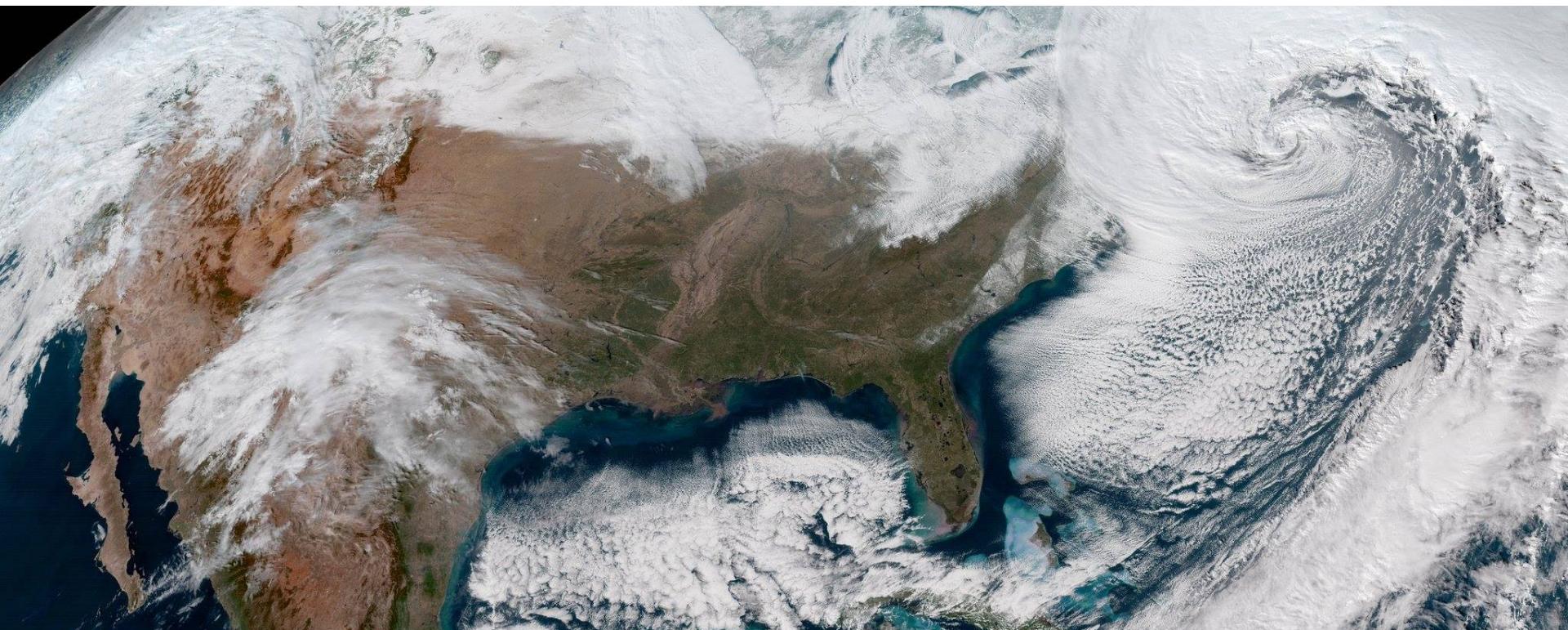


Wasser in der Atmosphäre

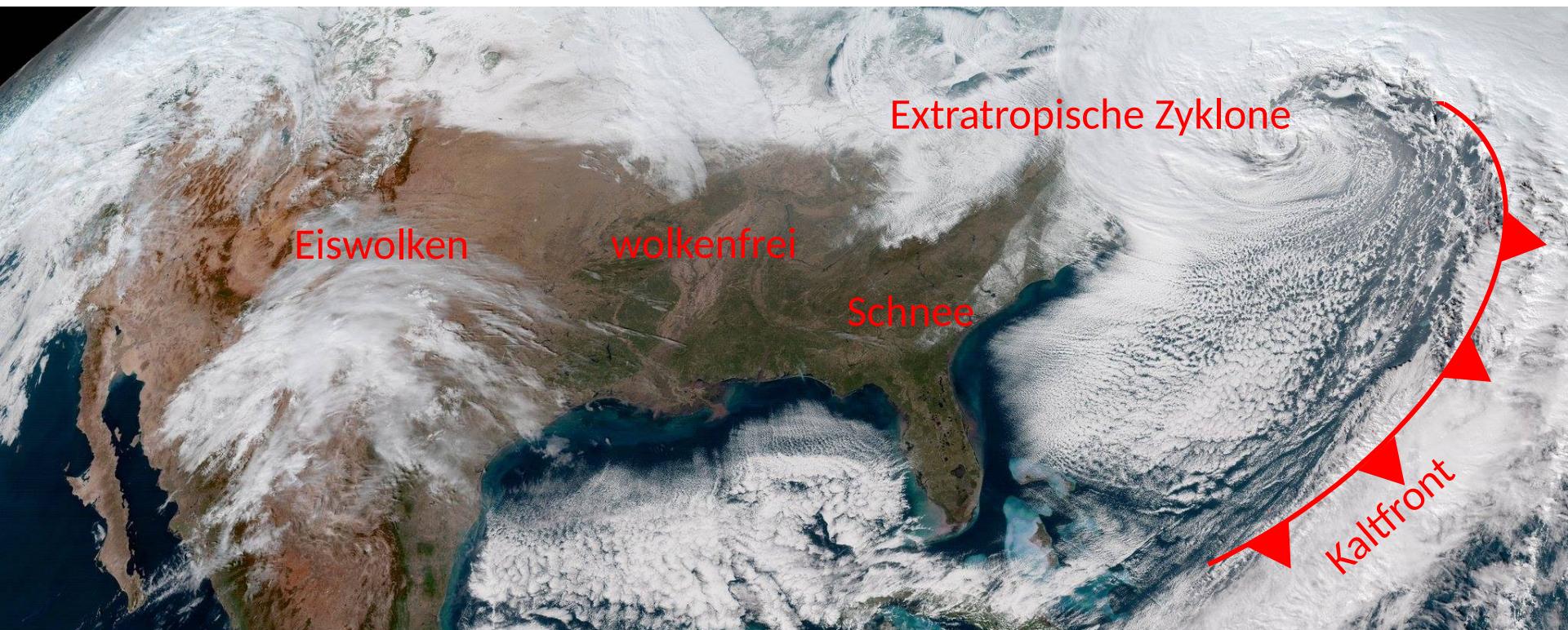
Modul Klimatologie



Iris Thurnherr (iris.thurnherr@env.ethz.ch), Raphael Portmann (raphael.portmann@env.ethz.ch)
Daniel Steinfeld (daniel.stinfeld@env.ethz.ch)

Motivation

Viele verschiedene Phänomene in der Atmosphäre –
Wasser spielt oft eine wichtige Rolle



GOES-16 Satellit vom 4. Januar 2018

Lernziele

- 1) Sie können nennen, in welchen Formen Wasser in der Atmosphäre vorkommt.
- 2) Sie können die Größen erklären, mit welchen Wasser in der Atmosphäre quantifiziert wird.
- 3) Sie können die (physikalischen) Voraussetzungen für Phasenänderungen von Wasser in der Atmosphäre erläutern.
- 4) Sie können Wetterphänomene beschreiben, bei welchen Feuchtigkeit eine wichtige Rolle spielt.

Wasser (H_2O) in der Atmosphäre

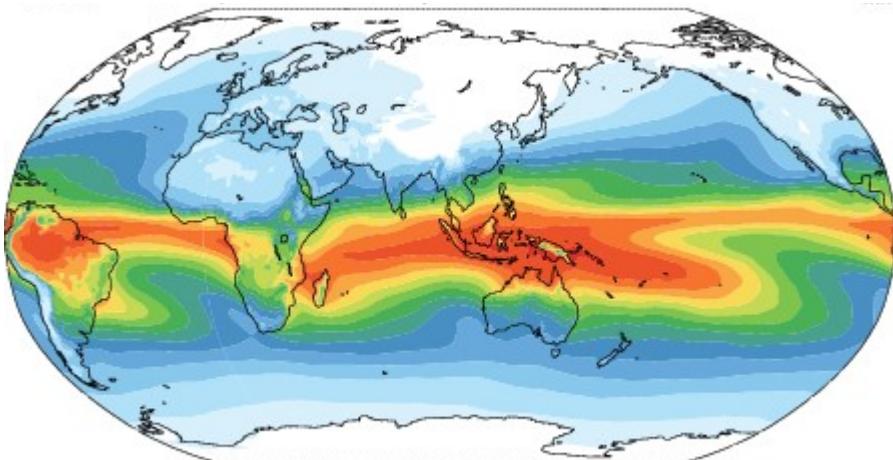
- Atmosphärische Feuchte = Gehalt an Wasserdampf in der Luft:
- Relativer Anteil am Luftvolumen: 0 - 4%
Erinnerung: CO_2 mit 0.04% (400 ppm)

- Wichtiges Treibhausgas:
60% (+ 20 K) am natürlichen Treibhauseffekt
- Hydrologischer Kreislauf:
Klimazonen, Vegetation, ...
- "Motor" für viele Prozesse in der Atmosphäre:
Tropische Stürme, extratropische Zyklone,
Gewitter

