

Vorlesung „Allgemeine Meteorologie“

Prof. Michael Kunz



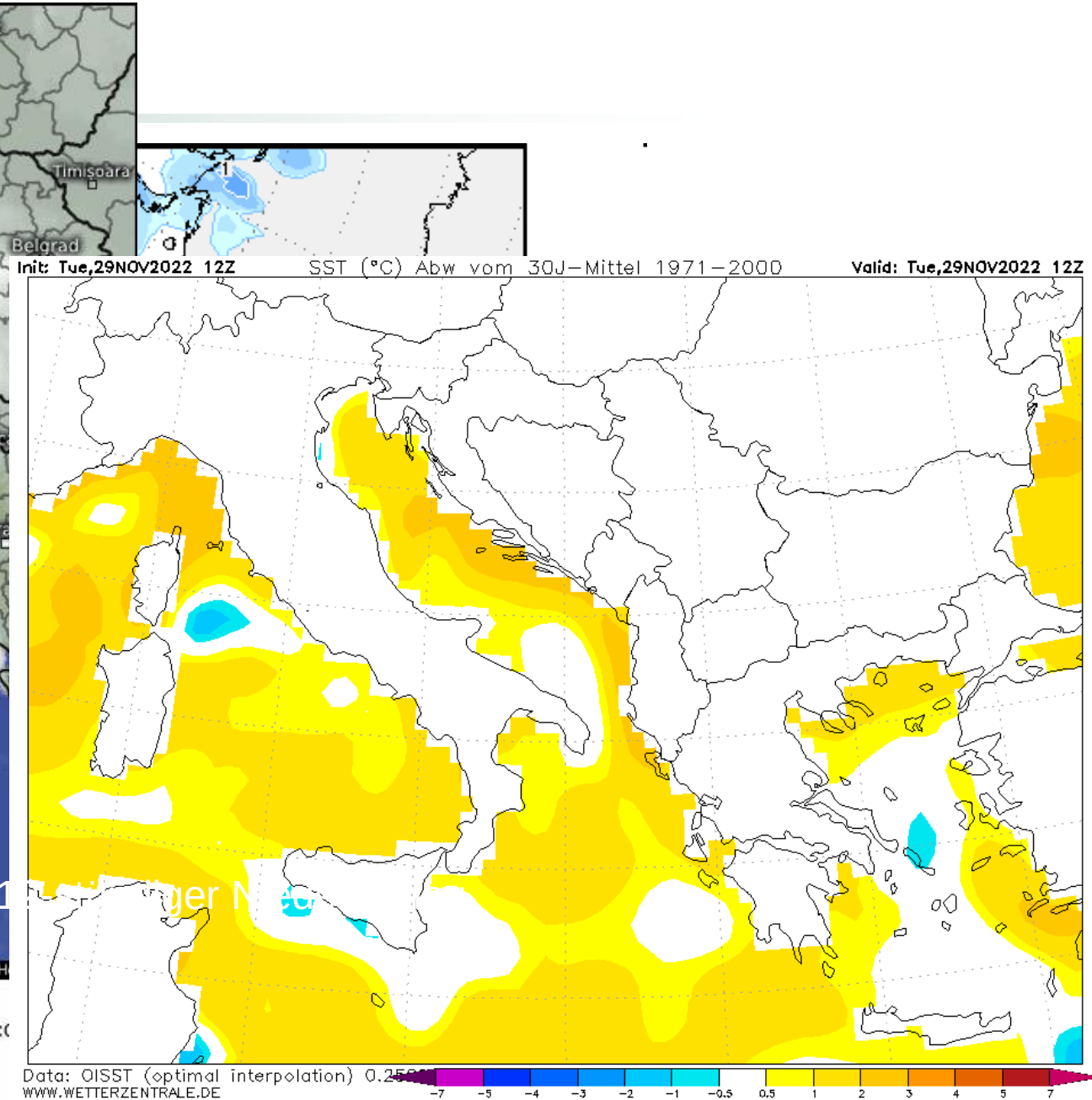
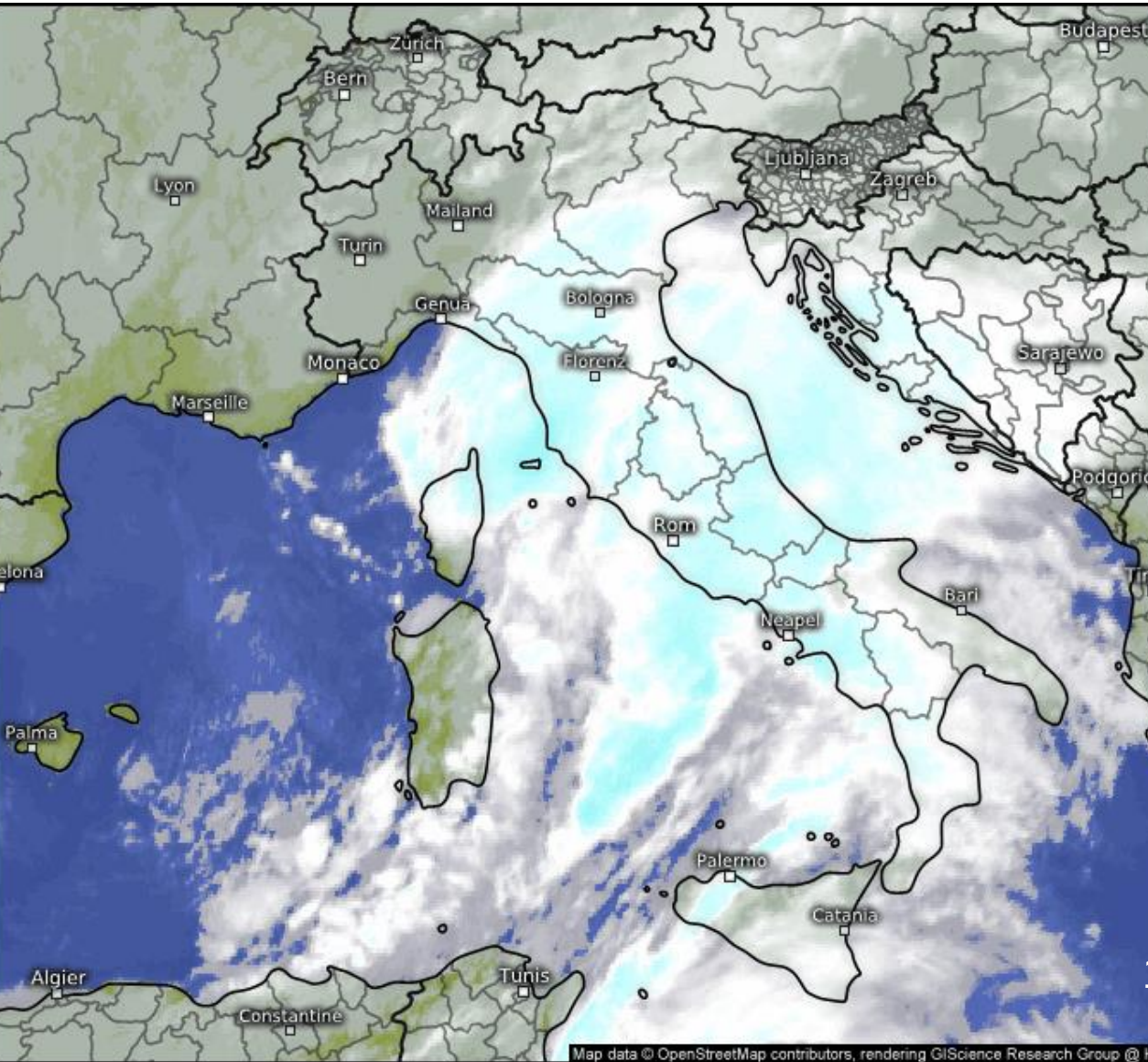
Das Wetter...



