



**D**ass auf Kommando Regen vom Himmel fällt, um verdorrte Landstriche in blühende Wiesen und Felder zu verwandeln, ist seit Menschengedenken ein Traum, den leider noch niemand verwirklichen konnte. Im alten Griechenland flehten die Bauern Zeus an, Regen zu schicken. Und viele indigene Völker führen heute noch Regentänze auf, um von ihren Göttern ausreichend Niederschlag für ihre Felder zu erbitten. Mit den modernen

kleiner als der Punkt am Ende dieses Satzes. Solche Teilchen entstehen beispielsweise bei jedem Sandsturm, bei dem der Wind tonnenweise Sand und Staub in die Atmosphäre wirbelt. Größere Sandkörner setzen sich bald wieder am Erdboden ab; kleine Partikel werden zum Teil bis in die Stratosphäre (also bis in über 10 Kilometer Höhe) transportiert und „wandern“ so um die halbe Welt (**Abb. B**). So stammt beispielsweise ein Teil des Aero-

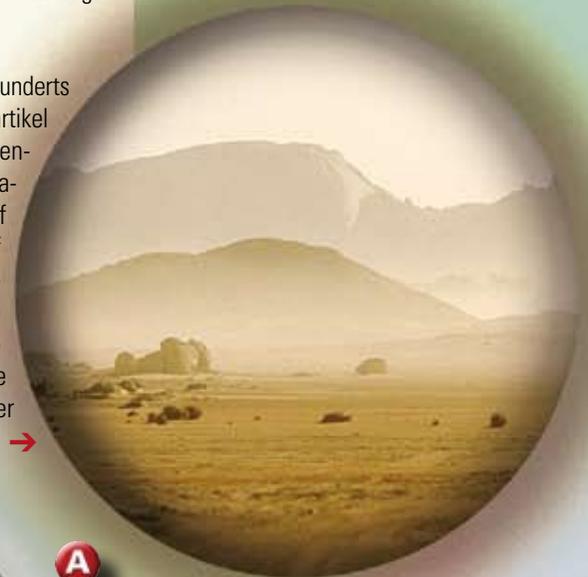
## Staub im Klimarechner – warum Forscher kleinste Teilchen zählen

Naturwissenschaften hat dies nichts zu tun. Schließlich taugen Forscher kaum als Regenmacher – sollte man meinen. Trotzdem erkundeten US-amerikanische Wissenschaftler bis in die 70er-Jahre des vergangenen Jahrhunderts hinein Möglichkeiten, künstlich Regen zu erzeugen. Und israelische Forscher tüfteln heute wieder an Methoden, mit denen sie es gezielt in einzelnen Regionen regnen lassen wollen.

Im Mittelpunkt dieser Untersuchungen stehen keine modernen Methoden der Götterbeschwörung, sondern **Aerosole**. Der Begriff meint eigentlich das Aerosolteilchen und die umgebende Luft. Wissenschaftlich ausgedrückt lautet die Definition: „Stabile **Suspensionen** von festen oder flüssigen Partikeln in Luft.“ Ein mittelgroßes Aerosolpartikel misst etwa 100 Nanometer und ist damit rund 2000-mal

solstaubs über Florida aus der afrikanischen Sahara. Was aber haben Aerosole mit Regen zu tun?

Seit Mitte des vergangenen Jahrhunderts wissen Forscher, dass Aerosolpartikel Kondensationskerne für Wolkentropfchen sind: Wassermoleküle lagern sich – schichtweise – darauf ab; der gasförmige Wasserdampf wird dadurch flüssig. Die Anlage- rung von Wasser wird durch die Feuchte der Umgebungsluft, die Temperatur und die chemische Zusammensetzung der



**A**

► Die Hauptquellen für Aerosole sind Salzkristalle, Sandkörner sowie Rußteilchen u.a. aus Industrieabgasen.