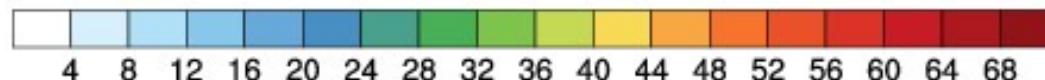
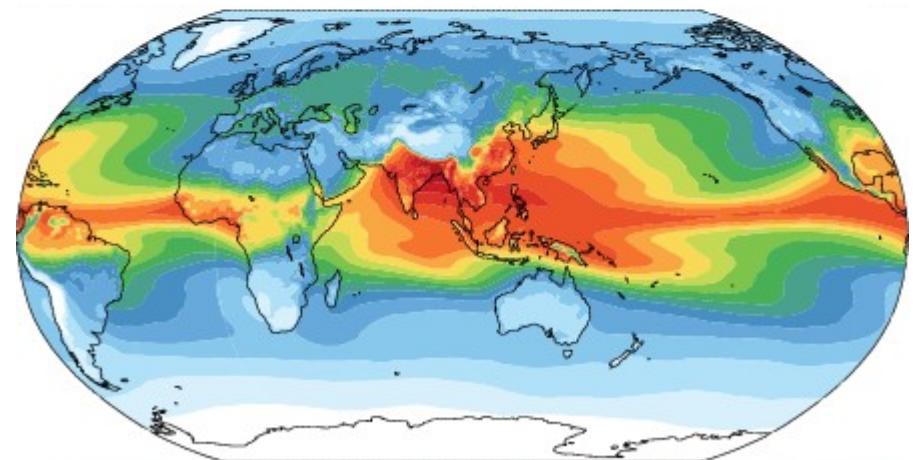
Wasser in der Atmosphäre

Globale Verteilung der vertikal integrierten Feuchte

Januar (1989 – 2010)



Juli (1989 – 2010)



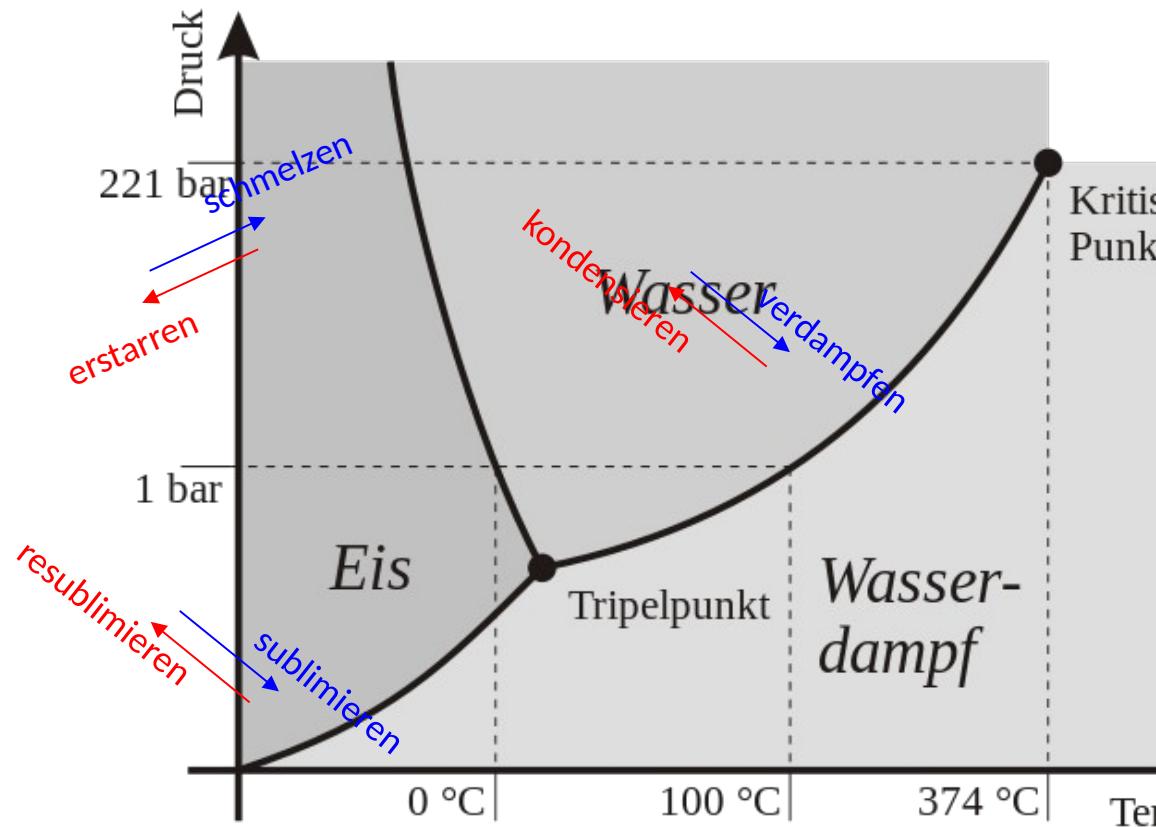
ausfällbares Niederschlagswasser [mm]

<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nasa-merra>

Phasendiagramm Wasser

- ← Freisetzung von Wärme
- Entzug von Wärme

1 bar (Atmosphärendruck)
= 1013.25 hPa



- Auf Kurve können zwei Phasen koexistieren (im Gleichgewicht)
- Phasenübergang durch:
 - Abkühlung/Erwärmung
 - Druckzunahme/Druckabnahme
 - Zufuhr/Abfuhr von Wasserdampf

Feuchte in der Atmosphäre

Die Feuchte in der Atmosphäre, d.h. der Wasserdampfgehalt in der Luft, kann durch sehr unterschiedliche Variablen quantifiziert werden:

Grösse	Symbol	Einheit
Spezifische Feuchte	q	g/kg
Relative Feuchte	RH	%
Taupunkttemperatur	T_d	K
Dampfdruck von H_2O	e	hPa

Feuchte in der Atmosphäre

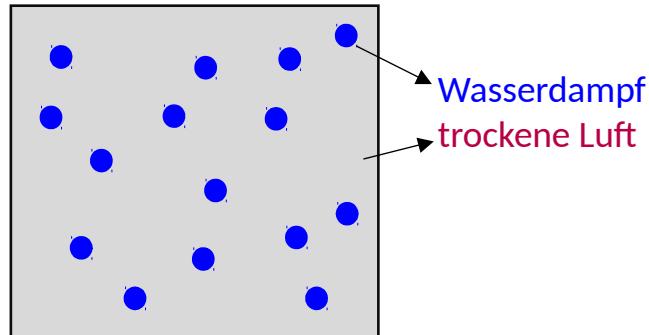
Die Feuchte in der Atmosphäre, d.h. der Wasserdampfgehalt in der Luft, kann durch sehr unterschiedliche Variablen quantifiziert werden:

Grösse	Symbol	Einheit
Spezifische Feuchte	q	g/kg
Relative Feuchte	RH	%
Taupunkttemperatur	T_d	K
Dampfdruck von H_2O	e	hPa

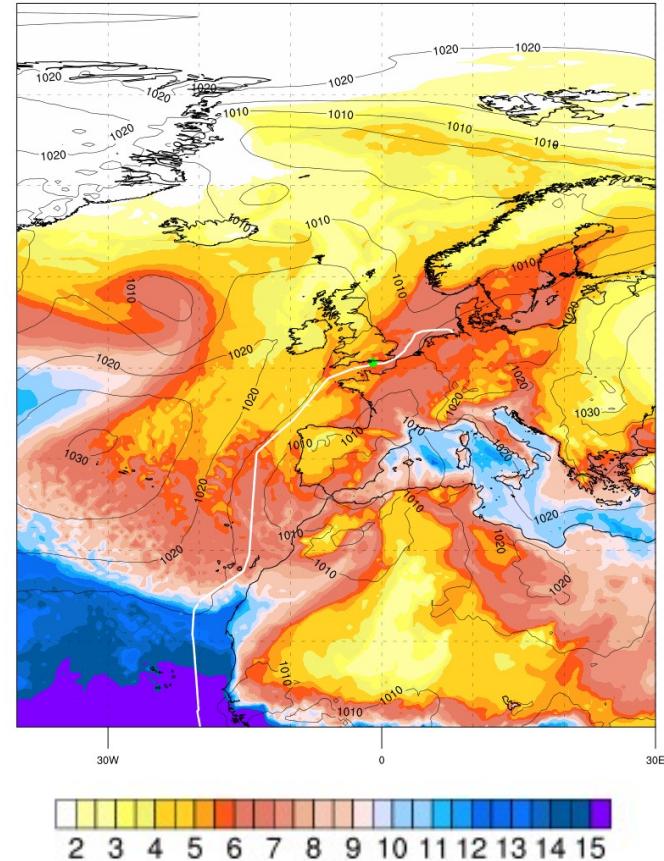
Spezifische Feuchte q

$$q = m_{H_2O} / m_{Luft}$$

Feuchte Luft: $m_{Luft} = m_{H_2O} + m_{dry}$

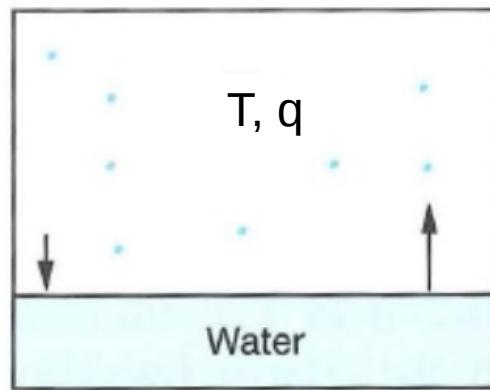


Typische Werte: 5 – 20 g/kg

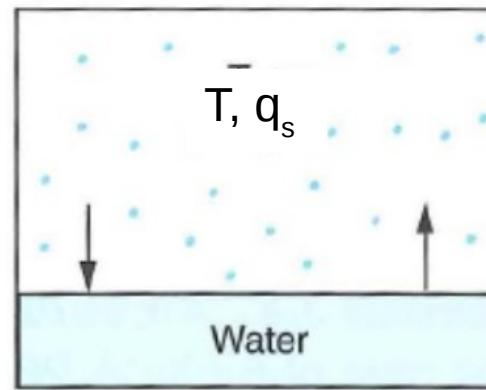


Sättigungsfeuchte

- Spezifische Sättigungsfeuchte q_s
maximale Menge an Wasserdampf, die von der Luft aufgenommen werden kann



