

Forschungsgruppenleiter:

Dr. Mojib Latif
Dr. Bennert Machenhauer

Emeritiertes Wissenschaftliches Mitglied:

Prof. Dr. Hans G. T. Hinzpeter

Fachbeirat:

Prof. Dr. Wallace S. Broecker,
Palisades/USA
Prof. Dr. Alain Chedin,
Palaiseau/Frankreich
Prof. Dr. Josef Egger, München
Prof. Dr. W. Lawrence Gates,
Livermore/USA
Prof. Dr. Brian J. Hoskins, Reading/UK
Prof. Dr. Robert Sadourny,
Paris/Frankreich
Prof. Dr. Gerhard Schmitz,
Kühlungsborn

Kuratorium:

Prof. Dr. Paul J. Crutzen, Mainz
Dr. Udo Gärtner, Offenbach
Prof. Dr. L. Hajen, Hamburg (bis 5/98)
Dr. Eckhard Lübbert, Bonn
Dr. Jürgen Lühje, Hamburg
Dr. J.-B. Mennicken,
Meckenheim (bis 1/99)
Krista Sager, Hamburg (seit 1/99)
Dr. Günter von Sengbusch, Geesthacht

Institutsgeschichte

Gegründet 1975 zur Erforschung der physikalischen Grundlagen des Klimas. Das Institut besteht aus drei Abteilungen. Eine Abteilung (Hasselmann) befaßt sich mit allgemeinen Fragen der Klimadynamik, unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen im System Atmosphäre-Ozean-Eis; die zweite (Graßl) untersucht vorwiegend Prozesse in der Atmosphäre und beim Austausch Ozean-Atmosphäre mit Schwergewicht auf der Fernerkundung mit Satelliten; die dritte (Bengtsson) widmet sich überwiegend der verbesserten Modellierung der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre mit Schwerpunkten bei

der Wechselwirkung Biosphäre-Atmosphäre und der Darstellung von Wolkenprozessen.

Aktueller Forschungsschwerpunkt*Quellen und Senken des atmosphärischen Kohlendioxids*

Einleitung: Das Kohlendioxid (CO₂) ist neben dem Wasserdampf das wichtigste Treibhausgas in der Atmosphäre und beeinflusst damit entscheidend die Oberflächentemperatur der Erde. Aus Analysen an Eiskernen sowie direkten Messungen seit 1958 läßt sich zeigen, daß die atmosphärische CO₂-Konzentration seit Beginn der industriellen Revolution in den letzten 200 Jahren von etwa 280 ppmv (1 ppmv = 1 CO₂-Molekül pro 10⁶ Luftmoleküle) auf heute über 350 ppmv – also um mehr als 25% – zugenommen hat. Diese Zunahme läßt sich eindeutig auf menschliche Aktivitäten zurückführen, insbesondere auf die Verbrennung von Öl, Kohle und Erdgas. Zudem wird CO₂ bei Änderungen der Landnutzung freigesetzt, wie z. B. bei Brandrodungen in den Tropen. Da diese CO₂-Emissionen auch in nächster Zukunft weiter anhalten werden, ist mit einer weiteren Erhöhung der CO₂-Konzentration und einer daraus resultierenden Klimaänderung im nächsten Jahrhundert zu rechnen. Um die zukünftige Entwicklung des atmosphärischen CO₂-Gehalts und die Auswirkungen auf das Klima der Erde genauer abzuschätzen, muß der globale Kohlenstoffkreislauf betrachtet werden. Das Kohlendioxid wird kontinuierlich zwischen der Atmosphäre und den beiden auf Zeitskalen bis zu einigen 100 Jahren wichtigsten Kohlenstoffspeichern der Erde, dem Ozean und der terrestrischen Biosphäre, ausgetauscht. Auf der Landoberfläche geschieht dies durch Pho-