→ Partikel (Hygroskopizität) bestimmt. Ist die Umgebungsluft mit Wasserdampf übersättigt, wird ein Teil der Partikel aktiviert: Sie überschreiten aufgrund der Anlagerung von Wasser einen kritischen Radius und wachsen dann zu einem Wolkentropfen weiter. Sobald genügend viele und große Tröpfchen vorhanden sind, regnet es. Was liegt also näher, als in den Gebieten darunter regnet? Vor allem Silberjodidkristalle wurden in der Vergangenheit für solche Experimente verwendet. Allerdings verliefen diese Aktionen nicht allzu erfolgreich. Und nicht nur die daran Beteiligten lernten bald, dass das natürliche Geschehen weitaus komplizierter ist, als sie zunächst angenommen hatten.

### KLEINE TEILCHEN, GROSSE WIRKUNG

Wissenschaftler fanden schnell heraus, dass Aerosole hochkomplexe Stoffe sind, die je nach Herkunft zahlreiche verschiedene Bestandteile enthalten und ein breites Spektrum an chemischen und physikalischen Eigenschaften aufweisen (**Kasten**). In der Natur sorgt vor allem die Erosion von Boden durch Wind für die Entstehung von Aerosolen. Diese enthalten dann hauptsächlich mineralische Bestandteile. Der Eintrag von Mineralstaub in die Atmosphäre wird allerdings auch von menschlichen Aktivitäten wie Wüstenbildung durch Überweidung und

Winderosion von Äckern als Folge verschiedener Ackerbautechniken beeinflusst. Über den Meeren wirbelt der Wind salzhaltige Aerosole in die Atmosphäre. Bei der Verbrennung von Biomasse – dazu gehören die Verbrennung von Feuerholz und Ackerabfällen, Brandrodung und Waldbrände – bilden sich ebenfalls winzige Partikel, vor allem aus Ruß und anderen kohlenstoffhaltigen Verbindungen. In Städten und Industriegebieten sorgt der Mensch für enorme Mengen an Aerosolen – etwa aus Zementwerken, Glashütten, Gießereien und Stahlwerken oder durch Verkehr. Bei der Produktion jeder Tonne Rohstahl gelangten Mitte des vergangenen Jahrhunderts etwa 15 kg Aerosole in die Atmosphäre, und heute sind es, trotz großer Filteranlagen, immerhin noch etwa 2 kg. Durch die Verbrennung fossiler Rohstoffe wie Kohle, Öl und Erdgas entstehen, wenn diese schwefelhaltig sind, neben Aerosolen aus Ruß auch solche aus organischen Stoffen und Sulfat. Sulfat aber bildet mit Wasser Schwefelsäure – einen der Hauptbestandteile des **sauren Regens**. Da fossile Brennstoffe heute zum Teil entschwefelt sind, hat die Menge der Sulfat-Aerosole in Europa und den USA in den vergangenen 20 Jahren allerdings deutlich abgenommen.

Den Hauptanteil an Schwebstoffen in der Atmosphäre stellen Mineralstaub und Seesalz

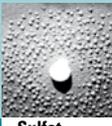
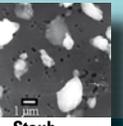


▲ Ein vom europäischen Forschungssatelliten ENVISAT am 29. 8. 2003 über Italien beobachteter Sandsturm.

