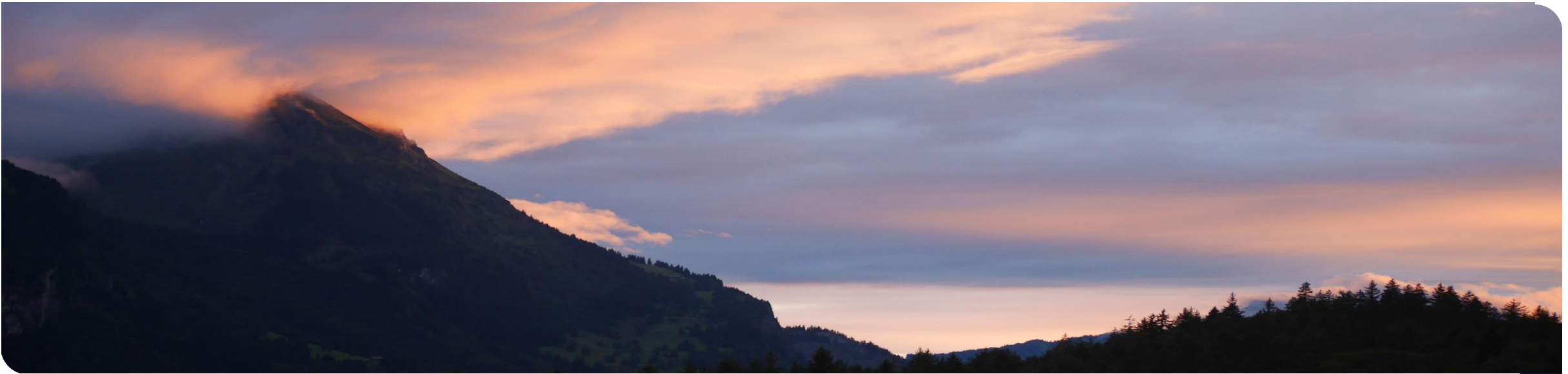
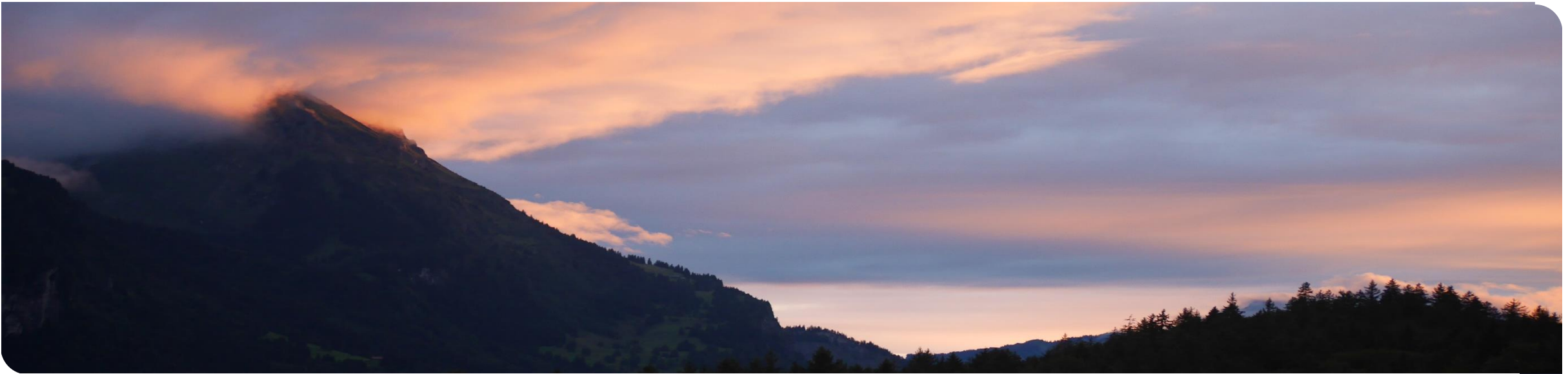


Vorlesung „Allgemeine Meteorologie“

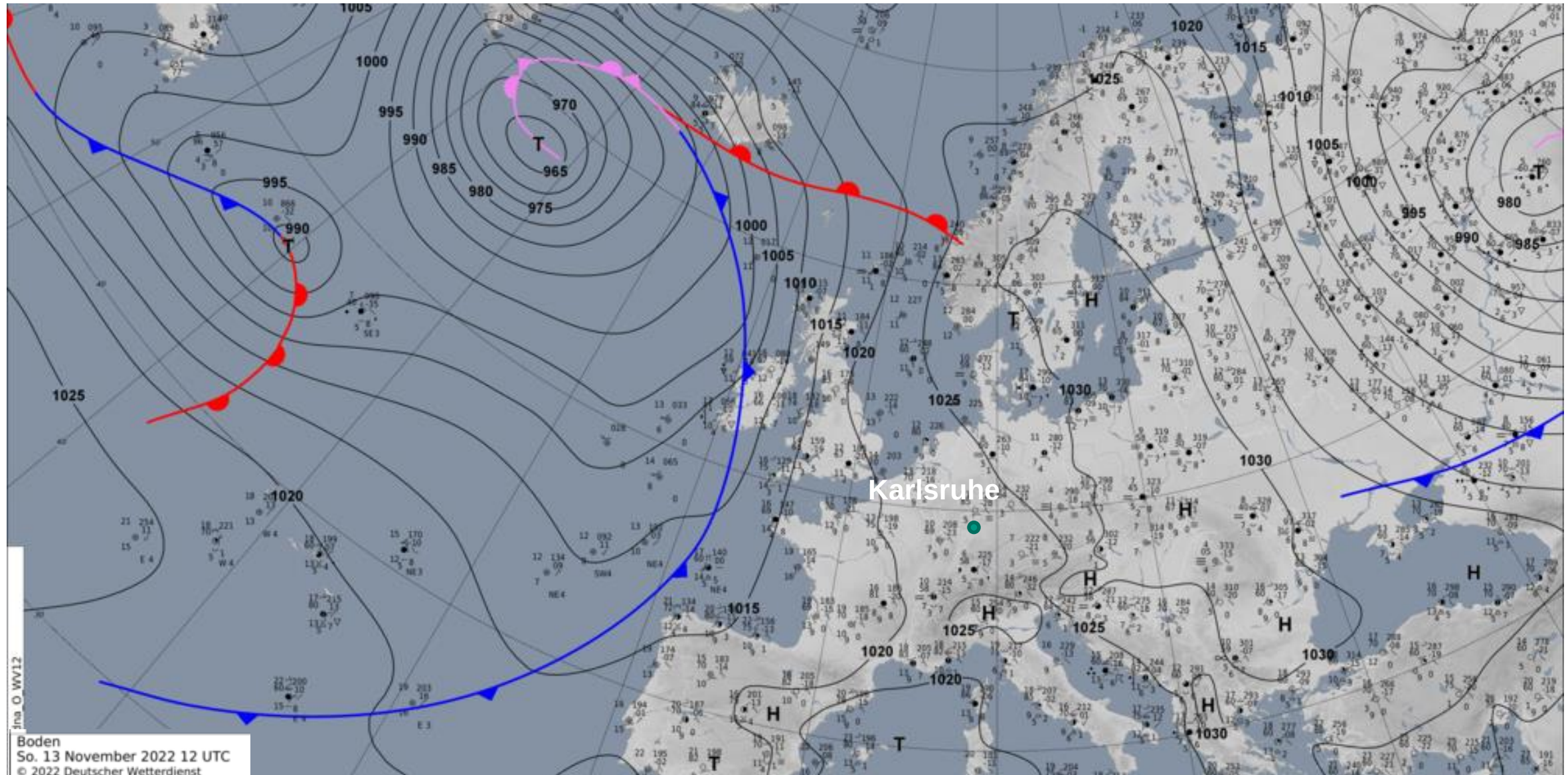
Prof. Michael Kunz



Das Wetter...

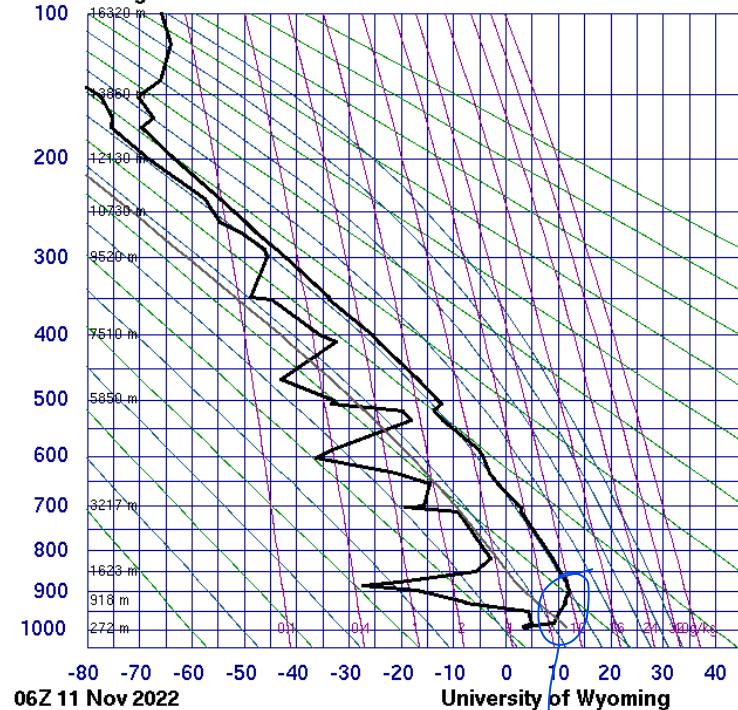


Bodenwetterkarte



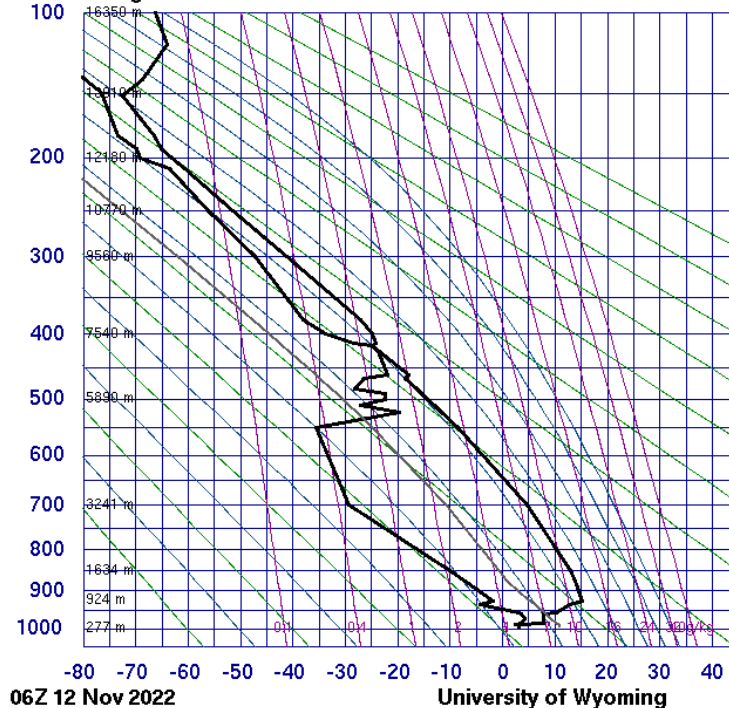
Sounding Stuttgart

10739 Stuttgart



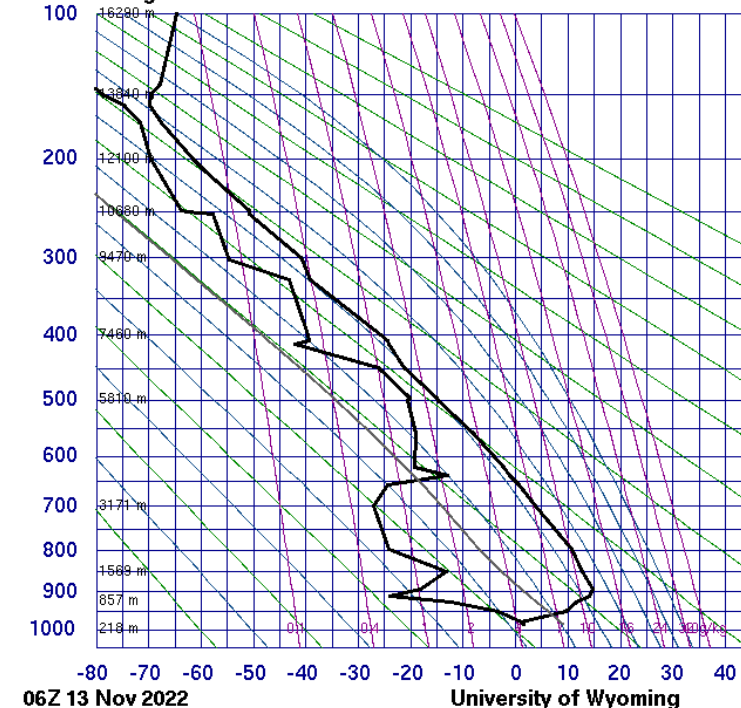
SLAT 48.83
SLON 9.20
SELV 321.0
SHOW 12.11
LIFT 16.26
LFTV 16.24
SWET 21.37
KINX -0.70

10739 Stuttgart



SLAT 48.83
SLON 9.20
SELV 321.0
SHOW 10.31
LIFT 16.20
LFTV 16.31
SWET 54.39
KINX -16.7

10739 Stuttgart



SLAT 48.83
SLON 9.20
SELV 321.0
SHOW 11.00
LIFT 19.60
LFTV 19.77
SWET 79.64
KINX -16.7
CTOT 1.50
VTOT 27.50
TOTL 29.00
CAPE 0.00
CAPV 0.00
CINS 0.00
CINV 0.00
EQLV -9999
EGTV -9999
LFCT -9999
LFCV -9999
BRCH 0.00
BRCV 0.00
LCLT 267.9
LCLP 822.0
LCLE 292.5
MLTH 283.4
MLMR 3.28
THCK 5592.
PWAT 8.07

