betrachten wir die Umsätze, so ist der C-Kreislauf durch sehr große Aufnahme- und Abgabeprozesse gekennzeichnet, die unter natürlichen Bedingungen fast ausgeglichen sind. Der Verbrauch fossi-



**Abb. 6:** Der globale Kohlenstoff(C)-Kreislauf, gemessen in Giga (= Milliarden) Tonnen, aus Schlesinger (1997) Biogeochemistry, S. 359.



ler Brennstoffe und die Landnutzung produzieren jedoch CO<sub>2</sub>-Mengen, die größer sind als die Differenz dieser Teilflüsse.

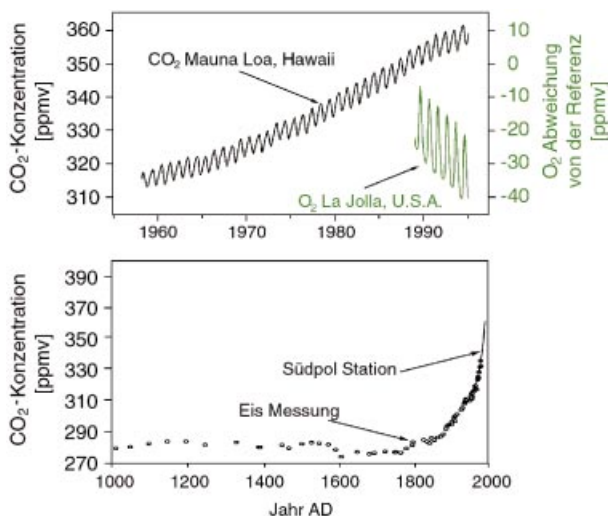
Will man die Emissionen eindämmen, dann ist die Kenntnis der geographischen Verteilung wichtig (Abb. 7). Beim CO<sub>2</sub> konzentrieren sich die Hauptquellen auf den Osten der USA, Mitteleuropa und Ostasien. Der vom Menschen verursachte, anthropogene Beitrag an den Stoffkreisläufen des Kohlenstoffs hat damit seinen Ursprung in einer sehr überschaubaren Zahl der 189 Mitgliedstaaten der Vereinten Nationen.

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration steigt derzeit um 0,5% im Jahr. Um diese Zahl beurteilen zu können, müssen wir den langfristigen Trend kennen und wissen, woher das CO<sub>2</sub> kommt, das wir in der Atmosphäre zusätzlich messen (Abb. 8). Auf dem Mount Mauna Loa in Hawaii wird seit 1959 ein kontinuierlicher Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration registriert. Sie erreicht während der Vegetationsperiode in den Sommermonaten jeweils ein Minimum und während der Vegetationsruhe im Winter die höchsten Werte. Parallel zum CO<sub>2</sub>-Anstieg beobachtet man eine Abnahme in der Sauerstoffkonzentration. Dies ist der Beweis dafür, dass die Zunahme des CO<sub>2</sub> auf Verbrennungsprozessen beruht und nicht etwa auf einer einfachen Ausgasung, z. B. der Ozeane.

Vor allem Beobachtungen über lange Zeiträume hinweg machen die Mauna-Loa-Messungen wertvoll – darauf sind Geowissenschaften und die ökologische Forschung in besonderem Maße angewiesen. Denn experimentelle Eingriffe sind selbst auf Landschaftsebene nicht möglich. Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang, dass die Mauna-Loa-Messungen von einer unabhängigen wissenschaftlichen Institution begonnen und seither fortgesetzt worden sind.

Mit der Untersuchung von Lufteinschlüssen im Eis kann man die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auch während lange zurückliegender Zeiten verfolgen (Abb. 8).

**Abb. 7:** Geographische Verteilung der Kohlendioxid(CO<sub>2</sub>)-Emissionen mit den Hauptquellen im Osten der USA, Mitteleuropa und Ostasien (nach Vitousek et al. (1997) Science 277: 494).



**Abb. 8:** Oben: Anstieg der  $\text{CO}_2$ -Konzentration, gemessen auf dem Berg Mauna Loa/Hawaii und Abnahme der Sauerstoff( $\text{O}_2$ )-Konzentration, registriert in LaJolla/USA. Unten: Kurve der  $\text{CO}_2$ -Konzentration in Luftein-schlüssen in Eis (nach Heimann (1997) *Ambio* 26: 17; WBGU Jahresgutachten 1998).

Der beobachtete Anstieg hat mit der Industrialisierung begonnen. Vor dem Anfang des 19. Jahrhunderts waren die  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen während der vergangenen 1.000 Jahre, ja sogar der letzten 10.000 Jahre, erstaunlich gleich geblieben.

Nachdem die Sauerstoffmessungen gezeigt haben, dass es sich bei der Zunahme der  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Atmosphäre um Verbrennungsprodukte handelt, bleibt offen, wie schnell dieses anthropogene  $\text{CO}_2$  im Stoffkreislauf umgesetzt wird. Martin Heimann, der an unserem Max-Planck-Institut für Biogeochemie arbeitet, hat in Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern in den USA diese Frage eindeutig beantwortet (**Abb. 9**):

Bei der Verbrennung wird Sauerstoff in einem festem Verhältnis zum Kohlenstoff verbraucht. Kennt man den Verbrauch an fossilen Brennstoffen, so kann man den Sauerstoffbedarf und die  $\text{CO}_2$ -Konzentration berechnen, die zu erwarten wäre, wenn alles entstehende  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre verbliebe.

In der Atmosphäre wird jedoch eine deutlich niedrigere  $\text{CO}_2$ -Konzentration beobachtet, als der Verbrauch fossiler Brennstoffe erwarten ließe. Die Differenz entsteht vor allem durch die Photosynthese der Landpflanzen, bei der  $\text{CO}_2$  verbraucht und proportional dazu Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) an die Luft abgegeben wird. Allerdings ist im Wasser die Löslichkeit von  $\text{CO}_2$  größer als von  $\text{O}_2$ . Damit wird an der Oberfläche der Ozeane vor allem  $\text{CO}_2$  umgesetzt, sodass der Einfluss der Kontinente von dem der Ozeane unterscheidbar ist. Zurzeit verbleiben etwa 50% des  $\text{CO}_2$  aus fossilen Brennstoffen in der Atmosphäre, 30% gehen in den Ozean, 20% werden durch Pflanzen assimiliert.

Wegen der spezifischen Absorptionseigenschaften dieses Gases ist die Erhöhung der  $\text{CO}_2$ -Konzentration klimawirksam. Bekannt ist dies als Glashausseneffekt, denn Glas ist für kurzwelliges Licht durchlässig, für Wärmestrahlung jedoch nicht. Mit ihren Spurengasen verhält sich die Atmosphäre ähnlich wie Glas. Die Einstrahlung der Sonne erfolgt im kurzwelligen, sichtbaren Bereich und wird in der Atmosphäre und an der Erdoberfläche umgesetzt. Hier wird die freigesetzte Energie entsprechend der Temperatur wiederum im langwelligen Bereich abgegeben. Die Absorptionseigenschaften von Wasserdampf, der zwischen 8 und 15  $\mu\text{m}$  Wellenlänge nicht absorbiert, beherrschen den Ausstrahlungsbereich. Verschiedene Spurengase wie  $\text{CO}_2$ , Methan,  $\text{N}_2\text{O}$  und die persistenten Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe zeigen aber gerade in diesem Bereich Absorptionslinien, d. h. die Spurengase verschließen das Ausstrahlungsfenster, und damit steigt die Temperatur im unteren Teil der Atmosphäre. Die Strahlungsbilanz ist aber nicht nur von der Ausstrahlung, sondern auch von der Einstrahlung abhängig, die von den Aerosolen verändert wird – auf dieses Detail möchte ich im Moment nicht eingehen.

Der „Intergovernmental Panel on Climate Change“ (IPCC) hat die Klimawirksamkeit der anthropogenen Emissionen in einem großen wissenschaftlichen Umfeld diskutiert und kam 1996 für verschiedene Szenarien der zu-



künftigen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen zu folgendem Vorhersageergebnis (Abb. 10): Eine kurzfristige Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentration auf etwa 400 ppm (= parts per million) und ein Wiederabsinken auf 350 ppm würde die globale Temperatur um etwa 0,5 Grad Celsius gegenüber den vergangenen 1.000 Jahren erhöhen. Ein Grad Celsius Temperaturerhöhung wird als Risikobereich angesehen. Diese Grenze wird bei 450 ppm überschritten. Im Jahr 1998 lagen wir bei etwa 370 ppm und die Temperaturerhöhung von 0,75 Grad Celsius bewegte sich nahe an dieser kritischen Grenze. Wir rechnen zurzeit mit einer Verdopplung bis Verdreifachung der vorindustriellen CO<sub>2</sub>-Konzentration, woraus sich eine Temperaturerhöhung von drei bis vier Grad Celsius errechnen lässt.