tosynthese der Vegetation, die der Atmosphäre CO₂ entzieht und durch Respiration der Atmosphäre wieder zuführt. Im marinen Bereich diffundiert CO₂ durch die Luft-Wasser-Grenzschicht und wird im Ozean durch chemische, physikalische und biologische Prozesse umgewandelt und in die Tiefe verfrachtet. Diese Austauschvorgänge im globalen Kohlenstoffkreislauf bewirken, daß zur Zeit nur etwa die Hälfte des vom Menschen freigesetzten CO₂ in der Atmosphäre verbleibt und der Rest durch Ozean und Landbiosphäre aufgenommen wird. Es ist jedoch zu erwarten, daß sich in Zukunft vergleichsweise mehr CO₂ in der Atmosphäre akkumulieren wird, da verschiedene der terrestrischen und ozeanischen Kohlenstoffspeicher zunehmend gesättigt werden. Da die Austauschprozesse zudem auch von Umgebungsbedingungen (Temperatur, Feuchte, Einstrahlung, Salzgehalt etc.) abhängen, kann eine durch veränderte Treibhausgaskonzentrationen induzierte Klimaänderung zudem Rückwirkungen auf den globalen Kohlenstoffkreislauf haben und damit den atmosphärischen CO₂-Anstieg verstärken oder auch abschwächen.

Die Klimaforschung, in Deutschland u. a. durch das Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg und das neu gegründete Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena vertreten, versucht, diese Austauschvorgänge im globalen Kohlenstoffkreislauf zu identifizieren und auf regionaler und globaler Skala zu quantifizieren. Basierend auf diesem Prozeßwissen lassen sich dann Modelle des globalen Kohlenstoffkreislaufs entwickeln, mit welchen die atmosphärische CO₂-Konzentration in Abhängigkeit von vorgegebenen anthropogenen Emissionsszenarien berechnet werden kann. Fernziel ist es, die Kohlenstoffmodelle an globale Klimamodelle anzukoppeln, um die Rückkopplungs-

effekte zwischen Klimasystem und Kohlenstoffkreislauf zu untersuchen.

Die Möglichkeit einer durch die zunehmenden Treibhausgaskonzentrationen ausgelösten zukünftigen Klimaänderung hat in den letzten Jahren weltweit zu Anstrengungen geführt, den Ausstoß der wichtigsten Treibhausgase zu begrenzen. Angestoßen von den UN-Klimakonferenzen von Rio und Berlin, wurden auf der dritten Vertragsstaatenkonferenz zur UN-Klimarahmenkonvention (UNFCCC) in Kyoto 1997 verbindliche Reduktionsziele für einzelne Ländergruppen festgelegt („Kyoto-Protokoll“). Auch wenn diese Reduktionsziele aus wissenschaftlicher Sicht noch relativ bescheiden sind (Reduktion von 5–10% der Emissionen im Verpflichtungszeitraum 2008–2012 bezogen auf die Emissionen im Jahre 1990, stellen sie dennoch einen wichtigen Schritt in Richtung einer globalen Klimaschutzpolitik dar. Insbesondere wurde mit dem Vertragswerk ein weltweites Instrumentarium zur Ermittlung der Treibhausgasemissionen geschaffen, das es erlaubt, in einheitlicher Form die nationalen Emissionen zu erfassen. Für die Wissenschaft stellt sich hier die Frage, ob und wie sich die aus nationalen Erhebungen ermittelten Emissionsangaben überprüfen lassen.

Globale Kohlenstoffbilanz. – **Tabelle 1** stellt die globale Bilanz des atmosphärischen CO₂ für den Zeitraum 1980–1989 dar, wie sie im letzten Bericht des „Intergovernmental Panel on Climate Change“ (IPCC) ermittelt wurde. Entsprechend standen den Emissionen aus dem Verbrauch von fossilen Brennstoffen (5,5 GtC a⁻¹ (Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr); 1 GtC = 10¹⁵ g C oder 1 Peta-Gramm C) eine Zunahme in der Atmosphäre von 3,2 GtC a⁻¹ und eine Aufnahme durch den Ozean von ca. 2 GtC a⁻¹ gegenüber. Damit ergibt sich eine Nettoaufnahme der terrestrischen Bio-

