

# Vorlesung „Allgemeine Meteorologie“

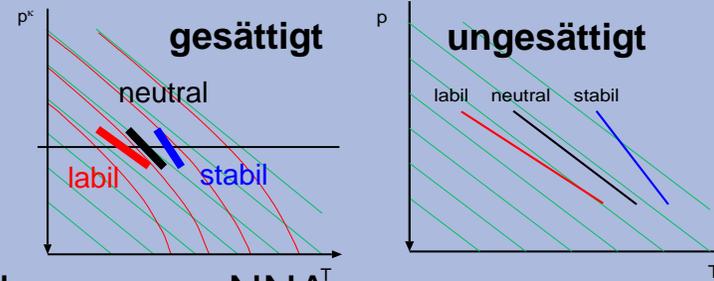
Prof. Michael Kunz

## Kapitel 9: Kondensationsprozesse in der Atmosphäre



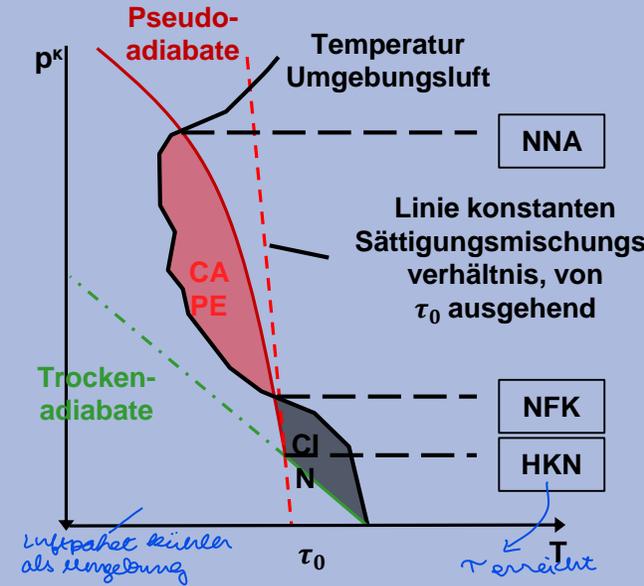
# Letzte Vorlesung...

■ **Stabilität / Labilität** einer Luftschichtung



■ Kondensationsniveaus HKN, NFK; Wolkenobergrenze NNA; Konvektionsenergie CAPE und CIN

$$CAPE = \int_{NFK}^{NNA} g \left( \frac{T_{V,LP} - T_{V,Ug}}{T_{V,Ug}} \right) dz$$



■ **Nukleation**: → Phasenänderung; Übergang in geordneteren Zustand

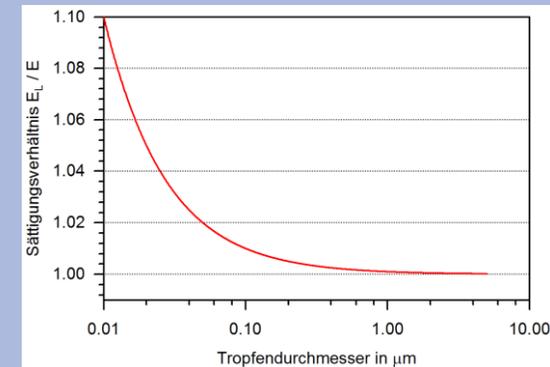
- **Homogene Nukleation**: sehr hohe Übersättigung notwendig, kommt praktisch nicht vor → ohne Aerosole (Korngröße nicht über)
- **Heterogene Nukleation**: Beteiligung **Aerosol**; entweder Erhöhung Anfangsradius oder Lösung
- Aerosole: feste oder lösliche Teilchen; Kondensationskeime (CCN;  $5 \cdot 10^{-2}$  bis  $10 \mu\text{m}$ ) / Eiskeime (IN)

■ **Krümmungseffekt**: Wassermoleküle auf gekrümmter Fläche haben geringere Bindungsenergie gegenüber Molekülen im Inneren

⇒ **Erhöhung Sättigungsdampfdruck  $E$**  in Tropfenumgebung

- Näherung aus Formel von Kelvin:

$$\frac{E_R}{E(T)} \approx 1 + \frac{\text{const.}}{R} > 1$$



## **9 Kondensationsprozesse in der Atmosphäre**

9.1 Krümmungs- und Lösungseffekt bei Tröpfchen

**9.2 Wolkenröpfchen**

**9.3 Tropfenwachstum in warmen Wolken**

**9.4 Tropfenwachstum über Eisphase**

**9.4.1 Eiskristalle in Wolken**

**9.4.2 Bergeron-Findeisen-Prozess**

**9.5 Entstehung von Hagel 😊**

**\* Neues aus der Hagelforschung**

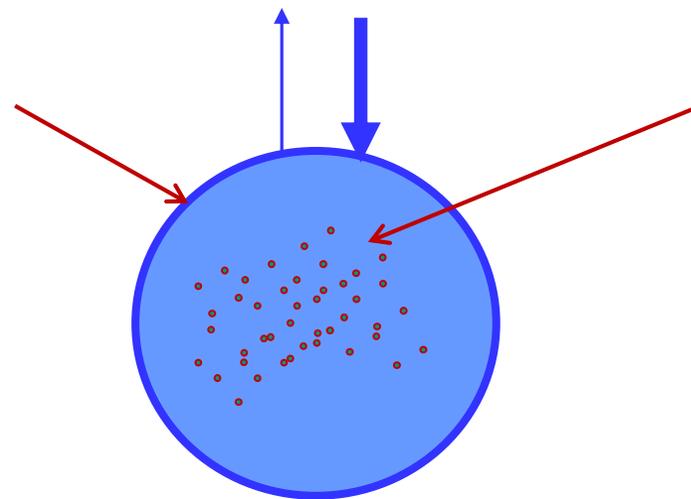
# 9.1 Krümmungs- und Lösungseffekt bei Tröpfchen

## Wassermoleküle eines Tropfens

**Folge:** Veränderung Sättigungsdampfdruck und damit Phasenflüsse

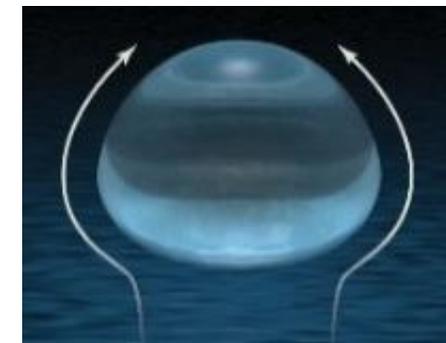
Wassermoleküle auf **gekrümmter Fläche** haben geringere Bindungsenergie gegenüber Moleküle im Inneren

$$\frac{E_R}{E(T)} \approx 1 + \frac{\text{const.}}{R} > 1$$



Tropfen

**Lösungen** (z.B. hygroskopisch) verstärken die Bindungen der Moleküle im Tropfen



# 9.1 Krümmungs- und Lösungseffekt bei Tröpfchen

## Lösungseffekt

- Verringerung Sättigungsdampfdruck  $E$  in Tröpfchenumgebung bei Lösung Aerosol in Wasser, z.B. hygroskopische Substanzen (alle Salze) *→ Ungleichgewicht*

- Erniedrigung von  $E$  durch Lösung ( $E_L$ ); beschrieben durch **Raoult'sches Gesetz:**

$$\frac{E_L}{E(T)} = 1 - \frac{n_L}{n + n_L} < 1 \quad (1)$$

$n_L$ : Anzahl Mole gelöste Substanz  
 $n$ : Anzahl Mole Wasser

$$\rightarrow n = \frac{m}{M} = \frac{\text{Masse Tropfen}}{\text{molare Masse}} = \frac{4/3\pi R^3 \rho_w}{18,02 \text{ g mol}^{-1}} = \text{const.} \cdot R^3 \quad (2)$$

- Wachsender Tropfen:  $n$  nimmt zu,  $n_L$  bleibt konstant

- Daraus folgt: 
$$\frac{E_L}{E(T)} = 1 - \frac{n_L}{n + n_L} \approx 1 - \frac{n_L}{n}$$

approx., da  $n \gg n_L$  Gleichung (2)

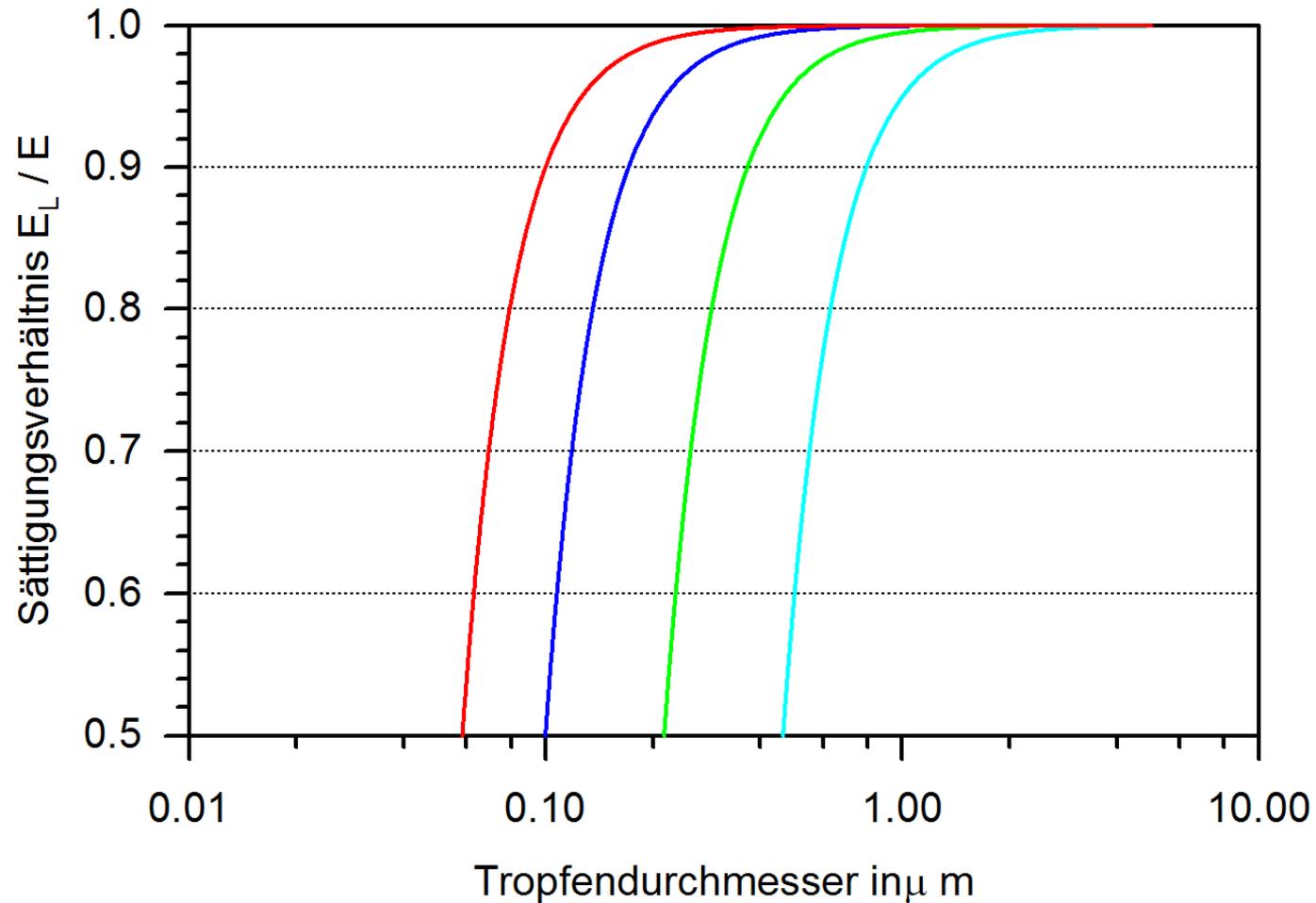
$$\Rightarrow \frac{E_L}{E(T)} = 1 - \frac{\text{const.}}{R^3}$$