Vergangenes Wetter: Ischia 26.11.2021



tagesschau

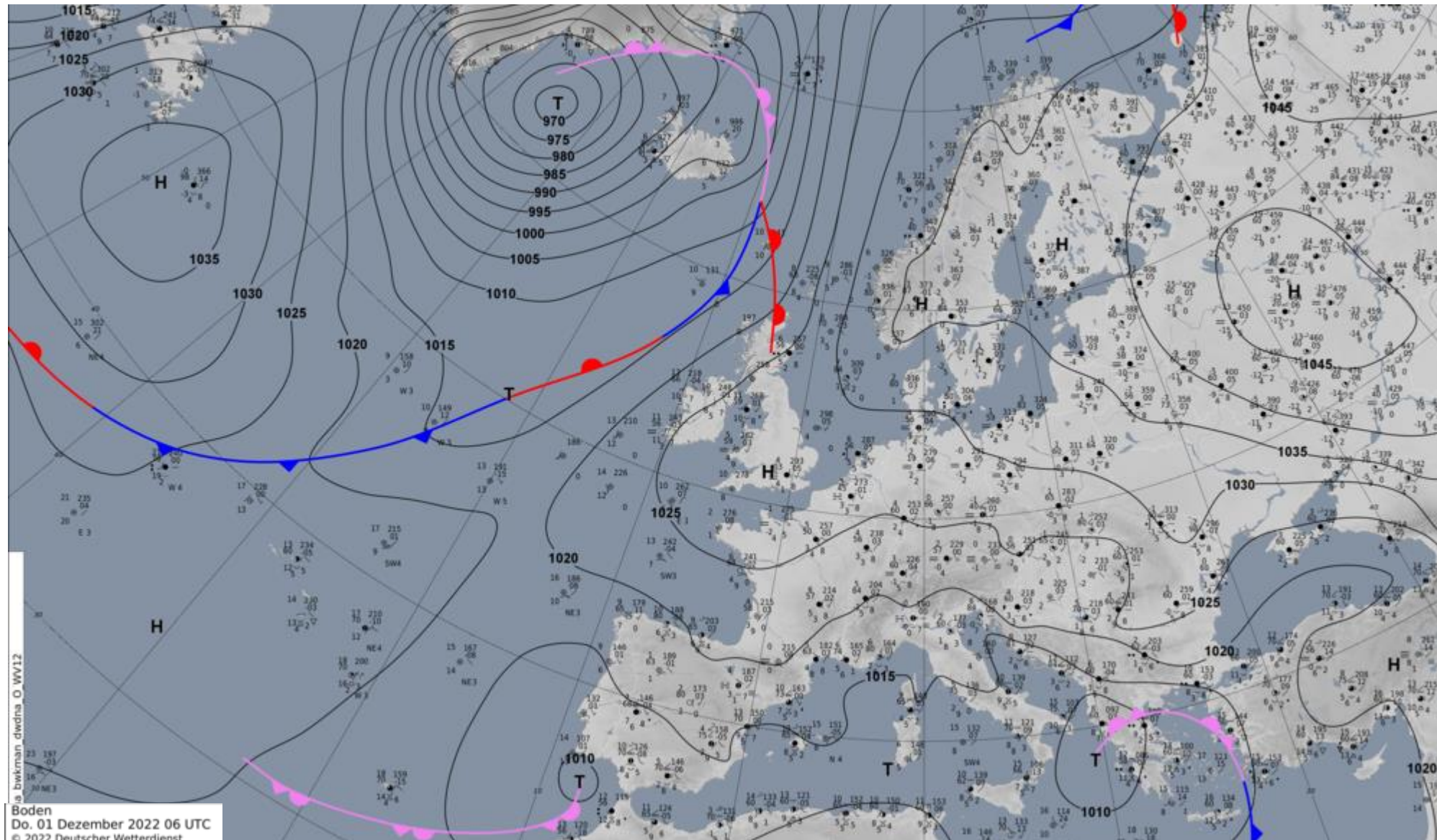


Satellit nature

Sa. 26.11.2022, 00:00

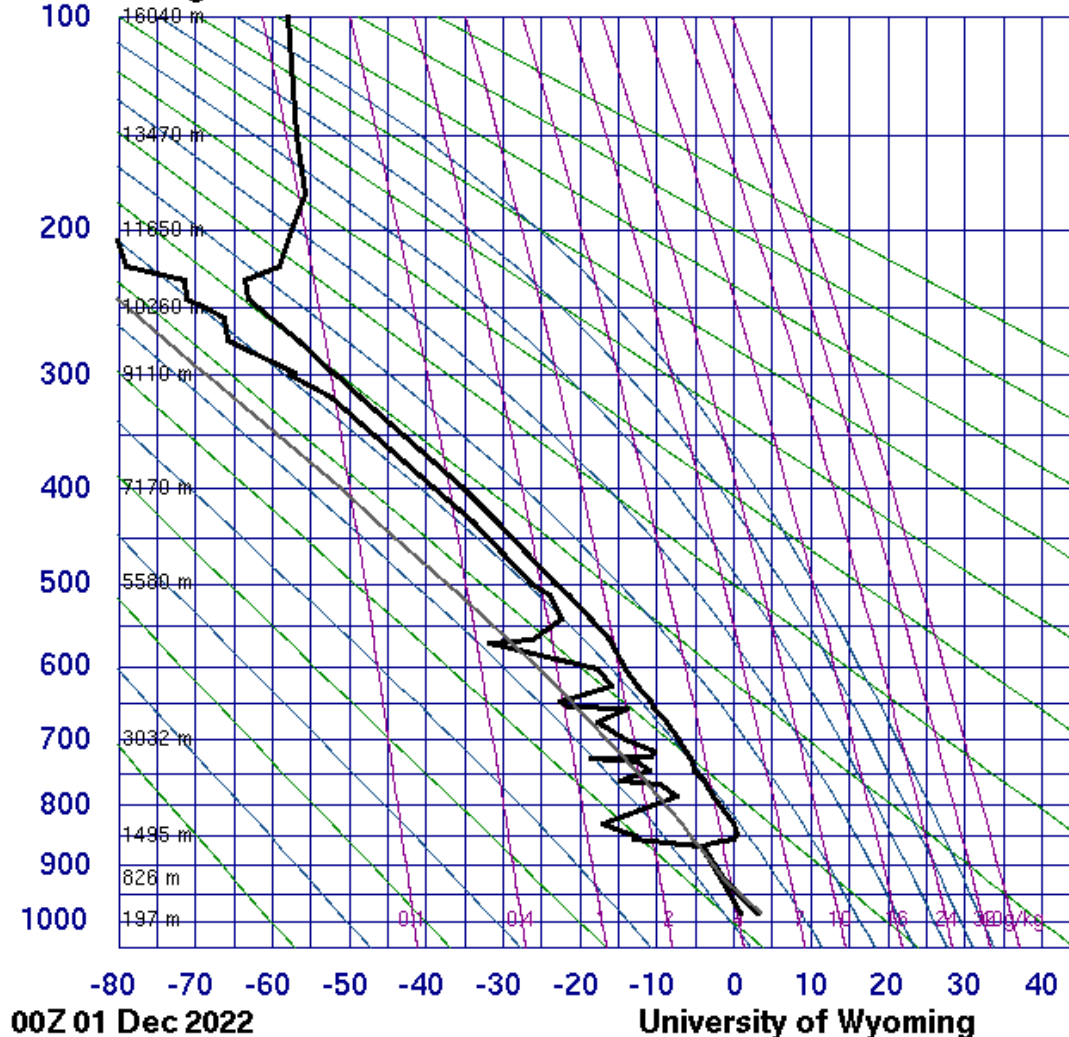
© Kachelmann GmbH - Download nur für den privaten Gebrauch!
Bitte benutzen Sie zum Teilen die Share-Buttons oben rechts

Wetter aktuell



Wetter aktuell

10739 Stuttgart



SNOW	14.02
LIFT	14.02
LFTV	14.12
SWET	54.39
KINX	3.50
CTOT	10.30
VTOT	23.30
TOTL	33.60
CAPE	0.00
CAPV	0.00
CINS	0.00
CINV	0.00
EQLV	-9999
EQTV	-9999
LFCT	-9999
LFCV	-9999
BRCH	0.00
BRCV	0.00
LCLT	272.4
LCLP	933.7
LCLC	288.7
MLTH	277.8
MLMR	3.92
THCK	5383
PWAT	11.30

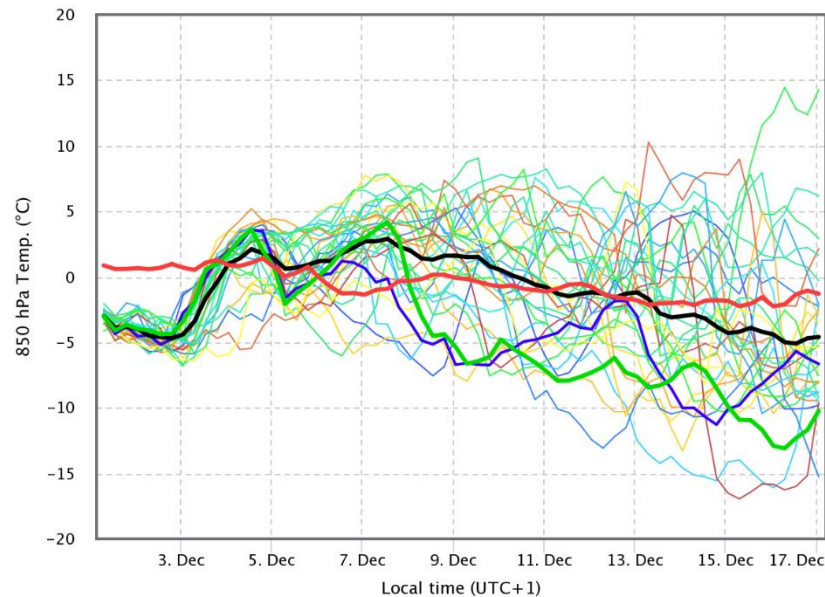
Inversion
→ stabile
Schichtung



Vorhersage: Ensembles

- Modell GFS (Global Forecast System) des amerik. Wetterdienstes NOAA
- 30 Ensemble Läufe
- Gitterpunkt Karlsruhe

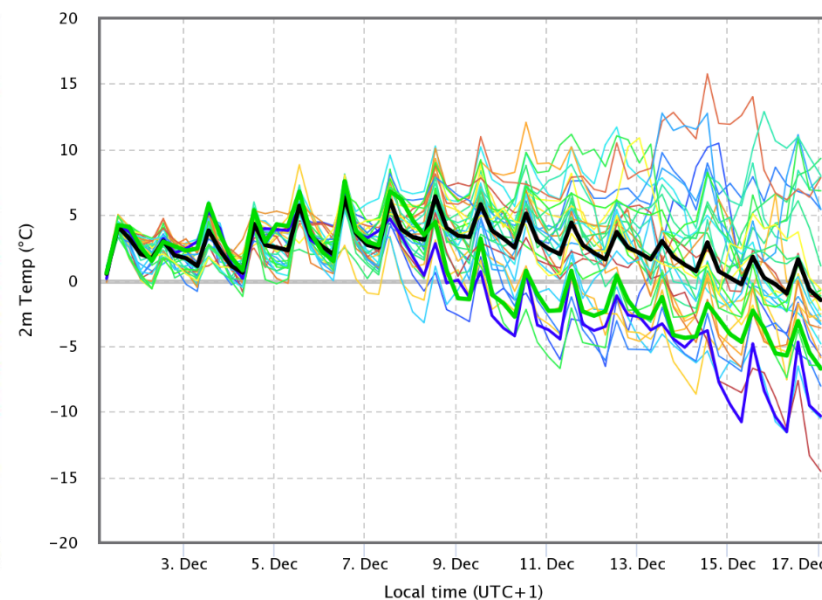
T850



P01 P02 P03 P04 P05 P06 P07 P08
P09 P10 P11 P12 P13 P14 P15 P16
P17 P18 P19 P20 P21 P22 P23 P24
P25 P26 P27 P28 P29 P30 CONTROL AVG
OPER LT MEAN 1981-2010

wetterzentrale.de

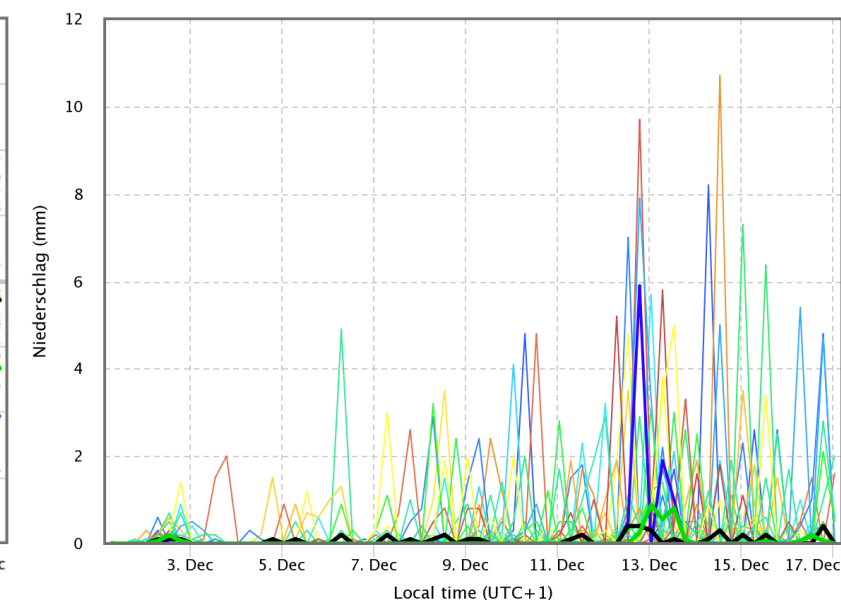
T 2m



P01 P02 P03 P04 P05 P06 P07 P08
P09 P10 P11 P12 P13 P14 P15 P16
P17 P18 P19 P20 P21 P22 P23 P24
P25 P26 P27 P28 P29 P30 CONTROL AVG
OPER

wetterzentrale.de

Niederschlag



P01 P02 P03 P04 P05 P06 P07 P08
P09 P10 P11 P12 P13 P14 P15 P16
P17 P18 P19 P20 P21 P22 P23 P24
P25 P26 P27 P28 P29 P30 CONTROL AVG
OPER

wetterzentrale.de

Vorlesung „Allgemeine Meteorologie“

Prof. Michael Kunz

Kapitel 5: Der Wasserdampf in der Atmosphäre



Wellen in Atmosphäre

> „Strömung schwingt“

Letzte Vorlesung...

