

Aerosol in der Atmosphäre

15.11.2006

Aerosole in der Atmosphäre

Wodurch entstehen Wolken?

Dazu braucht man gesättigte Luft und Aerosol



Aerosol in der Atmosphäre

- Entstehung & chemische Zusammensetzung
- Größenverteilung, physikalische Eigenschaften
- Umwandlungsprozesse
- Aerosol und Wolken
- Senken

primäres/sekundäres Aerosol

Aerosol kann direkt als nicht-flüchtige Flüssigkeit oder Festkörper in die Atmosphäre gelangen: primäres Aerosol

Aerosol kann durch Umwandlung von Gas in Teilchen in der Atmosphäre selbst entstehen: sekundäres Aerosol

Menschliche Aktivitäten tragen zu beiden Typen bei, aber wahrscheinlich mehr zum sekundären Aerosol, v.a. durch Emission von SO_2

Quellen von primärem Aerosol



sea salt (spray)



dust particles



volcanic ashes



oil droplets (forest fires)



anthropogenic : industry,
burning fossil fuels, ...)

major sources for
dispersion aerosols

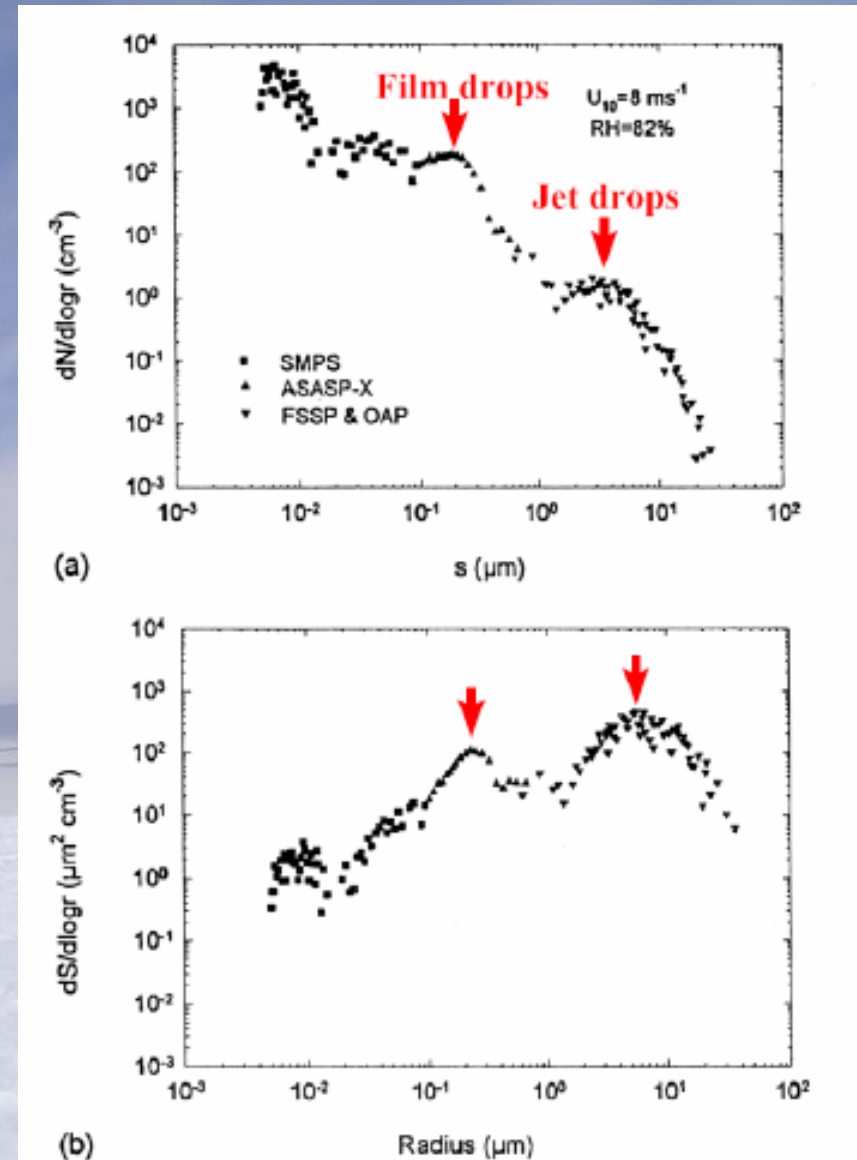
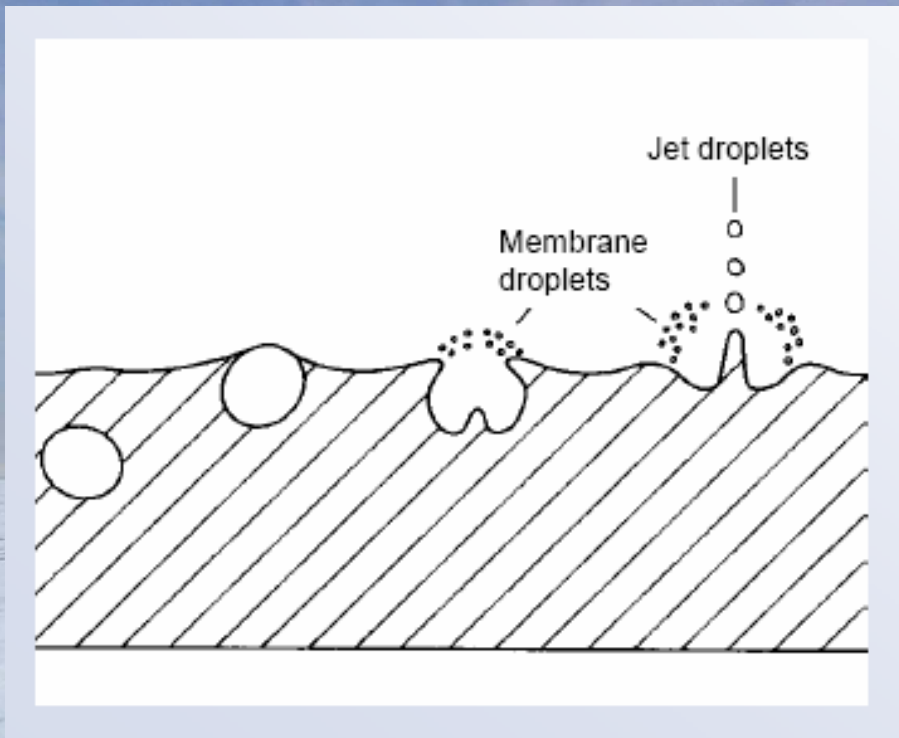
Eintrag von Staub in die Atmosphäre

- Kleine Teilchen können nicht direkt in die Atmosphäre gelangen
(in Grenzschicht vor Wind geschützt)!
- Größere Sandkörner werden vom Wind verweht (Sanddünen!)
- Bewegung eines großen Sandkorns "springend"
- Beim Landen werden auch kleine Teilchen aufgewirbelt und davongetragen



Eintrag von Seesalz in die Atmosphäre

- Kein direkter Eintrag durch Gischt-Tröpfchen
- Aufsteigende Luftblasen platzen an Oberfläche



Zusammensetzung Seesalz

Hauptbestandteile:

Na

Cl

Br

I

SO₄

Mg

Ca

Nicht nur NaCl (Kochsalz)

Br⁻ und I⁻ wichtig für Ozonabbau in Grenzschicht, im Frühling in Polargebieten

Ca²⁺ und SO₄²⁻ bilden Gips-Kristalle

Mg²⁺

Aerosol aus Biomassenverbrennung

Waldbrand, Brandrodung, Verbrennung von Biomasse erzeugt "Rauch" aus Teilchen mit unterschiedlichster Grösse

Zusammensetzung:

- Asche K_2CO_3 ("Pottasche")
- teilweise verbranntes organisches Material
- Russ ("black carbon") aus elementarem Kohlenstoff

Aerosol aus anthropogenen Verbrennungsprozessen

Verbrennung von fossilen Rohstoffen unterscheidet sich von Biomassenverbrennung:

- findet bei viel höherer Temperatur statt
- effizientere Verbrennung, weniger Russ

Russteilchen entstehen vor allem in Dieselmotoren
Abgas-Filtertechnik effektiv, aber teuer

Flugzeuge emittieren weniger Russ (1mg-100mg pro kg Kerosin)
dafür direkt in 10km Höhe