- **Sättigungsverhältnis**  $E_L/E < 1$  bei Lösungen
- Bei kleinen Tröpfchen wächst  $E_L$  mit zunehmenden Radius rasch an und geht asymptotisch gegen  $E$

# 9.1 Krümmungs- und Lösungseffekt bei Tröpfchen

## Lösungseffekt

- Verschiedene Ausgangskonzentrationen von NaCl

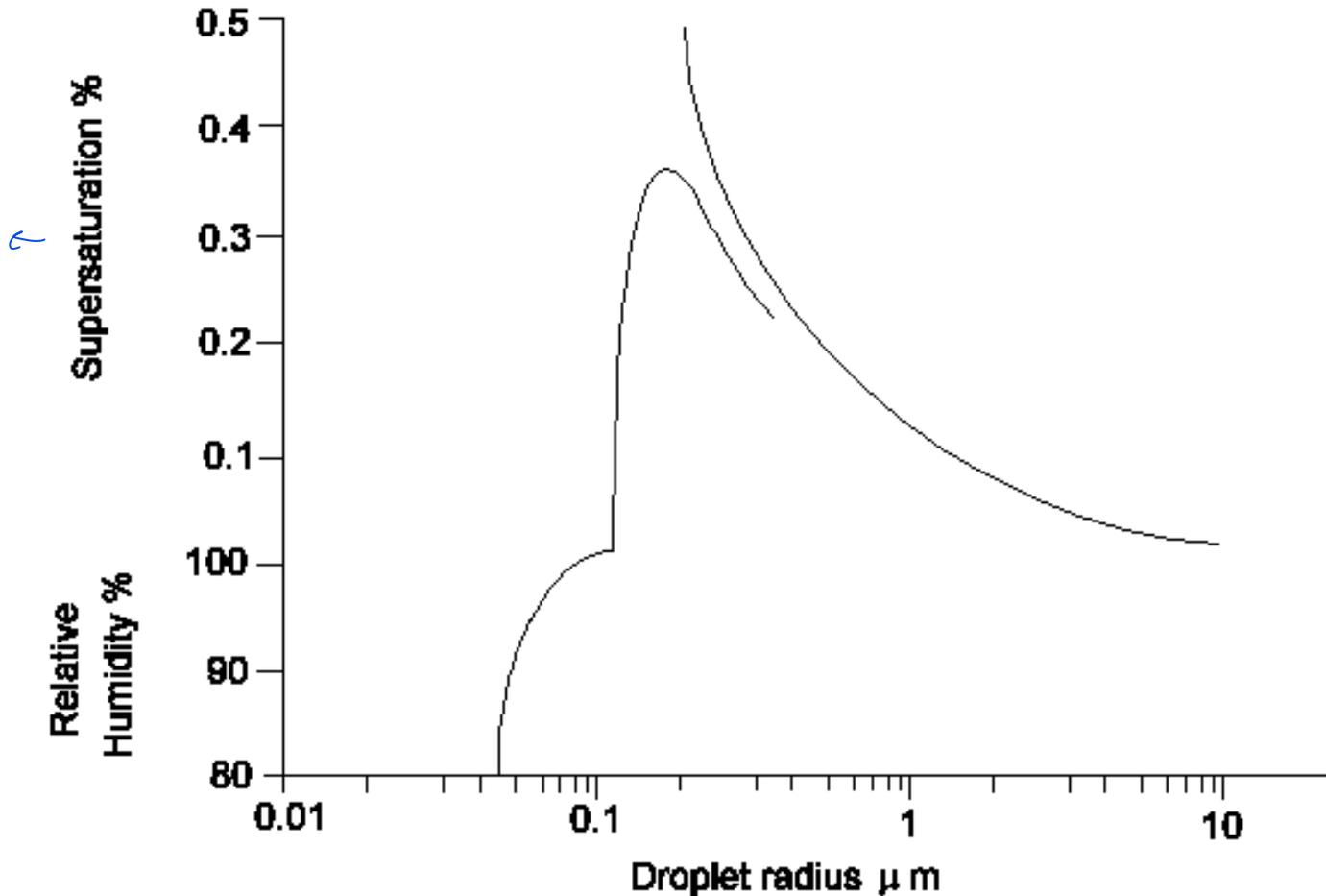




# 9.1 Krümmungs- und Lösungseffekt bei Tröpfchen

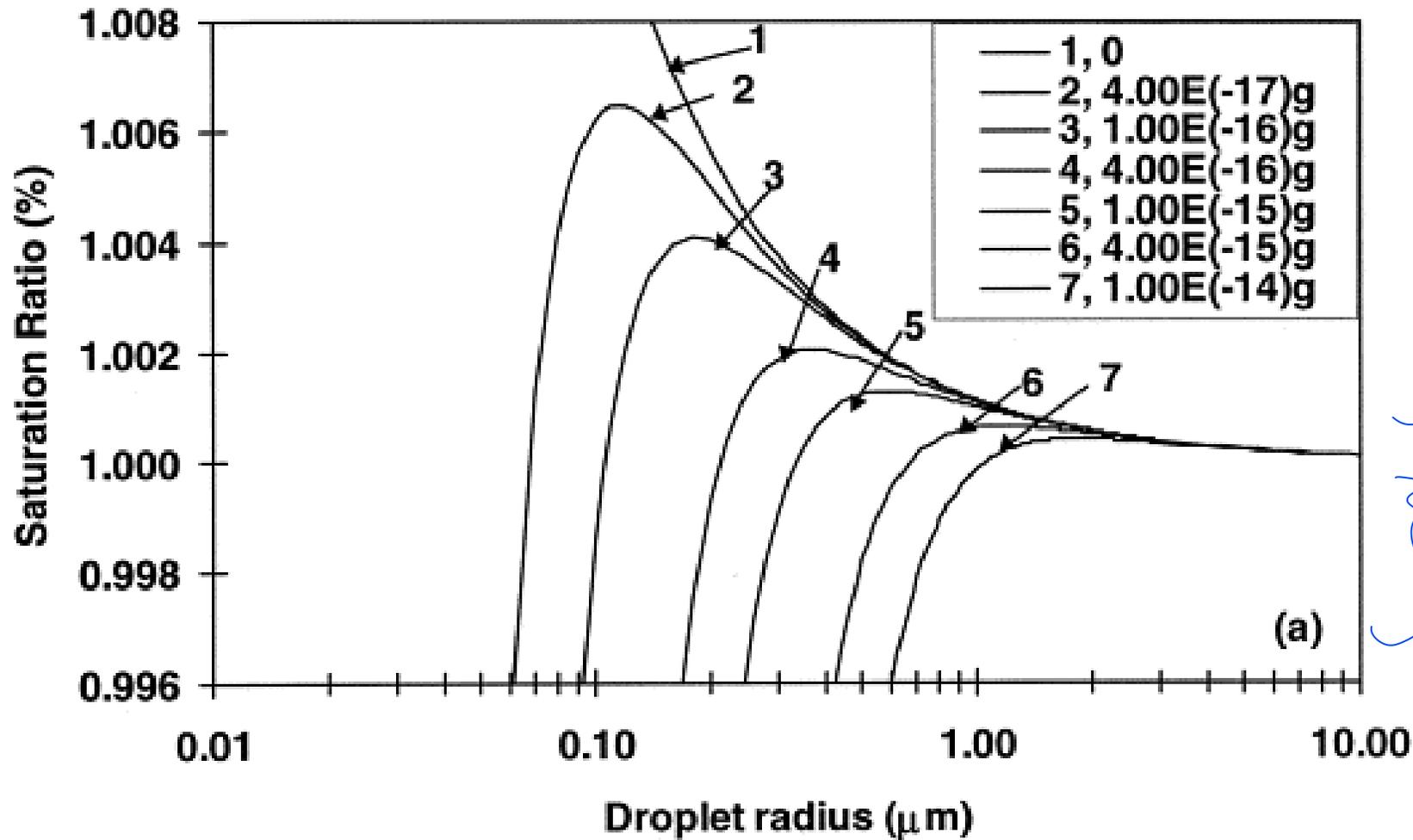
## Köhler-Diagramm: Krümmungs- und Lösungseffekt zusammen

