



Einfluss der Luftverschmutzung auf den Klimawandel – neue Erkenntnisse aus Satellitendaten und Klimamodellen

Autoren

Kinne, Stefan; Quaas, Johannes

Abteilungen

Atmosphäre im Erdsystem (Stevens) (Prof. Dr. Bjorn Stevens)

MPI für Meteorologie, Hamburg

Wolken-Klima-Wechselwirkungen (Emmy-Noether-Programm) (Dr. Johannes Quaas)

MPI für Meteorologie, Hamburg

Zusammenfassung

Schwebeteilchen in der Atmosphäre, so genannte Aerosole, reflektieren Sonnenlicht und verändern Eigenschaften von Wolken. Im globalen Mittel wirkt aus Verschmutzung stammendes anthropogenes Aerosol durch diese direkten und indirekten Effekte abkühlend auf das Klima. Die hier vorgestellten Studien, die neue Fernerkundungsdaten verwenden, zeigen, dass sowohl für den direkten als auch für den indirekten Effekt in früheren Abschätzungen der Klimaeinfluss der anthropogenen Aerosole zu hoch angesetzt wurde.

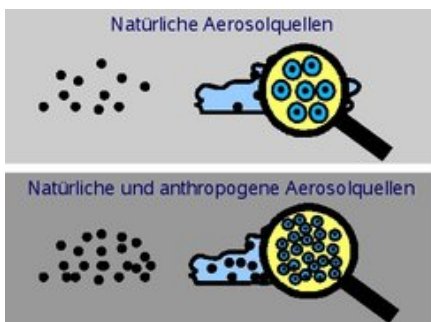
Aerosole

Spätestens seit Hinweisen auf die Gesundheitsschädlichkeit und der darauf folgenden Gesetzgebung spielen Feinstaubpartikel in der öffentlichen Wahrnehmung eine große Rolle. Bis in die siebziger Jahre hinein waren Industriegebiete für ihre schlechte Luft bekannt und saurer Regen galt als Ursache für Waldsterben. Noch heute bringt mancher nach Südwindwetterlagen sein Auto in die Waschanlage, weil sich über Karosserie und Scheiben eine Schicht aus Wüstenstaub gelegt hat. Beim Urlaub am Meer setzt sich nach und nach eine Salzkruste auf Brillen ab und im Frühjahr leidet man häufig unter erhöhter Pollenzahl.

Dies sind Beispiele aus der Alltagserfahrung, die alle mit Schwebpartikeln in der Luft, so genannten „Aerosolen“ zu tun haben. Aerosolteilchen sind unterschiedlichster Herkunft, Zusammensetzung, Form und Größe, wobei die Durchmesser von Nanometern bis zu mehreren Mikrometern reichen. Wegen ihres geringen Gewichts bleiben Aerosolteilchen typischerweise für mehrere Tage in der Atmosphäre, bis sie sich wieder am Erdboden ablagern oder durch Regen ausgewaschen werden. Natürliche Aerosole sind beispielsweise Wüstenstaub und Meersalz. Zusätzlich gibt es „anthropogene“ Aerosolquellen, vor allem Ruß- und Schwefelpartikel aus der Verbrennung von fossilen Brennstoffen und Biomasse.