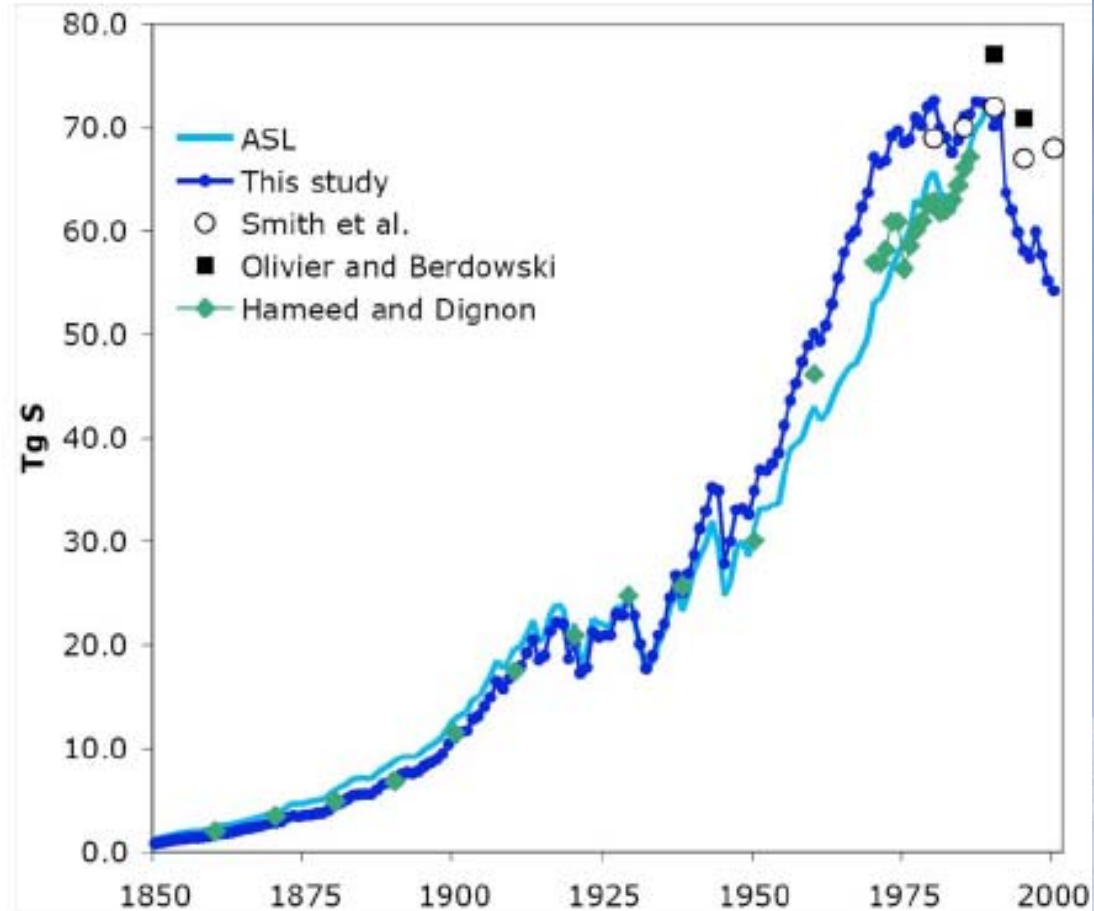


Quellen von sekundärem Aerosol: SO_2

Vorhanden in Aminosäuren,
biologischem Material
Phytoplankton ($\text{DMS (CH}_3)_2\text{S}$)
In Kohle, Öl, Gas
freigesetzt bei Verbrennung



Umwandlung von SO_2
In H_2SO_4
Extrem niedriger Dampfdruck
In feuchter Luft



Reversal in the trend of global anthropogenic sulfur emissions,
see <http://www.economics.rpi.edu/workingpapers/rpi0504.pdf>

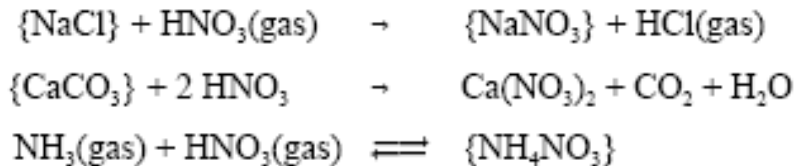
Quellen von sekundärem Aerosol: NO_2

NO_2 aus Verbrennung bei hohen Temperaturen



Salpetersäure: viel höherer Dampfdruck als Schwefelsäure
Bildet kein neues Aerosol

Reaktion mit anderen Aerosolteilchen:



Sekundäres organisches Aerosol

"VOC" - volatile organic compound

Grösstenteils natürlicher Ursprung

(u.a. Terpene (z.B. $C_{10}H_{16}$) aus Vegetation)

Nur kleiner Teil wird umgewandelt (u.a.
durch Reaktion mit Ozon)



Entwicklung von primärem/sekundärem Aerosol

- Unterscheidung primär/sekundär nur möglich bei jungem, frisch gebildetem Aerosol
- danach: Vermischung durch
 - Koagulation
 - Cloud processing
 - Particle coating (Ummantelung, Vergütung)

Entwicklung von Aerosol

- Extern gemischtes Aerosol

Unterschiedl. Komponenten, jedes Aerosolteilchen besteht nur aus 1 Komponente

- Intern gemischtes Aerosol

Aerosolteilchen setzen sich aus unterschiedl. Komponenten zusammen

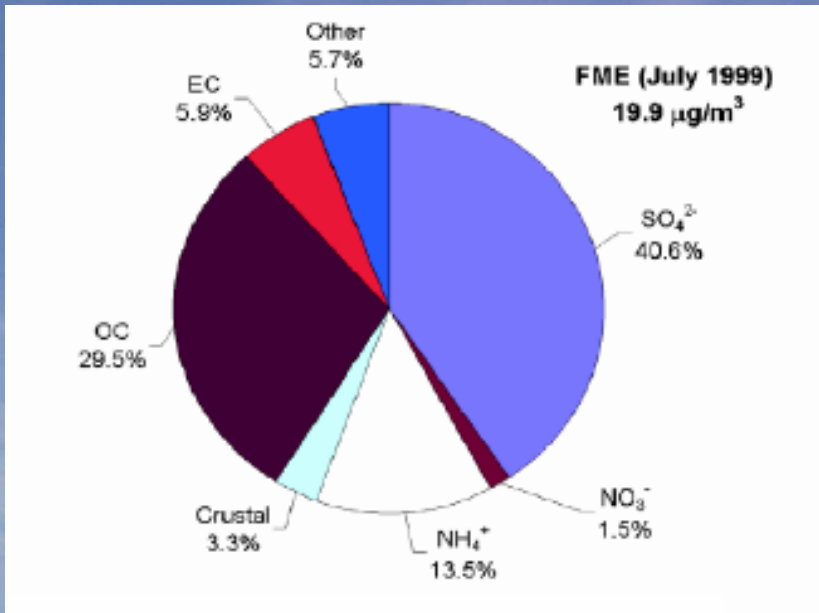
Altes Aerosol ist intern gemischtes Aerosol

Zusammensetzung Aerosol

EC: Elementarer Kohlenstoff
OC: Organische Kohlenstoffverbindungen

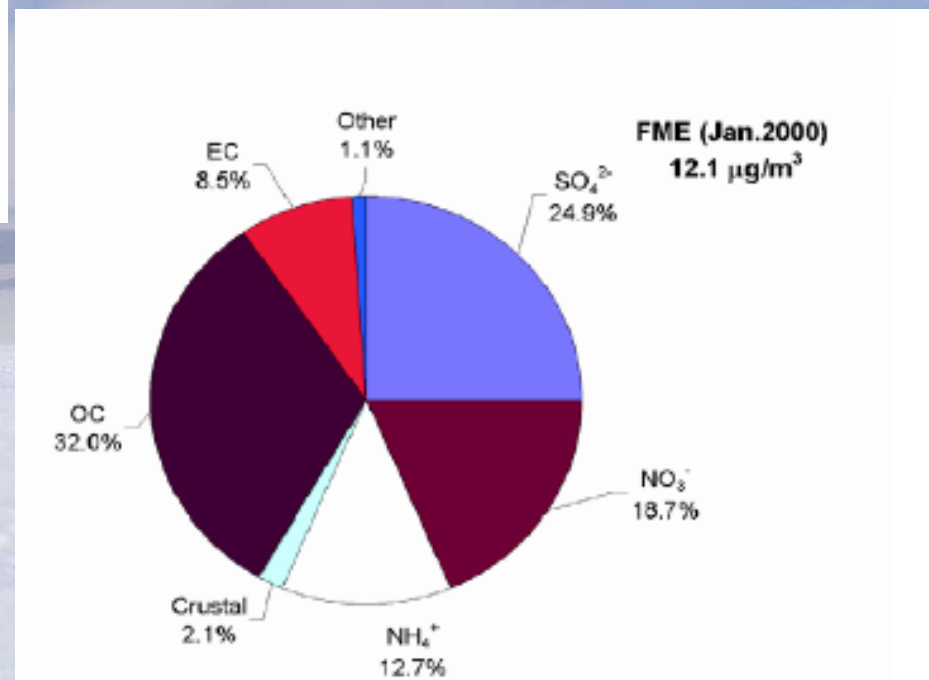
Inorganic compounds ~50% (by mass)