sphäre von $0,3 \text{ GtC a}^{-1}$. Berücksichtigt man jedoch zudem die Emissionen aus Änderungen der Landnutzung ($1,6 \text{ GtC a}^{-1}$), die aus Statistiken der Landwirtschaftsflächen und Annahmen über Kohlenstoffgehalt in Vegetation und Böden von natürlichen und landwirtschaftlich genutzten Flächen abgeschätzt werden können, dann sind weitere Senkenprozesse mit einem Beitrag von insgesamt $1,9 \text{ GtC a}^{-1}$ zu suchen (sogenannte „unbekannte Senke“ od. „missing sink“), um die Bilanz der terrestrischen Biosphäre zu schließen. Kontrovers diskutiert werden insbesondere die „Düngung“ der Vegetation durch die Zunahme des atmosphärischen CO_2 oder durch anthropogenen Stickstoffeintrag, aber auch durch in der Vergangenheit stärker bewirtschaftete Wälder, welche heute nachwachsen und damit zusätzlichen Kohlenstoff binden können. Es ist aber auch möglich, daß natürliche Klimaschwankungen (z. B. Änderungen der Ozeanzirkulation, Dürreperioden, Erwärmung in mittleren und hohen Breiten der Nordhemisphäre und damit eine Verlängerung der Vegetationsperiode) Variationen der atmosphärischen CO_2 -Konzentration verursachen können.

Viele Untersuchungen der letzten Jahre zielten darauf ab, die in Tabelle 1 dargestellten Quellen und Senkenprozesse genauer zu lokalisieren

und zu quantifizieren. Einer der wichtigsten Fortschritte in dieser Frage beruht dabei auf neuen, hochpräzisen Messungen des atmosphärischen Sauerstoffgehalts. Bei der Verbrennung von Öl, Kohle und Gas oder von Biomasse wird Sauerstoff in relativ gut bekannten stöchiometrischen Verhältnissen zu CO_2 verbraucht und umgekehrt bei der Photosynthese der Pflanzen erzeugt. Das stöchiometrische Verhältnis bezeichnet hier die Anzahl der Sauerstoffmoleküle die beim Umsatz eines CO_2 -Moleküls freigesetzt oder absorbiert werden. Im Gegensatz zum CO_2 wird jährlich jedoch nur ein geringer Bruchteil des atmosphärischen Sauerstoffs mit dem im Ozean gelösten Sauerstoff ausgetauscht. Die atmosphärische Sauerstoffkonzentration kann daher im Jahresmittel nur durch Oxidationsprozesse im Kohlenstoffkreislauf wesentlich verändert werden. Aus der atmosphärischen Sauerstoffbilanz läßt sich damit direkt der Nettobeitrag der terrestrischen Biosphäre in der globalen CO_2 -Bilanz ermitteln. Die Messungen von amerikanischen Kollegen (Abb. 1) zeigen in der Tat, daß der Sauerstoffgehalt der Atmosphäre abnimmt, gegenläufig zur CO_2 -Zunahme. Gemessen wird dabei nicht die absolute Sauerstoffkonzentration, sondern das Verhältnis von O_2 zu N_2 in Atmosphärenluft mit interferometrischen oder massenspektrometrischen Verfahren. Die Anforderungen an die Meßgenauigkeit sind dabei extrem hoch: Die interessanten Schwankungen liegen im Bereich von weniger als einem ppmv, was bei einem atmosphärischen Sauerstoffgehalt von 21 % eine Sensitivität der Messung von 10^{-6} erfordert. Die quantitative Analyse der vorliegenden Sauerstoffmessungen im Zeitraum 1989–1994 bestätigt die in Tabelle 1 aufgeführte Ozeanaufnahme von ca. 2 GtC a^{-1} .