■ **Dampfdruck** e : Partialdruck durch Wasserdampf; obere Grenze Sättigungsdampfdruck E ($f = 100\%$):

■ **Relative Feuchte**: i.d.R. in %

$$f = \frac{e}{E} \cdot 100\%$$

■ **Absolute Feuchte**: Wasserdampfdichte $a \equiv \rho_d$ (in kg m^{-3})

■ **Taupunktstemperatur** τ (in $^{\circ}\text{C}$); Abkühlung bis $f = 100\%$

$$e(T) = E(\tau)$$

■ **Mischungsverhältnis** r (dimensionslos, kg kg^{-1})

– Masse Dampf (M_d) zu Masse **trockener** Luft (M_l)

$$r = 0,622 \frac{e}{p - e}$$

■ **spezifische Feuchte** q (dimensionslos, kg kg^{-1})

– Masse Dampf (M_d) zu Masse **feuchter** Luft (M_l)

$$q = 0,622 \frac{e}{p - 0,378e}$$

■ **Virtuelle Temperatur** T_v

– Temperatur, die trockene Luft besitzen muss, damit sie bei gleichem Druck p dieselbe Dichte besitzt wie feuchte Luft; Berücksichtigung feuchte Luft in Zustandsgleichung

$$T_v = T(1 + 0,608q)$$

$$p = \rho R_l T_v$$

für trockene Luft
kannsten nur Wasserdampf-
anteil einkalkuliert sein

■ **Tagesgang**: Dampfdruck, absol./sep. Feuchte, Mischungsverhältnis und Taupunktstemperatur haben geringen Tagesgang; rel. Feuchte invers zu Temperatur

Der Wasserdampf in der Atmosphäre

5.1 Wasserdampf und Feuchte Maße

5.2 Vertikale Verteilung des Wasserdampfs

5.3 Koexistenz von Flüssigkeit und Dampf

5.4 Koexistenz von Festkörper und Flüssigkeit

5.5 Koexistenz dreier Phasen

5.6 Thermodynamische Phänomene, Kondensationsprozesse

5.6.1 Dunst

5.6.2 Nebel: Strahlungsnebel, Advektionsnebel

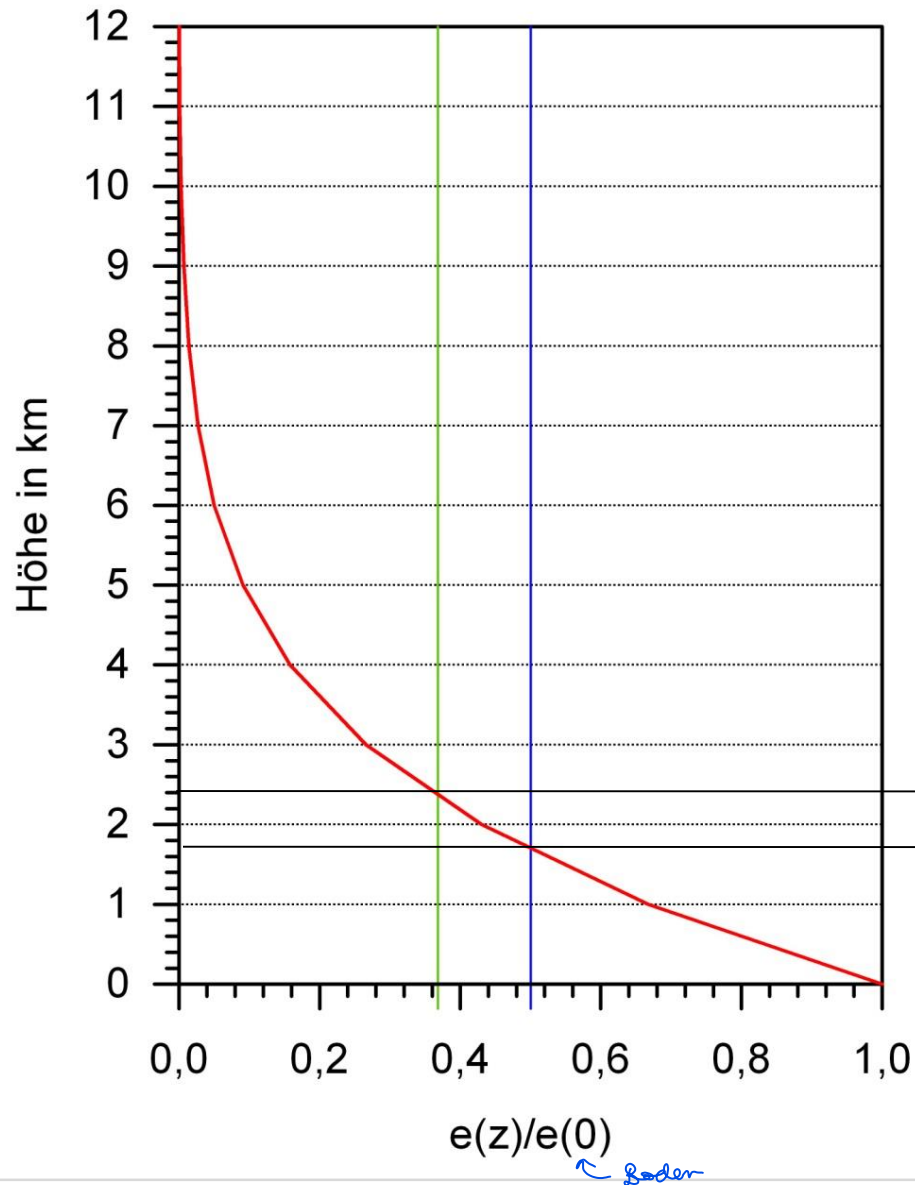
5.6.3 Wolkenklassifikation

5.2 Vertikale Verteilung des Wasserdampfs

- Aus $E \sim \exp(T)$ (Clausius-Clapeyron Gleichung $\rightarrow$ später in VL) folgt im Mittel in der Troposphäre annähernd **exponentielle Abnahme** des **Dampfdrucks** mit der Höhe (bei linearer Temperaturabnahme)
Sättigungs-
- Unterschiede in den verschiedenen Variablen:
 - Dampfdruck e , absolute Feuchte a : $\sim$ exponentielle Abnahme
 - Mischungsverhältnis r , spez. Feuchte q : konstant in Grenzschicht:
 - relative Feuchte f : keine Aussage möglich wegen $f = \text{funkt}(T)$
- Skalierungshöhe Wasserdampfdichte (Abfall auf $1/e$): 1 km bis 3 km; Halbwertshöhe (Abfall auf 50%) liegt etwas tiefer
- Empirische Formel nach Süring für vertikalen Verlauf Dampfdruck

$$e(z) = e(z = 0) \times 10^{-\frac{z}{6} - \frac{z^2}{120}}$$

5.2 Vertikale Verteilung des Wasserdampfs



Empirische Gleichung nach Süring:
Abnahme Dampfdruck mit der Höhe

$$e(z) = e(z = 0) \times 10^{-\frac{z}{6} - \frac{z^2}{120}}$$

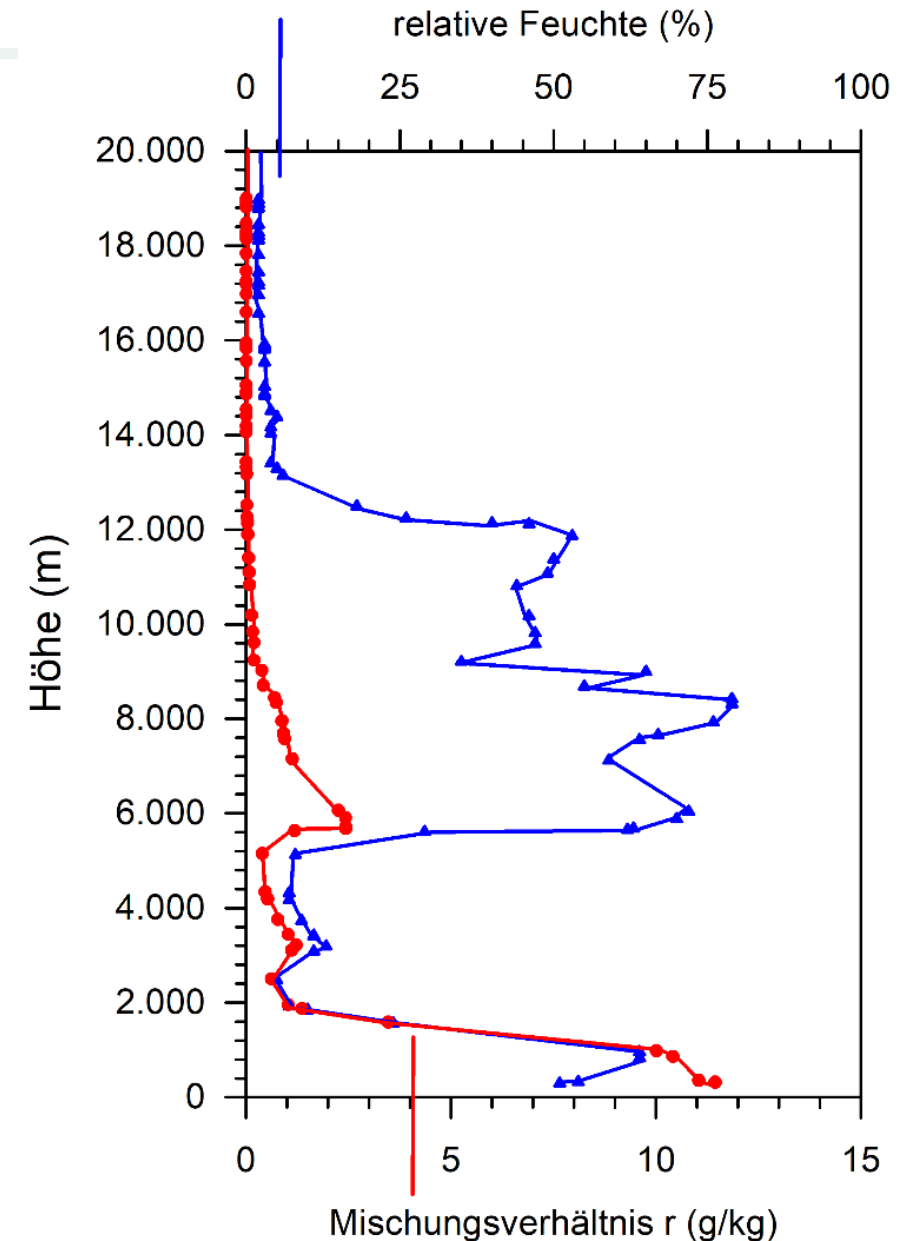
↪ unsicher ob richtig ist

Skalierungshöhe

Halbwertshöhe 50% Bodenwert

5.2 Vertikale Verteilung des Wasserdampfs

- Radiosonde Stuttgart am 15.09.2020, 12:00 UTC
 - trockene Schicht 2-6 km; darüber und darunter relativ feucht
 - sehr geringe Werte des Mischungsverhältnis ab ~ 10 km
 - Abnahme Mischungsverhältnis durch Abnahme Temperatur (im Mittel)
 - Aber: relative Feuchte prinzipiell keine direkte Funktion der Höhe



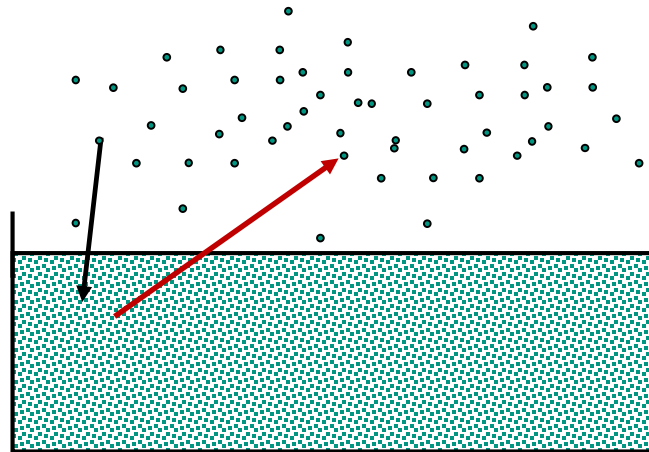
5.3 Koexistenz von Flüssigkeit und Dampf