2 Skalen, da  
Übersättigung deutlich  
geringere Zahlen



# 9.1 Krümmungs- und Lösungseffekt bei Tröpfchen

■ Abhängig von Radius und Konzentration (verschiedene Kurven) NaCl



*Krümmungseffekt*

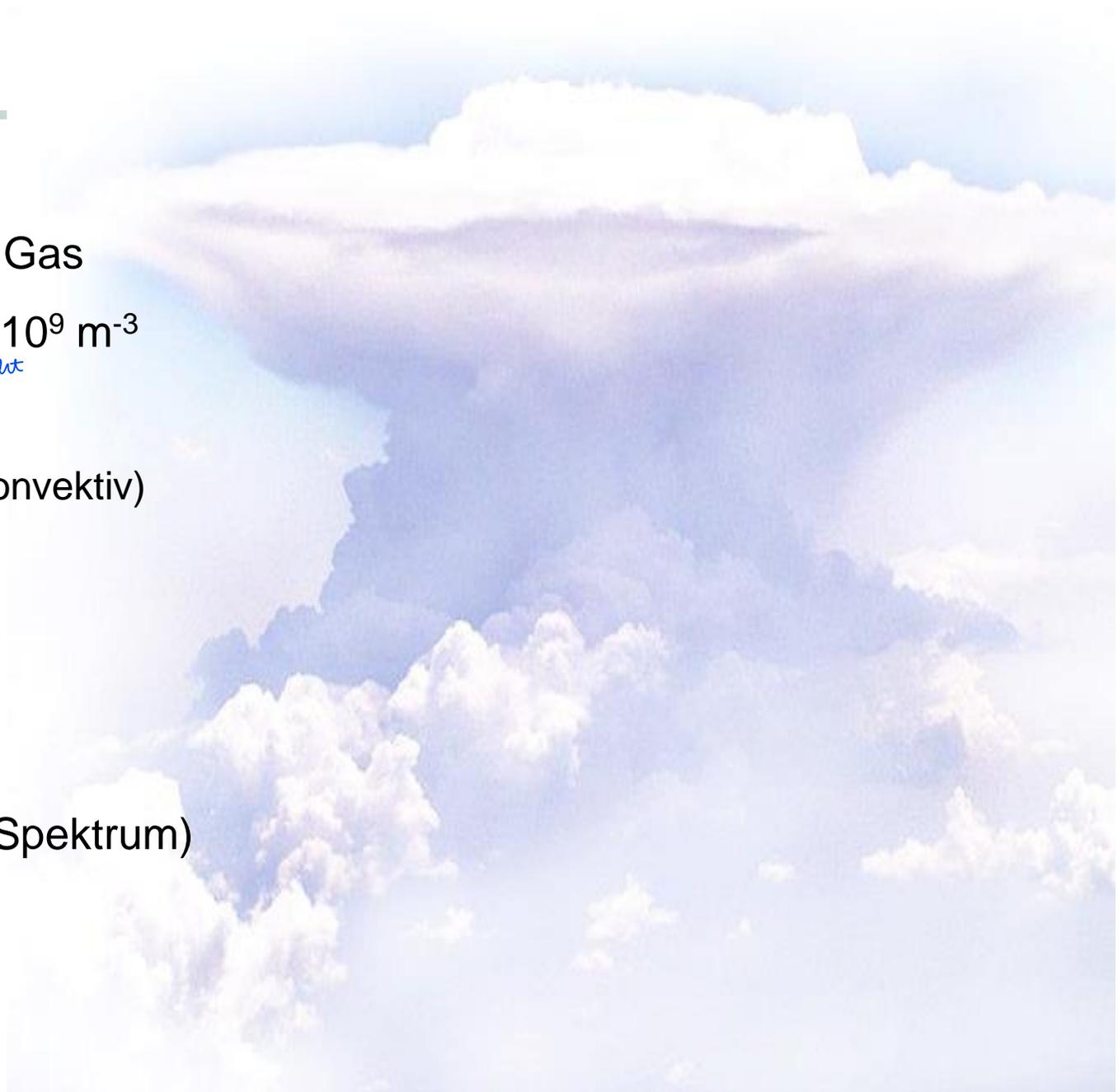
*Lösungseffekt dominiert*

## 9.2 Wolkentröpfchen

### Eigenschaften Wolken

- Kolloides System: Wolkenpartikel gelöst in Gas
- Hohe Anzahldichte an Wolkentröpfchen:  $\sim 10^9 \text{ m}^{-3}$   
*→ wichtig dafür ob Regen oder nicht*
- Tropfengrößenverteilung abhängig von:
  - Intensität Vertikalbewegung (stratiform vs. konvektiv)
  - Turbulenzgrad in der Wolke
  - Temperatur Umgebung
  - Alter der Wolke (*Tropfchen gießen zusammen → größer*)
- Da Bedingungen in Wolke nicht homogen  
⇒ unterschiedliche Größenverteilung (=Spektrum)  
mit Radien zwischen  $\sim 1$  und  $50 \mu\text{m}$

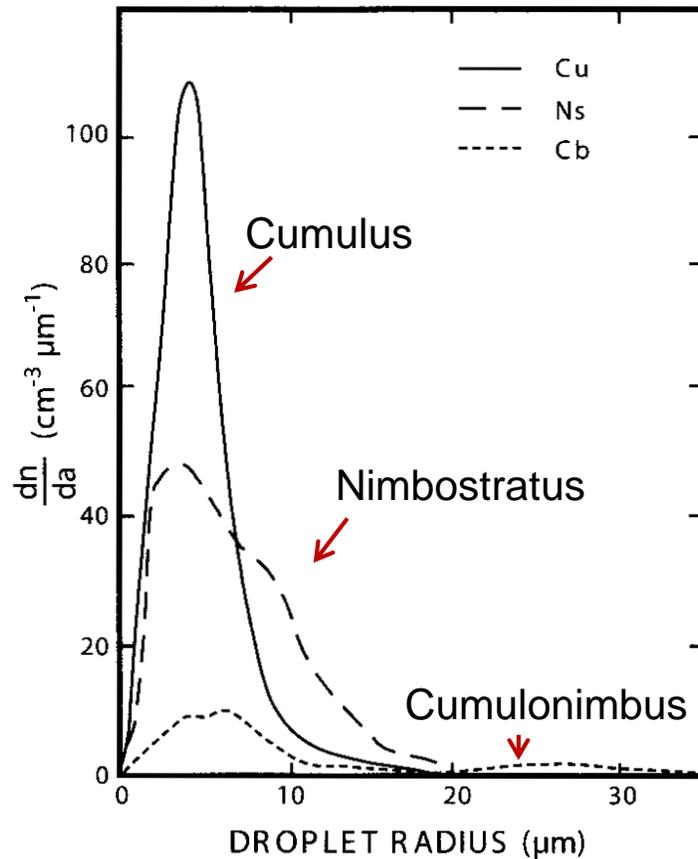
*bis  $50 \frac{\mu\text{m}}{\text{s}}$  bei starkem Gewitter*



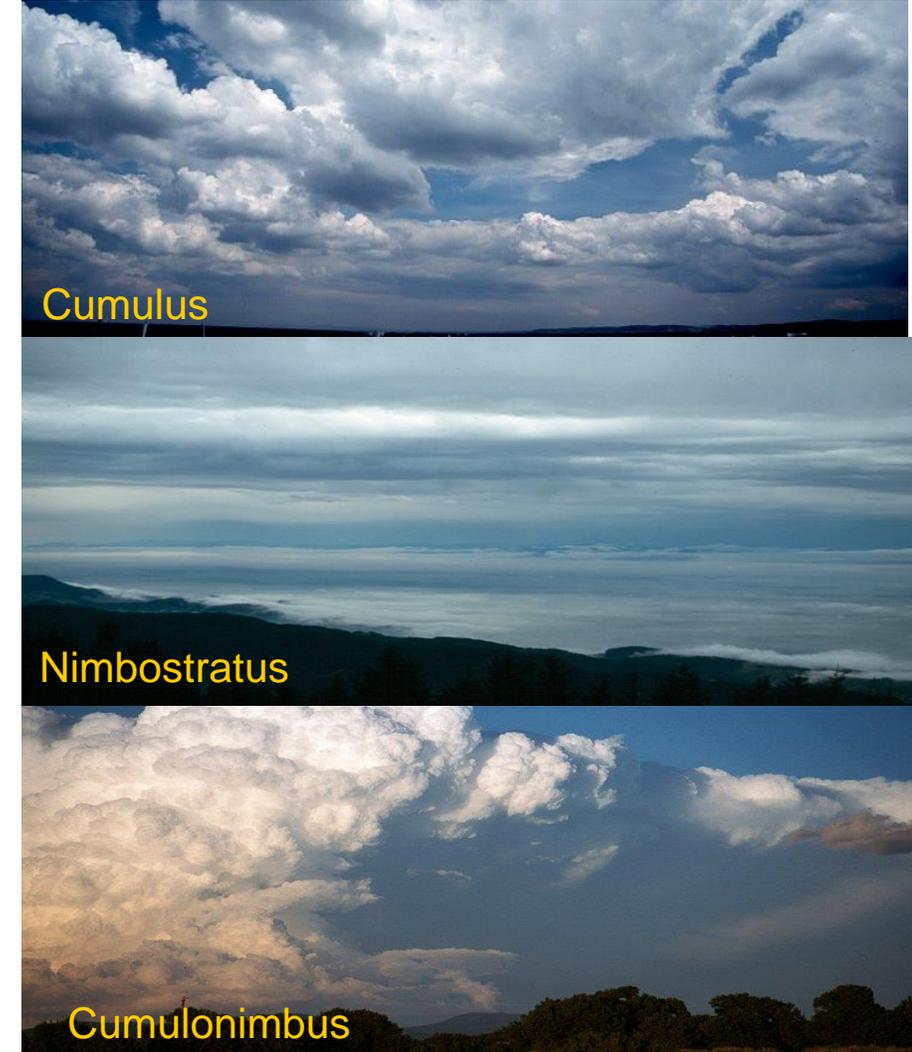
## 9.2 Wolkentröpfchen

### Größenspektrum Wolkentröpfchen für verschiedene Wolkenarten

- Typischer Radius Wolkentröpfchen: 1-10 (50)  $\mu\text{m}$ ; maritime Spektren schmaler als kontinentale



(Liou, 1990)

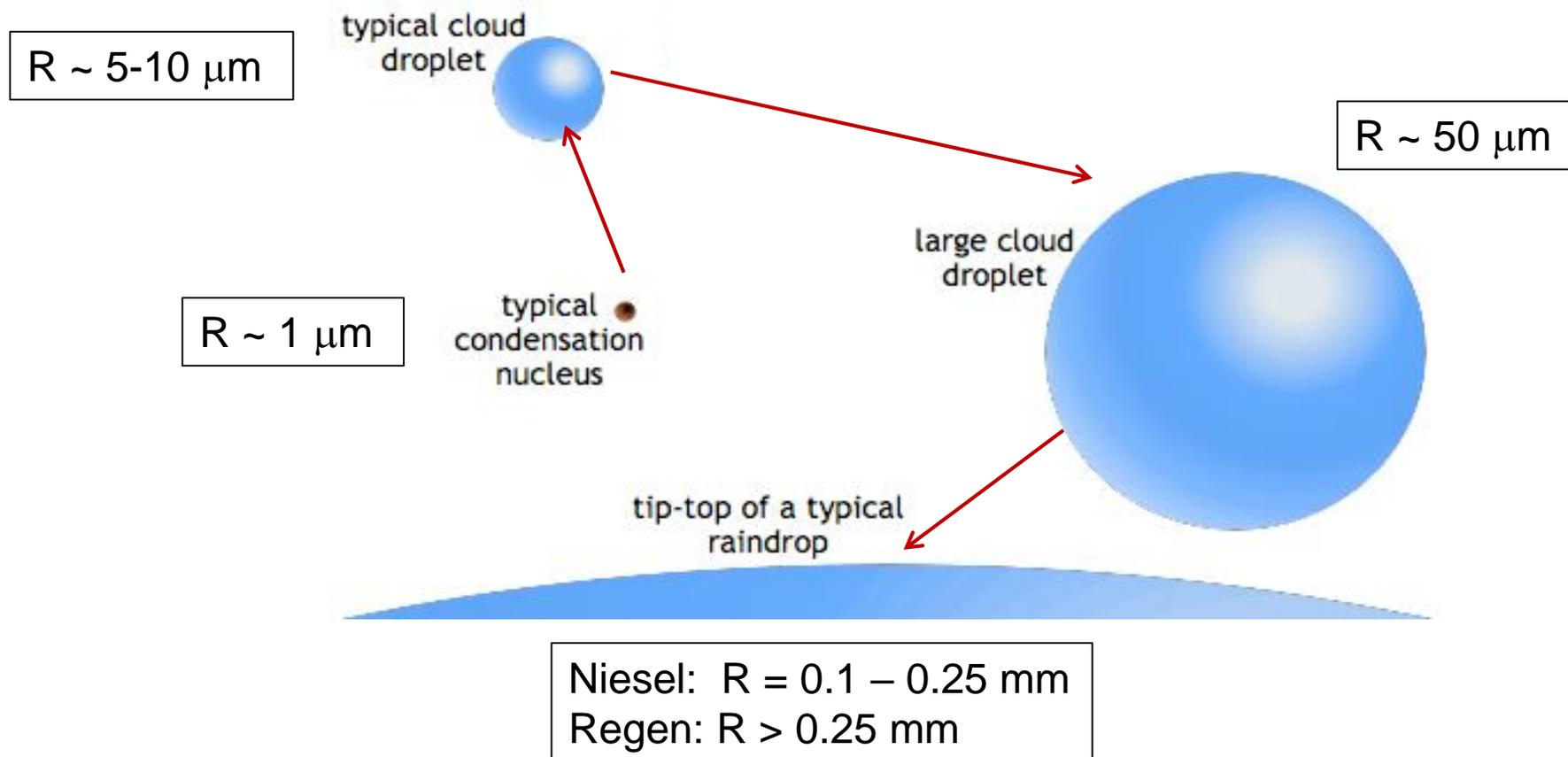


## 9.2 Wolkentröpfchen

→ Niederschlagsteilchen mit grösser Sedimentationsgeschw.