Bei derartigen Modellberechnungen gibt es eine Reihe von Unsicherheiten, denn das Klima der Erde wird nicht nur durch die Luftbewegungen in der Atmosphäre, sondern auch von den Meeresströmungen der Ozeane bestimmt. Eine Meeresströmung ist für Europa besonders wichtig: das ozeanische Fließband (engl. „Conveyorbelt“), das die Weltozeane verbindet (Abb. 11). Darin fließt warmes Oberflächenwasser im Atlantik als Golfstrom von Süden nach Norden. Durch Verdunstung und den Zustrom von salzreichem Wasser aus dem Mittelmeer wird dieses Wasser immer salzhaltiger. Es gefriert deshalb nicht, wenn es auf das arktische Kaltwasser vor Grönland trifft. Das salzreiche Wasser kühlt lediglich ab, wird schwerer, sinkt in die Tiefe des Nordatlantiks hinab und fließt als kalte, salzhaltige Tiefenströmung wieder zurück.

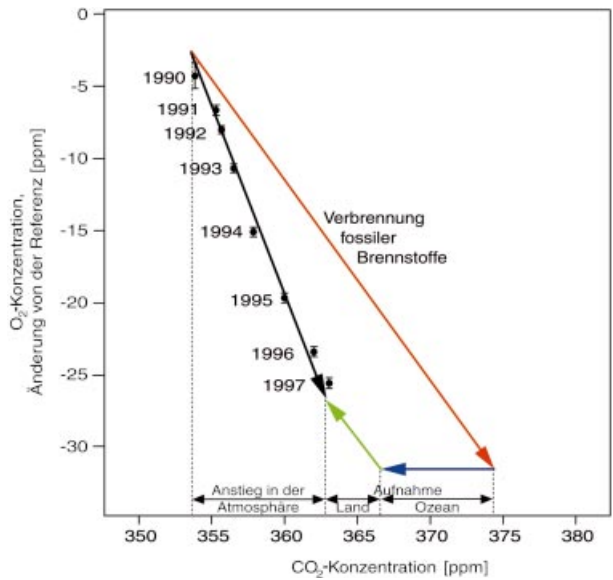


Abb. 9: Die Sauerstoffkonzentration in der Atmosphäre aufgetragen gegen die Konzentration an Kohlendioxid. Anhand der Menge an Kohlendioxid, die aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe freigesetzt worden sein müsste, kann man die Kohlendioxidaufnahme der Landflächen und der Ozeane abschätzen (nach Keeling et al. (1996) Nature 381:218).

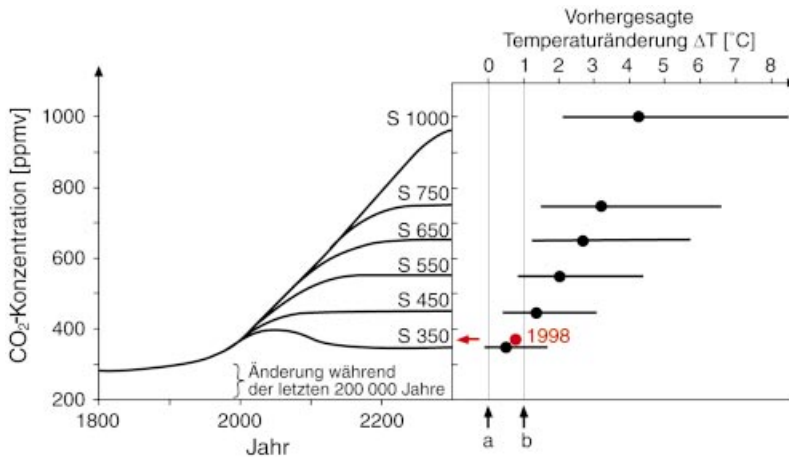
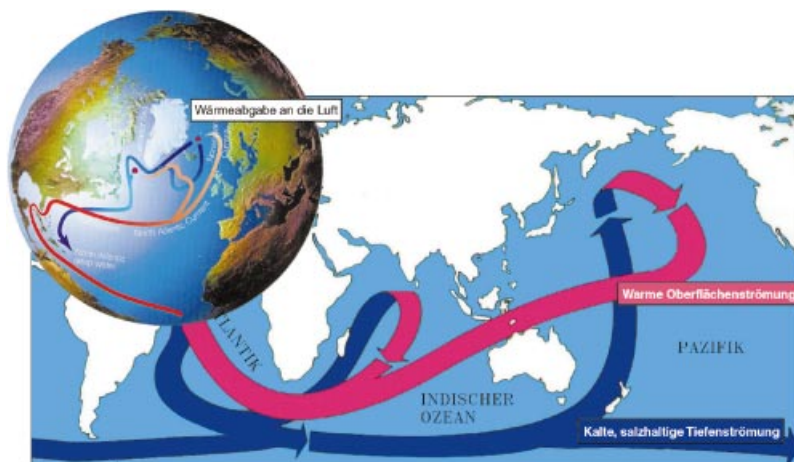


Abb. 10: Szenarien der Veränderung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in den nächsten 300 Jahren und die daraus abgeleiteten Temperaturveränderungen (nach Azar und Rodhe (1997) Science 276: 1818).

**Abb. 11:** Modellartige Darstellung der von Temperatur und Salzgehalt des Wassers bestimmten Meeresströmungen, englisch: „Conveyorbelt“.



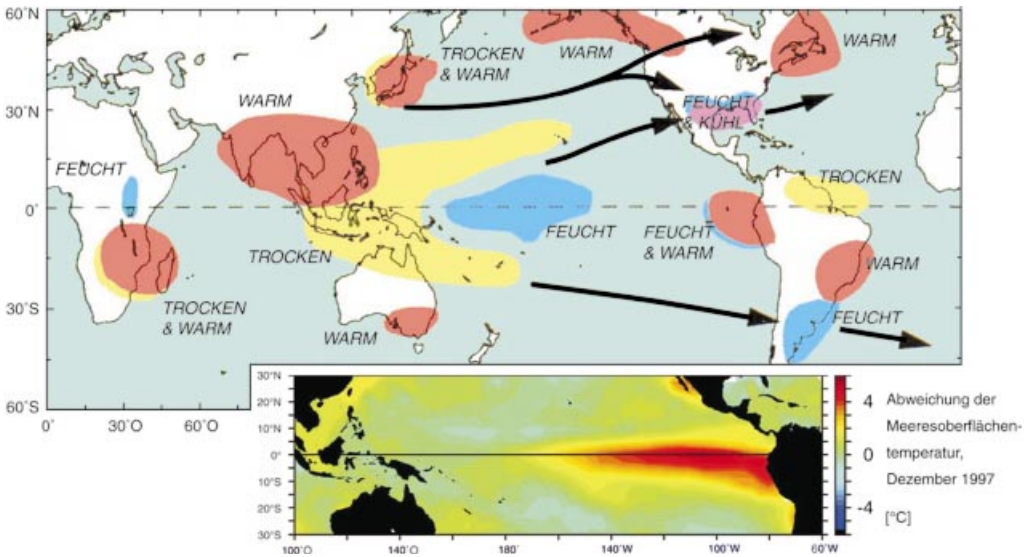
Dieses ozeanische Fließband ist für Europa lebenswichtig: Denn die Wärme, die beim Abkühlen und Absinken der Oberflächenströmung frei wird, sorgt für das milde, gemäßigte Klima in diesem Teil der Welt. Die Tatsache, dass wir Getreide in Skandinavien anbauen, das auf demselben geografischen Breitengrad wie das ewige Eis Grönlands liegt, verdanken wir dieser Meeresströmung.

Dieses ozeanische Fließband reagiert allerdings empfindlich auf den Salzgehalt des Wassers im Nordatlantik. Salzarmes Wasser würde nicht in die Tiefe des Ozeans absinken. Dadurch würde im Nordatlantik weniger Wärme freigesetzt und Europa abkühlen. So einen Fall gab es in der nacheiszeitlichen Klimageschichte, als der große Inlandsee von Nordamerika, der sich vor dem abschmelzenden Eis gebildet hatte, in den Nordatlantik hinaus geflossen ist. Dies hat die jüngere Dryas-Eiszeit in Europa verursacht. Eine Eisschmelze in der Arktis oder eine Abnahme der Wasserführung sibirischer Flüsse könnte einen ähnlichen Effekt haben. Schon ein Nachlassen des Golfstroms könnte Westeuropa abkühlen, enorme, bisher im Meerwasser gespeicherte Mengen an anthropogenem  $\text{CO}_2$  erneut freisetzen und zu deutlich mehr Niederschlägen führen.

