

# Das Karlsruher Simulationsmodell der mittleren Atmosphäre – Modellbeschreibung und Anwendungen

W. Kouker, T. Reddmann, R. Ruhnke, IMK

## Einführung

Trotz internationaler Anstrengungen zur Begrenzung von Ozon zerstörenden Substanzen muss befürchtet werden, dass sich die Erholung der Ozonschicht in der Stratosphäre wegen der Kopplung an die globale Klimaänderung erheblich verzögern wird. Als eine langfristige Aufgabe des Klimaschutzes muss daher das wesentliche Ziel der angewandten Stratosphärenforschung sein, die in der Stratosphäre ablaufenden Prozesse soweit zu verstehen, dass auch unter geänderten Bedingungen, wie sie der Treibhauseffekt in der Atmosphäre hervorrufen wird, eine zuverlässige Vorhersage des Zustandes der Stratosphäre möglich ist. Wegen der außerordentlichen Komplexität des Systems Atmosphäre kann sich dieser Aufgabe nur im Zusammenspiel von detaillierten Beobachtungen und aufwendigen, möglichst alle relevanten Prozesse beinhaltenden Modellsimulationen genähert werden. Die Ergebnisse solcher Studien müssen dann in parametrisierter Form in aufwendige Klimamodelle integriert werden.

Im IMK steht mit dem Karlsruher Simulationsmodell der Mittleren Atmosphäre (KASIMA) eine solche Modellumgebung zur Verfügung. KASIMA wird für die Interpretation von bei unterschiedlichen Messkampagnen erhaltenen Beobachtungsdaten eingesetzt, wobei im Vordergrund Messungen des IMK stehen, die mittels verschiedener Fernerkundungsmethoden gewonnen wurden (siehe nächste Ausgabe der Nachrichten).

## Modellbeschreibung

KASIMA ist ein globales atmosphärisches Modell, dessen Anwendbarkeit sich auf die mittlere Atmosphäre, d.h. die Stratosphäre, Mesosphäre und untere Thermosphäre, zwischen etwa 10 und 100 km begrenzt. Zur Beschreibung troposphärischer Prozesse ( $< 10$  km) fehlt die Behandlung der Feuchte und die damit verbundenen Umsetzungen latenter Wärme, sowie wichtige Parametrisierungen, z.B. der planetarischen Grenzschicht und der Konvektion [1].

Die horizontale Auflösung des Modells beträgt etwa  $3^\circ$ , vertikal 1-5 km. Da horizontale Schall- und Schwerewellen Lösung des meteorologischen Gleichungssystems sind, ist ein Zeitschritt von etwa 10 Minuten erforderlich.

## Die Meteorologie

Die zentrale Komponente von KASIMA ist ein numerischer Löser des meteorologischen Grundgleichungssystems (prognostisches Modell). Das sind Bilanzgleichungen für die Horizontalkomponen-