Bedeutung der Aerosole für das Klima

Der globale Klimawandel wird mittlerweile von Gesellschaft und Politik als eines der dringlichsten Probleme der Menschheit angesehen. Ursache für die globale Erwärmung ist zunächst der Treibhauseffekt durch anthropogene Emissionen insbesondere von Kohlendioxid. Zu Beginn der Neunziger Jahre erkannte man, dass über das vergangene Jahrhundert die tatsächlich beobachtete Erwärmung an der Erdoberfläche geringer ausfiel, als aufgrund der gemessenen Änderungen von Treibhausgaskonzentrationen zu erwarten war. Es musste also weitere Effekte geben, die einen Teil der Erwärmung verdecken. Es konnte gezeigt werden, dass anthropogene Aerosole, die wie Kohlendioxid bei der Verbrennung fossiler Energieträger freigesetzt werden, im globalen Mittel zu einer Abkühlung des Erdbodens beitragen. Dabei unterscheidet man zwischen „direkten“ und „indirekten“ Aerosol-Effekten. Durch den „direkten“ Effekt dringt in einer Aerosol-belasteten Atmosphäre weniger Sonnenlicht zum Erdboden und zu Ozeanoberflächen durch, wodurch diese sich abkühlen. „Indirekte“ Aerosol-Effekte beschreiben den vielfältigen Einfluss von Aerosolen auf Wolken. Aerosole stellen zusätzliche Kondensationskeime zur Wolkentropfenbildung bereit. Dadurch bestehen Wolken aus mehr und somit kleineren Tropfen, was die Reflexion von Sonnenstrahlung durch die Wolken erhöht und so einen abkühlenden Effekt bewirkt. Daneben gibt es möglicherweise weitere Einflüsse von Aerosolen auf Wolken, wie die Verzögerung der Niederschlagsbildung, ein verstärkter konvektiver Niederschlag oder eine Verdunstung von Wolken durch die lokale Erwärmung der Atmosphäre durch absorbierende Aerosole [1]. **Abbildung 1** skizziert schematisch den direkten und indirekten Aerosol-Effekt.



Schematische Darstellung des direkten und indirekten Aerosol-Effekts. Bei zusätzlichen anthropogenen Aerosolen wird die Oberfläche, an der Sonnenlicht reflektiert wird, erhöht (links). Ebenso funktioniert der indirekte Effekt: Durch mehr Wolkenkondensationskeime wird die Zahl der Wolkentropfen erhöht, und ebenso mehr Sonnenlicht reflektiert (rechts).

© Max-Planck-Institut für Meteorologie

Die abkühlenden Aerosol-Effekte sind also in der Tat in der Lage, einen Teil der Erwärmung durch den Treibhauseffekt zu verdecken. Da aber die Lebensdauer von Treibhausgasen in der Größenordnung von Jahrzehnten bis Jahrhunderten liegt, häufen sich diese Gase in der Atmosphäre an, und ihr erwärmender Effekt akkumuliert. Die recht kurze Lebensdauer der Aerosole von einigen Tagen dagegen bewirkt, dass der abkühlende Effekt dieser Verschmutzungspartikel nur unmittelbar nach der Emission wirkt. So konnte festgestellt werden, dass nach einem hypothetischen Stopp der Verbrennung fossiler Brennstoffe aufgrund des Wegfalls der Maskierung des Treibhauseffekts durch die kühlenden Aerosol-Effekte die globale Mitteltemperatur innerhalb weniger Jahre um bis zu 1 K ansteigen würde [2]. Man kann folgern, dass, je größer die Abkühlung durch die Aerosole ist, die künftige globale Erwärmung desto höher ausfallen muss [3].

Der Stand der Wissenschaft aus dem Sachstandsbericht des Weltklimarats

In seinem viel beachteten Sachstandsbericht hat der Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC), der für die Welt-Meteorologie-Organisation (WMO) und das Umweltprogramm der Vereinten