### Größenvergleich Hydrometeore (und Aerosol)

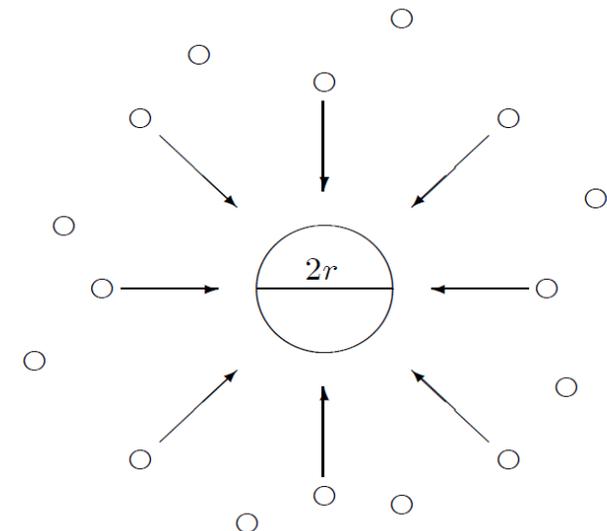
- Unterscheidung Wolken-/Niederschlag durch Aufwind: wenn Aufwind stark genug ist, dass er Hydrometeore vom Fallen abhält → Wolkenpartikel



## 9.3 Tropfenwachstum in warmen Wolken

### (A) Kondensation und Diffusion

- Diffusion von Wasserdampf der Umgebung zu Tröpfchen notwendig; dazu: größerer Wasserdampfpartialdruck Umgebung gegenüber direkter Umgebung Tröpfchen → *Diffusionsstrom*
- **Annahme:** Tröpfchen besitze Mindestgröße, so dass Krümmungs- und Lösungseffekt unbedeutend sind
- **Wasserdampffluss**  $F_d$  pro Volumen- und Zeiteinheit (Ficksche Diffusion)  
→ Antrieb Diffusion: Gradient Wasserdampfdichte in radialer Richtung (dR)



*Gradient in  
radiale Richtung  
↑*

$$F_d = -D \frac{d\rho_d}{dR}$$

$D$ : Diffusionskonstante  
 $\rho_d$ : Wasserdampfdichte  
 $R$ : radialer Abstand

# 9.3 Tropfenwachstum in warmen Wolken

## (A) Kondensation und Diffusion

### ■ mittlere Massenänderungsrate:

- wenn  $e_\infty > e_0 \equiv E$ : Kondensation
- wenn  $e_\infty < e_0 \equiv E$ : Verdunstung

↑                      ↑  
 Dampfdruck      Dampfdruck  
 Umgebung        Oberfl. Tropfen

### ■ Kondensation: Freisetzung latenter Wärme ( $= L_V dr_s$ )

- Zunahme  $T_0$
- aber: gleichzeitig stärkere Zunahme  $e_0 \equiv E(T_0)$  (exp-Form)

### ■ Folgen:

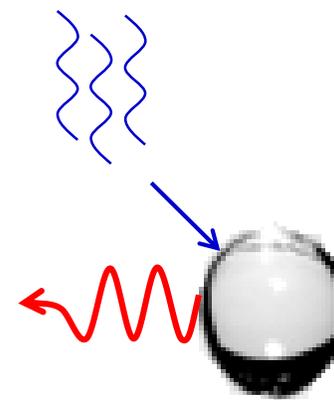
- Verlangsamung Massenänderungsrate (Tropfenwachstum)
- Folge: Begrenzung Radius Wolkentröpfchen (siehe Spektren;  $\sim 10 \mu\text{m}$ )
- **Kein Wachstum bis Regentropfengröße nur durch Diffusion!**

fläche                      diffusion  
 $\frac{dm}{dt} = -AF_d = 4\pi R^2 D \frac{d\rho_d}{dR}$  mit  $F_d = -D \frac{d\rho_d}{dR}$

Dampfdruck  
 $\frac{d\bar{m}}{dt} = \frac{4\pi R D}{R_d} \left( \frac{e_\infty}{T_\infty} - \frac{e_0}{T_0} \right)$   
↑                      ↑                      ↑  
 kontinuierl.      Umgebung      Oberfl. Tropfen  
 Wachstum

↪ d Sättigungsmischungsverhältnis

$\frac{e_0}{T_0} > \frac{e_\infty}{T_\infty} \rightarrow \frac{dm}{dt} < 0$  (Massenabnahme) → Verdunstung



↳ kann Tropfenbildung nur initiieren

## 9.3 Tropfenwachstum in warmen Wolken → nur Flüssigwasser

### (B) Wachstum Tropfen durch Koaleszenz: Theorie von Langmuir

- Kollision der Tropfen aufgrund unterschiedlicher **Fallgeschwindigkeiten**  $V_T$  und  $V_T'$  und anschließendem Zusammenfließen (= Koaleszenz) *ΔR nötig*
- Massenänderungsrate durch Koaleszenz (kontinuierliches Wachstum)

$$\frac{dm}{dt} = \varepsilon w_l \pi (R + R')^2 (V_T - V_T')$$

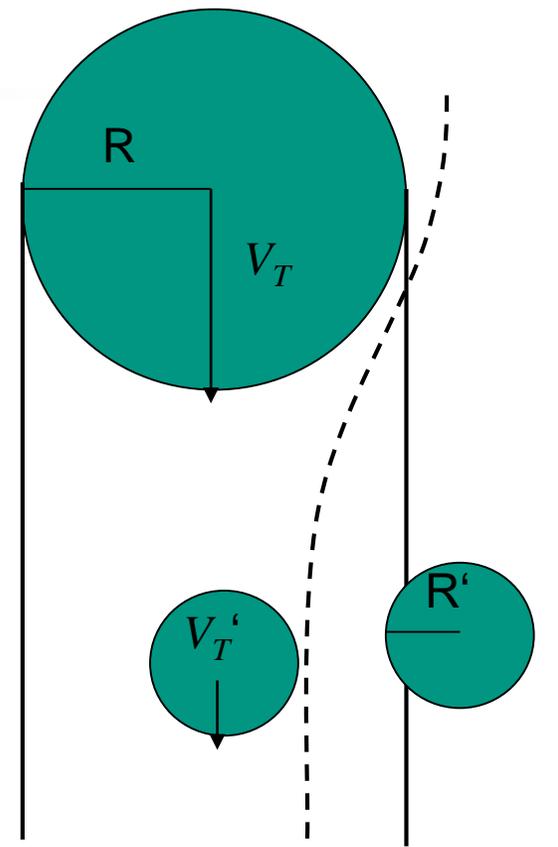
*effizienz = 1*  
*π r<sup>2</sup>*  
*Fallgeschw.*

$m$  = Masse  
 $w_l$  = Flüssigwassergehalt  
 $\varepsilon$  = Effizienz  
 $V_T$  = Endfallgeschwindigkeit (terminal velocity)

- Kollektionseffizienz  $\varepsilon$  berücksichtigt: → *lokal, verändert sich*
  - **Koaleszenzeffizienz**: berücksichtigt **Abprallen** von Tropfen
  - **Kollisionseffizienz**: kleine Tropfen strömen **um großen Tropfen herum**
- Langsamer Prozess, v.a. bei kleinen Tropfen (Beginn)

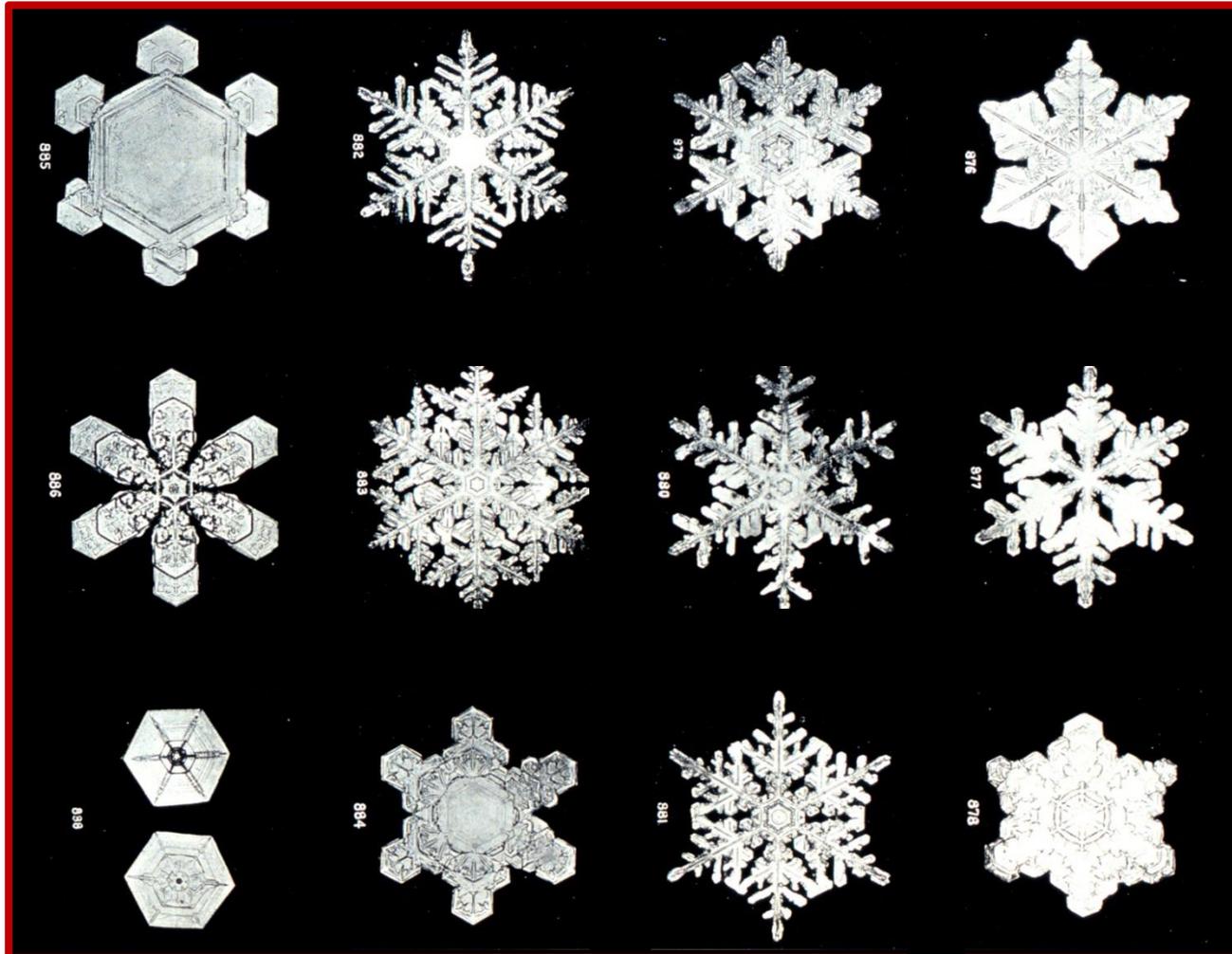
**Gesamt: Niederschlagsbildung** über Flüssigwasser durch (A) Diffusion und (B) Koaleszenz sind **wenig effizient**; Ausnahmen:

- große Vertikalgeschwindigkeit (*Erweiterwolken*)
- hoher Flüssigwassergehalt (Tropen)
- hohe vertikale Mächtigkeit der Wolke unterhalb Gefriergrenze



*nicht alles wird eingefangen wegen*  
 • *oberflächenspannung (abprallen)*  
 • *kleiner o kaum umfließen führt werden um R*

## 9.4 Tropfenwachstum über Eisphase



(Quelle: NOAA, 2012)

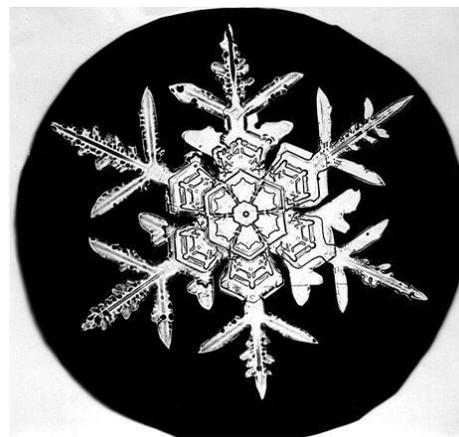
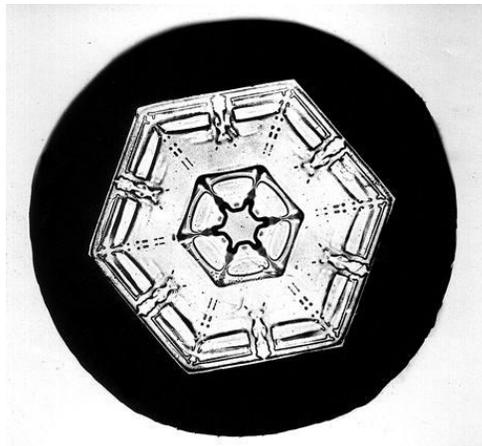
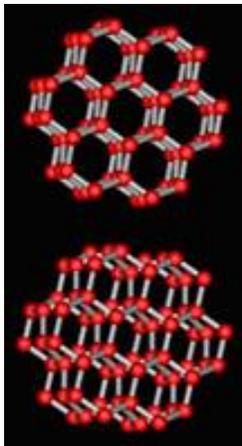
# Fragen über Fragen...

- Was passiert in einer **Mischwolke**, die aus Flüssigwasser und Eisteilchen besteht? Denken Sie dabei an den Sättigungsdampfdruck...  
*Sättigungsdampfdruck über Eis geringer  
unGGW → Diffusion  
Eis wächst auf Kosten des Flüssigwassers*
- Was ist das **Grundmuster** von Eiskristallen?
- Wieso gibt es in einer kalten Wolke **unterkühlte Tröpfchen** ( $T < 0^\circ\text{C}$ )?  
*Aerosol nötig mit ähnlicher Fiterstruktur wie Eis*
- Ab welcher Temperatur kommt es ohne Aerosole zu **Gefrierprozessen**? *-38°C*

## 9.4.1 Eiskristalle in Wolken

### Wachstumsformen Eiskristalle

- Gefrieren: Überführen der Wassermoleküle in **festes Raumgitter**
- Basis: **hexagonales** Kristallsystem  $I_h$  (in der Regel ☺) bildet Platten und Prismen; Molekülschichten werden nacheinander aufgebaut
  - **Langsamer** Aufbau (geringe Übersättigung): jede Schicht wird ganzheitlich aufgebaut, vollständiger Kristall *Schicht für Schicht*
  - **Schneller** Aufbau (hohe Übersättigung): Zunahme Verhältnis Oberfläche / Volumen  $\Rightarrow$  Aussparungen der hexagonalen Plättchen (Vergrößerung Oberfläche), Bildung von Dendriten

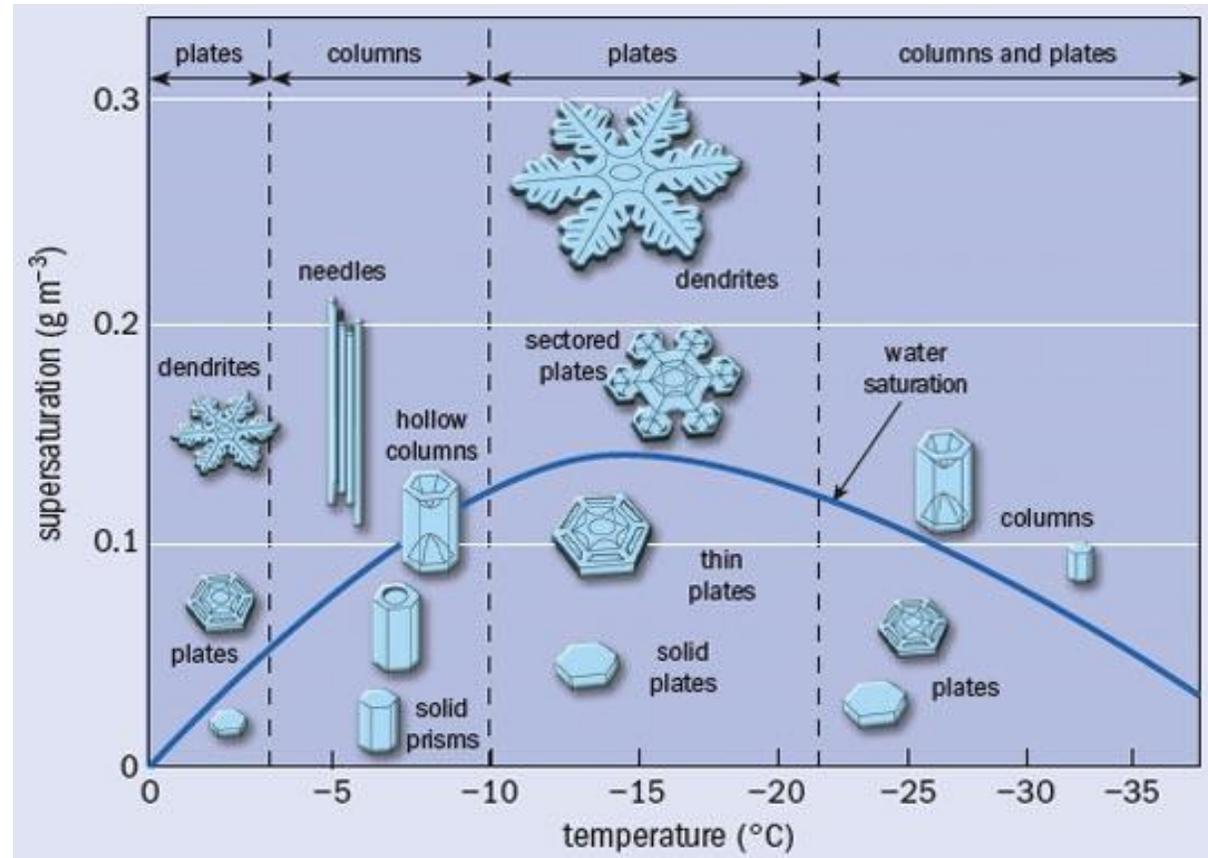


# 9.4.1 Eiskristalle in Wolken

*flatt von T & übersättigung*

## Wachstumsformen Eiskristalle

- Formen / Wachstum abhängig von Temperaturbereich und Übersättigung



*schnelles Wachstum*

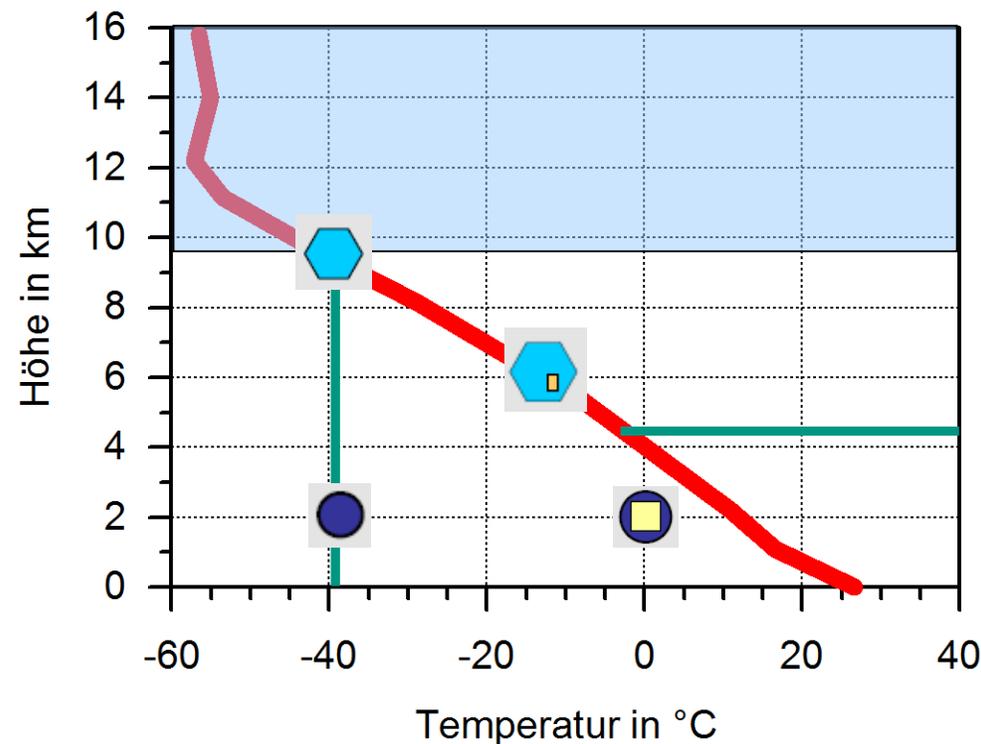
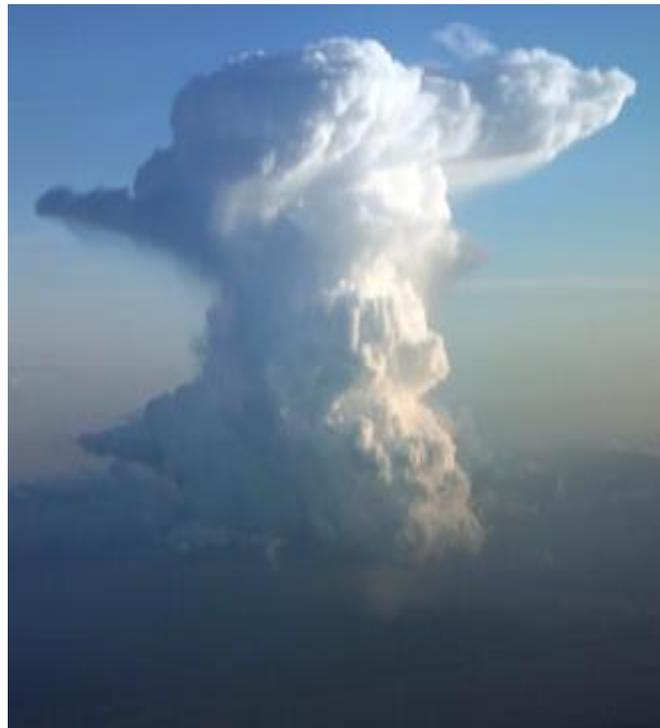
*langsameres Wachstum*