Sounding Stuttgart



Satellit color

Sa. 12.11.2022, 09:00 Uhr MEZ

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

Baden-Württemberg

Nebel Rheintal



Satellit color

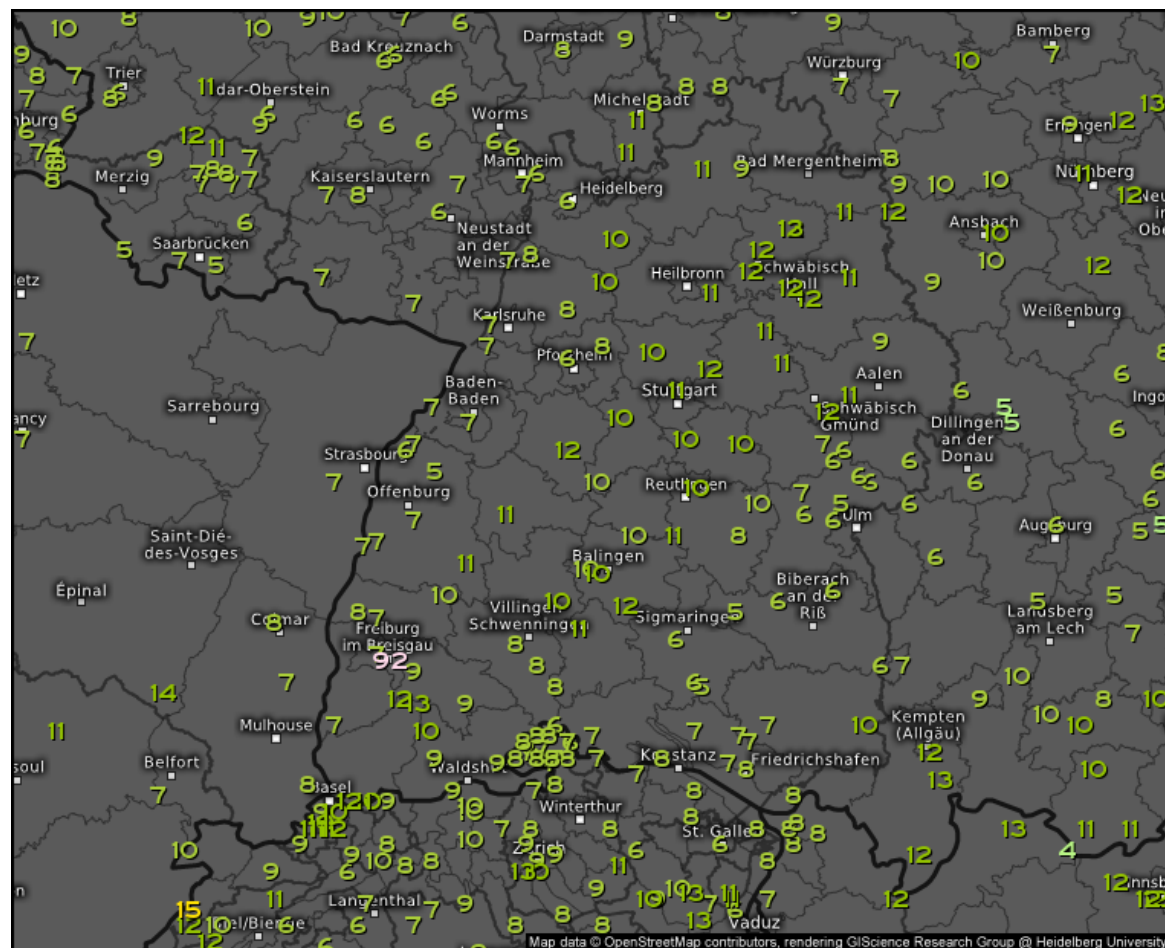
So. 13.11.2022, 09:00 Uhr MEZ

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

Baden-Württemberg

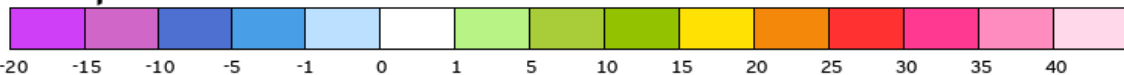


Sounding Stuttgart

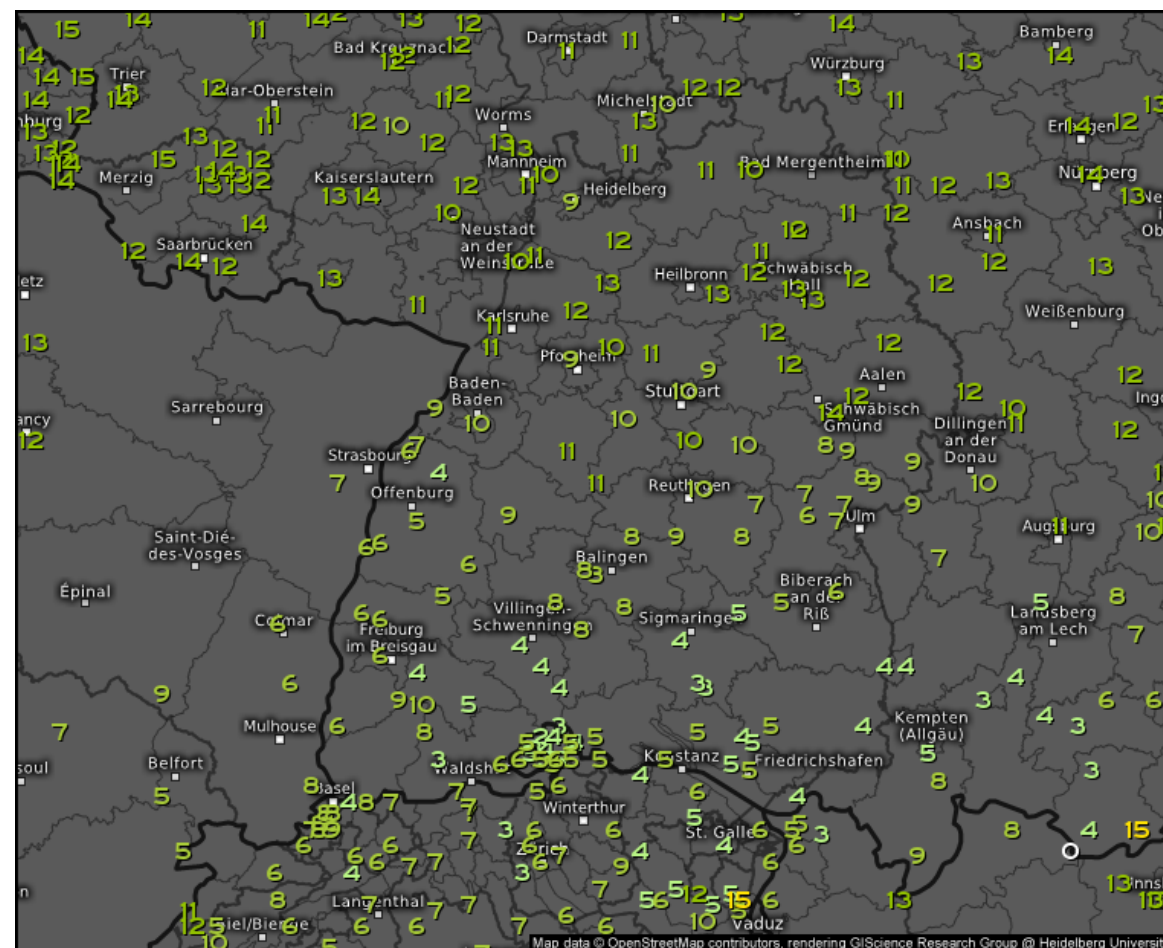


Temperatur 2m (°C)

Sa. 12.11.2022, 15:00 Uhr MEZ

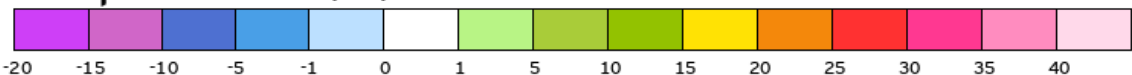


Baden-Württemberg, 325 Stationen im Kartenausschnitt



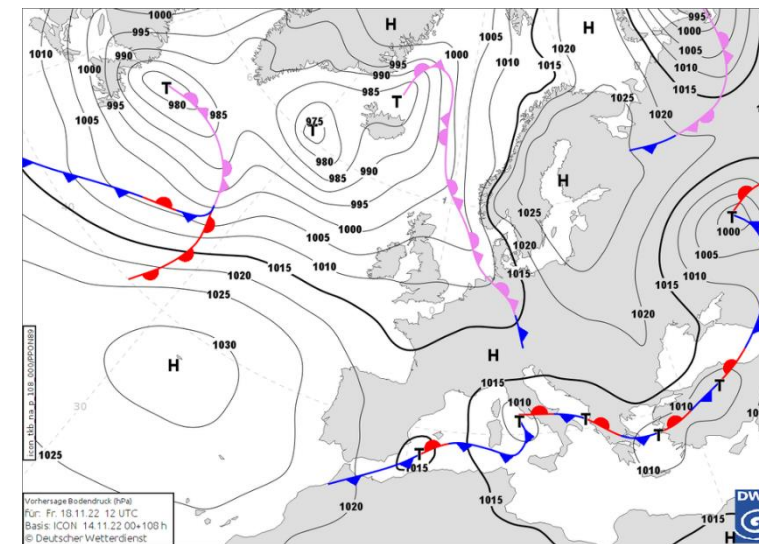
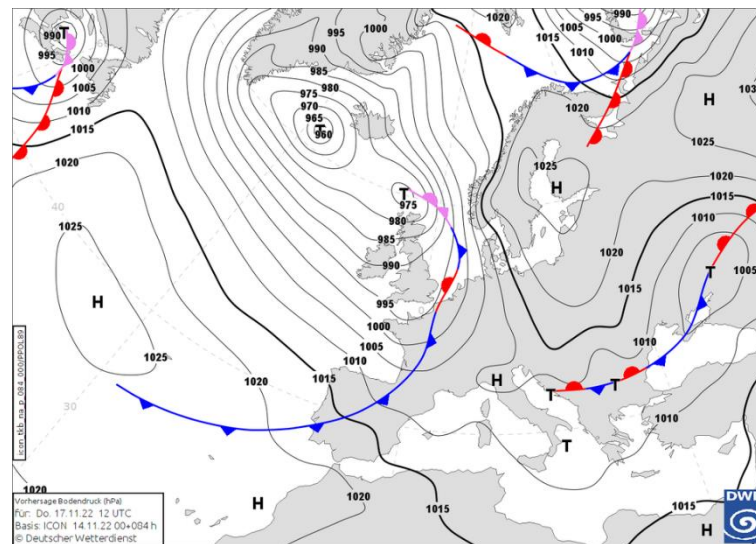
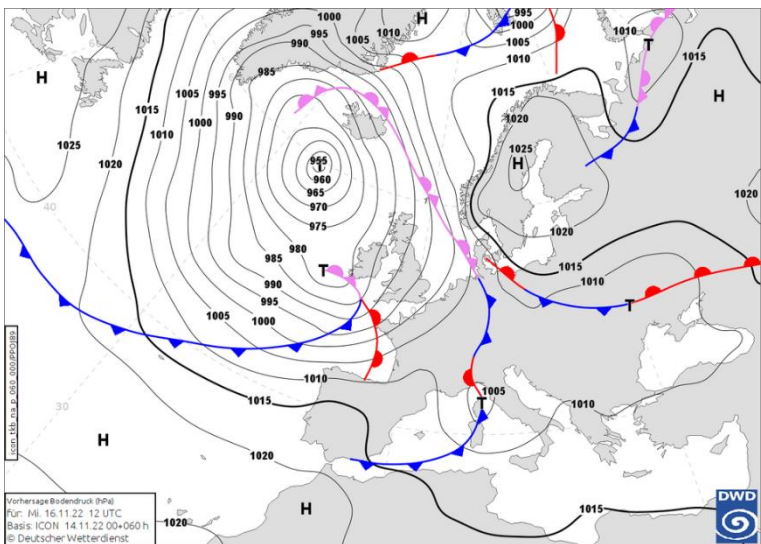
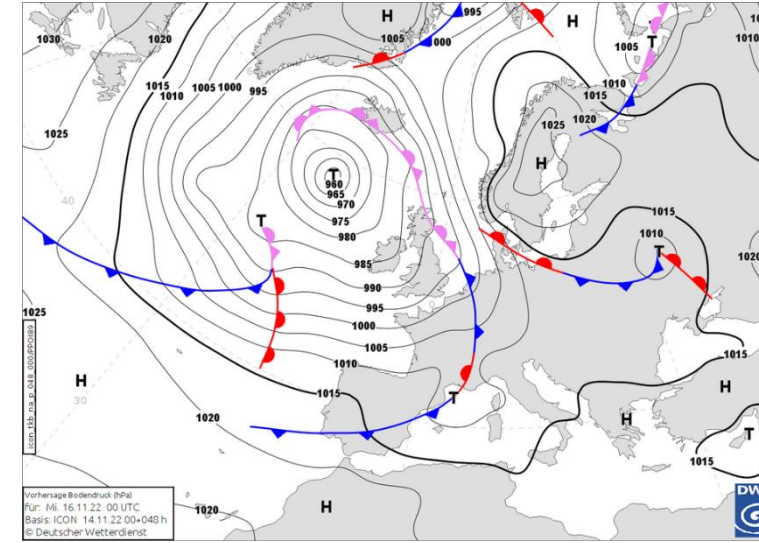
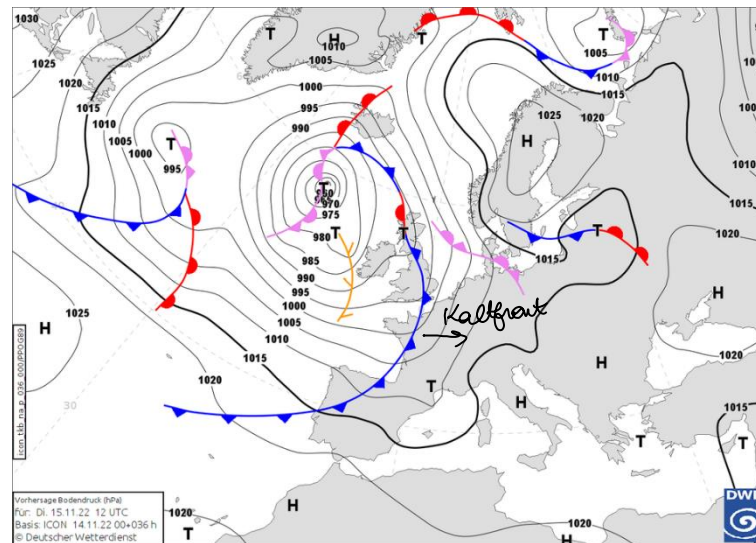
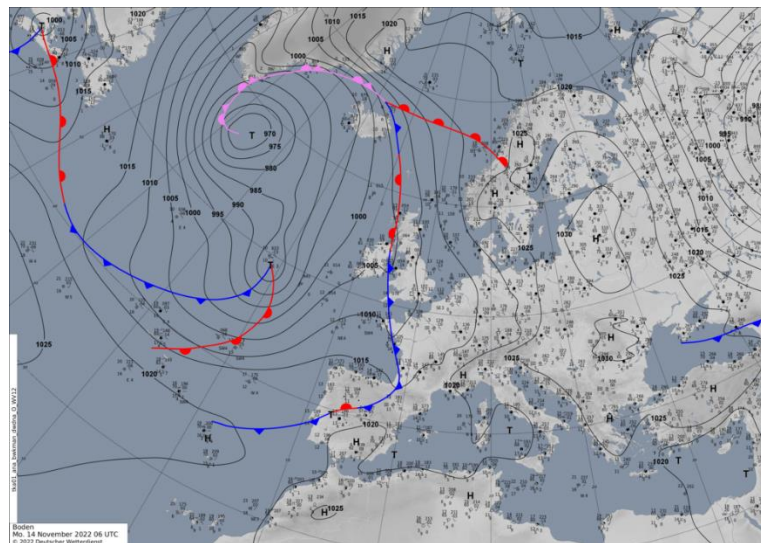
Temperatur 2m (°C)

So. 13.11.2022, 15:00 Uhr MEZ



Baden-Württemberg, 317 Stationen im Kartenausschnitt

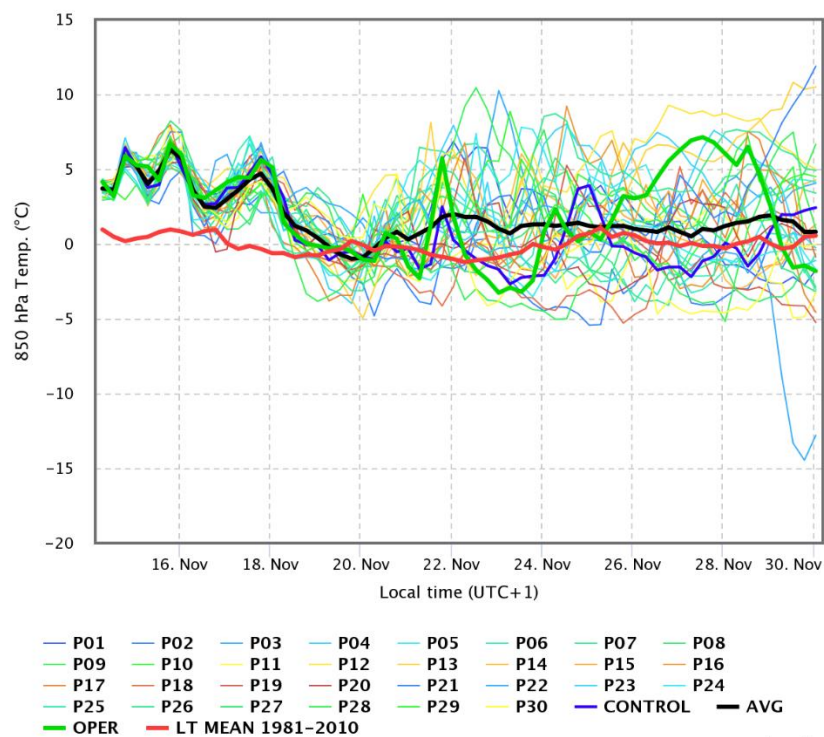
Bodenwetterkarte



Vorhersage: Ensembles

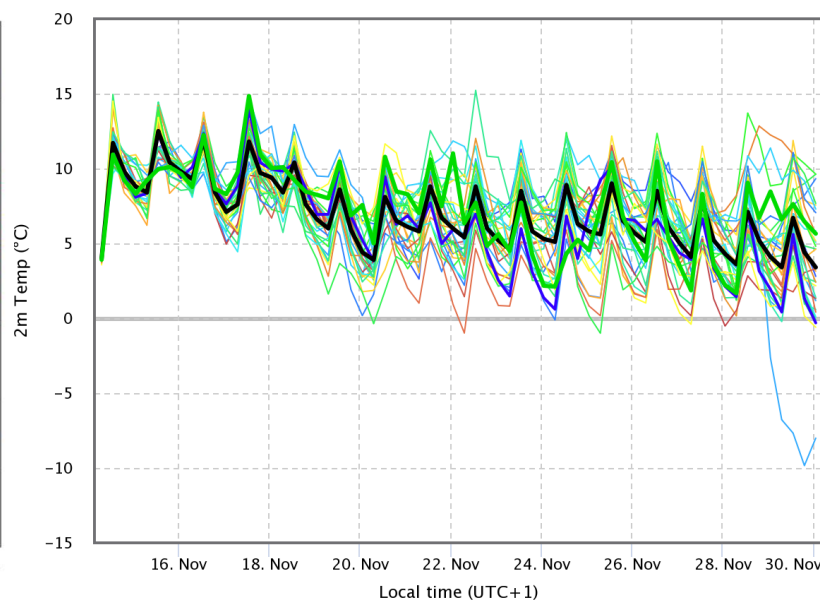
- Modell GFS (Global Forecast System) des amerik. Wetterdienstes NOAA
- 30 Ensemble Läufe
- Gitterpunkt Karlsruhe