Gleichgewicht, Verdunstung, Kondensation

- Voraussetzung: abgeschlossenes System

Phase 1
Dampf

Phase 2
Flüssigwasser



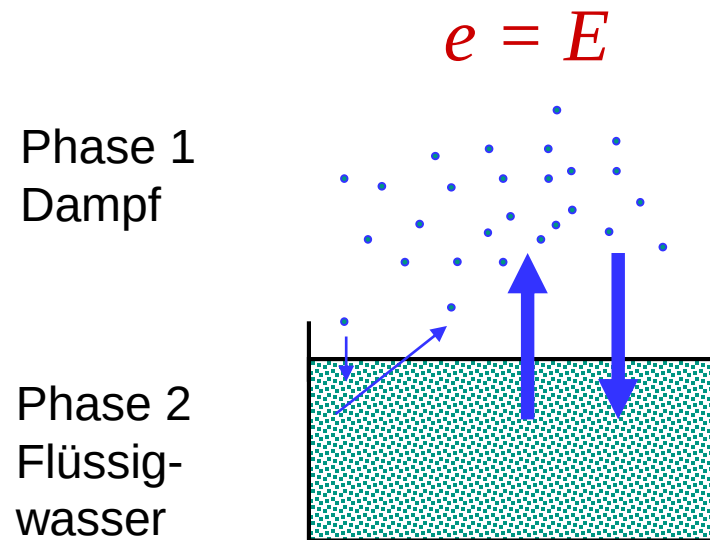
- 1. Verdunstung:** Übergang Moleküle von Flüssigwasserphase in Dampfphase
→ **Verrichtung von Arbeit**
→ Abnahme Temperatur in Flüssigwasser (oder Energiezufuhr)
- 2. Kondensation:** Übergang Moleküle von Dampfphase in Flüssigwasserphase
→ Zunahme Temperatur in Flüssigwasser (oder Energieabgabe)

5.3 Koexistenz von Flüssigkeit und Dampf

Gleichgewicht, Verdunstung, Kondensation

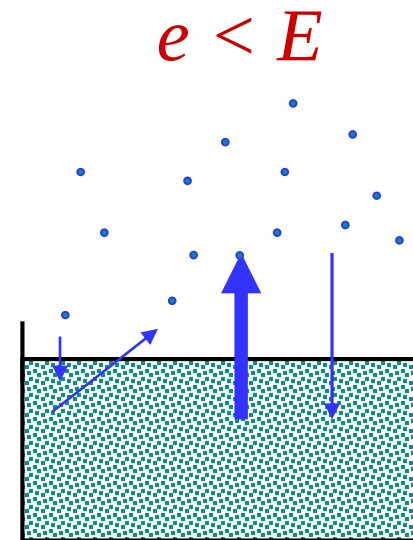
- Voraussetzung: abgeschlossenes System

Dampfdruck = Sättigungsdampfdruck

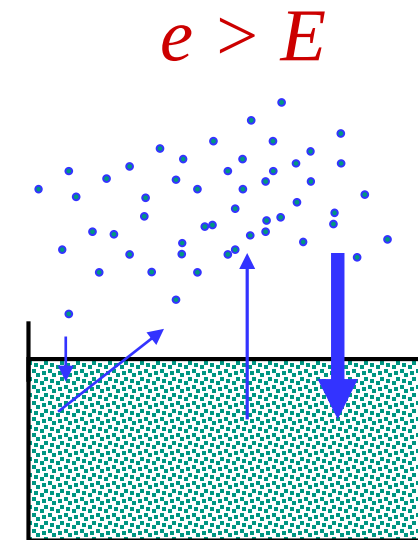


Gleichgewicht:
Netto keine
Phasenänderung

*(gleich viele Teilchen in
beide Richtungen)*



Ungleichgewicht:
Nettostrom in Luftraum
→ **Verdunstung**



Ungleichgewicht:
Nettostrom in Wasser
→ **Kondensation**
(z.B. Tau, Nebel)

5.3 Koexistenz von Flüssigkeit und Dampf

Gewitterenergie durch Kondensation
(destilliert v.a. im Sommer)

Verdampfungsenergie

- Benötigte Energie, um bestimmte Masse (Stoffmenge) von flüssiger Phase in Gasphase zu überführen
 - **spezifische Verdampfungsenergie** L_v : Energiemenge, um 1 kg einer Flüssigkeit isotherm zu verdampfen
 - **molare Verdampfungsenergie** Λ : Energiemenge, um 1 Mol einer Flüssigkeit isotherm zu verdampfen

Stoff	L_v (kJ kg ⁻¹)	Λ (kJ mol ⁻¹)	bei ϑ (°C) (Siedetemperatur)
Wasser	2 257 sehr hoch	40,8	100
Ethanol	845	38,9	78,4
Quecksilber	295	59,2	357,1
Stickstoff	199	5,6	-195,8
Wasserstoff	446	0,90	-252,8

5.3 Koexistenz von Flüssigkeit und Dampf

Clausius-Clapeyron-Gleichung

- Zusammenhang zwischen Temperatur und Dampfdruckkurve:

$$\frac{dE(T)}{dT} = \frac{L_v}{T} \frac{1}{\alpha_d - \alpha_{Fl}}$$

$E(T)$: Sättigungsdampfdruck
 α_{Fl}, α_d : spezifische Volumina ($=1/\rho$) von
Flüssigwasser und Dampf
 L_v : spez. Verdampfungsenergie



Rudolf Julius Emanuel **Clausius** (* 1822 in Köslin; † 1888 in Bonn) war ein deutscher Physiker; Entdecker des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik



Benoît Paul Émile **Clapeyron** (* 1799 in Paris; † 1864) war ein französischer Physiker; u.a. thermodyn. Kreisprozess nach Carnot

5.3 Koexistenz von Flüssigkeit und Dampf

Clausius-Clapeyron-Gleichung

- Zusammenhang zwischen Temperatur und Dampfdruckkurve:

$$\frac{dE(T)}{dT} = \frac{L_v}{T} \frac{1}{\alpha_d - \alpha_{Fl}}$$

$E(T)$: Sättigungsdampfdruck
 α_{Fl}, α_d : spezifische Volumina ($=1/\rho$) von
Flüssigwasser und Dampf
 L_v : spez. Verdampfungsenergie

- Annahme $\rho_{Fl} \gg \rho_d$ bzw. $\alpha_{Fl} \ll \alpha_d$
mit Zustandsgleichung für den Sättigungsdampfdruck $E = \rho_d R_d T \Leftrightarrow \alpha_d = \frac{R_d T}{E}$

$$\frac{dE(T)}{dT} = \frac{L_v E}{R_d T^2} \Leftrightarrow \frac{dE(T)}{E} = d \ln E = \frac{L_v dT}{R_d T^2}$$

- Integration liefert Form: $E(T) \sim \exp\left(-\frac{L_v}{R_d T}\right)$

5.3 Koexistenz von Flüssigkeit und Dampf

über warmen $E(T)$ höher als über Eis

Integration **Clausius-Clapeyron-Gleichung** liefert $E(T)$

■ Nach WMO (Temperatur ϑ in $^{\circ}\text{C}$):

$$E_W(\vartheta) = \underline{6,1070} \cdot \exp\left(\frac{17,15\vartheta}{\vartheta + 234,9}\right) \quad \vartheta \geq \vartheta_t$$

ϑ in $^{\circ}\text{C}$, E in hPa
über Wasser

höhere Bindungsenergie
hexagonale Kristallform

$$E_E(\vartheta) = 6,1064 \cdot \exp\left(\frac{21,88\vartheta}{\vartheta + 265,5}\right) \quad \vartheta < \vartheta_t$$

über Eis

■ Magnusformel

$$E_W(\vartheta) = 6,1070 \cdot 10^{7,4475\vartheta/(234,9+\vartheta)}$$

über Wasser

■ Dampfdruck e hat eine obere Grenze, die exponentiell (!) von der Temperatur abhängt (bei 100% rel. Feuchte): **Sättigungsdampfdruck E** (in hPa)

■ Sättigungsdampfdruck E bei 0°C über Wasser: 6,107 hPa; bei 100°C : 1013,25 hPa

diese Grenz Dampfdruck (max. bei 100% Sättigungsdampf.)

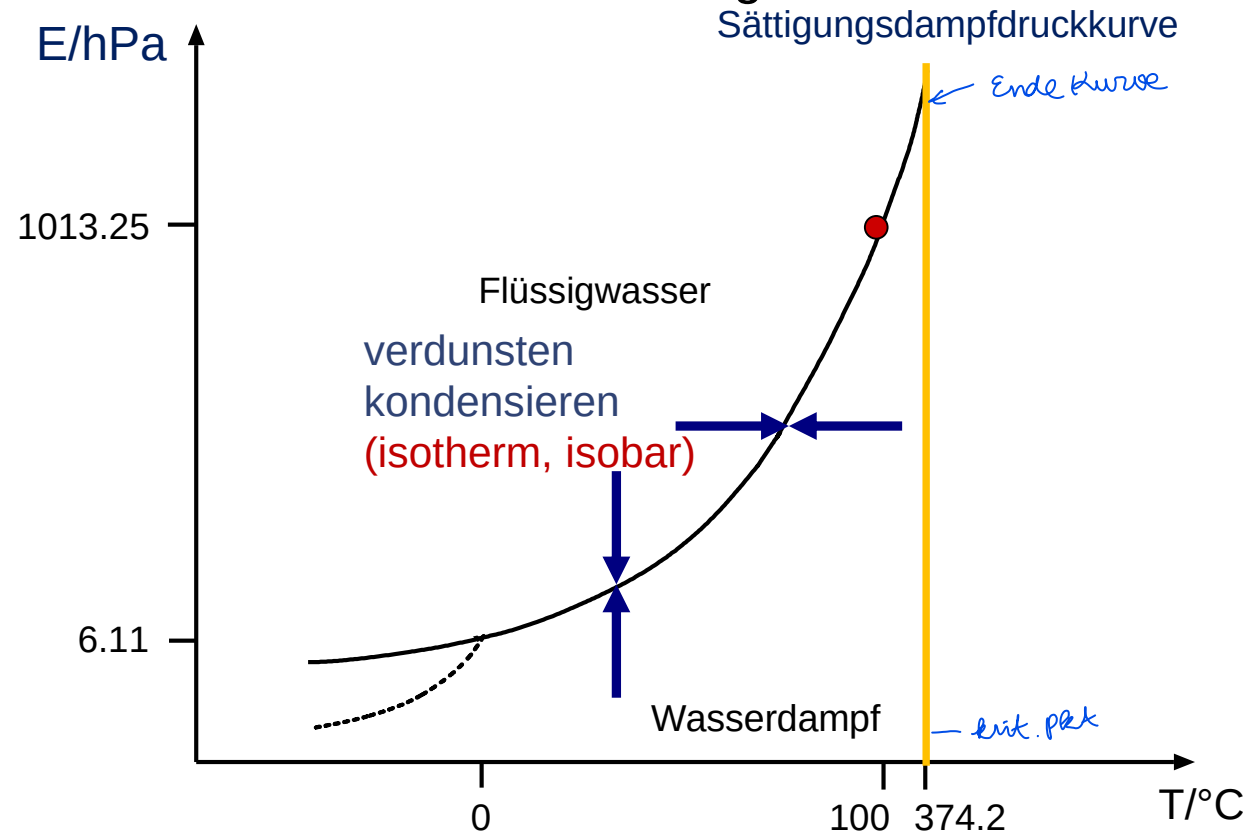
5.3 Koexistenz von Flüssigkeit und Dampf

Phasendiagramm: Gleichgewicht zwischen koexistenten Phasen

? ■ Kurven: **Gleichgewichtskurven** zwischen zwei koexistenten Phasen

● Siedepunkt: Dampfdruck = Normaldruck 1013.25 hPa und 100°C

| kritische Temperatur: es kann sich keine Flüssigkeit mehr bilden



kochen:
Sättigungsdampf = Atmosph.-druck
T kochendes Wasser bestimmen
→ Höhe bestimmbar

5.4 Koexistenz von Festkörper und Flüssigkeit



Fragen über Fragen...