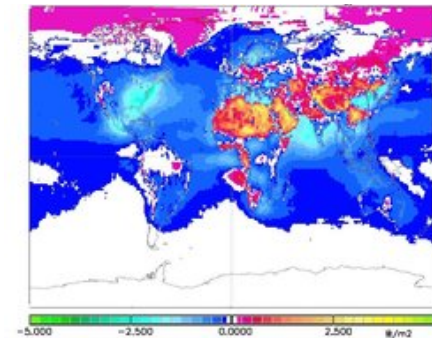
Nationen (United Nations Environmental Program, UNEP) den Stand der Wissenschaft zum Klimawandel zusammenfasst, erneut festgestellt, dass die Aerosol-Effekte nach wie vor eine der größten Unsicherheiten bezüglich des anthropogenen Antriebs des Klimawandels darstellen [4]. Um den Einfluss auf das Klima im System Erde-Atmosphäre zusammenzufassen, wird die Energiebilanz von Sonnenstrahlung und Wärmestrahlung an Oberrand der Atmosphäre betrachtet. Dabei erzeugen erhöhte Verluste ins All eine Abkühlung des Erdklimas, verminderte Verluste dagegen eine Erwärmung. In seiner Abschätzung gibt das IPCC für den Treibhauseffekt anthropogener Treibhausgase global einen erwärmenden Effekt von etwa $+2,6 \text{ Wm}^{-2}$ an mit einer vergleichsweise kleinen Ungenauigkeit von $\pm 0,3 \text{ Wm}^{-2}$. Im Vergleich dazu wird der Gesamtheit aller zusätzlichen Aerosole seit der Industrialisierung global ein abkühlender Effekt zugeordnet, der zwar kleiner, aber dafür viel ungenauer bestimmt ist. Dabei werden dem direkten Effekt eine Abkühlung von $-0,5 \text{ Wm}^{-2}$ und dem indirekten Effekt (hier nur der Effekt kleinerer Wolkentropfen) eine Abkühlung von $-0,7 \text{ Wm}^{-2}$ zugeordnet, mit Unsicherheitsbereichen von $-1,0$ bis $-0,1 \text{ Wm}^{-2}$ für den direkten und von $-1,8$ bis $0,3 \text{ Wm}^{-2}$ für den (einen) indirekten Effekt. Die Unsicherheit bezüglich des indirekten Aerosol-Effektes ist damit um Mehrfaches größer als die vieler anderer Effekte zusammen. Diese Ergebnisse beruhen im Wesentlichen auf Simulationen mit globalen Modellen, sodass sich zumindest bei Einschätzungen der Aerosol-Effekte die Frage stellt, ob nicht mit Daten globaler Fernerkundung die größeren Unsicherheiten einzugrenzen sind. In der Tat hat die Fernerkundung von Wolken- und Aerosoleigenschaften im letzten Jahrzehnt erhebliche Fortschritte gemacht. Neue Satelliten mit verbesserten Sensoren und innovativen Messmethoden erlauben neue Einblicke in die Zusammensetzung der Atmosphäre. Allerdings müssen die bei der Interpretation dieser Daten zu Grunde gelegten Annahmen und Einschränkungen genau überprüft werden.

„Direkter“ Strahlungsantrieb durch Aerosole

Die Höhe der Unsicherheit von fast $-1,0 \text{ Wm}^{-2}$ für den direkten Aerosol-Effekt im IPCC-Bericht ist auf Unterschiede zwischen Abschätzungen, orientiert an Satellitendaten auf der einen Seite ($-0,9$ bis $-0,3 \text{ Wm}^{-2}$) und Modell-Simulationen auf der anderen Seite ($-0,4$ bis $0,0 \text{ Wm}^{-2}$), zurückzuführen. Bei genauerer Untersuchung hat sich gezeigt, dass einige unzutreffende Annahmen bei den an Daten orientierten Ansätzen stärkere Abkühlung vortäuschten. Satellitendaten überschätzen häufig die Aerosolmenge über zusätzliche Zuordnungen durch Wolken- und Schnee-Reste, aber auch über eine Unterschätzung der Beiträge von Erdboden oder nahen Wolken. Auch werden Regionen mit sehr hellem Untergrund (wie über Wüste, Schnee und Eis), wo Aerosole durch eine (statt erhöhte nun) reduzierte Reflexion der Sonnenstrahlung erwärmend (statt abkühlend) wirken können, oft im globalen Mittel vernachlässigt, weil dort die Bestimmung der Aerosolmenge schwierig oder unmöglich ist. Insbesondere wird der direkte Aerosoleffekt daher in der Regel nur für wolkenfreie Gebiete bestimmt und dann unter der Annahme, er sei in bewölkten Gebieten vernachlässigbar, extrapoliert. Da der direkte Aerosoleffekt aber erwärmend wirkt, wenn sich Aerosole über Wolken befinden, führt diese Vereinfachung zu einem zu negativen Effekt. Auch bei der Festlegung des anthropogenen Anteils wird häufig der Aerosoleffekt überschätzt. Bei Ansätzen mit Satellitendaten wird dieser Anteil oft durch die Gesamtheit der kleinen Aerosole beschrieben. Dies ist jedoch nicht überall richtig, da auch natürliche Aerosole zur Menge der kleinen Aerosole beitragen können.