Ich muss auf ein weiteres wetterbestimmendes Phänomen hinweisen: die Meeresströmung „El Niño“. Insbesondere Prof. Lennart Bengtsson vom Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg hat diese Erscheinung untersucht. Dabei kommt es periodisch zu einer starken Erwärmung des Oberflächenwassers im Ost-Pazifik. Das führt dazu, dass die regelmäßige Meeresströmung von Osten nach Westen stoppt – mit enormen Auswirkungen auf das Wettergeschehen in solchen Jahren (**Abb. 12**). Es kommt zu katastrophalen Regenfällen in Südamerika, Trockenheit in Australien und einem Teil Indonesiens. Auch die Ernte in Südafrika ist davon betroffen. Neben Veränderungen der Verteilung von Niederschlägen führt die Erwärmung des Pazifiks zu einer Freisetzung großer Mengen an  $\text{CO}_2$  auf den umliegenden Kontinenten. Etwa ein Jahr später spüren wir die Folgen dann in Europa, d. h. auch wir sind von dem, was im Pazifik geschieht, in vielfältiger Weise abhängig.

Wegen dieser komplizierten Wechselwirkungen zwischen Ozean und Atmosphäre und der wetterbestimmenden Unregelmäßigkeiten bei den Meeresströmungen war man für lange Zeit skeptisch, ob die Vorhersage des IPCC zu-

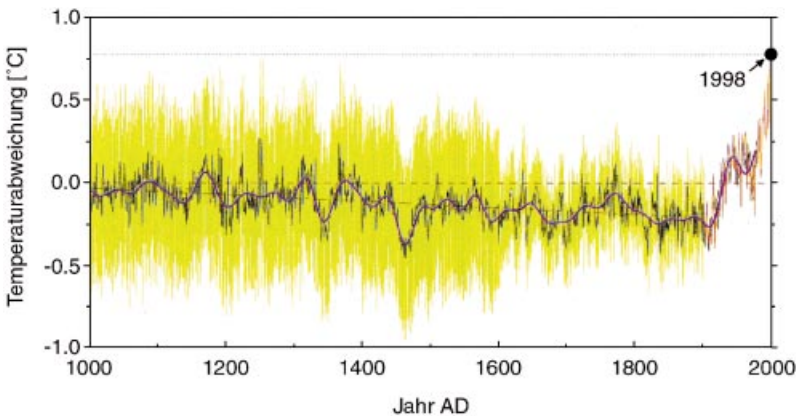




**Abb. 12:** Unten: Die „El Niño“-Meeresströmung, dargestellt anhand der Abweichung der Meeresoberflächentemperatur (aus Mc Phaden (1999) Science Vol. 283: 950). Oben: Die Auswirkungen des „El Niño“, die zahlreiche Gebiete unterschiedliche beeinflussen (aus Bengtsson (1997) Alexander von Humboldt Stiftung, Mitteilungen, Heft 69).

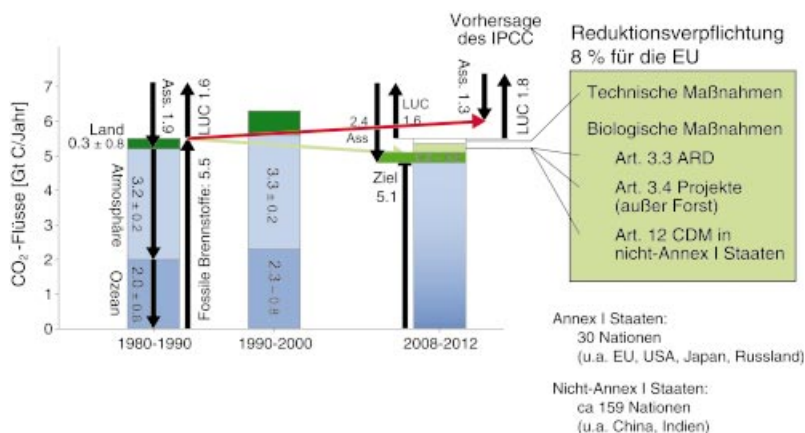
trifft, dass der Mensch in der Lage ist, in das globale Klimageschehen einzugreifen. Nunmehr bestätigt sich aber immer mehr die Vorhersage des IPCC, dass sich das globale Klima durch den Einfluss des Menschen erwärmt (**Abb. 13**). Im Jahr 1998 hat sich die globale Durchschnittstemperatur deutlich vom Trend der vergangenen 1.000 Jahre abgehoben. Die Erhöhung der Temperatur um 0,75 Grad Celsius übertrifft sogar die höchsten Temperaturwerte der zurückliegenden 1.000 Jahre.

Während der letzten 1.000 Jahre haben die durchschnittlichen Temperaturen bis 1900 geringfügig, aber ständig abgenommen. Man fragt sich, ob dieser schwache Trend und die geringen natürlichen Schwankungen vom Menschen überhaupt wahrgenommen worden sind. Es gibt aber eine Reihe historischer Ereignisse, die mit den Temperaturminima übereinstimmen: Im Jahr 1200 begann die letzte große Rodungsperiode in Europa, und in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts fanden nach katastrophalen Missernten die großen Auswan-



**Abb. 13:** Temperaturveränderungen während der letzten 1.000 Jahre, 1998 hat die globale Durchschnittstemperatur den höchsten Wert erreicht (nach Kerr (2000) Science 288: 589). Gezeigt wird die Abweichung von der Jahresmitteltemperatur in der Nordhemisphäre. Dicke schwarze Linie: gleitendes Mittel über 40 Jahre, dünne schwarze Linie: Jahresmittelwert, grün:  $2\sigma$  Schranke der Schätzung.

**Abb. 14:** Kohlendioxid-Bilanzen und Ziel des Kyoto-Protokolls. Das Kyoto-Protokoll sieht die Anrechnung so genannter „biologischer Senken“ vor. Schwarze Pfeile: CO<sub>2</sub>-Flüsse auf dem Land, dem Ozean und in der Atmosphäre. Ass: Netto-Assimilation der Vegetation. LUC: Land use change und damit verbundene Emission. Grüner Pfeil: Zielvorgabe des Kyoto-Protokolls. Weißer Teil der Säule: Reduktion durch technische Maßnahmen. Dunkelgrün: natürliche, nicht durch Menschen induzierte Senken. Hellgrün: anrechenbarer Anteil der Netto-Assimilation. Roter Pfeil: Vorhersage des IPCC-Berichtes über „Land use, Land use change and Forestry“.



derungswellen europäischer Einwohner nach Amerika statt. Der Eruption des Vulkans Krakatau 1883 folgte das Temperatur-Minimum zur Jahrhundertwende. Anscheinend hat der Mensch seinen Aktionskreis immer dann ausgeweitet, wenn die Temperaturen sanken.

Die Aussage des IPCC von 1996, dass es „einen erkennbaren Einfluss des Menschen auf das globale Klima“ gibt, führte im Rahmen der Klimarahmenkonvention zur Verhandlung des so genannten Kyoto-Protokolls (**Abb. 14**). Das Ziel dieses Vertragswerks ist eine rechtlich verbindliche Verpflichtung, die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr 2010 unter das Niveau von 1990 zu senken. Die Europäische Gemeinschaft (EU) versprach eine Reduktion um 8%, Deutschland eine Absenkung von 21% der Emissionen an Treibhausgasen.

Die Verpflichtung zur Minderung der CO<sub>2</sub>-Emission wird von den 30 so genannten Annex-I-Staaten getragen. Dies sind die Industrienationen und die Staaten in der Übergangsphase zur Marktwirtschaft. Die übrigen 159 Nationen der Vereinten Nationen (UN) sind keine derartige Verpflichtung eingegangen.

Um die Reduktionsverpflichtung nicht nur industriell umsetzen zu müssen, wird im Kyoto-Protokoll erstmals angeregt, biologische Senken neu zu schaffen, um dadurch einen Teil der industriellen CO<sub>2</sub>-Emissionen zu kompensieren. Die Überlegung, biologische Prozesse mit in die Berechnung einzubeziehen, beruht darauf, dass die achtprozentige Reduktionsverpflichtung nur einen Bruchteil der natürlichen Umsetzungen ausmachen, und es mit technischen Maßnahmen möglich sein sollte, das Gleichgewicht zwischen Assimilation und Atmung ein wenig zu verschieben. In die Berechnungen einbezogen werden sollen:

1. technische Maßnahmen seit 1990,
2. eine Verstärkung biologischer Senken durch Förderung von Aufforstungen und einer Vermeidung von Rodungen (Art. 3.3) und
3. die Einführung von emissionsmindernden Maßnahmen (Art. 3.4) z. B. in der Landwirtschaft. Eine nachhaltige Forstwirtschaft wird unglücklicherweise nicht angerechnet, denn die waldreichen Annex-I-Staaten (Kanada, Russland) wollen nicht bei der Nutzung der borealen Urwälder – dem nördlichen Nadelwaldgürtel – behindert werden.
4. Projekte zur Erhöhung von Senken in den Entwicklungsländern, der so genannten „Clean Development Mechanism“ (CDM, Art. 12), könnten sowohl technische als auch forstliche Maßnahmen enthalten. Dabei wird aber in

den waldreichen Entwicklungsländern (Brasilien, Indonesien) eine Rodung und Vernichtung von primären Regenwäldern nicht angerechnet, denn diese Länder sind keine Gesamtverpflichtung zur Reduktion eingegangen.