(Quelle: [www.physicsworld.com](http://www.physicsworld.com), 2013)

# 9.4.1 Eiskristalle in Wolken

## Homogene / heterogene Eisnukleation (analog warme Wolken)

- **Gefriervorgang:** feste Molekülkonfiguration durch zufallsartiges Zusammentreffen mehrerer Wassermoleküle  
→ Freisetzen Gefrierwärme, instabil durch thermische Molekularbewegung
- Konfiguration stabiler bei geringer T :  $\Rightarrow$  homogenes Gefrieren für  $T < -38^\circ\text{C}$



*ohne Aerosole*  
↑  
**Homogene Eisnukleation**  
 $T < -38$  bis  $-50^\circ\text{C}$   $\rightarrow$  bei Gefrieren, bei Kond. nicht  
**Heterogene Eisnukleation**  
 $-5 > T > -38^\circ\text{C}$

(B. Vogel, 2013)

# 9.4.1 Eiskristalle in Wolken

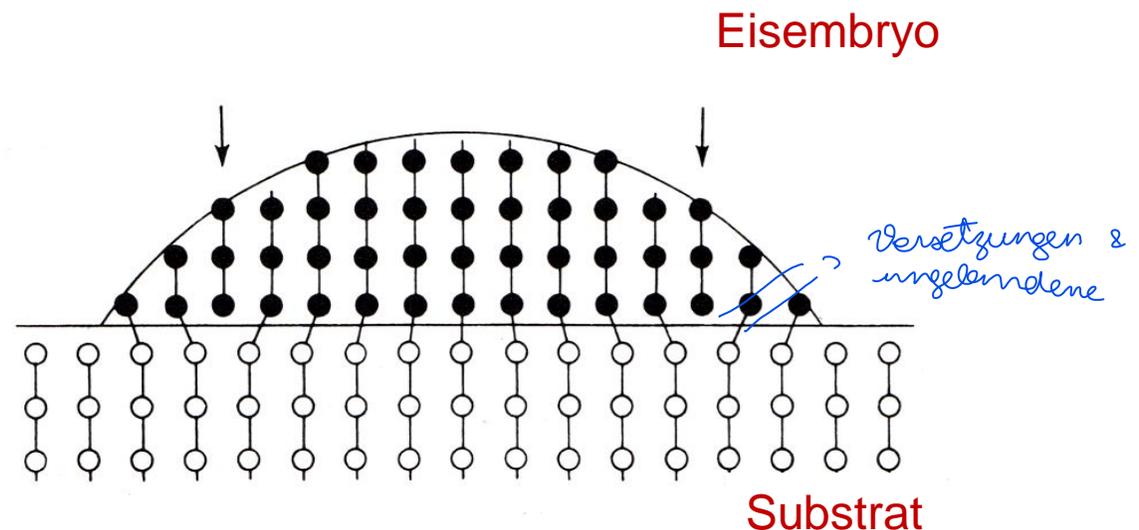
## Heterogene Eisnukleation

- **Eisphasenbildung** durch Deposition von Wasserdampf an Aerosol (= Eiskeim, Gefrierkern oder <sup>Ice</sup> Eis-Nucleating Particle, INP)
- Verschiedene Anforderungen an **Eis-Nukleus INP**:
  - geometrische Anordnung der Bindungen an der Oberfläche möglichst ähnlich zu der von Eis
  - Größe:  $> 0.1 \mu\text{m}$  (Überwindung kritischer Radius)
  - wasserunlöslich
  - Nuklei: Bakterien, Pollen, Mineralstaub, Eis (!)

Eisbildung an kristallinem Substrat mit Versetzungen an Schnittstelle  
⇒ Erhöhung der freien Energie der Oberfläche  
⇒ Nukleation bei geringerer Temperatur

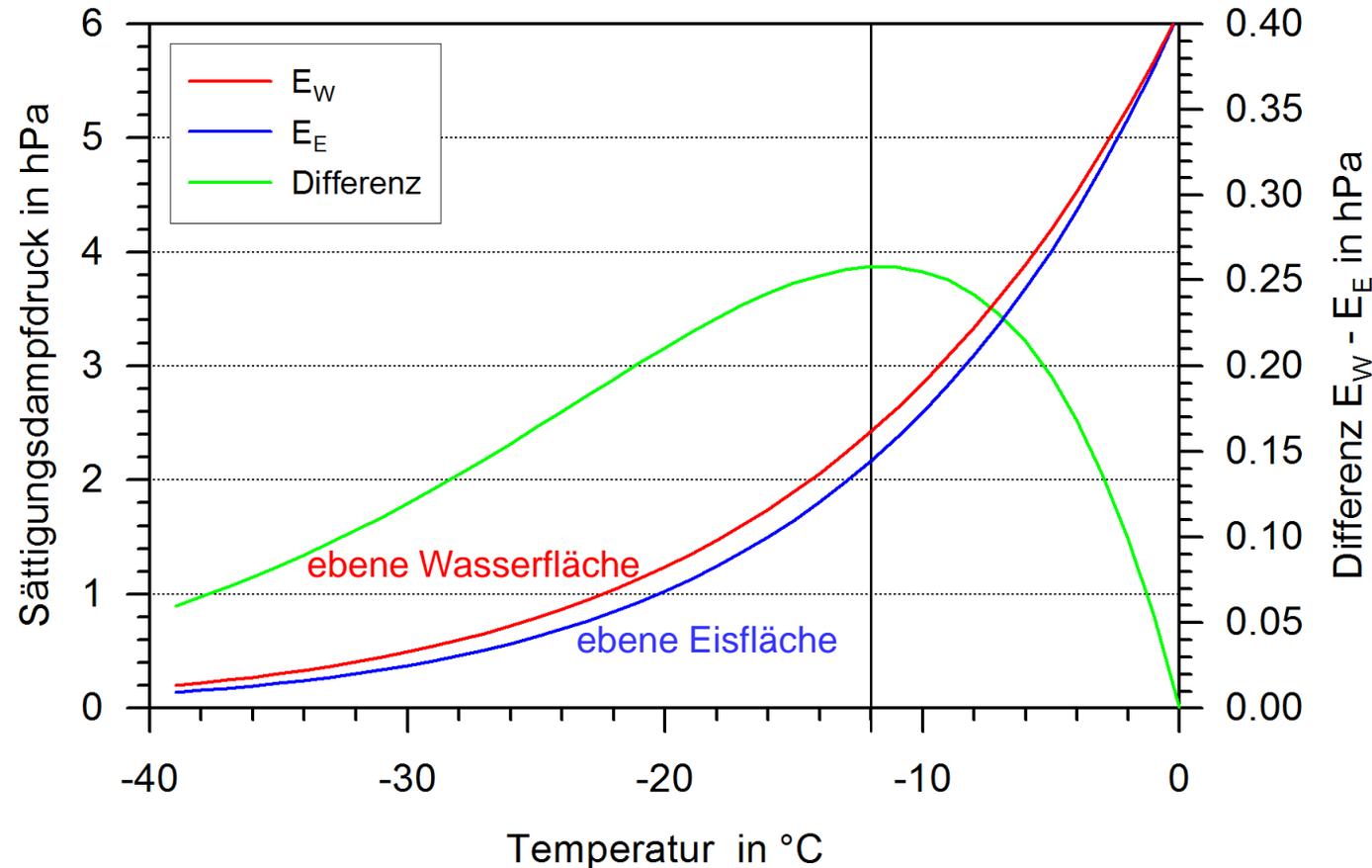
(Fletcher, 1966)

*fließt am besten mit anderem Eis*



## 9.4.2 Bergeron-Findeisen-Prozess

- Verringerung Sättigungsdampfdruck über (ebener) Eisoberfläche
  - ⇒ Wasserdampfdiffusion von Flüssigwasser ( $E$  erhöht) zu Eis ( $E$  verringert)
  - ⇒ Eisteilchen wachsen auf Kosten der Wassertröpfchen

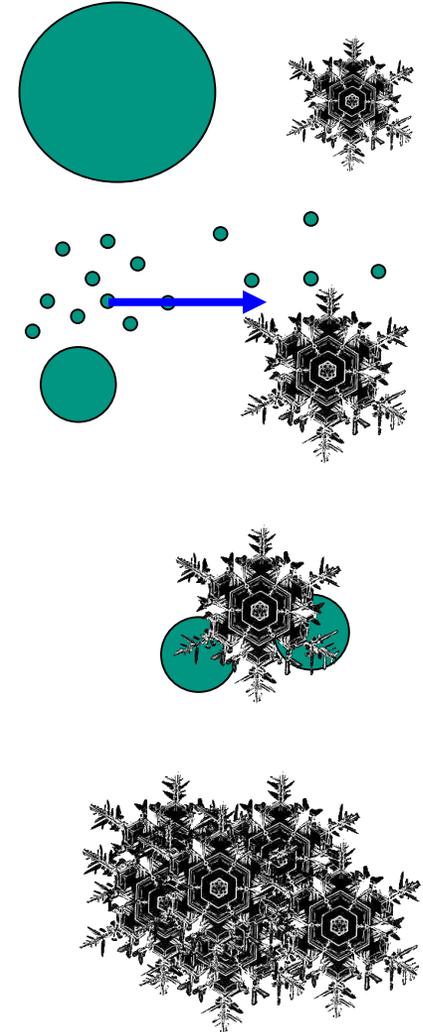


## 9.4.2 Bergeron-Findeisen-Prozess

### Bildung von Niederschlagsteilchen über Eisphase

- Ausgang: Mischwolke, Eisphase und unterkühlte Wolkentropfen nebeneinander
- **Wasserdampfdiffusion** von Tropfen zu Eisteilchen  
→ sehr schnelles Wachstum der Eisteilchen auf Kosten Flüssigwassertropfen
- Koagulation von Wolkentröpfchen an Eisteilchen während Fallen: **Akkreszenz**
- Einfangen verschiedener Eisteilchen: **Aggregation**

→ **Sehr effektives, schnelles Wachstum Niederschlagsteilchen**



# Fragen über Fragen...

■ Welche **Form** haben Hagelkörner?