Unabhängige Berechnungen mit (1) einem neuen Aerosol-Datensatz, der sich an genaue Beobachtungsdaten bodengestützter Messungen anlehnt, (2) zusätzlichen Satellitendaten für Wolken und Erdoberflächenreflektivität und (3) Modellabschätzungen für Höhe und anthropogenen Anteil kleiner Aerosole resultieren in einem globalen jährlichen Mittel von $-0,2 \text{ Wm}^{-2}$ für den direkten Effekt. Dieser stimmt mit dem Mittel in der globalen Modellierung recht gut überein. Der Unsicherheitsbereich konnte auf $-0,4$

Wm^{-2} bis $-0,0 \text{ Wm}^{-2}$ abgeschätzt werden. Allerdings darf der relative kleine Wert nicht darüber hinwegtäuschen, dass es auf regionaler Basis sehr viel größere Aerosol-Effekte gibt (siehe **Abb. 2**), und dieser relative kleine Globalwert nur durch Aufsummierung großer Werte unterschiedlichen Vorzeichens entsteht. Zudem gibt es noch große regionale Unterschiede zu typischen Feldern der Modellierung, sodass Bedarf für noch genauere und detailliertere Aerosol-, Wolken- und Bodenbeschaffenheits-Beobachtungen besteht.

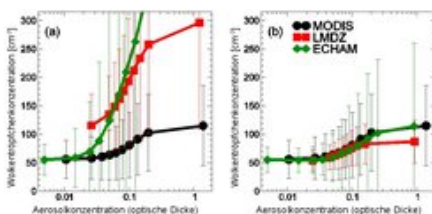


Geographische Verteilung des jährlich gemittelten Strahlungsantriebs durch den direkten Aerosol-Effekt, wie er mit dem neuen Verfahren berechnet wurde. Rosa, rote und gelbe Farben zeigen erwärmende Effekte an, hauptsächlich über hellen Oberflächen wie Schnee, Meereis, Wüsten und tiefliegenden Wolken. In türkisen und blauen Farben werden Bereiche angezeigt, in denen anthropogenes Aerosol abkühlend wirkt.

© Max-Planck-Institut für Meteorologie

„Indirekter“ Strahlungsantrieb durch Aerosole

Um Ergebnissen der Klimamodelle und ihren Zukunfts-Projektionen zu trauen, müssen diese mit Beobachtungsdaten evaluiert werden. Neue Satellitendatensätze können hier trotz ihrer oft beschränkten Genauigkeit eine große Rolle spielen und zur Evaluierung einzelner Prozesse der Wechselwirkung zwischen Aerosol und Wolken herangezogen werden. So erlauben statistische Zusammenhänge zwischen Aerosolkonzentration und Wolkentröpfchen-Anzahlkonzentration eine beobachtbare Quantifizierung eines indirekten Aerosol-Effektes. In zwei verschiedenen Klimamodellen, dem „LMDZ“ des französischen Klimaforschungsinstituts Laboratoire de Météorologie Dynamique in Paris, und dem „ECHAM“ des MPI für Meteorologie in Hamburg, wurden mit einem „Satelliten-Simulator“ die Aerosolkonzentration und die Wolkentröpfchenkonzentration in gleicher Weise wie in den Beobachtungen simuliert, und die Relation zwischen den beiden Größen berechnet. In **Abbildung 3** wird diese simulierte mit der beobachteten Relation verglichen.



Statistische Relation zwischen Tröpfchenanzahlkonzentration und Aerosolkonzentration („Optische Dicke“, hier der kleinen Aerosole) über Ozeanen. In Schwarz ist die von Daten des amerikanischen MODIS-Satelliteninstruments berechnete Kurve gezeigt, in Rot und Grün die Relationen, wie sie im französischen bzw. deutschen Klimamodell berechnet werden. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung der Tröpfchenkonzentration für die jeweilige Aerosolkonzentration. Links wird die Standard-Parametrisierung des indirekten Aerosol-Effekts in den Modellsimulationen benutzt, rechts eine angepasste Parametrisierung [5].

