

Vorlesung „Allgemeine Meteorologie“

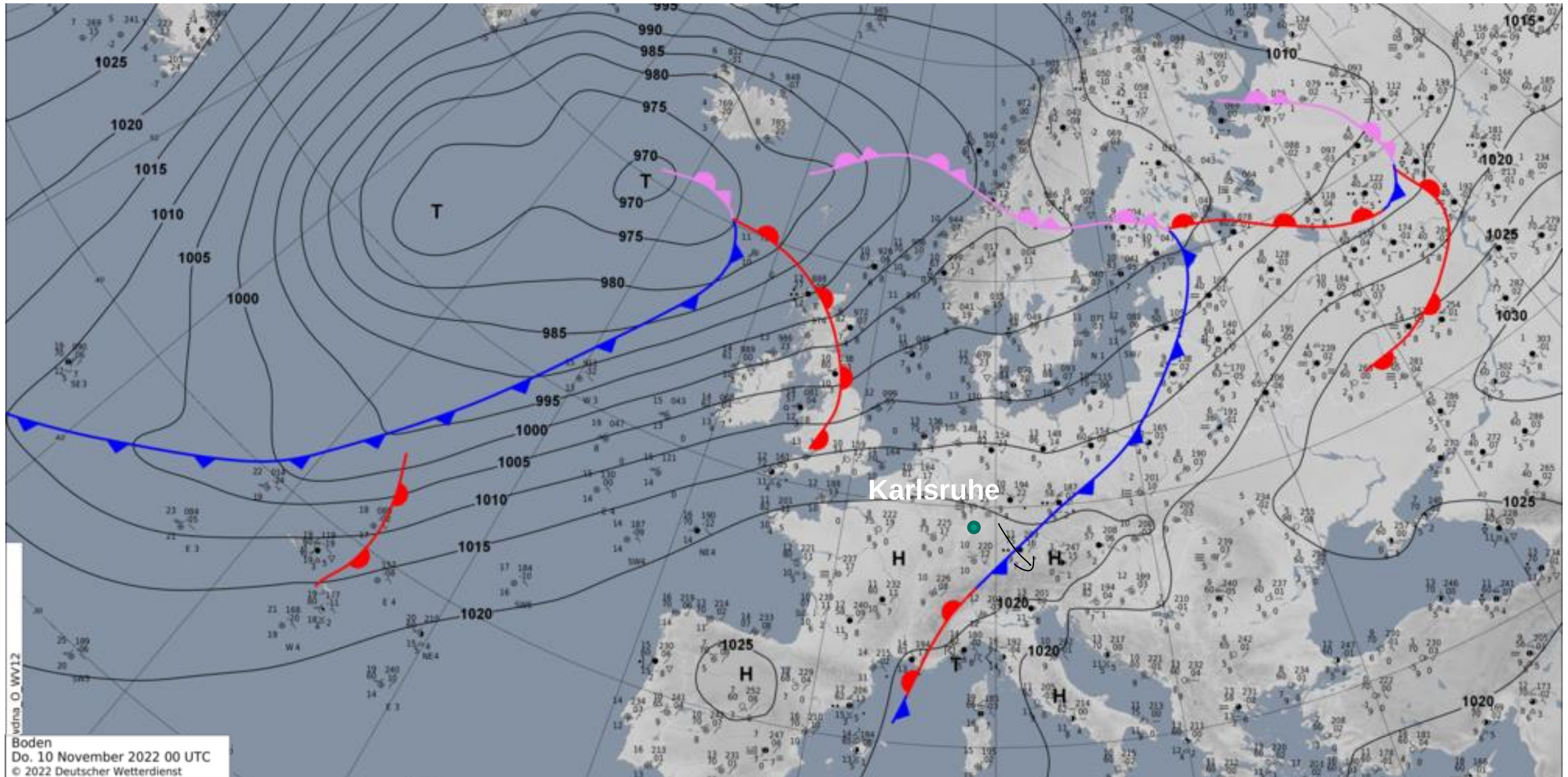
Prof. Michael Kunz



Das Wetter...

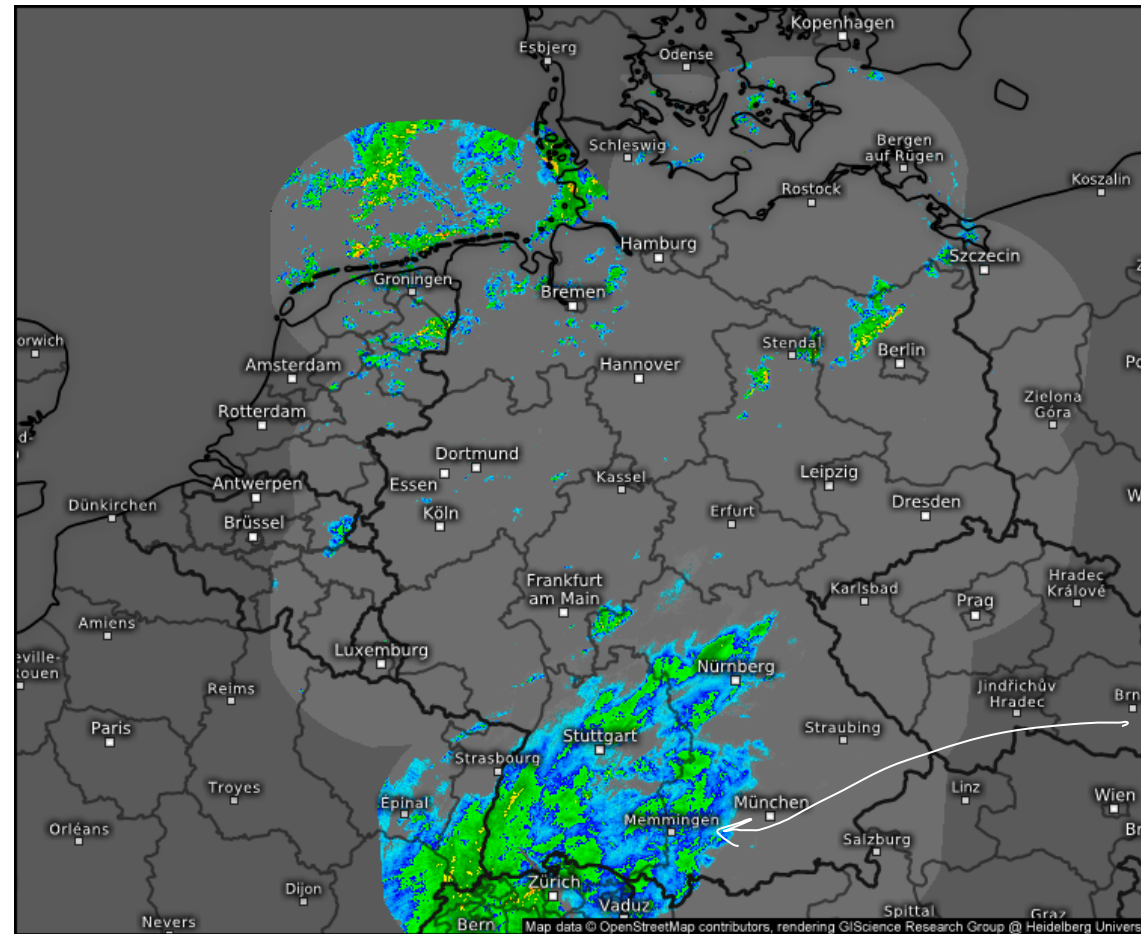


Bodenwetterkarte



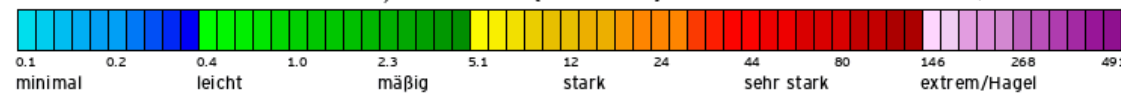
Satellit sichtbar

Niederschlag gestern



Radar Deutschland, 250m (mm/h)

Mi. 09.11.2022, 17:00 Uhr MEZ



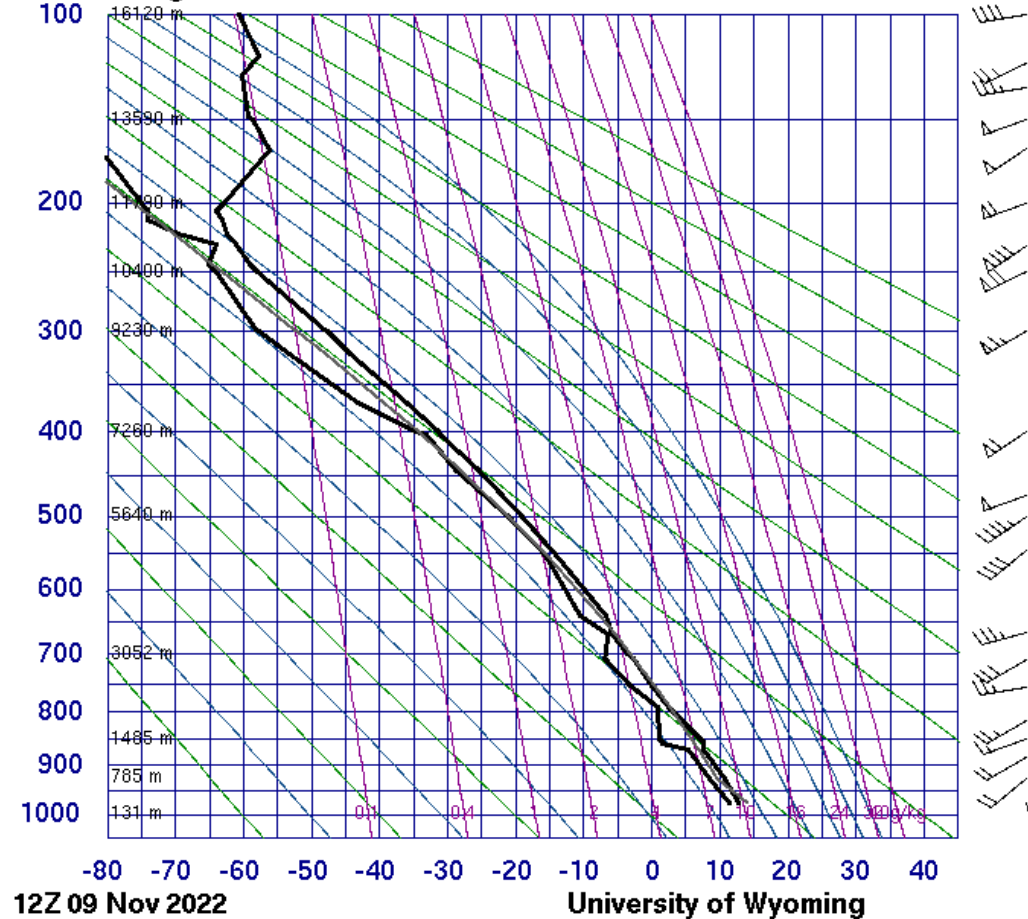
Deutschland



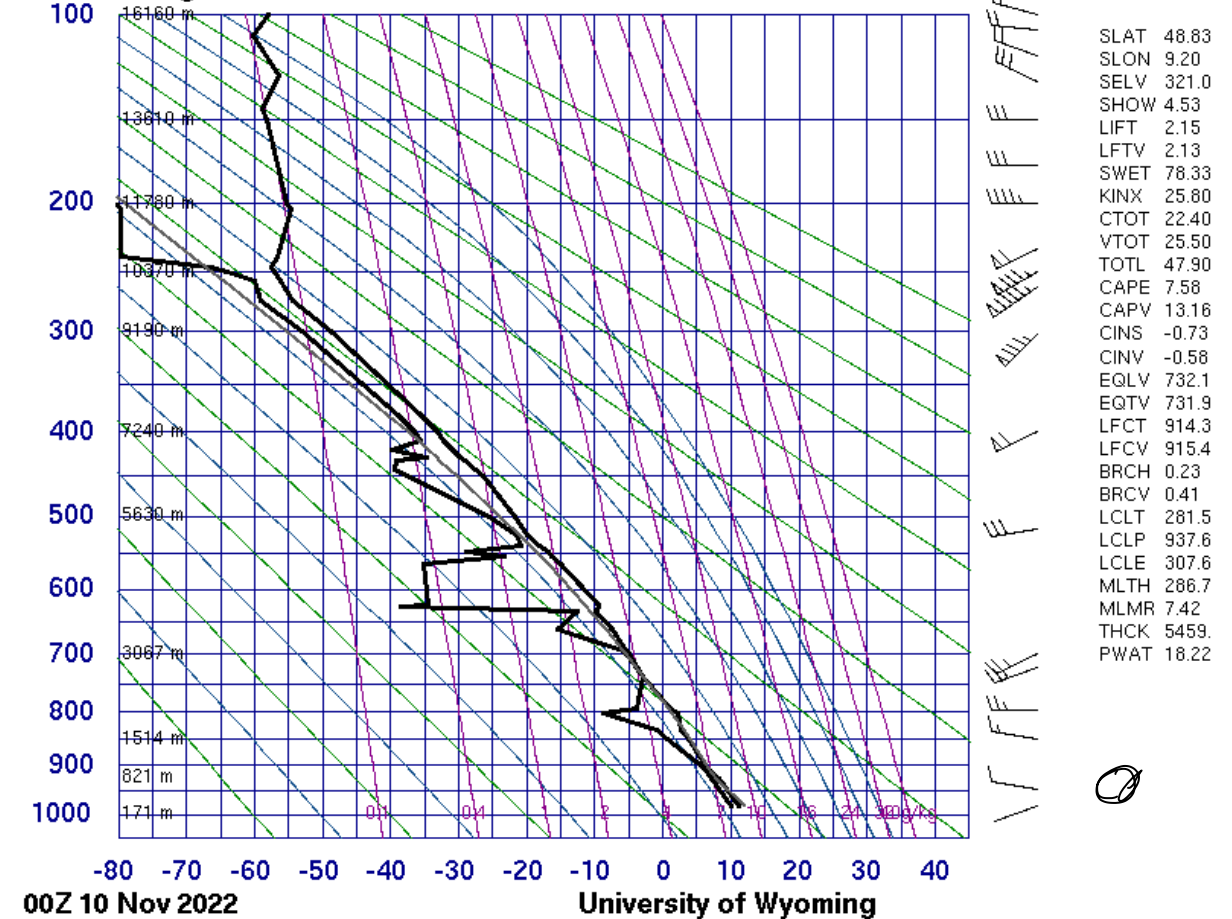
Stradiformer Niederschlag
(großflächig, eher niedrige Intensität)

Vertikalprofile gestern

10739 Stuttgart

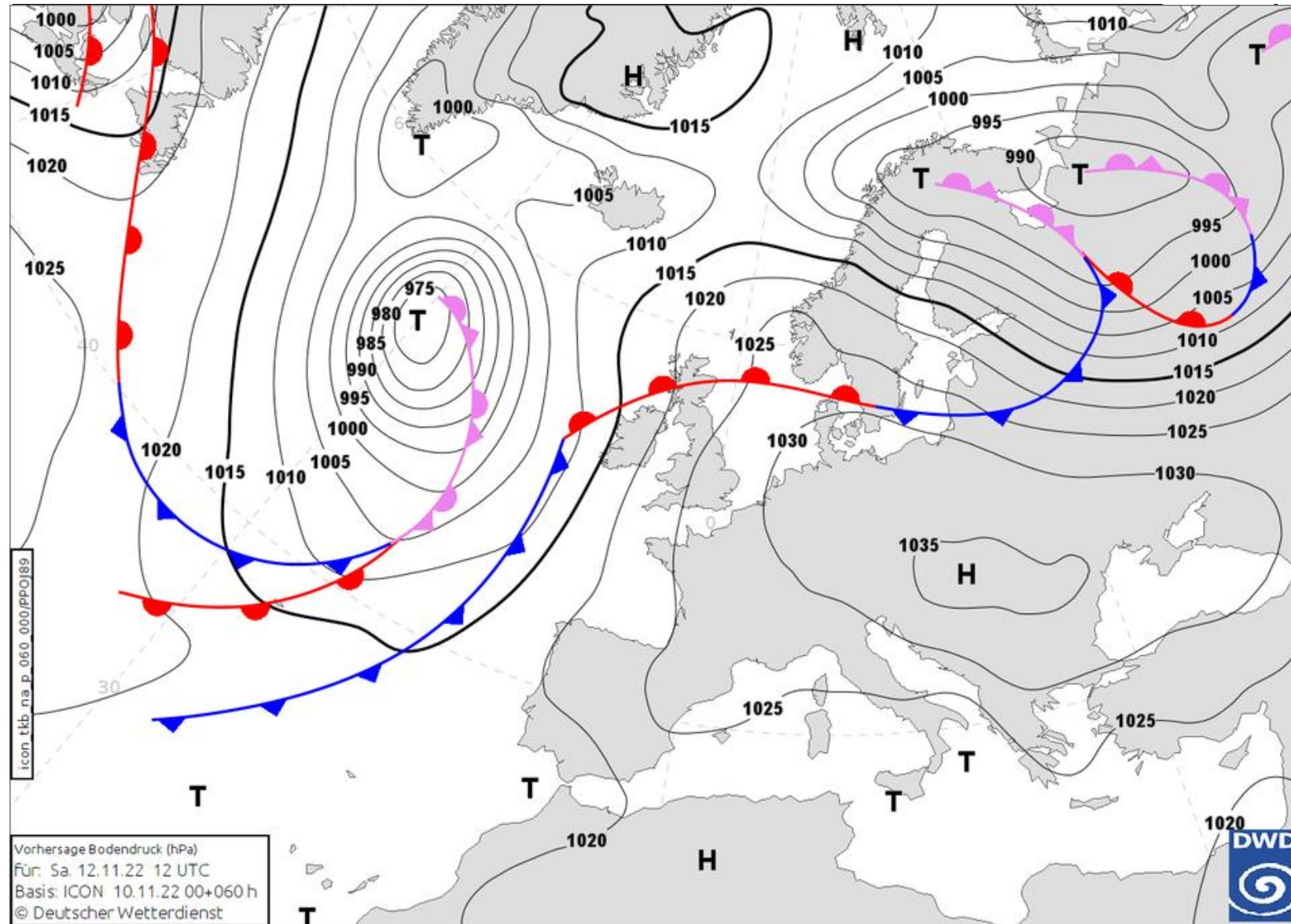


10739 Stuttgart



Temp. & Taupkttemp. → wenn nah aneinander : ?