dar. Sie übertreffen die aus anthropogenen Quellen stammenden Partikel bei weitem. Trotzdem üben Sulfat- und Rußpartikel aufgrund ihrer Fähigkeit, sehr wirksam die einfallende Sonnenstrahlung zu streuen oder zu absorbieren, einen größeren Einfluss auf die optischen Eigenschaften des Aerosols aus. Das liegt vor allem an ihrer Größe: Während Staub- und Seesalzteilchen 2 bis 10 Mikrometer (Tausendstel Millimeter) groß sind, messen Sulfat- und Rußteilchen nur zwischen 0,1 bis 2 Mikrometer. Allein in Europa entstehen inzwischen jedes Jahr etwa 40.000 Tonnen Aerosole. „Und da es hier keine Wüsten mit Sandstürmen gibt und die Verbrennung von Biomasse ebenfalls kaum ins Gewicht fällt, spielen diese anthropogenen – also vom Menschen produzierten – Aerosole in Europa eine entscheidende Rolle,“ erklärt Johannes Quaas vom Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg. Er untersucht, wie Aerosole die Wolkenbildung beeinflussen – aber nicht, weil er es künstlich regnen lassen will. Vielmehr möchten er und seine Kollegen wissen, welchen Einfluss anthropogene Aerosole auf das Klima haben.

„Prinzipiell beeinflussen Aerosole die Sonneneinstrahlung und damit die Energie an der Erdoberfläche“, so Quaas. Indem sie einerseits Sonnenlicht zurück in den Weltraum streuen (**direkter Aerosoleffekt**) und andererseits die optischen Eigenschaften von Wolken verändern (**indirekter Aerosoleffekt**), wirken sie tendenziell abkühlend auf der Erde (**Abb. C**).

## AEROSOLPARTIKEL UND IHRE VERTEILUNG

Aerosol-Typ						Gesamt
	Sulfat	Ruß	Organ. Aerosole	Meersalz	Staub	
Konzentration global, gesamt [mg/m <sup>2</sup> ]	6,2	0,23	1,9	20,6	18,5	47,4
Konzentration global, über Land [mg/m <sup>2</sup> ]	8,3	0,46	4,0	4,9	39,7	57,4
Konzentration über Europa, gesamt [mg/m <sup>2</sup> ]	8,3	0,21	0,71	12,6	11,3	33,1
Konzentration über Europa, über Land [mg/m <sup>2</sup> ]	9,9	0,30	0,99	6,4	11,5	29,1

(Die Gesamtfläche der Erde beträgt 510 Mio km<sup>2</sup>, die Landfläche 150 Mio km<sup>2</sup>, die Fläche Europas 13 Mio km<sup>2</sup> und die europäische Landfläche 6 Mio km<sup>2</sup>.)

## STRAHLUNGSANTRIEB

Aerosolkomponente	Strahlungsantrieb W/m <sup>2</sup>
Sulfat anthropogen	-0,3 bis -0,4
Ruß von fossilen Brennstoffen	+0,1 bis +0,4
Ruß von Biomasseverbrennung	-0,2
anthropogener Effekt auf Wasserwolken*	-1,0 bis -2,0*
Sulfat natürlich	-0,2
Mineralstaub	-0,6 bis +0,4
Seesalz	-2,0
<b>Treibhausgase</b>	
Kohlendioxid	+1,5
Methan	+0,42
alle Treibhausgase	+2,43

Ein positives Vorzeichen bedeutet Erwärmung, ein negatives Abkühlung.  
\* Neuere Zahlen: -0,3 bis -2,0, wahrscheinlich sogar nur bis zu -1,0