Carbonaceous material ~40% (by mass)



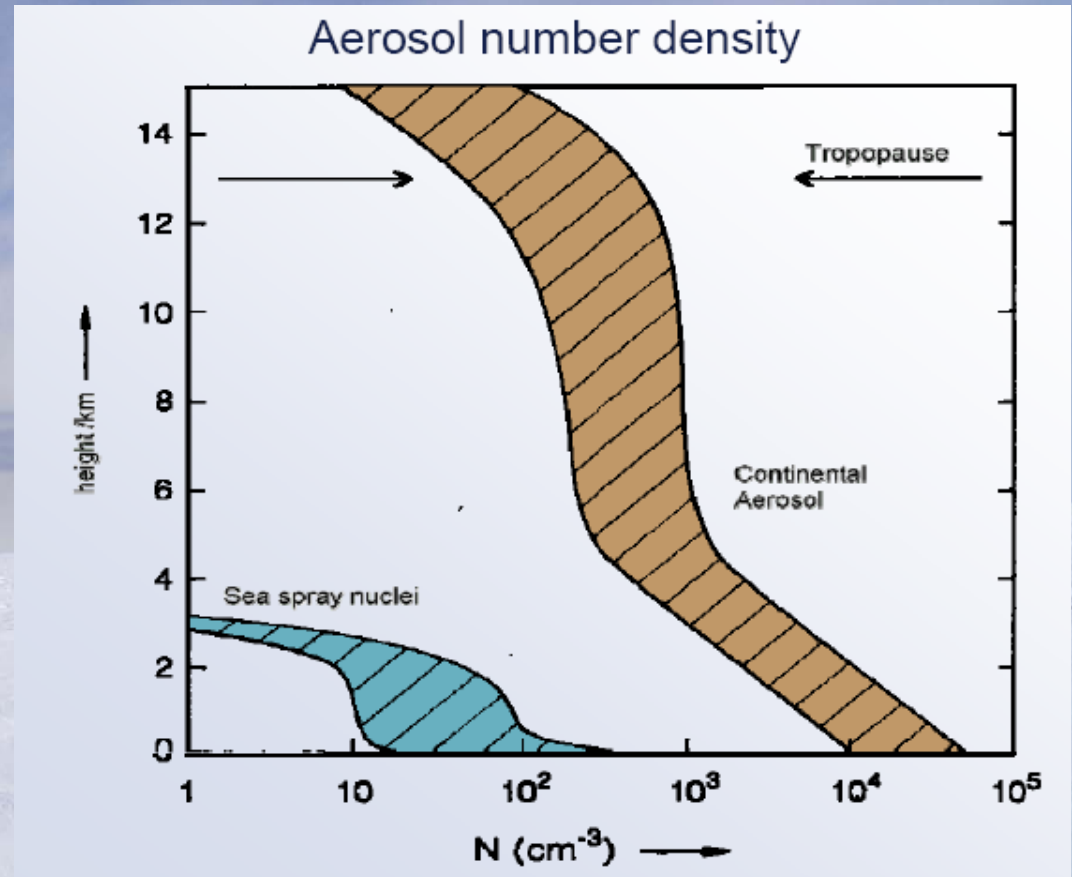
Summer: Sulfate dominates.

Winter: Nitrate/carbonaceous particles play bigger roles.



Parametrisierung in Aerosol-Klassen

- kontinental-sauber
- kontinental-verschmutzt
- Maritim-sauber
- Maritim-verschmutzt
- Sahara-Staub
- arktisch/antarktisch
sauber



Aerosol und Optische Dicke

$$-\int_0^x \beta_{ext,\lambda} \cdot dx = \tau_{ext,\lambda}$$

$\beta_{ext,\lambda}$

Spektraler Extinktionskoeffizient

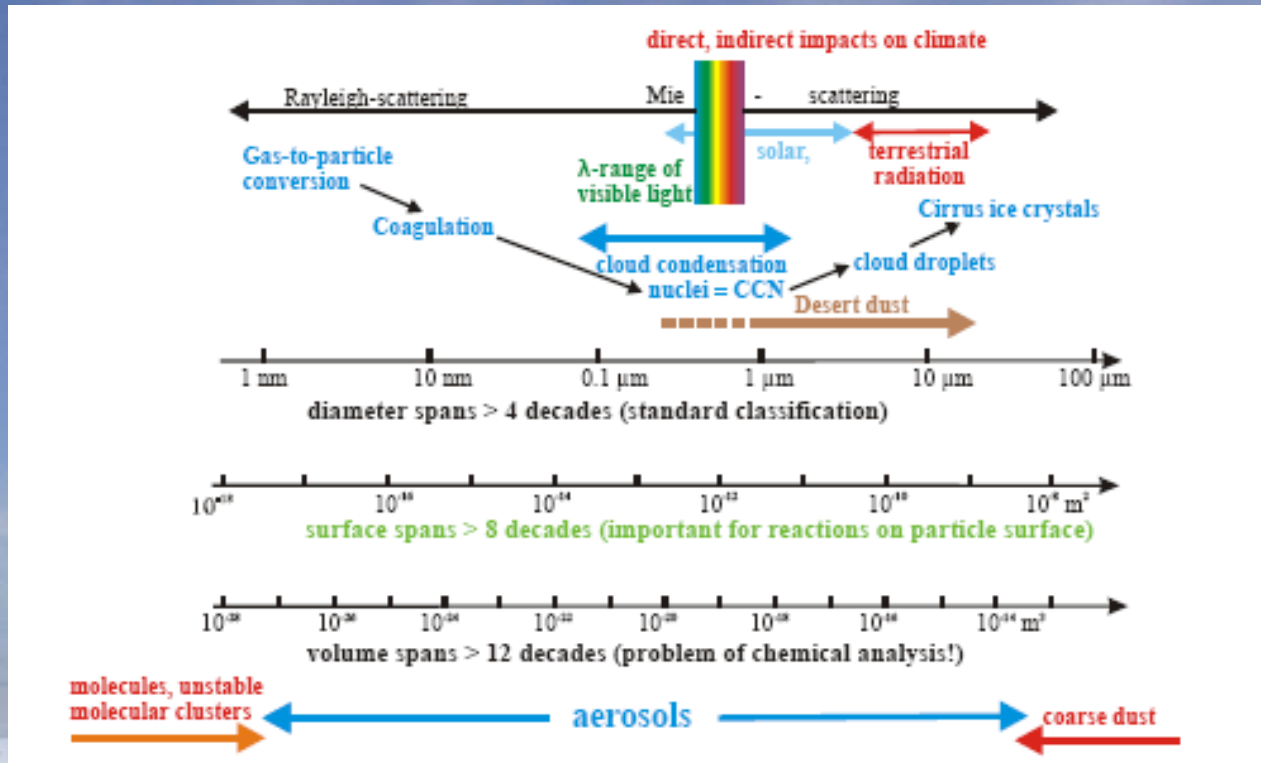
Die dimensionslose, spektrale optische Dicke bezieht sich auf einen lotrechten Strahlungspfad und charakterisiert den Trübungsgrad der Atmosphäre unabhängig vom tatsächlichen Sonnenstand sowie dem Beobachtungswinkel. Für den schrägen Strahlungspfad gilt:

$$T_{\lambda,\theta} = \exp(-\tau_{\lambda,0}/\cos \theta)$$

Gesamte Aerosolmasse und optische Dicke

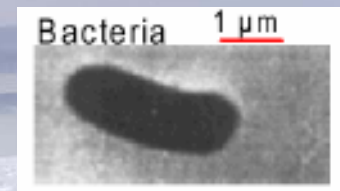
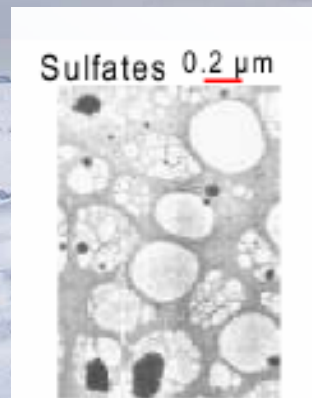
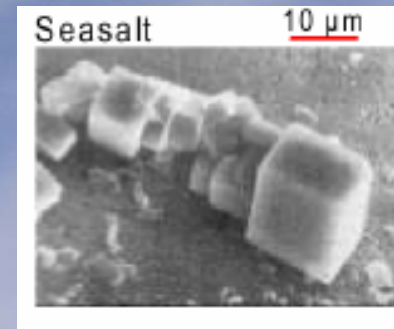
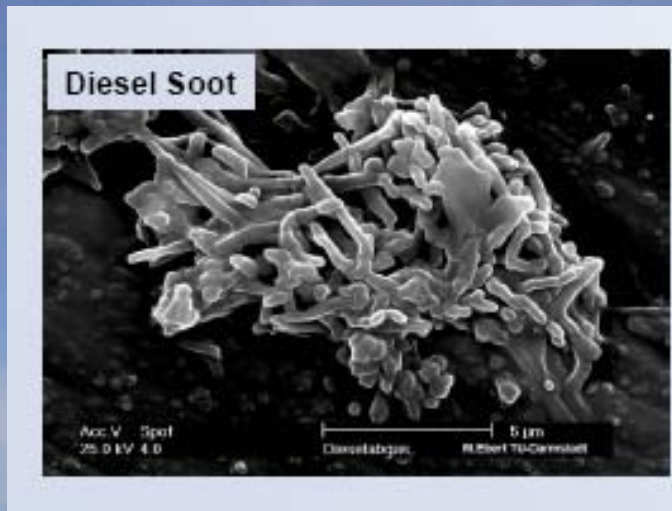
Main sources for aerosol <i>Estimates of Andreae (1994)</i>		Approx. global emission flux [Tg / year]	Global mean optical thickness at 550 nm
N a t u r a l	<i>Primary aerosols</i>		
	Desert and semi-arid areas (mineral dust)	1500	0.023
	Marine sea spray	1300	0.003
	Volcanic dust	33	0.001
	Biogenic (pollens, debris)	50	0.002
	<i>Secondary aerosols</i>		
	Sulphates from biogenic gases	90	0.017
	Sulphates from volcanic SO ₂	12	0.002
	Nitrates from nitrogen oxides	55	0.017
	Organics from volatile organic compounds (VOC)	22	0.001
	TOTAL	~3060	0.066
A n t h r o p o g e n i c	<i>Primary aerosols</i>		
	Industrial dust	100	0.004
	Soot	10	0.006
	<i>Secondary aerosols</i>		
	Organics from biogenic (VOC)	10	0.027
	Sulphates produced by SO ₂	190	0.027
	Produced from biomass combustion gases	90	0.002
	Nitrates from nitrogen oxides	50	0.003
	TOTAL	~390	0.069

Größenverteilung von Aerosol



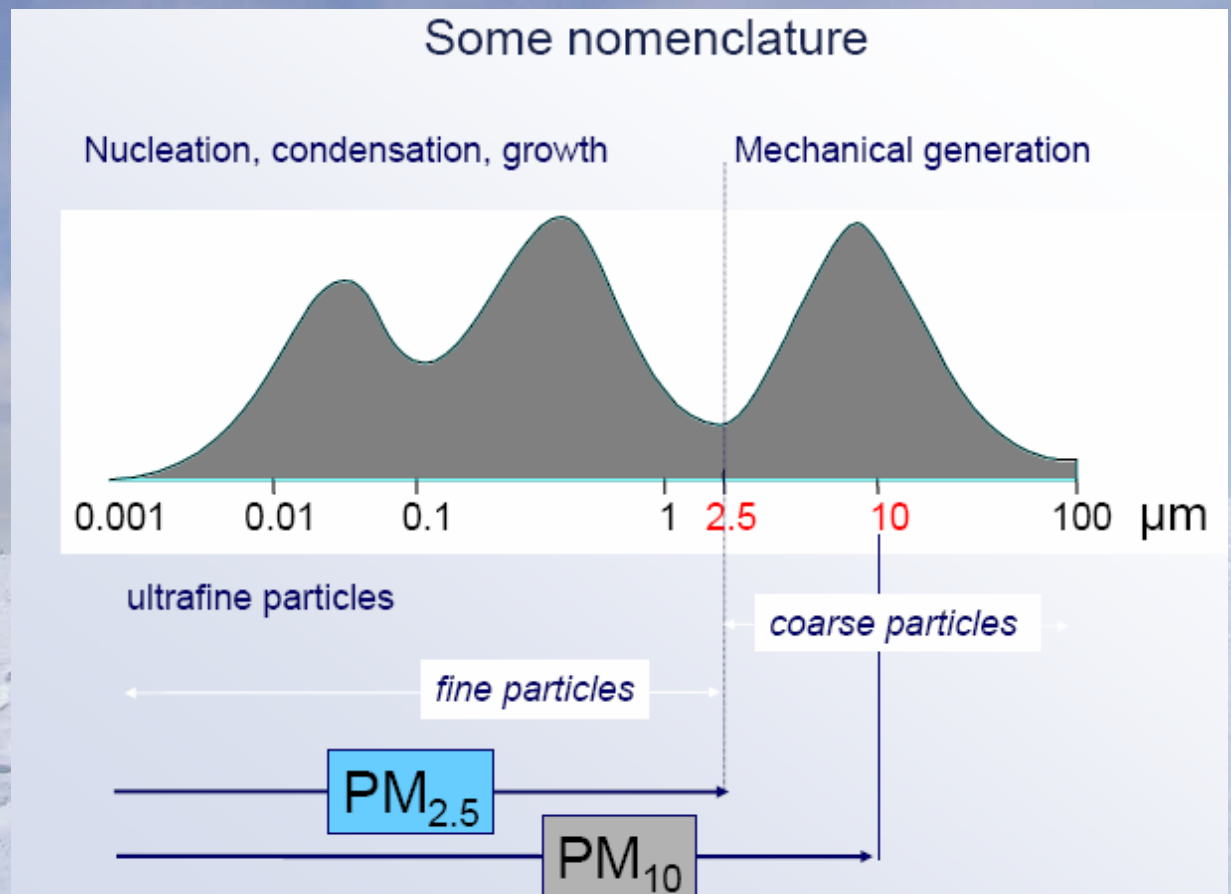
Size range of aerosol particles in terms of diameter, surface area, and volume (\propto particle mass)

