

Die **Atmosphäre** (griech.: *atmos* = *Dunst, Dampf*; *sphaira* = *Kugel*) ist die Gashülle, die die Erde aufgrund der Schwerkraft umgibt. Sie ist neben den Weltmeeren eines der beiden großen fluiden Systeme der Erde. Im Vergleich zum Erdradius bildet die Atmosphäre nur eine dünne „Haut“, die die Erde umgibt. Die sich in ihr abspielenden physikalisch-chemische Prozesse (z. B. Strahlungstransport, Wetter, chem. Reaktionen) sind u. a. Voraussetzung für Leben auf der Erde.



Eine kurze Geschichte der Atmosphärenwissenschaften

v.Chr.

340 v.Chr. Aristoteles *Meteorologica* wird veröffentlicht. Seine Theorien bleiben für ca. 2000 Jahre unbestritten.

16. Jhd.

1590er Galileo Galilei erfindet das Thermoskop, einen Vorläufer des Thermometers.

17. Jhd.

1643 Evangelista Torricelli benutzt ein Quecksilber-Manometer für Experimente zum Atmosphärendruck.

1686 Edmond Halley zeigt, dass niedere Breitengrade mehr solare Strahlung empfangen als hohe Breitengrade. Er schlägt vor, dass dieser Gradient die Triebkraft für die generelle atmosphärische Zirkulation ist.

18. Jhd.

1714 Gabriel D. Fahrenheit entwickelt das Thermometer und eine Temperaturskala.

1735 George Hadley zeigt die Relevanz der Erdrotation für das Verhalten der Hauptwindströmungen, etwa der Passatwinde und des Westwindgürtel in den mittleren Breiten; die tropische Hadley-Zirkulation ist nach ihm benannt.

1750er Joseph Black weist CO_2 in atmosphärischer Luft nach.

1770er Daniel Rutherford weist Stickstoff in Luft nach. Carl Scheele und Joseph Priestley entdecken unabhängig voneinander Sauerstoff.

1781 Henry Cavendish misst die Zusammensetzung der Luft als 79.16% Stickstoff und 20.84% Sauerstoff.



Eine kurze Geschichte der Atmosphärenwissenschaften

19. Jhd.

- 1839 Christian Schönbein entdeckt das Ozon im Labor.
- 1859 John Tyndall schlägt vor, dass Wasserdampf, CO_2 , und andere strahlungsaktive Bestandteile der Atmosphäre „alle von Geologen gefundene Veränderungen des Klimas hervorrufen können.“
- 1878 Alfred Cornu misst das Spektrum der Solarstrahlung am Erdboden und schlägt vor, dass das Fehlen von kurzwelliger ultravioletter Strahlung durch einen Absorber in der Atmosphäre zustande kommt. Zwei Jahre später folgert Walter Hartley, dass dieser Absorber das Ozon in der oberen Atmosphäre ist.
- 1896 Svante Arrhenius publiziert ein Klimamodell, welches die Empfindlichkeit der Erdoberflächentemperatur auf die CO_2 Konzentration zeigt.

20. Jhd.

- 1919-25 Jacob Bjerknes, sein Vater Vilhelm, und Halvor Solberg entwickeln die Theorie der polaren Fronten zur Beschreibung lokaler Meteorologie.
- 1919-37 Vilhelm und Jacob Bjerknes und andere identifizieren extratropische Zyklen als Wellen an der Polarfront. Zusammen mit späteren Theorien der planetaren Wellen von Carl-Gustaf Rossby und Jule Charney bilden diese atmosphärischen Strömungen die Grundlage für unser heutiges Verständnis der allgemeinen Zirkulation und der Wettervorhersage.
- 1920 Milutin Milankovitch publiziert seine Theorie der Eiszeiten basierend auf Variationen der Umlaufbahn der Erde um die Sonne.
- 1924-28 Gordon Dobson dokumentiert die jahreszeitlichen und längengradabhängigen Variationen von Ozon.
- 1928 Gilbert Walker beschreibt die „Southern Oscillation,“ ein Auf und Ab des Atmosphärendrucks auf der West- und Ostseite des Pazifischen Ozeans.
- 1930 Sydney Chapman publiziert die erste photochemische Theorie zur Bildung von Ozon in der oberen Atmosphäre.