<https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

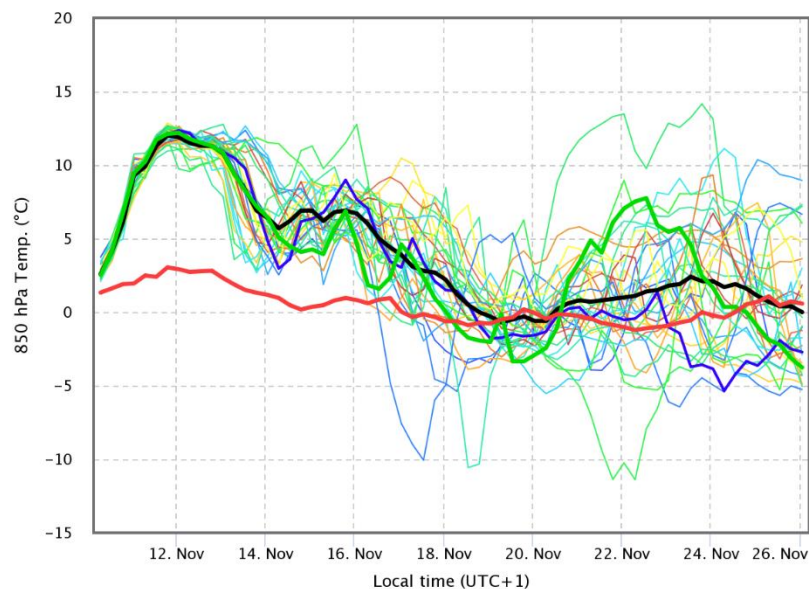


H: absinkende
Luftmassen
(Herbst Hochnebel,
da Inversion
Sommer ☺)
Hier auch Wind gering

Vorhersage: Ensembles

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

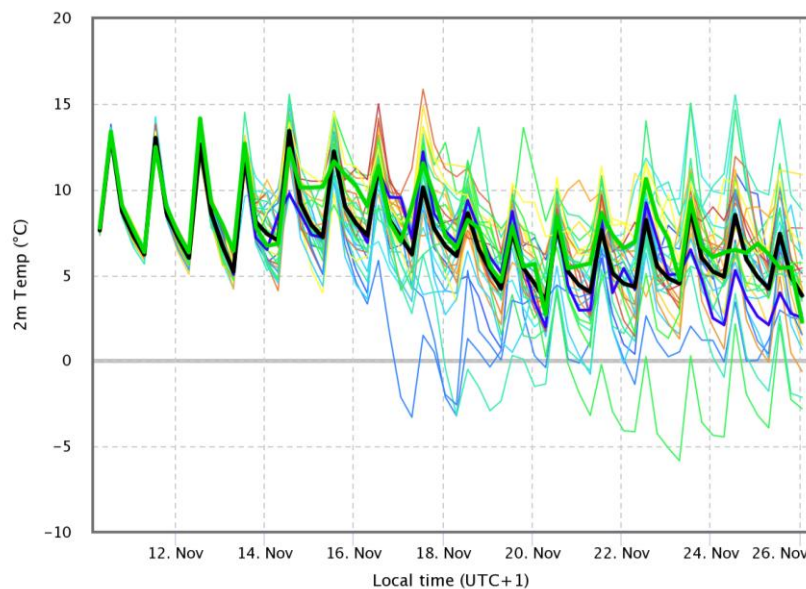
T_{850 hPa}



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

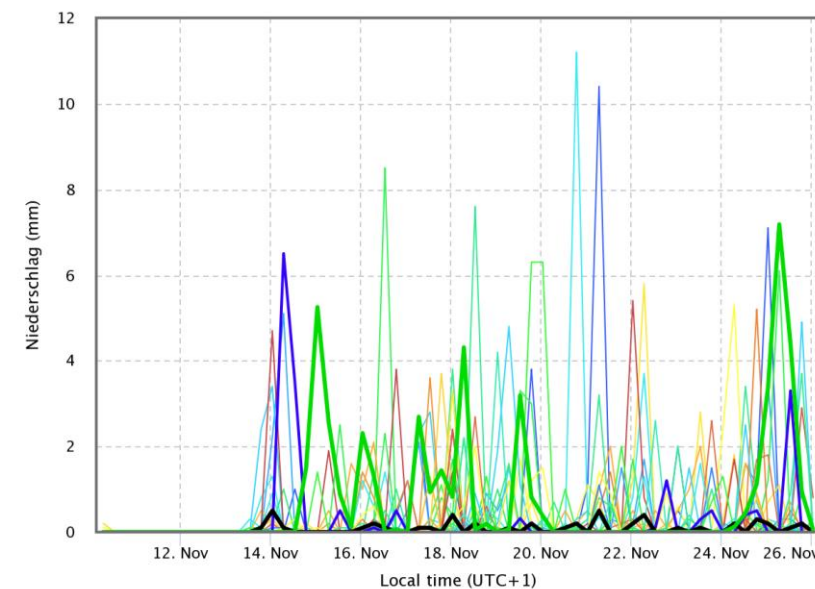
T_{2m}



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 3: Zustandsvariablen, Zustandsgleichung und meteorologische Größen



Letzte Vorlesung...

- **Kinetische Gastheorie**: Temperatur $\sim E_{\text{kin}}$

$$\overline{E} = \frac{3}{2}kT \quad \overline{E} = \frac{1}{2}m\overline{v^2} \quad \Rightarrow \quad T = \frac{m\overline{v^2}}{3k}$$

- Temperatur-Skalen: absolut (Kelvin), °C, °F
- Gesetz **Gay-Lussac** ($p = \text{const.}$) $\frac{V}{T} = \text{const.}$
- Gesetz **Boyle-Mariotte** ($T = \text{const.}$) $pV = \text{const.}$
- Zustandsänderungen für **ein** individuelles ideales Gas

$$p = \rho RT \Leftrightarrow pV = mRT = \frac{m}{M}R^*T \quad \text{mit} \quad R^* = R \cdot M = R \cdot \frac{m}{n}$$

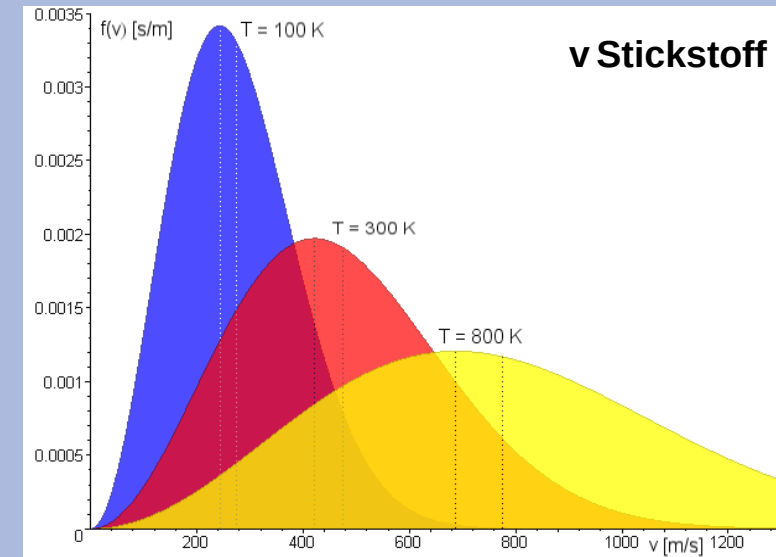
$M = m / n = \text{molare Masse}$, $m = \text{Masse}$, $n = \text{Anzahl Mole}$

R : individuelle Gaskonstante R^* : universelle Gaskonstante

- Zustandsgleichung für **Gemisch** idealer Gase: trockene Luft (Dalton: $p = \sum_i p_i$)

$$pV = mR_l T \Leftrightarrow p = \rho R_l T \quad R_l = \frac{R^*}{M_d} = \frac{8314}{28,97} \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1} = 287,1 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

- **Wind**: dreidimensional; mittlerer Wind vs. Böen; $\text{m/s} = 3,6 \text{ km/h} \approx 2 \text{ kn}$
- **Skalen**: Beaufort-Skala (Bf1-12); Saffir-Simpson-Skala (1-5) für tropische Wirbelstürme (Kat 1 $\geq 119 \text{ km/h}$); (Enhanced) Fujita Skala (0-5) für Tornados



agenda

3.1 Meteorologische Zustandsvariablen

3.1.1 Dichte (Volumen)

3.1.2 Luftdruck

3.1.3 Temperatur

3.2 Zustandsgleichung für ideale Gase

3.3 Zustandsgleichung einer Mischung idealer Gase

3.4 Wind (siehe auch Kap. 7)

3.5 Niederschlag (siehe auch Kap. 9)

3.5 Niederschlag

- Alle Niederschlagsteilchen in fester oder flüssiger Phase (die den Boden erreichen)
- Niederschlagsarten
 - Niesel, Regen (definiert nach Tropfendurchmesser; Regen ab $D > 0.5 \text{ mm}$)
 - Eis, Schnee
 - eher wie Schneeball*
 - Graupel, Hagel (unterschiedliches Wachstum, verschiedene Dichten)
 - hohe Dichte, nah an Eis*
 - abgesetzter Niederschlag (z.B. Reif)
- Dimension: L/T oder L
- Einheiten
 - Intensität (berücksichtigt Menge und Andauer): mm h^{-1}
 - Menge: $\text{kg m}^{-2} \approx \text{l m}^{-2} = \text{mm}$; Zeitangabe notwendig (z.B. Tag, Jahr)

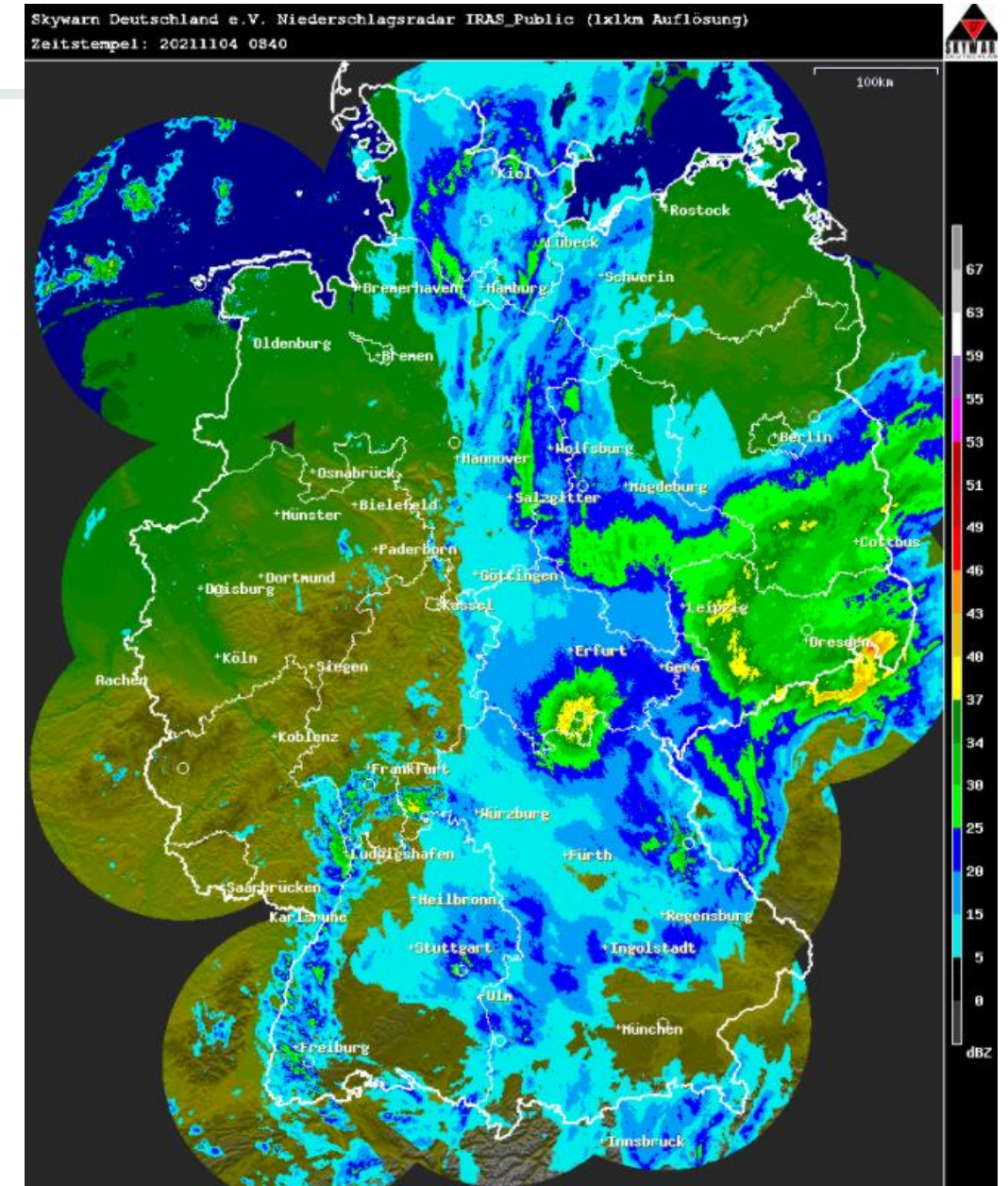


3.5 Niederschlag

■ Niederschlag: Unterscheidung nach Wolkenart

stratiform

- ☞ große räumliche Ausdehnung
- ☞ Dauer mehrere Stunden bis Tage
- ☞ geringe bis moderate Intensitäten
- ☞ homogen über große Flächen und über lange Zeit
- ☞ Entstehung: großräumige Hebung
- ☞ Vertikalgeschw.: $0.05\text{-}0.5\text{ m s}^{-1}$



Swabian
MOSES

23-06-2021 18.00 Uhr

durch
gesamte
Troposphäre
(starkes Eigen: hoch
ausgedehnt)

- MaxCappi, (dBZ) Höhe 12 km, LS 100 km, Range 120 km
- 23-06-2021 18.00 Uhr
-
- The image displays a MaxCappi radar plot at 12 km altitude. The plot shows a large area of high reflectivity (red and yellow) over the Rhine region, indicating heavy precipitation. The plot includes a color scale from -5.0 to 70.0 dBZ and a range scale from 0 to 120 km. The plot is titled 'MaxCappi, (dBZ) Höhe 12 km, LS 100 km, Range 120 km' and '23-06-2021 18.00 Uhr'. The plot shows a large area of high reflectivity (red and yellow) over the Rhine region, indicating heavy precipitation. The plot includes a color scale from -5.0 to 70.0 dBZ and a range scale from 0 to 120 km.

