

# Einführung in die Meteorologie Teil III

**Roger K. Smith**

## Einführung in die Meteorologie Teil I

- **Kinetische Gastheorie**
- **Struktur und Zusammensetzung der Atmosphäre**
- **Thermodynamik der Atmosphäre**
  - **Feuchtigkeit**
  - **die Nützung von Aerologischen Diagramme**
- **Luftmassen und Fronten**
- **Es gibt ein Skript von mir!**

## Einführung in die Meteorologie Teil II

- **Synoptische Analyse außertropische Wettersysteme**
- **Wettervorhersage**
- **Die Dynamik der Atmosphäre**
- **Es gibt ein Skript von mir!**

## Einführung in die Meteorologie Teil III

- **Aerosol und Wolkenphysik**
- **Wolken und Gewitter**
- **Strahlung und Strahlungsgesetze**
- **Die globale Energiebilanz**
- **Zusätzlicher Treibhauseffekt und stratosphärischer Ozonabbau**
- **Die allgemeine Zirkulation**

## Skript

- Es gibt auch ein Skript von mir:

### Einführung in die Meteorologie Teil III

- Es steht im Internet zur Verfügung
- Weil sie alle lesen können, werde ich nicht alle Stoff im Skript besprechen
- Trotzdem kann alle dieser Stoff geprüft werden

Buch J. M. Wallace & P. V. Hobbs  
Atmospheric Science: An introductory survey  
Academic Press, 1977

## Aerosol und Wolkenphysik

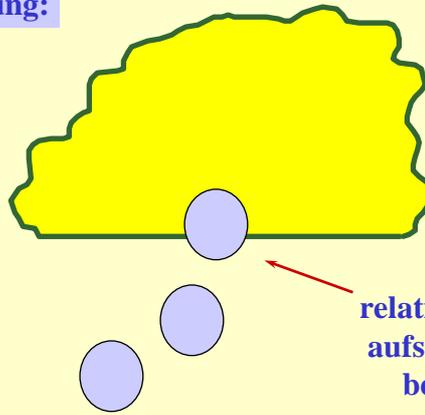
Es handelt sich um die mikrophysikalischen Prozesse, die bei der Bildung von Wolken und Niederschlag ablaufen.

Regentropfen, Schneeflocken usw



## Wolkenbildung

### Bisherige Erklärung:



relative Feuchte der  
aufsteigenden Luft  
beträgt 100%

**In Wirklichkeit sind die Verhältnisse erheblich komplizierter!**

## Probleme

- Die aufsteigende Luft erreicht den Zustand der Sättigung bezüglich einer ebenen Wasseroberfläche.
- In der freien Atmosphäre ist keine Wasseroberfläche vorhanden, an der sich der Wasserdampf auskondensieren könnte.
- Im Labor tritt Kondensation in absolut sauberer Luft erst bei einer relativen Feuchte von rund 800% auf.
- So hohe Übersättigungen werden in der Atmosphäre nicht beobachtet.
- Die gemessenen Maximalwerte liegen nur wenig über 100%.

## Aerosole

- Prozesse müssen wirksam werden, die in der Atmosphäre zur Kondensation bei einer relativen Feuchte um 100% führen.
- Im Gegensatz zu dem Laborversuch besteht die Atmosphäre nicht aus absolut sauberer Luft.
- Sie enthält eine Vielzahl von festen und flüssigen Luftbeimengungen (z. B. **Staubpartikel, Seesalzteilchen**). Diese feinen und feinsten Partikel nennt man **Aerosolteilchen** oder einfach **Aerosole**.
- Die Aerosolpartikel spielen bei der Wolkenbildung eine wichtige Rolle, denn sie wirken als **Kondensationskerne** (bzw. **Gefrierkerne**) für die Wolkentröpfchen.