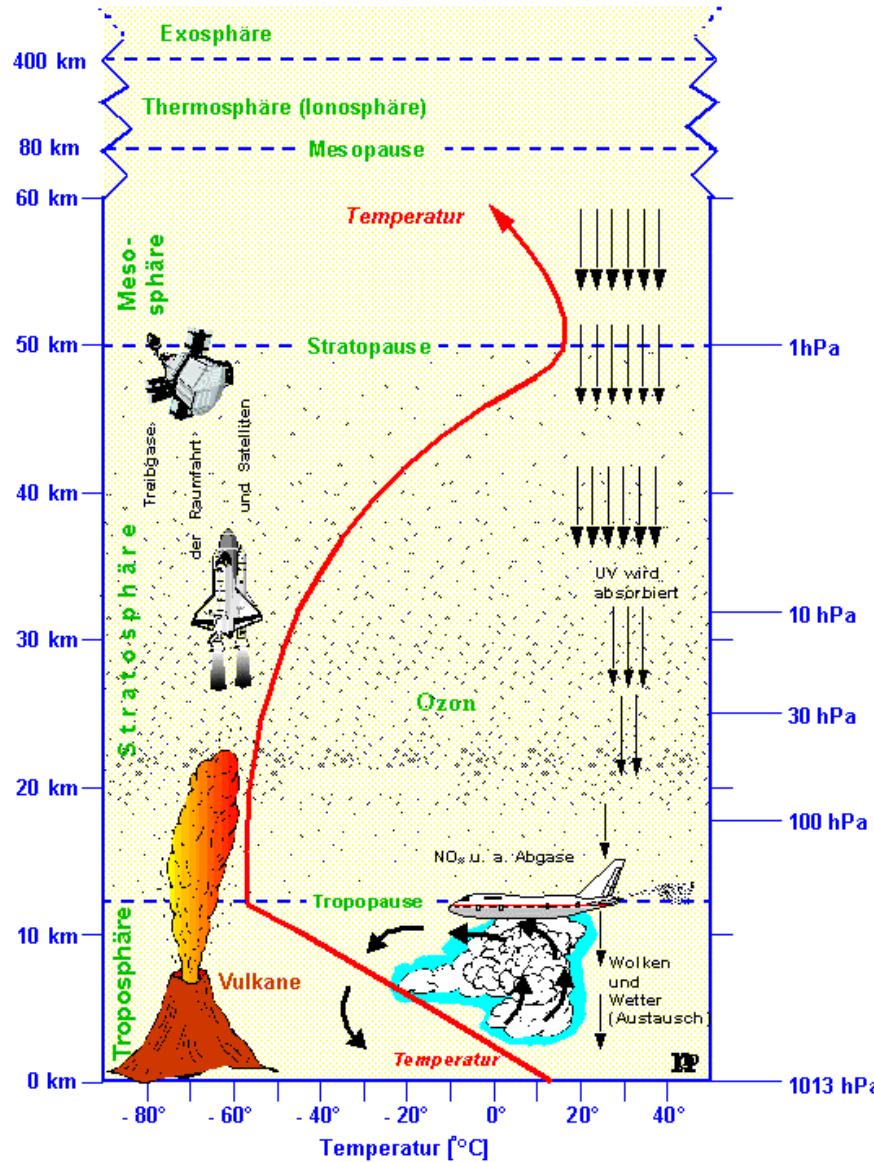
Eine kurze Geschichte der Atmosphärenwissenschaften

- 1941 Radar wird zur Wetterverfolgung genutzt.
- 1949-56 Arbeiten von Alan Brewer und Dobson führen zu einem Modell der generellen Zirkulation in der Stratosphäre.
- 1950 David Bates und Marcel Nicolet schlagen vor, dass H, HO, and HO₂ eine katalytische Rolle in der Atmosphäre spielen. Charney und John von Neumann begründen die Wissenschaft der numerischen Wettervorhersage mit einem ENIAC Computer.
- 1956 Norman Phillips realisiert die erste erfolgreiche numerische Simulation der atmosphärischen Zirkulation.
- 1959 Der Satellit Explorer VI liefert TV-Bilder der Wolkenbedeckung. Verner Suomi benutzt Explorer VII zur Abschätzung des Budgets der globalen Strahlungswärme des Systems Erde/Atmosphäre.
- 1963 Der Meteorologe Edward Lorenz entwickelt ein System mit drei Gleichungen, um damit die Grenzen der Vorhersagbarkeit des Wetters aufzuzeigen. Dies führt letztendlich zur Entwicklung der Chaostheorie.
- 1967 Syukuro Manabe und Richard Wetherald entwickeln ein eindimensionales konvektives Strahlungsmodell, welches Wolken, Wasserdampf, CO₂, und Ozon beinhaltet. Mit dem Modell zeigen sie, dass eine Verdopplung des atmosphärischen CO₂ die Erde um etwa 3 Grad erwärmen kann. 1975 initiieren sie Studien zum Klimawandel mit globalen Zirkulationsmodellen.
- 1969 Jacob Bjerknes bringt die Southern Oscillation mit El Nino in Beziehung.
- 1970-74 Paul Crutzen und Harold Johnston identifizieren ozonzerstörende katalytische Zyklen der Oxide des Stickstoffs (NOx). Richard Stolarski und Ralph Cicerone schlagen einen weiteren solcher Zyklen mit Chlor vor, und Mario Molina und F. Sherwood Rowland verbinden diesen Zyklus mit dem Ozonabbau durch Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKWs).
- 1972 Hiram Levy postuliert, dass die Reaktion mit dem Hydroxylradikal für fast alle in die Atmosphäre emittierten Gase die Hauptsenke in der Troposphäre darstellt.