(a) Unsaturated

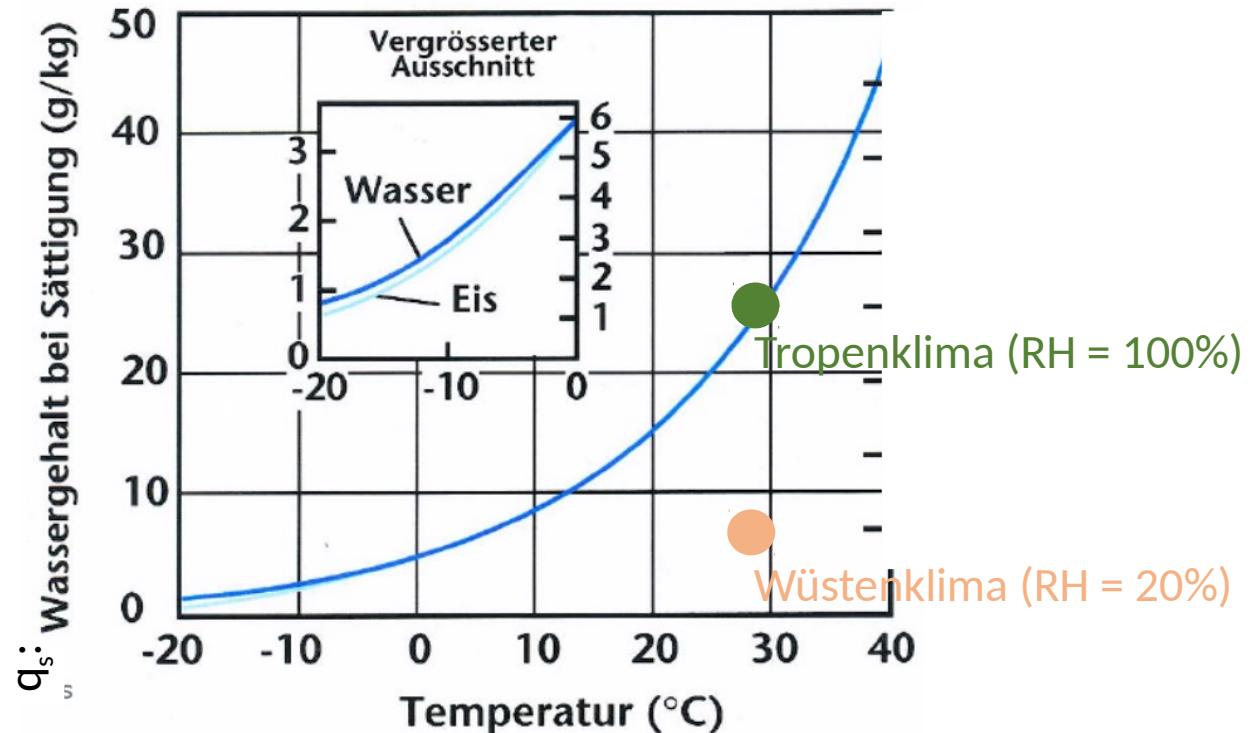


(b) Saturated

- q_s ist temperaturabhängig (Clausius-Clapeyron Gleichung)

Clausius-Clapeyron_Kurve

- q_s ist temperaturabhängig (Clausius-Clapeyron Gleichung)



$q < q_s$: Untersättigung

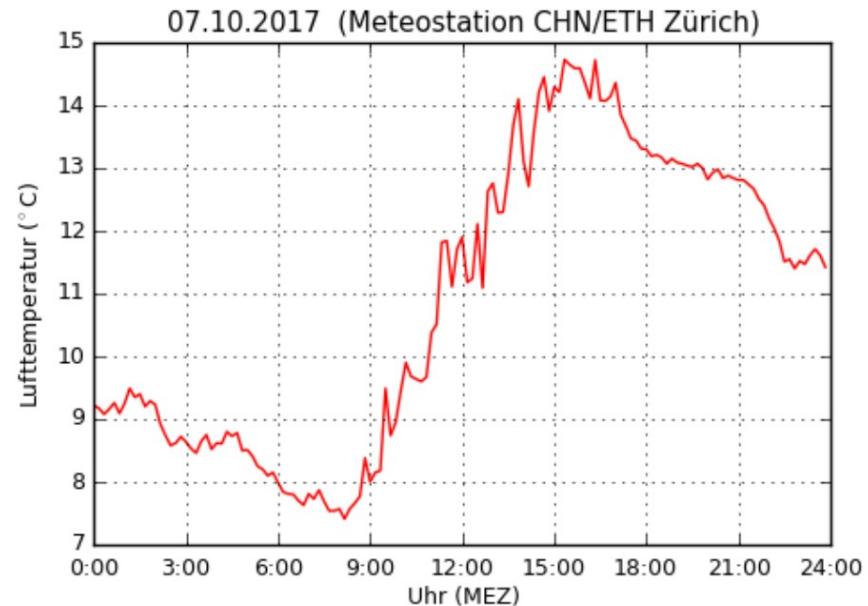
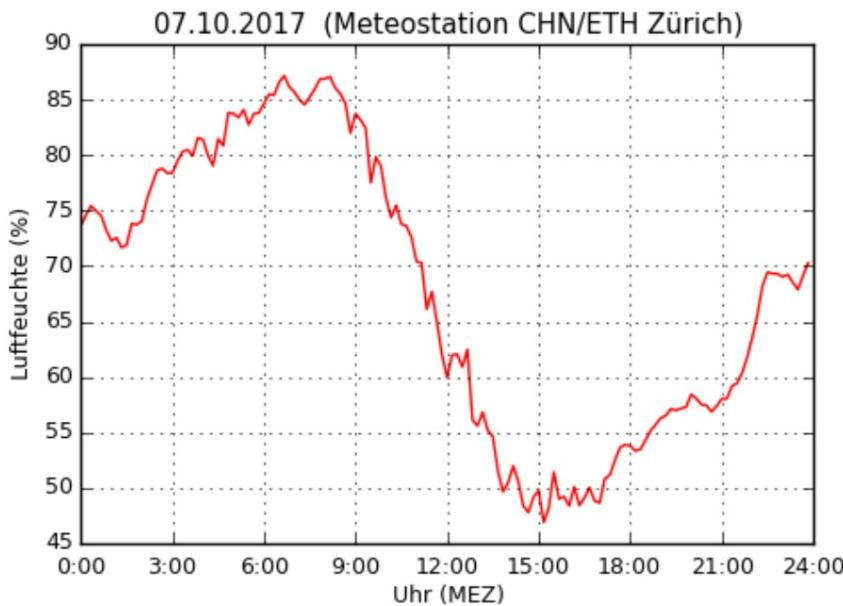
$q = q_s$: Sättigung