## Aerosole und Sichtweite



Nordthailand

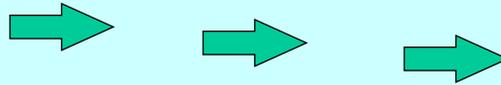


Nordostaustralien

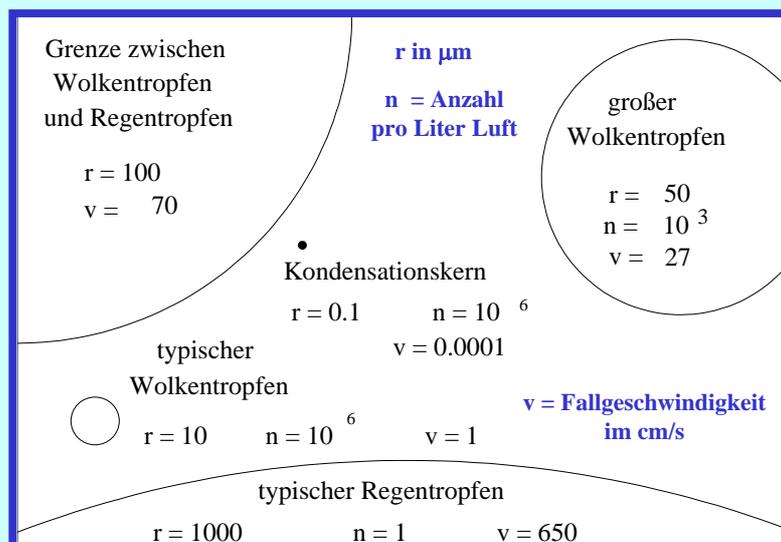
- Die Zahl der Aerosolpartikel, die in der Luft enthalten sind, bestimmt die Sichtweite.
- In absolut sauberer Luft würde die Sichtweite ungefähr 300 km betragen.

## Regentropfen & Wolkentropfen

- Das wahrscheinlich kleinste meteorologische Phänomen, das man ohne spezielle Meßinstrumente beobachten kann, ist ein Regentropfen oder eine Schneeflocke.
- Für den Wolkenphysiker ist ein **Regentropfen** jedoch ein sehr großes Gebilde, denn er entsteht aus Millionen von **Wolkentropfen**.
- Die **Wolkentropfen** sind wiederum hundertmal größer als die **Kondensationskerne** (Radius beträgt nur etwa  $0,1 \mu\text{m}$ ).



## Größenvergleich von Regentropfen, Wolkentropfen und Kondensationskernen



## Messung der Aerosolkonzentration

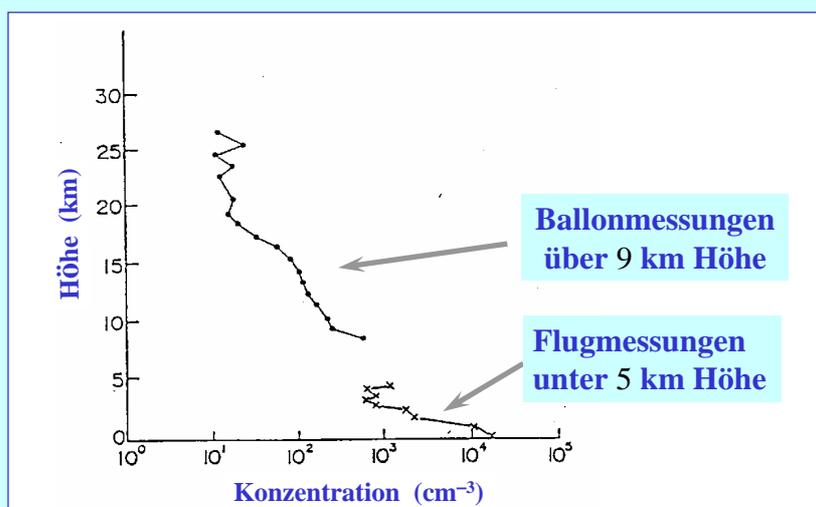
- Ein Kondensationskernzähler wird von dem schottischen Physiker **John Aitken** (1839-1919) entwickelt.
- In diesem Gerät wird gesättigte Luft schnell expandiert, wodurch die abgekühlte Luft dann gegenüber Wasser um einige hundert Prozent übersättigt ist.
- Bei einer derartig hohen Übersättigung kondensiert der Wasserdampf auf nahezu allen Aerosolpartikeln, so daß eine Wolke von kleinen Wassertröpfchen entsteht.
- Die Tröpfchen werden auf einer Glasplatte mit eingraviertem Zählgitter gesammelt und unter dem Mikroskop ausgezählt.