Datenaufzeichnung und Urheberrechte: Institut für Meteorologie und Klimaforschung, KIT Impressum Datenschutz

Superzelle 23. Juni 2021 → Rotation



© Latt



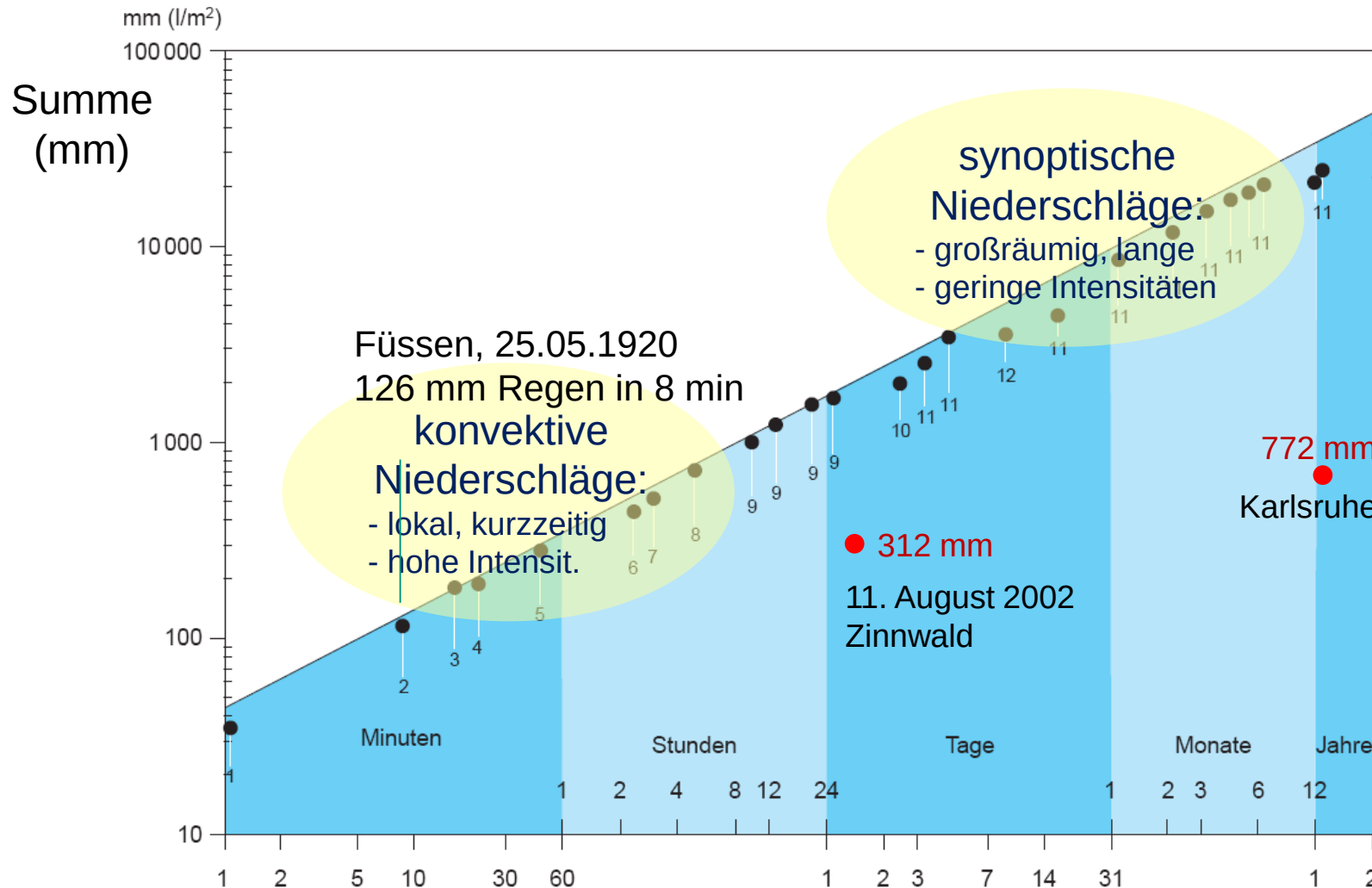
© Latt



© Kunz

3.5 Niederschlag

■ Niederschlagsrekorde



- 1 Barot, Guadeloupe, Frankreich
- 2 Füssen, Bayern, Deutschland
- 3 Plumb Point, Jamaika
- 4 Curtea de Arges, Rumänien
- 5 Holt, Missouri, USA
- 6 Rockport, West Virginia, USA
- 7 D'Hanis, Texas, USA
- 8 Smithport, Pennsylvania, USA
- 9 Belouve, Réunion, Frankreich
- 10 Hsin-Liao, Taiwan
- 11 Cherrapunji, Assam, Indien ! XD
- 12 Bellenden, Queensland, Australien

Rekorde:
Niederschlag Indien oft,
anderes USA

Dauer

Vorlesung „Allgemeine Meteorologie“

Prof. Michael Kunz

Kapitel 4: Vertikaler Aufbau der Atmosphäre



4.1 Aufbau der Atmosphäre

4.1.1 Troposphäre

4.1.2 Stratosphäre

4.1.3 Mesosphäre

4.1.4 Thermosphäre

4.2 Hydrostatische Approximation

4.3 Modellatmosphären

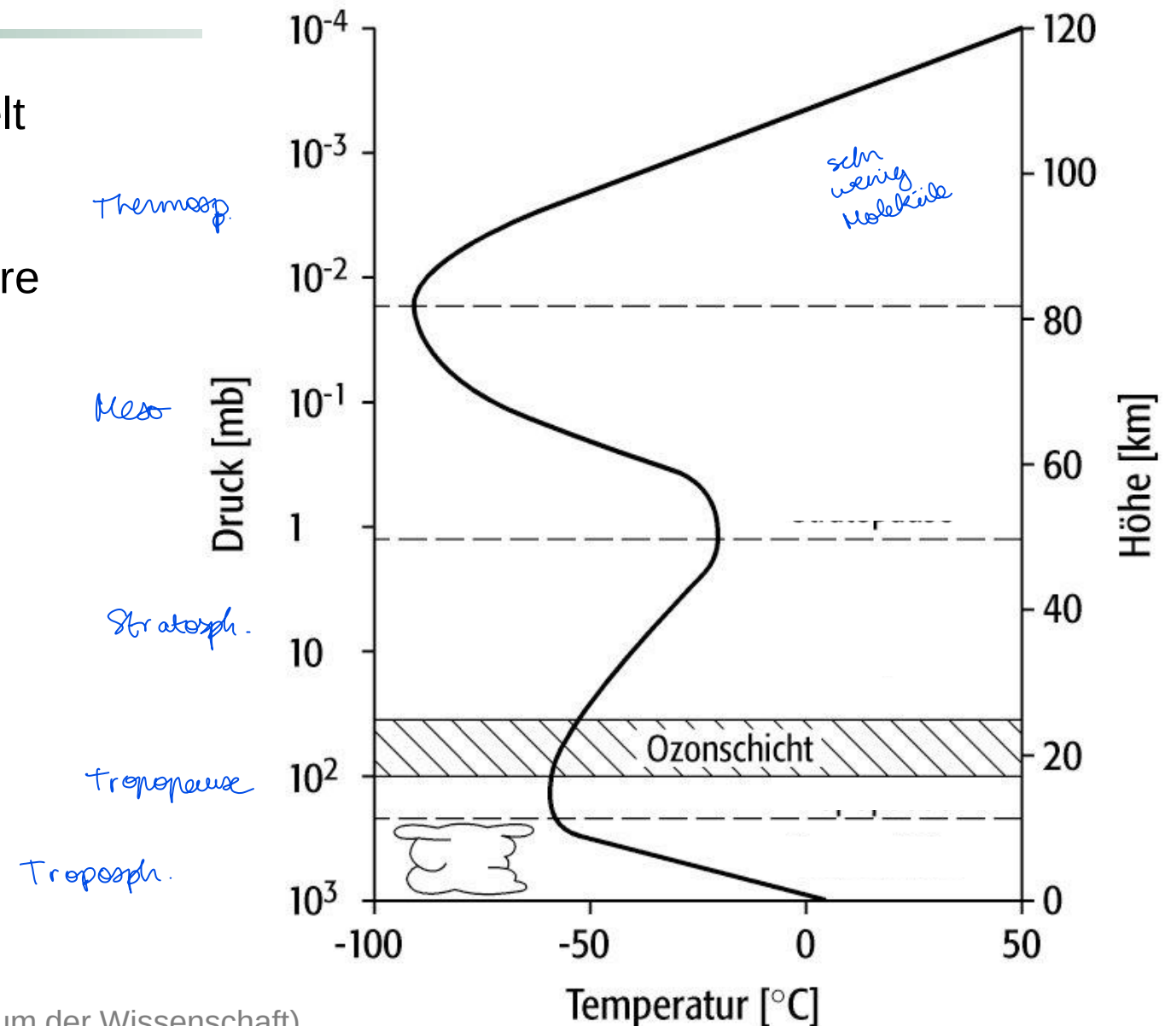
4.3.1 Homogene Atmosphäre

4.3.2 Isotherme Atmosphäre & Barometrische Höhenformel

4.3.3 Polytrope Atmosphäre

4.1 Aufbau der Atmosphäre

- **Temperaturverlauf** Atmosphäre spiegelt ablaufende **Prozesse** in den jeweiligen Höhenschichten wider
→ Einteilung Stockwerke der Atmosphäre nach Temperaturverteilung



(Quelle: Spektrum der Wissenschaft)

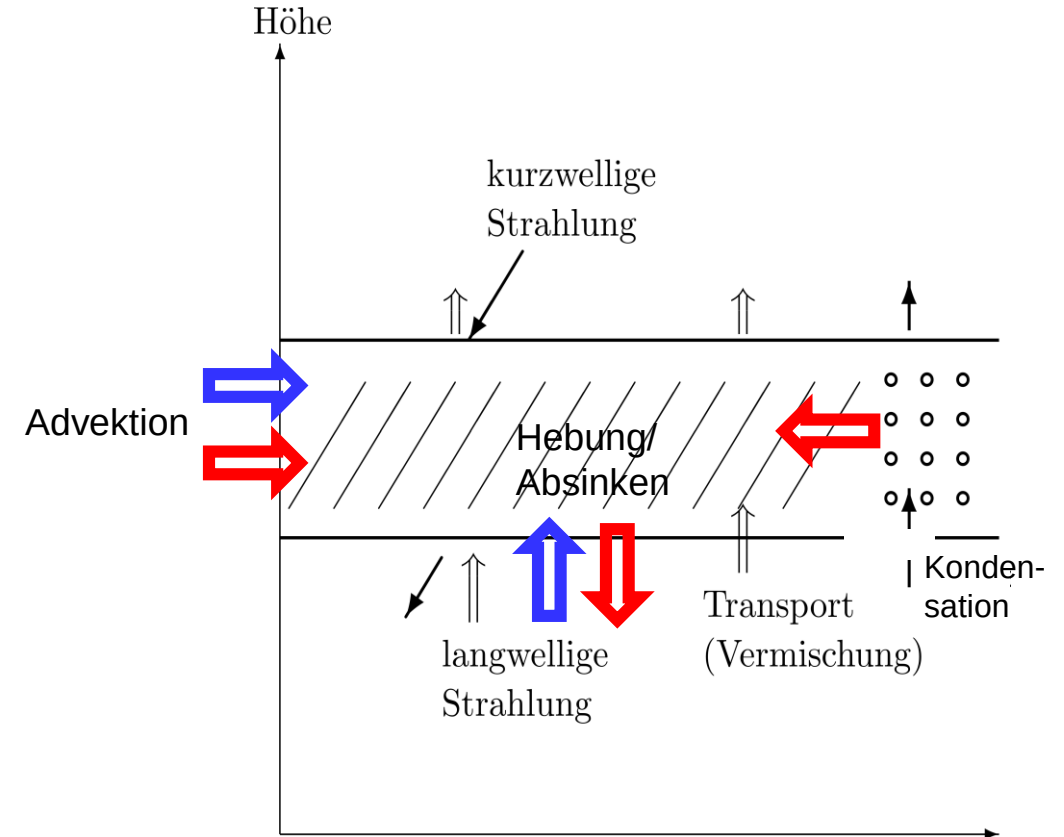
Fragen über Fragen...

- Welche Vorgänge und Prozesse bestimmen das **Vertikalprofil** der Temperatur?
*kurz & langwellige Strahlung
(Ozonbildung exotherm) chem. Reaktionen
Konvektion*
*Wolkenbildung & Verdunstung
(Wärmeübergänge)
adiabatischer Auftrieb, Hebung/Senkung*
- Bis wohin reicht die **Troposphäre**? Wovon hängt die Höhe ab?
*Pole 8 km
Äquator ~ 18 km
im Sommer höher
abh. von geog. Breite / Temp.*
- In welche Schichten ist die **Atmosphäre** unterteilt?


4.1 Aufbau der Atmosphäre

Vorgänge, die die Temperatur in einer Luftschicht beeinflussen:

- Strahlungsflussdivergenzen/Absorption
 - kurzwellige (solare) Strahlung
 - langwellige (terrestrische) Strahlung
- Transport- und Vermischungsvorgänge
 - Advektion
 - Konvektion, Turbulenz
- Vertikalbewegungen (Hebung/Absinken)
- Kondensation (Wärmezufuhr) und Verdunstung (Wärmeabgabe)
- chemische Reaktionen (z.B. Ozonchemie)



→ in den Schichten dominieren unterschiedliche Vorgänge ⇒ charakteristisches Temperaturprofil
→ Einteilung der Atmosphäre in Schichten mit ähnlichen Eigenschaften

4.1.1 Troposphäre

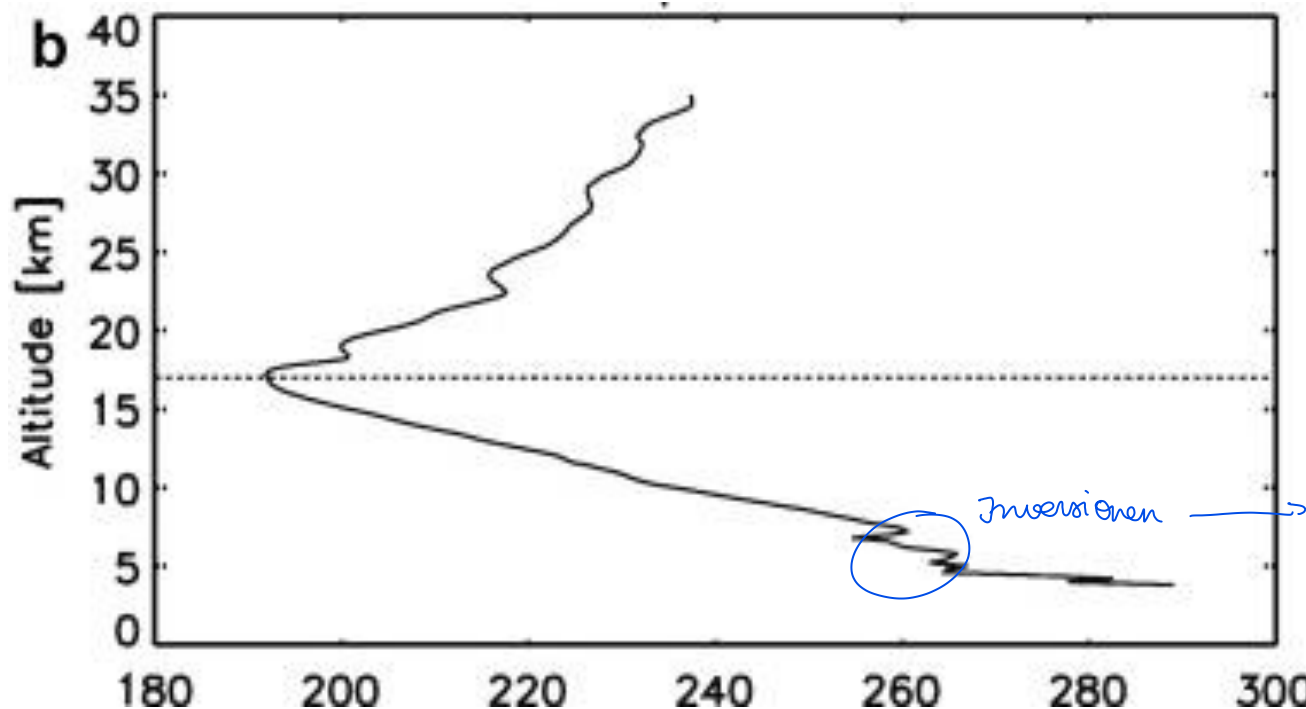
„Bremsen“ für Vertikalbewegungen



4.1.1 Troposphäre

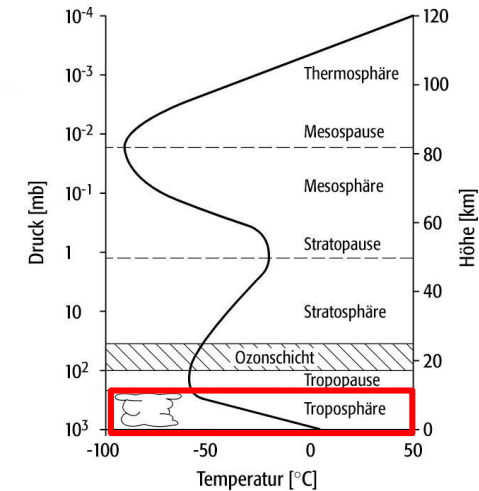
- Ort der Wettersysteme; Wolken- / Niederschlag
- Starke vertikale (turbulente) Durchmischung
- Temperaturabnahme mit Höhe, **Mittel** $\gamma = 0,0065 \text{ K m}^{-1}$
 - aber: Einzelprofile sehr variabel, z.B. Isotherme / Inversionen

Mittel (2001-2009) aus Satellitenmessungen, 20°- 40°



freie Atmosphäre ≠ Grenzschicht
(Reibung
unwirksam)