© Physik in unserer Zeit, 2/2009, S.76

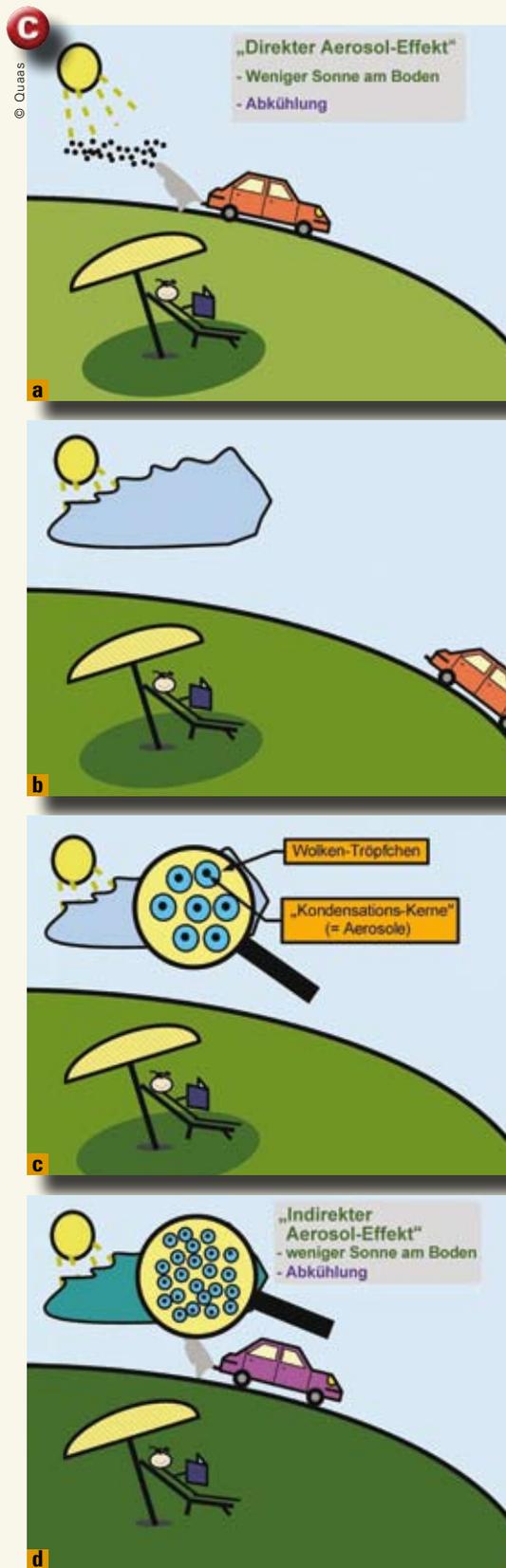
Der direkte Effekt lässt sich am Beispiel eines Treibhauses erläutern: In früheren Zeiten sprühte man verdünnte Kalkfarbe auf die Dächer der Treibhäuser, wenn es darin im Sommer zu warm wurde. Die einfallende Sonnenstrahlung gelangt dann nicht mehr mit der gleichen Intensität in das Haus, sondern wird zum Teil vom Dach nach oben gestreut. Die Aerosolpartikel in der Atmosphäre sind somit das, was die Kalkfarbe für das Treibhaus ist. Wolken haben grundsätzlich die Eigenschaft, einen Teil des Sonnenlichtes in den Weltraum zurückzustrahlen, und wirken somit abkühlend. Dieses Phänomen kann man gut selbst erfahren: Unter einer Wolke ist es schattiger und auch kühler. Doch wie beeinflussen die kleinen Aerosolpartikel ein so riesiges Gebilde wie eine Wolke? Je mehr Aerosole in der Luft schweben, desto mehr Wolkentröpfchen bilden sich. Da nur eine bestimmte Wassermenge vorhanden ist, sind die einzelnen Tropfen folglich kleiner; die Wolke wird damit „dichter“. Und das bewirkt, dass sie das Sonnenlicht stärker reflektiert und weniger Energie zur Erdoberfläche durchdringt. Je kleiner die Wolkentröpfchen sind, desto geringer ist auch die Wahrscheinlichkeit, dass sie sich zu größeren Tropfen zusammenschließen und abregnen. Die Lebensdauer der Wolken und ihr Wassergehalt sind damit erhöht. Auch dies führt dazu, dass mehr Sonnenlicht in den Weltraum „zurückgeschickt“ wird. In der Fachsprache wird diese Kühlung „negativer Strahlungsantrieb“ genannt.