T_{850 hPa} → Feldberg



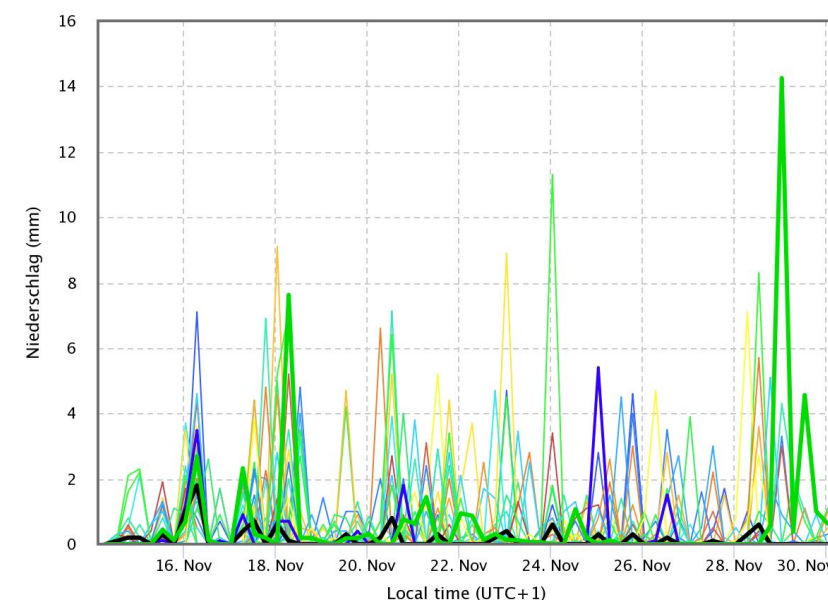
wetterzentrale.de

T_{2m}



wetterzentrale.de

Niederschlag

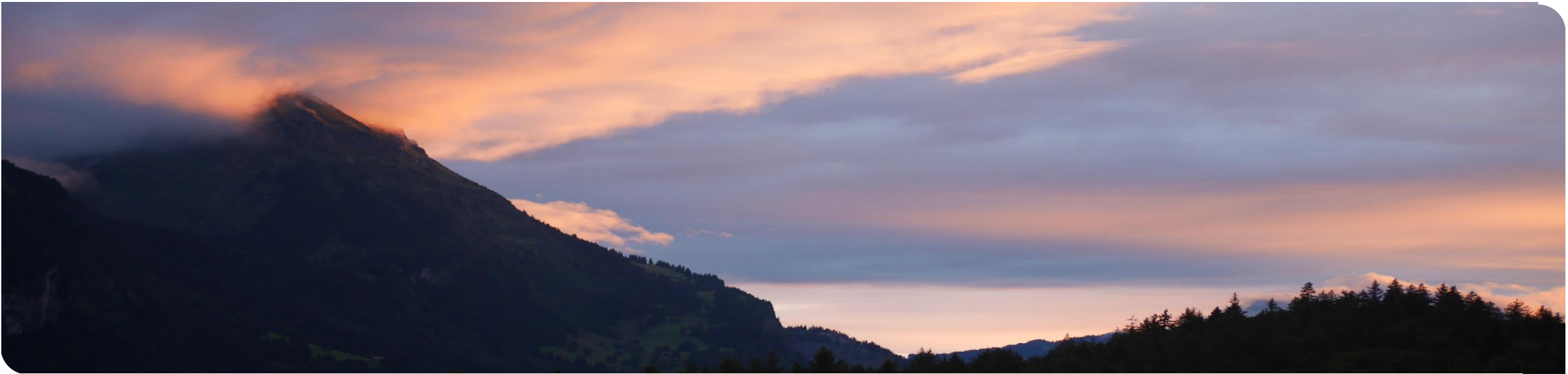


wetterzentrale.de

Vorlesung „Allgemeine Meteorologie“

Prof. Michael Kunz

Kapitel 4: Vertikaler Aufbau der Atmosphäre



Letzte Vorlesung...

Grenzschicht: „schmutzig“

- **Niederschlag:** Unterteilung in konvektiv und stratiform (Unterschiede: Hebungsgeschwindigkeit, Intensitäten, zeitl./räuml. Variabilität)

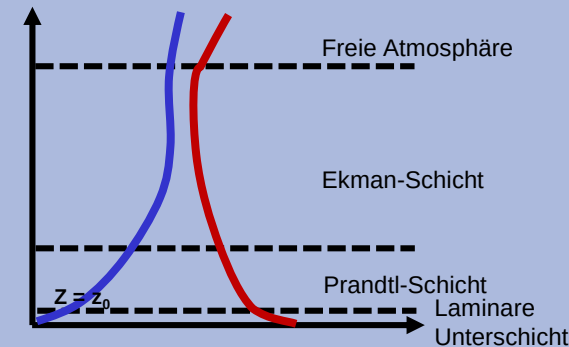
- **Aufbau Atmosphäre** nach Temperatur; Prozesse:

- Strahlungsflussdivergenzen; Transport- und Vermischungsvorgänge; Kondensation/Verdunstung; chem. Reaktionen

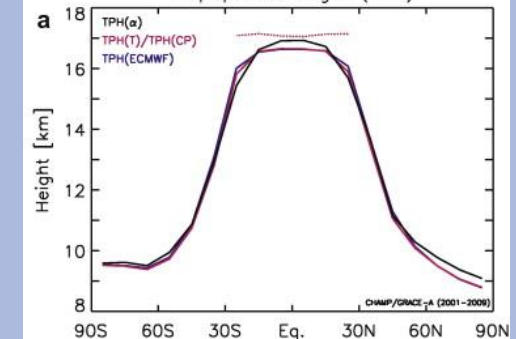
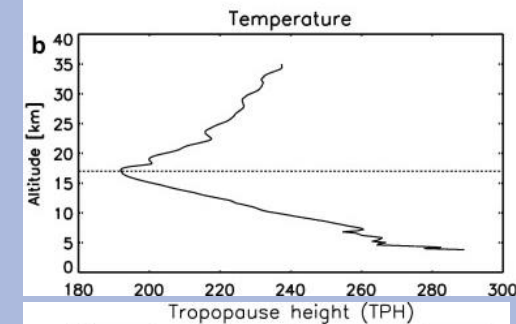
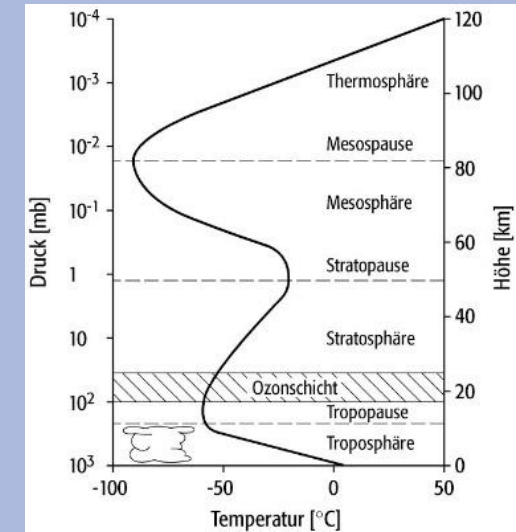
- **Troposphäre: Wettersysteme**

- **mittlere** Temperaturabnahme $-0,65 \text{ K}/100 \text{ m}$;
- Planetare Grenzschicht (ABL): stärkster Tagesgang Temperatur
- laminare Unterschicht ($\sim 10 \text{ mm}$),
Prandtl-Schicht (Windzunahme; $\sim 100 \text{ m}$),
Ekman-Schicht (Winddrehung; $1\text{-}3 \text{ km}$ hoch);
darüber: freie Atmosphäre *strömung || Isobaren (unter Reibung Erde)*
- Höhe Troposphäre: $8\text{-}16 \text{ km}$; Höhe abhängig von Temperatur (geogr. Breite)

Nacht / Tag



- **Stratosphäre:** Einfluss auf Wettergeschehen insbes. bei Sudden Stratospheric Warming / Aufspaltung des Polarwirbels (NH) → Kaltlufteinbruch



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

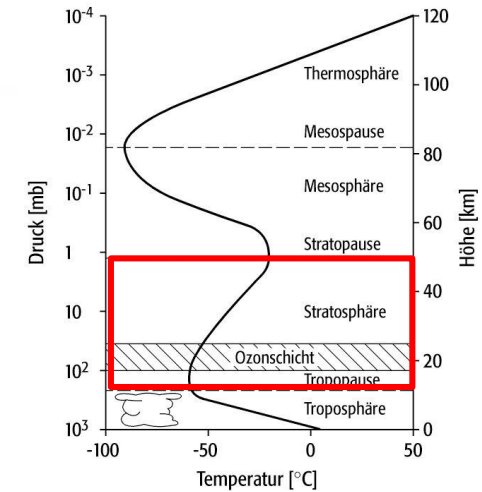
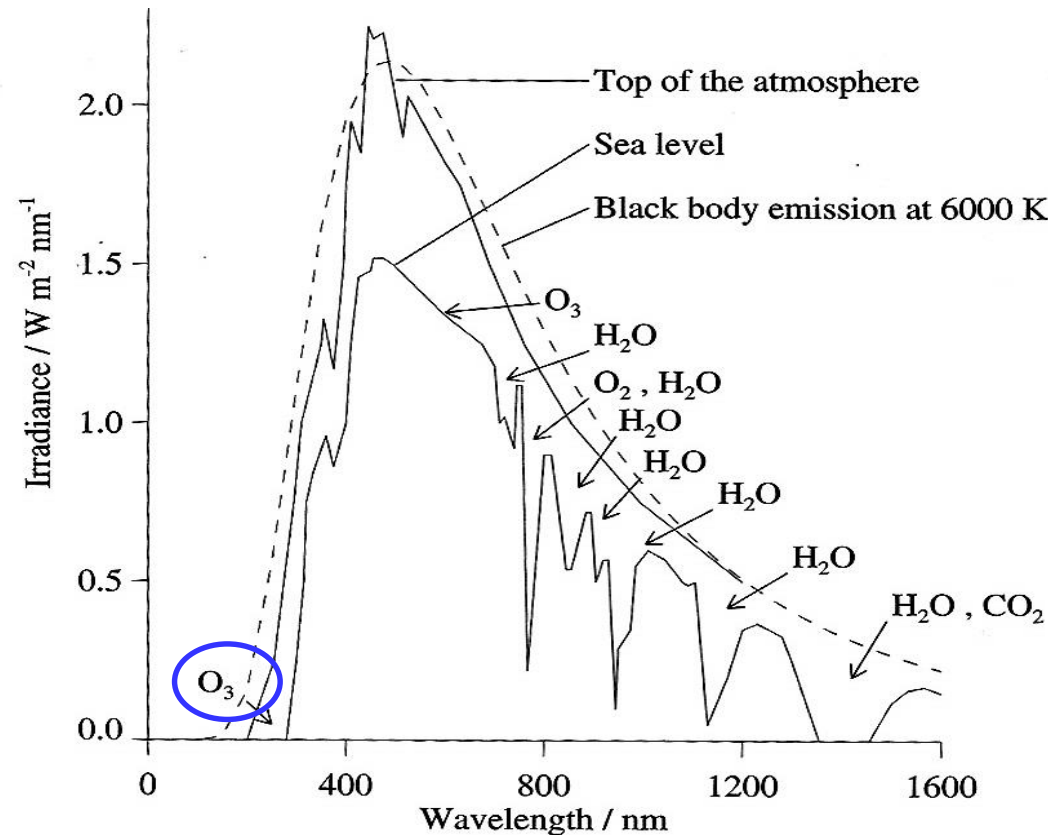
Fragen über Fragen...

- Was sind die beiden wesentlichen Effekte von **Ozon** in der Stratosphäre? *UVC, UVB-Strahlung absorbiert · durch Ozonchemie Erwärmung (Tropopause?)*
- Wodurch ist das **Ozonloch** entstanden? *CFC 11, CFC 12*
- In welcher **Hemisphäre** ist das Ozonloch am stärksten? Wo? Wieso? *in Südhemisphäre am stärksten, v.a. über Südpol (zwischen Australien)
Antarktis deutlich kälter als Arktis, stärkerer persistenter Wirbel → spez. Wolken gebildet*

4.1.2 Stratosphäre

Ozon O₃ Stratosphäre

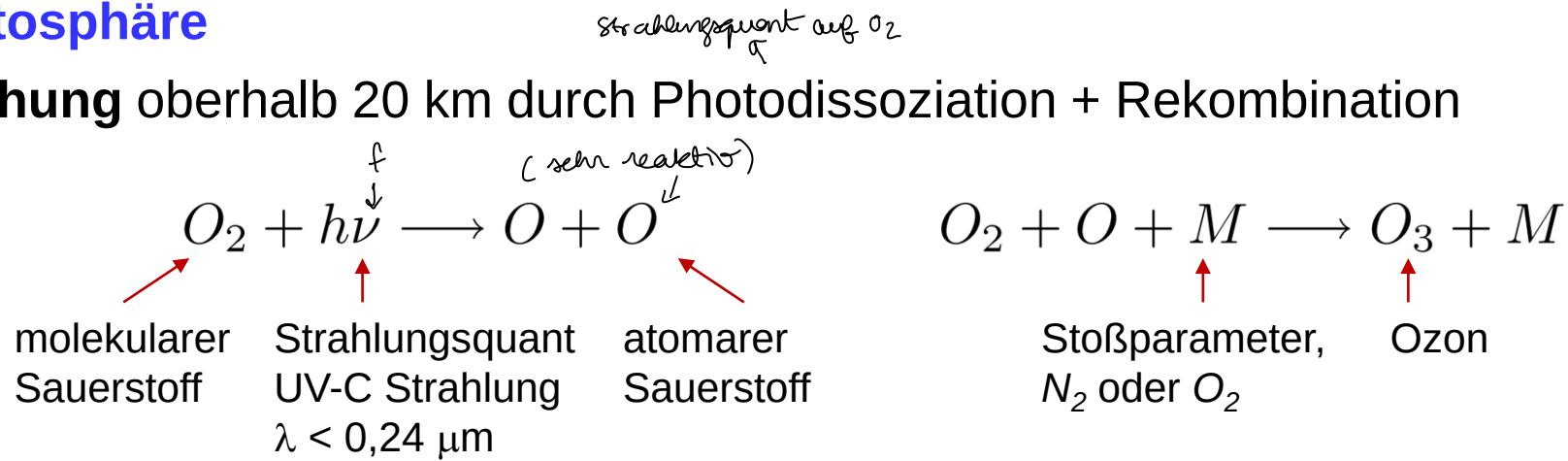
- Absorption energiereicher **UV-Strahlung**
- Entwicklungsgeschichtlich: erste Photosynthese durch Algen im Meer, Entstehung Sauerstoff bis Aufbau Ozonschicht (davor Leben auf Erde nicht mgl)



