

Förderkennzeichen 01 LA 9808/9

**Entwicklung eines inversen, hochauflösenden globalen  
numerischen Simulationsmodells zur Überprüfung der  
Reduktion nationaler Emissionen von klimarelevanten  
Spurenstoffen**

Martin Heimann, Thomas Kaminski, Sander Houweling

Max-Planck-Institut für Meteorologie, Bundesstr.55, D-20146 Hamburg

Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Carl-Zeiss-Promenade 10, Postfach 100164,  
D-07701 Jena

Projektlaufzeit: 1.7.1998- 31.3.2001

Schlussbericht  
Oktober 2001

# 1 Inhalt

1	Inhalt.....	2
2	Kurzdarstellung.....	3
2.1	Aufgabenstellung.....	3
2.2	Voraussetzungen.....	3
2.3	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	4
2.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand.....	4
2.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	5
3	Erzielte Ergebnisse.....	6
3.1	Zur Methodik.....	6
3.1.1	Allgemeines.....	6
3.1.2	Berechnung der Basisfunktionen mit Hilfe des adjungierten Modells von TM2.....	7
3.1.3	Lösung des Inversionsproblems, Bayes'scher Ansatz.....	8
3.2	Fallstudien.....	8
3.2.1	Ermittlung der globalen raumzeitlichen Quellenstärken des CO <sub>2</sub> .....	8
3.2.2	Ermittlung der globalen raumzeitlichen CH <sub>4</sub> Emissionen .....	13
3.2.3	Ermittlung der globalen raumzeitlichen CO Emissionen.....	13
3.3	Theoretische Untersuchungen zum Inversionsproblem.....	13
3.3.1	Das Problem der <i>a priori</i> Kovarianz der Quellenunsicherheiten .....	13
3.3.2	Verwendung eines prozessorientierten Quellenmodells mit unbekannten Parametern .....	14
3.3.3	Vorteil der hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung.....	15
3.3.4	Atmosphärische Beobachtungsdaten .....	16
3.3.5	TRANSCOM3: Ein Vergleich verschiedener Inversionsmodelle und Verfahren.....	17
4	Ausblick.....	18
5	Im Rahmen des Projektes erstellte Publikationen (Anlagen) .....	19
6	Zitierte Literatur .....	21

## **2 Kurzdarstellung**

### **2.1 Aufgabenstellung**

1. Entwicklung eines inversen, hochauflösenden globalen numerischen Simulationsmodells des atmosphärischen Transportes.
2. Bestimmung von raum-zeitlichen Quellenmuster einiger klimarelevanter Spurengase aus atmosphärischen Konzentrationsmessungen mit Hilfe des inversen Modells (Kohlendioxid, Methan, Kohlenmonoxid).
3. Theoretische Untersuchungen zum Inversionsproblem in Hinblick auf den Einsatz des Modells zur Bestimmung und Überprüfung nationaler Reduktionsziele für den Ausstoß von langlebigen, klimarelevanten Spurenstoffen (Kohlendioxid, Methan, Kohlenmonoxid, Distickoxid oder FCKW).

### **2.2 Voraussetzungen**

Unter dem Protokoll von Kyoto und den nachfolgenden Klimakonferenzen sind Reduktionsziele über nationale und supranationale Emissionen klimarelevanter Spurenstoffe (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, FCKW, u.a.) vereinbart worden. Insbesondere die Möglichkeit, natürliche Kohlenstoffsenken in terrestrischen Ökosystemen unter gewissen Voraussetzungen mit den nationalen Emissionsbilanzen von CO<sub>2</sub> zu verrechnen, erfordert von der Wissenschaft die Bereitstellung von Verfahren zur unabhängigen Überprüfung der aus nationalen Statistiken ermittelten „bottom-up“ Emissionswerte.

Ein unabhängiges Verfahren zur quantitativen Bestimmung der raumzeitlichen Emissionsmuster an der Erdoberfläche besteht darin, diese aus präzisen atmosphärischen Konzentrationsmessungen unter Beizug eines Modells des atmosphärischen Transportes mit Hilfe von mathematischen Inversionsmethoden zu ermitteln („top-down“ Ansatz). Zum Zeitpunkt der Antragstellung des Projektes existierten nur wenige Untersuchungen mit dieser Methode. Ein wesentlicher Nachteil dieser Studien war deren sehr grobe räumliche Auflösung der Quellenverteilung (z.B. Enting et al., 1995, Fan et al. 1998). Das Potential dieses Verfahrens war an sich schon länger erkannt; allein die geringe Anzahl der global verteilten Stationen mit genügend genauen Messungen erlaubte nur sehr summarische Inversionsrechnungen (z.B. für das CO<sub>2</sub>: Heimann et al., 1986, Keeling et al., 1989, Tans et al., 1990). Erst in den 1990'er Jahren entwickelte sich der Aufbau der globalen Messnetze in einer Weise, die regionale Inversionsrechnungen in die Möglichkeit rückten.