„Diese kühlenden Aerosoleffekte sind zusammengenommen beinahe so stark, wie der erwärmende **Treibhauseffekt** und deshalb von großer Bedeutung für unser Klima“, erläutert Johannes Quaas. Nach Schätzungen des *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) von 2000 liegt der Strahlungsantrieb durch Aerosole aus anthropogenen Quellen zwischen -1,1 und -2,2 W/m<sup>2</sup>. Das entspricht 60 bis 90 Prozent des gesamten Strahlungsantriebs der Treibhausgase (**Tabelle links**). Allerdings sind die Abschätzungen mit erheblich größeren Unsicherheiten behaftet als die der Treibhausgase (neuere Ergebnisse deuten daraufhin, dass der Strahlungsantrieb etwas schwächer ist, zwischen -0,5 und -1,5 W/m<sup>2</sup>). „Nur wenn wir die Aerosoleffekte verstehen, können wir langfristige Klimaänderungen vorhersagen“, betont der Meteorologe.

### SPÄHER AUS DEM ALL

Um die Aerosoleffekte untersuchen zu können, müssen die Forscher zunächst feststellen, welche Aerosolmengen sich in der Atmosphäre befinden. Unter anderem nutzen sie dazu ein weltweites Netzwerk aus automatisierten Messstationen, von denen sechs auch in Deutschland stehen. „Man kann sich diese Stationen als optische Geräte vorstellen, die in den Himmel blicken“, erläutert Quaas. Die Wissenschaftler sind dabei auf schönes Wetter angewiesen. Denn solche optischen Messungen funktionieren nur, wenn keine Wolken die „Sicht“ der Geräte versperren. Prinzipiell registrieren die Apparaturen den Anteil des Sonnenlichts, der in der Atmosphäre nicht von Aerosolen oder anderen Stoffen absorbiert oder gestreut wird. Daraus können die Forscher dann Rückschlüsse ziehen auf die Konzentration der Aerosole, die Größe der Partikel und deren jeweilige Zahl. Will man Prozesse auf globalem Maßstab und für relativ lange Zeiträume untersuchen, sind Satellitenbeobachtungen am besten geeignet. Polarumlaufende Satelliten können täglich einmal (fast) jeden Punkt der Erdoberfläche beobachten. Moderne Satelliteninstrumente sind in der Lage, zahlreiche Eigenschaften von Aerosolen und Wolken zu vermessen.

Allerdings ist die Interpretation der Messwerte nicht einfach. Die Hamburger Meteorologen müssen wissen, was der Satellit beobachtet hat. „Wolken sind weiß, Ozeane von oben dagegen schwarz – da fällt die Unterscheidung leicht“, so Quaas. „Auch Festland ist relativ dunkel. Aber Wüsten



▲ Aerosole – z.B. Rußpartikel aus Autoabgasen – streuen das Sonnenlicht zurück in den Weltraum (**direkter Aerosoleffekt**; a) und wirken damit abkühlend. Wolken haben dieselbe Eigenschaft (b). Aerosole sind Kondensationskerne für Wolken (c). Je mehr Aerosole in der Luft schweben, desto mehr Wolkentröpfchen bilden sich. Die Wolke wird dadurch „dichter“ und reflektiert mehr Sonnenlicht in den Weltraum zurück (**indirekter Aerosoleffekt**; d).



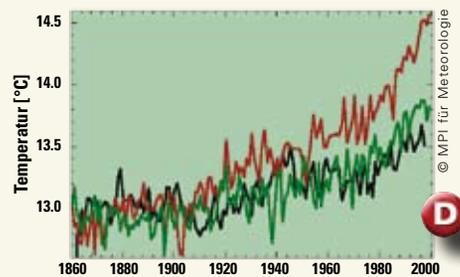
→ haben fast die gleiche Farbe wie Wolken, und diese wiederum ähneln sehr stark den Aerosolen.“ Die Forscher lösen dieses Problem, indem sie einzelne Spektralbereiche getrennt analysieren: Wie sieht eine Wolke im Vergleich zu einer Wüste durch einen roten und dann durch einen grünen Filter aus? Ähnlich lassen sich auch Wolken von Aerosolen unterscheiden. Die Wissenschaftler vergleichen dann unter anderem die ermittelten Aerosolmengen mit den beobachteten Wolkeneigenschaften. Und mit diesen und vielen anderen Daten speisen sie schließlich ihre Rechenmodelle am Computer. „Um die Vergleichbarkeit von Satellitenmessungen und Modellergebnissen zu gewährleisten, haben wir den Satelliten quasi im Modell fliegen lassen“, erzählt Quaas, „und dann die Modellrechnungen solange verändert, bis die Daten, die unser virtueller Satellit berechnet hat, mit den realen Messungen übereinstimmen.“