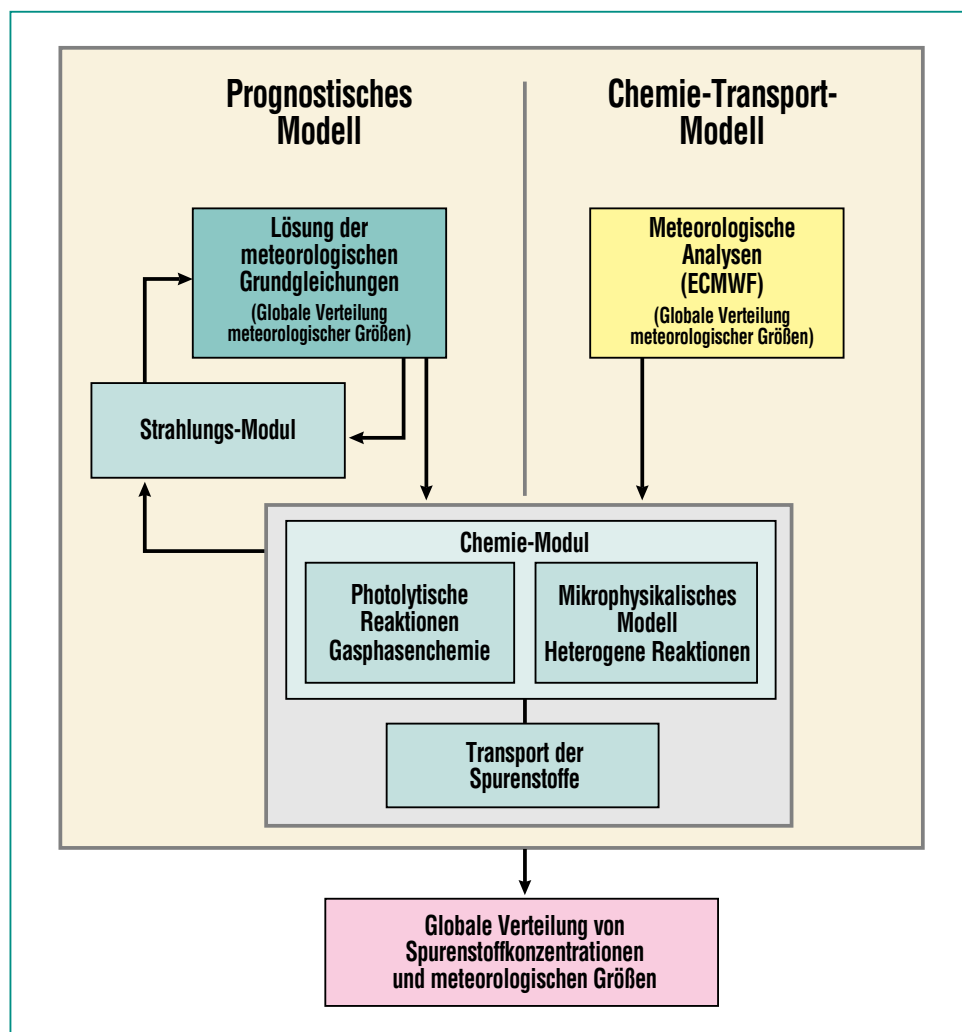


Abb. 1: Schematische Darstellung der in KASIMA enthaltenen Module.

ten des Impulses, der Luftmasse, und Wärme (1. Hauptsatz). Die Vereinfachungen gegenüber dem Navier-Stokeschen Gleichungssystem sind im Wesentlichen die Approximation der Vertikalkomponente der Impulsbilanz durch die Hydrostatik, das ist die Balance von Auftriebs- und Schwerkraft, sowie die Nichtberücksichtigung der molekularen Viskosität.

Die horizontale Abhängigkeit der Modellvariablen wird durch eine endliche Reihe von Koeffizienten der Kugelflächenfunktionen, die assoziierten Légendre Polynome, dargestellt. Die Vertikalordinate ist eine variable Funktion des Luftdruckes. Die nichtlinearen Terme zur Berechnung der Impuls- und Wärmeflüsse werden über die spektrale Transformationsmethode berechnet. Probleme numerischer nichtlinearer Instabilität (Aliasing) durch das Auftreten von Koeffizienten von kleineren räumlichen Skalen werden durch Nichtberücksichtigung verhindert [2].

Das Modell wird angetrieben durch die Nettoerwärmungsrate (siehe Strahlung) sowie durch vorgegebene Randbedingungen. Die untere Randbedingung sind aus Analysen des europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (ECMWF) entnommene Felder für das Geopotential (die Höhe der Druckfläche) zur Integration der hydrostatischen Gleichung, sowie Temperatur und Horizontalwindkomponente für die Vertikalflüsse.

Die Wechselwirkung von kurzwelligen (ca. 100 km Wellenlänge) Schwerewellen, die explizit nicht mehr aufgelöst werden, mit der

großräumigen Strömung werden in parametrisierter Form berücksichtigt.

### Die Strahlung

Der primäre Antrieb atmosphärischer Zirkulation ist die Absorption von Sonnenstrahlung in den Luftschichten und am Erdboden. Da die Erde als Ganzes und im zeitlichen Mittel gesehen im thermischen Gleichgewicht ist, muss die als im wesentlichen durch sichtbares Licht zugeführte Energie wieder in den Weltraum abgegeben werden. Dies kann ebenfalls nur in Form von Strahlung erfolgen, und zwar entsprechend der Temperatur der Atmosphäre bzw. des Erdbodens im infraroten Spektralbereich, also durch Wärmestrahlung.