- Bei welcher Temperatur hat Wasser seine **größte Dichte**? $+4^{\circ}\text{C}$
- Was ist die **Anomalie** des Wassers? *Dichteanomalie eig Abnahme genf → fest*
- Wieso können Fische **im Winter** überleben? *unten am See flüssig*
- Wieso können wir **Skifahren oder Schlittschuhlaufen**?
Wasserfilm auf Eis (wegen Druck)



5.4 Koexistenz von Festkörper und Flüssigkeit

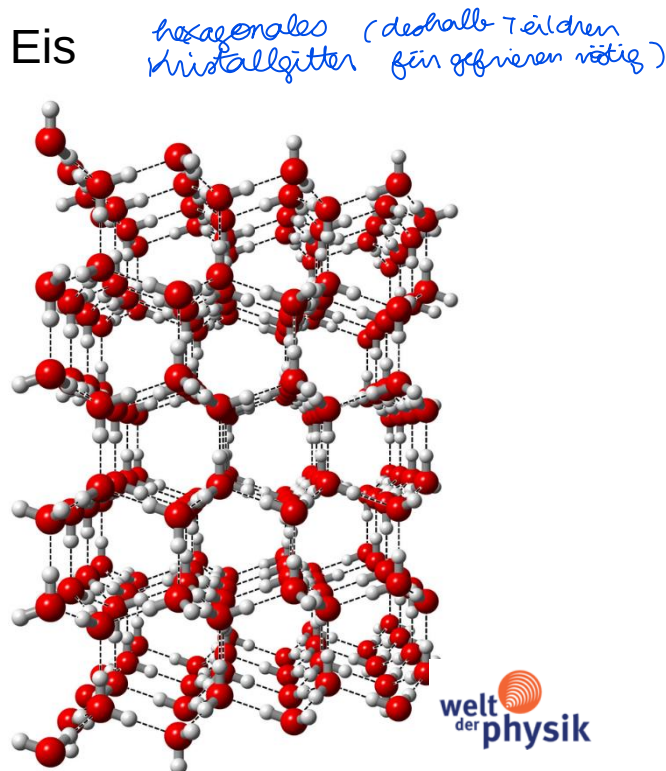
Dichteanomalie von Wasser

- Dichte nimmt mit abnehmender Temperatur nicht über alle Aggregatzustände zu; Anomalie im Bereich 0-4°C
- Maximale Dichte von $(999,974950 \pm 0,00084)$ kg/m³ bei $T = 3,98^\circ\text{C}$

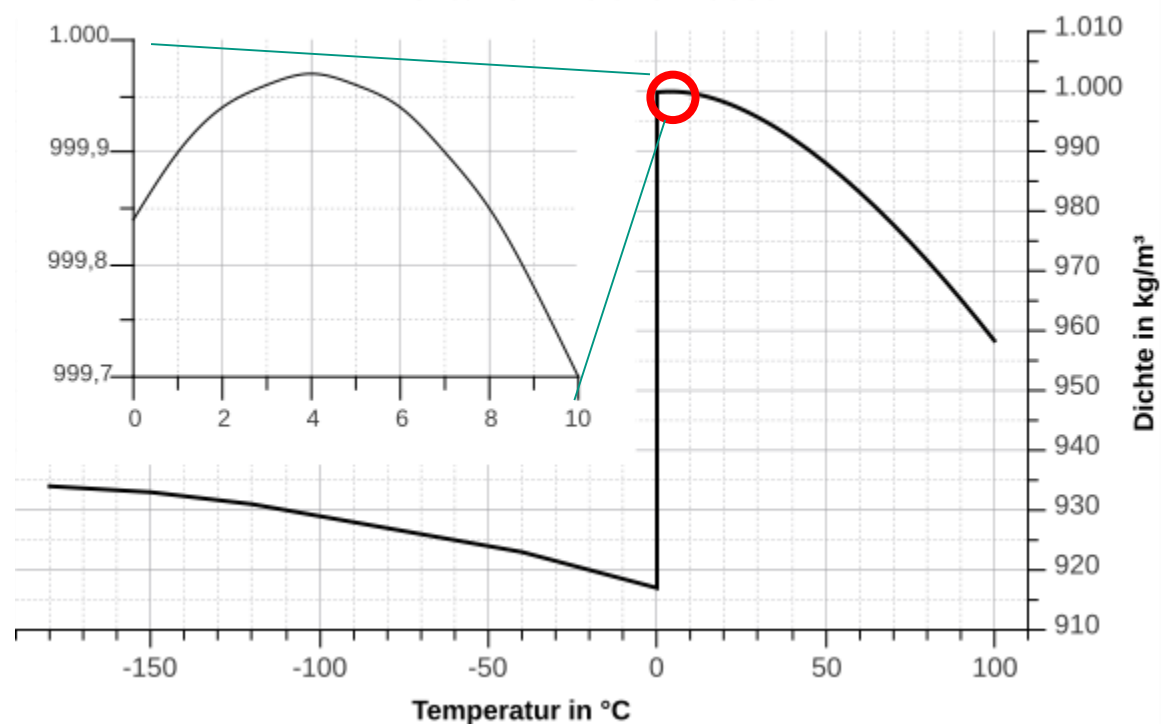
Flüssigwasser



Eis



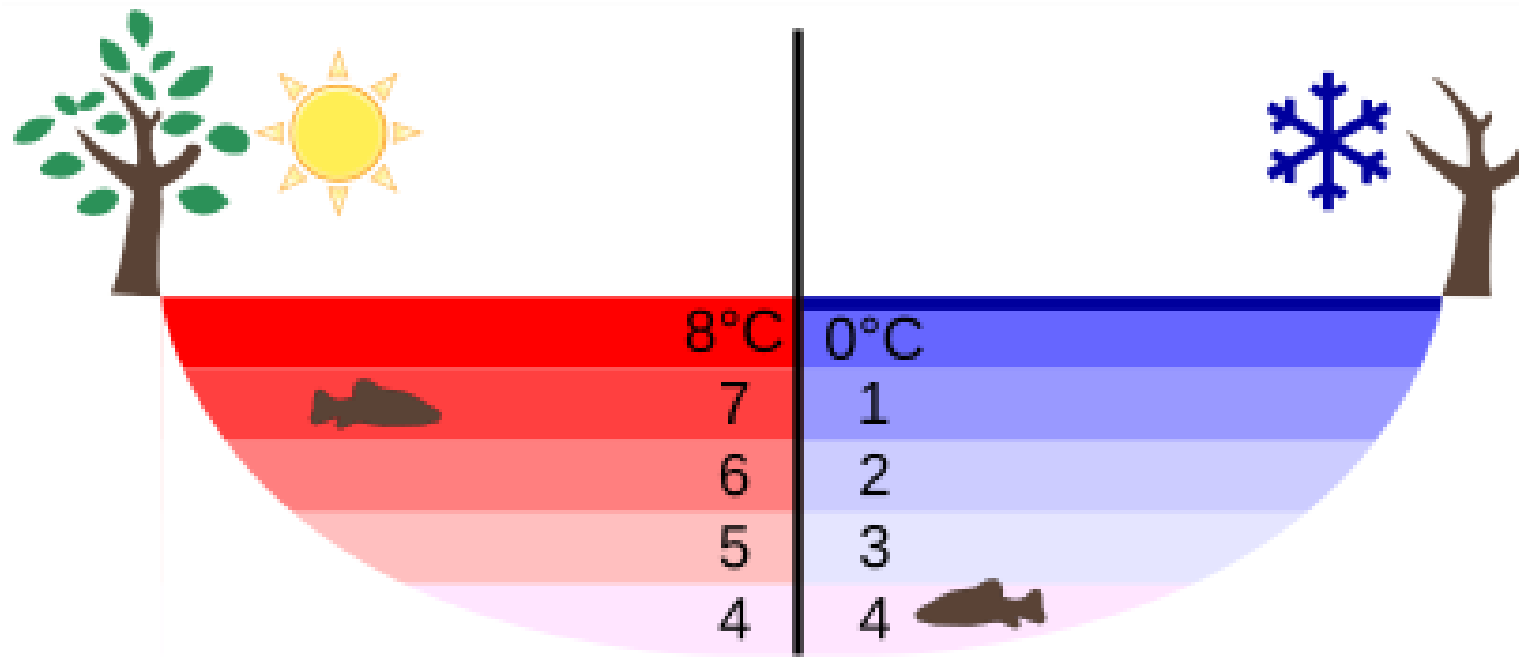
Dichte von Eis und Wasser



5.4 Koexistenz von Festkörper und Flüssigkeit

Effekt der Dichteanomalie

- Aufgrund der geringeren Dichte sinkt Oberflächenwasser mit einer Temperatur unterhalb von 4°C nicht nach unten
 - ⇒ kein vollständiges Durchfrieren von Gewässern
 - wichtig für Leben in Gewässern



(Wikipedia)

5.4 Koexistenz von Festkörper und Flüssigkeit

Clausius-Clapeyron-Gleichung für Eisphase

- Beschreibung Eisphase durch Clausius-Clapeyron-Gleichung mit L_S für Eis (spezifische Schmelzwärme)

$$\frac{dE(T)}{dT} = \frac{L_S}{T} \frac{1}{\alpha_{Fl} - \alpha_{Eis}}$$

$E(T)$: Sättigungsdampfdruck
 $\alpha_{Fl}, \alpha_{Eis}$: spezifische Volumina (=1/ ρ)
Flüssigwasser und Eis
 L_S : spez. Schmelzwärme
= $3,34 \cdot 10^5 \text{ J kg}^{-1}$

- Wasser einziger Stoff bei dem gilt: $\alpha_{Fl} < \alpha_{Eis}$ (bzw. $\rho_{Fl} > \rho_{Eis}$)

$\Rightarrow \frac{dE(T)}{dT} < 0$, d.h. negative Steigung (Abfall) der Schmelzkurve

$\Rightarrow$ Eis kann durch Druckerhöhung schmelzen (z.B. Skifahren, Eislauf)