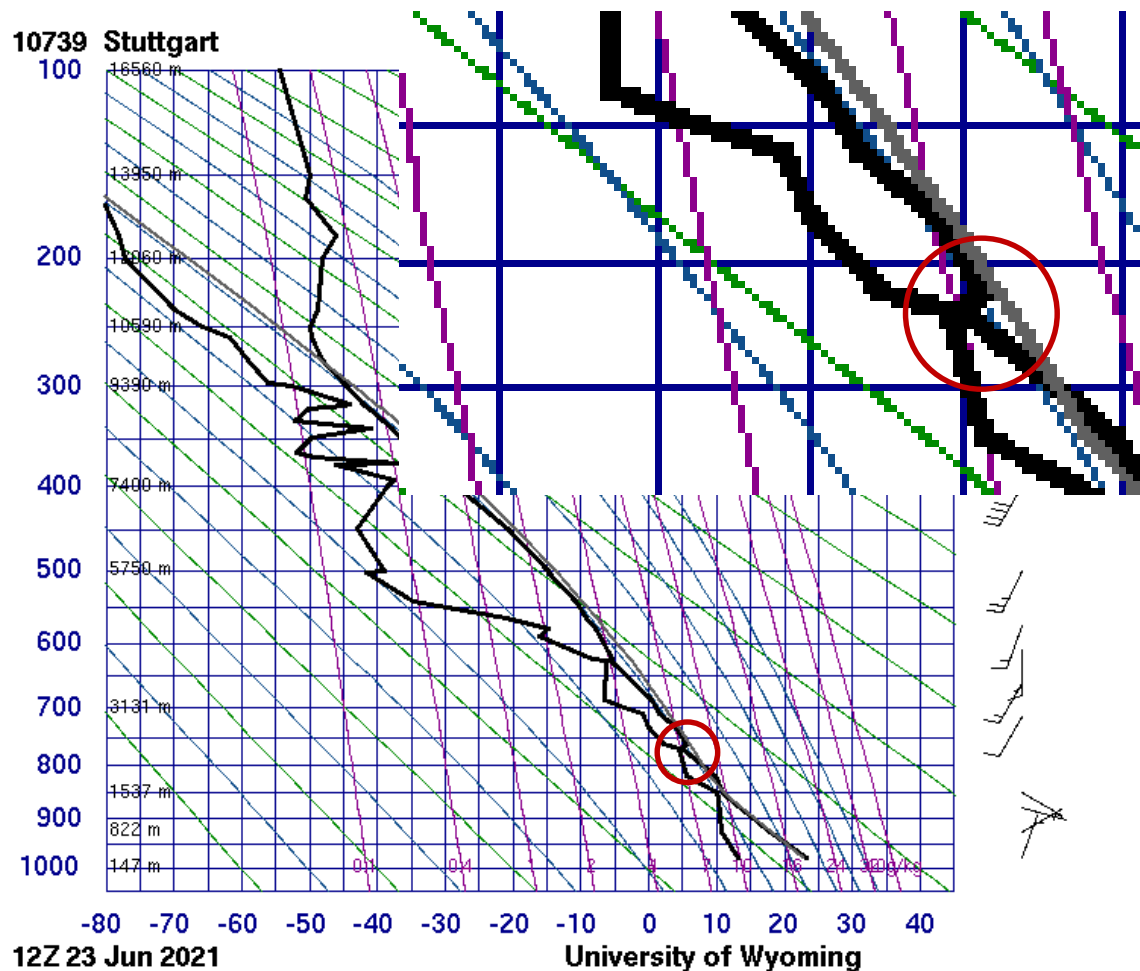
(Schmidt und
Wickert et al., 2010)



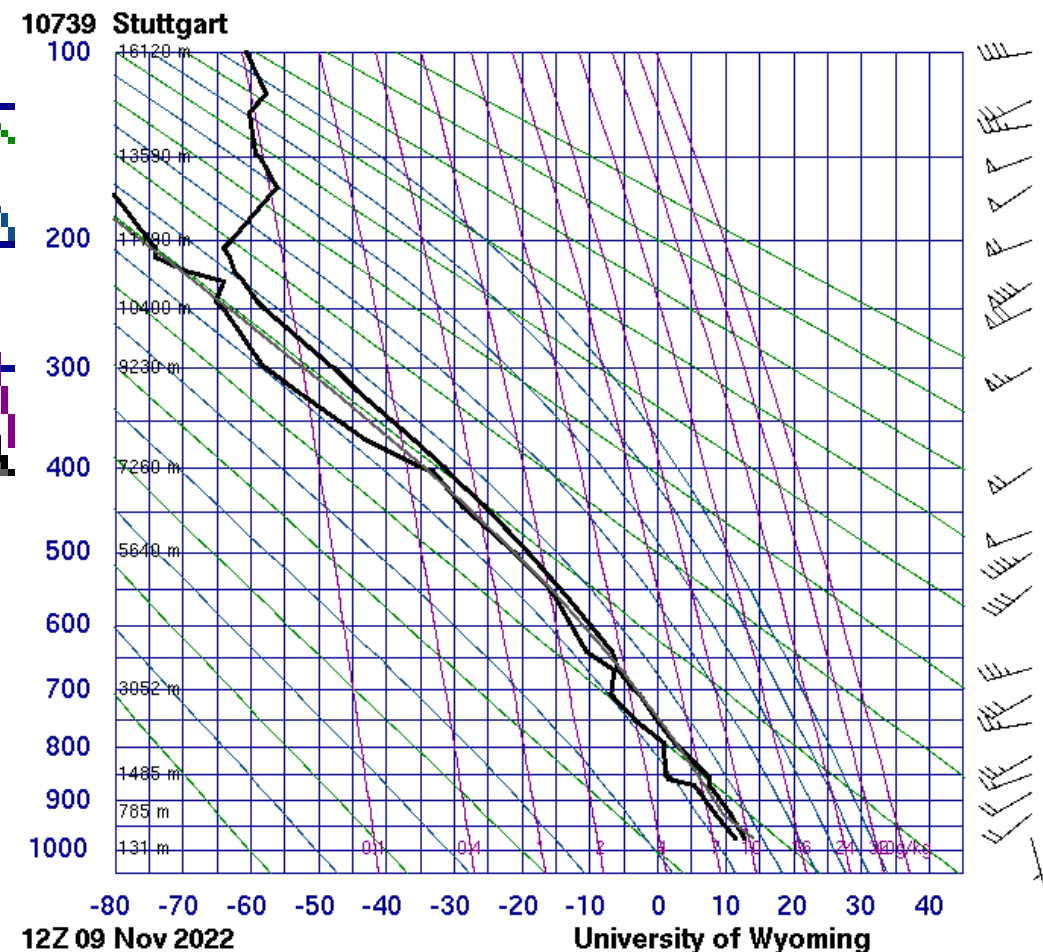
4.1.1 Troposphäre

■ Reale Vertikalprofile Station Stuttgart

23. Juni 2021 12 UTC



gestern 12 UTC



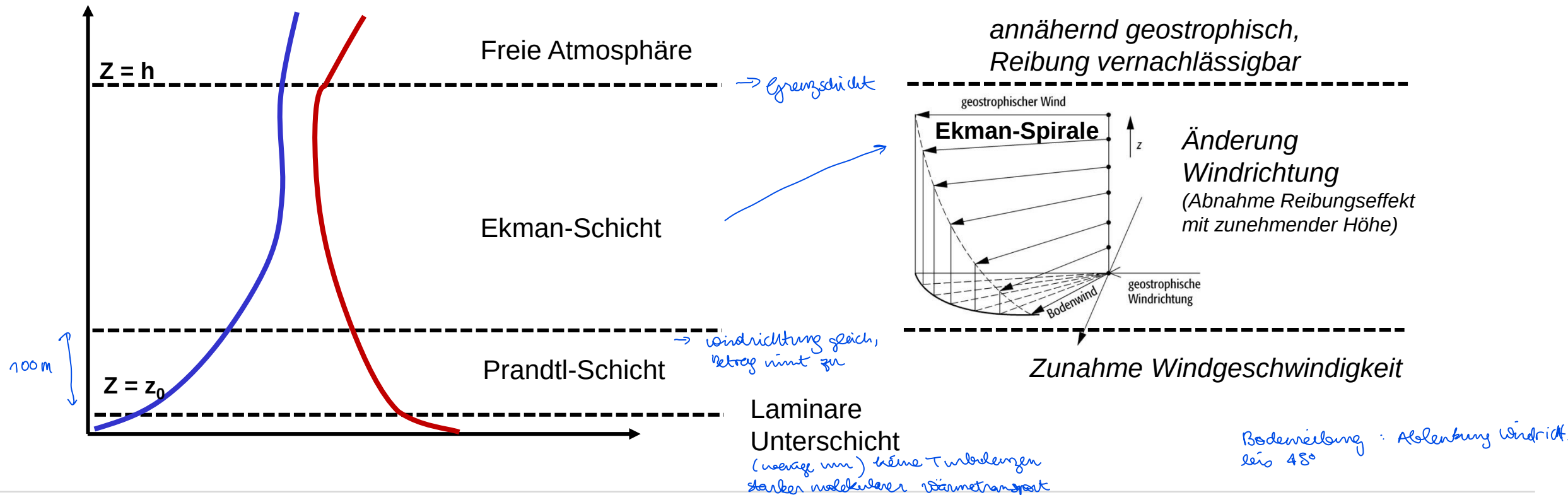
4.1.1 Troposphäre

Unterteilung: Planetare Grenzschicht – freie Atmosphäre



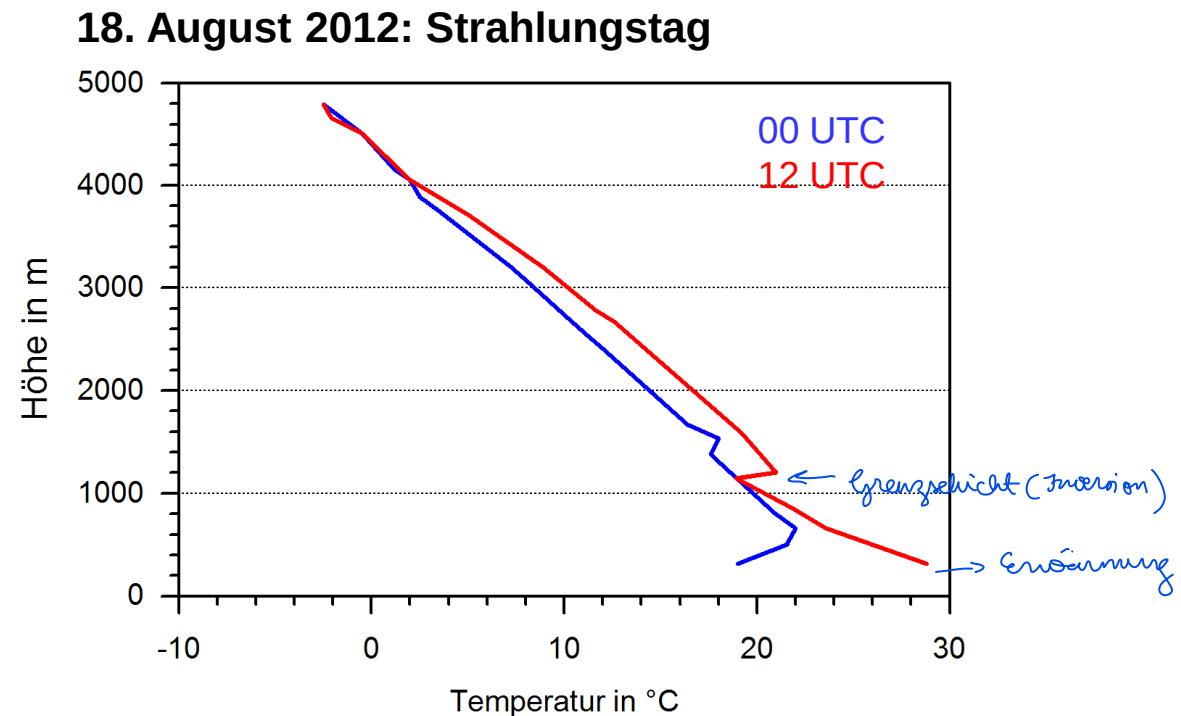
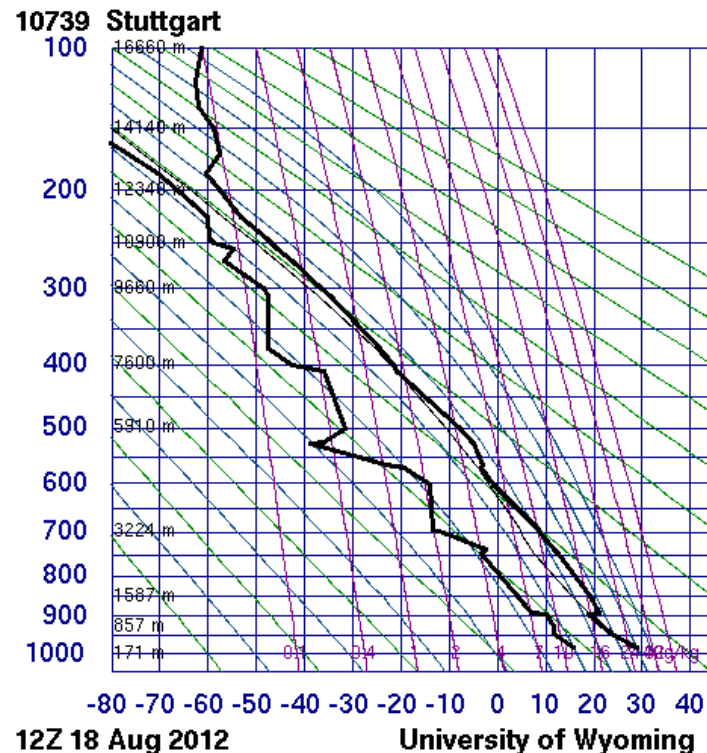
4.1.1 Troposphäre

- **Planetare Grenzschicht:** bodennahe Luftschicht; bis ~500 m (v.a. nachts) bzw. ~3000 m (tags) *baut sich tagsüber auf*
- Ausgeprägter Tagesgang der Temperatur (Strahlungstage)
 - **Tag:** Einstrahlung + Erwärmung Erdboden / angrenzende Luftschichten
 - **Nacht:** Ausstrahlung + Abkühlung Erdboden / angrenzende Luftschichten



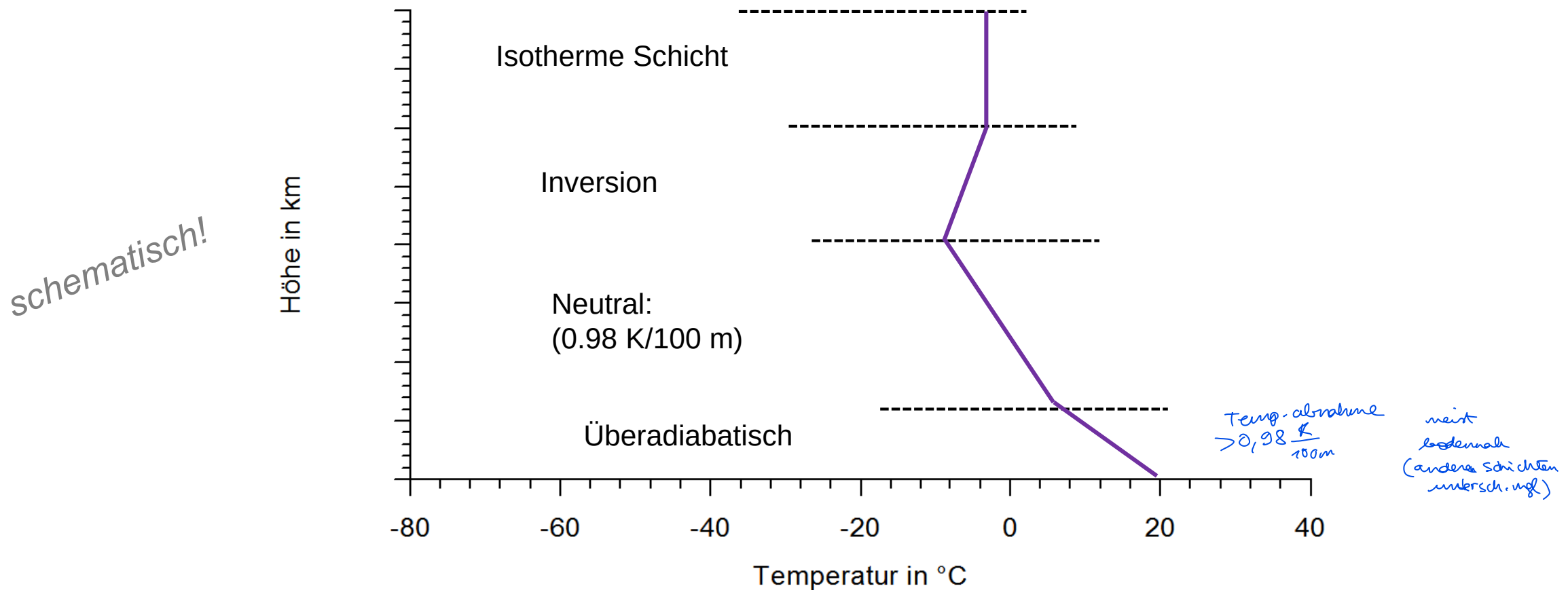
4.1.1 Troposphäre

- **Planetare Grenzschicht:** bodennahe Luftschicht; bis ~500 m (v.a. nachts) bzw. ~3000 m (tags)
- Ausgeprägter Tagesgang der Temperatur (Strahlungstage)
 - **Tag:** Einstrahlung + Erwärmung Erdboden / angrenzende Luftschichten
 - **Nacht:** Ausstrahlung + Abkühlung Erdboden / angrenzende Luftschichten