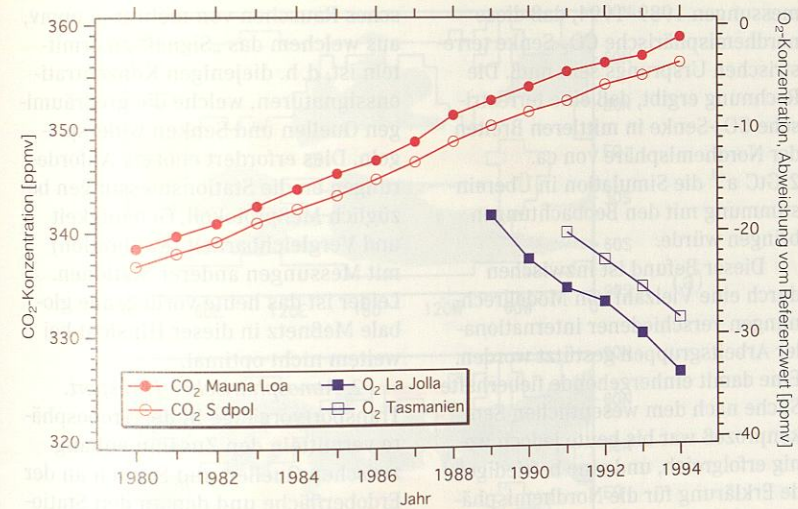


Abb. 1: Jahreszeitlich gemittelter zeitlicher Verlauf der Konzentration von Kohlendioxid und Sauerstoff, beobachtet an Stationen der Nord- (Mauna Loa auf Hawaii, La Jolla in Kalifornien) und Südhemisphäre (Südpol, Tasmanien). Die Sauerstoffkonzentration ist angegeben als Abweichung von einem Referenzwert. Man erkennt das gegenläufige Verhalten von CO_2 und O_2 : Zunahme bzw. Abnahme mit der Zeit und die umgekehrte Nord-Südkonzentrationsdifferenz.

Nord-Süd Gradient. – Weitere wichtige Hinweise auf Quellen und Senken des CO_2 ergeben sich aus der räumlichen Struktur der atmosphärischen CO_2 -Verteilung. Abbildung 1 zeigt, daß die beobachtete CO_2 -Konzentration in der Nordhemisphäre im Jahresmittel etwas höher liegt als in der Südhemisphäre. Der entsprechende Konzentrationsgradient des Sauerstoffs ist dagegen genau umgekehrt, mit höheren Werten in der Südhemisphäre. Dieser meridionale Konzentrationsgradient wird primär erzeugt durch das CO_2 aus fossilen Brennstoffen, welches zu über 90 % in den industrialisierten Ländern der Nordhemisphäre emittiert wird. Mit Hilfe

eines am MPI für Meteorologie in Hamburg entwickelten, dreidimensionalen Modells des atmosphärischen Transportes, das auf den meteorologischen Daten des europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersagen (ECMWF) basiert, läßt sich dieser beobachtete Konzentrationsgradient untersuchen. Dabei zeigt sich der überraschende Befund, daß der beobachtete interhemisphärische Nord-Süd-Gradient von etwa 3 ppmv um etwa 2 ppmv kleiner ist, als in einer Modellsimulation, in der nur die fossilen CO_2 -Emissionen vorgegeben werden. Da das Transportmodell die beobachteten interhemisphärischen Gradienten von anderen gasförmigen Spurenstoffen (FCKW, ^{85}Kr) realistisch berechnet, kann davon ausgegangen werden, daß der großräumige Transport im Modell richtig wiedergegeben wird. Es muß daher in der Nordhemisphäre offenbar neben der fossilen CO_2 -Quelle auch CO_2 -Senkenprozesse geben, welche den interhemisphärischen Konzentrationsgradienten reduzieren. Untersucht man gleichzeitig den Sauerstoffgradienten, so zeigt sich, jedenfalls für den Zeitraum der Sauerstoff-

Tabelle 1: Atmosphärische Kohlenstoffbilanz 1980–89. Einheit: GtC a^{-1} (10^9 Tonnen Kohlenstoff pro Jahr).