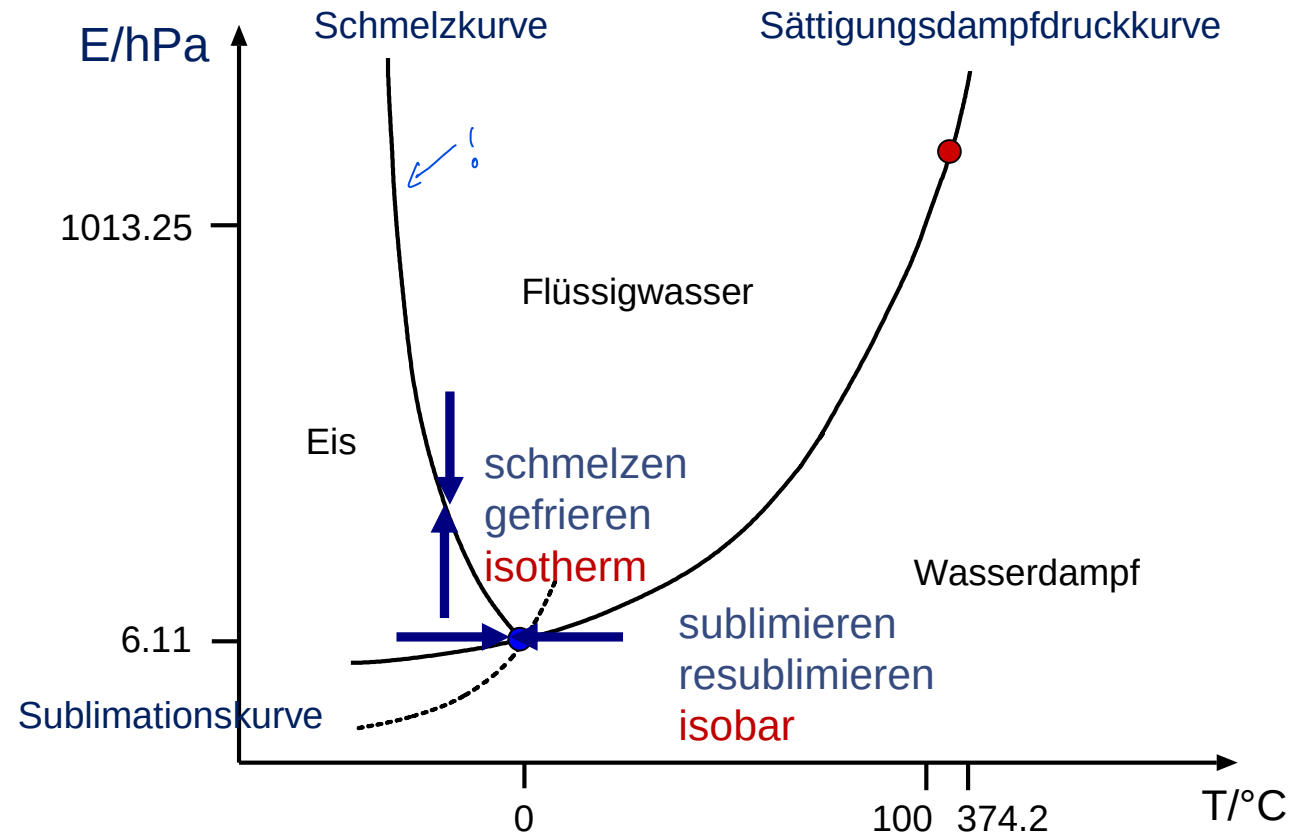
5.5 Koexistenz dreier Phasen



5.5 Koexistenz dreier Phasen

Gleichgewicht zwischen drei koexistenten Phasen

- Kurven: **Gleichgewichtskurven** zwischen zwei koexistenten Phasen

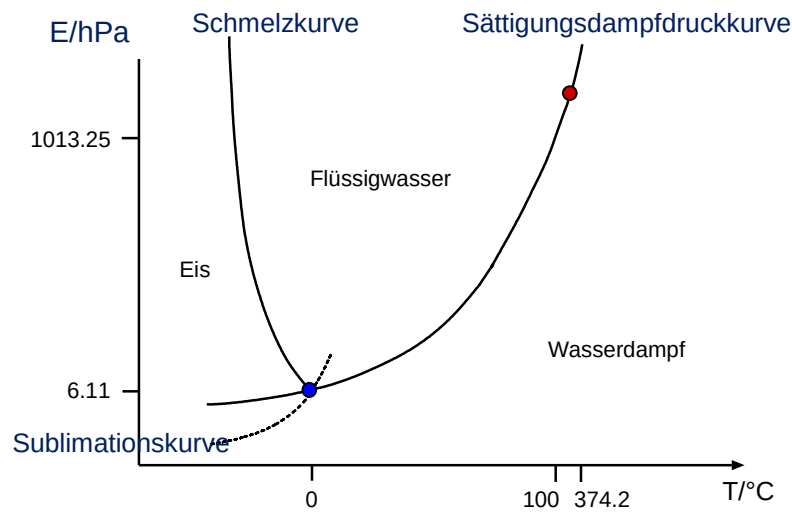


5.5 Koexistenz dreier Phasen

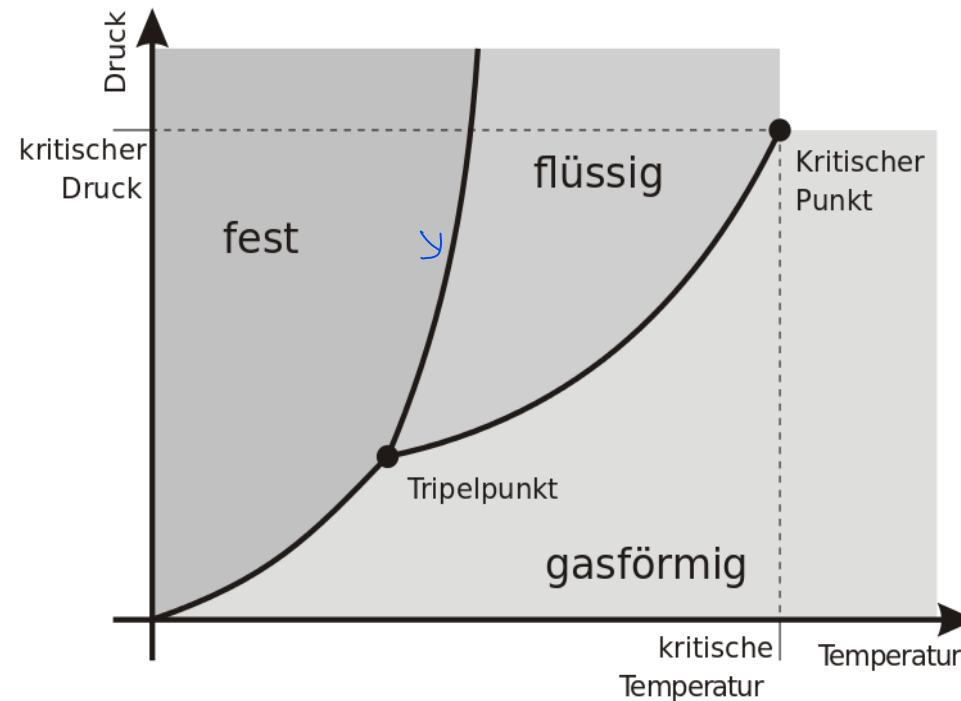
Anomalie des Wassers

- Schmelzkurve **nur** von Wasser negativ (nach links geneigt)
→ Druck lässt Wasser schmelzen

Wasser



Alle anderen Stoffe



Fragen über Fragen...

- Was ist der Unterschied zwischen **Dunst**, **Nebel** und **Wolken**?
tiefer
näher
- Wie kann sich **Nebel** bilden?
Luftabkühlung & Kondensation
Inversionschicht
Transport von Feuchtigkeit
von → 100% rel Luftf.. (T-Abnahme oder Feuchtigkeitszufuhr)
- Welche „**Farbe**“ hat Dunst, welche hat Nebel?
blau
(Streuung i was)
farblos

5.6 Thermodynamische Phänomene, Kondensationsprozesse

Kondensationsprozesse in Atmosphäre

- Kondensation, wenn Taupunkttemperatur erreicht / überschritten: *(8 eig Aerosole)*
 - Abnahme Temperatur (z.B. Tagesgang Temperatur, Hebung, Advektion)
 - Zufuhr von Feuchtigkeit (z.B. Advektion, Niederschlag)

Bezeichnung abhängig von **Höhe**:

- am Boden: **Tau**
- nahe Erdoberflächen: **Nebel, Dunst**
- Troposphäre: **Wolken** (Stratosphäre: leuchtende Nachtwolken)



5.6 Thermodynamische Phänomene, Kondensationsprozesse

Kondensationsprozesse in Atmosphäre

- Kondensation, wenn Taupunkttemperatur erreicht / überschritten durch
 - Abnahme Temperatur (z.B. Tagesgang Temperatur, Hebung, Advektion)
 - Zufuhr von Feuchtigkeit (z.B. Advektion, Niederschlag)

- Wolkentröpfchen: 2-10 μm ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$),
in Gewitterwolken bis 100 μm (siehe auch Kap. 9)

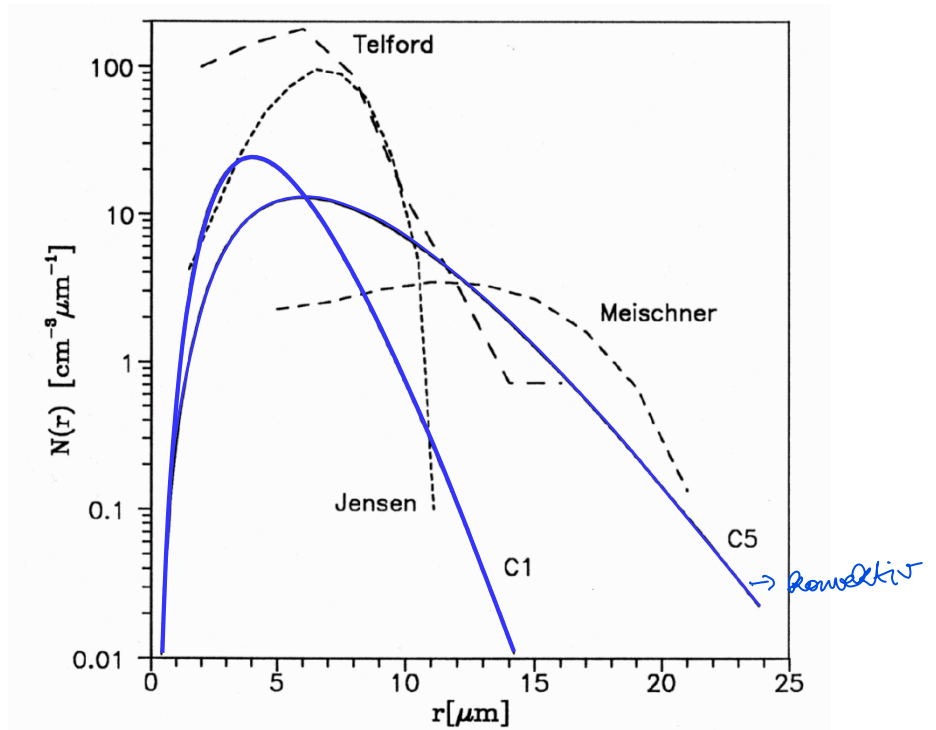
→ Tropfenspektrum

abhängig von Temperatur, Aerosolen,
Wolkenart, Wolkenalter, ...