4.1.2 Stratosphäre

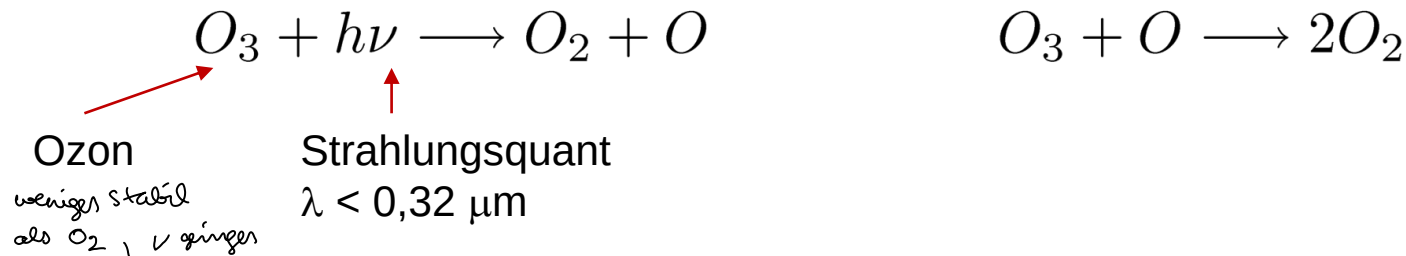
Ozon O₃ Stratosphäre

■ Ozonentstehung oberhalb 20 km durch Photodissoziation + Rekombination



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

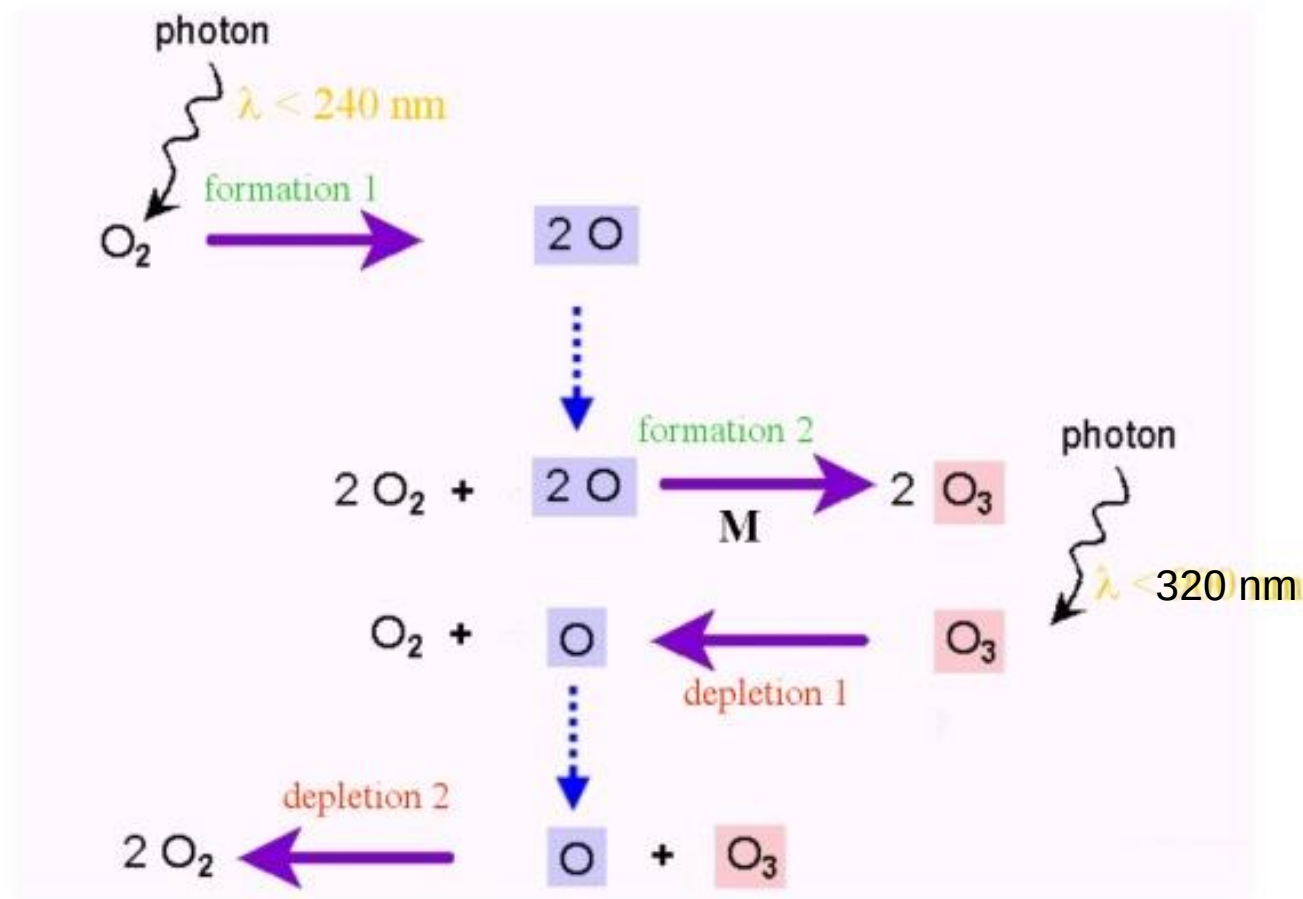
■ Zerfall von Ozon (natürlich): Photodissoziation bzw. Rekombination



4.1.2 Stratosphäre

Ozon O₃ Stratosphäre

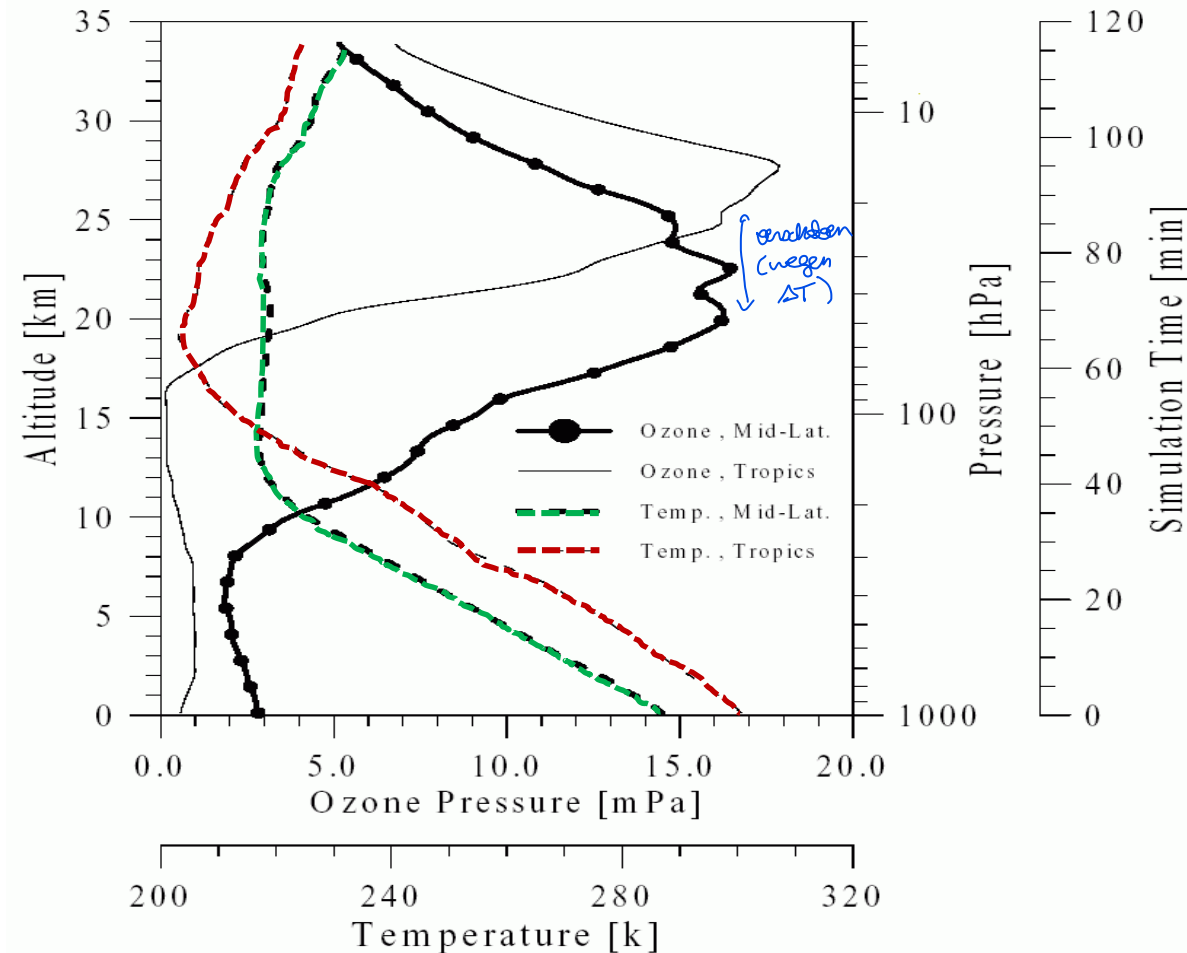
- Photochemisches Gleichgewicht durch Zerfall und Neubildung: [Chapman Zyklus \(1930\)](#)



4.1.2 Stratosphäre

Ozon O₃ Stratosphäre

- Maximum Ozonkonzentration 20-30 km; abhängig von Einstrahlung



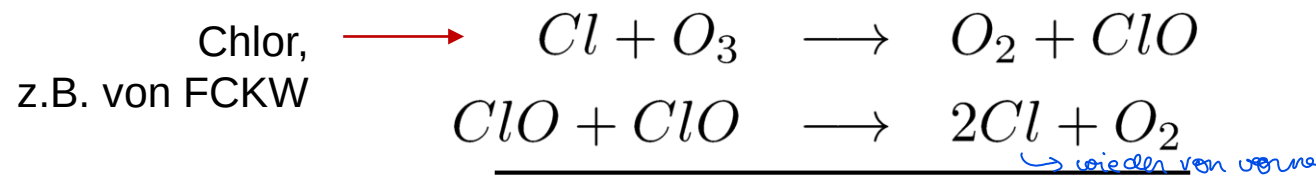
gekoppelt mit Vertikalprofil T
(oben mehr UV-Absorp.)

(FZ Jülich, 2005)

4.1.2 Stratosphäre

Ozon O₃ Stratosphäre

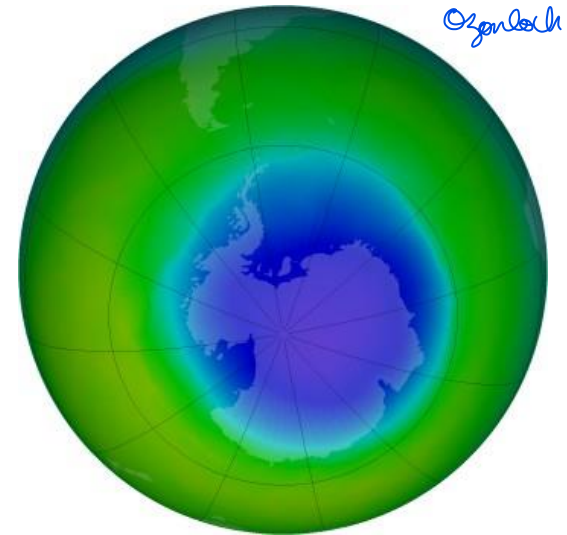
- Ozonabbau durch **katalytische** Reaktion mit Hilfe freier Radikale (ungesättigte Elektronenbindungen), z.B. OH, HO₂, NO, NO₂, Cl



Ergebnis: $O_3 + O \implies 2O_2$

Reaktionspartner Cl bleibt erhalten

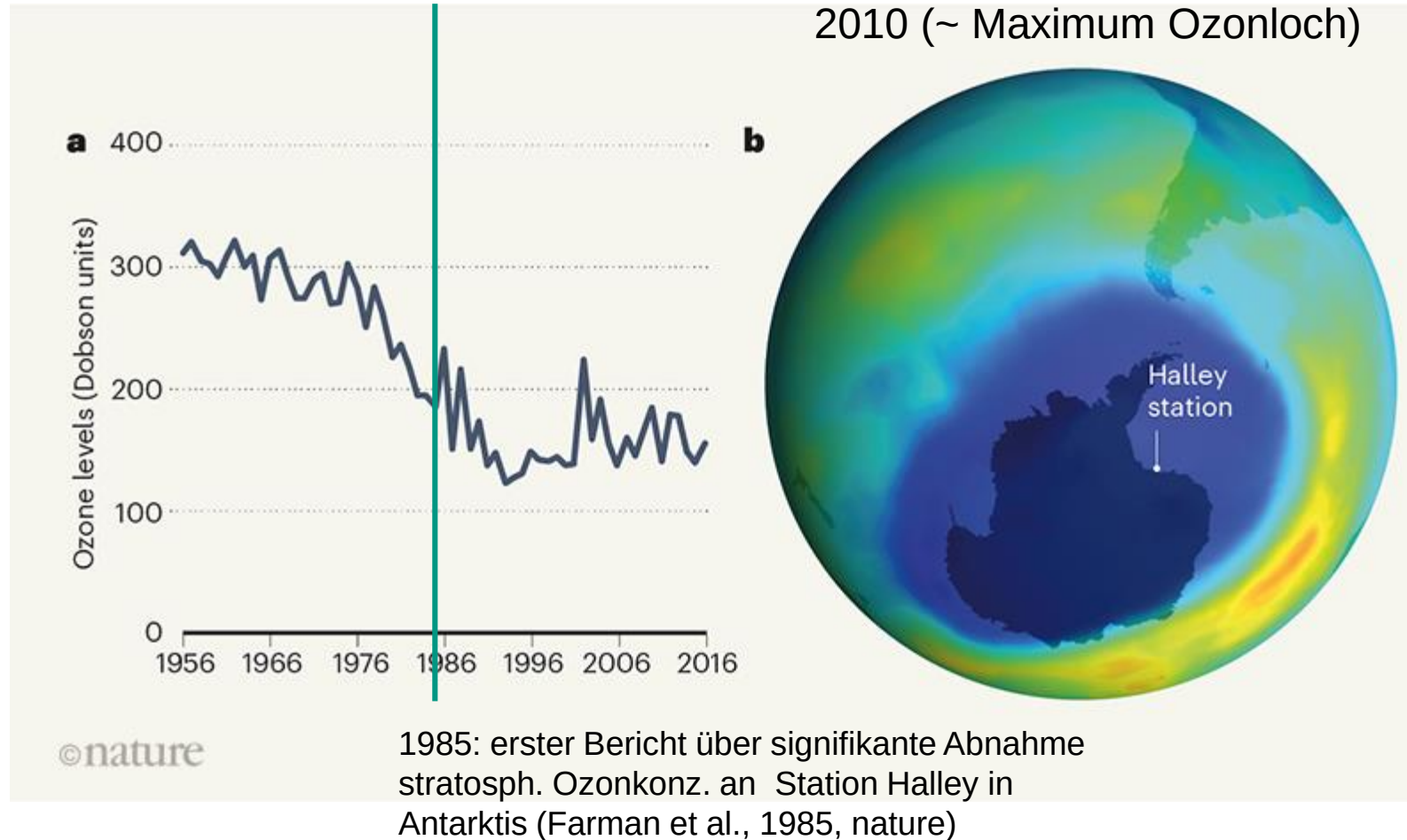
- Entfernung aus Stratosphäre (nach langer Zeit)



4.1.2 Stratosphäre

Ozon O_3 : Ozonloch Südhalbkugel

CKW langsamen Abbau



(Solomon, 2019, nature)