(1) Emissionen aus Verbrennung von Öl, Kohle und Gas	$5,5 \pm 0,5$
(2) Beobachtete atmosphärische Zunahme	$3,2 \pm 0,2$
(3) CO_2 -Aufnahme durch den Ozean	$2,0 \pm 0,8$
(4) Nettobilanz der terrestrischen Biosphäre = (1)–((2)+(3))	$0,3 \pm 1,0$
(5) Emissionen verursacht durch Landnutzungsänderungen (u. a. Brandrodungen in den Tropen)	$1,6 \pm 1,0$
(6) CO_2 -Aufnahme durch andere, im Detail noch unbekannt Senken (vermutlich nachwachsende Wälder, CO_2 -Düngungseffekt, Stickstoffdüngung, Klimavariabilität) = (4) + (5)	$1,9 \pm 1,4$

messungen 1989–1994, daß diese nordhemisphärische CO₂-Senke terrestrischen Ursprungs sein muß. Die Rechnung ergibt, daß eine terrestrische CO₂-Senke in mittleren Breiten der Nordhemisphäre von ca. 2 GtC a⁻¹ die Simulation in Übereinstimmung mit den Beobachtungen bringen würde.

Dieser Befund ist inzwischen durch eine Vielzahl von Modellrechnungen verschiedener internationaler Arbeitsgruppen gestützt worden. Eine damit einhergehende fieberhafte Suche nach dem wesentlichen Senkenprozeß war bis heute jedoch wenig erfolgreich, und eine befriedigende Erklärung für die Nordhemisphärensenke steht noch aus.

Inverse Methoden. – Im vorhergehenden Abschnitt wurde dargestellt, wie sich aus der großräumigen atmosphärischen CO₂-Konzentrationsverteilung Hinweise auf Lage und Stärke von Quellen und Senken des CO₂ ableiten lassen. Für die CO₂-Konzentration existiert ein weltweites Beobachtungsnetz mit über 100 Reinluftmeßstationen. Damit stellt sich die Frage, wie sich aus den Stationsmessungen die raumzeitliche Verteilung der CO₂-Quellen und -Senken rekonstruieren läßt. Eine genauere Analyse dieses inversen Problems stößt auf drei fundamentale Schwierigkeiten:

1. **Genauigkeit der CO₂-Konzentrationsmessungen.** Wie bereits gezeigt, beträgt der interhemisphärische Nord-Süd-Gradient im Jahresmittel nur wenige ppmv. Intrahemisphärische, jahreszeitlich gemittelte Konzentrationsgradienten liegen im Bereich von weniger als 1 ppmv. Diese kleinen Differenzen sind relativ zu jahreszeitlichen Schwankungen von 6–20 ppmv in der Nordhemisphäre zu sehen. Zudem erzeugt die stark heterogene Quellen- und Senkenverteilung an der Erdoberfläche je nach Luftmassengeschichte ein synopti-

sches Rauschen von mehreren ppmv, aus welchem das „Signal“ zu ermitteln ist, d. h. diejenigen Konzentrationssignaturen, welche die großräumigen Quellen und Senken widerspiegeln. Dies erfordert enorme Anforderungen an die Stationsmessungen bezüglich Meßprotokoll, Genauigkeit und Vergleichbarkeit (Kalibration) mit Messungen anderer Stationen. Leider ist das heute vorliegende globale Meßnetz in dieser Hinsicht bei weitem nicht optimal.

2. **Atmosphärischer Transport.** Transportvorgänge in der Troposphäre vermitteln den Zusammenhang zwischen Quellen und Senken an der Erdoberfläche und den an den Stationen beobachteten Variationen der CO₂-Konzentration. Dieser Transport muß mit Hilfe von dreidimensionalen Simulationsmodellen berechnet werden. Zwar können die heute vorliegenden Modelle den großskaligen und insbesondere den interhemisphärischen Spurenstofftransport relativ realistisch nachbilden, im Bereich von starken kontinentalen Quellen sind jedoch die meteorologischen Transportvorgänge insbesondere in vertikaler Richtung sehr komplex und in dreidimensionalen, globalen Modellen nur in grober, parametrisierter Form darstellbar. Entsprechend zeigen die verschiedenen vorliegenden Modelle über den Kontinenten ein stark unterschiedliches Verhalten. Leider fehlen geeignete Methoden, um die Simulationsmodelle in dieser Hinsicht zu überprüfen.