$q > q_s$: Übersättigung → Kondensation

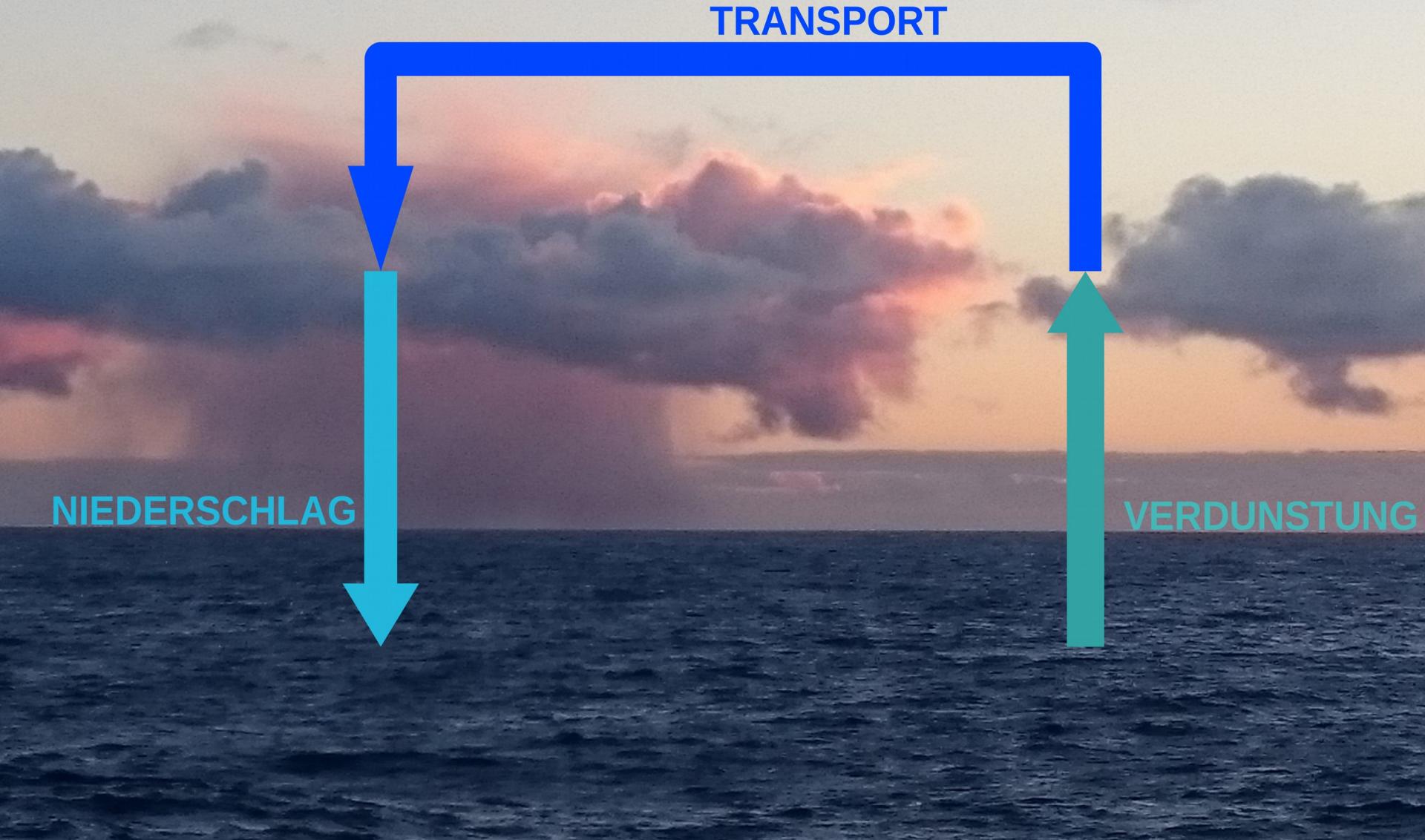
Relative Feuchte RH

$$RH \approx \frac{q}{q_s} \cdot 100\%$$

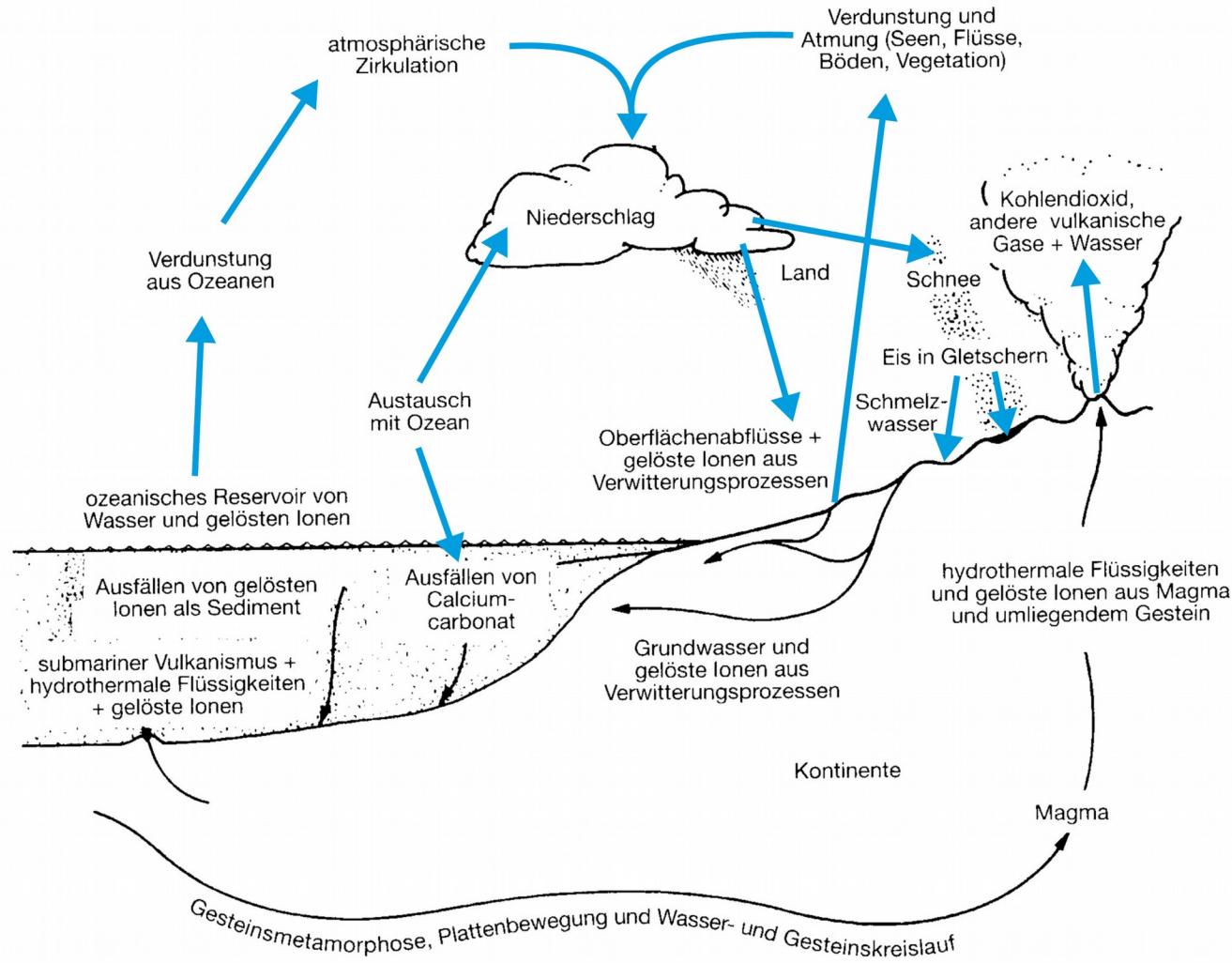
Werte von 20 – 30% empfinden wir als trocken, Werte über 80% als sehr feucht/schwül, bei einem Wert von 100% ist die Luft gesättigt