4.1.2 Stratosphäre

Ozon O₃: Ozonloch Südhalbkugel

1 Monat
↘

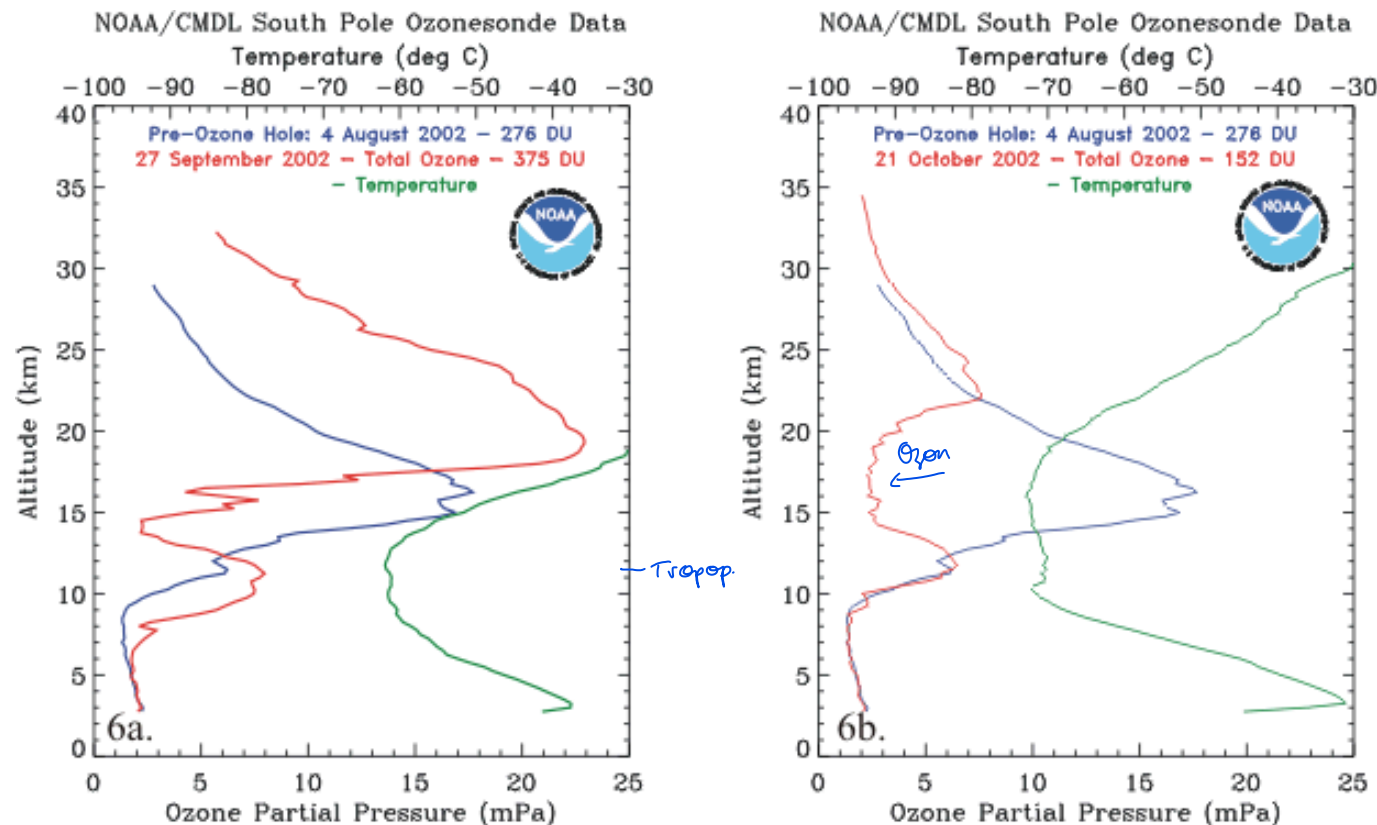
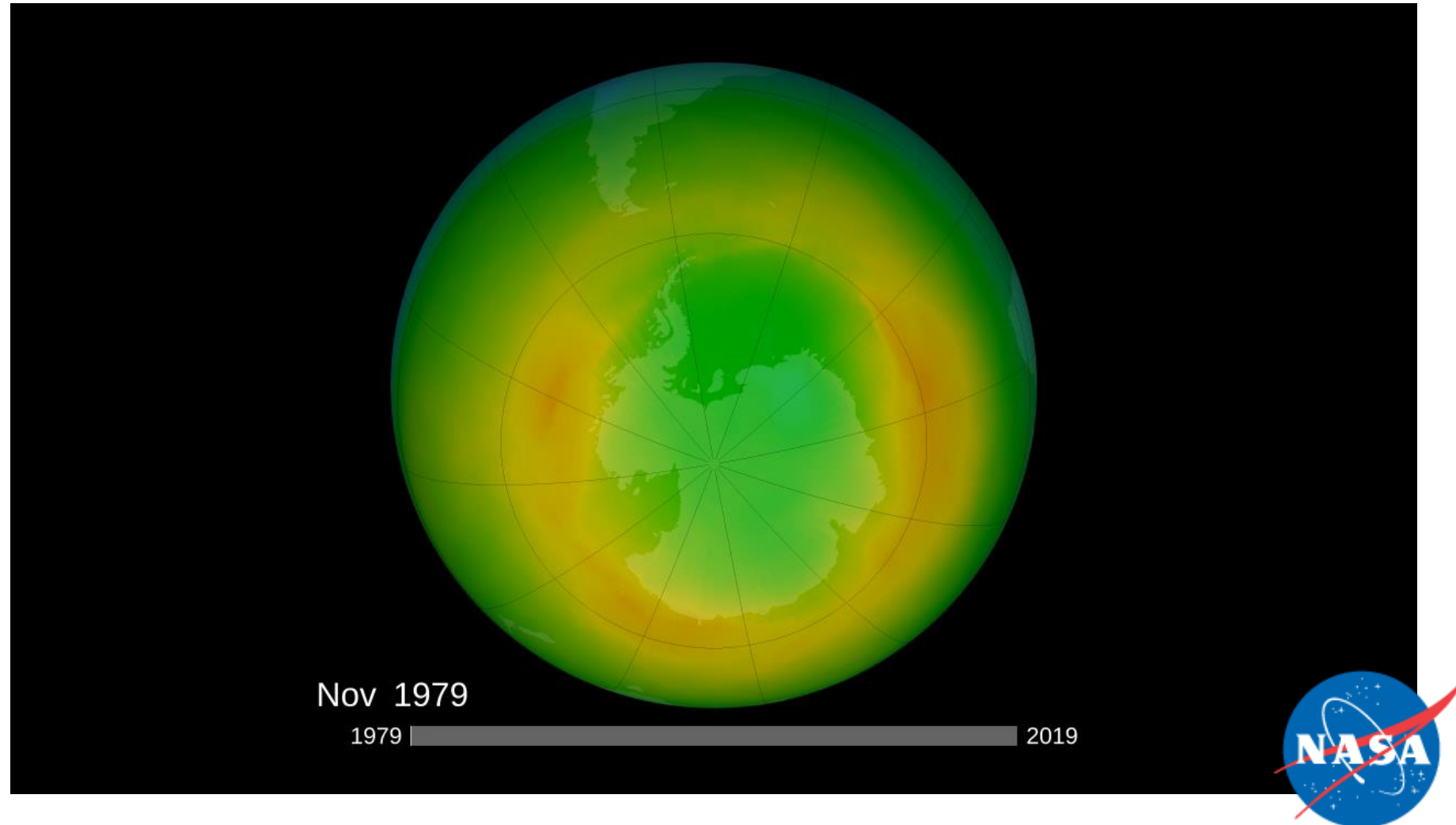


Figure 6a and 6b. Ozone soundings made at the South Pole on September 27, 2002 and October 21, 2002. The August 4, 2002 “pre-ozone hole” sounding shows no ozone depletion. The September 27, 2002 sounding shows partial ozone depletion between 14-18 km with high ozone amounts aloft. This sounding was taken 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)

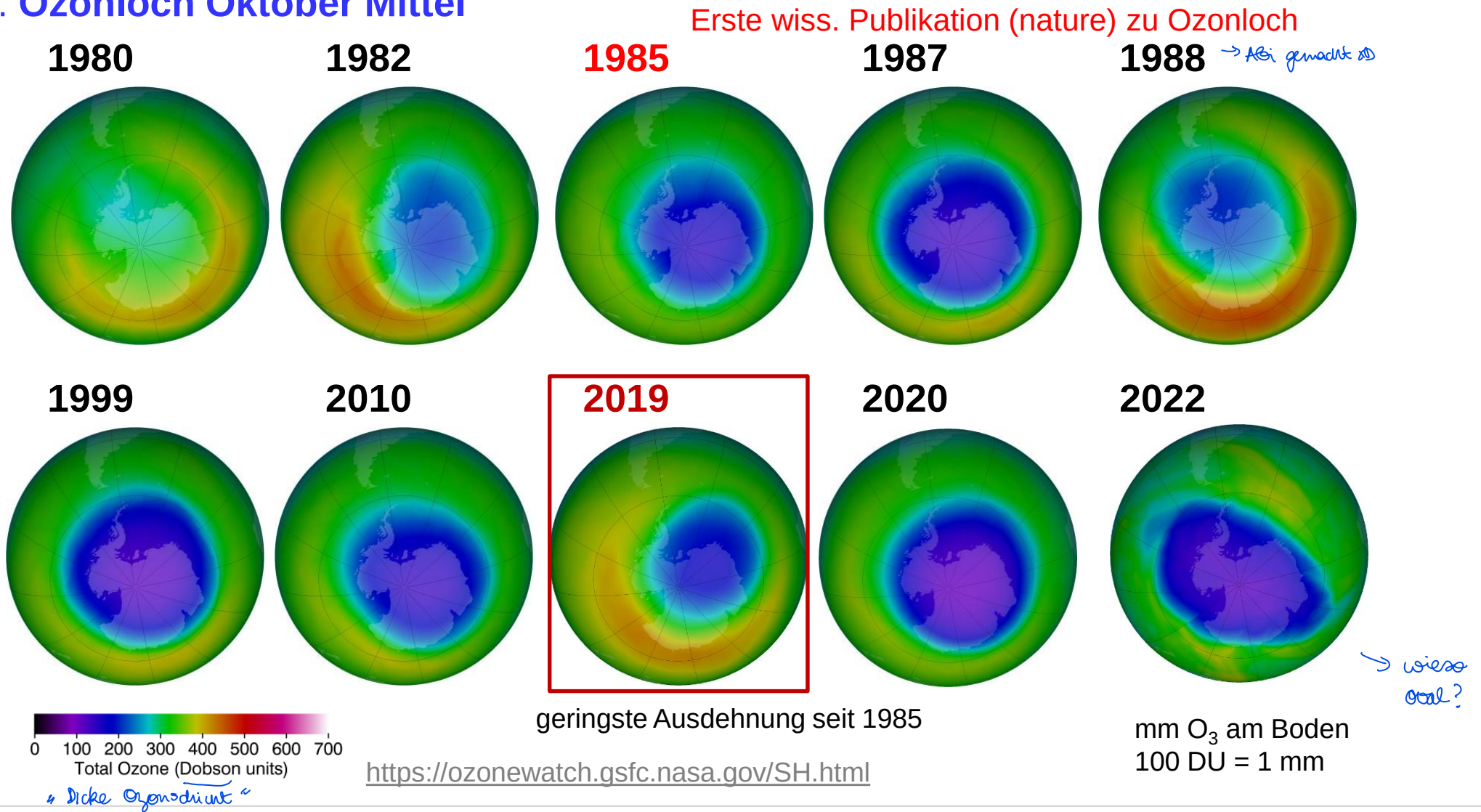
4.1.2 Stratosphäre

Ozon O_3 : Ozonloch Südhalbkugel



4.1.2 Stratosphäre

Ozon O₃: Ozonloch Oktober Mittel



4.1.2 Stratosphäre

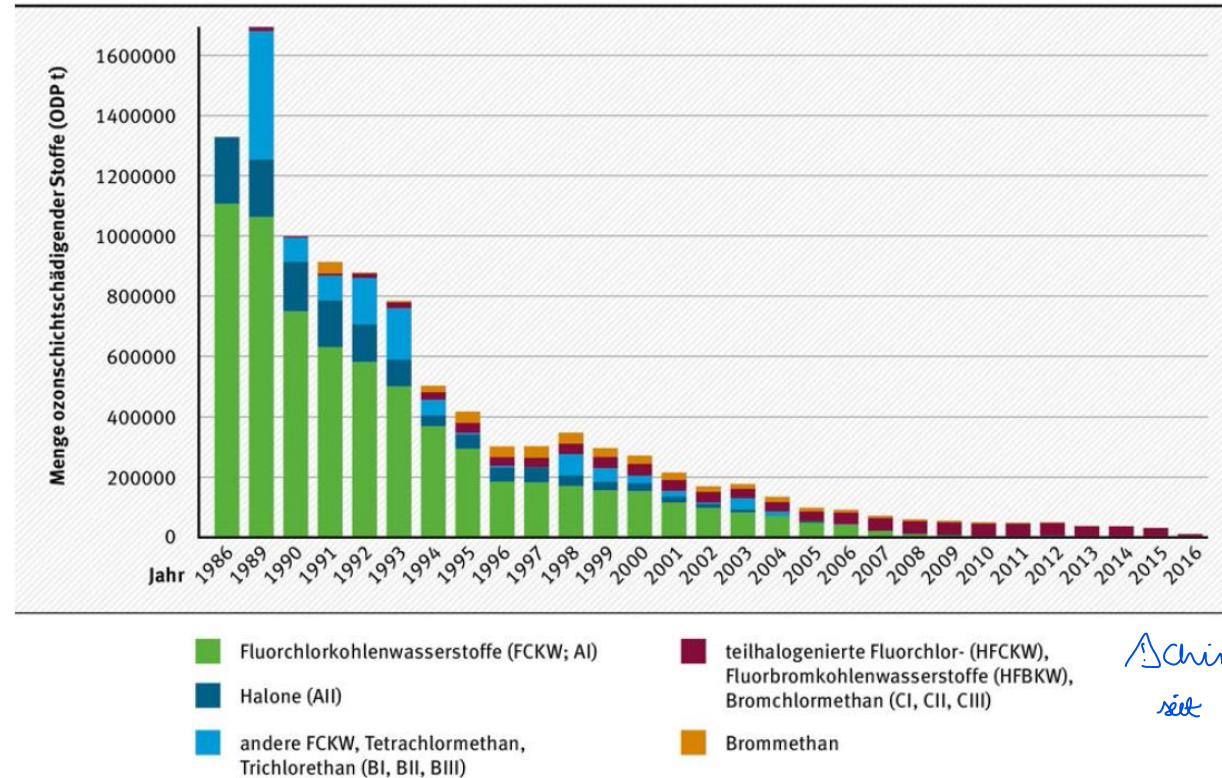
Antarktis sehr kalt, auch durch
Väkel abgegrenzt von Umgebung
polaric stratospheric clouds



(c) Greenpeace München 2001

- 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.



China jetzt wieder ↑
seit ca. 5 Jahren

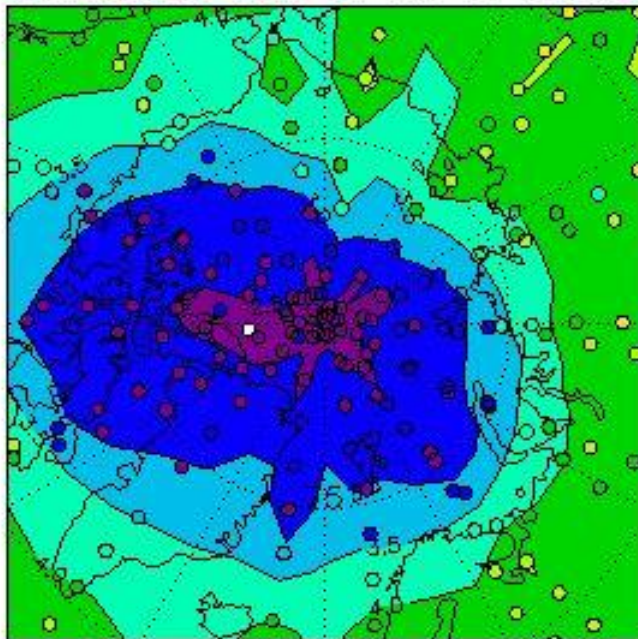
Quelle: UNEP [10]

4.1.2 Stratosphäre

Ozon O_3 : Ozonloch Nordhalbkugel

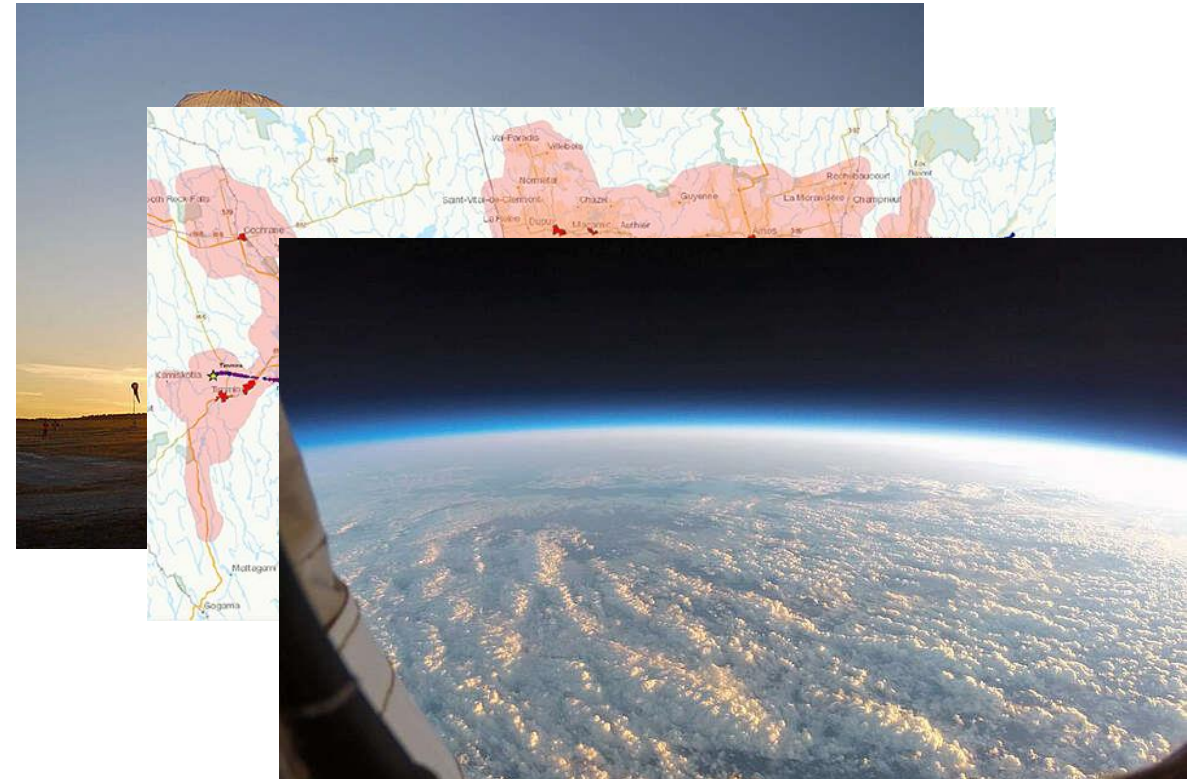
→ Temperaturen meist zu hoch, um PSC zu bilden / Chlor zu aktivieren;
hier v.a. Beteiligung von Brom (Br)-Verbindungen