In der Stratosphäre erfolgt die Absorption ultra-violetten Lichtes (Heizung) durch Elektronenübergänge hauptsächlich am Ozon, in der Mesosphäre am molekularen Sauerstoff. Die Emission (Kühlung) erfolgt im wesentlichen in den Schwingungs- und Rotationsbanden der Moleküle  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$  und  $\text{H}_2\text{O}$ . Der rechnerische Aufwand für den Strahlungstransport in der Atmosphäre ist im allgemeinen so hoch, dass Parametrisierungen für die Berechnung von Heiz- und Kühlraten benutzt werden müssen. Über Ozon (und in geringerem Maße auch über den Wasserdampf) sind der chemische und der dynamische Zustand der Atmosphäre über die Strahlung gekoppelt [3].

### Die Chemie

Die in KASIMA integrierte Chemie berücksichtigt die für die Simula-

tion der Stratosphäre wichtigen chemischen Prozesse. Dazu gehören Reaktionen in der Gasphase und auf flüssigen oder festen Aerosolen sowie die Photodissoziationen (die durch Sonnenlicht induzierte Spaltung) der Spurenstoffe in der Stratosphäre. Neben diesen insgesamt 165 Reaktionen, an denen insgesamt 49 Substanzen teilnehmen, werden auch mikrophysikalische Prozesse in parametrisierter Form berücksichtigt. Diese Parametrisierungen enthalten die Aufnahme von Spurenstoffen (z.B.  $\text{HNO}_3$ ) in flüssige Aerosole oder die Bildung von polaren stratosphärischen Wolken, die ab einer gewissen Größe sedimentieren.

### Anwendungen

Die KASIMA-Modellumgebung kann für eine Reihe von Problemen eingesetzt werden. Im Folgenden werden einige Beispiele aufgezeigt.

Die chemischen Lebenszeiten von Spurenstoffen in der Stratosphäre reichen bis hin zu Jahren. Eine wesentliche Voraussetzung für die erfolgreiche Modellierung der Spurengaskonzentrationen in der Stratosphäre ist daher eine möglichst realistische Wiedergabe des Transportes von Luftmassen. Die notwendige Verifikation der Transporteigenschaften des numerischen Modells kann durch detaillierte Vergleiche von Modelldaten mit Beobachtungen langlebiger Spurengase (Tracer) untersucht werden. Zwei Beispiele solcher Untersuchungen werden im Folgenden herausgegriffen (Streamer und Mittleres Alter).

### Streamer

Der Eintrag von Spurengasen von der Troposphäre in die Stratosphäre erfolgt im wesentlichen in den Tropen. Hierdurch erhält man für die Quellgase in der Stratosphäre eine typische Verteilung mit maximaler Konzentration in den Tropen und Abnahme zu den Polen.

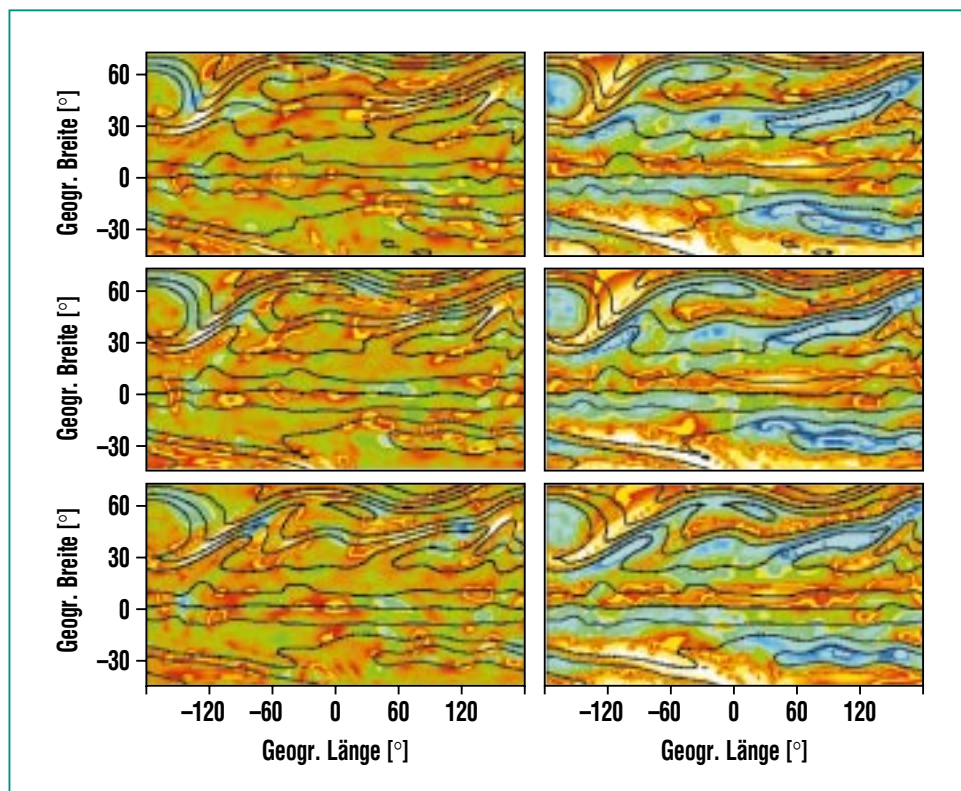
Durch großskalige planetarische Wellen, besonders im Winter, werden Scherströmungen hervorgerufen, durch die tropische Luft innerhalb weniger Tage in Form langgezogener Zungen, sogenannte Streamer, in mittlere und höhere Breiten transportiert wird.

