

## Aerosole – ein Fragezeichen hinter der Zukunft des Klimas

**Aerosole, die unzähligen in der Luft schwebenden unsichtbar kleinen Partikel, sind nicht nur aus gesundheitlicher Sicht problematisch, sondern stellen gegenwärtig den grössten Unsicherheitsfaktor in der Diskussion um die zukünftige Klimaentwicklung dar. Die direkte Wirkung der Aerosole auf die Wärmebilanz der Erde ist abhängig von der Grösse und der chemischen Zusammensetzung der Aerosolpartikel. Die Mehrheit der Aerosole reflektiert Sonnenstrahlung zurück in den Weltraum und hat dadurch eine abkühlende Wirkung. Die Aerosole beeinflussen zusätzlich die Wolkenbildung und dadurch auch indirekt die Temperatur an der Erdoberfläche. Dieser indirekte Effekt hat in der Nettobilanz wahrscheinlich ebenfalls eine Abkühlung zur Folge, deren Ausmass aber sehr schwierig abzuschätzen ist. Die Zunahme der Aerosole durch menschliche Aktivitäten und ihre abkühlende Wirkung kann die Wirkung des menschenverursachten Treibhauseffekts zum Teil kompensieren. Allerdings sammeln sich die Aerosole im Gegensatz zu den Treibhausgasen in der Luft nicht über längere Zeit an, so dass die Folgen des zusätzlichen Treibhauseffekts nicht beliebig lange verzögert werden. Die Aerosolkonzentrationen schwanken zeitlich und räumlich sehr stark. Deshalb ist ihr Kühleffekt sehr heterogen und schwierig zu messen odervorherzusagen. Am stärksten ist der Effekt im allgemeinen in der Nähe der Aerosolquellen, wie z.B. grossen Industrieregionen.**

Sie sind klein und unsichtbar, sie bestehen aus den unterschiedlichsten Stoffen, haben mannigfaltige Formen, können uns beim Atmen stören und kühlen die Erdoberfläche – ein Kurzporträt der Aerosole. In den Zeitungsspalten tauchen sie in der Rubrik Luftschadstoffe unter dem Namen PM10 auf. Gemeint sind damit alle in der Luft schwebenden Partikel (siehe Kasten) mit einem Durchmesser unter 10 Mikrometer (Tausendstel Millimeter), die meisten im Bereich 0.01 bis 1 Mikrometer. Neben den Medizinern, die in den letzten Jahren verschiedene Auswirkungen auf den menschlichen Herz-Lungenkreislauf und die Atemwege gefunden haben, beschäftigen sich auch die Klimatologen intensiv mit diesen kleinen Partikeln. Denn vor allem deren Wirkung

auf die Bildung von Wolken bereitet ihnen seit längerem Kopfzerbrechen.

### Aerosole reflektieren die Sonnenstrahlung

Die direkte Wirkung der Aerosole liegt hauptsächlich im Bereich der kurzwelligen Sonnenstrahlung. Die Partikel reflektieren einen Teil der einfallenden Sonnenstrahlung zurück in den Weltraum und vermindern dadurch den Strahlungsanteil, der in die untersten Atmosphärenschichten eindringt und die Erdoberfläche erreicht. An der Erdoberfläche ergibt sich also eine Abkühlung. Der Betrag dieser Abkühlung ist nicht nur von der Anzahl und Grösse der Partikel abhängig, sondern auch vom chemischen Inhalt und dessen Verteilung, d.h. ob verschiedene chemische Stoffe im gleichen Partikel enthalten sind oder auf verschiedene Partikel aufgeteilt sind. Die Wirkung der Aerosole auf die Temperatur ist regional sehr unterschiedlich, da sowohl ihre Zusammensetzung als auch ihre Konzentration von Region zu Region unterschiedlich ist.

Eine besondere Rolle nehmen Russpartikel ein. Sie reflektieren die Sonnenstrahlung nur wenig, absorbieren aufgrund ihrer dunklen Farbe aber einen Teil. Dadurch nimmt die Strahlung an der Erdoberfläche ebenfalls ab, jedoch steigt die Temperatur in der betreffenden Atmosphärenschicht an.