Eine kurze Geschichte der Atmosphärenwissenschaften

- 1985 Der British Antarctic Survey berichtet von einer systematisch im Frühling wiederkehrenden Reduktion des Ozons über der Station Halley Bay mit einem Rückgang von 40% zwischen 1956 und 1985.
- 1987 Eine große Anzahl von Staaten unterzeichnen das Montrealer Protokol über Substanzen, die die Ozonschicht abbauen. Damit beschließen die Unterzeichner die Produktion und Nutzung von ozonzerstörenden Materialien unter Kontrolle zu stellen.
- 1989 Das Earth Radiation Budget Experiment zeigt, dass Wolken signifikant mehr Solarenergie reflektieren als langwellige Strahlungsenergie zurückhalten, wodurch sie einen großen Kühlungseffekt für die Erde besitzen.
- 1990er Forscher erkennen die Wichtigkeit von anthropogenen Aerosolen wegen deren Möglichkeit, durch Reflektion von Solarstrahlung dem Treibhauseffekt entgegenzuwirken. Der in den 70er Jahren begonnene Trend der globalen Erwärmung setzt sich fort und im Vergleich der letzten 100 Jahre erreichen die mittlere Oberflächentemperaturen Rekordwerte.
- 1995 Ein internationales Team von mehr als 1000 Wissenschaftlern versammelt sich unter der Charta des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) und erklärt: "Die Gesamtheit der Evidenz lässt auf einen erkennbaren menschlichen Einfluss auf das globale Klima schließen." Paul Crutzen, Mario Molina, und F. Sherwood Rowland wird wegen ihrer Arbeiten zur Chemie der Atmosphäre, insbesondere über Bildung und Abbau von Ozon, der Nobelpreis für Chemie verliehen.
- 1996 In der industriellen Welt endet die Produktion von FCKWs und einiger anderer ozonabbauender Chemikalien.
- 1997 Das Kyoto-Protokoll fordert eine gesetzliche Verpflichtung aller entwickelten Staaten zur Einhaltung von Emissionsgrenzen von Treibhausgasen.



Thermische Schichtung:

Thermosphäre (ab 80 km Höhe): Absorption kurzwelliger Strahlung durch Stickstoff und Sauerstoff.

Mesosphäre (50-80 km Höhe): Kälteste Atmosphäreschicht, starke vertikale Durchmischung.

Stratosphäre (12-50 km Höhe): Ozonschicht, geringe vertikale Durchmischung.

Troposphäre (0-12 km Höhe): Wettergeschehen, Wasserdampfatmosphäre, negativer Temperaturgradient, starke Durchmischung.

Mischungsmechanismus:

Homosphäre (0-100 km Höhe): homogen (turbulent) gemischte Sphäre

Heterosphäre (> 100 km Höhe): heterogen (diffusiv) entmischte Sphäre

Ionisationsgrad:

Ionosphäre (Teil der Meso- und Thermosphäre): starke Ionisation der Luftmoleküle durch harte UV-Strahlung, Polarlichter

Ideale Gasgesetz

Voraussetzung: Zwischen den Gasteilchen bestehen keine Wechselwirkungen und das Volumen der Gasteilchen ist vernachlässigbar gegenüber dem Volumen des Raumes (bzw. das Gas ist unendlich kompressibel).