Ein solcher Prozess wurde im November 1994 mit dem räumlich hochauflösenden gekühlten Spektrometer CRISTA der Universität Wuppertal beobachtet und mit KASIMA anhand der Ertelschen Potenziellen Vorticity (EPV), einem Analogon der Hydrodynamik zum Drehimpuls starrer Körper, analysiert [6].

Abb. 2 zeigt eine Zeitreihe der EPV, mit der Streamerstruktur über dem Nordatlantik und Sibirien (Linien). Deutlich erkennbar sind die starken Änderungen des Gradienten der EPV durch Advektion (farbig) im Bereich der Streamerentstehung von Südwesten nach Nordosten.

### Mittleres Alter stratosphärischer Luft

Auf Zeitskalen von Jahren werden die Substanzen in der gesamten Stratosphäre verteilt. Dies kann durch das sogenannte (mittlere) Alter stratosphäri-



**Abb. 2:** Ertels Potenzielle Vorticity (EPV, Linien), die Änderung des Betrages (farbig links) und die Winkelgeschwindigkeit (rechts) ihres Gradienten für den 5.-7. November 1994 (von oben nach unten). Die Streamer sind an den Linien konstanter EPV erkennbar.

scher Luft charakterisiert werden, die die Zeit angibt, wie lange im Mittel ein Luftpaket von der tropischen Tropopause zu einem Punkt der Stratosphäre benötigt hat. Mittels eines stabilen Gases, wie z.B. dem Gas  $\text{SF}_6$ , dessen Konzentration in der Troposphäre beständig wächst, kann diese zunächst theoretische Größe experimentell über die Differenz der Konzentration am Ort der Messung und an der tropischen Tropopause bestimmt und mit Modellsimulationen verglichen werden. Da aber auch sehr inerte Gase in den oberen Luftschichten (größer etwa 60 km) von der harten UV-Strahlung und Ionenreaktionen angegriffen werden, wur-

den für die teilweise unsichere Chemie dieses Gases verschiedene Szenarien gerechnet, siehe Abb. 3, und mit den Beobachtungen verglichen. Die Vergleiche deuten auf eine wesentlich längere chemische Lebenszeit hin, als bisher angenommen wurde. Dies ist auch deshalb wichtig, weil  $\text{SF}_6$  eine um Größenordnungen stärkere spezifische Treibhauswirkung als  $\text{CO}_2$  besitzt und damit trotz viel geringerer Konzentration langfristig zum anthropogenen Treibhauseffekt beiträgt [7].