Der atmosphärische Wasserkreislauf

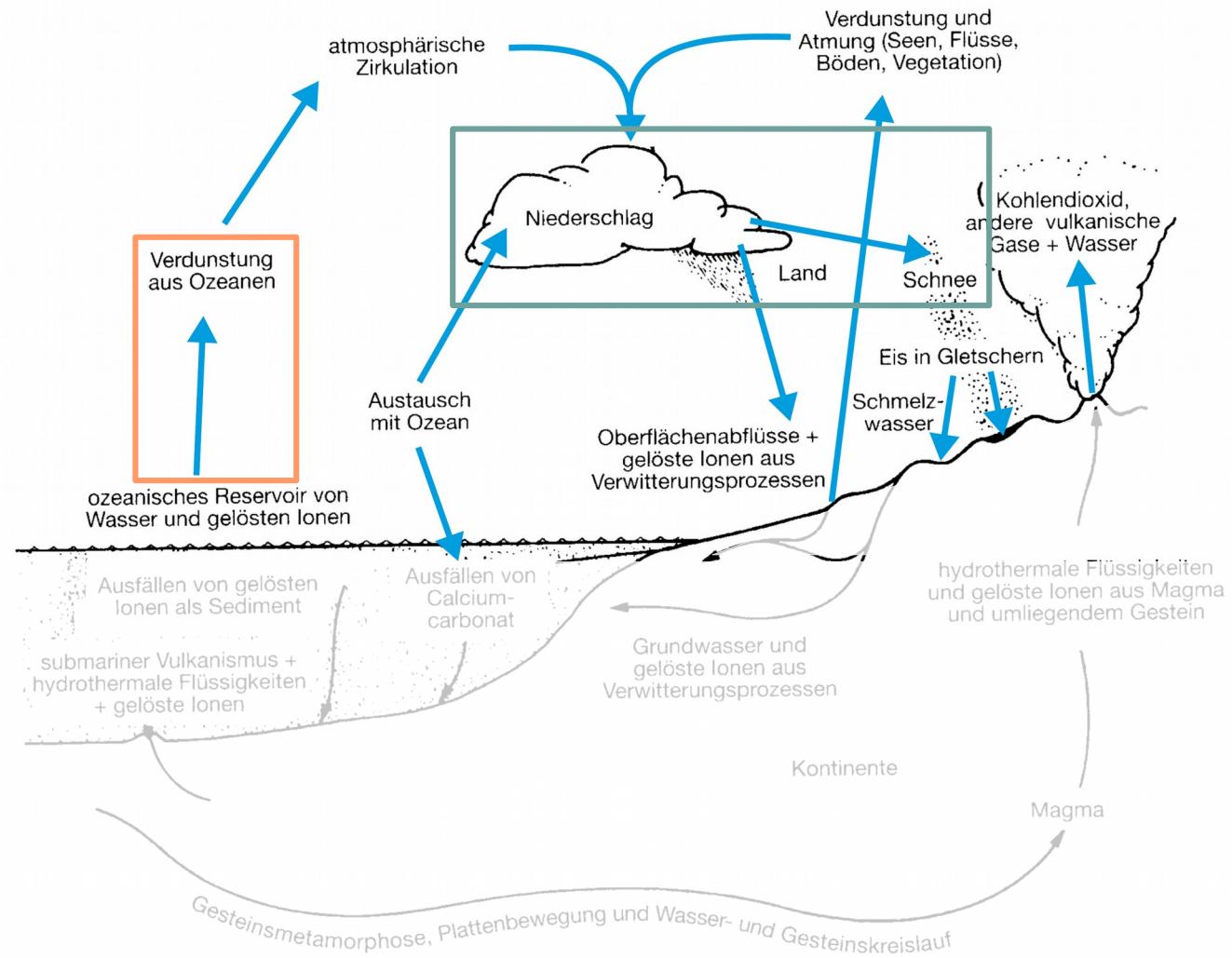


Der atmosphärische Wasserkreislauf



Der atmosphärische Wasserkreislauf

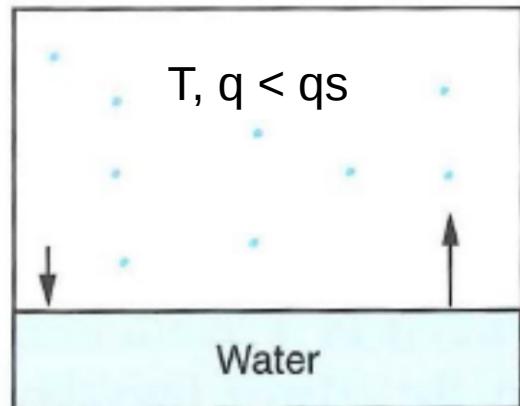
Phasenübergänge



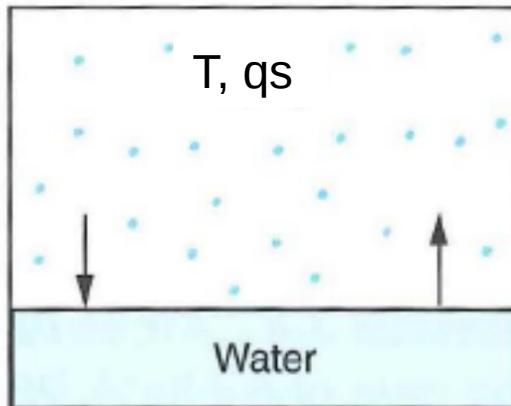
Verdunstung

- Untersättigte Atmosphäre:

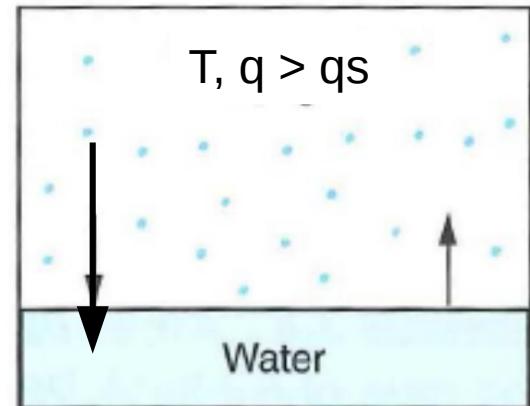
$$q < q_s$$



(a) Unsaturated



(b) Saturated

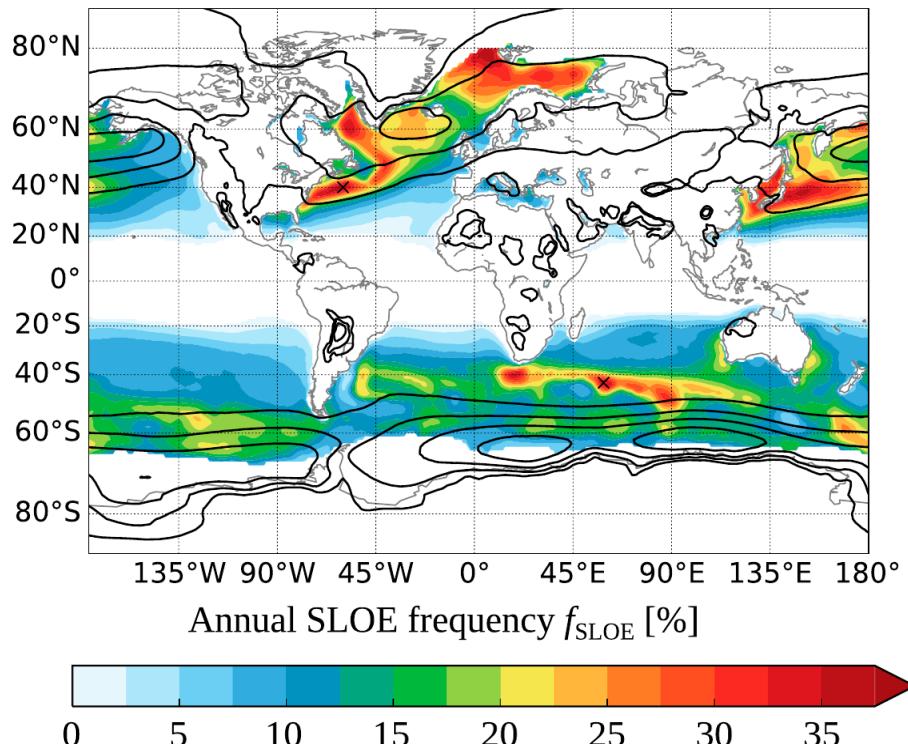


(c) oversaturated

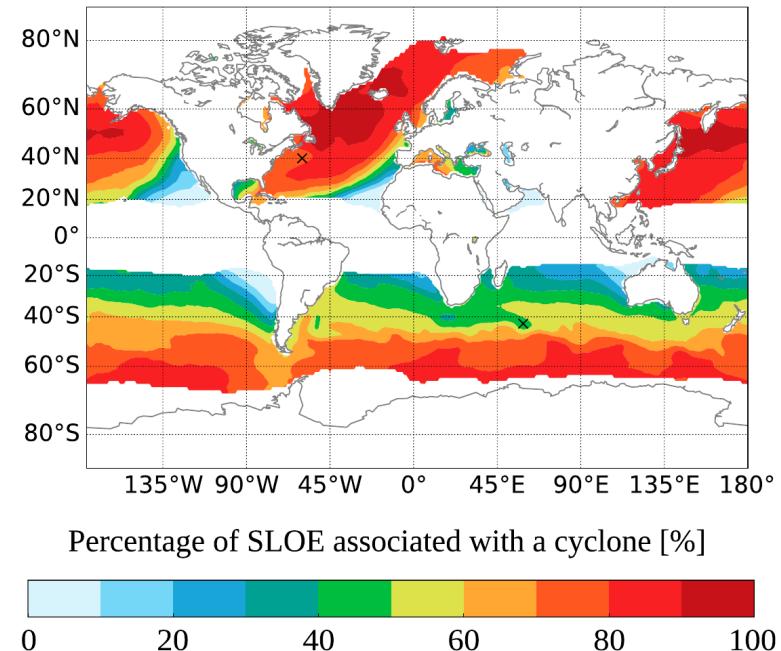
Verdunstung

Ozeanverdunstung durch Tiefdrucksysteme

Studie zur Ozeanverdunstung (Aemisegger and Papritz 2018):
Grossskalige Verdunstungssereignisse im Ozean werden hauptsächlich
durch Tiefdrucksysteme verursacht



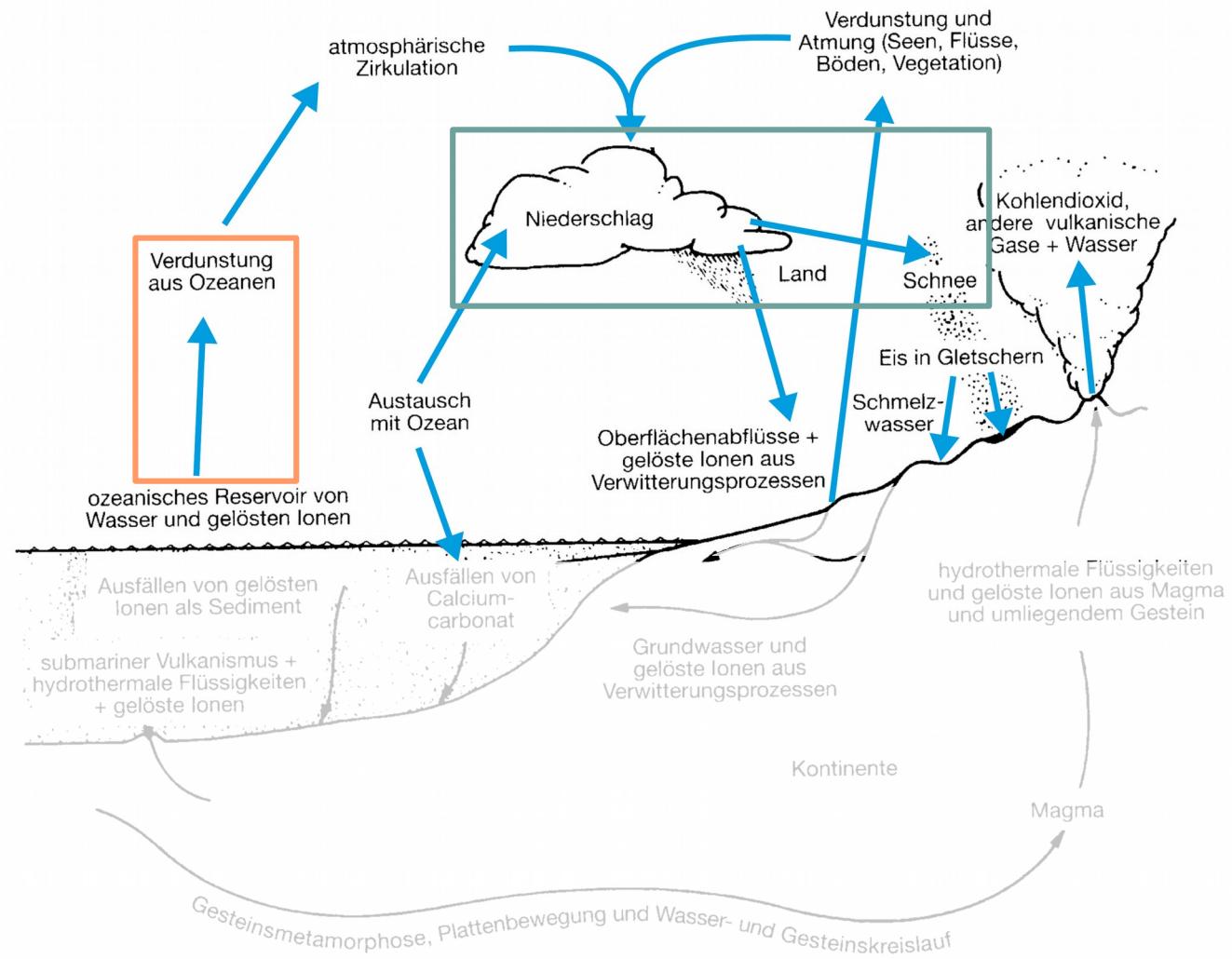
SLOE: strong large-scale ocean evaporation