Prinzipiell sind Klimamodelle nichts anderes als komplexe Gleichungssysteme mit einigen Dutzend Variablen (vor allem Temperatur, Luftdruck, Wassergehalt der Atmosphäre und Windgeschwindigkeit), die das Klimageschehen beschreiben. Sie sollen die Frage beantworten, ob beobachtete Klimaänderungen seit Beginn der industriellen Revolution im 19. Jahrhundert auf Aktivitäten des Menschen zurückgehen oder natürliche Ursachen haben. Diese Untersuchungen konzentrierten sich bisher auf den Einfluss des Anstiegs von

CO<sub>2</sub> und anderer Treibhausgasen. Nur wenige Simulationen berücksichtigen die komplexen Klimaeffekte einer anthropogenen Zunahme von Partikeln in der Atmosphäre. „Indem wir die Auswirkungen der Aerosole auf das Klima untersuchen, fügen wir weitere Gleichungen und Variablen im Modell hinzu“, so Quaas. Die Ergebnisse der Max-Planck-Forscher legen nahe, dass anthropogene Aerosole seit Beginn der Industrialisierung im vergangenen Jahrhundert die Durchschnittstemperaturen auf der Erde um etwa 0,4 Grad Celsius gesenkt haben. Die seit diesem Zeitpunkt freigesetzten Treibhausgase führten dagegen zu einer Erderwärmung von rund einem Grad. Tatsächlich ist es auf der Erde im Durchschnitt 0,6 Grad Celsius wärmer als vor hundert Jahren (**Abb. D**). Wäre es da nicht sinnvoll, Aerosole gezielt gegen den anthropogenen Treibhauseffekt einzusetzen?

### EIN EFFEKT, DER SCHNELL VERPUFFT

„Wenn ich heute eine Tonne Kohle verbrenne, entsteht etwa eine Tonne Sulfataerosole; diese haben eine Lebensdauer von sieben Tagen. Daneben werden aber zwei Tonnen des Treibhausgases Kohlendioxid freigesetzt – und die werden auch 2050 noch in der Atmosphäre sein“, erklärt Johannes Quaas. Im Klartext: Während Treibhausgase jahrzehntelang in der Atmosphäre bleiben und dafür sorgen, dass sich die Erde langsam erwärmt, ist der kühlende Effekt der Aerosole schnell verpufft. Darüber hinaus



▲ Der Verlauf der globalen jährlichen Mitteltemperatur über Land aus Beobachtungsdaten (schwarz) und aus zwei Modellsimulationen: nur mit dem Treibhauseffekt (rot) und mit Treibhaus- und Aerosoleffekten (grün).

sind viele Aerosole gesundheitsschädlich: Da nur wenige Millionstel bis einige wenige Hundertstel Millimeter klein, können sie die Atemweg-Filterssysteme des Menschen ungehindert passieren. Über die Bronchien gelangen sie dann teilweise in den Blutkreislauf und sind, wenn sie krebserregende Substanzen tragen, entsprechend gefährlich für den Körper.