### Antarktisches Ozonloch

Ein weiteres Beispiel gibt einen Einblick, inwieweit mit KASIMA

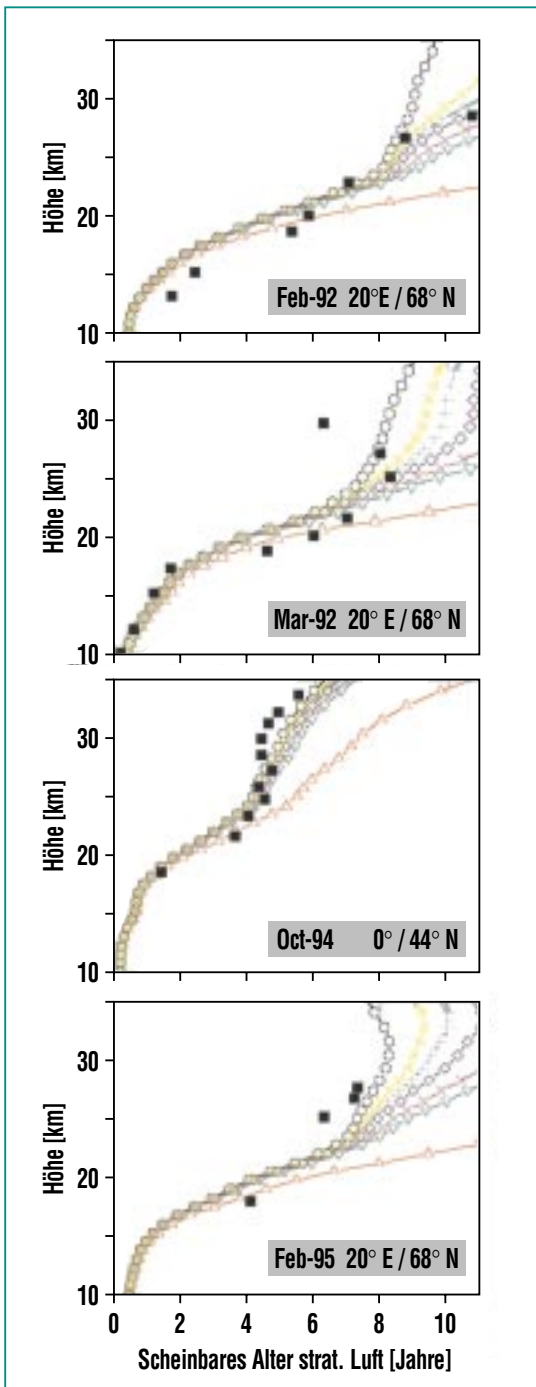


Abb. 3: Aus SF<sub>6</sub>-Messungen bestimmtes Alter der Luft (Quadrate) und Vergleich mit verschiedenen chemischen Szenarien für SF<sub>6</sub> (Linien mit Symbolen). Die Szenarien mit größter Lebenszeit ergeben die beste Übereinstimmung zwischen Modell und Beobachtung.

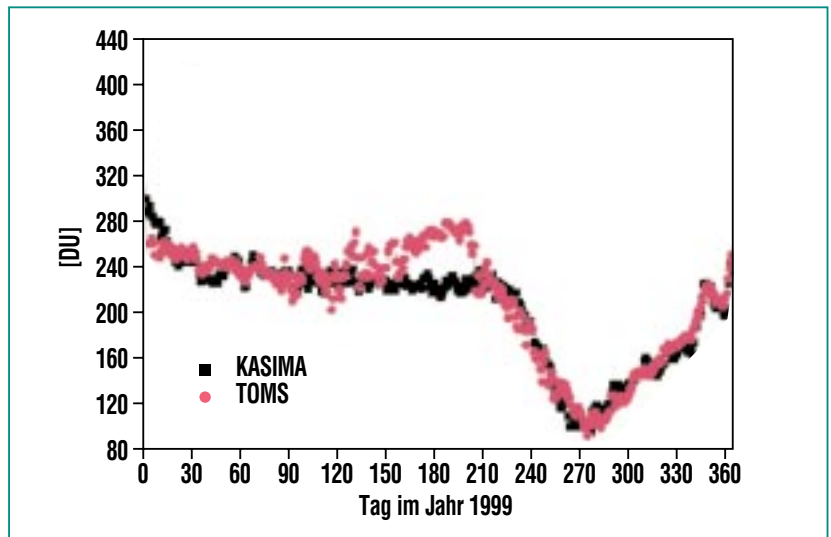


Abb. 4: Minimaler Ozonsäulengehalt in Dobson-Einheiten (1 Dobson-Einheit entspricht einer auf Normalbedingungen komprimierten Ozonschicht von 1 mm Dicke) südlich von 60° Süd im Laufe des Jahres.

die chemischen Prozesse in der Stratosphäre reproduziert werden können. Das Ozonloch ist ein jährlich über dem Südpol auftretendes Phänomen, bei dem durch die aufgehende Sonne im Frühjahr Chlor- und Bromatome in der Stratosphäre freigesetzt werden, die dann in katalytischen Zyklen das Ozon abbauen. Gasphasenchemie, Transporte und physikalische und chemische Prozesse an polaren stratosphärischen Wolken spielen hierbei zusammen.