*Klumpen*

■ In welchen Wolkenarten kann sich **Hagel** bilden?

*nur in  
Cumulonimbus  
ideal: rotierende  
Supercellen*

■ Wodurch entstehen die verschiedenen **Schichten** eines Hagelkorns im Vertikalschnitt?

*häufiges Aufschmelzen*



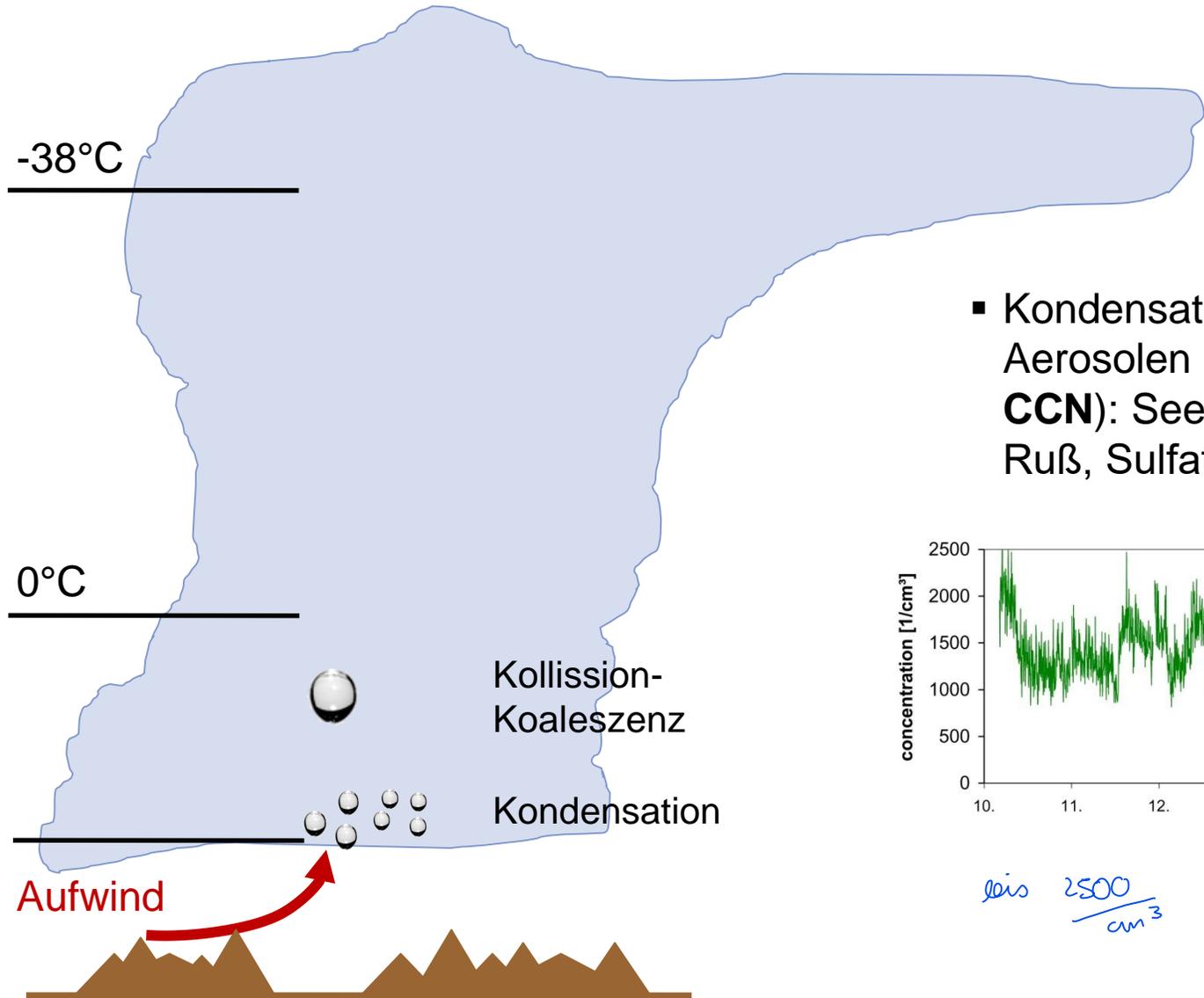
## 9.5 Entstehung von Hagel

- Formen: rund, konisch, oval, gezackt, abgeplattet, Ausstülpungen...
- Aufbau aus mehreren Schichten
- Dichte:  $0.8 - 0.9 \text{ g cm}^{-3}$ ; Durchmesser: 0.5 bis 20(!) cm

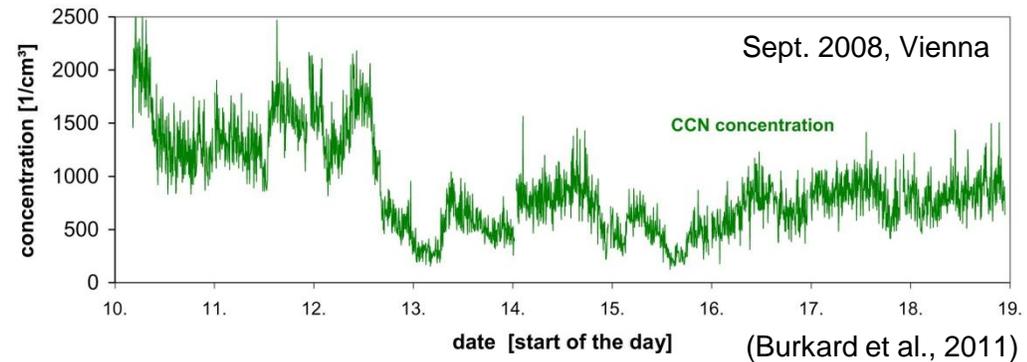
↙ größtes in DE



# 9.5 Entstehung von Hagel

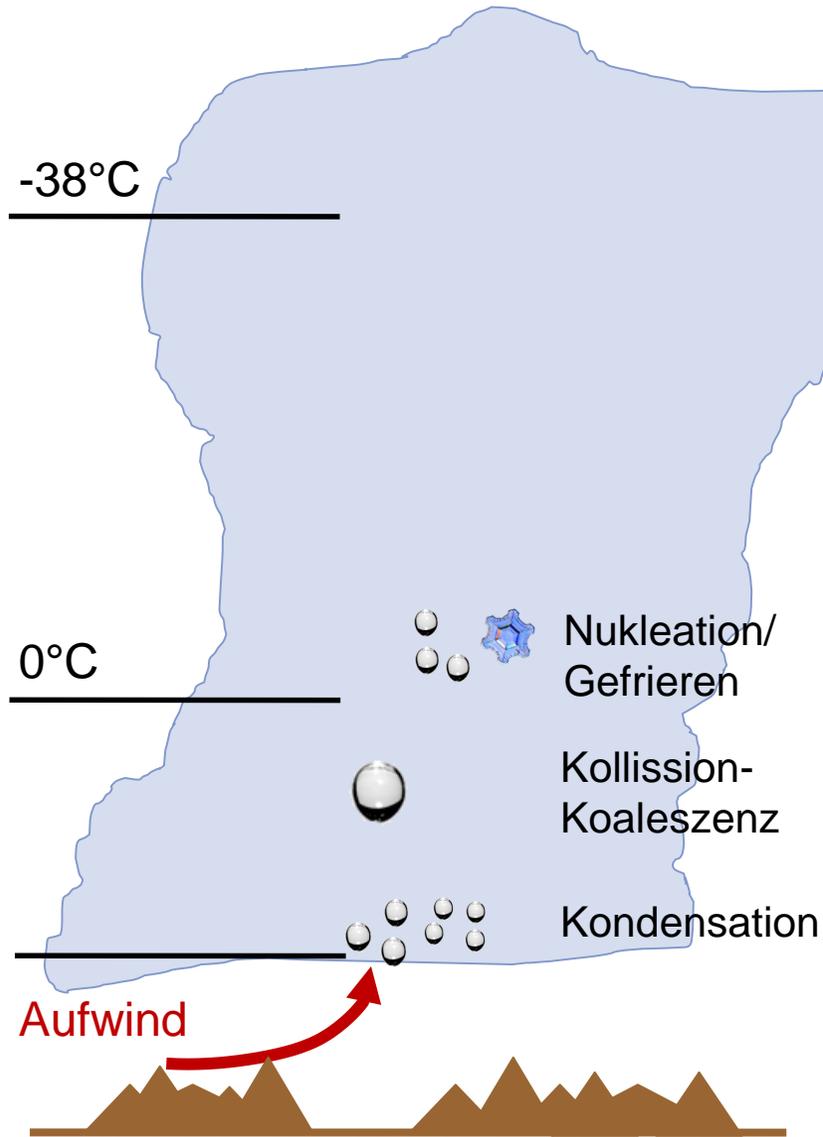


- Kondensation unter Beteiligung von Aerosolen (Cloud-Condensation-Nuclei, **CCN**): Seesalz, Mineralstaub, Ruß, Sulfat,...