4.1.1 Troposphäre

- **Planetare Grenzschicht:** bodennahe Luftschicht; bis ~500 m (v.a. nachts) bzw. ~3000 m (tags)
darüber: **freie Atmosphäre**
- Schichtungsarten in der Troposphäre / Grenzschicht (siehe auch Kap. 8.5)



4.1.1 Troposphäre

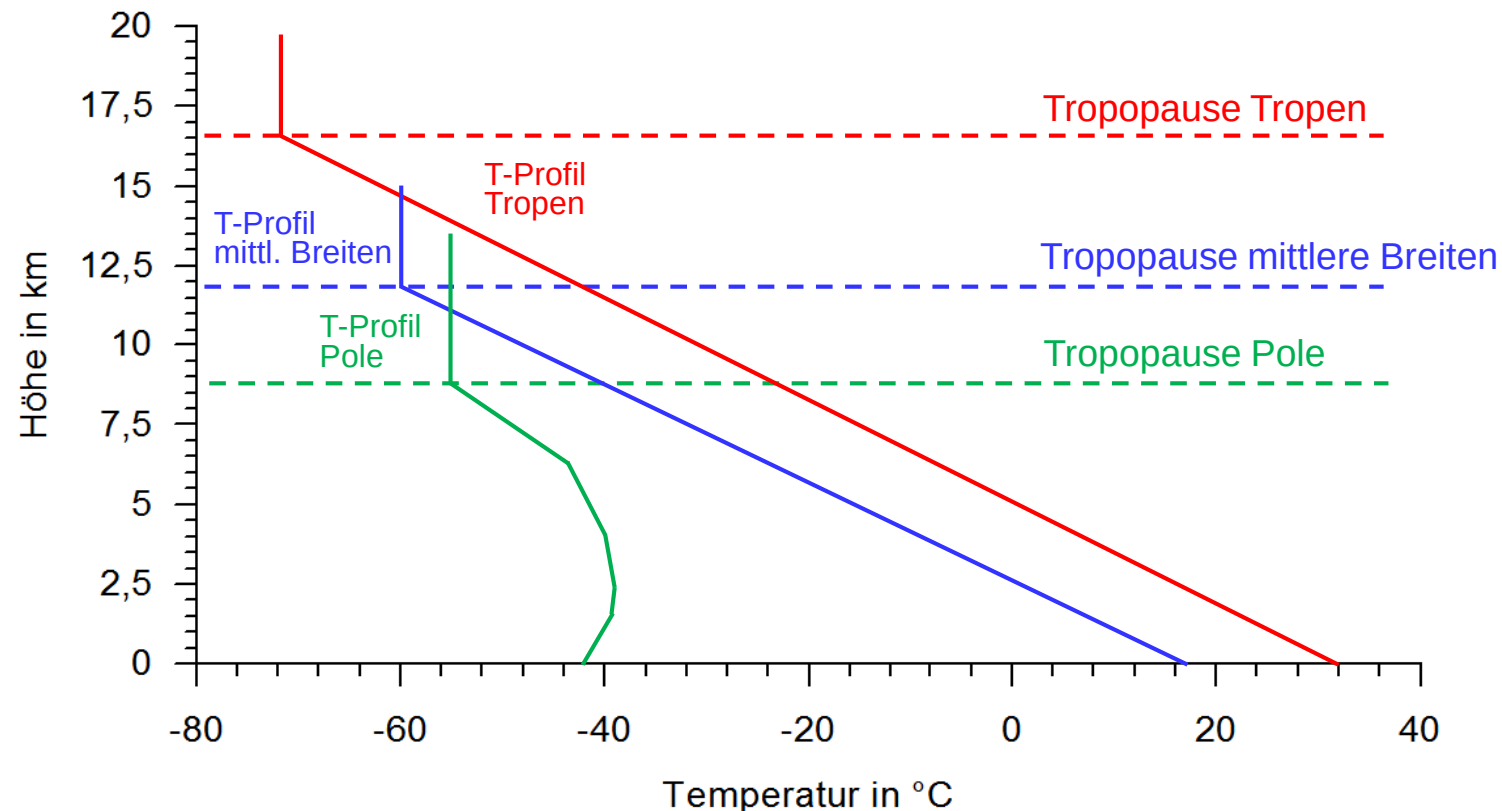
- **Tropopause:** Obergrenze Troposphäre; T -40 bis -60°C
- Gekennzeichnet durch Zunahme der Temperatur (Inversion); in Tropopause oft konstante Temp. *oder Isothermie*
- Höhe der Tropopause (und Ausdehnung Troposphäre) abhängig von Temperatur (= geografischer Breite + Jahreszeit)



4.1.1 Troposphäre

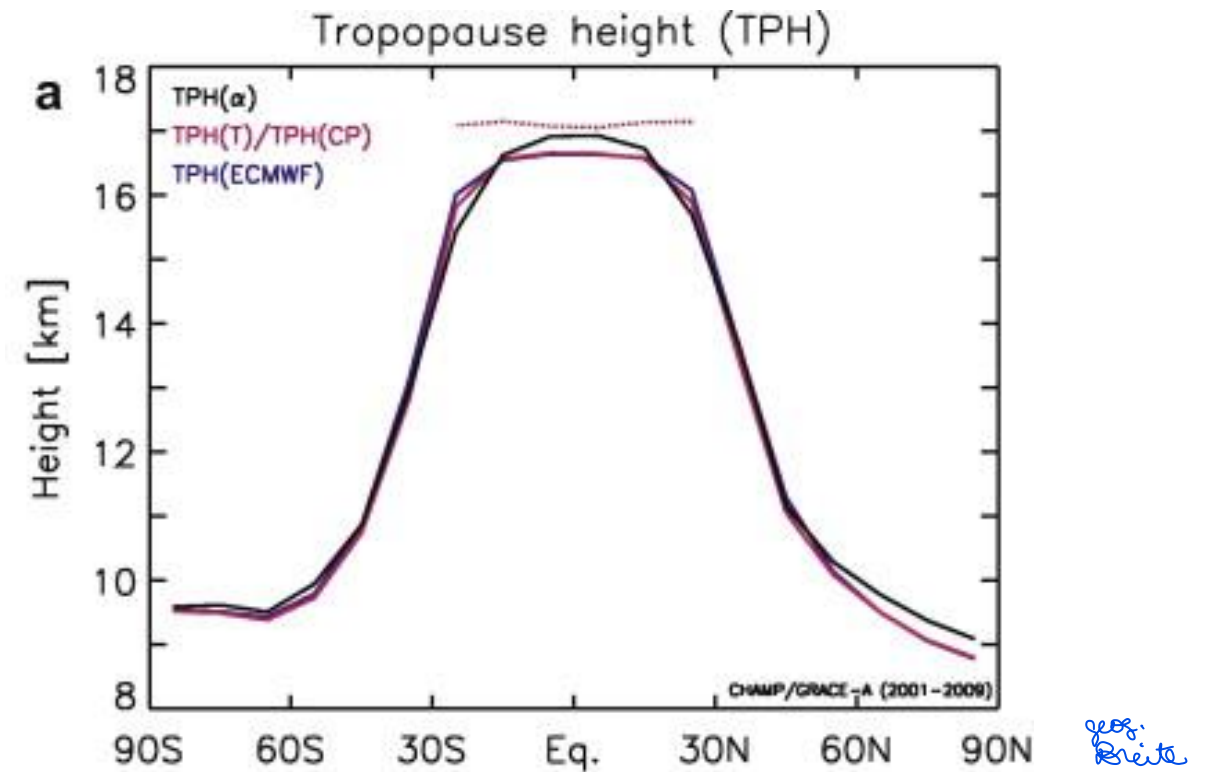
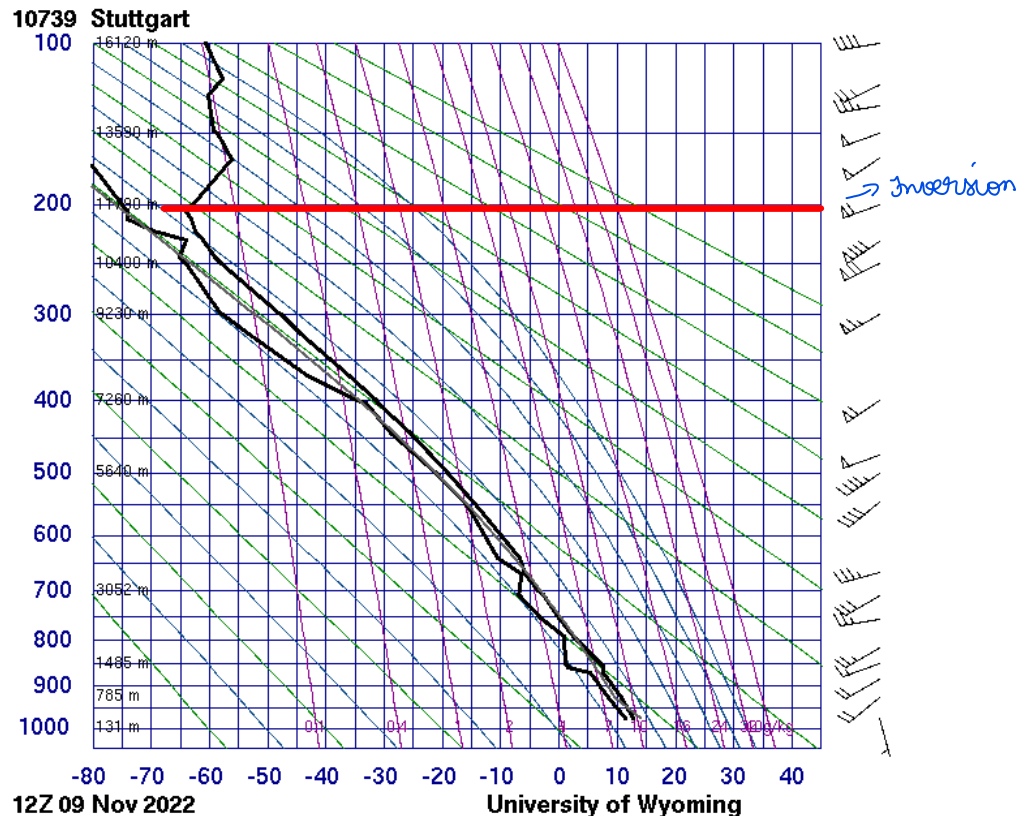
- **Tropopause:** Obergrenze Troposphäre; T -40 bis -60°C
- Gekennzeichnet durch Zunahme der Temperatur (Inversion); in Tropopause oft konstante Temp.
- Höhe der Tropopause (und Ausdehnung Troposphäre) abhängig von Temperatur (= geografischer Breite + Jahreszeit)

schematisch!



4.1.1 Troposphäre

- **Tropopause:** Obergrenze Troposphäre; T -40 bis -60°C
- Gekennzeichnet durch Zunahme der Temperatur (Inversion); in Tropopause oft konstante Temp.
- Höhe der Tropopause (und Ausdehnung Troposphäre) abhängig von Temperatur (= geografischer Breite + Jahreszeit)



(Schmidt und Wickert et al., 2010)

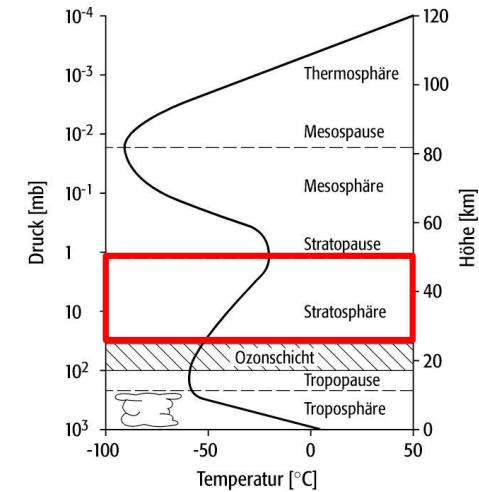
4.1.2 Stratosphäre



4.1.2 Stratosphäre

- Oberhalb Troposphäre, mit dieser verbunden; Stratosphäre bestimmt auch Wettersysteme;
- Temperaturzunahme bis ~50 km auf ~0°C; bestimmt v.a. durch Ozonchemie (sehr hoher Ozongehalt)
- Sehr trocken, keine Wolken; Ausnahme: **polare stratosphärische Wolken (PSC)**, Bildung bei sehr tiefen Temperaturen aus Eis, Salpetersäurehydrate oder unterkühlten Tröpfchen (Flüssigwasser); entscheidend für Chloraktivierung (**Ozonloch**)