3. **Unterbestimmte mathematische Natur des Inversionsproblems.** Auch bei genügend genauen Daten und realistischen Transportmodell zeigt sich, daß die Ermittlung der raumzeitlichen Struktur der CO₂-Quellen und -Senken aus dem globalen Stationsnetz ein hochgradig unterbestimmtes inverses Problem darstellt. Mathematisch gesehen bedeutet dies,

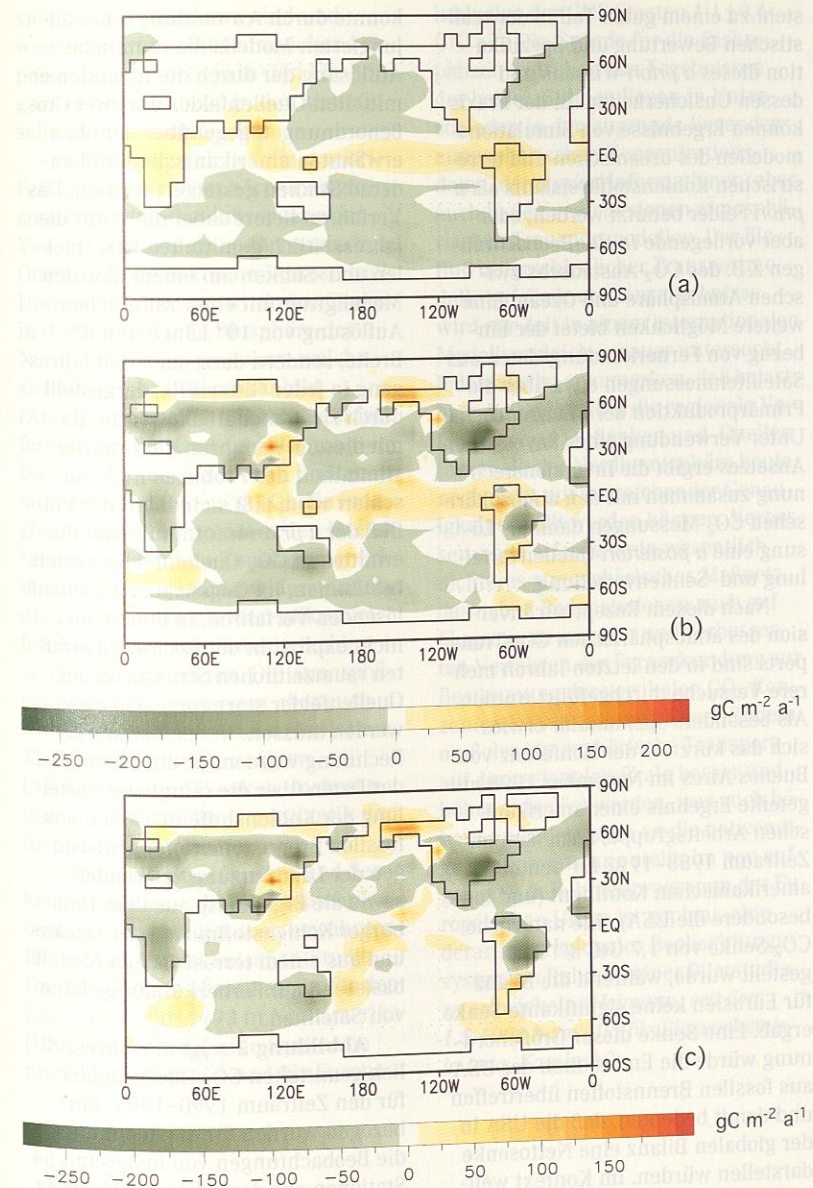


Abb 2: Jahreszeitlich gemittelte Verteilung der nicht-fossilen Kohlendioxidquellen an der Erdoberfläche, berechnet für den Zeitraum 1990–93. **(a)** a priori-Felder, ermittelt aus Prozeßmodellen des Ozeans und der terrestrischen Biosphäre sowie Statistiken von Landnutzungsänderungen. **(b)** a posteriori-Felder, ermittelt durch die Inversion des atmosphärischen Transportes aus atmosphärischen Stationsdaten. **(c)** Differenz a posteriori – a priori.