### Aerosole machen Wolken weisser

Wolken sind für die Temperatur an der Erdoberfläche von grosser Bedeutung und stellen neben den Aerosolen den grössten Unsicherheitsfaktor in der Klimaentwicklung dar. Wolken wirken je nach Art abkühlend oder aufheizend: Dünne, hohe Wolken (z.B. Cirruswolken) wirken ähnlich wie Treibhausgase erwärmend, denn sie lassen die kurzwellige Sonnenstrahlung zum grossen Teil durch, absorbieren hingegen die Wärmestrahlung der Erde. Dicke Wolken (z.B. Cumuluswolken) reflektieren hingegen einen grossen Teil der Sonnenstrahlung und führen damit zur Abkühlung der Erdoberfläche. Aerosole spielen bei der Wolkenbildung eine wichtige Rolle, da jedes Wolken-

## Aerosole

### Arten

Es können vier Hauptkategorien von Aerosolen unterschieden werden:

- Sulfate (Salze der Schwefelsäure) und Nitrate (Salze der Salpetersäure)
- Kohlenstoffhaltige Aerosole (Russ sowie organische Kohlenstoffverbindungen)
- (Mineral)Staub
- Meersalz.

Sulfate, Nitrate und kohlenstoffhaltige Aerosole stammen überwiegend aus menschlichen Quellen und sind meist sehr klein (kleiner als ein Tausendstel Millimeter). Staub und Meersalz stammen mehrheitlich aus der Natur und bestehen aus vergleichsweise größeren Partikeln.

Viele der genauer untersuchten Aerosolpartikel haben einen Russkern, der für die Absorption der Sonnen- und Erdstrahlung verantwortlich zeichnet, während die anderen Aerosolkomponenten die Strahlung meist „nur“ streuen.

### Quellen

*Staubpartikel* natürlicher Herkunft werden vor allem durch den Wind aufgewirbelt und in die Atmosphäre gebracht, hauptsächlich in Trockenregionen wie beispielsweise Wüsten oder deren wasserarmen Randzonen. Staubemissionen stammen aber auch von menschlichen Aktivitäten, insbesondere Brandrodungen in den tropischen Regionen und industriellen Prozessen wie Kohleverbrennung, Zementherstellung, Metallurgie und Abfallverbrennung.

Beim Verbrennen von fossilen Energieträgern (z.B. Öl, Kohle, Benzin) und Biomasse (Holz, Torf, organische Abfälle) werden auch *kohlenstoffhaltige Aerosole* in die Atmosphäre ausgestossen.

*Sulfathaltige Aerosole* entstehen durch chemische Reaktionen in der Luft und werden hauptsächlich durch  $\text{SO}_2$  aus der Verbrennung fossiler Rohstoffe und/oder Vulkanausbrüchen gebildet. Über den Ozeanen werden sulfathaltige Aerosole produziert, indem Phytoplankton Dimethylsulfid (DMS) ausscheidet das anschliessend in der Atmosphäre chemisch umgewandelt wird.

*Nitrathaltige Aerosole* entstehen durch chemische Reaktionen von Stickoxiden (Nebenprodukt bei Verbrennungsprozessen)

*Meersalzaerosole* werden durch diverse physikalische Prozesse gebildet (z.B. Gischtproduktion), die durch die Wellenbewegung der Ozeane ausgelöst werden

tröpfchen um einen Aerosolkern herum gebildet wird. Wird die Anzahl Aerosole erhöht, so sind mehr Aerosolkerne vorhanden, und es bilden sich mehr, aber kleinere Wolkenströpfchen. Dies haben sowohl direkte Messungen über dem Indischen Ozean als auch Satellitenmessungen gezeigt. Die Erhöhung der Anzahl Tröpfchen lässt die Wolken weisser erscheinen, verstärkt damit die Reflexion und Streuung der Sonnenstrahlung und hat deshalb eine abkühlende Wirkung. Die Stärke dieses Effektes ist von der chemischen Zusammensetzung und der Grössenverteilung des Aerosols abhängig. Auch hier spielen Russpartikel, wenn sie in hohen Konzentrationen auftreten, eine besondere Rolle, weil sie die Wolken aufheizen und am Abregnen hindern können.