Ozonabbau

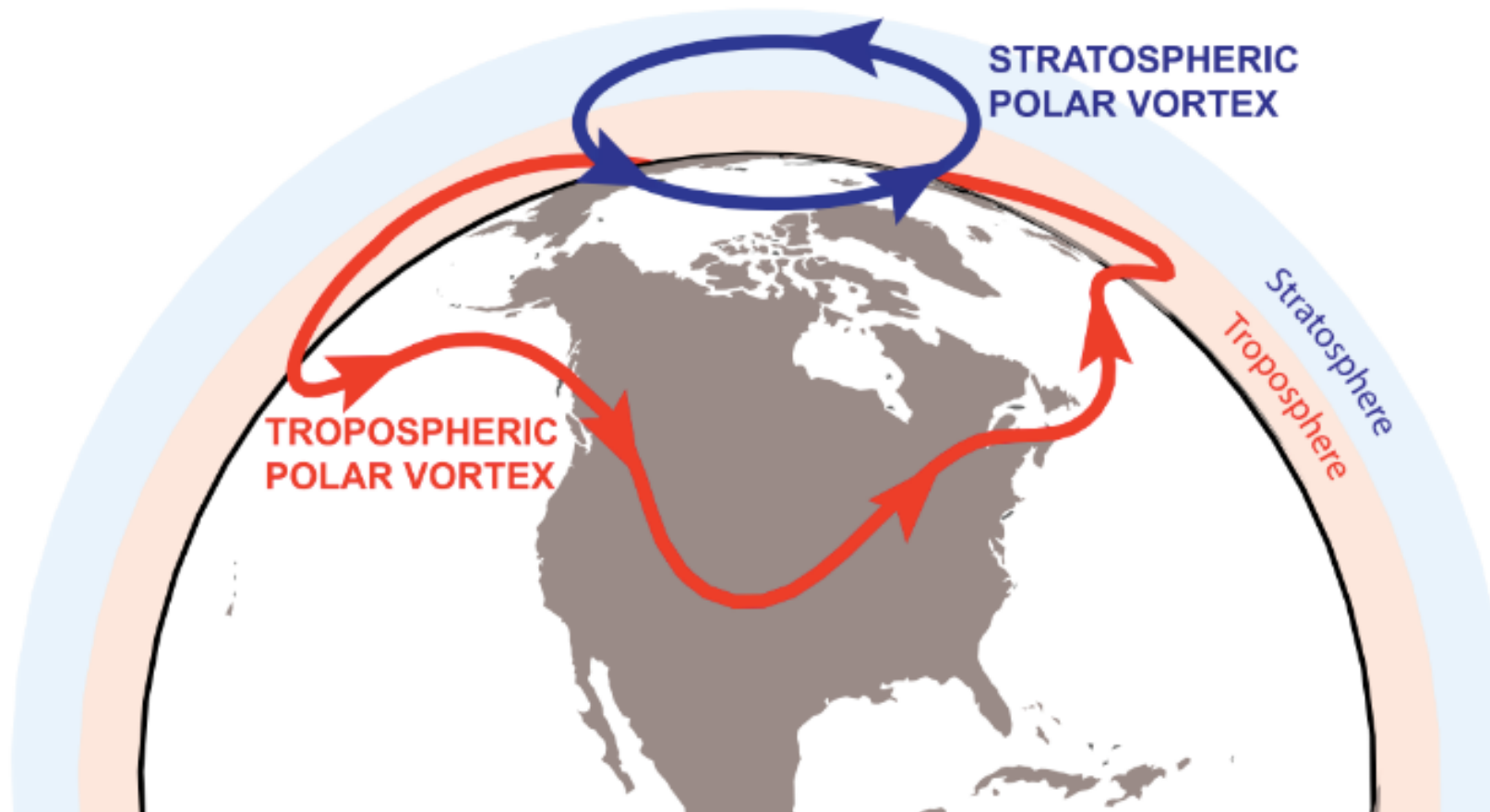


4.1.2 Stratosphäre

näher da ΔT groß

Polarwirbel (Vortex) über Arktis / Antarktis

Großräumiges Tiefdruckgebiet mit Kaltluft im jew. **Hemisphärenwinter**



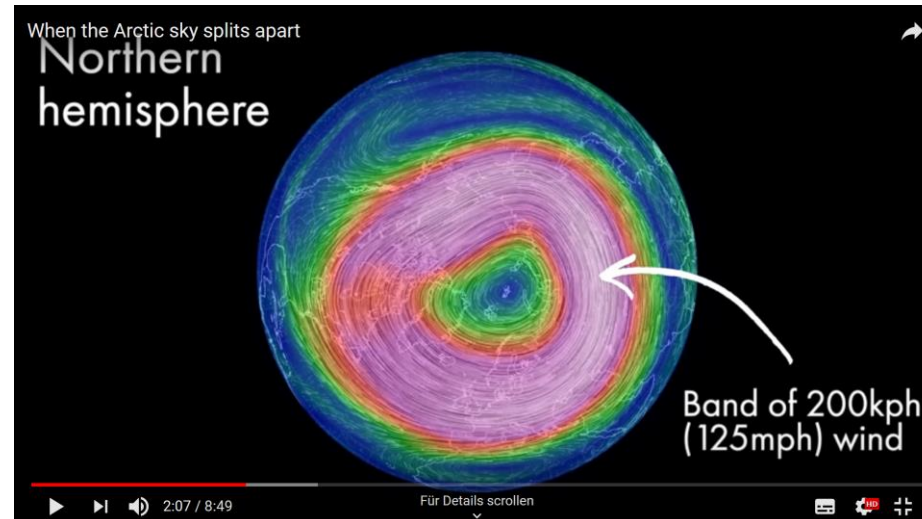
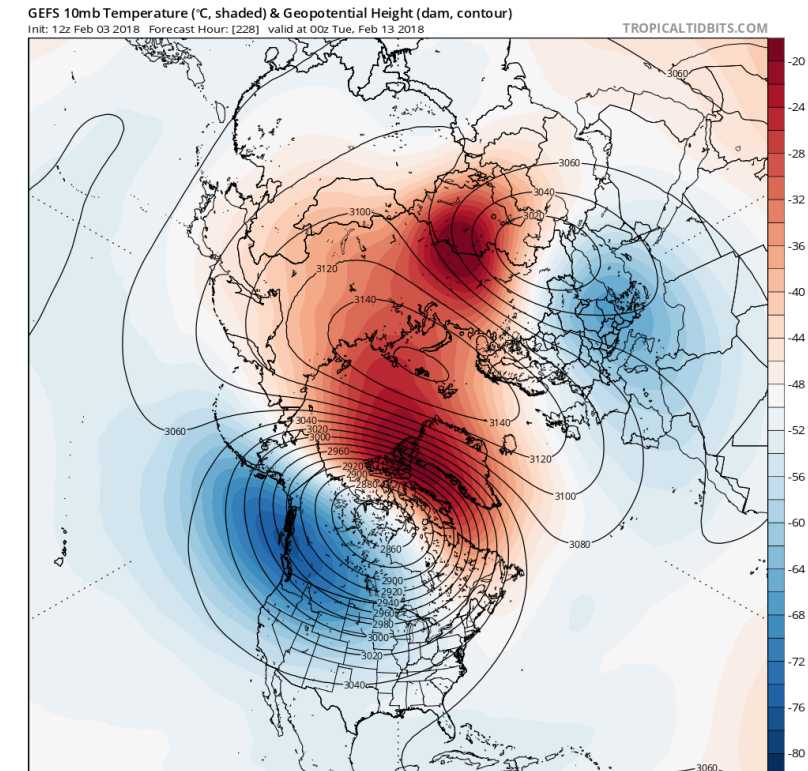
Quelle: Waugh et al., 2017; AMS

4.1.2 Stratosphäre

Plötzliche Stratosphärenenerwärmung im Winter (R. Scherhag, 1952)

- Entsteht, wenn stratosphärischer Polarwirbel aus dem Takt gerät
- Folge: Verlangsamung Zirkulation oder Aufspaltung in zwei getrennte Wirbel → *Ausw. Troposph.*
- Massive Temperaturzunahme in Stratosphäre in wenigen Tagen
- Troposphäre: Verbunden mit Umkehr der West- in Ostwinde
→ Vordringen kontinentaler Kaltluft aus Osten
- Tritt ca. alle 2 Jahre auf

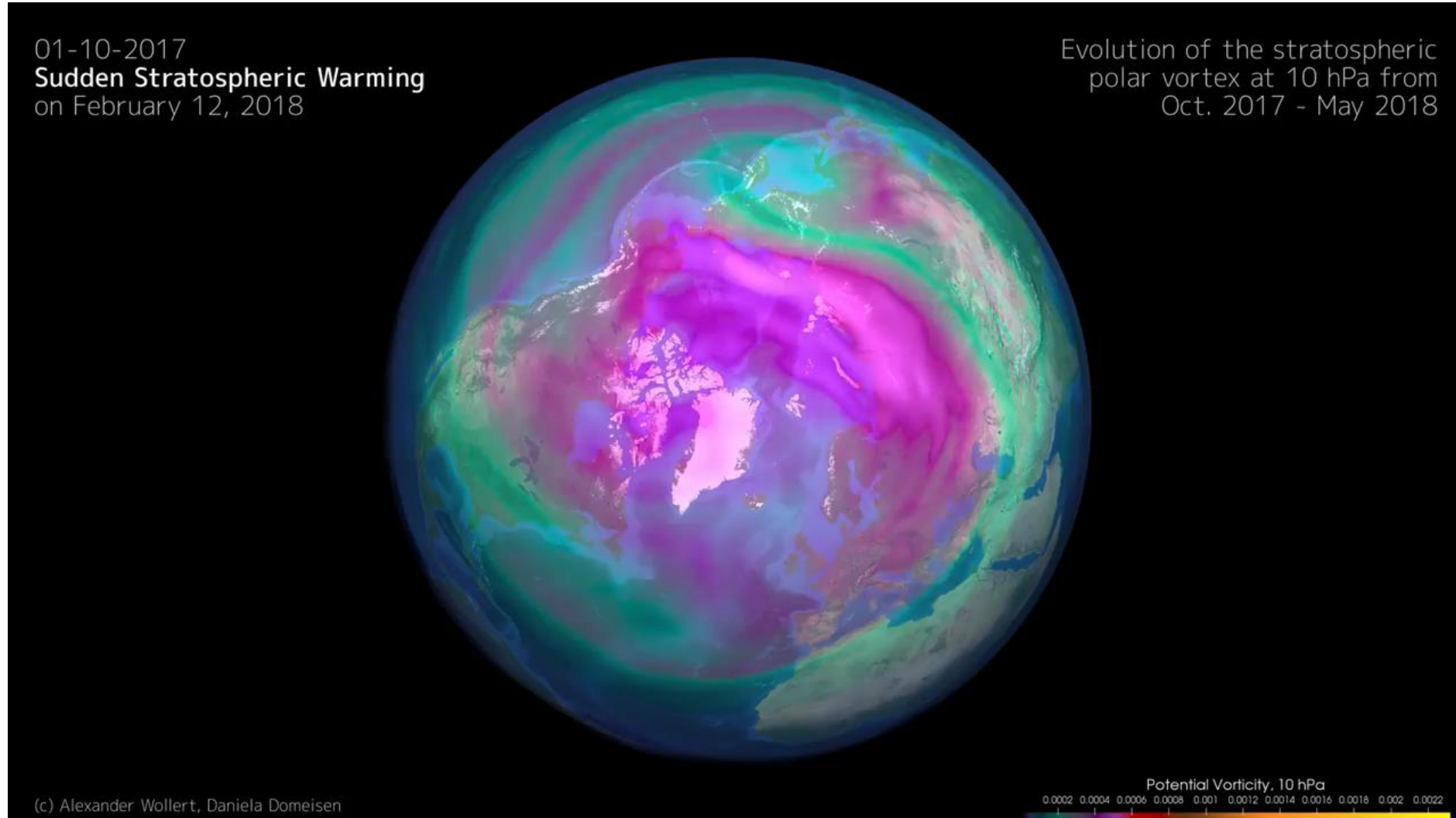
Temperatur / Geopotential 10 hPa 13.02. 2018



<https://twitter.com/simonoxphys/status/967737811670589442>

4.1.2 Stratosphäre

Plötzliche Stratosphärenerwärmung 2018



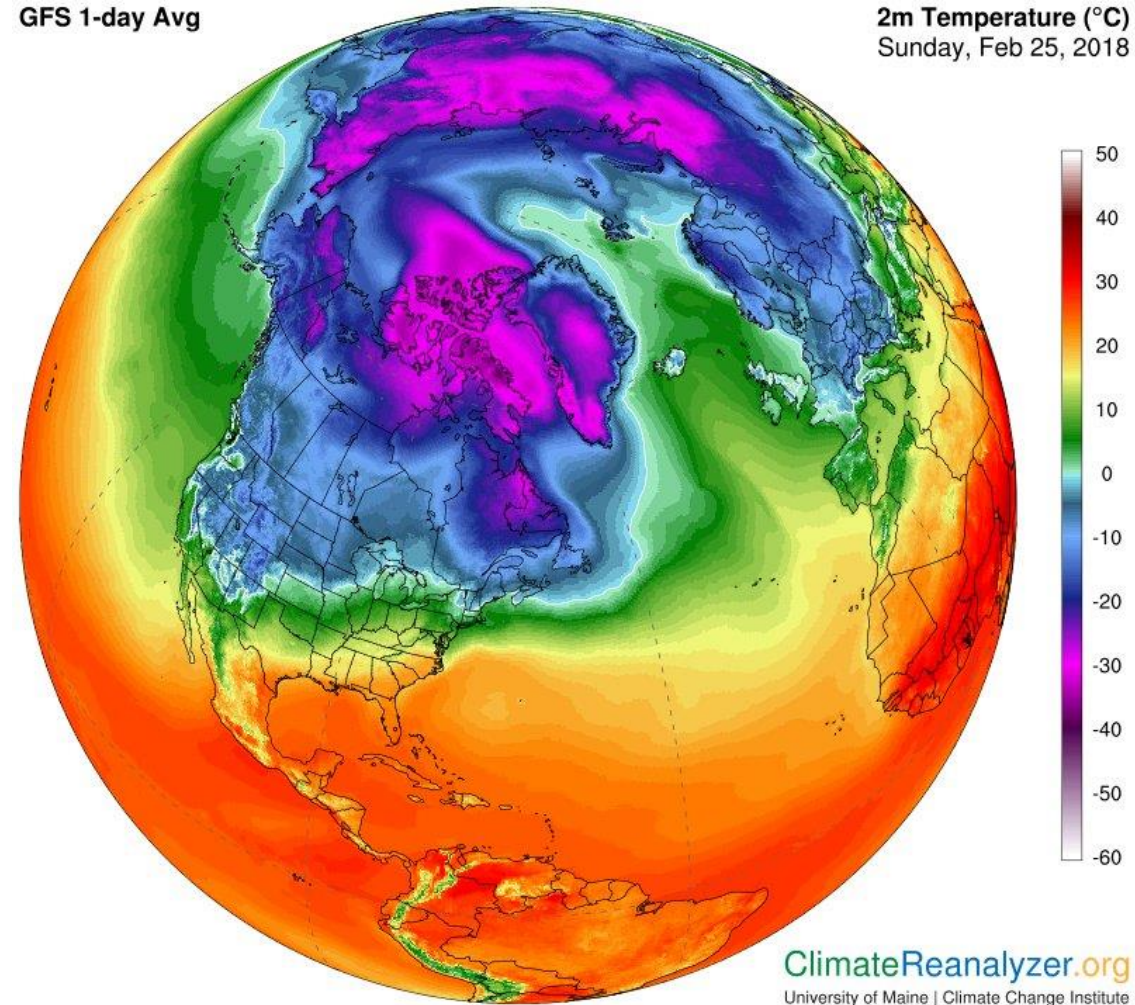
4.1.2 Stratosphäre

Folgen Stratosphärenerwärmung / Split Polar Vortex in Troposphäre

**2 m Temperatur
Nordhemisphäre
25. Febr. 2018**

GFS 1-day Avg

2m Temperature (°C)
Sunday, Feb 25, 2018



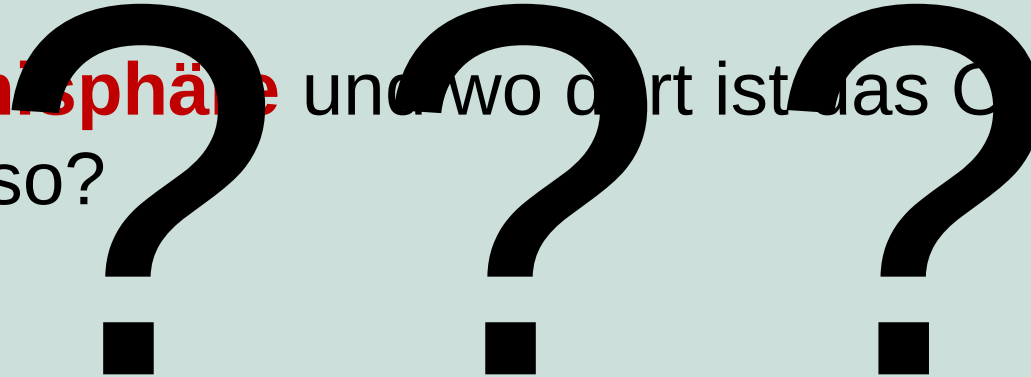
4.1.2 Stratosphäre

Folgen Stratosphärenenerwärmung / Split Polar Vortex in Troposphäre



Fragen über Fragen...

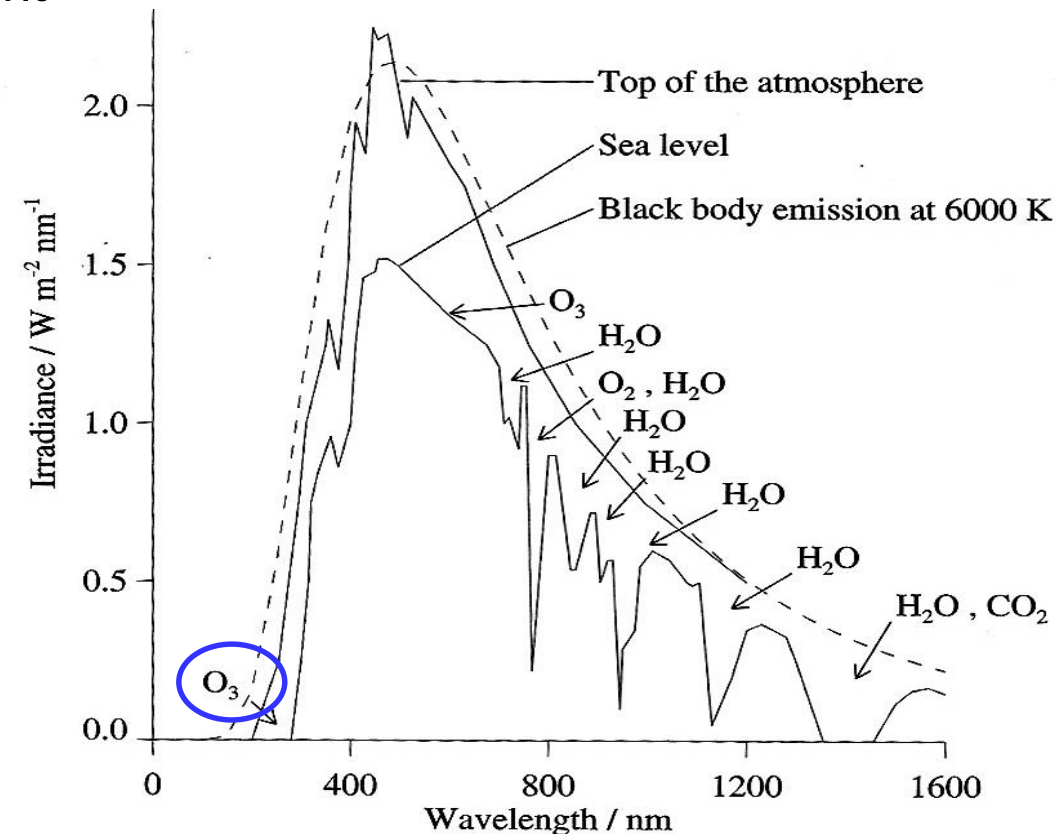
- Was sind die beiden wesentlichen Effekte von **Ozon** in der Stratosphäre?
- Wodurch ist das **Ozonloch** entstanden?
- In welcher **Hemisphäre** und wo dort ist das Ozonloch am stärksten? Wieso?