daß das Problem „regularisiert“ werden muß: Es müssen zusätzliche Anforderungen an die zu ermittelnde Lösung gestellt werden, d. h. Annahmen über die Struktur der Quellen und Senken auf Grund von bereits vorliegendem Wissen müssen gemacht werden. So ist z. B. evident, daß Wü-

sten und polare Eiskappen keine CO₂-Quellen sind, während andererseits die Verteilung und der Jahresgang der Produktivität der Landvegetation einen wichtigen Hinweis auf Lage wie Intensität von terrestrischen CO₂-Senken darstellen. Die Kunst bei der Lösung des inversen Problems be-

steht zu einem guten Teil in der realistischen Bewertung und Spezifikation dieses *a priori*-Wissens und dessen Unsicherheiten. In der Praxis können Ergebnisse von Simulationsmodellen des ozeanischen und terrestrischen Kohlenstoffkreislaufs als *a priori*-Felder benutzt werden; oder aber vorliegende *In-situ*-Beobachtungen z. B. des CO₂-Austauschs zwischen Atmosphäre und Ozean. Eine weitere Möglichkeit bietet der Einbezug von Fernerkundungsdaten aus Satellitenmessungen etwa über die Primärproduktion der Pflanzendecke. Unter Verwendung eines Bayes'schen Ansatzes ergibt die Inversionsrechnung zusammen mit den atmosphärischen CO₂-Messungen dann als Lösung eine *a posteriori*-Quellenverteilung und -Senkenverteilung.

Nach diesem Rezept zur Inversion des atmosphärischen CO₂-Transports sind in den letzten Jahren mehrere Versuche durchgeführt worden. Als besonders spektakulär erwies sich das kurz vor der Konferenz von Buenos Aires im November 1998 mitgeteilte Ergebnis einer amerikanischen Arbeitsgruppe, nach dem im Zeitraum 1988–1992 für den nordamerikanischen Kontinent (und insbesondere die USA) eine natürliche CO₂-Senke von 1,7 GtC a⁻¹ festgestellt wurde, während die Bilanz für Eurasien keine signifikante Senke ergab. Eine Senke dieser Größenordnung würde die Emissionen der USA aus fossilen Brennstoffen übertreffen und damit bedeuten, daß die USA in der globalen Bilanz eine Nettosenke darstellen würden. Im Kontext weltweiter Anstrengungen zu weiteren Emissionsreduktionen hätte ein solcher Befund, falls er durch weitere Untersuchungen bestätigt würde, weitreichende Konsequenzen.

Mit dem am MPI für Meteorologie in Hamburg entwickelten Modell wurden ähnliche Inversionsrechnungen durchgeführt. Als Besonderheit

konnte durch Anwendung eines adjungierten Modells die räumliche Auflösung der durch die Inversion ermittelten Quellenfelder um zwei Größenordnungen gegenüber der oben erwähnten amerikanischen und anderen Studien gesteigert werden. Das Verfahren liefert dabei nicht nur die jahreszeitlich gemittelten CO₂-Quellen und -Senken auf einem globalen Modellgitter mit einer räumlichen Auflösung von 10° Länge und 8° Breite, sondern dazu auch den Jahresgang in jeder Gitterzelle, dargestellt durch zwölf monatliche Werte. Damit dieses Verfahren die Unterbestimmtheit des Problems nicht kaschiert wird, läßt sich damit der Einfluß der *a priori*-Information auf die ermittelten CO₂-Quellenfelder gezielt bestimmen, im Gegensatz zu grob auflösenden Verfahren, in denen die nicht explizit in der Rechnung erfaßten raumzeitlichen Strukturen der Quellenfelder starr vorgeschrieben werden müssen. In der Hamburger Rechnung wurden für die *a priori*-Felder Daten über die räumliche Verteilung der Kohlenstoffemissionen aus fossilen Brennstoffen und Änderungen der Landnutzung verwendet, sowie die Ergebnisse aus dem Hamburger Kohlenstoffmodell des Ozeans und aus einem terrestrischen Modell basierend auf Fernerkundungsdaten von Satelliten.