In der Zeit von 1980 bis 1990 trugen die Emissionen von 5,5 Milliarden Tonnen pro Jahr (Gt/Jahr) zum großen Teil zum Anstieg des  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre bei (Abb. 14). Die  $\text{CO}_2$ -Nettoaufnahme der Landflächen war 1990 nur sehr gering. Diese kleine Zahl setzt sich aber aus zwei wesentlich größeren Teilflüssen zusammen: Die  $\text{CO}_2$ -Assimilation des Landes betrug fast 2 Gt/Jahr, das sind 36% der anthropogenen Emissionen. Doch diese Senkenkapazität wird durch Waldrodungen kompensiert, die 1,6 Gt freisetzen. Man könnte daran denken, diese Rodungen wieder aufzuforsten, bzw. die Rodungen zu verhindern; dieser anthropogene Anteil soll vom Jahr 2010 an auf die industriellen Emissionen anrechenbar sein.

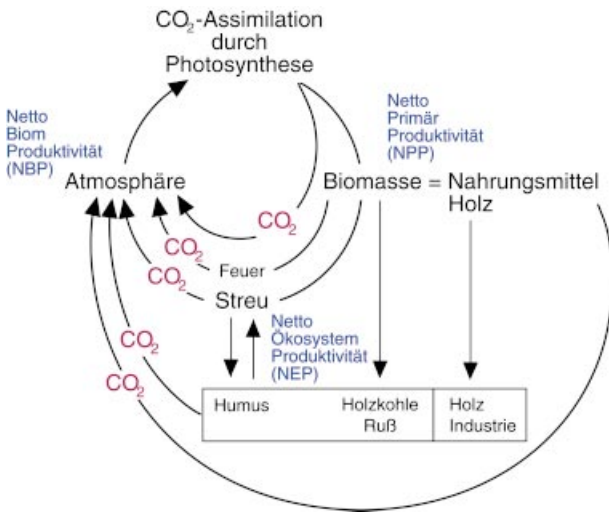
Nun sieht die Realität bereits im Jahre 1999 etwas anders aus: Zum einen haben sich die Gesamtemissionen an  $\text{CO}_2$  im Jahr 2000 bereits auf 6,3 Gt/Jahr erhöht. Erstaunlicherweise verdoppelte sich aber auch die Senkenkapazität der Landflächen. Dies beruht aber nicht auf besonderen Leistungen des Menschen, sondern ist anscheinend eine Folge verringerter Atmung nach dem Ausbruch des Vulkans Mount Pinatubo – was vorübergehend zu einer globalen Abkühlung führte.

Die Prognosen des IPCC sehen für 2010 völlig anders aus als ursprünglich angenommen (Abb. 14). Da die Entwicklungsländer keine Verpflichtungen zum Verringern der  $\text{CO}_2$ -Emissionen eingegangen sind, werden dort verstärkt Wälder abgeholzt, um Flächen für die CDM-Maßnahmen der Industrieländer frei zu machen. Pointiert ausgedrückt, bedeutet dies: Die Wälder Borneos brennen, um Flächen für CDM-Maßnahmen zu schaffen. Da es Jahrhunderte dauert, bis auf abgebrannten Flächen der Wald wieder eine entsprechende Biomasse aufbauen kann, wird im Jahr 2010 die biologische Bilanz in Richtung auf eine  $\text{CO}_2$ -Quelle verschoben sein, d. h. die  $\text{CO}_2$ -Emission vor allem durch Rodung von Primärwald übersteigt die Assimilation um voraussichtlich 0,5 Gt/Jahr.

Ich mache mit Nachdruck darauf aufmerksam, dass die Anrechnung biologischer Senken im Rahmen von CDM-Maßnahmen eine Verwüstung der Primärwälder und höchst unsichere Erfolge bei der Wiederaufforstung nach sich zieht, solange diese Entwicklungsländer keine Reduktionsverpflichtung eingegangen sind. Im November 2000 wird die Konferenz der Mitgliedsstaaten (COP6) klären müssen, ob biologische Senken beim CDM anrechenbar sind.

Deutschland hat sich verpflichtet, die Emissionen gegenüber 1990 um 21% zu senken. In der Tat ging die Emission von Treibhausgasen Deutschlands von 1990 bis 1998 um 13% zurück. Es zeichnet sich aber ab, dass das Reduktionsziel von 21% nicht erreicht werden wird. Würde man beschließen, die fehlenden 8% durch Aufforsten zu kompensieren, müssten noch in diesem Jahr auf 80 Millionen Hektar neue Wälder gepflanzt werden. Das entspricht dem Achtfachen der derzeitigen Waldfläche Deutschlands, d. h. wir müssten zusätzlich in europäischen Nachbarländern mit aufforsten, um unser Defizit zu kompensieren. Eine andere Möglichkeit wäre, eine nachhaltige Forstwirtschaft anrechnungsfähig zu machen.

Die Umsetzung des Kyoto-Protokolls ist vor allem deswegen schwierig, weil es eine Vielzahl von Interpretationsmöglichkeiten offen lässt. Insbesondere ist im Kyoto-Protokoll ungeklärt geblieben, was eigentlich eine Kohlen-



**Abb. 15:** Kohlenstoff-Kreislauf und Definitionen verschiedener Ebenen der Kohlenstoff-Produktivität.

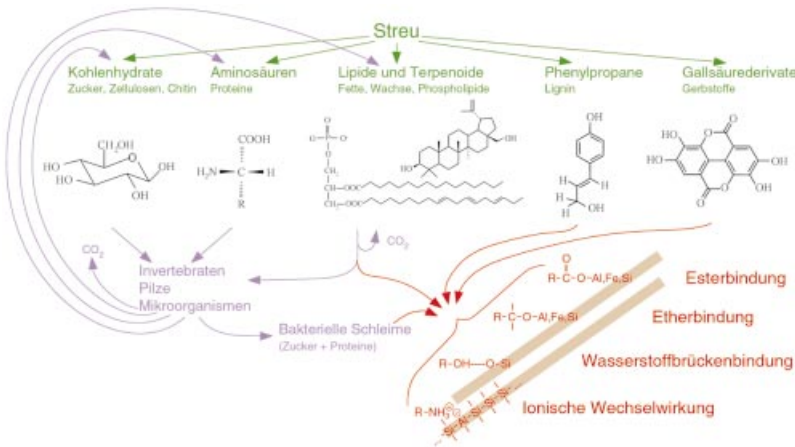
sphärenforscher. Je nachdem, mit welcher Zielvorstellung man die C-Flüsse auf der Erde betrachtet, kommt man zu ganz unterschiedlichen Ergebnissen. Denn die genannten Prozesse laufen nicht synchron ab. Die Biomasseproduktion könnte unter Bedingungen hoch sein, bei denen der Boden viel CO<sub>2</sub> verliert (Humusabbau nach Rodung) und die dann bei der globalen Bilanz nicht als Senke, sondern als Quelle erscheinen.

Für die Forschung bedeutet dies, dass wir die verschiedenen Ebenen der Produktivität vergleichend erfassen müssen, um zu prognostizieren und um zu verifizieren, ob und wie sich verschiedene Speicher ändern. Unser Max-Planck-Institut für Biogeochemie führt solche vergleichenden Messungen durch. Wir betreiben mehrere Messtürme in Sibirien und sammeln dort mit Flugzeugen Luftproben für die Analyse von Spurengasen und deren Isotopen. Sibirien ist für uns ein wichtiges Messfeld: Die Abgasfahne aus Europa reicht bis quer über Sibirien, und das Gelände ist ausreichend homogen. Das erlaubt modellhafte Grundlagen-Untersuchungen. Sie sind notwendig, um Maßnahmen des Menschen künftig beurteilen zu können.

Wenn man an eine langfristige Bewirtschaftung des Kohlenstoff-Kreislaufs denkt, ist neben der Biomasse in alten Bäumen von Urwäldern vor allem der Boden das Kompartiment, in dem eine längerfristige – wir haben 6.000 bis 12.000 Jahre gemessen – Speicherung von Kohlenstoff möglich ist. Zudem ist die in Böden gespeicherte Kohlenstoff-Menge doppelt so groß wie die in der Atmosphäre.