Aemisegger, F., and L. Papritz, 2018:
A climatological analysis of strong large-scale
ocean evaporation. Part I: Identification, global
distribution, and associated climate conditions.
J. Climate, 31, 7287–7312,
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0591.1>.

Der atmosphärische Wasserkreislauf

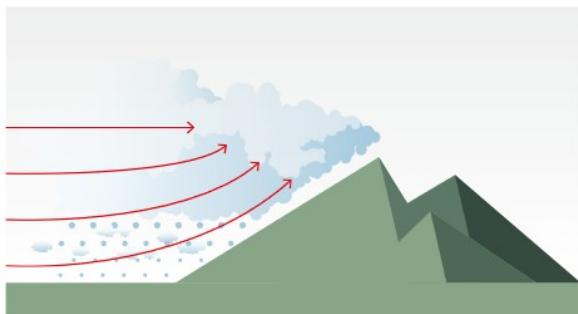
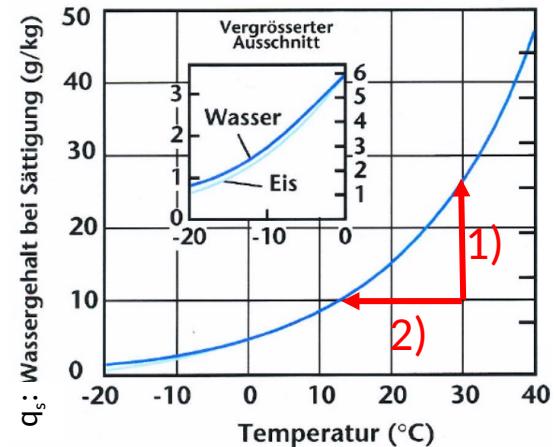
Phasenübergänge



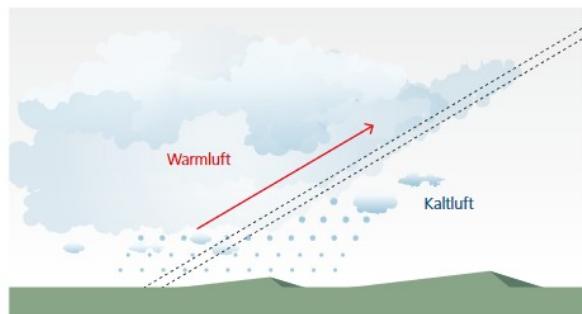
Wolkentröpfchenbildung

Voraussetzung für Kondensationsprozesse

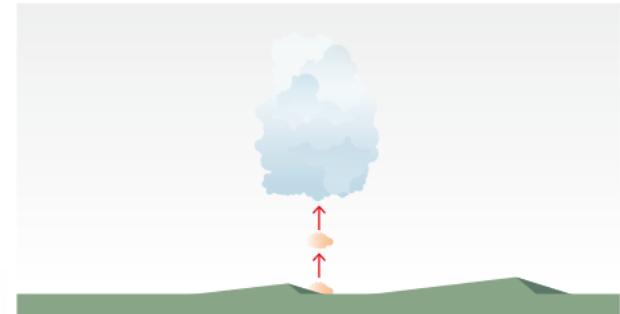
- Übersättigung des Wasserdampfes
 $q > q_s$, $\text{RH} \geq 100\%$
- Wie?
 - 1) Zufuhr von Wasserdampf
 - 2) Abkühlung der Luft bei gleichbleibendem Wassergehalt



An einem Gebirge wird die anströmende Luft zum Steigen gezwungen, es bildet sich Staubwölkung.



Die ausgedehntesten Wolkenmassen entstehen in der aufgleitenden Warmluft an Fronten.

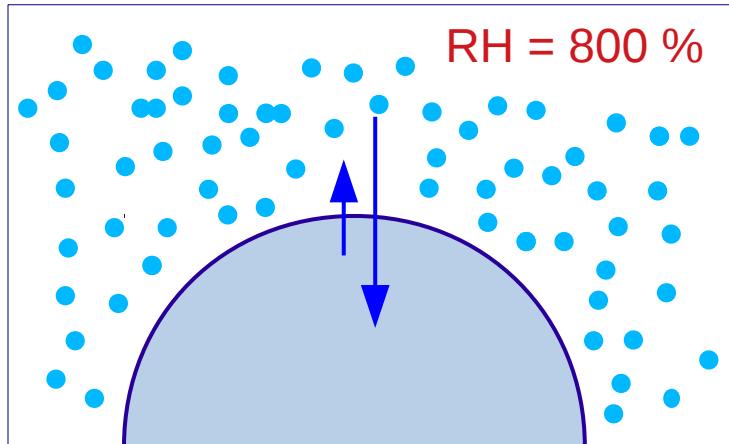


Durch die Sonneneinstrahlung an der Erdoberfläche entstandene Warmluftblasen steigen und kondensieren zu Cumuluswolken.

Bilder: Meteoschweiz

Wolkentröpfchenbildung

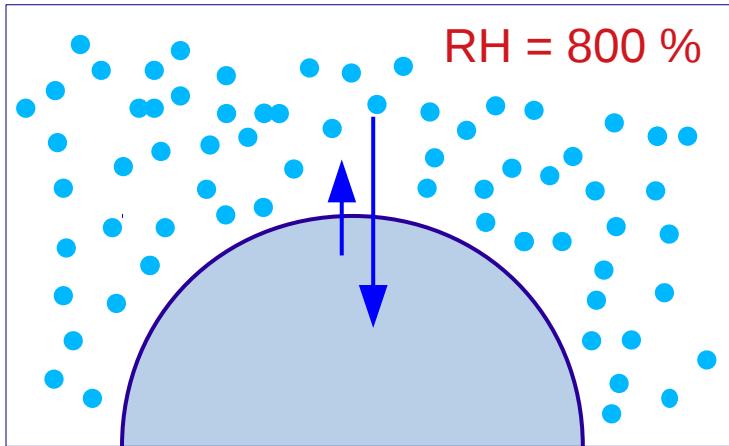
Homogene Kondensation



Für Kondensation direkt vom Wasserdampf wäre eine Übersättigung von mehreren 100% nötig.

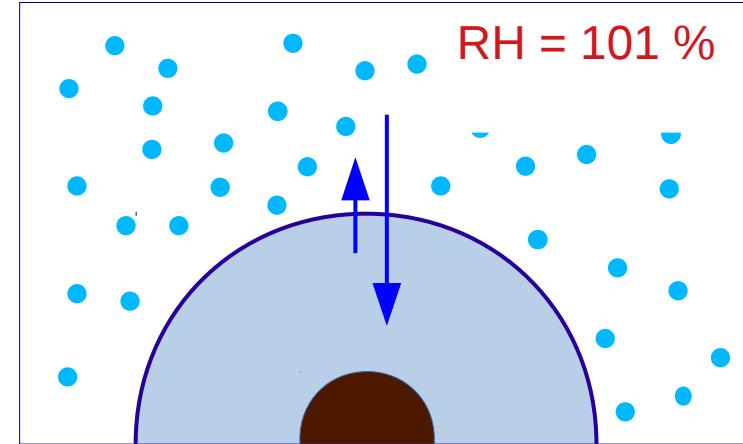
Wolkentröpfchenbildung

Homogene Kondensation



Für Kondensation direkt vom Wasserdampf wäre eine Übersättigung von mehreren 100% nötig.