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 PI 040/2011

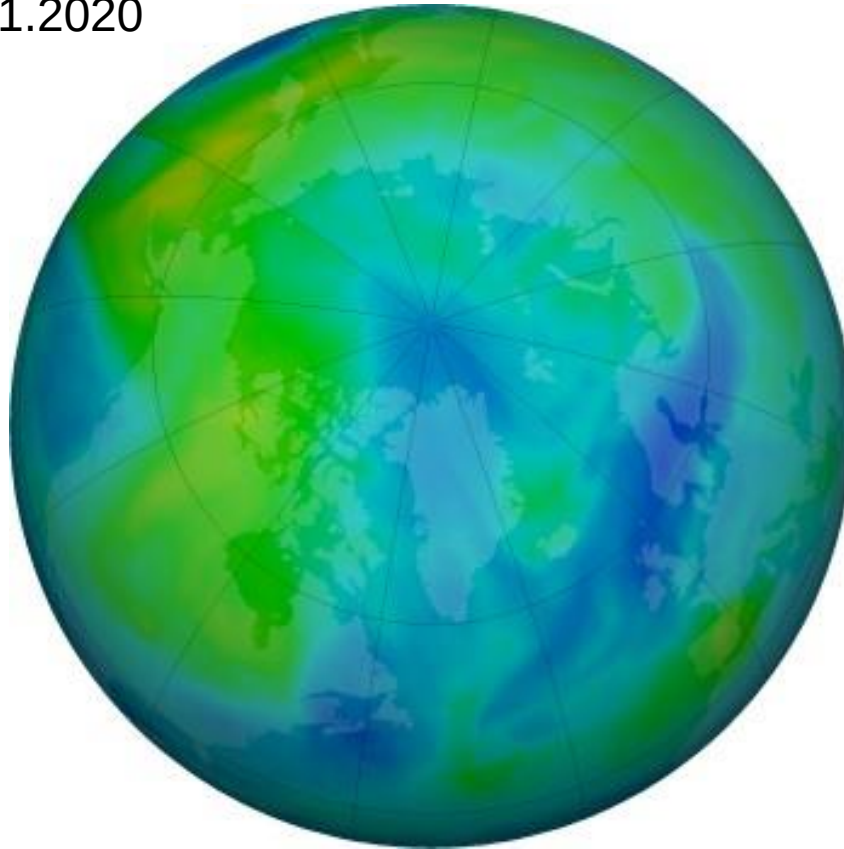


Messkampagne IMK-ASF (Leitung) Sept. 2014 zur
Messung von Gasen, die die Ozonschicht zerstören

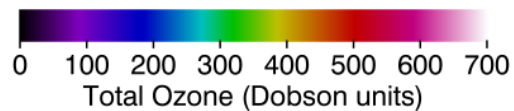
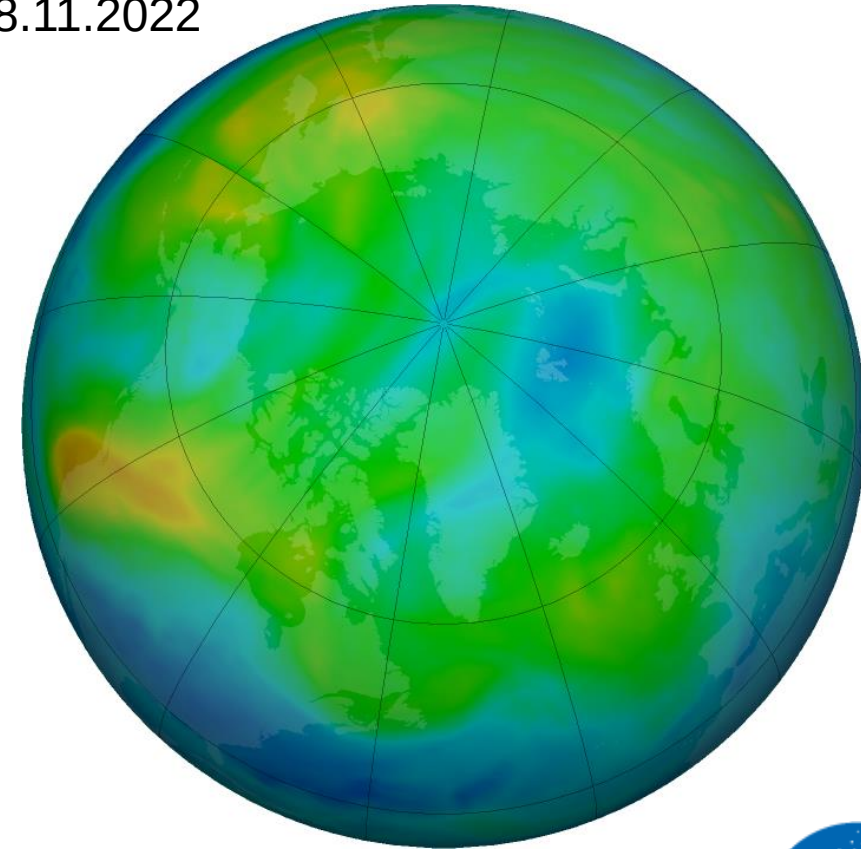
4.1.2 Stratosphäre

Ozon Nordhalbkugel

06.11.2020



08.11.2022



<https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/SH.html>



4.1.3 Mesosphäre

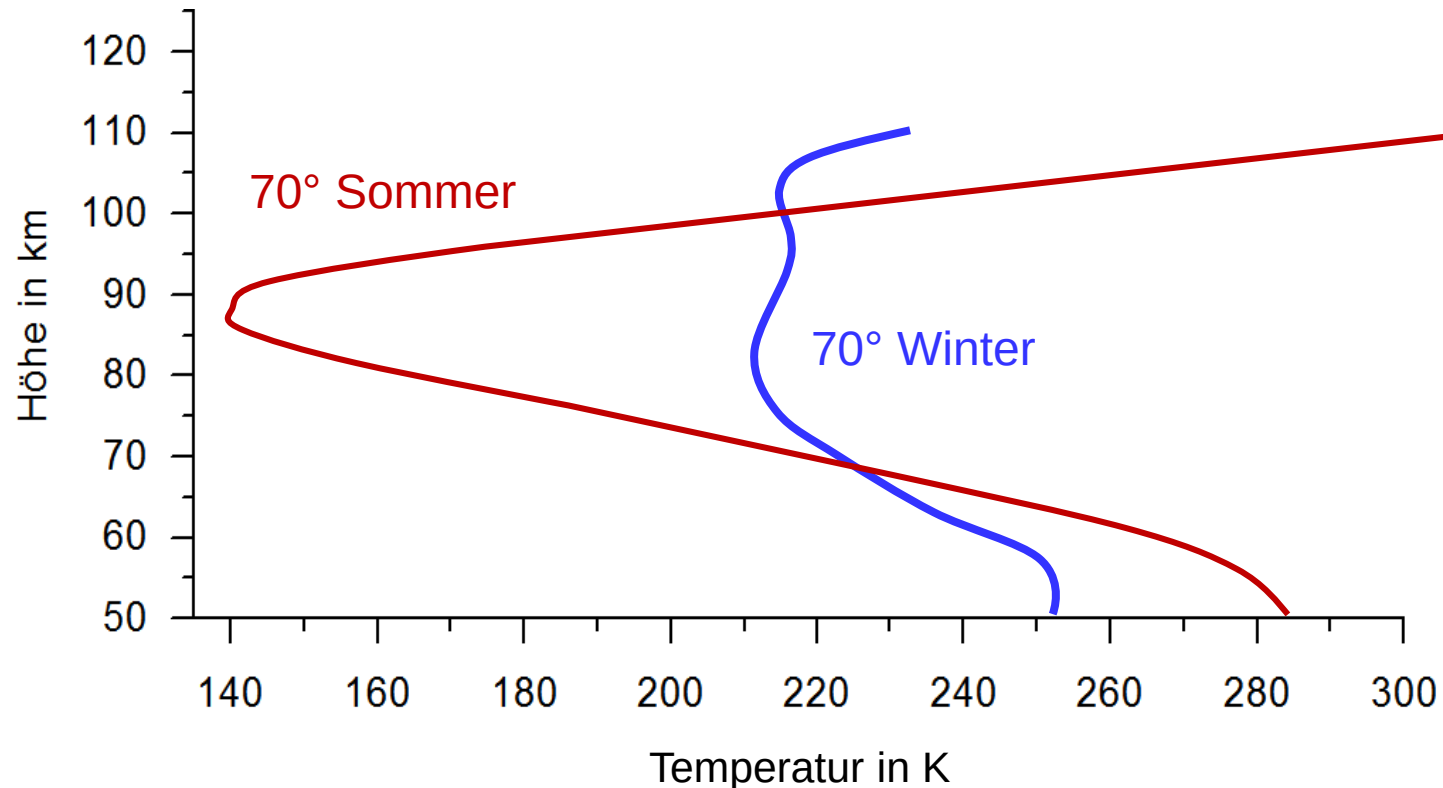
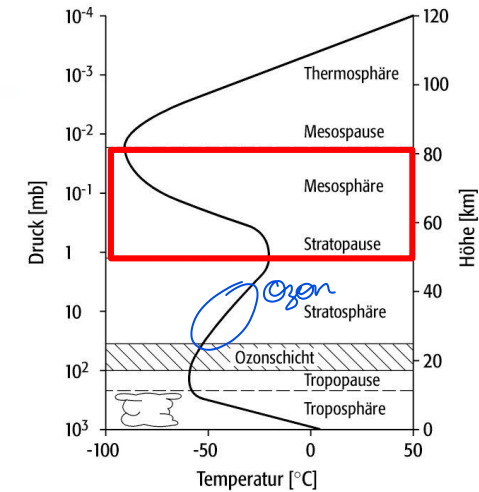


14.11.2022

Leuchtende
Nachtwolken

4.1.3 Mesosphäre

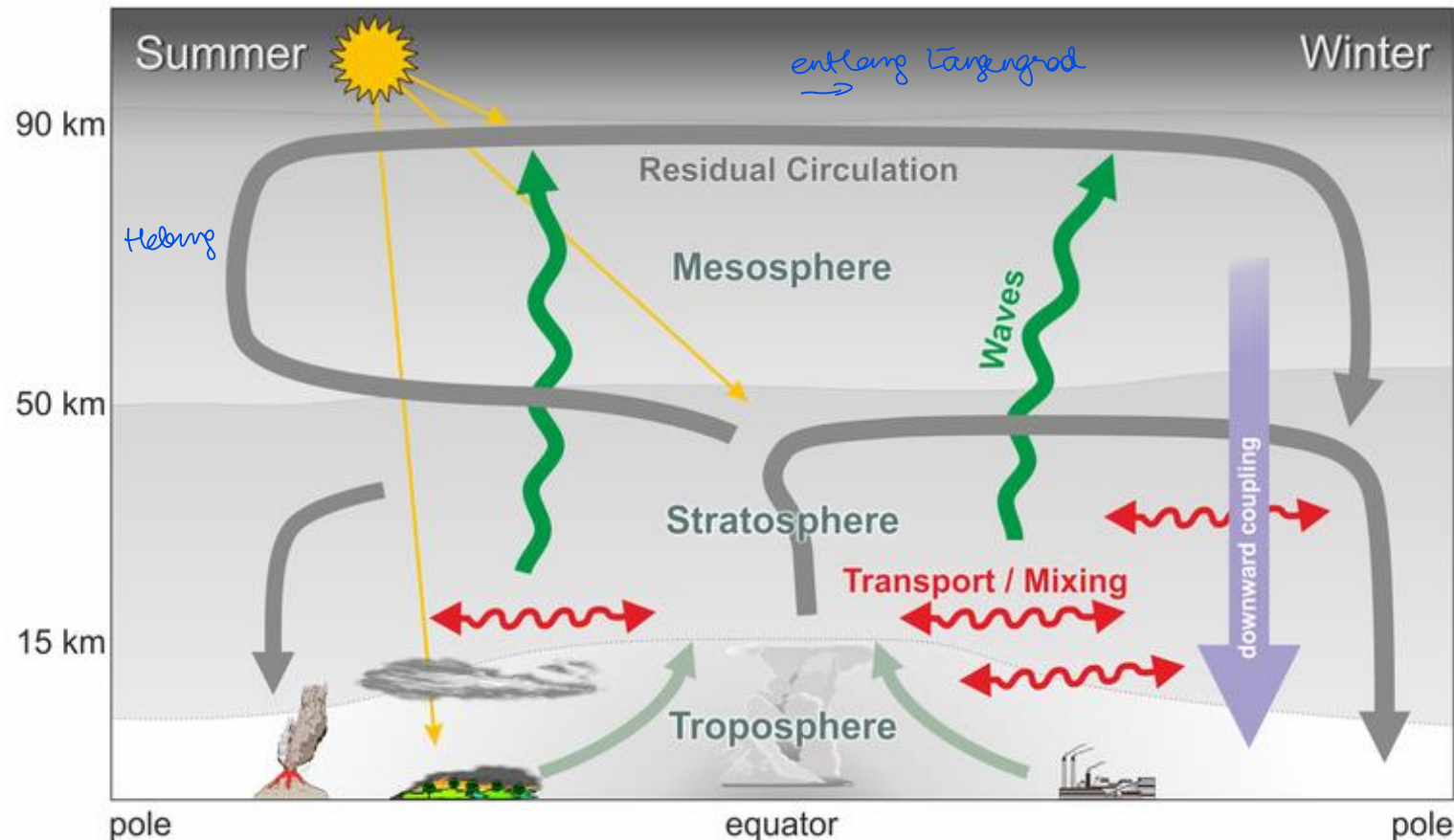
- Schicht von ca. 50 bis 80 km Höhe (oberhalb Stratopause)
- Sehr geringe Ozonkonzentration $\Rightarrow$ Abnahme Temperatur bis ca. 80 km (Mesopause)
- **Jahresgang Temperatur:** Zirkulation vom Sommer- zum Winterpol



Luftpaket $\uparrow$, dehnt sich aus, da der Druck geringer
 $T \downarrow$
 (innere E muss für Ausdehnung sinken)

4.1.3 Mesosphäre

- Zirkulation vom Sommer- zum Winterpol
 - Aufwärtstransport + adiabatische Abkühlung im Bereich Sommerpol
 - Deutlich tiefere Temperaturen im Sommer (100 bis 150 K) als im Winter



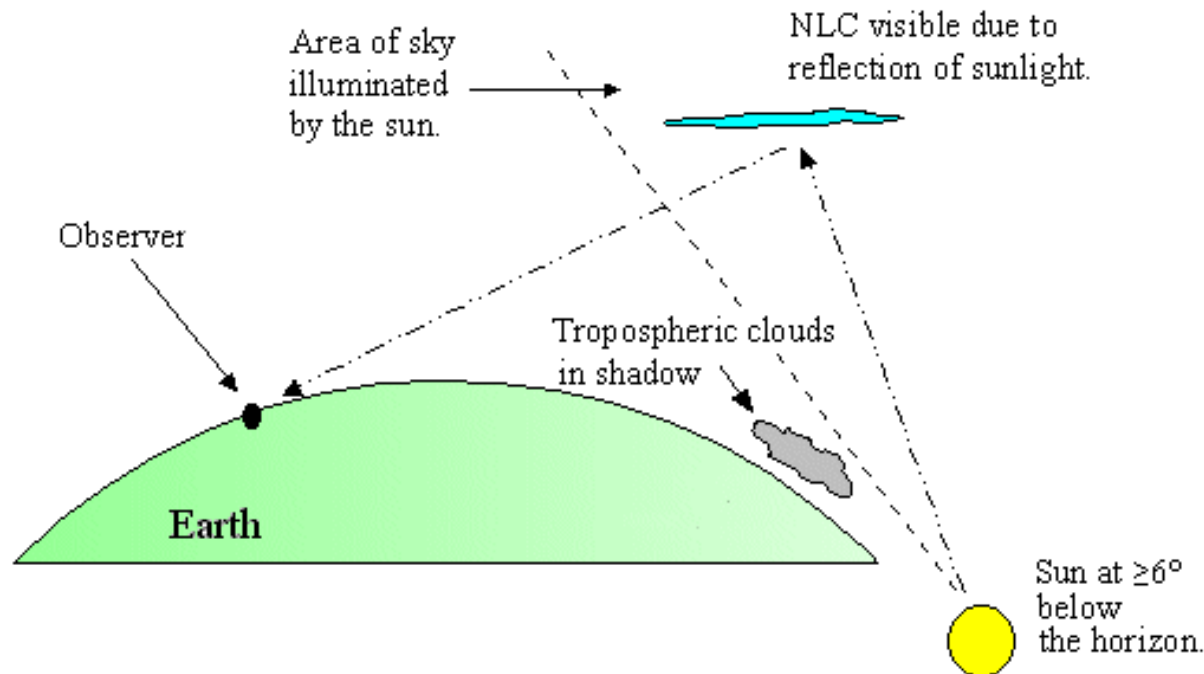
Bereich Mesopause: Leuchtende Nachtwolken



→ Wellenmuster
(Wellen stationär)

Bereich Mesopause: Leuchtende Nachtwolken

- Leuchtende Nachtwolken (Noctilucent clouds, NLC): *sehr trocken*
 - Eiskristalle, die sich an Meteoritenstaub bilden
 - Mitte Mai bis Mitte August in Nordeuropa sichtbar (tiefste Temperatur Mesosphäre)
 - Häufigkeit: 1-5 Mal pro Jahr (NLC Saison) *unbekannt von Häufigkeit*
 - Sonne muss zwischen 6 und 16° unter dem Horizont stehen
 - sichtbar in Gebieten >50°N/S (49°?) → siehe nächste Folie ☺