Ein Schwerpunkt der Forschungsarbeiten unseres Instituts beschäftigt sich daher mit der Humus-Chemie. Es ist zu klären, welche chemischen Strukturen in der Natur persistent, also besonders langlebig sind (Abb. 16). Bei der Umsetzung organischer Masse im Boden erfolgt ein fraktionierter Abbau der Pflanzenbiomasse, die aus Kohlenhydraten, Aminosäuren, Lipiden und zyklischen Kohlenwasserstoffen besteht. Kohlenhydrate und Aminosäuren werden sehr rasch in den Bau- und Betriebsstoffwechsel so genannter heterotropher Organismen überführt. Lipide und Terpenoide hingegen werden je nach Struktur deutlich langsamer abgebaut und können durchaus 1.000 Jahre unverändert im Boden bleiben; die Gesamtmenge ist jedoch gering. Phenylpropan als wichtigster Baustein des Lignins wird anscheinend deutlich schneller abge-

stoff-Senke ist. Die Auffassungen darüber gehen weit auseinander (Abb. 15). Zum einen gibt es die Photosynthese als primären Prozess der C-Bindung. Dies wäre die Senke, an die Pflanzenphysiologen denken. Aus den Produkten wird Biomasse gebildet, die vom Menschen entweder als Nahrungsmittel oder Holz verwertet wird. An diese Senke denken die Land- und Forstwirte. Ein Teil der Biomasse gelangt andererseits als Streu auf den Boden und wird dort von Bodenorganismen in Humus umgesetzt. An diese Senke denken die Ökosystemforscher. Nun führen Brand, Ernte und Weiden zu CO<sub>2</sub>-Verlusten, und nur der kleine, verbleibende Rest interessiert die Atmo-



**Abb. 16:** Beim Abbau von Pflanzenbiomasse im Boden zu Humus entstehen unterschiedlich langlebige Substanzen. Rechts unten: Organische Substanzen werden auf verschiedene Arten an Tonminerale gebunden.

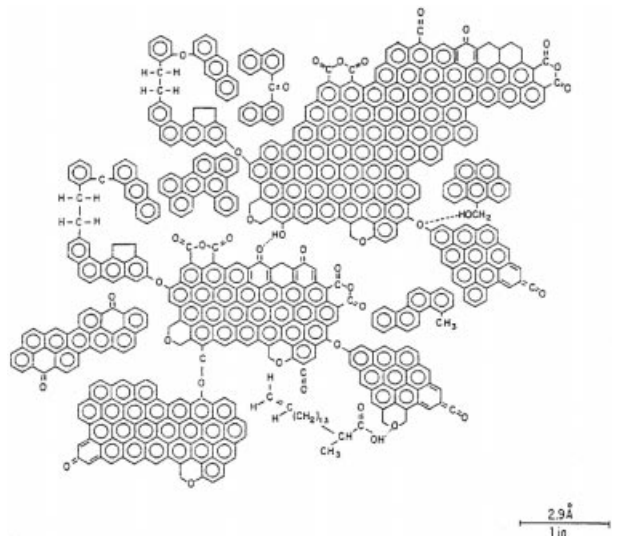
baut als bisher häufig vermutet. Es können aber die Phenolreste zu naphthalenartigen Strukturen kondensieren, die dann extrem stabil sind. Andere heterozyklische, sekundäre Pflanzenstoffe können ebenfalls sehr lange Zeit unverändert bleiben

Die meisten Stoffe werden jedoch als Teil eines Kreislaufs in mikrobielle Biomasse überführt und kehren auf diese Weise wieder in den Pool organischer Grundsubstanzen zurück. Hier gibt es keine Persistenz. Trotzdem existiert ein wichtiger Stabilisierungsmechanismus: die Bindung der organischen Substanz an Tonminerale. Die entstehenden, organisch-anorganischen Komplexe sind die schwer abbaubaren Polymere, die im Boden verharren.

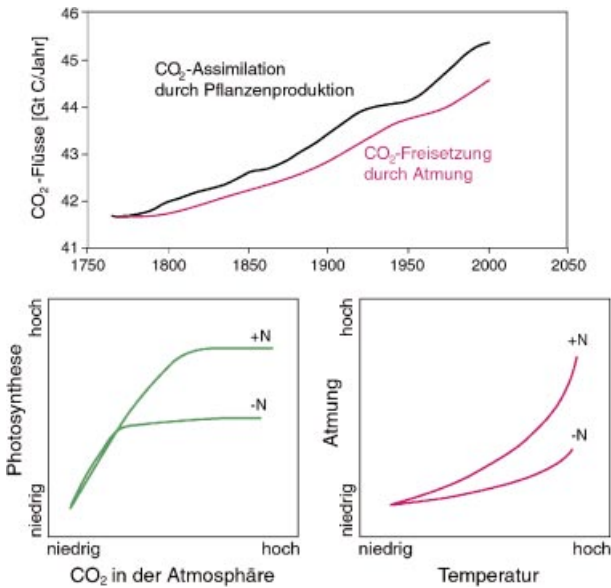
Neben der Humusbildung hat die Bildung von so genanntem schwarzem Kohlenstoff eine besondere Bedeutung für die Immobilisierung des Kohlenstoffs. Vor allem Prof. Paul Crutzen vom Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz hat darauf aufmerksam gemacht (Abb. 17). Durch Feuer entstehen hoch kondensierte Polymere, die kaum eine Angriffsfläche für mikrobiellen Abbau bieten. Der Fluss in dieses dauerhafte Kompartiment ist aber zu gering, um anthropogene Emissionen zu kompensieren. Im Gegenteil – es gibt eine Reihe menschlicher Eingriffe, welche die organische Substanz im Boden wieder mobilisieren. Dazu gehören insbesondere mechanische Störungen durch Bodenbearbeitung ebenso wie eine erhöhte Temperatur und ausreichende Wasserversorgung nach einer Ernte.

Da die Umsetzungen in den verschiedenen Bodenschichten Zeit benötigen und eine große Zahl von Organismen beteiligt ist, eilt die Kohlenstoffassimilation dem Abbau voraus (Abb. 18). Im Augenblick nimmt die pflanzliche Produktion wegen der er-

**Abb. 17:** Chemische Struktur des vor allem durch Feuer entstehenden „schwarzen Kohlenstoffs“, der kaum Angriffsflächen für einen Abbau durch Mikroorganismen bietet (nach Smith und Chughtai (1995) Colloids Surf. A 105:47).







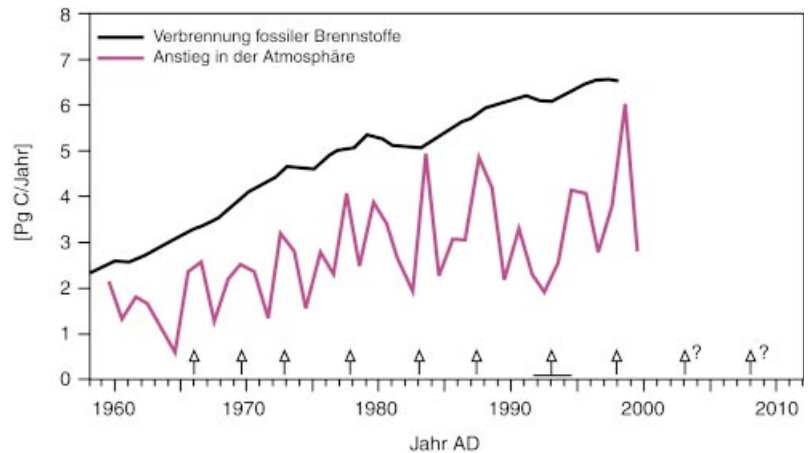
**Abb. 18:** Globale Kohlendioxid-Flüsse durch  $\text{CO}_2$ -Assimilation und  $\text{CO}_2$ -Freisetzung zwischen den Jahren 1750 und 2000 (oben) und Reaktion von Assimilation und Atmung auf Änderungen der  $\text{CO}_2$ -Konzentration und Temperatur in Abhängigkeit von der Stickstoff (N) Versorgung (aus Melillo et al. (1996)).

unserem Max-Planck-Institut zeigt bei seiner Auswertung für den IPCC, dass die Änderung der  $\text{CO}_2$ -Konzentration einer Fieberkurve gleicht. Es gibt Jahre mit einem erheblichen Anstieg beim  $\text{CO}_2$ , dicht gefolgt von Jahren mit geringerer Emission. Die Schwankungen sind offensichtlich durch das Verhältnis von Atmung oder Feuer zu Assimilation bedingt. Herausragend sind Jahre mit hoher Emission bei „El Niño“-Ereignissen. Im Jahr 1998 entsprach die Zunahme der  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Atmosphäre sogar dem Verbrauch an fossilen Brennstoffen, d. h. die Landfläche hat in der Nettobilanz im Jahr 1998 kein  $\text{CO}_2$  aufgenommen.