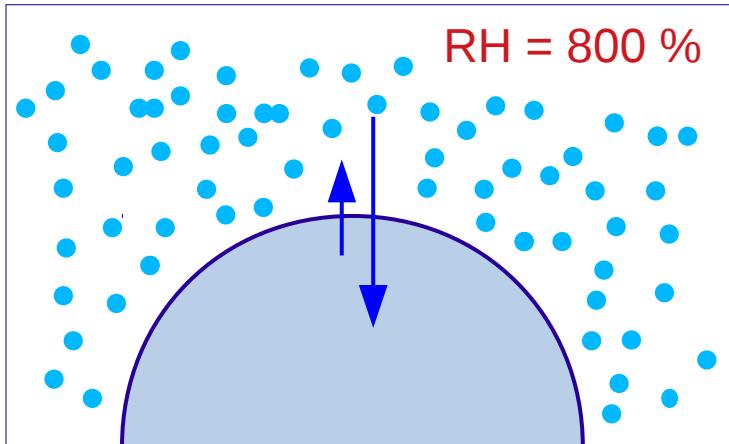
Heterogene Kondensation



Sind lösliche Partikel vorhanden, so erniedrigt sich die zur Kondensation benötigte relative Feuchte erheblich.

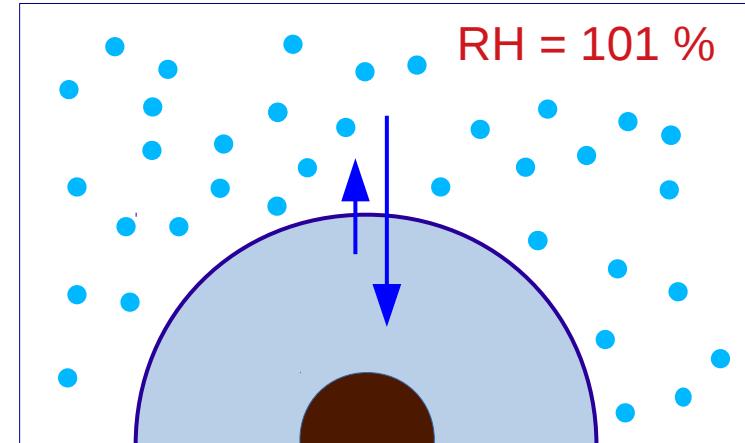
Wolkentröpfchenbildung

Homogene Kondensation



Für Kondensation direkt vom Wasserdampf wäre eine Übersättigung von mehreren 100% nötig.

Heterogene Kondensation

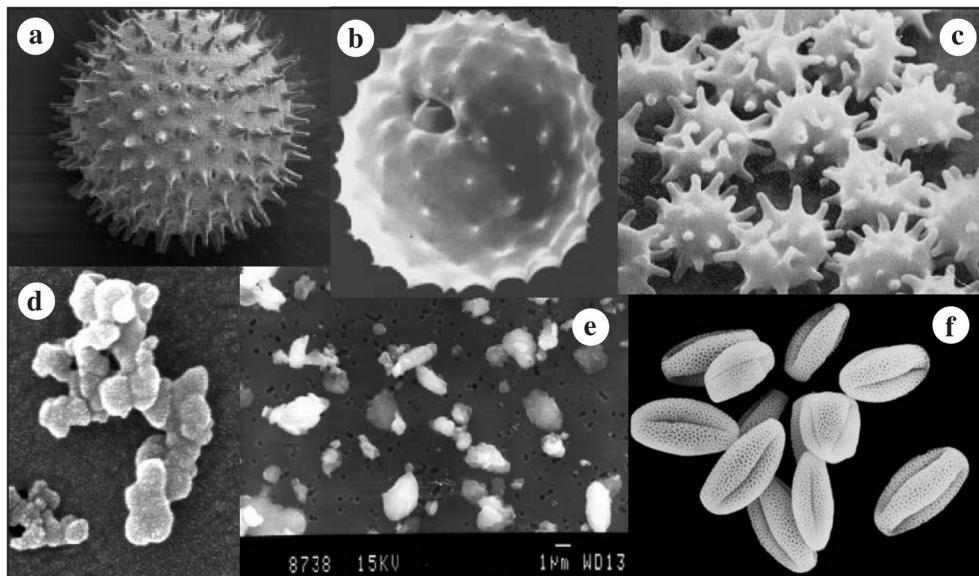


Sind lösliche Partikel vorhanden, so erniedrigt sich die zur Kondensation benötigte relative Feuchte erheblich.

Keine Wolkenbildung durch homogene Kondensation in der Natur!!!

Aerosole

- Keime für Wolkentröpfchenbildung
- Stabile Suspension fester und/oder flüssiger Partikel in der Luft



Einige Beispiele für Aerosole:

- (a) Pollen der Präriemalve,
- (b) Pollen des Traubenkrautes (Ambrosia), (c) Pilzsporen,
- (d) Russpartikel aus Oelflamme,
- (e) Silikatpartikel (Staubsturm),
- (f) Pollen irgendeiner Pflanze.
(aus dem Skript der Vorlesung Atmosphäre, ETHZ)

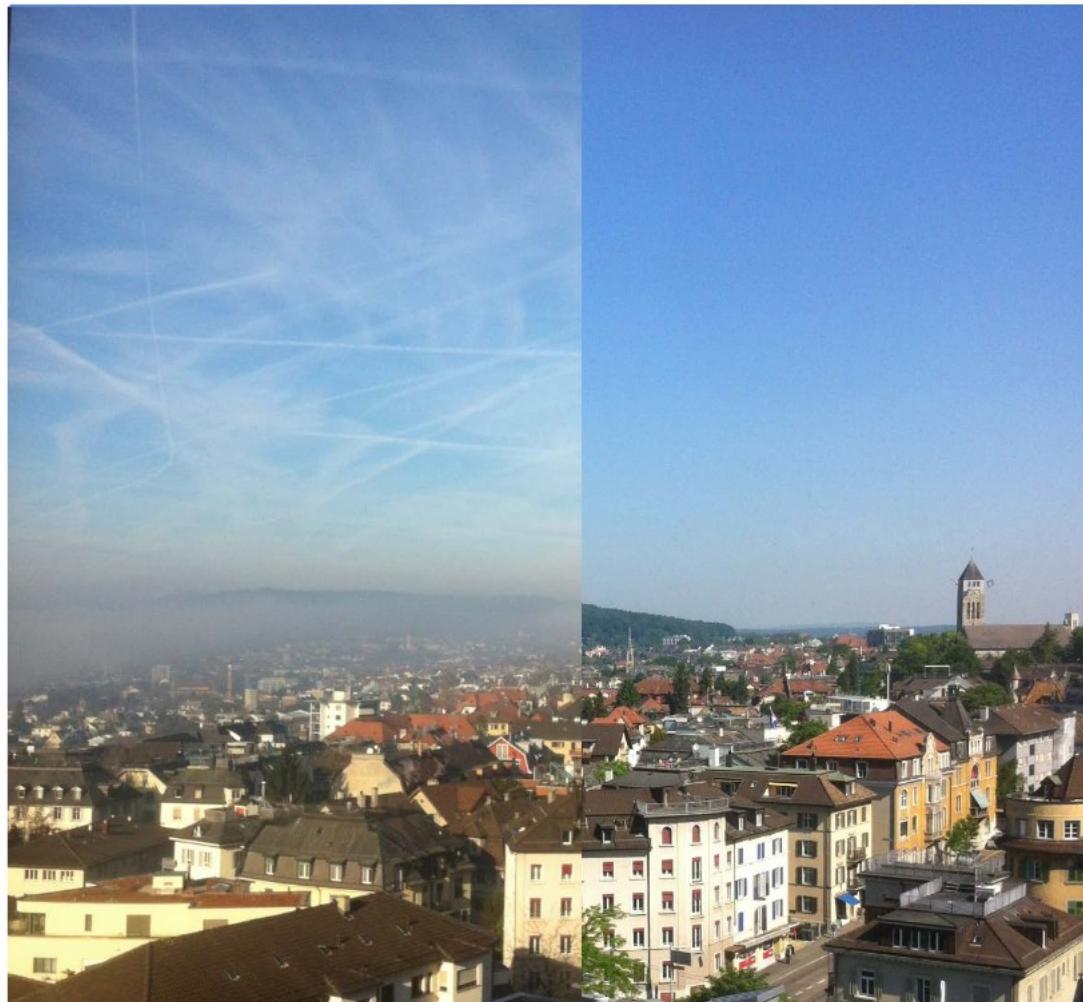
Aerosole

Bedeutung

- Notwendig für die **Wolkenbildung**: Aerosole dienen als Wolkenkondensations- und Eiskeime:
Ohne Aerosole → Keine Wolken:
<https://www.youtube.com/watch?v=aUSKHFfSYfI>
- **Luftverschmutzung**:
 - Gefährlich für Gesundheit
 - Reduktion der Sichtweise
- Bedeutung für die **Strahlung und Klima**:
 - Direkter Aerosoleffekt: streuen und absorbieren Strahlung
 - Indirekter Aerosoleffekt: Veränderung der Wolken (z.b. mehr aber kleinere Wolkentropfen, Lebenszeit der Wolken, Phase (Eis/Wasser)) → mehr Reflektion von Sonnenstrahlung (Wirken somit Erwärmung entgegen)