$$pV = nRT \quad \text{mit } R = 8,314 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$$

bzw.

$$p = \rho R' T \quad \text{mit } R' = R/\mu_{air} = 287,05 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$$

$$\text{und } \mu_{air} = \sum \mu_i n_i / n = 28,96 \text{ g mol}^{-1}$$

Partialdruck (Gesetz von Dalton)

Der Gesamtdruck eines idealen Gases ist gleich der Summe der Partialdrücke der Einzelkomponenten:

$$p = \sum p_i \quad \text{bzw.} \quad \rho = \sum \rho_i = \sum m_i / V$$

Moleküldichte (molecular density) $\rho_i = m_i/V$ $[\rho_i] = \text{kg/m}^3$ bzw. $\mu\text{g/m}^3$

Teilchenzahldichte (number density) n_i $[n_i] = \text{m}^{-3}$ bzw. cm^{-3}

Partialdruck p_i $[p_i] = \text{Pa}$

Massenmischungsverhältnis $p/p_{air} = \rho/\rho_{air} = m/m_{air}$
in kg/kg

Volumenmischungsverhältnis $c_i = n_i/n_{air}$ in mol/mol bzw. %, ppm, ppb, ppt

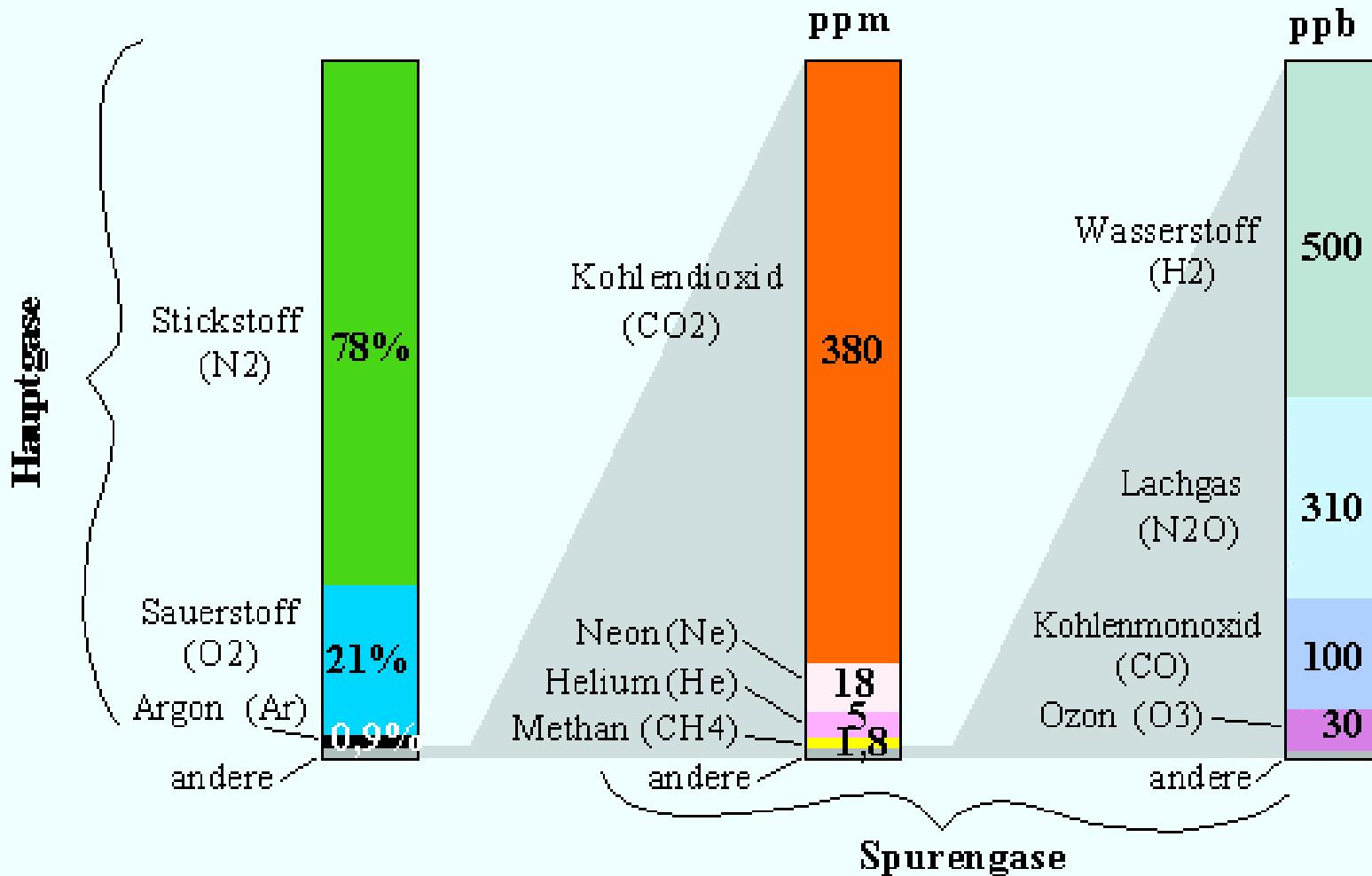
Volumenmischungsverhältnis:

$$\begin{aligned}1 \text{ ppmv} &= 1 \mu\text{mol/mol} = 10^{-6} \text{ mol/mol} \\1 \text{ ppbv} &= 1 \text{ nmol/mol} = 10^{-9} \text{ mol/mol} \\1 \text{ pptv} &= 1 \text{ pmol/mol} = 10^{-12} \text{ mol/mol}\end{aligned}$$

„parts per million“
„parts per billion“
„parts per trillion“

Konstanten:

durchschnittlicher Erdradius	$r = 6.37 \cdot 10^6 \text{ m}$
Erdbeschleunigung	$g = 9.80665 \text{ m s}^{-2}$
Avogardozahl	$N_A = 6.0225 \cdot 10^{23} \text{ molec./mol}$
Molekulargewicht von (trockener) Luft	$m_{air} = 28.97 \text{ g mol}^{-1}$
Dichte (trockener) Luft bei 273K und 1013.25 hPa	$\rho_{air} = 1.293 \text{ kg m}^{-3}$
spezifische Wärme von Luft	$c_p = 1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $c_v = 717 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
universelle Gaskonstante	$R = 8.3143 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
Gaskonstante von Luft	$R' = c_p - c_v = 287.05 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$
„Kappa“	$\kappa = R'/c_p = 0.285$
Latente Wärme von Wasser (0°C)	$L = 2.5 \cdot 10^6 \text{ J kg}^{-1}$