Aerosol unter dem Elektronenmikroskop

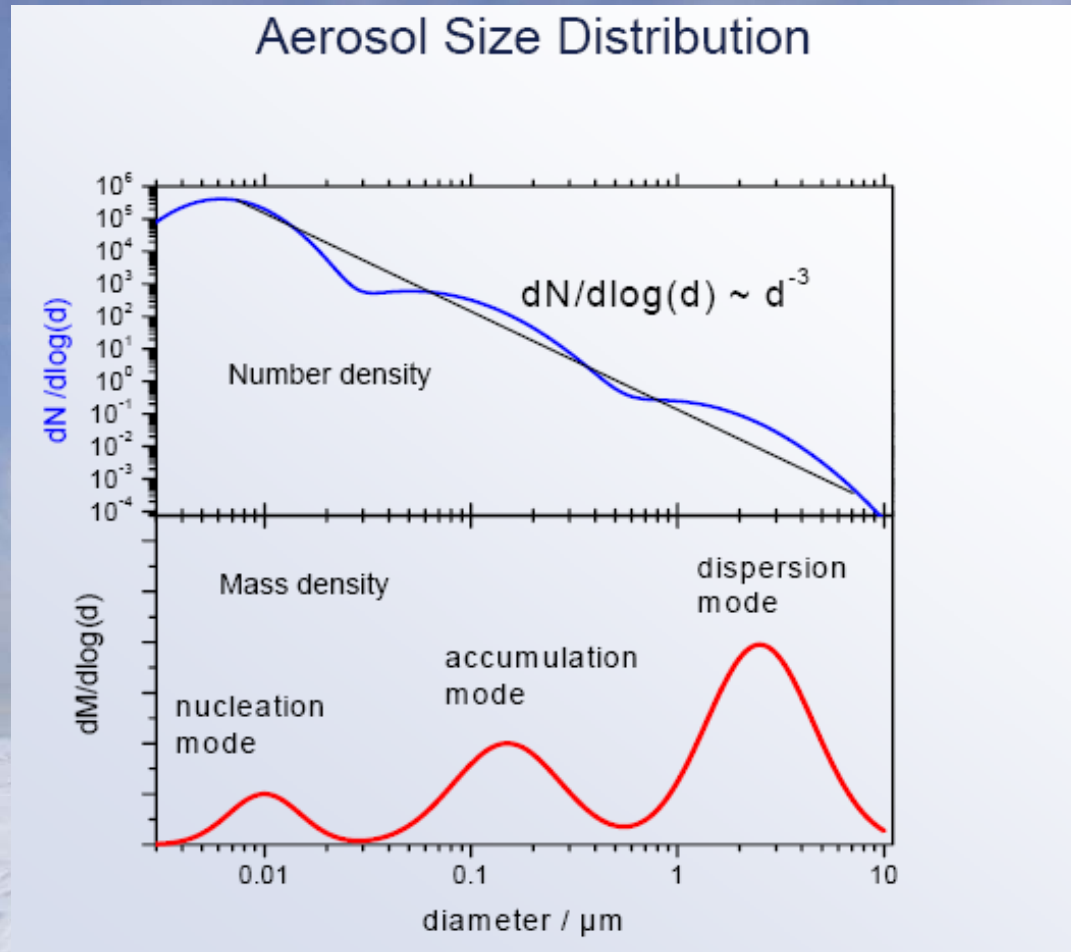


Größenverteilung

- Aitken-Kerne ($< 0,5 \mu\text{m}$)
- Grosse Kerne ($0,5-2 \mu\text{m}$)
- Riesenkerne ($> 2 \mu\text{m}$)