Abbildung 2 zeigt die jahreszeitlich gemittelten CO₂-Quellenfelder für den Zeitraum 1990–1993. Einbezogen wurden für die Rechnung die Beobachtungen von insgesamt 54 Stationen aus dem globalen Meßnetz. Dargestellt ist (a) die *a priori*-Information über die CO₂-Quellen, welche in die Rechnung einfließt, (b) die aus der Inversionsrechnung ermittelten *a posteriori*-Quellenfelder und (c) die Differenz *a posteriori* - *a priori*. Diese Differenz zeigt insbesondere diejenigen Bereiche, in welchen die *a priori*-Felder nicht konsistent mit den atmo-

sphärischen Meßdaten sind und weist damit auf nicht hinreichend repräsentierte Prozesse in den Eingangsmodellen, bzw. in den statistischen Eingangsdaten hin.

Das Modell, welches die *a priori*-Felder der Landbiosphäre erzeugte, simuliert zwar den Jahresgang der Vegetation, aber keine terrestrischen Quellen oder Senken im Jahresmittel. Durch die Inversion wird eine Senke in die terrestrische Biosphäre der Nordhemisphäre projiziert, welche sich direkt im Differenzbild (Abb. 2 c) abzeichnet. Interessant ist ferner, daß die atmosphärischen Daten in hohen nördlichen Breiten auf dem Lande eine CO₂-Quelle induzieren. Dies könnte die in den letzten Jahren beobachtete Zunahme der arktischen Temperaturen widerspiegeln, die zu einem verstärkten mikrobiellen Abbau des Tundrabodenkohlenstoffs führen könnten. Die atmosphärischen Daten verlangen aber auch Modifikationen der vom ozeanischen Kohlenstoffmodell erzeugten CO₂-Quellen und -Senken, insbesondere im Bereich des Nordatlantik und im südlichen Polarmeer.

Die ermittelten Quellen und Senken aufsummiert über Nordamerika bestätigen nicht den oben erwähnten Befund der amerikanischen Studie. Das Hamburger Modell ergibt für den Zeitraum 1990–1993 in Nordamerika (USA und Kanada) eine Senke von nur 0,8±0,5 GtC a⁻¹ und für Europa

inklusive der GUS-Staaten 1,1±0,6 GtC a⁻¹. Die Gründe für die Diskrepanzen zwischen den Ergebnissen der beiden Studien liegen in Unterschieden in den zugrunde liegenden atmosphärischen Konzentrationsdaten, der *a priori*-Informationen, aber auch in den verschiedenen atmosphärischen Transportmodellen. Der Einfluß unterschiedlicher Transportmodelle auf die Inversionsergebnisse wird zur Zeit in einem internationalen Modellvergleich genauer untersucht. Jedenfalls ist anzumerken, daß belastbare Aussagen über die regionale Verteilung von CO₂-Senken und -Quellen innerhalb der Nordhemisphäre heute noch nicht mit ausreichender Genauigkeit erstellt werden können. Verbesserungen erfordern ein wesentlich dichteres atmosphärisches Meßnetz, das neben Bodenstationen auch auf Flugzeugmessungen und verbesserten Verfahren der Fernerkundung zur Bestimmung der vertikalen CO₂-Konzentrationsverteilung basiert. Zudem muß der atmosphärische Transport auf der regionalen Skala besser und höher aufgelöst werden, was auch höhere Anforderungen an die notwendige Rechnerleistung stellt. Im neu aufgelegten 5. Rahmenprogramm der Europäischen Union ist geplant, ein derartiges regionales Beobachtungssystem im Rahmen einer Pilotstudie zu entwickeln (*Heimann, seit dem 1.5.1998 beim MPI für Biogeochemie in Jena, Kaminski*).