- Auf diese Weise läßt sich die Konzentration der Tröpfchen in der Wolke bestimmen, die annähernd gleich der Aerosolkonzentration ist.

## Aerosolkonzentration

- Die Aerosolkonzentration variiert zwischen verschiedenen Orten auf der Erde sehr stark.
- Auch an einem festen Ort gibt es zeitliche Schwankungen um eine Größenordnung.
- Typische Teilchenanzahlen sind  $1000/\text{cm}^3$  über den Ozeanen,  $10000/\text{cm}^3$  über den Kontinenten und bis weit über  $100000/\text{cm}^3$  in verschmutzter Stadtluft.
- Die Kontinente sind eine wichtige Aerosolquelle und dort werden insbesondere in Großstädten und Industriegebieten viele Teilchen freigesetzt.

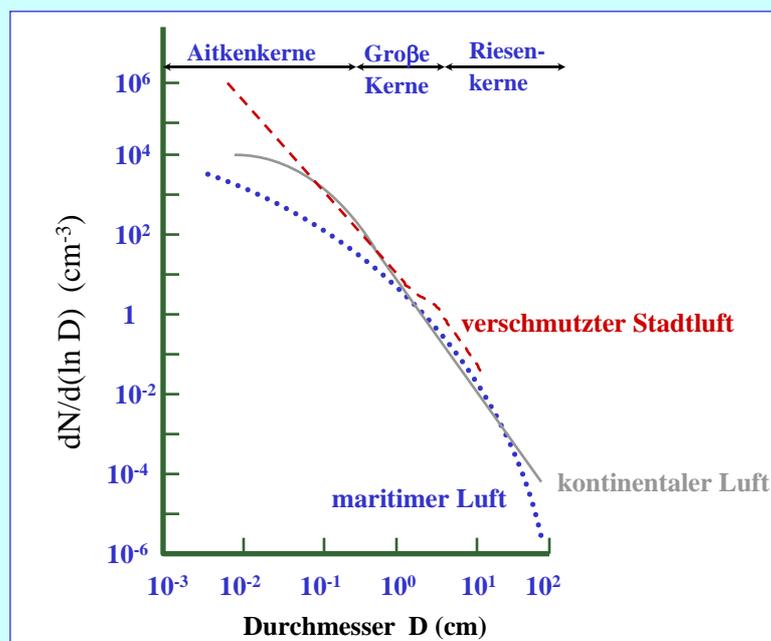
### Höhenabhängigkeit der Aerosolkonzentration über Deutschland am 5. Oktober 1973



Die Teilchenanzahl nimmt in größeren Höhen stark ab.

## Aerosolkonzentration und Größe

- Der Durchmesser der Aerosolpartikel variiert zwischen  $10^{-4}$   $\mu\text{m}$  und  $10^2$   $\mu\text{m}$ .
- Die Konzentration schwankt in Abhängigkeit von Ort und Teilchengröße zwischen  $10^7/\text{cm}^3$  und  $10^{-6}/\text{cm}^3$ .
- Meßtechniken zur Bestimmung von Größe und Konzentration der Aerosolteilchen über einen so großen Bereich werden von Wallace und Hobbs (Seite 145) beschrieben.
- Das nächste Bild zeigt die Anzahlverteilung der Aerosolpartikel in kontinentaler Luft, maritimer Luft und verschmutzter Stadtluft.