Ein Beispiel für einen Vergleich zwischen KASIMA-Modelldaten und Satellitenmessungen ist in Abb. 4 zu sehen. Die mit KASIMA berechneten südhemisphärischen Minimalwerte stimmen in ihrem Jahresgang gut mit den Messungen des TOMS Satellitenexperimentes überein. Die Ozonverteilung über der Südhemisphäre am 30. September 1999, dem Tag des ausgeprägtesten Ozonlochs, ist in Abb. 5 darge-

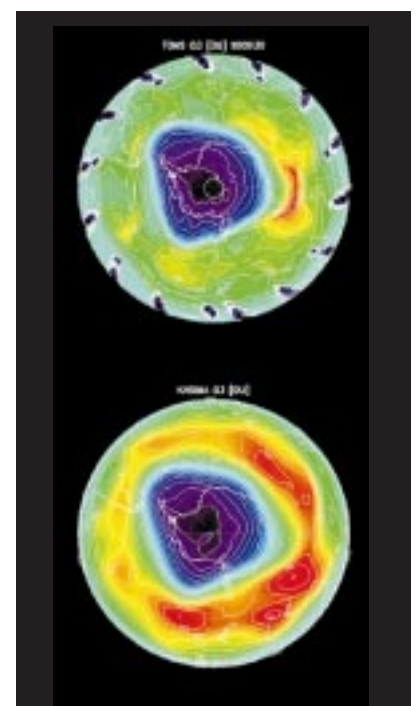


Abb. 5: Vergleich des Ozonsäulengehaltes über der Südhemisphäre am 30. September 1999 (Oben: TOMS-Messdaten, unten: KASIMA-Modellergbnisse)

stellt. Die Simulation des Ozonloches entspricht der tatsächlichen Größe und Stärke in vielen Details, die Ozonverteilung in mittleren Breiten wird jedoch vom Modell überschätzt.

Die Ursache dieser Überschätzung des Ozon, die sowohl dynamische (Ozon wird in der Stratosphäre über den Tropen gebildet und in höhere Breiten transportiert) als auch chemische Ursachen haben kann, sind momentan Bestandteil der Untersu-

chungen am IMK und werden unter anderem im Rahmen von Projekten, wie sie von der EU und vom BMBF innerhalb des Atmosphärenforschungsprogramms (AFO 2000) gefördert werden, durchgeführt.

### Schlussbemerkung

Nach dem erfolgreichen Start des europäischen Umweltsatelliten ENVISAT werden im IMK globale Datensätze vieler wichtiger strato-

sphärischer Spurengase ausgewertet und mit dem Modell KASIMA interpretiert. Dadurch wird ein erheblicher Fortschritt beim Verständnis stratosphärischer Prozesse und ihrer Modellierung erwartet.

## Literatur

Detaillierte Informationen zu KASIMA gibt es im Internet unter <http://www.fzk.de/imk/imk2/kasima>

- [1] W. Kouker, I. Langbein, Th. Reddmann, R. Ruhnke, *Wissenschaftliche Berichte No. 6278, Forschungszentrum Karlsruhe, 1999*
- [2] W. Kouker, A. Beck, H. Fischer, K. Petzoldt, *J. Geophys. Res.*, 100, 11069-11084, 1995
- [3] Th. Reddmann, R. Ruhnke, W. Kouker, *Ann. Geophysicae*, 17, 415-429, 1999.
- [4] R. Ruhnke, W. Kouker, Th. Reddmann, *J. Geophys. Res.*, 104, 3755-3772, 1999.
- [5] R. Ruhnke, W. Kouker, Th. Reddmann, H. Berg, G. Hochschild, G. Kopp, R. Krupa, M. Kuntz, *Geophys. Res. Letters*, 26, 839-842, 1999.
- [6] W. Kouker, D. Offermann, V. Küll, R. Ruhnke, Th. Reddmann, A. Franzen, *J. Geophys. Res.*, 104, 16405-16418, 1999.
- [7] Th. Reddmann, R. Ruhnke, W. Kouker, *J. Geophys. Res.*, 106, 14525-14537, 2001.

## Berichtigung

In Heft 2-3/2002 der „Nachrichten“ ist auf Seite 187 die Unterschrift der unteren Abbildung zu ersetzen durch:

**Abb. 7: Mikrotiterplatte aus PMMA mit 96 identischen mikrofluidischen Kanalstrukturen für die Kapillarelektrophorese (mit freundlicher Genehmigung der Firma Greiner Bio-one, Frickenhausen).**