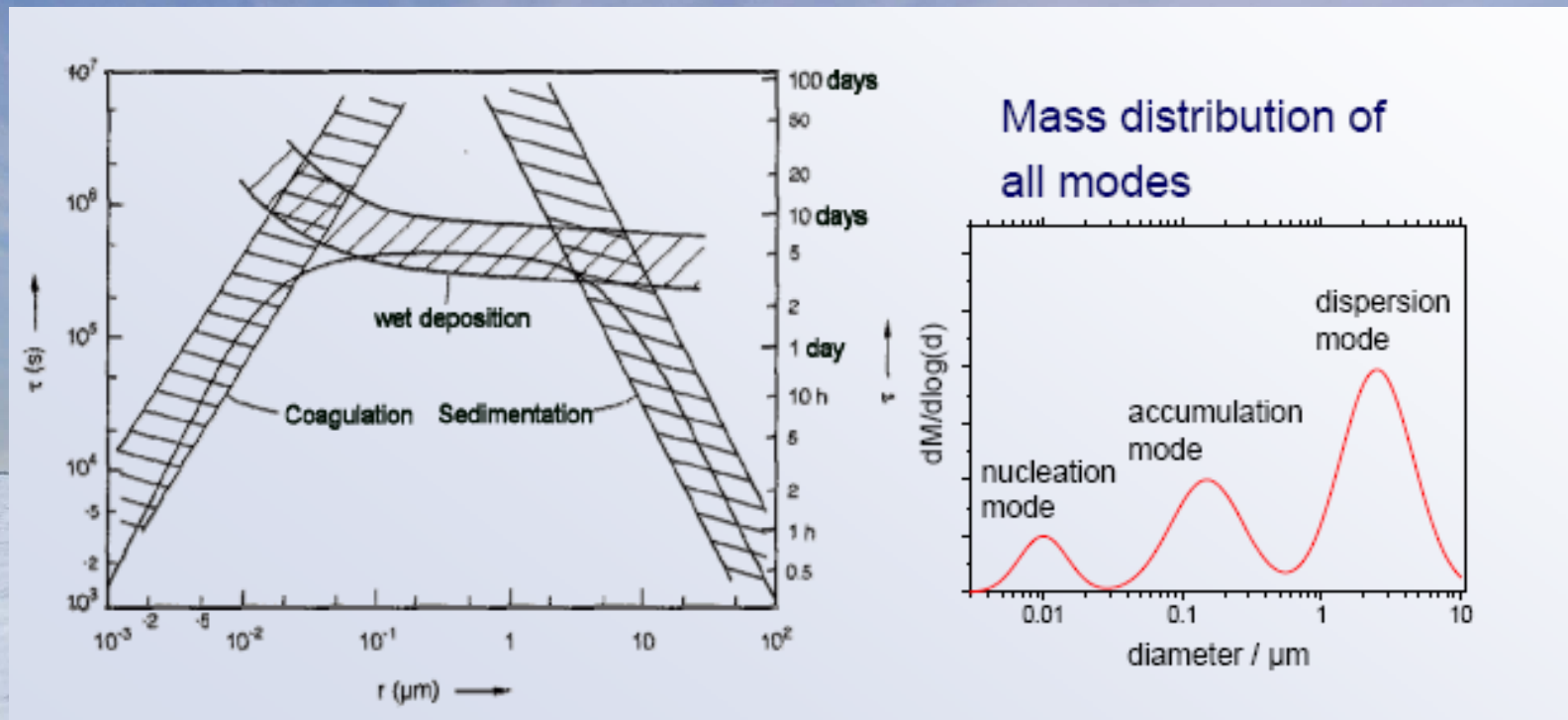


Anzahl- und Massenverteilung von Aerosol

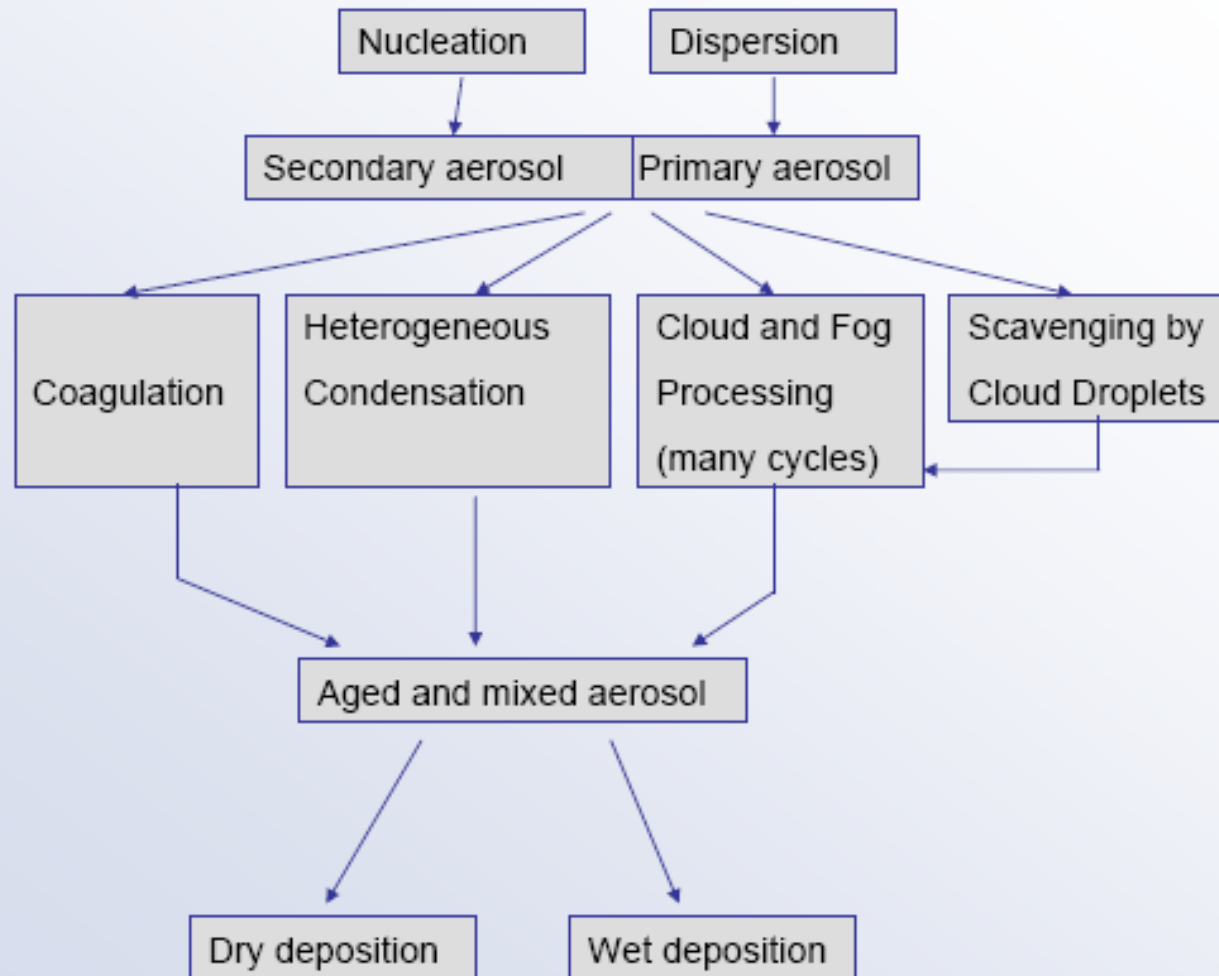


Umwandlungsprozesse und Lebensdauer

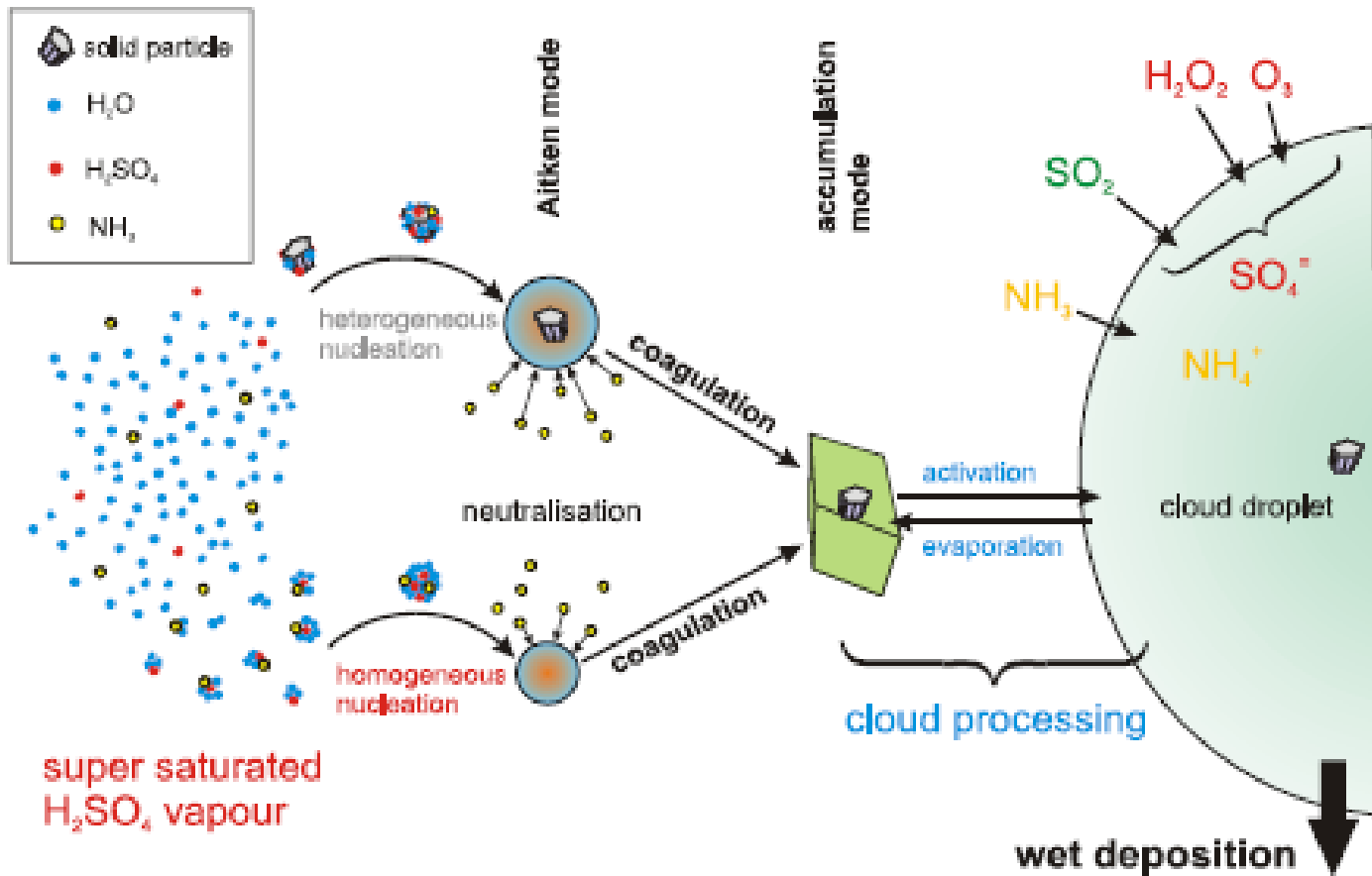
Kondensieren aus der Gasphase, heterogene Kondensation
Koagulation
durch Prozesse in Wolken



Lebenszyklus der Aerosole



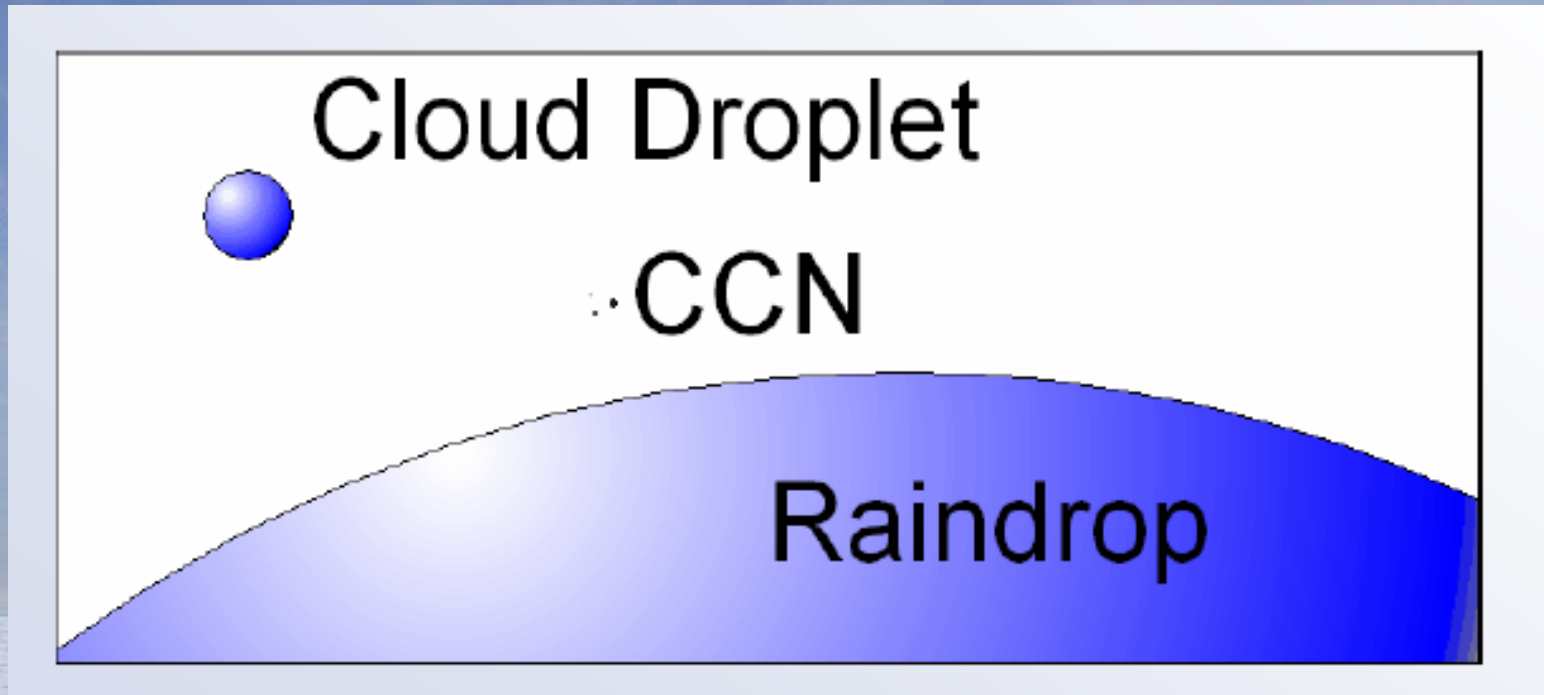
Lebenszyklus der Aerosole



Aerosol & Wolken

- Aerosole dienen als Kondensationskerne
- Aerosole werden durch physikalische und chemische Prozesse in Wolken verändert
- Aerosole ändern die Grösse und Eigenschaften der Wolkentropfen