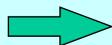


Anzahlverteilung der Aerosolteilchen

- Man kann zeigen (s. Wallace und Hobbs Seite 147), daß die Riesenteilchen und die Aerosolteilchen mit einem Durchmesser zwischen  $0,2\ \mu\text{m}$  und  $2\ \mu\text{m}$  (sogenannte **große Teilchen**) an der Gesamtmasse des kontinentalen Aerosols gleich großen Anteil haben, obwohl es wesentlich mehr große Teilchen als Riesenteilchen gibt.
- So haben auch die Aitkenkerne eine hohe Anzahlkonzentration, tragen jedoch nur ungefähr 10% bis 20% zur Gesamtmasse des Aerosols bei.

## Ursprung von Aerosole

- Die kleinsten Teilchen (**Aitkenkerne**) entstehen hauptsächlich bei Verbrennungsprozessen.
- Wichtige Quellen sind menschliche Aktivitäten (**Heizung, Industrie, Verkehr**) sowie **Waldbrände** und **Vulkanausbrüche**.
- In **verschmutzter Stadtluft** ist die Konzentration der Aerosolteilchen mit einem Durchmesser unter  $0,2\ \mu\text{m}$  am höchsten.
- Aitkenkerne kommen aber auch in kontinentaler und maritimer Luft in beachtlichen Mengen vor.



Es muß noch weitere Quellen für Aitkenkerne geben

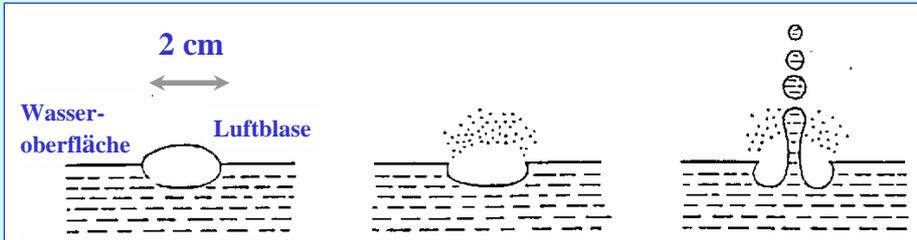
## Andere Quellen von Aerosole

- Eine solche Quelle ist die chemische Umwandlung von atmosphärischen Spurengasen zu Aerosolpartikeln
- Bezeichnet in der Fachliteratur als **gas-to-particle conversion**.
- Aerosol kann sich auf diese Weise in übersättigten Gasen bilden, infolge **chemischer Reaktionen** entstehen (wie z. B. Schwefelsäuretröpfchen durch Oxidation von Schwefeldioxid) oder **ein Produkt photochemischer Reaktionen** sein, verbunden mit der Absorption von solarer Strahlung durch die Moleküle.

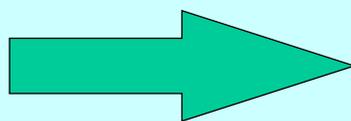
## Weitere Quellen von Aerosole

- Die **Aufwirbelung von Staub** (besonders in ariden Gebieten) oder von **pflanzlichen Sporen und Pollen**, sowie das **Zerplatzen von Luftblasen** an der Wasseroberfläche der Ozeane. Durch diese Produktionsmechanismen entstehen hauptsächlich große Teilchen und Riesenteilchen.
- Über den Ozeanen gelangen Seesalzteilchen in die Atmosphäre, wenn die in der Gischt der Wellen erzeugten Luftbläschen zerplatzen.
- Einige Tropfen werden auch direkt von den Schaumkronen der Wellen in die Luft gewirbelt.
- Diese Tropfen sind aber so groß, daß ihre Verweildauer in der Atmosphäre nur sehr klein ist.