© Max-Planck-Institut für Meteorologie

Beide Klimamodelle simulieren eine generell zu hohe Wolkentröpfchenkonzentration, und insbesondere ist die simulierte Steigung der Kurve in beiden Fällen, verglichen mit den Beobachtungsdaten, zu hoch. Parameter in der mathematischen Darstellung („Parametrisierung“) der Aerosol-Wolken-Wechselwirkung in den beiden Modellen wurden in der Studie dahingehend verändert, dass im Resultat der neuen Simulation die simulierten Kurven der beobachteten entsprechen. Aufgrund der nun geringeren Sensitivität der Wolkentröpfchenkonzentration bei einer Variation der Aerosolkonzentration verringert sich der Einfluss der anthropogenen Aerosole auf das Klima: Statt eines vorher simulierten Effekts von $-0,8$ bzw. $-1,5 \text{ Wm}^{-2}$ im französischen bzw. deutschen Klimamodell wird nun ein Effekt von $-0,5$ bzw. $-0,3 \text{ Wm}^{-2}$ simuliert [5]. Mithilfe von statistischen Analysen der neuen Satellitendaten ist es auch möglich, eine grobe Abschätzung des indirekten Aerosol-Effekts allein aus Beobachtungsdaten zu erhalten. Das Ergebnis dieser Studie weist ebenfalls auf einen vergleichsweise geringen indirekten Aerosol-Effekt hin [6].

Ausblick

Wegen der wachsenden Komplexität und den damit verbundenen großen Unsicherheiten in der Modellierung im Zusammenhang mit Aerosol-Einflüssen auf das Klima gewinnen Beobachtungsdaten zunehmend an Bedeutung. Mit einem erhöhten Vertrauen in Satellitendaten durch ein besseres Verständnis der Unsicherheiten, mit begleitenden Daten von Bodennetzwerken und *in-situ* Daten, wird es möglich, Eigenschaften von Aerosolen, Wolken und deren Wechselwirkungen besser zu bestimmen. Neben den genannten Möglichkeiten werden in Zukunft zeitlich hoch aufgelöste Fernerkundungsdaten bedeutsam, die neben der räumlichen auch eine zeitliche Zuordnung zulassen, und aktive Sensoren (Wolken-Radar und Aerosol-Lidar – ein Radar-ähnliches Instrument, das mit einem Laser arbeitet), die Informationen über die vertikale Verteilung von Wolken und Aerosol liefern. Diese Daten werden der Modellierung neue Wege zeigen, sodass – zumindest mit der Zeit – verbesserte Modelle und damit genauere Bestimmungen des Aerosoleinflusses auf das Klima zu erwarten sind.

Originalveröffentlichungen

1. **U. Lohmann, J. Feichter:**

Global indirect aerosol effects: A review.
Atmospheric Chemistry and Physics **5**, 715-737 (2005).

2. **G. P. Brasseur, E. Roeckner:**

Impact of improved air quality on the future evolution of climate.
Geophysical Research Letters **32**, L23704, doi: 10.1029/2005GL023902 (2005).

3. **M. O. Andreae, C. D. Jones, P. M. Cox:**

Strong present-day aerosol cooling implies a hot future.
Nature **435**, 1187-1190, doi: 10.1038/nature.03671 (2005).

4. **IPCC**

Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
Cambridge University Press (2007).

5. **J. Quaas, O. Boucher, U. Lohmann:**

Constraining the total aerosol indirect effect in the LMDZ and ECHAM4 GCMs using MODIS satellite data.

Atmospheric Chemistry and Physics **6**, 947-955 (2006).

6. **J. Quaas, O. Boucher, N. Bellouin, S. Kinne:**

Satellite-based estimate of the direct and indirect aerosol climate forcing.

Journal of Geophysical Research **113**, D05204, doi: 10.1029/2007JD008962 (2008).