In Hinblick auf das Kyoto-Protokoll ist das Jahr 1990 interessant, in dem kein „El Niño“ auftrat. 1990 war die Zunahme der  $\text{CO}_2$ -Konzentration gering, die Erde war eine signifikante Senke. Nun treten die „El Niño“-Ereignisse mit

höhten  $\text{CO}_2$ -Konzentration zu. Die Abbauprozesse sind zurzeit gegenüber der Assimilation um etwa 30 Jahren verzögert. Dies könnte sich in Zukunft ändern: Denn die Photosynthese erreicht mit steigender  $\text{CO}_2$ -Konzentration eine Sättigung. Im Gegensatz dazu werden der Stoffabbau und damit die Atmung durch die steigenden Temperaturen weiter gefördert. Das bedeutet: Landflächen, die in Abhängigkeit von der Temperatur heute noch als Senken für  $\text{CO}_2$  wirken, verwandeln sich in Zukunft in eine Quelle. Sie wird durch die Atmung angetrieben, welche die Assimilation übersteigt.

Deutlich wird die Bedeutung der Atmung für die globale  $\text{CO}_2$ -Bilanz, wenn man den Anstieg der  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Atmosphäre betrachtet (**Abb. 19**; 1. Ableitung der Mauna-Loa-Kurve).



**Abb. 19:** Schwankungen beim Anstieg der  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Atmosphäre (Prentice, persönliche Mitteilung).

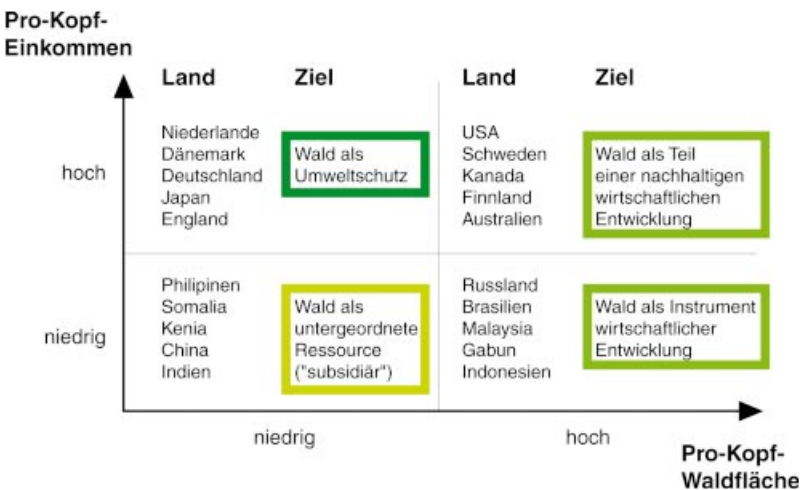


einer gewissen Regelmäßigkeit von vier bis sechs Jahren auf. Das bedeutet, dass wir in der Verpflichtungsperiode mit großer Wahrscheinlichkeit mit einem „El Niño“-Ereignis zu rechnen haben. Das wird den Nachweis einer Auswirkung der Kyoto-Maßnahmen extrem schwierig machen.

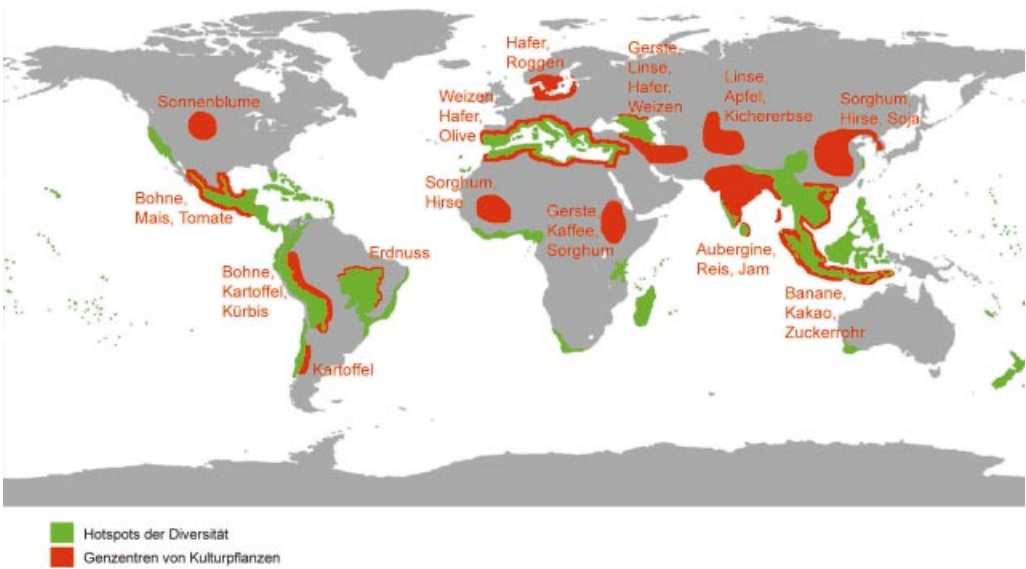
Das Kyoto-Protokoll rechnet bestimmte anthropogene, forstliche Maßnahmen an, unabhängig von Naturereignissen. In einem „El Niño“-Jahr wäre sogar zu erwarten, dass der Zuwachs von Plantagen erhöht ist, da der C-Gehalt des Bodens abnimmt und damit Nährstoffe verfügbar werden. Dies wäre die zu befürchtende Situation, in der anthropogene Maßnahmen eine Senke nachweisen, der Globus aber als Ganzes eine C-Quelle ist.

Im Kyoto-Protokoll geht es offensichtlich um einen Ausgleich von Umweltinteressen (Reduktion von Emissionen) und wirtschaftlichen Interessen (Nutzung von Primärwald und Umwandlung in Plantagen). Es ist daher nötig, die Interessen der beteiligten Länder an diesem Abkommen genauer zu betrachten. Untergliedert man die Länder nach dem Pro-Kopf-Einkommen und der Pro-Kopf-Waldfläche (**Abb. 20**), dann geht es nicht um einen Konflikt zwischen Annex-I- und Nicht-Annex-I-Staaten, sondern um eine Kontroverse zwischen waldreichen und waldarmen Ländern. In Staaten mit hohem Einkommen und großer Waldfläche hat die nachhaltige Entwicklung der Wirtschaft Vorrang – unabhängig vom Atmosphärenschutz. In Ländern mit niedrigem Einkommen und großer Waldfläche wird die Nutzung des Primärwalds direkt für die ökonomische Entwicklung eingesetzt. Waldarme Länder mit geringem Einkommen sind auf Holzimporte aus waldreichen Ländern angewiesen und damit gegen den Schutz des Waldes. Es bleiben Länder mit hohem Einkommen und mäßiger Waldfläche, die fast isoliert für einen Umweltschutz eintreten. Um diese Allianz gegen den Waldschutz aufzubrechen, bedarf es wohl innovativer und politischer Aktionen.

Es gibt einen weiteren Konflikt bei der Bewirtschaftung der Kohlenstoff-Senken. Das Kyoto-Protokoll vermeidet ausdrücklich den Schutz bestehender C-Speicher in den Primärwäldern, sondern bevorzugt das Anlegen von Plantagen mit Pflanzen geringer Biomasse, aber hoher Produktivität auf gerodeten Flächen. Damit ist ein Konflikt zwischen dem Kyoto-Protokoll und der Biodiversitätskonvention programmiert.



**Abb. 20:** Ziele in Bezug auf den Wald, differenziert nach Pro-Kopf-Einkommen und Pro-Kopf-Waldfläche der jeweiligen Länder.