→ bei großer Streuung? → Niederschlagstropfen

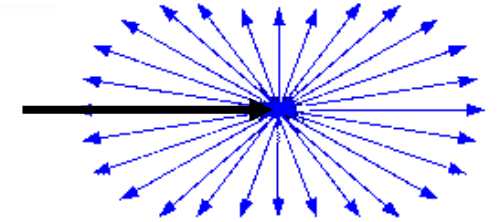
Größenverteilungen von Wolkentröpfchen

- stratiform (Deirmendian 1969, 1975)
- konvektiv (Cumuluswolken): *starke Hebung (Koagulationstropfen)*
 - Telford: Verteilung in 2250 m (Telford et al., 1984)
 - Jensen: Verteilung A von Jensen et al. (1985)
 - Meischner: in 3250 m (Meischner und Bögel, 1984)



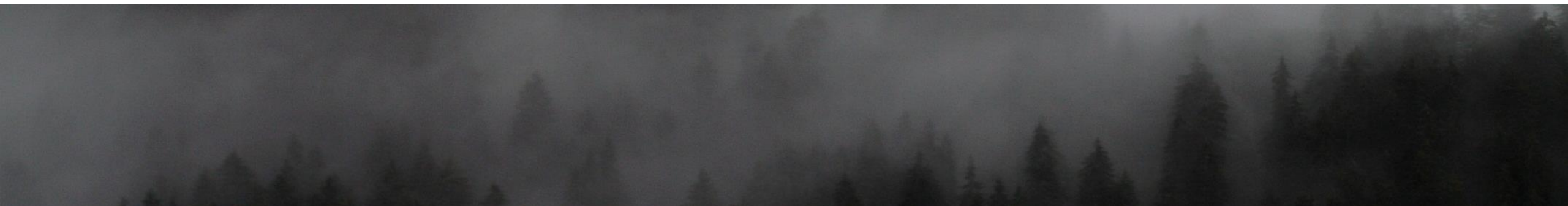
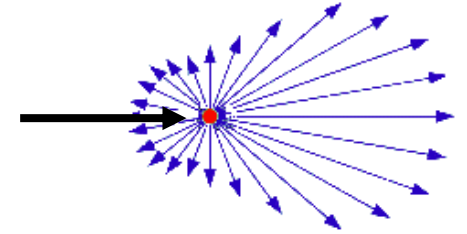
5.6.1 Dunst

- Einschränkung Sichtweite ≥ 1 km *wenn kleiner: Nebel*
- **Streustrahlung**; Streupartikel sehr klein, $r = 0,1-1 \mu\text{m}$
- Streuung abhängig von Wellenlänge (**Rayleigh-Streuung**; siehe Kap. 6)
 - stärkere Streuung kurzer Wellenlängen
 - daher ist Dunst **bläulich** („Verblauung“), *Himmel blau*
- Streukörper: *kleiner als bei Nebel*
 - Wassertröpfchen, Eisteilchen mit geringer Anzahlverteilung (feuchter Dunst)
 - Aerosole (trockener Dunst), ggf. Aufquellen durch Wasserdampf



5.6.2 Nebel

- Einschränkung Sichtweite **< 1 km (auf Augenhöhe)**, teilweise **< 10 m**
- Tröpfchenradius 5-10 μm , Max 20 μm , Wassergehalt 0,01 – 0,3 g m^{-3}
→ nässender Nebel bei großen Tröpfchen
- Streuung „**unabhängig**“ **von der Wellenlänge** (Mie-Streuung; siehe Kap. 6)
→ Nebel (Wolken) erscheinen weiß
- Arten bzw. Ursachen:
 - **Strahlungsnebel**: Abkühlung durch Ausstrahlung
 - **Advektionsnebel**: Abkühlung durch Überströmung kalter Oberfläche
 - **Frontnebel, Seerauch**: Wasserdampfunguhr und Abkühlung
 - **Hochnebel**: Anreicherung Wasserdampf in Grenzschicht unter Inversion

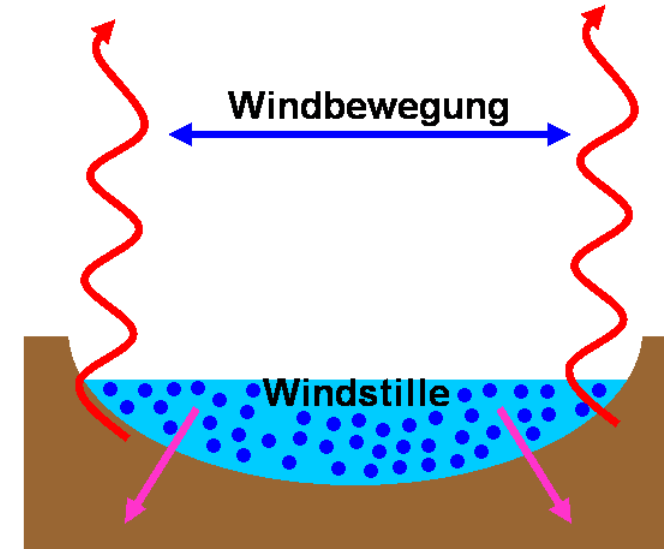
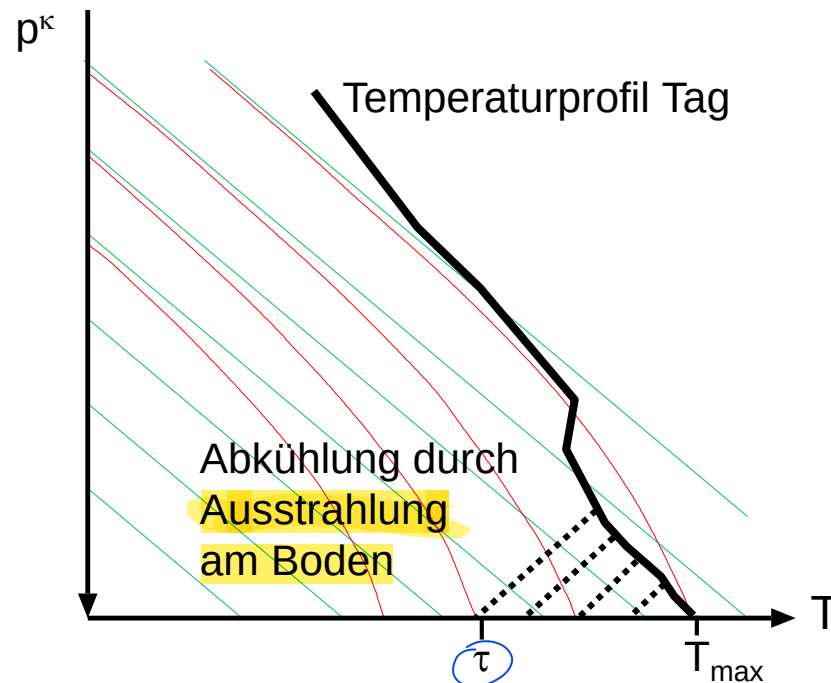


5.6.2 Nebel

Entstehung und Arten von Nebel

■ Strahlungsnebel *chemische Ausstrahlung Boden*

- geringe Vertikalerstreckung (wenige m), meist Auflösung am Morgen; Nebelbildung geht vom Boden aus → Zunahme Höhe während Nacht
- ideal: windschwach, klarer Himmel, flache Senken, Talbecken
- Auflösung: Sonneneinstrahlung, Erwärmung Erdboden (→ Hochnebel)

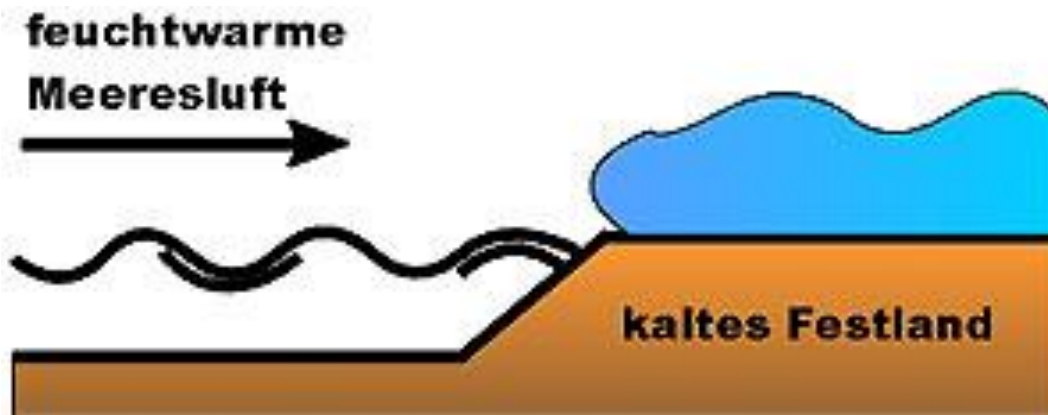


5.6.2 Nebel

Entstehung und Arten von Nebel

■ Advektionsnebel

- **vertikal mächtig**, 300 – 500 m, in Meeresgebieten oft lange Andauer (Tage bis Wochen)
- Ursache: feuchte Luft überströmt kältere Unterlage
- großflächig: z.B. Warmluftvorstoß nach Norden; Monsunnebel; Aufeinandertreffen kalte und warme Meeresströmung (z.B. Neufundland)



5.6.2 Nebel

Entstehung und Arten von Nebel

■ Zufuhr von Wasserdampf

- **Seerauch:** **Verdunstung** warmes Wasser in kalter Luft; Labilisierung durch Verdunstungswärme; Aufsteigen und Mischung mit Kaltluft → Kondensation
- **Frontnebel:** Niederschlag fällt von Warmluft in Kaltluft (an Luftmassengrenze, v.a. Warmfront)



Frage über Fragen...

- Welche Masse hat ein einzelner Cumulus (humilus; **Schönwetterwolke** 100 m x 100 m x 100 m) bei einer angenommenen Wasserdampfdichte von 1 g/m³?
- Wieso fallen **Wolken** nicht einfach zum Boden?
- In welchen **Höhen** treten Wolken auf?
- Was ist ein **Cb**?
- Was sind **Cirren** und worauf deuten sie hin?

5.6.3 Wolkenklassifikation

■ Klassifikation nach Art und Gestalt der Wolken (deskriptiv)

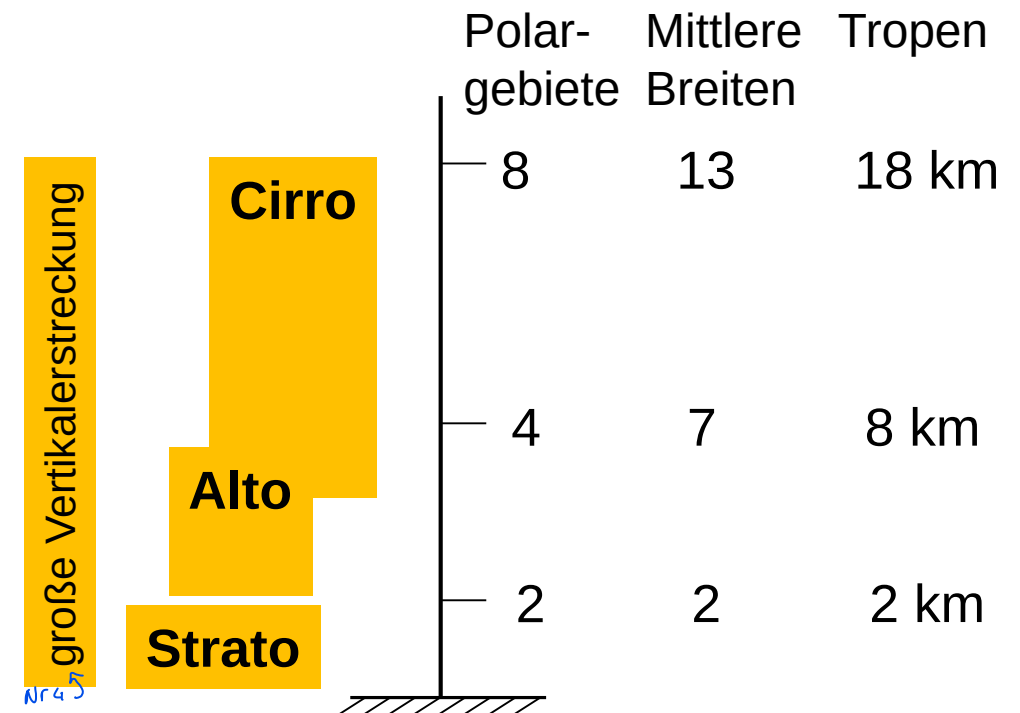
- WMO International Cloud Atlas
- Dynamik: wichtig, aber für Klassifikation nicht ausschlaggebend
- basierend auf Arbeiten von Luke Howard (1803)

Luke Howard (* 1772; † 1864) war Pharmakologe und Apotheker in London. Er gilt als Begründer der modernen Wolkenkunde.