Bereich Mesopause: Leuchtende Nachtwolken

25.06.2021, 23:00 MESZ, Eggenstein © Fabian Siegmann

↳ bei Karlsruher



4.1.4 Thermosphäre

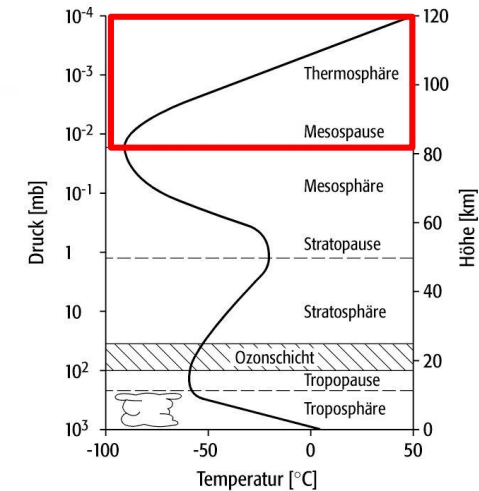
Pollichter



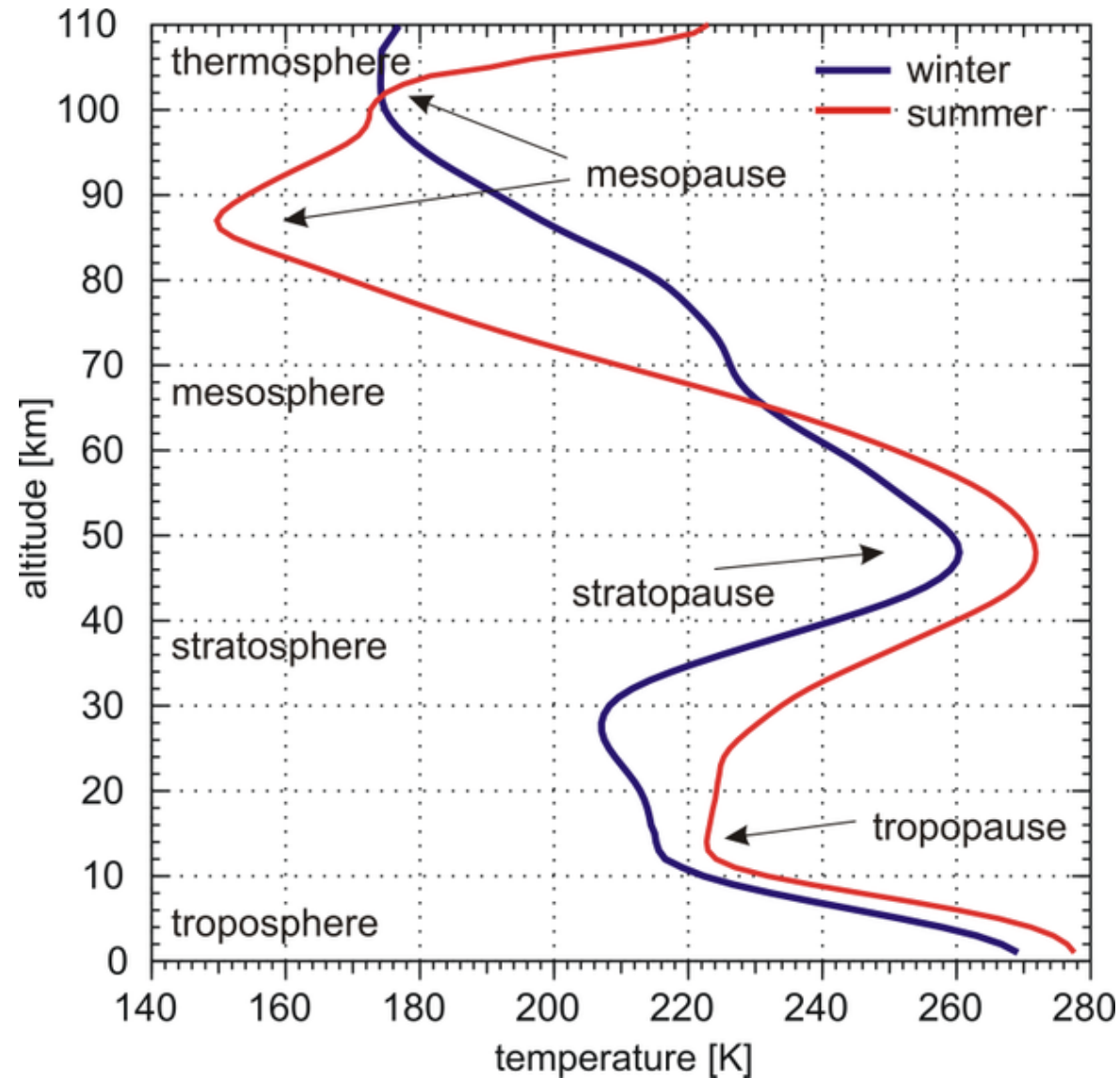
4.1.4 Thermosphäre

Stickstoff v. Molekül $\approx \dots$
(oder eig. Boltzmann-Vert.)
kin. Gastheorie statistisch $\rightarrow$ in Thermosp. zu wenige Teilchen
für Statistik

- Höhe ab Mesosphäre bis ca. 400 km
- Starke **Zunahme Temperatur** bis auf ca. 1000 K
 - Starke tageszeitliche Schwankungen (~ 100 K), abhängig von Sonnenaktivität
 - wenige Moleküle $\rightarrow$ kinetische Gastheorie (Statistik) nicht anwendbar
 $\rightarrow$ Temperaturbegriff problematisch
- Dissoziation / Entmischung Gase (**Heterosphäre**); Abnahme mittlere molare Masse
- Polarlichter (Aurora borealis), meist $> 66.5^\circ$ N/S Breite
 - Elektrisch geladene Teilchen der Magnetosphäre (v.a. Elektronen, auch Protonen) treffen auf schwere Ionen (Sauerstoff, Stickstoff) der Atmosphäre
 - Auslösung von Prozessen, die zu geänderten Elektronen-konfigurationen führen.
 - Abregung kurz danach: Aussenden von Licht (Fluoreszenz)

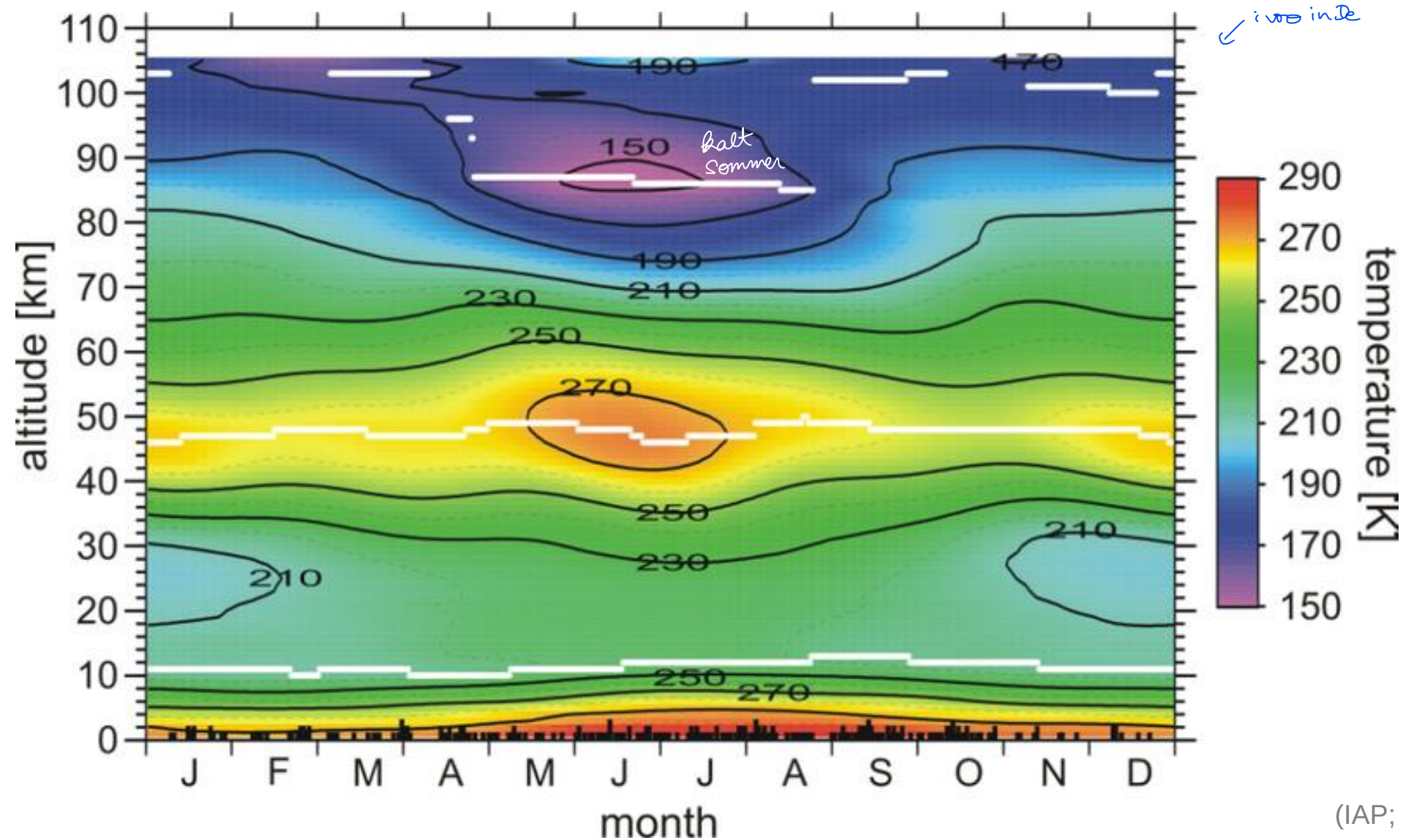


4.1 Zusammengefasst



(IAP; Gerding, 2008)

4.1 Zusammengefasst



(IAP; Gerding, 2008)

Fragen über Fragen...

Druckgradientkraft!

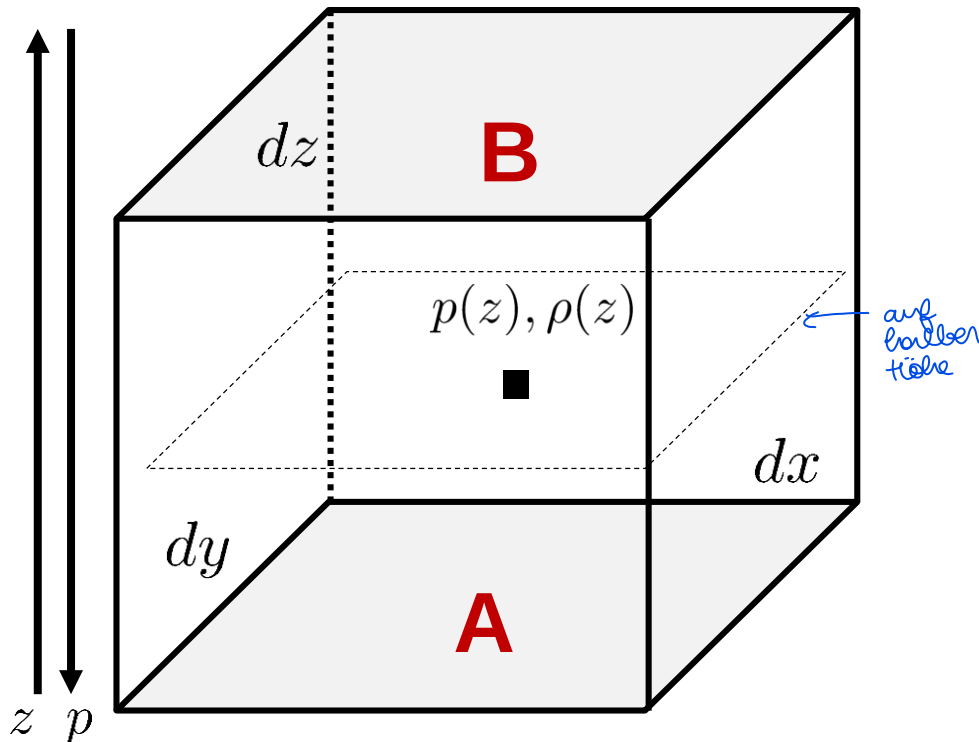
sehr klein
(Teilung) F_z ,
wegen ΔT
 $\uparrow$ z.B.
 $\uparrow$ Auftrieb
 $F_G!$

- Welche **Kräfte** in vertikaler Richtung wirken auf ein Luftpaket?
- Wie ändert sich der **Luftdruck** mit der Höhe? Wie ändert sich der **Wasserdruck** mit der Tiefe?
 $\hookrightarrow$ exp. Abnahme
 $\hookrightarrow$ lineare Zunahme
- Wieso? Wasser nicht kompressibel, Luft schon (Δp)
- Hat die Atmosphäre einen **Oberrand**? nein

4.2 Hydrostatische Approximation

- Betrachtung: differentielles Volumenelement $dV = dx dy dz$ (*infinitesimales Volumenelement*)
- Weiterhin gelte $p = p(z)$ (damit ist $\partial p = dp$)
- Definition Druck: Gewichtskraft / Fläche $p = \frac{F}{A} \Leftrightarrow F = pA \rightarrow dF = p dA$

(1) Differentielle **Druckgradientkraft** auf Fläche **A/B** (vertikal)



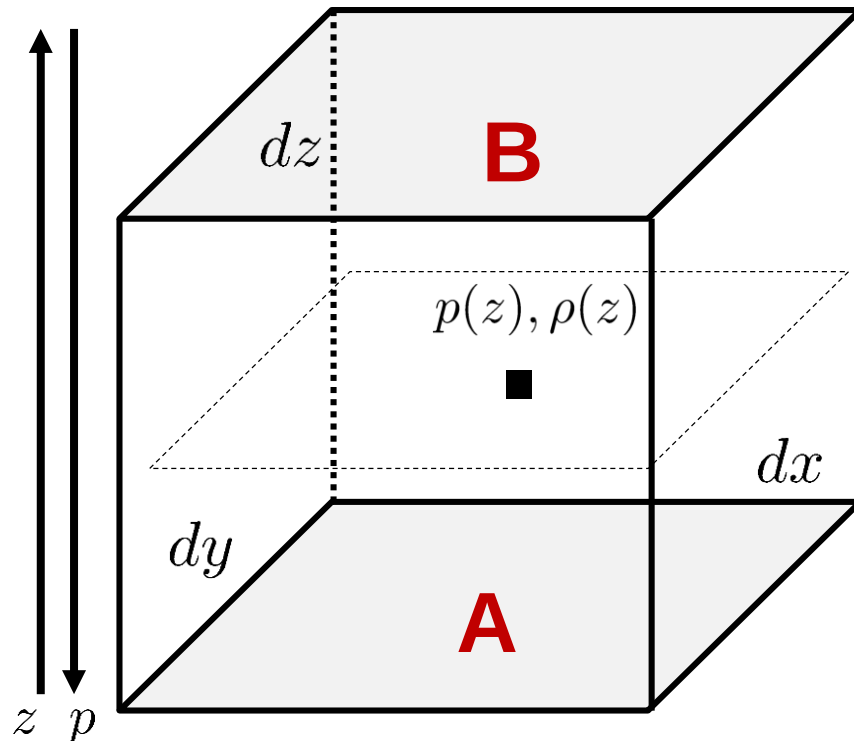
$$dF_B = \left(p(z) - \frac{dp}{dz} \frac{dz}{2} \right) \underbrace{dx dy}_{dA}$$

$$dF_A = \left(p(z) + \frac{dp}{dz} \frac{dz}{2} \right) dx dy$$

4.2 Hydrostatische Approximation

- Betrachtung: differentielles Volumenelement $dV = dxdydz$
- Weiterhin gelte $p = p(z)$ (damit ist $\partial p = dp$)
- Definition Druck: Gewichtskraft / Fläche $p = \frac{F}{A} \Leftrightarrow F = pA \rightarrow dF = pdA$