## Vorgänge beim Zerplatzen einer Luftblase auf der Ozeanoberfläche



**Weltweite Aerosolproduktion  
(Angaben in  $10^{12}$  g pro Jahr)**



Quelle	Durchmesser der Aerosolteilchen	
	> 5µm	< 5µm
a) <b>Natürliche Quellen</b>		
Seesalz	500	500
gas-to-particle conversion	100	470
aufgewirbelter Staub	250	250
Waldbrände	30	5
Meteoritenstaub	10	0
Vulkanausbrüche (stark variabel)	?	25
<b>Summe</b>	890 (+?)	1250
b) <b>Anthropogene Quellen (1968)</b>		
gas-to-particle conversation	25	250
Industrie	44	12
fossile Brennstoffe (stationäre Quellen)	34	10
direkte Partikelinjektion	2	0,5
Verkehr	0,5	2
sonstige Quellen	23	5
<b>Summe</b>	128,5	279,5

### Gesamtmasse der freigesetzten Aerosolteilchen

- Die Gesamtmasse der aus natürlichen Quellen freigesetzten Aerosolteilchen war fünfmal so hoch wie die aus anthropogenen Quellen im Jahr 1968.
- Diese Schätzung ist jedoch relativ unsicher: Einige Autoren setzen den anthropogenen Anteil an den atmosphärischen Aerosolquellen mit nur 5% an, andere dagegen mit 45%.
- Bekannt ist, daß die Aerosolteilchen in der Großstadtluft hauptsächlich anthropogenen Ursprungs sind.
- Für das Jahr 2000 wird mit einer Verdoppelung der anthropogenen Aerosolproduktion gerechnet

- **Im Mittel müssen die aus den verschiedenen Quellen freigesetzten Aerosolteilchen aus der Atmosphäre wieder abgeschieden werden, denn sonst würde die Aerosolkonzentration ständig steigen.**
- **Es gibt also auch Senken für Aerosolpartikel.**

### **Senken für Aerosolpartikel**

- **Oft verbessert sich die Sichtweite nach dem Durchzug eines Niederschlagsgebietes, weil die aerosolhaltige Luft durch die Niederschlagsteilchen gereinigt wurde.**
- **Man schätzt, daß 80% bis 90% der Aerosolmasse, die pro Jahr weltweit aus der Atmosphäre wieder zur Erdoberfläche gelangt, durch Niederschläge ausgewaschen wird.**
- **Die Aerosolpartikel dienen als Kondensations- bzw. Gefrierkerne für die Wolkenteilchen aus Wasser bzw. Eis.**

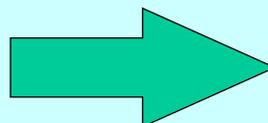
- Die Fallgeschwindigkeiten von Aerosolpartikeln mit einem Durchmesser von mehr als  $1 \mu\text{m}$  sind so groß, daß viele Partikel auf Grund ihrer Schwerkraft ausfallen (**trockene Ablagerung**).
- Beispielsweise beträgt die Fallgeschwindigkeit eines Aerosolteilchens mit einem Durchmesser von  $1 \mu\text{m}$  ( $10 \mu\text{m}$ ) ungefähr  $3 \times 10^{-5} \text{ms}^{-1}$  ( $3 \times 10^{-3} \text{ms}^{-1}$ ).
- Ungefähr 10% bis 20% der jährlich produzierten Aerosolmasse erreicht durch trockene Ablagerung wieder die Erdoberfläche.

- Eine weitere Senke für Aerosolteilchen, insbesondere für die in großer Anzahl vorhandenen Aitkenkerne, ist die **Koagulation**.
- Darunter versteht man das **Zusammentreffen und Zusammenbleiben** von Teilchen etwa gleicher Größe.
- Dem Verlust kleiner Teilchen steht also eine Zunahme größerer Teilchen gegenüber.
- In dem nächsten Bild sind die verschiedenen Quellen und Senken für Aerosolpartikel zusammengefaßt.
- In dem nächsten Bild ist die Oberflächenverteilung (d.h. die Oberfläche  $S$  als Funktion des Teilchendurchmessers  $D$ ) für maritime, kontinentale und verschmutzte Luft angegeben.
- Die Kenntnis der Oberflächenverteilung ist wichtig bei der Untersuchung der optischen Wirksamkeit der Aerosole.