■ Klassifikationsschema

- **Wolkenfamilie (4); Klassifikation nach Höhe (man beachte die Endung -o)**

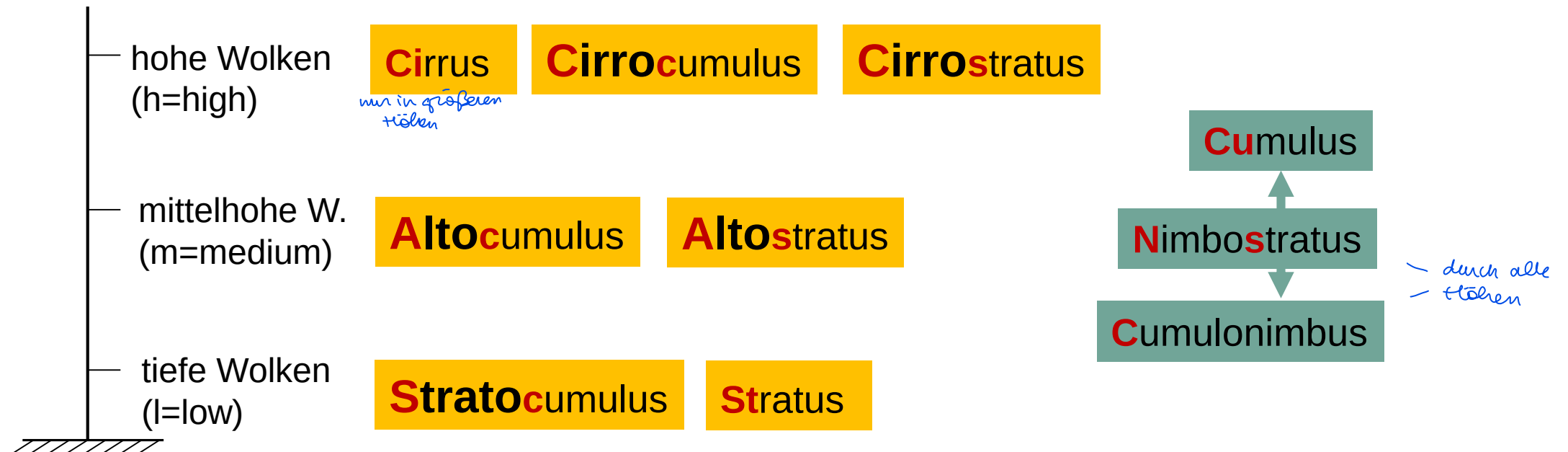


5.6.3 Wolkenklassifikation

Nebel, Tornados, leucht. Nachtwolken
nicht klassifiziert

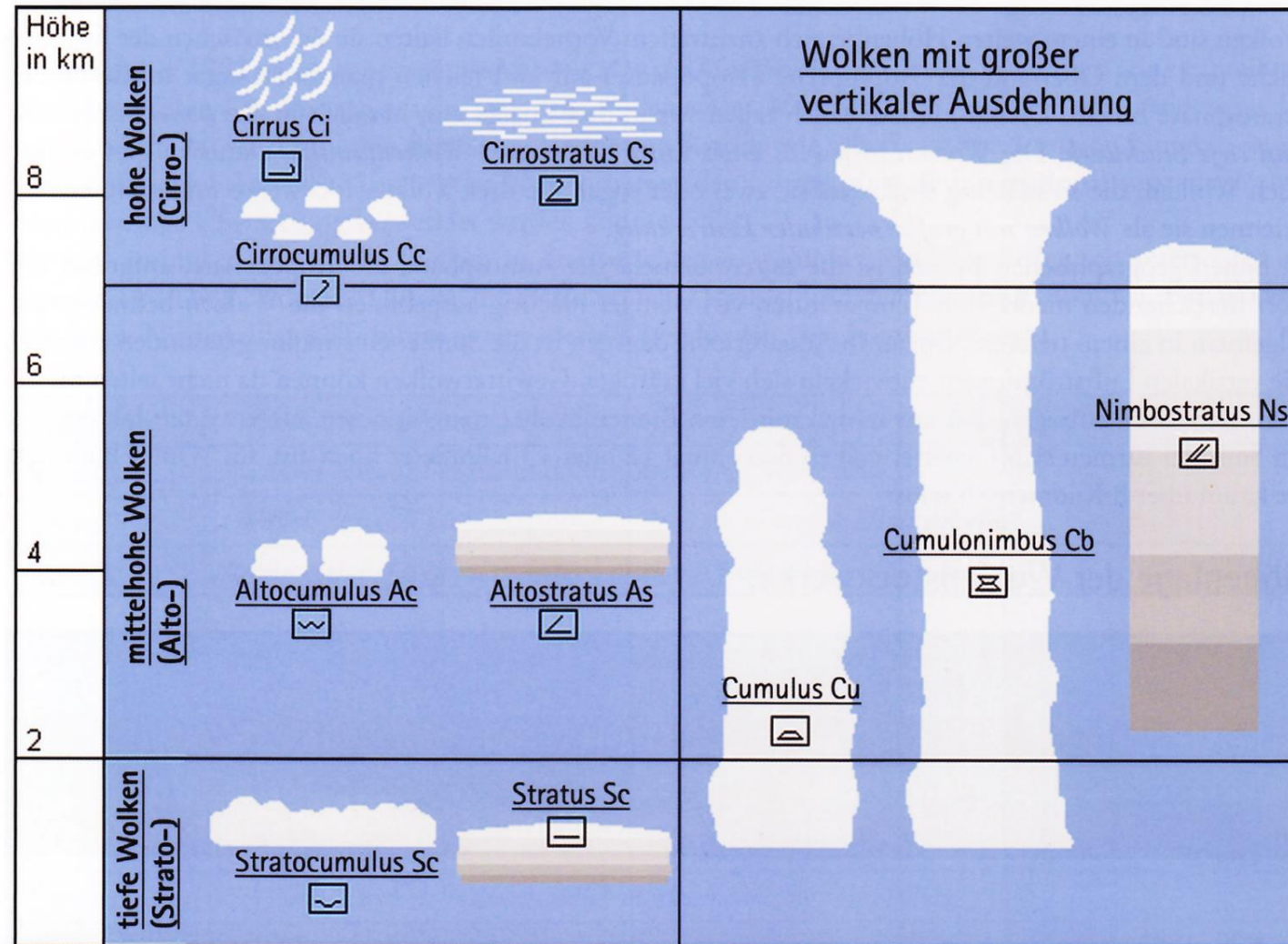
■ Klassifikationsschema

- *Wolkenfamilie (4): Klassifikation nach Höhe*
- **Wolkengattungen (10): Klassifikation nach Form (rot: WMO Kürzel)**
 - -cumulus (Haufenwolken) und -stratus (ausgedehnt, strukturlos)
- *Wolkenarten (14)*
- *div. Unterarten / Sonderformen*



5.6.3 Wolkenklassifikation

Wolkengattungen



(Mühr und Berberich, 2008)

5.6.3 Wolkenklassifikation

Wolkenarten (14) nach Erscheinungsform

lateinische Bezeichnung	deutsche Bezeichnung	Abkürzung
fibratus	faserig	fib
uncinus	haken-, krallenförmig	unc
spissatus	dicht	spi
castellanus	türmchenförmig	cas
floccus	flockig, bauschig	flo
stratiformis	schichtförmig	str
nebulosus	nebel-, schleierartig	neb
lenticularis	linsen-, mandelförmig	len
fractus	zerrissen	fra
humilis	niedrig	hum
mediocris	mittelmäßig entwickelt	med
congestus	aufgetürmt, mächtig, aufquellend	con
calvus	kahl, glatt	cal
capillatus	behaart, ausgefranst, faserig	cap

(Quelle: www.wetterstation-neustadt.de)

Gattungen	Arten	Unterarten	Sonderformen	Mutterwolken
			Begleitwolken	(genitus)
Cirrus	fibratus	intortus	mamma	Cirrocumulus
	uncinus	radiatus		Alto cumulus
	spissatus	vertebratus		Cumulonimbus
	castellanus	duplicatus		
	floccus			
Cirrocumulus	stratiformis	undulatus	virga	
	lenticularis	lacunosus	mamma	
	castellanus			
	floccus			
Cirrostratus	fibratus	duplicatus		Cirrocumulus
	nebulosus	undulatus		Cumulonimbus
Alto cumulus	stratiformis	translucidus	virga	Cumulus
	lenticularis	perlucidus	mamma	Cumulonimbus
	castellanus	opacus		
	floccus	duplicatus		
		undulatus		
		radiatus		
		lacunosus		
Altostratus		translucidus	virga	Alto cumulus
		opacus	praecipitatio	Cumulonimbus
		duplicatus	pannus	
		undulatus	mamma	
		radiatus		
Stratocumulus	stratiformis	translucidus	mamma	Altostratus
	lenticularis	perlucidus	virga	Nimbostratus
	castellanus	opacus	praecipitatio	Cumulus
		duplicatus		Cumulonimbus
		undulatus		

5.6.3 Wolkenklassifikation

- Wolkenarten, -unterarten, Sonderformen (Auszug *Karlsruher Wolkenatlas*)

Gattungen	Arten	Unterarten	Sonderformen	Mutterwolken
			Begleitwolken	(genitus)
Nimbostratus			praecipitatio	Cumulus
			virga	Cumulonimbus
			pannus	Altostratus
				Stratocumulus
				Alto cumulus
Cumulus	humilis	radiatus	pileus	Alto cumulus
	mediocris		velum	Stratocumulus
	congestus		virga	
	fractus		praecipitatio	
			arcus	
			pannus	
			tuba	
Cumulonimbus	calvus		praecipitatio	Alto cumulus
	capillatus		virga	Altostratus
			pannus	Nimbostratus
			incus	Stratocumulus
			mamma	Cumulus
			pileus	
			velum	
			arcus	
			tuba	

Wir fassen zusammen...

- **Verdunstung:** Übergang Moleküle von Flüssigwasserphase in Dampfphase; umgekehrt: **Kondensation**; Gleichgewicht: $e = E$
ungleichgewicht
- Sättigungsdampfdruck E nimmt **exponentiell mit T** zu (Clausius-Clapeyron) → **Phasendiagramm**; Zustandskurve als Gleichgewicht zw. Phasen
- Im Bereich **0-4°C Abnahme Dichte mit Temperatur** (Dichte-Max bei 4°C): **Anomalie Wasser** (auch: Schmelzen v Eis durch Druck)
- **Dunst:** Streupartikel sehr klein, $r = 0,1-1 \mu\text{m}$, Sichtweite $> 1 \text{ km}$
- **Nebel:** größere Streupartikel, Streuung **unabh. von Wellenlänge**
 - **Strahlungsnebel:** Abkühlung durch Ausstrahlung
 - **Advektionsnebel:** Abkühlung durch Überströmung kalter Oberfläche
 - **Frontnebel, Seerauch:** Wasserdampfzufuhr und Abkühlung
 - **Hochnebel:** Anreicherung Wasserdampf in Grenzschicht unter Inversion
- **Wolkenklassifikation:**
 - Wolkenfamilie (4 Typen) nach Höhe: Alto, Cirro, Strato, große Vertikalerstreckung
 - Wolkengattung (10 Typen): unterschieden nach Höhe und Struktur
 - Wolkenarten (14 Typen): unterschieden nach Aussehen (Dynamik)
8 - unterarten