Größenvergleich



Wolkenbildung I

- Mit Wasserdampf gesättigte Luft
- Kondensationskerne (hygroskopisches Aerosol)
- Abkühlung der Luft, Rückgang des Sättigungsdampfdrucks, Erhöhung der rel. Feuchte

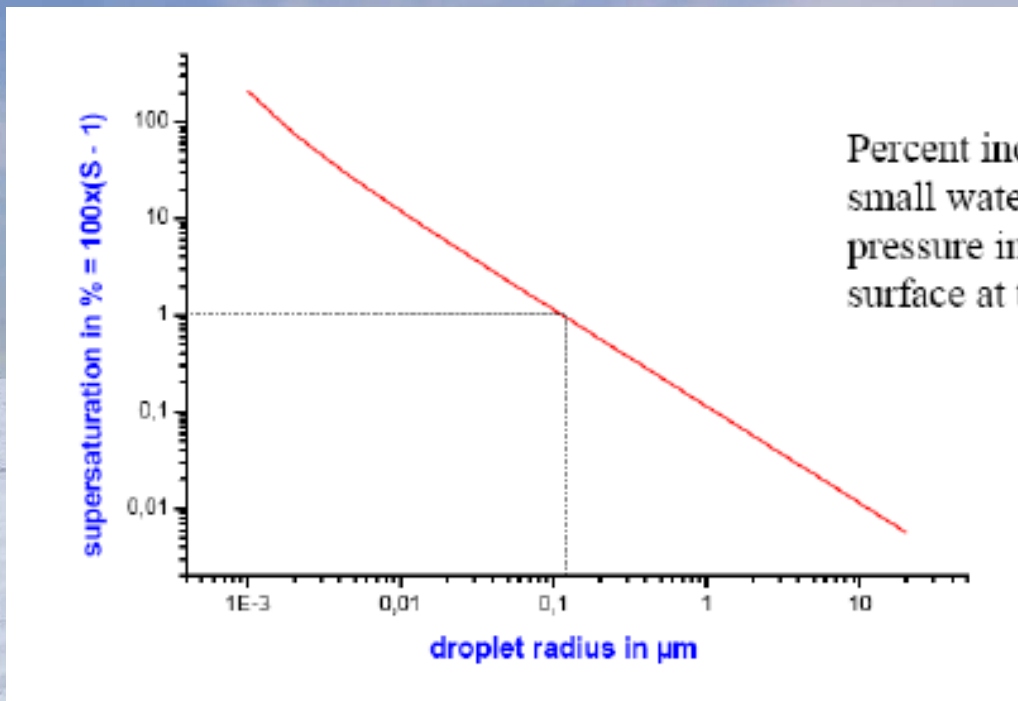
Wolkenbildung II - Abkühlung

- Adiabatische Abkühlung von aufsteigenden Luftpaketen (Cumulus)
- Diabatische Abkühlung von feuchten Luftmassen (Nebel)
- Vermischung von Luftmassen unterschiedlicher Temperatur (Stratus)



Wolkenbildung III - Krümmungseffekt

- Unterschiedl. Sättigungsdampfdruck über ebenen/gekrümmten Wasseroberflächen
- Krümmungseffekt: Kleinerer Tropfen: stärker gekrümmte Oberfläche (Oberflächenspannung), höherer Dampfdruck

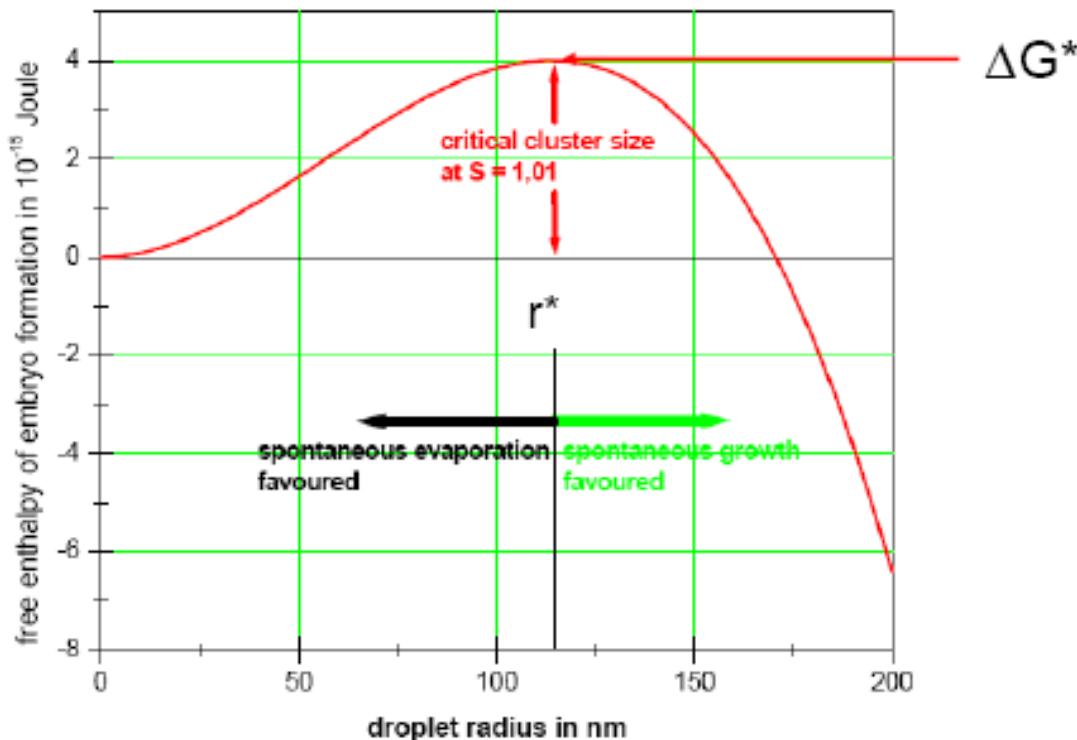


Percent increase of the vapour pressure of small water droplets, relative to the vapour pressure in equilibrium with a flat water surface at the same temperature.

Wolkenbildung IV - Krümmungseffekt

Tropfen im Dampf

Die Kelvin-Gleichung besagt, dass der Dampfdruck einer gekrümmten Oberfläche größer ist als der Dampfdruck einer ebenen Oberfläche. Daraus folgt, dass Tropfen, die einen bestimmten Radius haben und die anfänglich im Gleichgewicht mit ihrem Dampf stehen, instabil sind. Angenommen durch Kondensation vergrößert sich ein Tropfen, dann sinkt sein Dampfdruck und er würde weiter wachsen. Umgekehrt, sinkt durch Verdampfung die Tropfengröße steigt der Dampfdruck und noch mehr Flüssigkeit verdampft. Aus einer Menge von Tropfen mit unterschiedlichen Größen werden die großen Tropfen auf Kosten der kleinen Tropfen wachsen.



Wolkenbildung IV - Lösungseffekt

- Lösungseffekt: Aerosol löst sich in kondensierten Wassertröpfchen, stärkere Anziehungskräfte, niedrigerer Sättigungsdampfdruck



“Nukleation”

- Phasenübergang, Keimbildung
- Homogene Nukleation
- Wolkentropfen bildet sich durch Kondensation von Wasserdampf “aus sich heraus”, in der Atmosphäre extrem unwahrscheinlich; dafür bei Bildung von Aerosol wichtig;
- Heterogene Nukleation
- Wolkentropfen bildet sich durch Kondensation an anderen Stoffen

Wachstum von Wolkentropfen

- Koaleszenz: Zusammenfließen bei Berührung (Oberflächenspannung)
- Koagulation: Kollision und Verschmelzung von unterschiedlich großen Tropfen