Ziel des Projektes bestand darin, dieses top-down Verfahren wesentlich zu erweitern:

- (1) durch Verbesserung der Darstellung des atmosphärischen Transportes,
- (2) durch Entwicklung einer hocheffizienten numerischen Ermittlung der für Inversionsrechnungen notwendigen Basisfunktionen und
- (3) durch exemplarische Untersuchungen zur mathematischen Natur des Inversionsproblems.

### 2.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde vom Hamburger Max-Planck-Institut für Meteorologie 1997 beantragt und, durch den Umzug des Hauptantragstellers an das neu gegründete Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena, anschließend in Zusammenarbeit an den beiden Instituten im Zeitraum 1.7.1998-31.3.2001 durchgeführt. Auf dem Projekt wurden 2 Postdoktoranden beschäftigt: Dr. Thomas Kaminski (bis 30.6.2000) und anschließend bis zum Ende des Projekts Dr. Sander Houweling.

Im Rahmen des Projektzeitraums wurden der Reihe nach die folgenden Arbeitsschritte und Untersuchungen durchgeführt:

1. Verbesserung des 3-dimensionalen atmosphärischen Transportmodells TM2/TM3 mit neuen aufbereiteten meteorologischen Antriebsdaten.
2. Entwicklung des adjungierten Modells zu TM2 zur effizienten Berechnung der Basisfunktionen.
3. Berechnung der Basisfunktionen für eine globale räumliche Auflösung von  $8^{\circ} \times 10^{\circ}$  und  $4^{\circ} \times 5^{\circ}$  (geogr. Breite x geogr. Länge) und eine zeitliche Auflösung von 1 Monat.
4. Bereitstellung und Aufbereitung der atmosphärischen Messdaten der Konzentration von  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , und CO von weltweit verteilten Reinluftstationen.
5. Bereitstellung der „*a priori*“ Quellen- und Senkeninformation (Quellstärken und Unsicherheiten) für die verschiedenen Spurenstoffe auf dem globalen Modellraster mit monatlicher Auflösung.
6. Exemplarische Inversionsstudien  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , und CO.
7. Theoretische Untersuchungen zum Inversionsproblem.

### 2.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

1. Transportmodell, meteorologische Antriebsdaten.

Für die Arbeiten konnte auf das am MPI für Meteorologie entwickelte Transportmodell TM2 (Heimann, 1995) und dessen Nachfolger TM3 mit verbessertem Konvektions- und numerischem Schema zurückgegriffen werden. Der modellierte atmosphärische Transport wurde Beizug von neuen meteorologischen Antriebsdaten (Reanalysen) vom Europäischen Zentrum für Mittelfrist-Wettervorhersage (ECMWF) und vom amerikanischen Wetterdienst (NCEP-Reanalysen) für die Jahre 1979-1993 (ECMWF) und 1955-2000 (NCEP) verbessert.

2. Adjungiertes Modell zu TM3.

Zur Entwicklung des adjungierten Modells zu TM3 konnte auf den am Hamburger MPI entwickelte Tangent and Adjoint Model Compiler (TAMC, Giering, 1996) zurückgegriffen werden.

3. Atmosphärische Beobachtungsdaten

Für die atmosphärischen Beobachtungen konnten Messungen der amerikanischen des amerikanischen Climate Monitoring and Diagnostic Laboratory der National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA-CMDL) in Boulder, Colorado, verwendet werden.

4. *A priori* Quelleninformation

Die für die Inversionsrechnungen notwendigen Informationen über die *a priori* Quellen und Senken an der Erdoberfläche wurden aus Emissionsstatistiken und aus Simulationsmodellrechnungen des MPI für Meteorologie (u.a. Ozeanische Austauschflüsse) auf dem Modellgitter bereitgestellt.

Die Simulationsrechnungen wurden auf den Rechenanlagen des Deutschen Klimarechenzentrums (DKRZ) in Hamburg, auf dem Hausrechner des MPI für Biogeochemie in Jena und auf den Rechenanlagen der GWDG in Göttingen durchgeführt.

## **2.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Das Projekt wurde in Zusammenarbeit zwischen den Max-Planck-Instituten für Biogeochemie in Jena und für Meteorologie in Hamburg durchgeführt.

Eine enge thematische Zusammenarbeit ergab sich mit:

Universität Utrecht/NL (IMAU, Prof. J. Lelieveld): Inverse Modellierung des Methans (Houweling et al., 1999).

CSIRO Dep. of Atmospheric Research, Aspendale, Australia (Dr. P. Rayner): Theoretische Untersuchungen zum Inversionsproblem (Kaminski et al., 2001, Rayner et al., 2001).