### Aerosole können Regen verhindern

Regentropfen müssen eine gewisse Grösse erreichen, um zur Erde zu fallen. Deshalb schwächt die Aufteilung des Wolkenwassers auf eine grössere Anzahl, aber kleinere Tröpfchen die Regenbildung ab. Dieser Effekt konnte

anhand von Satellitendaten im subtropischen Asien identifiziert werden: Innerhalb und ausserhalb verschmutzter Luftmassen wurden zwar gleich viele Wolken mit ähnlichem Wassergehalt gefunden, Regen wurde jedoch nur in Gebieten ausserhalb der verschmutzten Luftmassen beobachtet. Eine Verzögerung des Ausregnens in verschmutzter Luft verlängert zudem die Lebensdauer von Wolken und könnte so eine gewisse Abkühlung an der Erdoberfläche zur Folge haben.

### Aerosole sind auf vielen Ebenen mit im Spiel

Neben der Wirkung auf Wolken lösen Aerosole noch weitere Rückkopplungseffekte aus: Eine Temperaturänderung verändert die Luftfeuchtigkeit, dies wiederum beeinflusst die chemischen Prozesse in der Luft und damit die Zusammensetzung der Aerosole, was wiederum die Temperatur verändern kann.

Die Absorption und Reflexion von Strahlung durch Aerosole hat auch einen Einfluss auf die Stabilität (Temperaturschichtung) der Atmosphäre. Dies wirkt sich

auf die Windstärke an der Erdoberfläche und damit auf die Aufwirbelung von Staub und die Produktion von Meer-salzaerosolen aus und verändert somit seinerseits wieder die Aerosolkonzentration.

Speziell Russpartikel haben durch ihre Absorption des Sonnenlichtes eine ähnliche Wirkung wie Treibhausgase. Die Stärke dieses Effektes ist allerdings noch schlecht bekannt, vor allem wegen des Fehlens von verlässlichen, repräsentativen Feldmessungen.

### **Aerosolwirkung versus Treibhauseffekt**

Zusammenfassend stellt sich die Frage, ob die kühlende Wirkung der Aerosole die Folgen des Treibhauseffektes aufheben könnte. In diesem Zusammenhang ist wichtig, dass die meisten Aerosole typischerweise nur einige Tage bis Wochen in der Atmosphäre verbleiben, bevor sie ausgewaschen werden, die Treibhausgase hingegen mehrere Jahrzehnte oder Jahrhunderte. Bei gleichbleibenden Emissionen bedeutet dies, dass die Aerosolkonzentration konstant bleibt, während sich die Treibhausgase wegen ihrer viel längeren Lebensdauer weiterhin ansammeln und dadurch deren Konzentration stetig ansteigt. Es ist möglich, dass die leichte globale Abkühlung zwischen 1940 und 1970 teilweise auf den starken Anstieg der Schwefel-emissionen in diesem Zeitraum zurückzuführen ist, so dass eine vielleicht positive Temperaturentwicklung auf diese Weise maskiert wurde.

Die Wirkung der Aerosole konzentriert sich zudem weitgehend auf die grossen Industrieregionen, wo sie oder ihre Vorläufer produziert werden. Je nach Wetterlage werden Aerosolpartikel aber auch über Tausende von Kilometern transportiert wie zum Beispiel bei der Verfrachtung von Saharastaub nach Mitteleuropa.