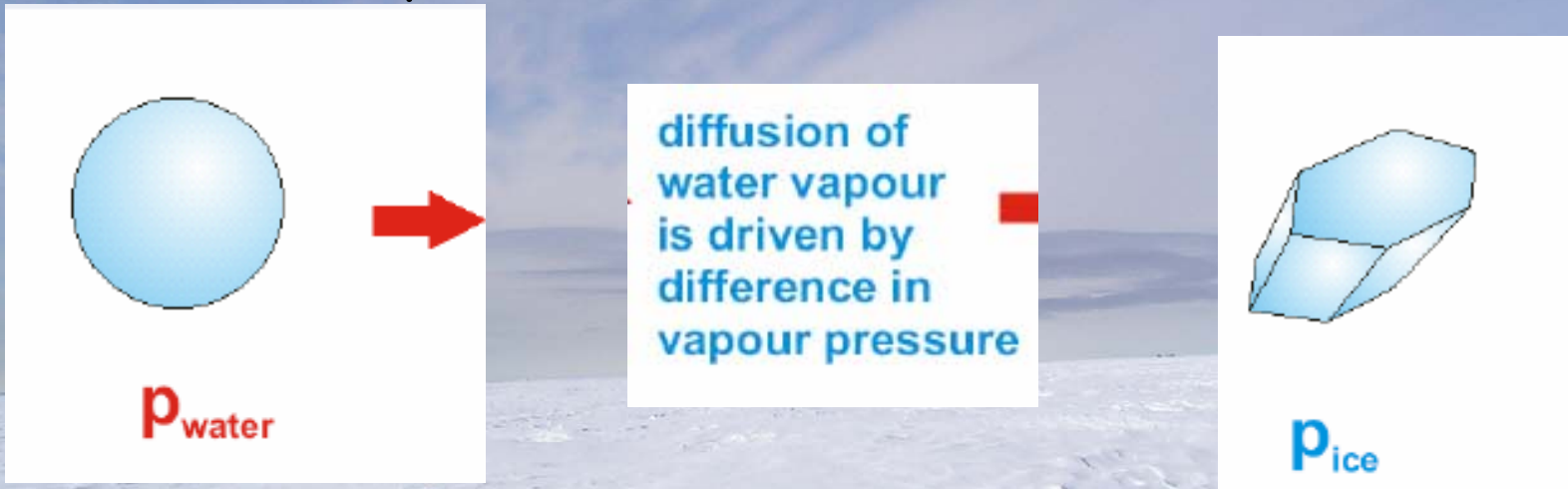


Eiskristallbildung

- Abhängig von der Temperatur:
- 0 bis -12 Grad: unterkühlte Wassertropfen überwiegen
- -13 bis -20 Grad: Wassertropfen und Eiskristalle sind gleich häufig
- -20 bis -40 Grad: Eiskristalle überwiegen
- Unter -40 Grad: nur Eiskristalle

Bergeron-Findeisen-Prozess

- Wassertropfen und Eiskristalle in Mischwolke
- Über Eis niedrigerer Sättigungsdampfdruck (fester Körper, zwischenmolekulare Kräfte größer)
- Wassertropfen verdunsten, Eiskristalle wachsen



ice particles grow at the expense of supercooled cloud droplets:

Bildung von Regentropfen

In warmen Wolken:

Kleine Wolkentropfen fallen nicht als Regen aus - zu niedrige Fallgeschwindigkeit
Evaporation unterhalb von Wolke (Luft nicht gesättigt)

Wachstum durch Kollision und Koaleszens

Regen-Vorhersage schwierig... komplexe Prozesse



Bedeutung der Eisphase in Wolken

Bildung von Eiskristallen in unterkühlten Wolken durch

“Deposition Freezing” - Kondensation an Eiskernen, Gefrieren

“Contact Freezing” - Kollision von Eiskernen mit unterkühlten Tropfen

Schwere Eiskristalle tendieren eher dazu, abzuregnen

In der Troposphäre sind in der Regel nicht viele Eiskerne vorhanden
(ein paar pro Liter Luft)

Warme Wolken regnen oft aufgrund von “seeder-feeder” -Effekt, d.h.
Eiskristalle aus höheren Wolken dienen als Kondensationskeime
in warmer, niedriger Wolke

Beeinflussung von Wolken durch Kondensationskeime

Beweis des "Seeder-feeder" Effekts:

Effiziente Eiskerne werden in warme, nicht regnende Wolke eingebracht und führen zu Regen

z.B.

Silberiodid-Kristalle

Trockeneis

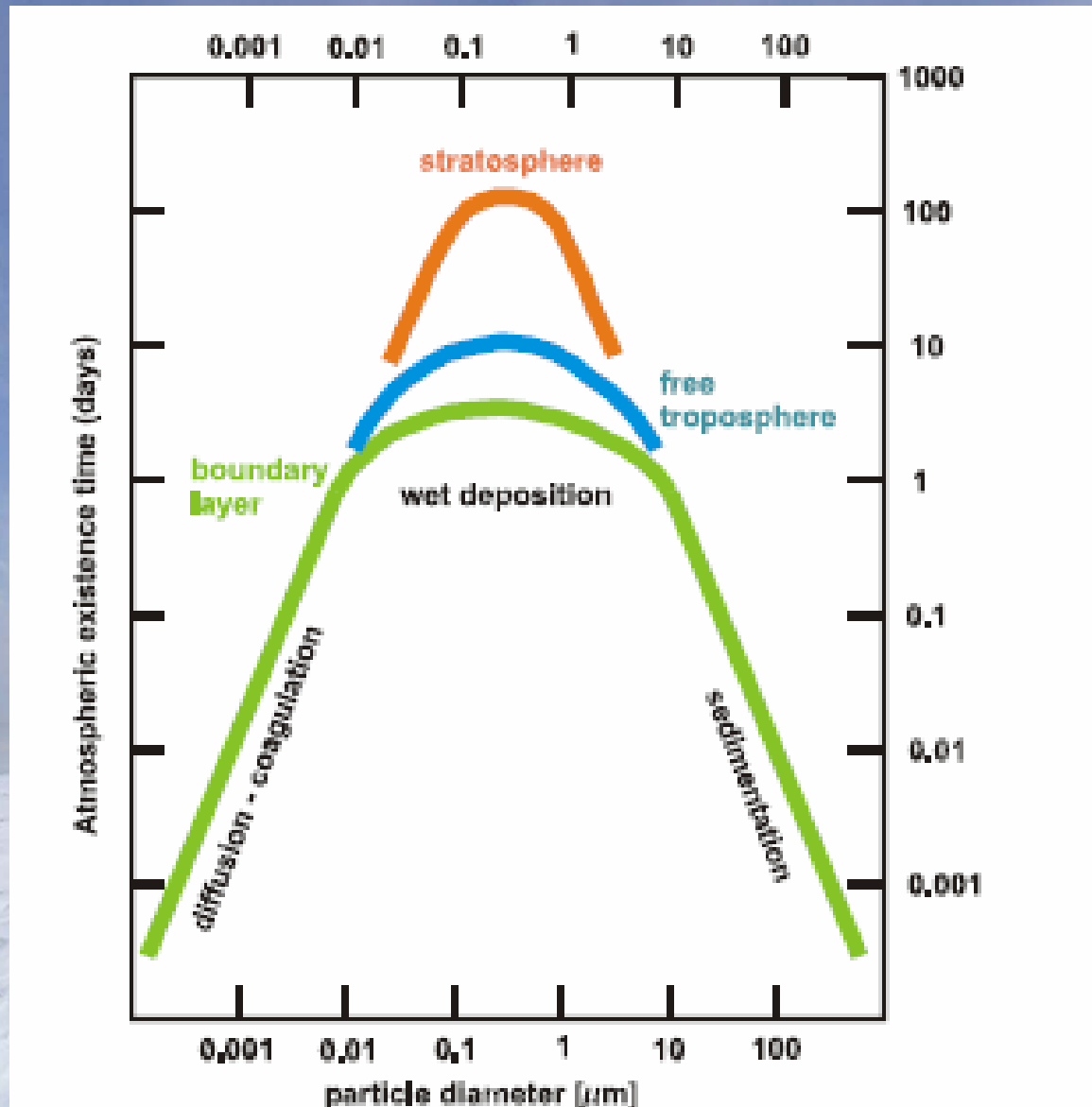


Beeinflussung von Wolken durch Kondensationskeime



An obvious hole in a stratus deck due to cloud seeding with aircraft, using **dry ice** as a seeding agent. This is an example of cold cloud seeding, where supercooled cloud droplets are converted into ice crystals, which then precipitate out of the cloud deck.

Verweildauer in der Atmosphäre



Aerosol-Senken

- Trockene Ablagerung/Sedimentieren
- Auswaschen



Literatur

- Malberg: Meteorologie und Klimatologie, Eine Einführung, Springer-Verlag
- <http://www.wolkenatlas.de/>