Unter bestimmten Bedingungen können Aerosole den Treibhauseffekt auch verstärken; dies beobachten Klimaforscher seit einiger Zeit über Regionen in China, wo die Wirtschaft boomt und die Luftverschmutzung extrem hoch ist: Der enorme Gehalt an Ruß und Flugasche lässt dort die Wolken vergrauen und macht sie zu regelrechten Strahlenfallen, die dann infolge der absorbierten Strahlung wie eine „Heizdecke“ über der Region lasten. Nach heutigem Wissensstand eignen sich Aerosole also weder zum Regenmachen, noch als „Bremsen“ gegen den anthropogenen Treibhauseffekt. „Ihre Erforschung ist zurzeit aber einer der wesentlichen Schlüssel für bessere Klimamodelle“, so Johannes Quaas. Und je höher die Qualität der Klimavorhersagen, desto engagierter hoffentlich die Maßnahmen zum Klimaschutz.

**Schlagwörter:** Aerosole, Suspension, saurer Regen, direkter/indirekter Aerosoleffekt, negativer Strahlungsantrieb, Treibhauseffekt

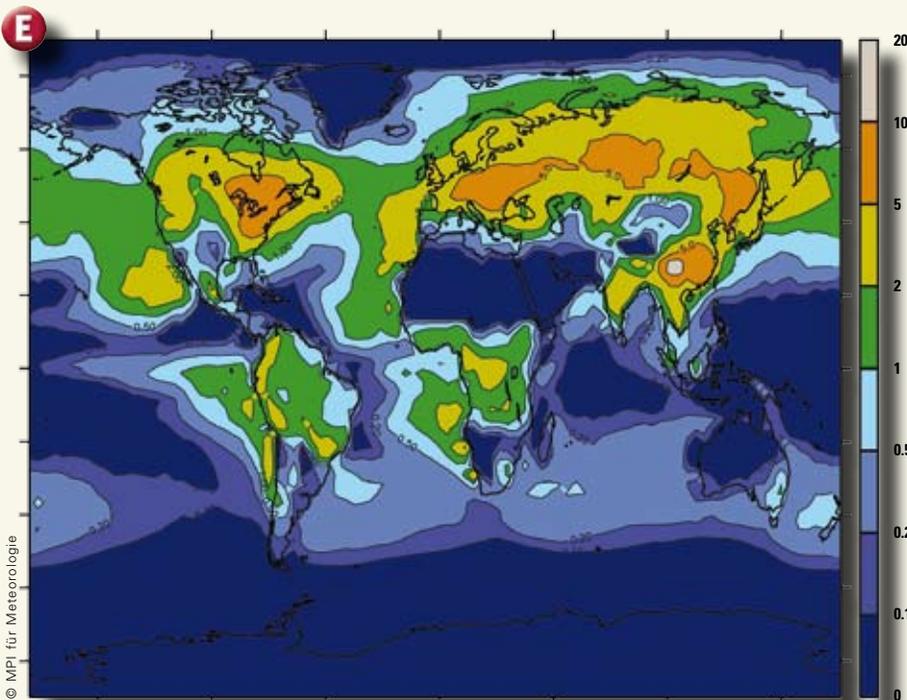
**Lesetipps:** Aerosole – Würzstoffe in der Klimaküche, MaxPlanckForschung 4/2004, S. 48; Aerosole und das Klimasystem, Physik in unserer Zeit, 2/2003, S. 72

**Internet:** [www.hamburger-bildungsserver.de/klima](http://www.hamburger-bildungsserver.de/klima); [www.esper.net](http://www.esper.net)

## WWW.MAX-WISSEN.DE

– der Link zur Forschung für Schüler und Lehrer

Hier finden Sie Hintergrundinformationen und didaktisches Material zu den jeweils zweimal im Jahr erscheinenden Ausgaben von BIOMAX, GEOMAX und TECHMAX. Weitere Exemplare können Sie kostenlos bestellen bei:



▲ Verteilung des simulierten indirekten Aerosol-Effekts für das Jahr 2000: Besonders stark sind die Aerosoleffekte über dem Osten der USA, Mittel- und Osteuropa, China und Südostasien.