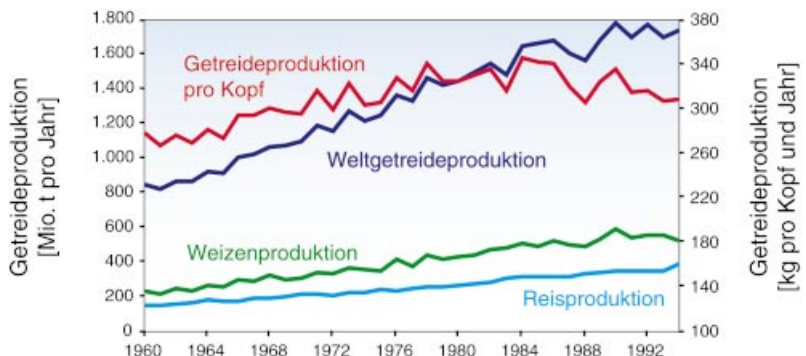


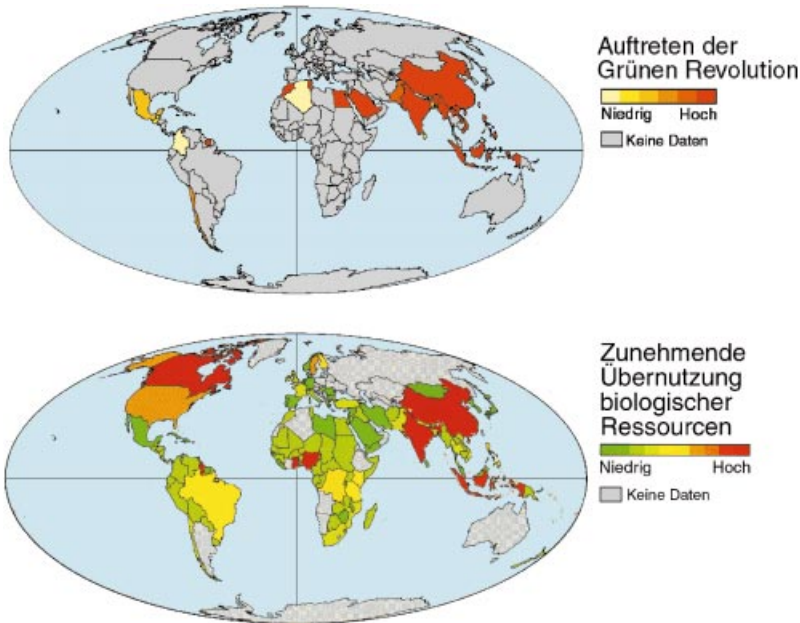
**Abb. 21:** Weltkarte der Biodiversität mit so genannten Hotspots und Zentren der genetischen Diversität unserer Kulturpflanzen (aus Reid et al. (1989) World Resources Institute, Washington DC und Myers et al. (2000) Nature 403:853).

Betrachtet man die Weltkarte der Biodiversität (Abb. 21), dann enthält diese Karte 25 so genannte Hotspots, die oftmals auch Genzentren unserer Kulturpflanzen sind. Ursprünglich erstreckten sich diese Hotspots auf etwa 12% der Erdoberfläche. Einschließlich der Genzentren handelt es sich um etwa 20% der Erdoberfläche. Auf der ursprünglichen Fläche der Hotspots leben aber zurzeit etwa 1,1 Milliarden Menschen, und sie haben durch Landnutzungsänderung diese Fläche inzwischen auf etwa 1,4% der Erdoberfläche zurückgedrängt. Könnte man diese Restflächen schützen, dann würde man im Augenblick noch 44% aller Pflanzenarten und 35% der Vögel, Säuger, Reptilien und Amphibien schützen. Doch das erscheint derzeit aussichtslos.

Die Ursachen für den Rückgang der Arten sind aber weitaus komplexer – damit komme ich zu einem weiteren Konfliktfeld des Kyoto-Protokolls. Trotz aller Anstrengungen sinkt zurzeit die Pro-Kopf-Getreideproduktion (Abb. 22), und mit zunehmender Knappheit an Nahrungsmitteln treten natürlich sowohl für den biologischen Klimaschutz als auch für den Artenschutz Probleme auf.

**Abb. 22:** Die Getreideproduktion pro Kopf der Bevölkerung sinkt zurzeit – mit Folgen für Klima- und Artenschutz (nach WBGU Jahresgutachten 1997, S. 247).





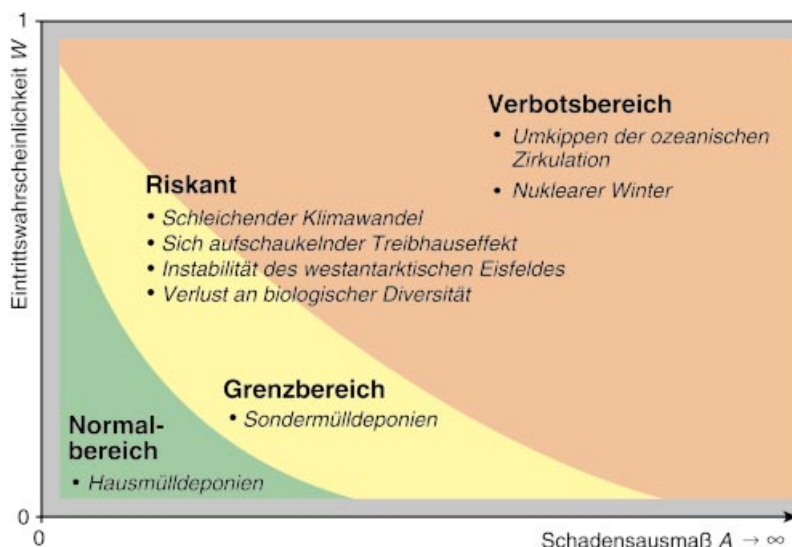
**Abb. 23:** Weltkarten der „Grünen Revolution“ und der zunehmenden Übernutzung biologischer Ressourcen (aus WBGU Jahresgutachten 1999, S. 290).

Der Einrichtung von Kyoto-Plantagen sind durch die notwendige Produktion von Nahrungsmitteln Grenzen gesetzt.

Die Karten der grünen Revolution (**Abb. 23**) und der Übernutzung der biologischen Ressourcen zeigen die eigentliche Entwicklung: Bei der Übernutzung der biologischen Ressourcen handelt es sich in den Tropen vor allem um eine Umwandlung von Primärwald, hingegen handelt es sich in der temperaten und borealen Region um eine Übernutzung der bodenbedingten Gegebenheiten. Hinsichtlich der biogeochemischen Kreisläufe ist die Vernichtung der borealen Primärwälder vor allem in Nordamerika und in Sibirien bedeutsamer als die Umwandlung der tropischen Wälder, denn im borealen Wald ist mehr Kohlenstoff gelagert.

Es ist angemessen, die Änderungen in den Stoffkreisläufen und im Klima einer Risikoanalyse zu unterziehen, zumal der „Wissenschaftliche Beirat Globale Umweltveränderungen“ der deutschen Bundesregierung (WBGU) sich mit Umweltrisiken systematisch auseinandergesetzt hat. Trägt man die Eintrittswahrscheinlichkeit gegen das Schadensausmaß auf (**Abb. 24**), dann existiert ein Bereich normaler Alltagsrisiken, mit denen die Menschheit leben muss, z. B. einer Hausmülldeponie. Es gibt dann einen Grenzbereich, der besondere Aufmerksamkeit verlangt, wohl aber technisch beherrschbar ist, wie Sondermülldeponien. Schließlich existiert ein Verbotsbereich, der unter allen Umständen und ohne Rücksicht auf die Kosten zu vermeiden ist. Dazu gehört die Gefahr eines „Umkippens“ der thermohalinen – also die Temperatur und den Salzgehalt des Meerwassers betreffenden – Zirkulation. An der „Leitplanke“ zu diesem Verbotsbereich gibt es eine Reihe riskanter Unternehmungen. Hier können wir im Augenblick nicht abschätzen, ab welchem Punkt sie technisch nicht mehr beherrschbar sind. Dazu gehören der schleichende Klimawandel, ein sich aufschaukelnder Treibhauseffekt und der Verlust an Biodiversität.

**Abb. 24:** Risikoanalyse von Änderungen der Stoffkreisläufe und Auswirkungen auf das Klima – die Eintrittswahrscheinlichkeit ist dem Schadensausmaß gegenübergestellt (aus WBGU Jahresgutachten 1998, S. 8).



Modellberechnungen der thermohalinen Zirkulation im Nordatlantik zeigen, dass sich der Golfstrom bei weiter gehender, globaler Erwärmung abschwächt. Diese Instabilität liegt im Verbotbereich. Verursacht wäre dies durch die Veränderung der biogeochemischen Kreisläufe aufgrund von Aktivitäten des Menschen auf dem Land.