4.1.2 Stratosphäre

Ozon O₃ Stratosphäre

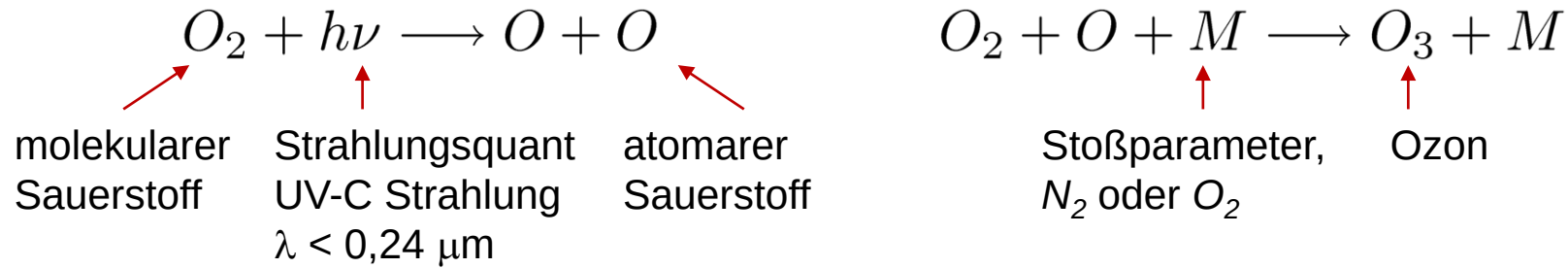
- Absorption energiereicher UV-Strahlung
- Entwicklungsgeschichtlich: erste Photosynthese durch Algen im Meer, Entstehung Sauerstoff bis Aufbau Ozonschicht



4.1.2 Stratosphäre

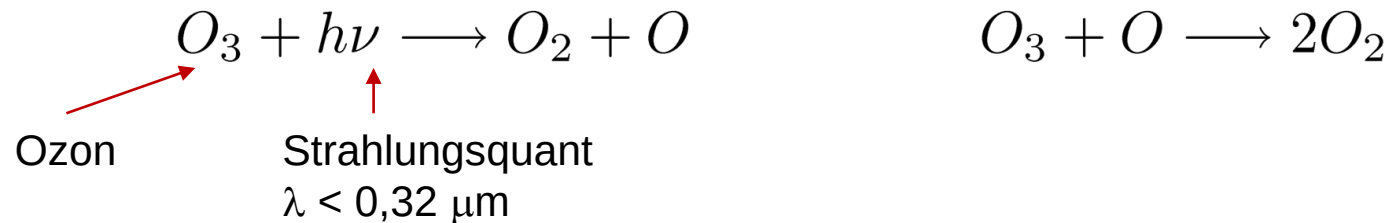
Ozon O₃ Stratosphäre

- **Ozonentstehung** oberhalb 20 km durch Photodissoziation + Rekombination



– Bildungsrate: ca. $5 \times 10^{31} \text{ Mol s}^{-1}$ bzw. $1,25 \times 10^{11} \text{ t a}^{-1}$

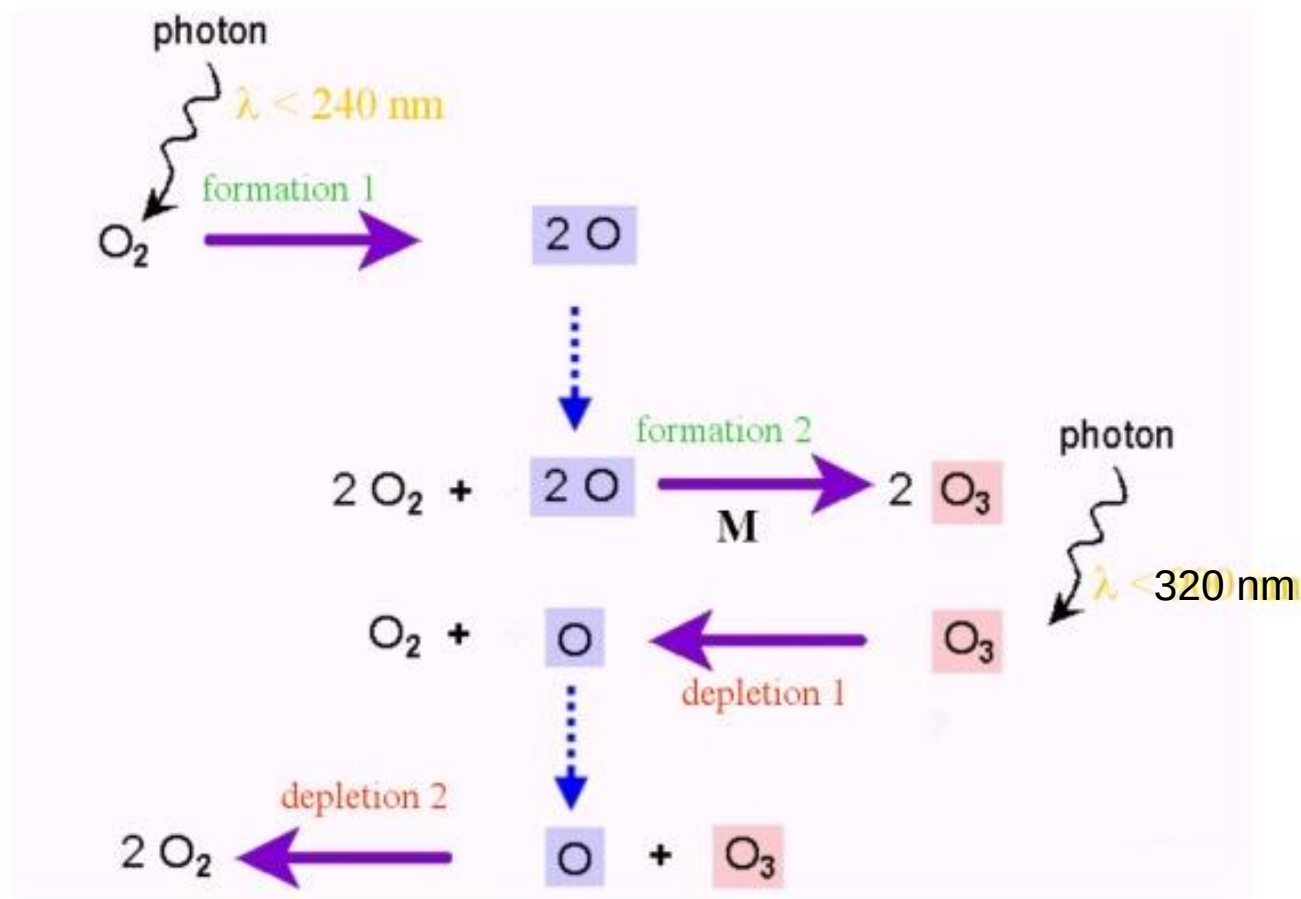
- **Zerfall von Ozon (natürlich):** Photodissoziation bzw. Rekombination



4.1.2 Stratosphäre

Ozon O₃ Stratosphäre

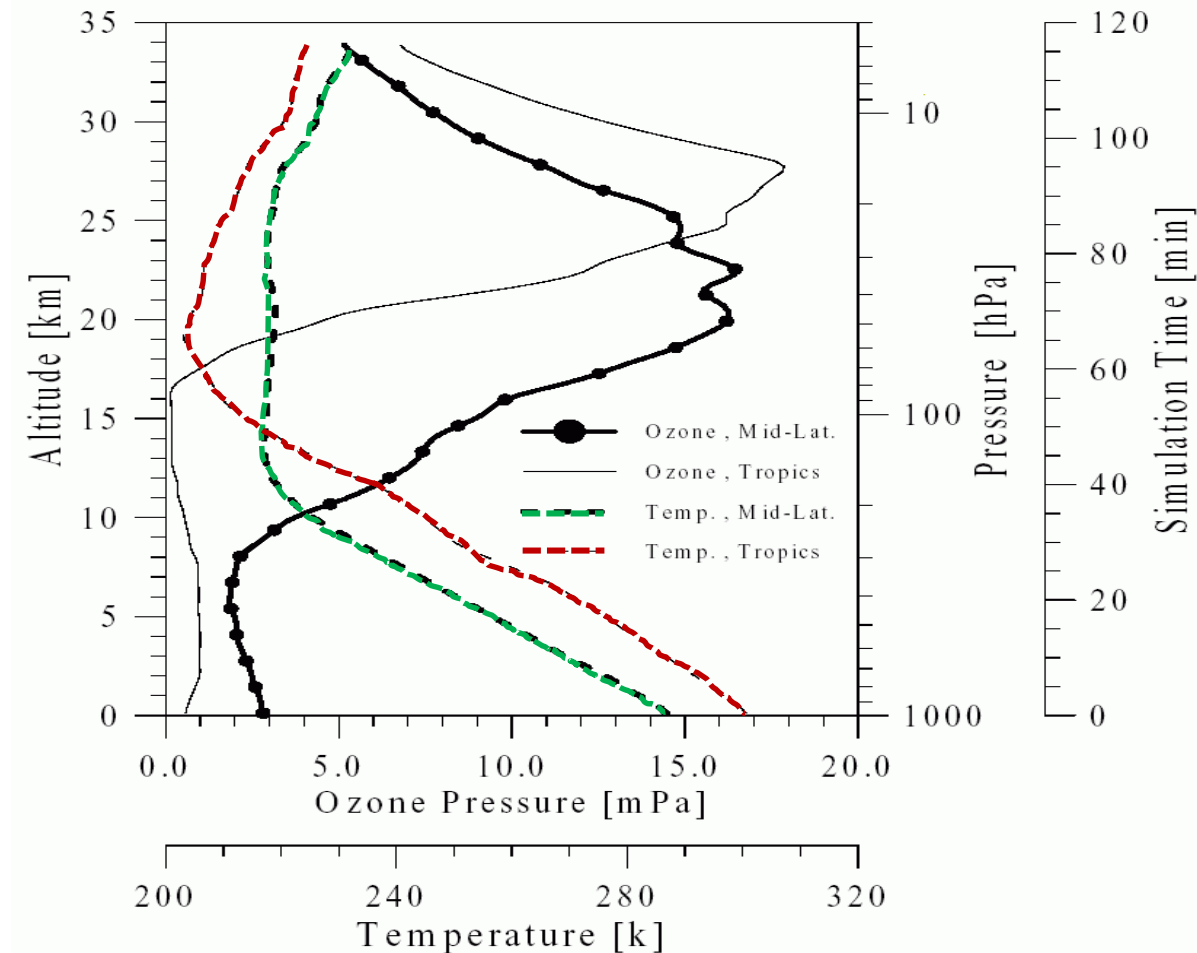
- Photochemisches Gleichgewicht durch Zerfall und Neubildung: [Chapman Zyklus \(1930\)](#)



4.1.2 Stratosphäre

Ozon O₃ Stratosphäre

- Maximum Ozonkonzentration 20-30 km; abhängig von Einstrahlung

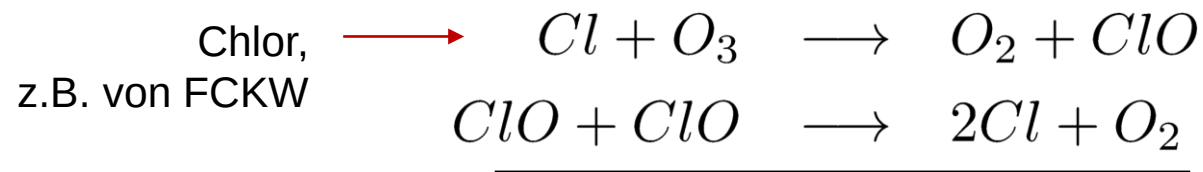


(FZ Jülich, 2005)

4.1.2 Stratosphäre

Ozon O₃ Stratosphäre

- Ozon**abbau** durch katalytische Reaktion mit Hilfe freier Radikale (ungesättigte Elektronenbindungen), z.B. OH, HO₂, NO, NO₂, Cl



Ergebnis: $O_3 + O \implies 2O_2$

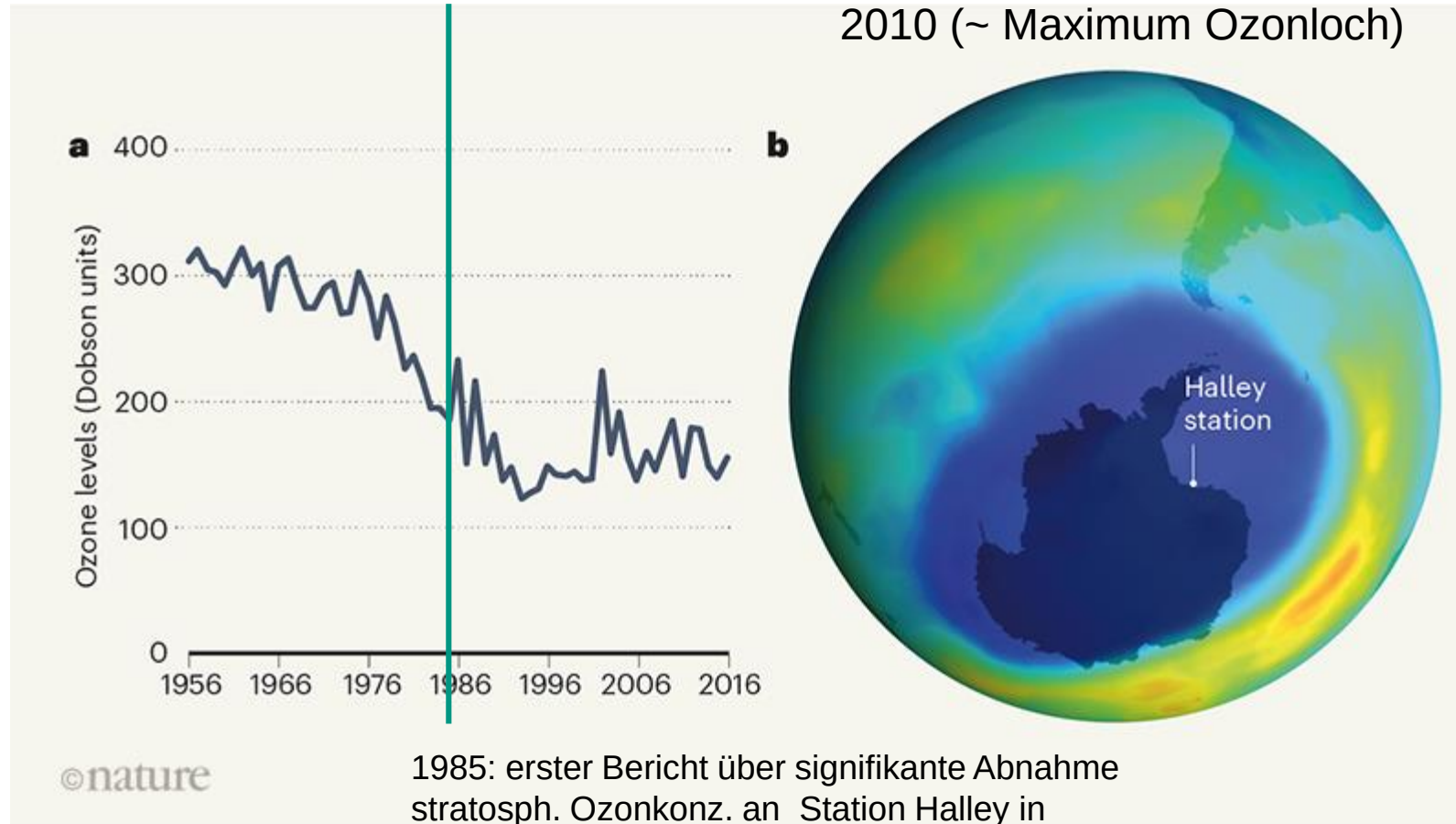
Reaktionspartner Cl bleibt erhalten

- Entfernung aus Stratosphäre (nach langer Zeit)



4.1.2 Stratosphäre

Ozon O₃: Ozonloch Südhalbkugel



1985: erster Bericht über signifikante Abnahme stratosph. Ozonkonz. an Station Halley in Antarktis (Farman et al., 1985, nature)

(Solomon, 2019, nature)