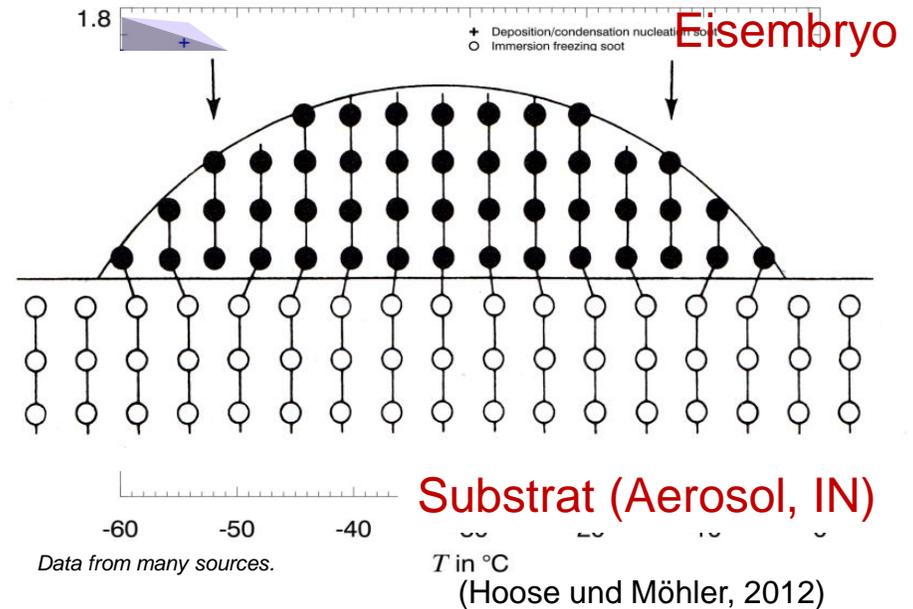


leis  $\frac{2500}{\text{cm}^3}$

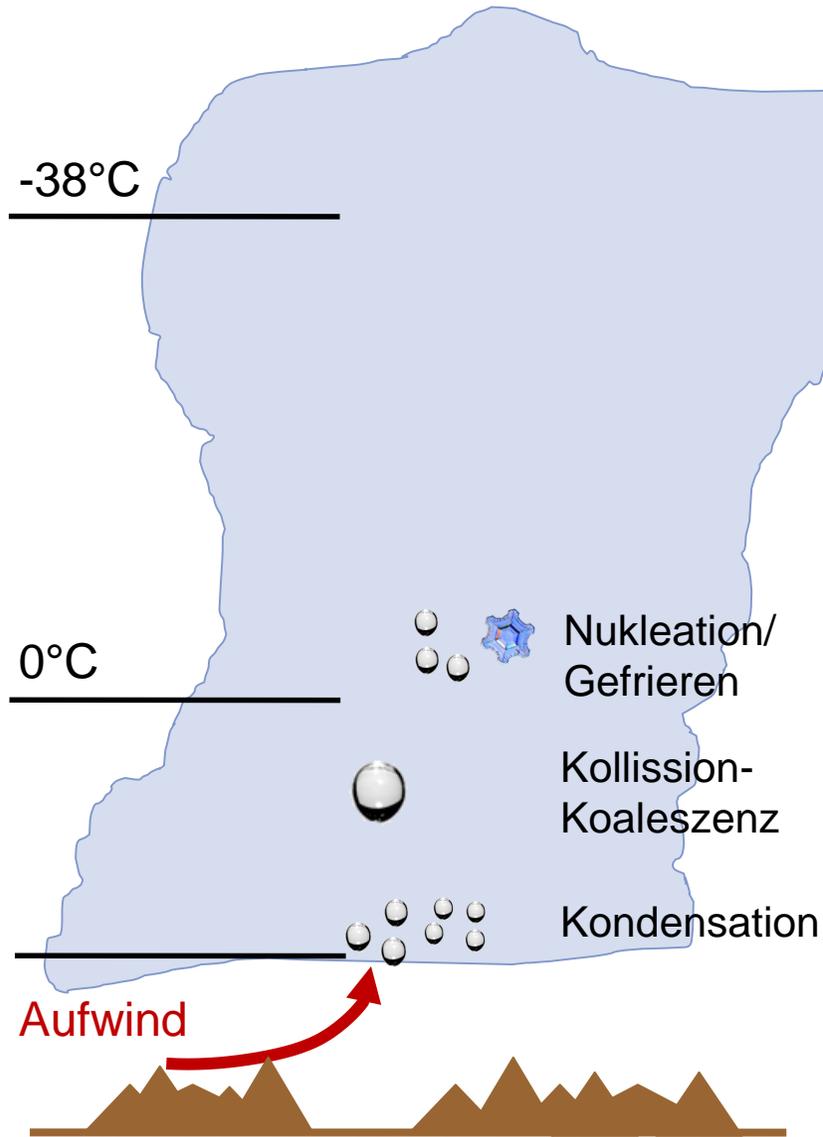
# 9.5 Entstehung von Hagel



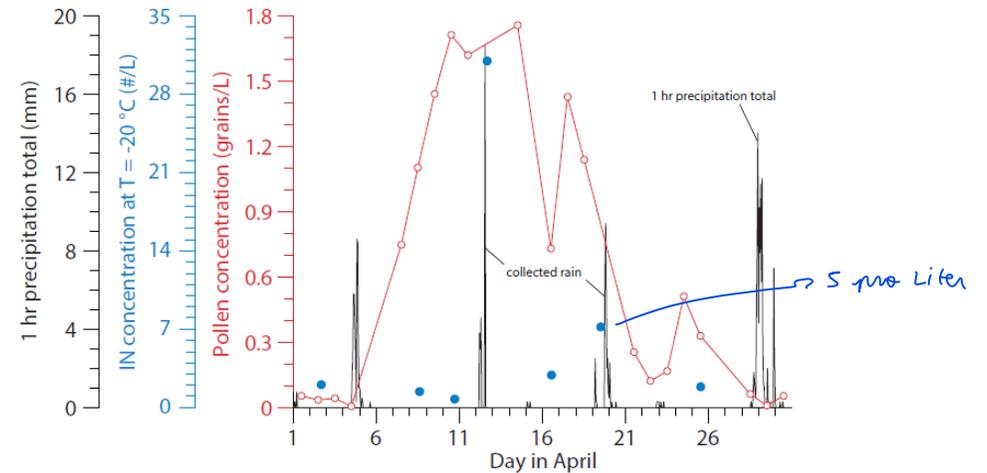
- Heterogene Gefrierprozesse mit Aerosolen (Ice Nuclei, **IN**): Bakterien, Pollen, Mineralstaub,...



# 9.5 Entstehung von Hagel

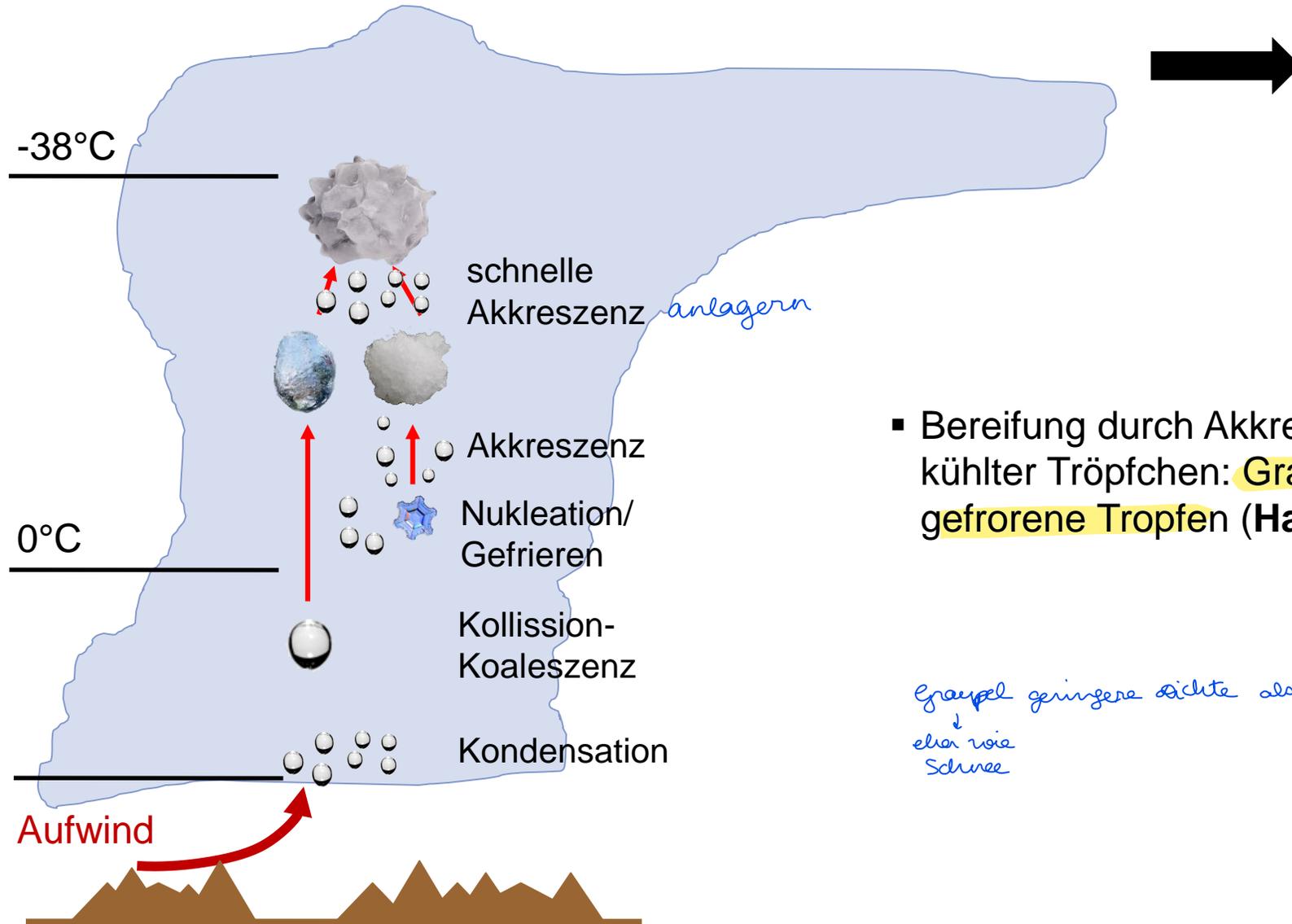


- Heterogene Gefrierprozesse mit Aerosolen (Ice Nuclei, IN): Bakterien, Pollen, Mineralstaub,...



IN concentrations at  $T = -20^{\circ}\text{C}$  for the month of April 2013, North Carolina (Hader et al., 2014)

# 9.5 Entstehung von Hagel



- Bereifung durch Akkreszenz unterkühlter Tröpfchen: **Graupel / gefrorene Tropfen (Hagelembryo)**

*Graupel geringere dichte als Hagel  
↳ wie Eis  
eben wie Schnee*

# 9.5 Entstehung von Hagel

## Wachstumsregime Hagel *→ aeroch. Schichten*

### ■ Trockenes Wachstum ( $T_s < 0^\circ\text{C}$ )

- Lufteinschlüsse bei Bereifungsvorgang
- Konzentration Lufteinschlüsse ~ Gefriertrate
- opake Schicht

### ■ Feuchtes Wachstum ( $T_s \approx 0^\circ\text{C}$ )

- Gefrierwärme (Akkreszenz) → Anschmelzen
- Eindringen Flüssigwasser in Poren
- klare, durchsichtige Schicht

### ■ Trennbereich zwischen Regimen: Schumann-Ludlam Limit (SLL)



# Wir fassen zusammen...

- Lösungseffekt führt zur Erniedrigung Sättigungsdampfdruck; Effekt  $\sim 1/R^3$
- Köhler-Gleichung: Krümmungs- und Lösungseffekt; Gleichgewichtskurven
- Tropfenwachstum in warmen Wolken: Diffusion und Kollision/Koaleszenz; langsames Wachstum; abhängig von Tropfenspektrum (breite Spektren effektiv) und Aufwind in Wolken
- Eisteilchen: hexagonale Mikro- und Makrostruktur
- In Wolke i.d.R. heterogene Nukleation / Eisbildung unter Beteiligung Aerosol (Ice Nuclei, IN); ohne IN: unterkühltes Wasser: Flüssigwasser bis ca.  $-38^\circ\text{C}$
- Erniedrigung Sättigungsdampfdruck über Eisfläche  $\rightarrow$  Wasserdampfdiffusion von Flüssigwassertröpfchen zu Eisteilchen
- In Gewitterwolken: erst Graupelbildung durch Akkreszenz (Anlagerung unterkühlter Tröpfchen an Eisteilchen), dann Hagelbildung
- Schichtenaufbau Hagelkörner durch Feuchtes / Trockenes Wachstumsregime abhängig von Umgebungstemperatur und Konzentration unterkühlter Tröpfchen

*$\rightarrow$  E-Mail Swabian Moses Mai-Juli  
Föhnwind*