(1) Differentielle **Druckgradientkraft** auf Fläche **A/B** (vertikal)



$$dF_B = \left(p(z) - \frac{dp}{dz} \frac{dz}{2} \right) dxdy$$

Differenz: $d(F_B - F_A) =$

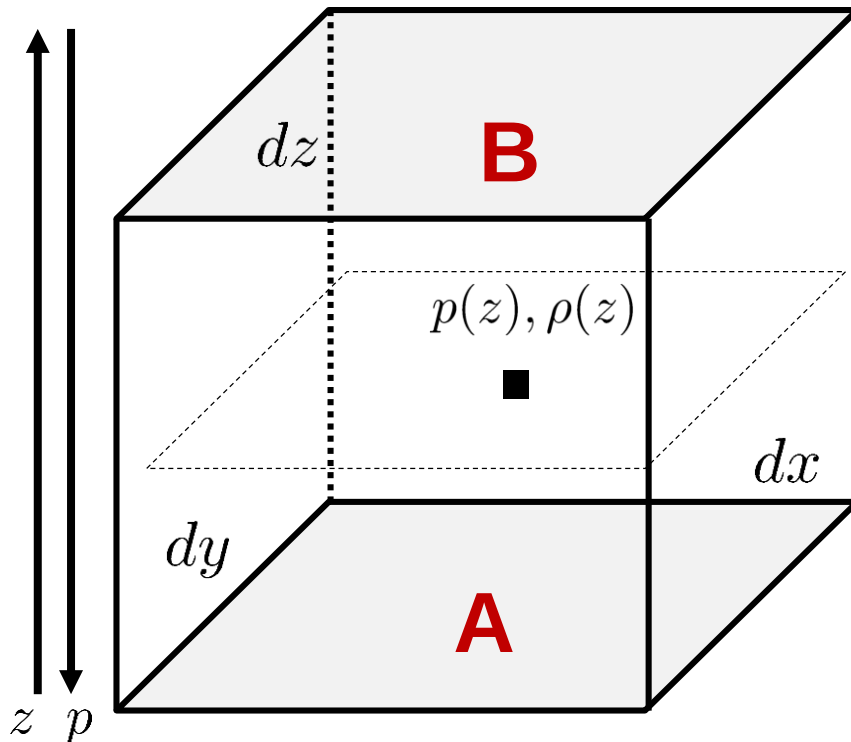
$$\begin{aligned} &= \left(\cancel{p(z)} - \frac{dp}{dz} \frac{dz}{2} - \cancel{p(z)} - \frac{dp}{dz} \frac{dz}{2} \right) dxdy \\ &= -\frac{dp}{dz} dz dxdy = -\frac{dp}{dz} dV \end{aligned} \quad (1)$$

$$dF_A = \left(p(z) + \frac{dp}{dz} \frac{dz}{2} \right) dxdy$$

4.2 Hydrostatische Approximation

- Betrachtung: differentielles Volumenelement $dV = dx dy dz$
- Weiterhin gelte $p = p(z)$ (damit ist $\partial p = dp$)
- Definition Druck: Gewichtskraft / Fläche $p = \frac{F}{A} \Leftrightarrow F = pA \rightarrow dF = p dA$

(1) Differentielle **Druckgradientkraft** auf Fläche **A/B** (vertikal)



$$d(F_B - F_A) = -\frac{dp}{dz} dV \quad (1)$$

(2) differentielle **Schwerkraft**

$$m = \rho \cdot V$$

$$dF_G = dm \cdot g = \rho(z) dV g \quad (2)$$

gleichsetzen (1) und (2):

$$-\cancel{\frac{dp}{dz} dV} = \cancel{\rho dV} g \Rightarrow \frac{dp}{dz} = -\rho g$$

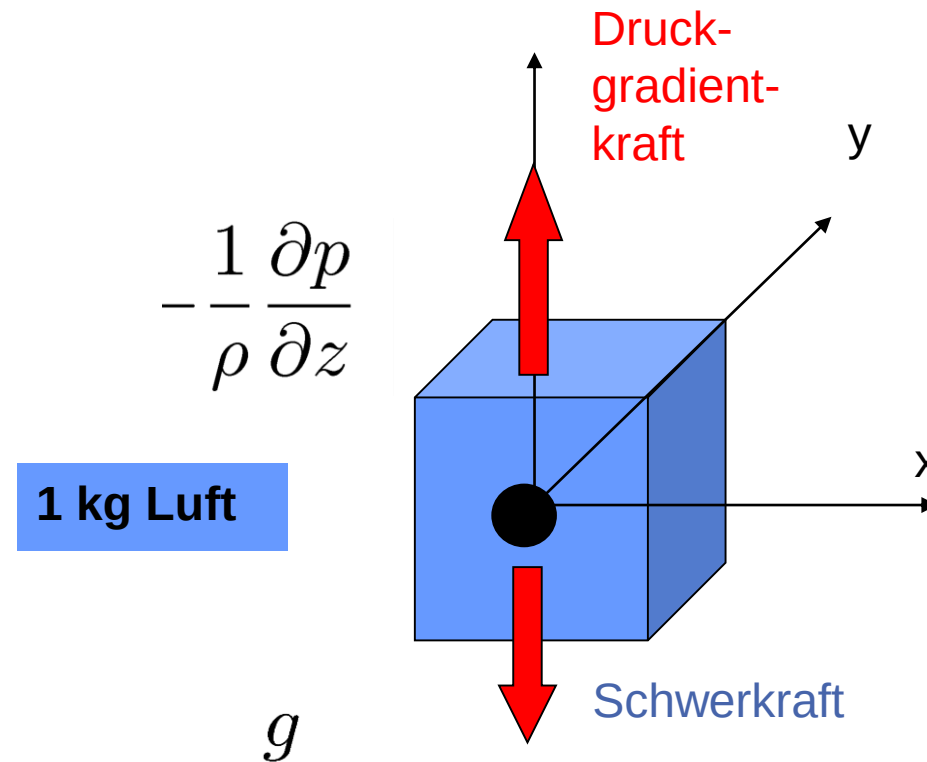
hydrostatische Approximation

g von Höhe abhängig? & ist wegen r_Erde = 6370 km?

4.2 Hydrostatische Approximation

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g$$

- Balance zwischen *(wenn keine a , ansonsten noch zusätzliche Kraft)*
 $v = \text{konstant}$
- vertikaler Druckgradientkraft (nach oben hin gerichtet wegen negativem Vorzeichen)
 - Schwerkraft (zum Erdboden hin gerichtet)



4.2 Hydrostatische Approximation

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g$$

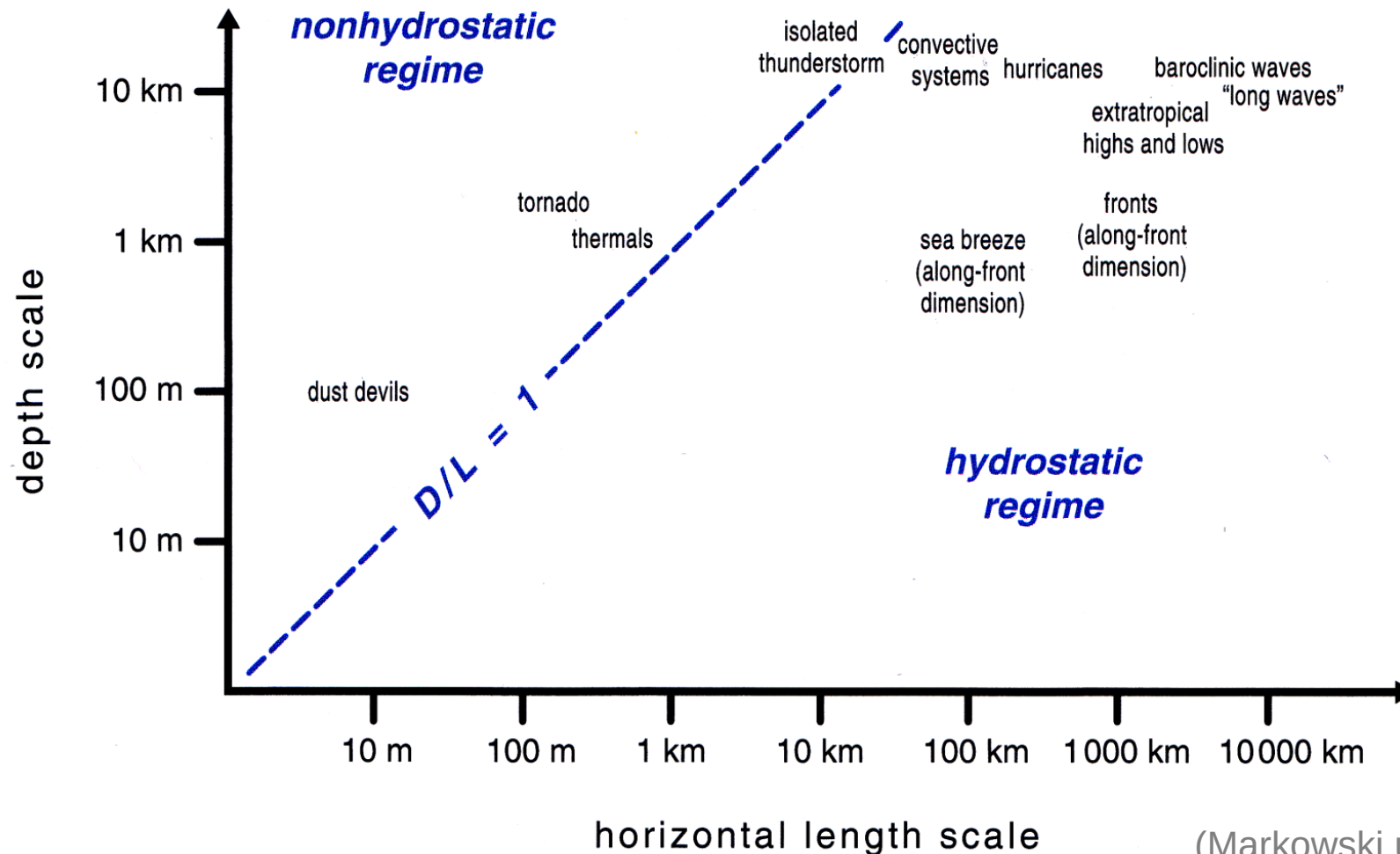
Bemerkungen

- Bezeichnung: hydrostatische Approximation sinnvoller als hydrostatische Grundgleichung
- Wettervorhersagemodelle Vergangenheit oftmals hydrostatisch
- Bedingung: keine Vertikalbeschleunigungen (nicht berücksichtigt bei Herleitung); Vertikalgeschwindigkeit ist aber möglich
- Herleitung aus Bewegungsgleichung: Skalenanalyse für großräumige Wettersysteme
→ im Mittel gültig für große Raumskalen $\sim O(100 \text{ km})$

4.2 Hydrostatische Approximation

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g$$

Wettersysteme und hydrostatische Annahme

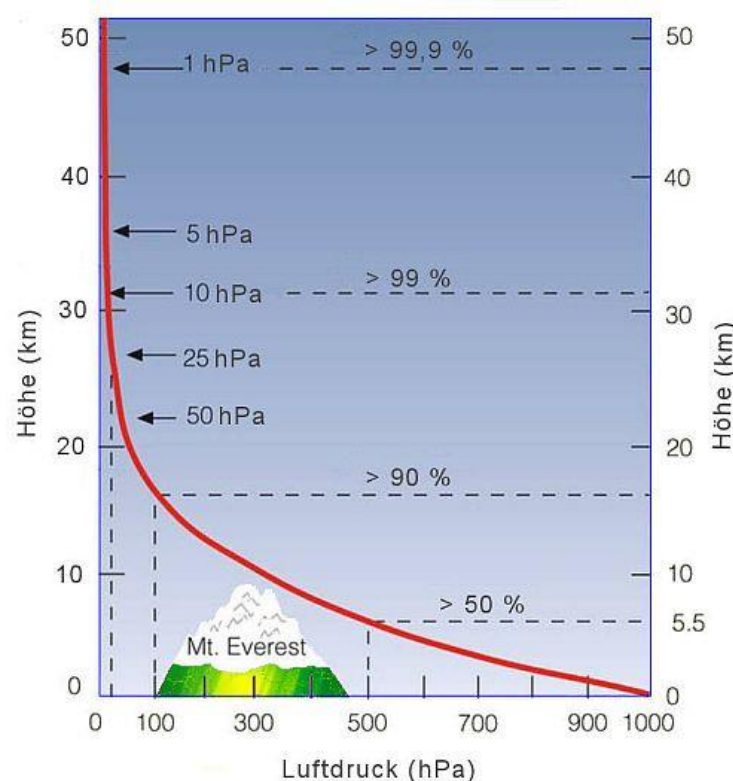


(Markowski und Richardson, 2010)

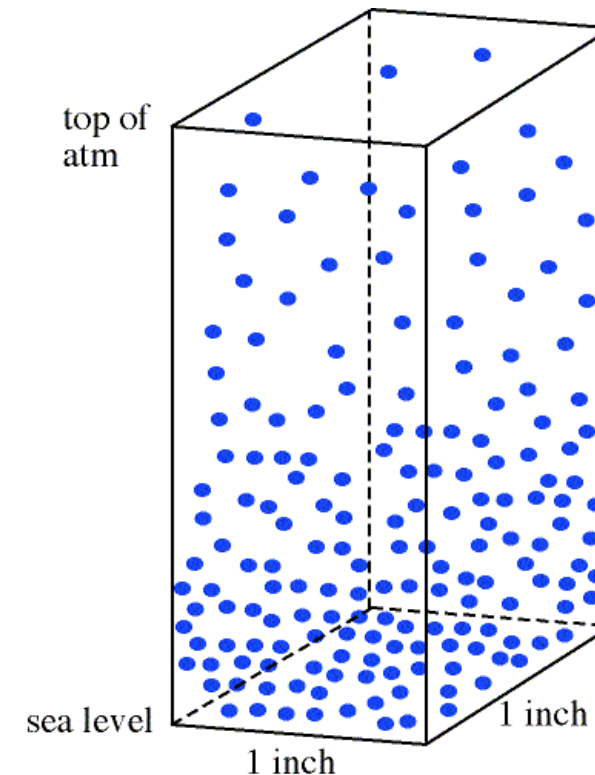
4.3 Modellatmosphären

Verlauf Luftdruck in der realen Atmosphäre

- **Luftdruck:** Gewichtskraft der Atmosphäre oberhalb von z
- Auf Meereshöhe ca. $10^5 \text{ Pa} \sim 10^4 \text{ kg}$ (Normalbed.: 1013.25 hPa)
- **Exponentielle Druckabnahme** mit der Höhe wg. Kompressibilität Luft



(Bild: gerd-pfeffer.de)



4.3 Modellatmosphären

Modellatmosphären

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g$$

hydrostatische
Approximation

$$p = \rho R_L T$$

Zustandsgleichung

p : Druck
 z : Höhe
 ρ : Dichte
 g : Schwerebeschl.
 T : Temperatur
 R_L : Gaskonstante für Luft
(trocken)

(a) Homogene Atmosphäre (isochor; $\rho = \text{const.}$)

(b) Isotherme Atmosphäre ($T = \text{const.}$)

(c) Polytrope Atmosphäre (Temp-Abnahme $\frac{\partial T}{\partial z} = \text{const.}$)

4.3.1 Homogene Atmosphäre

Homogene Atmosphäre:

$$\rho = \text{const.}$$

- Herleitung über **hydrostatische Approximation** (substantiell)

$$\frac{dp'}{dz'} = -\rho g = \text{const.} \quad (1)$$

$$\Leftrightarrow dp' = -\rho g dz' \quad (2)$$

$$\Rightarrow \int_{p_0}^p dp' = -\rho g \int_{z=0}^z dz' \quad (3)$$

$$\Rightarrow [p]_{p_0}^p = p - p_0 = -\rho g [z]_{z=0}^z = -\rho g z \quad (4)$$

$$p(z) = p_0 - \rho g z$$

- Lineare Druckabnahme mit der Höhe in der homogenen Atmosphäre
 - z.B. für einfache Abschätzung Druckänderung in untere Höhen; Faustformel: $\sim 1 \text{ hPa} / 9 \text{ m}$
- Homogene Atmosphäre hat eine Obergrenze (Auflösung von Gleichung (4) nach z , $p=0$ ergibt mit typischen Werten $H \sim 8 \text{ km}$) → Übung

Wir fassen zusammen...

■ Schichtenaufbau Atmosphäre

- Troposphäre (bis 8 - 16 km); Wettersysteme
- Stratosphäre (bis ~ 50 km); Erwärmung durch Ozonchemie
- Mesosphäre (bis ~ 80 km);
- Thermosphäre; Temperaturbegriff nicht sinnvoll;

■ Stratosphäre - Ozon O₃:

- Maximum in Stratosphäre, 20-30 km; bestimmt Temperaturprofil dort
- Photochemisches Gleichgewicht: Chapman-Zyklus
- Ozonabbau (ungebremst) durch Radikale: OH, Cl
- Dicke Ozonschicht ~3 mm unter Normalbedingungen (Auf Erde gebracht)

■ Mesosphäre: Temperaturabnahme am stärksten im Sommer wg. Zirkulation Sommer- zum Winterpol und Hebung; NLC invas - clouds

■ Thermosphäre: heiß; wenige Gase; Entmischung Gase

■ Hydrostatische Approximation: Gleichgewicht Schwerkraft (zum Boden gerichtet) und Druckgradientkraft (nach oben); gilt nur für größere Raumskalen $\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g$

■ Homogene Atmosphäre ($\rho = \text{const.}$): lineare Druckabnahme; Atmosphäre hat „Oberrand“