4.1.2 Stratosphäre

Ozon O₃: Ozonloch Südhalbkugel

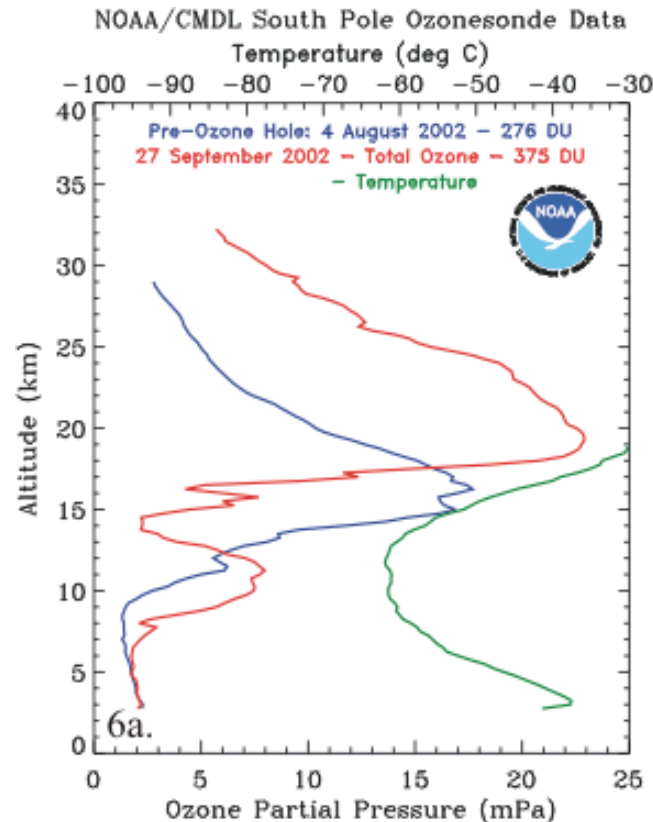
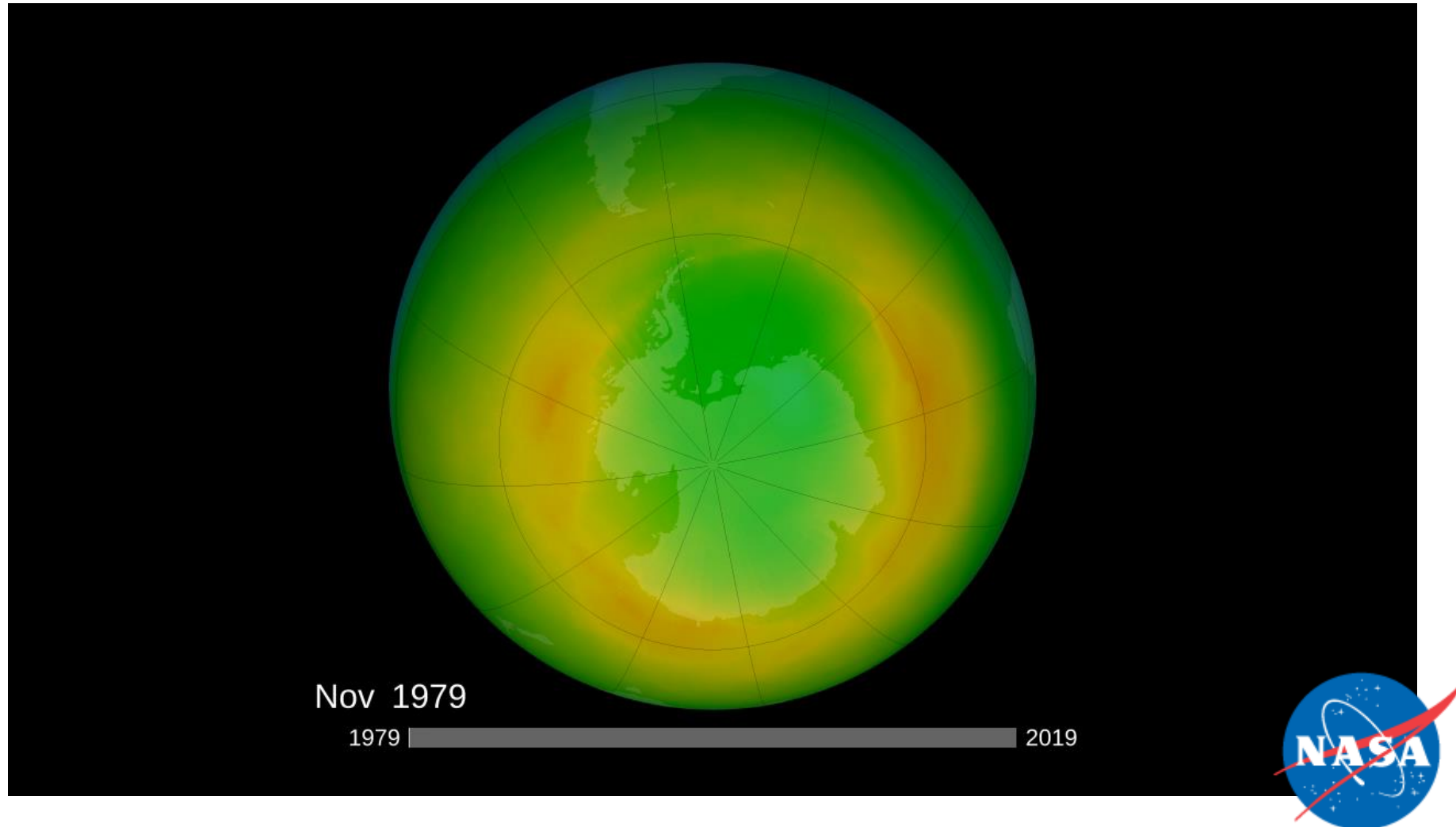


Figure 6a and 6b. Ozone soundings made at the South Pole on September 27, 2002 and October 21, 2002. The August 4, 2002 “pre-ozone hole” sounding shows no ozone depletion. The September 27, 2002 sounding shows partial ozone depletion between 14-18 km with high ozone amounts aloft. This sounding was taken when the “ozone hole” had been displaced off the pole towards the South American continent. The October 21, 2002 sounding is taken when the “ozone hole” had moved back over the south polar region.

(NOAA, 2002)

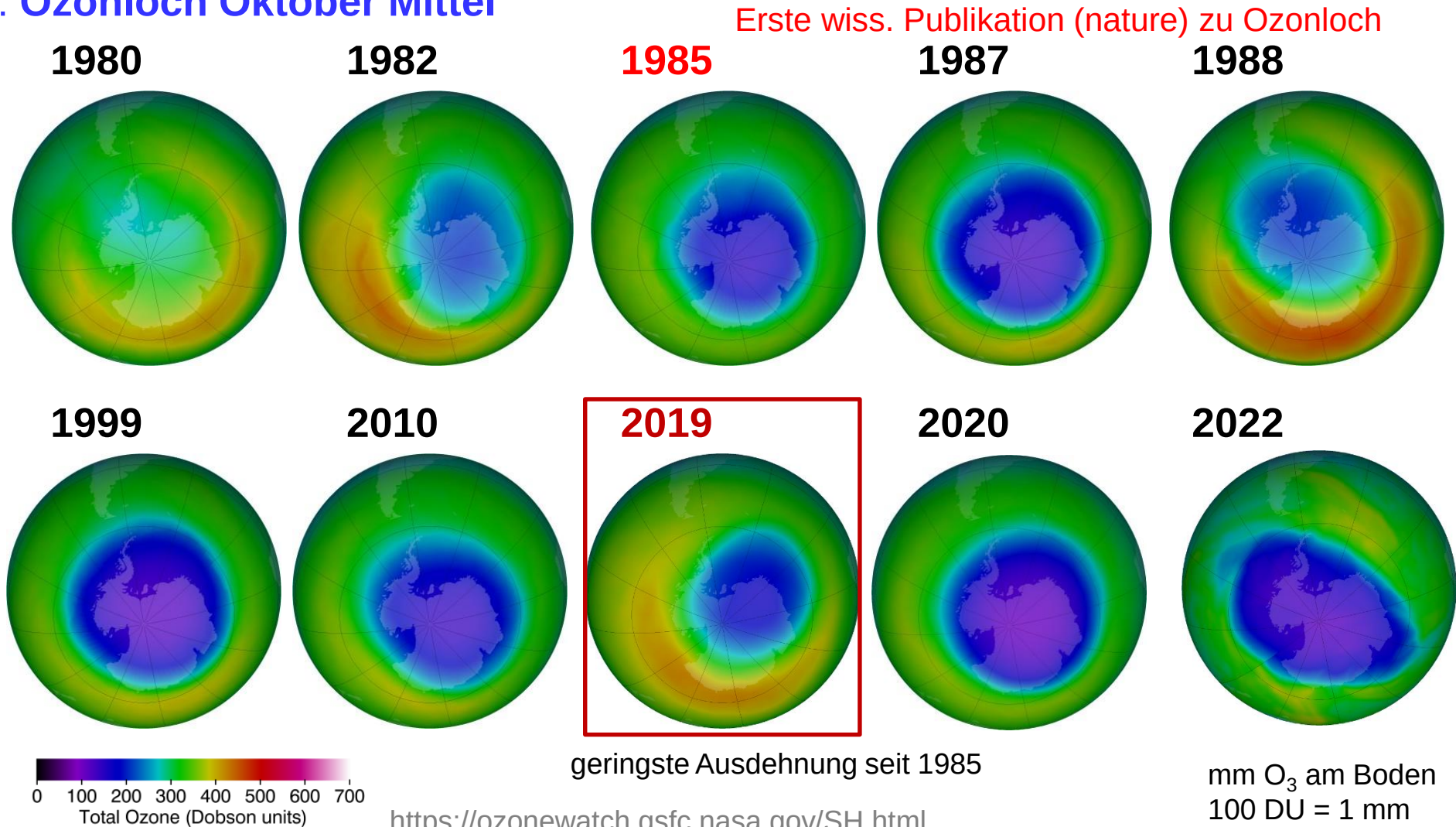
4.1.2 Stratosphäre

Ozon O_3 : Ozonloch Südhalbkugel



4.1.2 Stratosphäre

Ozon O₃: Ozonloch Oktober Mittel

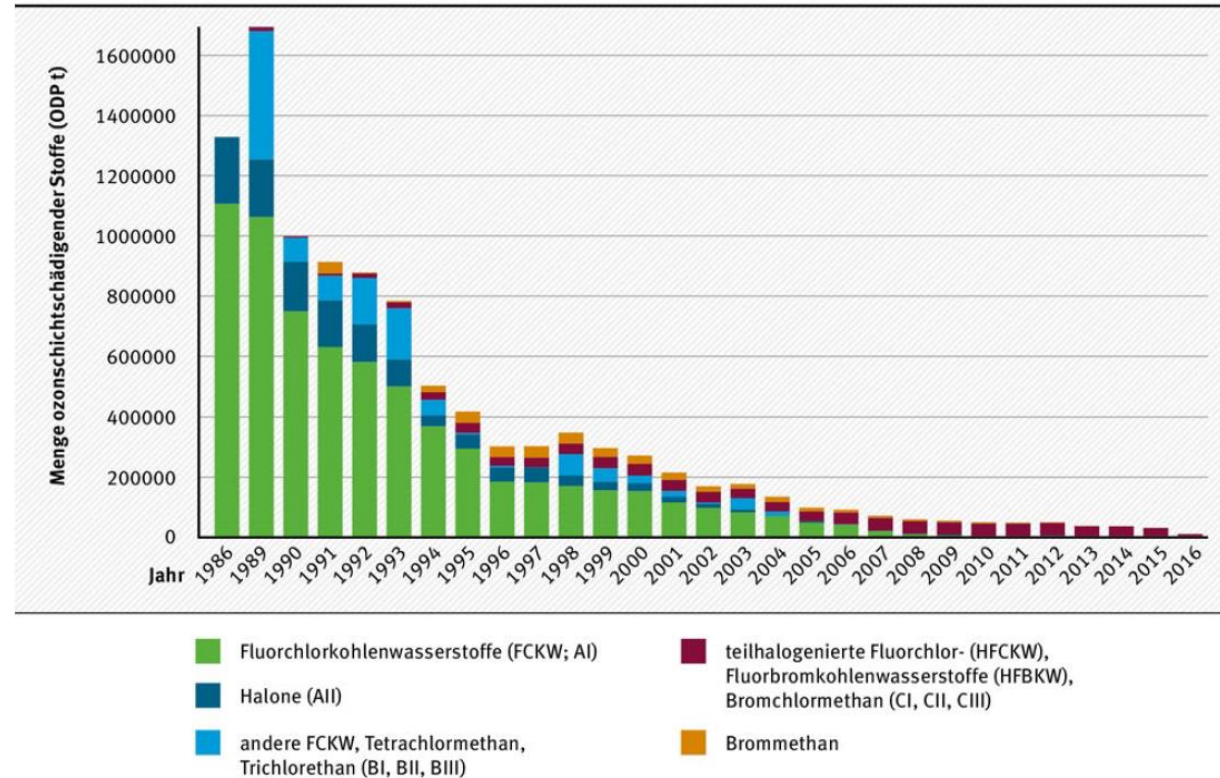


4.1.2 Stratosphäre



- Ozonschicht-zerstörende Gase: FCKW
- Lebensdauer CFC-11: ~45 Jahre; CFC-12: ~100 Jahre
- Aktivierung über PSC bei sehr tiefen Temperaturen

Weltweiter Verbrauch der im Montrealer Protokoll verankerten Ozonschicht schädigenden Stoffe in nach Ozonzerstörungspotenzial (ODP) gewichteten Tonnen in den Jahren 1986 bis 2016.



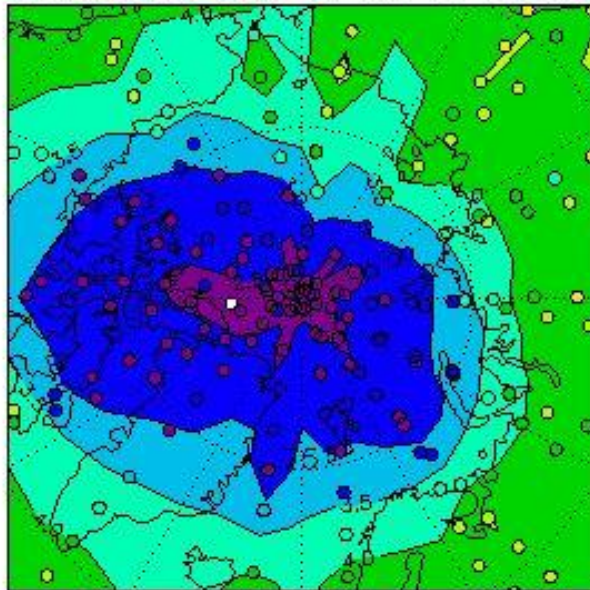
Quelle: UNEP [10]

4.1.2 Stratosphäre

Ozon O_3 : Ozonloch Nordhalbkugel

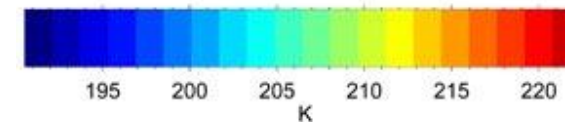
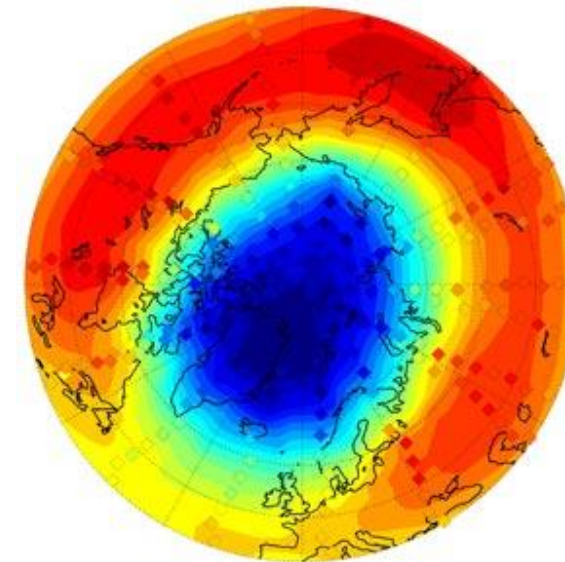
→ Temperaturen meist zu hoch, um PSC zu bilden / Chlor zu aktivieren; hier v.a. Beteiligung von Brom (Br)-Verbindungen

20110309_NRT NPole O3 30mb



Sehr stark reduzierter Ozongehalt in der Stratosphäre über der Arktis (violett und blaue Farben entsprechen sehr geringen Ozonkonzentrationen). (Quelle: Univ. of Oxford / KIT / IMK-ASF)
KIT-Pressinformation 040/2011

MIPAS Temp 20110306 50.00 hPa



Wir fassen zusammen...

- Niederschlag: Unterteilung in konvektiv und stratiform (w gering $\sim \text{cm/s}$)
- Aufbau Atmosphäre nach Temperaturverlauf; relevante Prozesse: Strahlungsflussdivergenzen; Hebung/Absinken, Transport- und Durchmischungsvorgänge, Kondensation und Verdunstung; chemische Reaktionen
- Troposphäre (bis 8 - 16 km); Wettersysteme; Unterteilung in Grenzschicht (laminare Unterschicht, Prandtlschicht, Eckmanschicht) u freie Atmosphäre
- Oberrand: Tropopause 8-17 km Höhe (abh. von Temperatur)
- Troposphäre: **Wettersysteme**; mittlere Temperaturabnahme $0,65 \text{ K/100 m}$; Aufbau (planetare Grenzschicht, ABL): laminare Unterschicht ($\sim 10 \text{ m}$), Prandtl-Schicht (Windzunahme; $\sim 100 \text{ m}$), Ekman-Schicht (Winddrehung; 1-3 km hoch); darüber: freie Atmosphäre
- Stratosphäre: Ozonchemie; Einfluss auf Wettergeschehen insbes. bei SSW
 - Maximum Ozon in Stratosphäre, 20-30 km; bestimmt Temperaturprofil dort
 - Photochemisches Gleichgewicht: Chapman-Zyklus
 - Ozonabbau (ungebremst) durch Radikale: OH, Cl
 - Dicke Ozonschicht $\sim 3 \text{ mm}$ unter Normalbedingungen