Zurzeit liegt die kühlende Wirkung der Aerosole im globalen Mittel in einer ähnlichen Grössenordnung wie die Wirkung der Treibhausgase. Das international anerkannte Klimagremium IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) schätzt die heutige Strahlungswirkung für die anthropogenen Treibhausgase auf rund  $+2.5 \text{ W/m}^2$  (das positive Vorzeichen steht für eine Erwärmung). Für die gesamte Wirkung der Aerosole liegt die beste Schätzung bei etwa  $-1.6 \text{ W/m}^2$ , wobei die Unsicherheit bei den Aerosolen sehr gross ist (möglicher Bereich zwischen  $-4$  und  $+0.8 \text{ W/m}^2$ ).

Dies bedeutet, dass der anthropogene Treibhauseffekt zurzeit durch die Wirkung der Aerosole noch abgeschwächt wird und deshalb nicht voll zum Tragen kommt. Jedoch muss davon ausgegangen werden, dass bei konstanten Emissionen der kühlende Effekt der Aerosole im Vergleich zur Aufheizung durch die Treibhausgase in Zukunft an Bedeutung verliert. Die Aerosole hätten dann zwar die globale Erwärmung verzögert, würden sie aber auf längere Sicht nicht verhindern können.

### **Kontaktpersonen:**

PD Dr. Urs Baltensperger, Labor für Atmosphärenchemie, Paul-Scherrer-Institut, 5232 Villigen PSI, Tel. 056/310 24 08, Fax 056/ 310 45 25, e-mail: urs.baltensperger@psi.ch

Prof. Thomas Peter, Institut für Atmosphären- und Klimaforschung ETH Zürich, ETH Hönggerberg HPP, 8093 Zürich, Tel. 01/633 27 55, Fax 01/633 10 58, e-mail: thomas.peter@atmos.umnw.ethz.ch

Dr. Michel J. Rossi, Institut de Génie de l'Environnement (IGE) – PAS, EPF Lausanne, Ecublens, 1015 Lausanne, Tel. 021/693 53 21, Fax 021/ 693 36 26, e-mail: michel.rossi@epfl.ch

### **Erwärmung durch Massnahmen für die Gesundheit?**

Aerosole, insbesondere die zu einem grossen Teil vom Menschen produzierten feinen Partikel (Feinstaub, PM<sub>10</sub>), stellen eine erhebliche Atemwegsbelastung dar. Es werden deshalb weltweit grosse Anstrengungen unternommen, um deren Emissionen zu vermindern. So werden heute viele Kraftwerke mit Entschwefelungsanlagen und Russfiltern ausgerüstet, und auch im Heizöl wird der Schwefelgehalt laufend gesenkt. In der Schweiz sind beispielsweise die Schwefeldioxidkonzentrationen seit Mitte der 80er Jahre auf etwa ein Fünftel bis ein Zehntel gesunken. Aber nicht nur in den Industrieländern, auch in Schwellenländern wie China werden die diesbezüglichen Anstrengungen laufend verstärkt. Die Folge von diesen Anstrengungen ist eine Verminderung der abkühlenden Wirkung der Aerosole. Diese Entwicklung ist ein Hauptgrund dafür, dass im wissenschaftlichen Bericht des IPCC im Jahr 2001 die erwartete Erwärmung im 21. Jahrhundert gegenüber dem Bericht von 1995 nach oben korrigiert werden musste.

---

## **Internetseite**

---

[http://www.grida.no/climate/ipcc\\_tar/wg1/160.htm](http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/160.htm)

Das Kapitel im IPCC-Bericht 2001 zum Thema Aerosole. Quelle: Intergovernmental Panel on Climate Change, WMO / UNEP

---

# Interessante Veranstaltung

---

19. September 2002, 13:30-18:00 (Hauptsymposium)

**Wissenschaft und Zauberberg – Beiträge der Gebirgsforschung zum naturwissenschaftlichen Weltbild**  
(Jahreskongress der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften SANW)