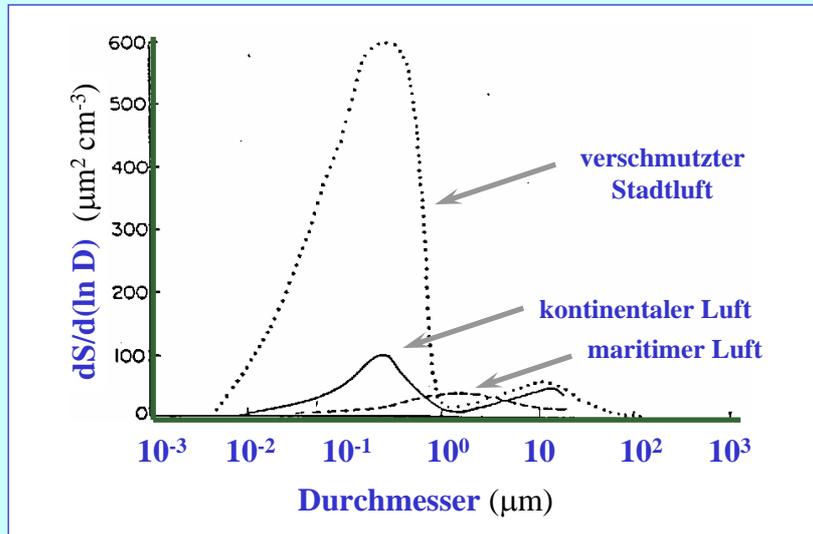
**Die Quellen, Senken und Verweilzeiten der Aerosolteilchen in der Troposphäre.**

Bezeichnung	Aitkenkerne	Grosse Kerne	Riesenkern	
Quellen	<p>Verbrennung</p> <p>Gas-to-partical Conversion</p>		<p>aufgewirbelte Staub</p> <p>Flugssche Seesalz, Blütenstaub</p> <p>Emission von Riesenkern durch die Industrie</p>	
Senken	<p>Koagulation von Aitkenkerne</p> <p>Aufnahme in Wolkentropfen</p>		<p>Auswaschen in durch Niederschlag trockene Ablagerung</p>	
Verweilzeit	weniger als eine Stunde in verschmutzter Luft oder in Wolken	Tage	Stunden bis Tage	Minuten bis Stunden

- In dem nächsten Bild ist die Oberflächenverteilung (d.h. die Oberfläche  $S$  als Funktion des Teilchendurchmessers  $D$ ) für maritime, kontinentale und verschmutzte Luft angegeben.
- Die Kenntnis der Oberflächenverteilung ist wichtig bei der Untersuchung der optischen Wirksamkeit der Aerosole.



## Oberflächenverteilung der Aerosolteilchen



## Aerosole und Chemie

- Aerosole spielen eine wichtige Rolle bei vielen in der Atmosphäre ablaufenden chemischen Prozessen.
- Auf der Oberfläche fester Aerosole können Spurengase angelagert werden, die dann untereinander reagieren.
- Wenn Spurengase in flüssigen Aerosolpartikeln gelöst sind, können ebenfalls chemische Reaktionen ablaufen.
- Besonders deutlich wird der Zusammenhang zwischen Aerosolen und Atmosphärenchemie in stark verschmutzter Luft.

- In einer feuchten, stabil geschichteten Luftmasse unterhalb einer Inversion kann sich das von Industrie und privaten Haushalten produzierte Aerosol und Schwefeldioxid (neben anderen Abgasen) immer mehr ansammeln.
- Unter diesen Bedingungen bilden sich Sulfate und Schwefelsäuretröpfchen in hohen Konzentrationen. Derartigen **Smog** gab es häufig in London, bevor es verboten wurde, fossile Brennstoffe (u. a. Holz, Kohle) am offenen Feuer zu verbrennen.
- Der Ausdruck **Smog** bezeichnete ursprünglich das Aerosol, das im mit Rauch (**smoke**) verschmutzten Nebel (**fog**) entsteht.