Aerosole

Wolkenbedeckung in Zürich



Zürich, Photos von Amewu Mensah

Aerosole Quellen

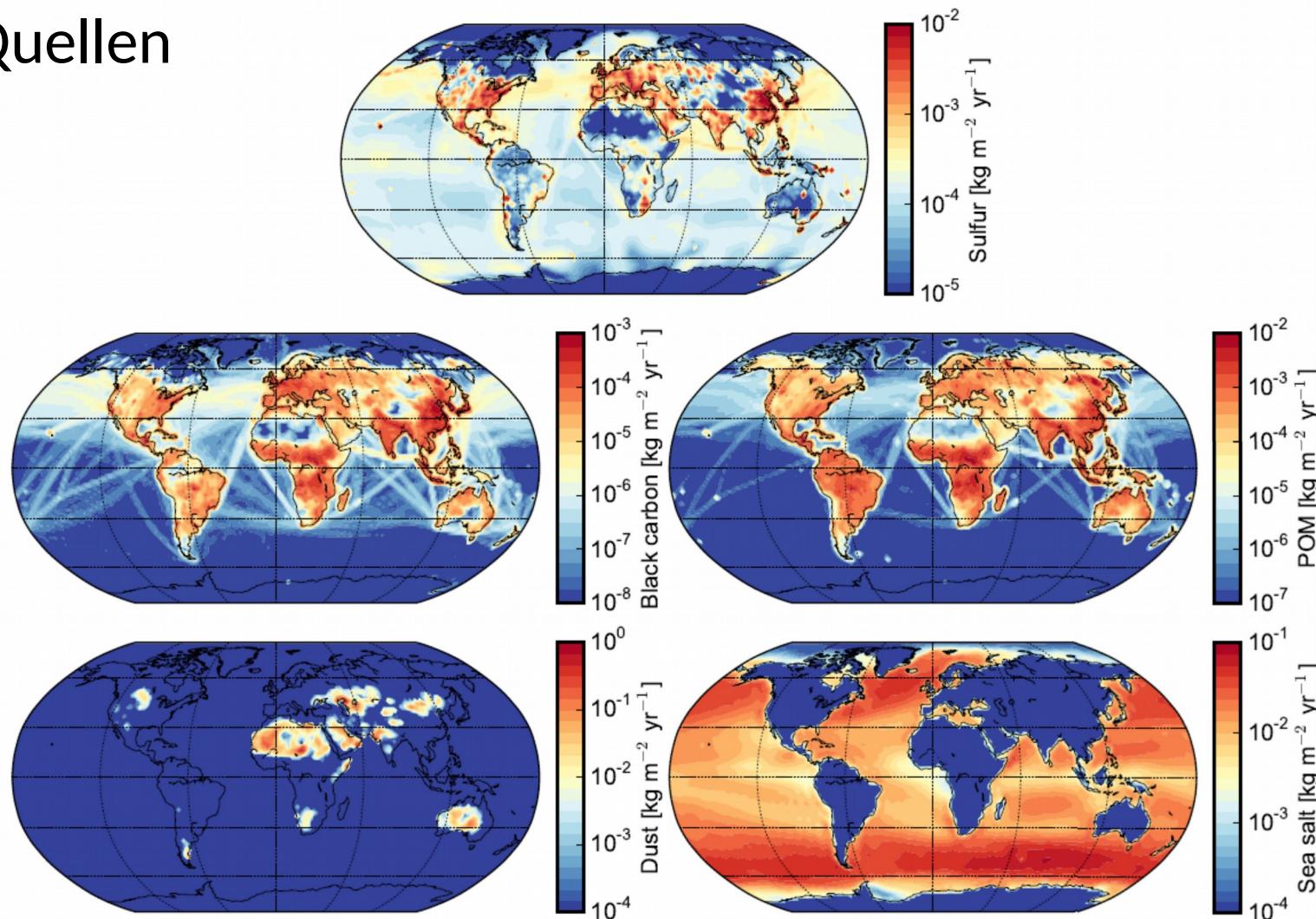


Abb. 5.9 (Lohmann et al., 2016)

POM: Particulate organic matter

Vom Wolken- zum Regentropfen

Ein Wolkentröpfchen wächst über Kondensation und Koaleszenz (Zusammenfliessen von einzelnen Wolkentröpfchen durch Zusammenstossen).

Regentropfen: Tropfen ist so gross, dass er fällt.

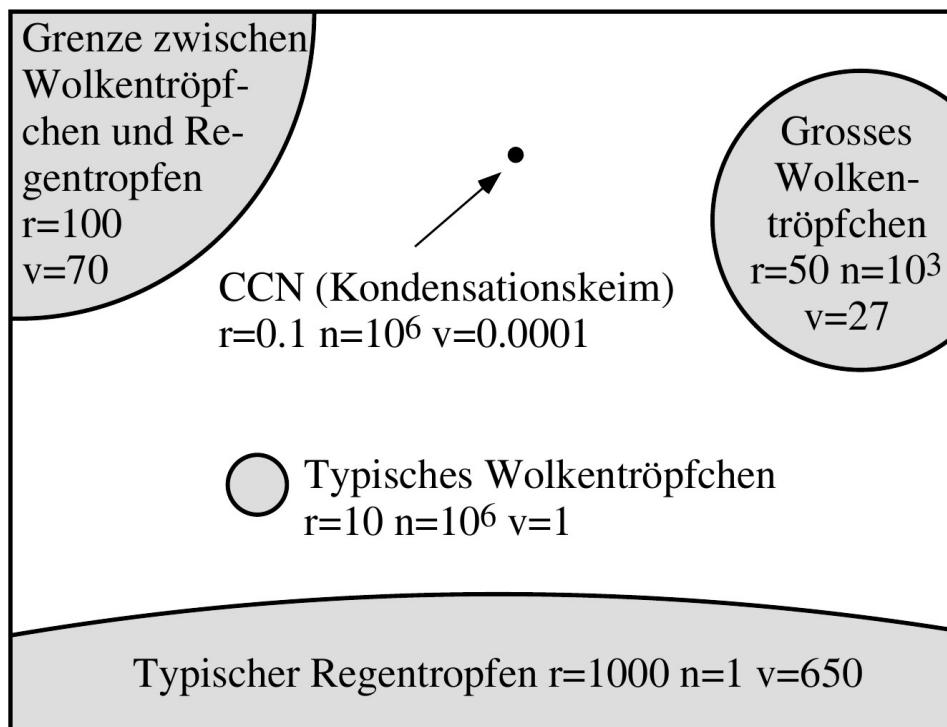
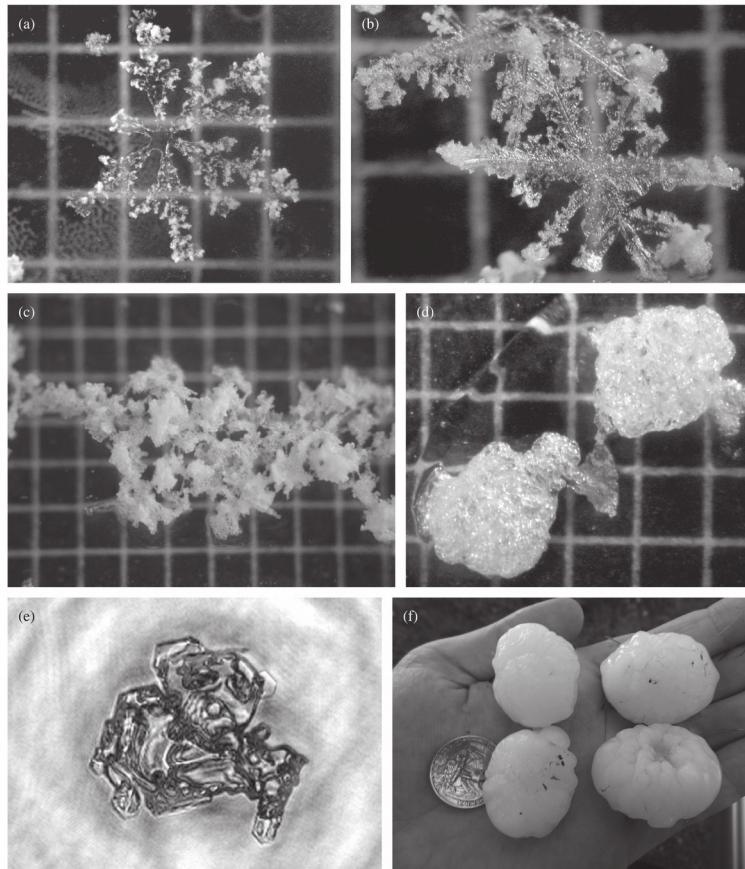


Abbildung 4.6: r Radius (μm), n Konzentration (pro Liter), v Fallgeschwindigkeit (cm s^{-1}) [Wallace and Hobbs].

Eiskristalle/Schneeflocke

- Bei Temperaturen unter 0°C bestehen die Wolken aus Eiskristallen und der Niederschlag fällt als Schnee, Graupel oder Hagel.
- Heterogene Eisnukleation an **Eisnukleationskeimen** (e.g. Staub, biologische Partikel, Russ)



(a) – (c) verreifte Eiskristalle
(d) Graupel
(e) Kristallaggregat
(f) Hagel

Aus Lohmann et al. 2016
An Introduction to Clouds

Niederschlagsbildung in den gemässigten Breiten

- Über Eisphase: Eiskristall bildet sich an Nukleationskeim und wächst zu Schneekristall
- Schmelzen der festen Niederschlagspartikel beim Fallen → Regen am Boden