Ort: Kongresshaus Davos

Info: Christian Preiswerk, Generalsekretariat SANW, Bärenplatz 2, 3011 Bern, Tel. 031 310 40 20,

e-mail: preiswerk@sanw.unibe.ch

www.sanw-davos02.ch/Hauptprogramm/Hauptsymposium.pdf

Programm des gesamten Jahreskongress (18.-21. Sept.): www.sanw-davos02.ch

Am 182. Jahreskongress der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften steht aus Anlass des von der UNO ausgerufenen Internationalen Jahrs der Berg die Gebirgsforschung im Zentrum. Mit wachsendem Verständnis für die Veränderungen des globalen Klimas und der Bedeutung der Biodiversität in regionalen Ökosystemen hat die Gebirgsforschung wieder an Bedeutung gewonnen. Neben vielen Workshops (18.-20. September) und Exkursionen (21. September) ist am 19. September das Hauptsymposium den Themen Alpine Geologie, Klimaüberraschungen aus Gletscher und Eisbohrkernen, Bedeutung von Naturkatastrophen für die nationale Identität in der Schweiz, Anpassung der Menschen an Höhenlagen und Leben von Pflanzen in der Kälte gewidmet.

---

## Aktuell: Hochwasser in Europa und Klimaänderung

---

Nach den Hochwassern in weiten Teilen Europas wird häufig die Frage nach einem allfälligen Einfluss der Klimaerwärmung gefragt. Dazu kann Folgendes gesagt werden:

- Aus den gegenwärtigen Kenntnissen über die physikalischen Prozesse, und aus umfangreichen Klimamodellrechnungen für das Ende des 21. Jh., gilt es als wahrscheinlich, dass intensive Niederschläge bei einer globalen Klimaerwärmung häufiger werden. (IPCC-Bericht 2001, [http://www.grida.no/climate/ipcc\\_tar/wg1/008.htm#tabspm1](http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/008.htm#tabspm1))
- Die Klimaerwärmung löst keine Einzel- bzw. Extremereignisse aus, kann solche aber verstärken. Das bedeutet, dass bei speziellen, zufällig auftretenden Wetterlagen, die zu starken Niederschlägen führen, die Niederschlagsmenge in wärmerem Klima höher ausfällt (wegen höherem Wassergehalt in der Luft bei höheren Temperaturen). Es muss also damit gerechnet werden, dass Hochwasser häufiger auftreten als bisher und ein grösseres Ausmass erreichen können.
- Ein Zusammenhang zwischen Klimaänderung und Extremereignissen kann grundsätzlich nicht "nachgewiesen" werden, weil Extremereignisse so selten sind, dass keine statistischen Aussagen zu Trends gemacht werden können. Trendberechnungen zu Überschwemmungen sind ev. längerfristig auf kontinentaler oder globaler Ebene möglich.
- Die Tatsache, dass es ähnliche Hochwasser schon früher gegeben hat, sagt nichts über den Einfluss der Klimaänderung aus. Es kann damit gerechnet werden, dass die erwartete Intensivierung des Wasserkreislaufs zu häufigeren Hochwassern führt. Allerdings kann dieser Prozess regional durch andere Prozesse (z.B. El Niño, Nordatlantische Oszillation) kompensiert oder verstärkt werden.

### **Zusammengefasst:**

Die aufgetretenen Hochwasser sind nicht eine Folge der Klimaerwärmung. Ihr Ausmass ist jedoch wegen der Klimaerwärmung möglicherweise grösser ausgefallen, als dies sonst der Fall gewesen wäre. Die Hochwasser sind weder ein Beweis noch ein Gegenbeweis für die Klimaänderung, sie passen aber ins Bild, das die Klimatologen als Folge der Erwärmung im Laufe des 21. Jahrhunderts erwarten.

### **Auskunftspersonen:**

Dr. Christoph Frei, Institut für Klimaforschung, ETH Zürich, Winterthurerstr. 190, 8057 Zürich,

Tel: 01/635 52 32, Fax: 01/362 51 97, e-mail: christoph.frei@geo.umnw.ethz.ch

Prof. Heinz Wanner, Geographisches Institut, Universität Bern, Hallerstr. 12, 3012 Bern,

Tel: 031/631 88 85, Fax: 031/631 85 11, e-mail: wanner@giub.unibe.ch