### Schlussfolgerungen

*Wir stehen am Anfang eines neuen Zeitalters: Der Mensch gestaltet aktiv die globalen Stoffkreisläufe. Das Kyoto-Protokoll ist ein erster Schritt in diese Richtung. Es gibt globale Gemeinschaftsgüter (Atmosphäre, Ozean, Genressourcen), die dringend einer geregelten Bewirtschaftung bedürfen.*

Prof. Rüdiger Wolfrum vom Max-Planck-Institut für ausländisches öffentliches Recht und Völkerrecht, Heidelberg, hatte bereits 1997 bei der Hauptversammlung der Max-Planck-Gesellschaft in Bremen in seinem Öffentlichen Vortrag mit dem Thema „Globale Ressourcen gemeinsam verwalten – Neue Entwicklungen im Umweltvölkerrecht“ auf dieses Problem hingewiesen. Für die Bewirtschaftung dieser globalen Gemeinschaftsgüter benötigen wir in Zukunft vermutlich eine eigene organisatorische Struktur, welche die Interessen des Umweltschutzes zur Abwehr absehbarer Risiken wirkungsvoll gegen wirtschaftliche Interessen vertritt. Die Bewirtschaftung der Stoffkreisläufe der Erde ist offensichtlich mit hohen Risiken verbunden, denn wir wissen nicht, ab wann bestimmte Trends nicht mehr umkehrbar sind. Die Wissenschaft trägt dabei besondere Verantwortung, auf diese Risiken hinzuweisen.

*Der Mensch beeinflusst über die globalen Stoffkreisläufe das Klima, aber sozioökonomische Randbedingungen machen die Vorhersage unsicher.*

Zwei extreme Szenarien mögen dies plakativ verdeutlichen. Nehmen wir an, dass der Klimawandel zu einem Zusammenbruch der Wirtschaftssysteme der

„Dritten Welt“ führt, dann gäbe es eine Rückkopplung in Richtung einer Stabilisierung der CO<sub>2</sub>-Konzentration. Dies wäre aber mit unabsehbaren humanitären Folgen verbunden. Es ist auch denkbar, dass mit der Globalisierung des Welthandels die Industrienationen ihre Reduktionsverpflichtung durch den Export CO<sub>2</sub>-intensiver Industrien in Entwicklungsländer erfüllen. Dies ist unbegrenzt möglich, solange die Entwicklungsländer keine Verpflichtung zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen übernehmen. In diesem Fall würden die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Atmosphäre ungehindert ansteigen, und wir kämen damit tatsächlich in den für Europa kritischen Verbotsbereich. Diese zwei Szenarien zeigen, dass die Qualität der Vorhersagen nur durch eine enge Zusammenarbeit zwischen Natur- und sozioökonomischen Wissenschaften zu verbessern ist.

*Die Gestaltung der biogeochemischen Kreisläufe in der Zukunft erfordert eine Stärkung des Umweltbewusstseins in allen gesellschaftlichen Schichten.*

Ich denke, dass wir technisch in der Lage sind, bei weitaus höheren oder niedrigeren Temperaturen zu arbeiten und zu wohnen. Das Klimarisiko betrifft aber auch den Anbau von Kulturpflanzen. Darüber hinaus greift der Kohlenstoffhaushalt in alle Bereiche des täglichen Lebens ein, und das „neue Zeitalter“ der Gestaltung des C-Haushaltes kann nicht ohne ein tieferes Verständnis für die langfristigen Umweltrisiken in allen Bevölkerungsschichten gelingen. Ein Anfang wäre bei uns eine naturwissenschaftliche und umweltrelevante Ausbildung von Ingenieuren.

Danksagung: Ich danke Frau Barbara Lühker für die Bearbeitung der Abbildungen.

## Literatur

- Azar, C. & Rohde, H. (1997). *Targets for stabilization of atmospheric CO<sub>2</sub>*. Science 276: 1818–1819. – Bengtsson, L. (1997). *Modelling and prediction of the climate system*. Alexander von Humboldt Magazine 69: 3–14. – Cerveny, R. S. & Balling, R. C. (1998). *Weekly cycles of air pollutants, precipitation and tropical cyclones in the coastal NW Atlantic region*. Nature 394: 561–563. – Ciaia, P., Tans, P., Trolier, M., White, J. W. & Francey, R. I. (1995). *A large northern hemisphere terrestrial CO<sub>2</sub> sink indicated by 13C/12C ratio of atmospheric CO<sub>2</sub>*. Science 269: 1089–1102. – Costanza, R., Darge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hanon, B., Limburg, K., Naeem, S., O’neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P. & van den Belt, M. (1997). *The value of the world’s ecosystem services and natural capital*. Nature 387: 253–260. – *Bericht der Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages*, Economica Verlag (1992). – Fan, S., Gloor, M., Pacala, S., Sarmiento, J., Takahashi, T. & Tans, P. (1998). *A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and oceanic carbon dioxide data and models*. Science 282: 442–446. – Gleixner, G., Czimczik, C. J., Kramer, C., Lühker, B., Schmidt, M. W. I. (2000). *Turnover and stability of soil organic matter*. In: Schulze E-D, Holland, Global biogeochemical cycles in the climate system. Academic Press, San Diego (in Press). – Gloor, M., Fan, S. M., Pacala, S., Sarmiento, J. & Ramonet, M. (1999). *A model-ba-*



*sed evaluation of inversions of atmospheric transport, using annual mean mixing ratios, as a tool to monitor fluxes of nonreactive trace substances like CO<sub>2</sub> on a continental scale.* J Geophys. Res 104: 14245–14260. – Heimann, H. (1997). *A review of the contemporary global carbon cycle and as seen a century ago by Arrhenius and Högbom.* Ambio 26: 17–24. – Keeling, R.F., Piper, S.C. & Heimann, M. (1996). *Global and hemispheric CO<sub>2</sub> sinks deduced from changes in atmospheric O<sub>2</sub> concentration.* Nature 381: 218–221. – Kerr, R.A. (2000). *Draft report affirms human influence.* Science 288: 589–590. – Lloyd, J. (1999). *The CO<sub>2</sub> dependence of photosynthesis, plant growth responses to elevated CO<sub>2</sub> concentrations and their interaction with soil nutrient status. II. Temperate and boreal forest productivity and the combined effects of increasing CO<sub>2</sub> concentration and increased nitrogen deposition at a global scale.* Functional Ecology 13: 439–459. – Maini, J.S. (2000). *Boreal forests: Social, economic and environmental considerations.* In: The role of boreal forests and forestry in the global carbon budget. Conference in Edmonton, May 8 to 12, 2000, Abstracts. – McPhaden, M.J. (1999). *Genesis and evolution of the 1997–98 El Niño.* Science 283: 950–954. – Melillo, J.M., Prentice, I.C., Farquhar, G.D., Schulze, E.-D., Sala, O.E. (1996). *Terrestrial biotic responses to environmental change and feedbacks to climate.* In: Climate Change 1995, The Science of Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge 445–482. – Meyers, N., Mittermeier, R.A., Mittermeier, C.G., da Fonseca, G.A.B. & Kent, J. (2000). *Biodiversity hotspots for conservation priorities.* Nature 403: 853–858. – Mitchell, J.F.B. (1989). *The „greenhouse“ effect and climate change.* Review of Geophysics 27: 115–139. – Reid, W.V. and Miller, K.R. (1989). *Keeping options alive: the scientific basis for conserving biodiversity.* World Resources Institute, Washington DC. 128 pp. – Scheffer, F. & Schachtschabel P. (1982). *Lehrbuch der Bodenkunde.* Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart. – Schimel, D., Alves, D., Enting, I., Heimann, M., Joos, F., Raynaud, D., Wigley, T., Prather, M., Derwent, R., Ehhalt, D., Fraser, P., Sanhueza, E., Zhou, X., Jonas, P., Charlson, R., Rohde, H., Sadasivan, S., Shine, K.P., Fouquart, Y., Ramaswamy, V., Solomon, S., Sprinivasan, J., Albritton, D., Derwent, R., Isaksen, I., Lal, M. & Wuebbles, D. (1996). *Radiative forcing of climate change.* In: Climate Change 1995, The Science of Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge 65–132. – Schlesinger, W.H. (1997). *Biogeochemistry; An Analysis of global Change.* Academic Press, San Diego 588 pp. – Schulze, E.-D. & Heimann, M. (1998). *Carbon and water exchange of terrestrial systems.* IGBP Series 3: Cambridge University Press, Cambridge 145–161. – Smith, D.M. & Chughtai, A.R. (1995). *The Surface Structure and Reactivity of Black Carbon.* Colloids Surf. A 105, 47–77. – Toon, O.B. (2000). *How pollution suppresses rain.* Science 287: 1763–1765. – Vitousek, P.M., Mooney, H.A., Lubchenco, J. & Melillo, J.M. (1997). *Human domination of earth`s ecosystems.* Science 277: 494–499. – WBGU (1997). *Welt im Wandel. Wege zu einem nachhaltigen Umgang mit Süßwasser.* Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen. Springer Verlag, Heidelberg 419 pp. – WBGU (1999). *Welt im Wandel, Strategien zur Bewältigung globaler Umweltrisiken.* Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen. Springer Verlag, Heidelberg 383 pp. – WBGU (2000). *Welt im Wandel. Erhaltung und nachhaltige Nutzung der Biosphäre.* Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen. Springer Verlag, Heidelberg 282 pp.