- Heute wird der Begriff **Smog** auch auf eine durch photochemische Reaktionsprodukte (z. B. Ozon) verunreinigte Luft angewandt.
- Diese Art (Photo-) Smog kommt besonders in Los Angeles vor, weil dort oft starke Sonneneinstrahlung herrscht und gleichzeitig die Luft stabil geschichtet ist (**kühle Seeluft in Bodennähe, heiße Kontinentalluft in der Höhe**).



Foto



**Photo-Smog in Los Angeles**

### **Oberflächenverteilung der Aerosolteilchen**

- **Die Streuung und Absorption von Strahlung durch die Aerosole hat wichtige Auswirkungen auf die Sichtweite und den Strahlungshaushalt in der Atmosphäre.**
- **Die Aerosolteilchen mit einem Durchmesser zwischen  $0,2 \mu\text{m}$  und  $2 \mu\text{m}$  sind vor allem für die Streuung von Strahlung im sichtbaren Wellenlängenbereich verantwortlich.**
- **Viele dieser Teilchen quellen bei zunehmender relativer Feuchte auf, denn sie haben die Fähigkeit, die Feuchtigkeit in der umgebenden Luft teilweise zu absorbieren.**

- Bei hoher relativer Feuchte vermindern diese Teilchen die Sichtweite durch die erhöhte Streuung des Lichts; es entsteht **Dunst**.
- Seesalzteilchen z. B. vergrößern bei einem Anstieg der relativen Feuchte von 60% auf 80% ihre Streuwirkung um das Dreifache.

### Auswirkungen auf das Klima

- Obwohl die Aerosole nur einen geringen Teil der Strahlung absorbieren oder streuen (**Wolken und Spurengase haben einen wesentlich größeren Einfluß**), könnte ein stetiges Wachstum der Aerosolkonzentration infolge menschlicher Aktivitäten die Strahlungsbilanz der Erde und damit das Klima ändern.
- Die Absorption solarer Strahlung durch eine größere Anzahl von Aerosolteilchen führt zu einer Erwärmung.
- Andererseits wird durch mehr Aerosolteilchen auch mehr Strahlung zurück in den Weltraum gestreut, gleichbedeutend mit einer Abkühlung der Atmosphäre.

- **Die Auswirkungen des Anstiegs der Aerosolkonzentration seit Beginn dieses Jahrhunderts auf die globale Mitteltemperatur sind noch umstritten.**
- **Es ist schon festgestellt, daß die starke Erhöhung der Aerosolkonzentration nach heftigen Vulkanausbrüchen in der Stratosphäre eine Erwärmung bis zu 3K zur Folge hat.**
- **Die Teilchen, die in die Troposphäre geschleudert, werden relativ schnell wieder ausgewaschen.**
- **Im Gegensatz dazu, kann die Störung der Teilchenkonzentration in der Stratosphäre über ein Jahr andauern.**
- **Die Troposphäre erreicht während dieser Zeit weniger Sonnenstrahlung, was zu einem geringen Temperaturrückgang am Erdboden führt.**

### Zusammenfassung - 1

- **Die Luft ist nicht sauber, sie enthält Millionen von Aerosolteilchen.**
- **Der Durchmesser der Aerosolpartikel variiert zwischen  $10^{-4}$   $\mu\text{m}$  und  $10^2$   $\mu\text{m}$ .**
- **Die Konzentration schwankt in Abhängigkeit von Ort und Teilchengröße zwischen  $10^7/\text{cm}^3$  und  $10^{-6}/\text{cm}^3$ .**
- **Im Jahr 1968 war die Gesamtmasse der aus natürlichen Quellen freigesetzten Aerosolteilchen fünfmal so hoch wie die aus anthropogenen Quellen.**

## Zusammenfassung - 2

### ➤ Aerosole sind wichtig:

- sie dienen als **Kondensations- und Gefrierkerne in Wolken**
- sie beeinflussen die **Sichtweite**
- sie beeinflussen durch **Streuung und Absorption die Strahlungsbilanz**
- sie bestimmen die **Luftqualität**
- sie beeinflussen das **Klima**

**Ende**