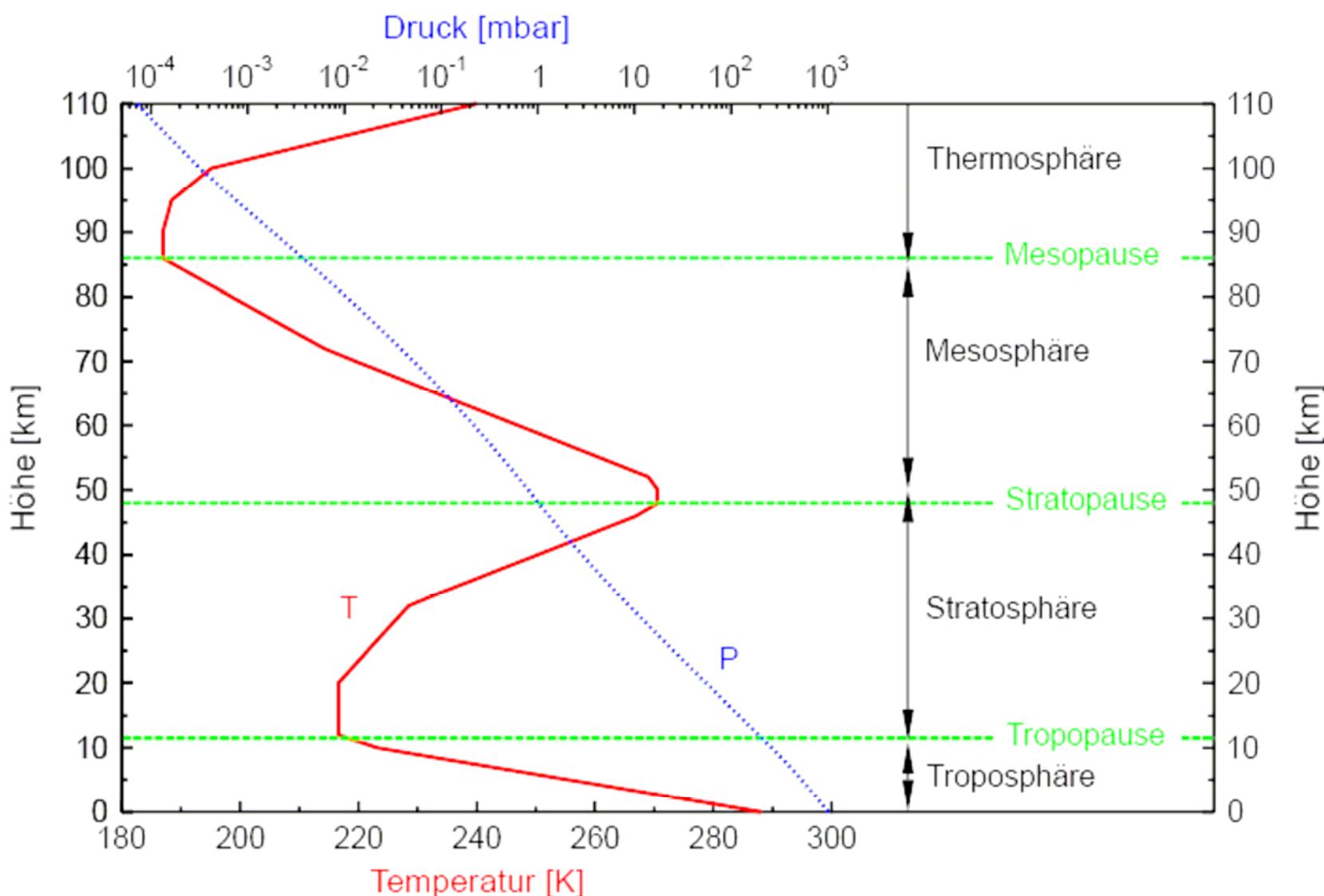
Zusammensetzung der Atmosphäre

Gas		Molare Masse [g mol ⁻¹]	Mischungsverhältnis [†] [mol mol ⁻¹] [*]	Partialdruck bei 288.15 K und 1013.25 mbar [mbar]	Anzahl Moleküle [cm ⁻³]	Hauptquellen und Anmerkungen [†]
Stickstoff	N ₂	28.013	0.78084	= 78.1 %	791.2	2.0·10 ¹⁹
Sauerstoff	O ₂	31.999	0.209476	= 20.9 %	212.3	5.3·10 ¹⁸
Argon	Ar	39.948	9.34·10 ⁻³	= 0.9 %	9.5	2.4·10 ¹⁷
Neon	Ne	20.179	1.818·10 ⁻⁵	= 18.2 ppm	1.8·10 ⁻²	4.6·10 ¹⁴
Krypton	Kr	83.800	1.1·10 ⁻⁶	= 1.1 ppm	1.1·10 ⁻³	2.8·10 ¹³
Xenon	Xe	131.300	9·10 ⁻⁸	= 90 ppb	9.1·10 ⁻⁵	2.3·10 ¹²
Helium	He	4.003	5.24·10 ⁻⁶	= 5.2 ppm	5.3·10 ⁻³	1.3·10 ¹⁴
Kohlendioxid	CO ₂	44.010	3.6·10 ⁻⁴	= 360 ppm	3.6·10 ⁻¹	9.2·10 ¹⁵
Methan	CH ₄	16.043	1.7·10 ⁻⁶	= 1.7 ppm	1.7·10 ⁻³	4.3·10 ¹³
Kohlenmonoxid	CO	28.010	5·10 ⁻⁸ – 2·10 ⁻⁷	= 50–200 ppb	5·10 ⁻⁵ – 2.0·10 ⁻⁴	1.3·10 ¹² – 5.1·10 ¹²
Wasserstoff	H ₂	2.016	5.5·10 ⁻⁷	= 550 ppb	5.6·10 ⁻⁴	1.4·10 ¹³
Lachgas	N ₂ O	44.013	3.1·10 ⁻⁷	= 310 ppb	3.1·10 ⁻⁴	7.9·10 ¹²
Stickstoffmonoxid	NO	30.006	10 ⁻¹² – 10 ⁻⁸	= 1ppt–10 ppb	10 ⁻⁹ – 10 ⁻⁵	2.6·10 ⁷ – 2.6·10 ¹¹
Stickstoffdioxid	NO ₂	46.006	10 ⁻¹² – 10 ⁻⁸	= 1ppt–10 ppb	10 ⁻⁹ – 10 ⁻⁵	2.6·10 ⁷ – 2.6·10 ¹¹
Ozon (trop.) (strat.)	O ₃	47.998	10 ⁻⁸ – 5·10 ⁻⁷	= 10–500 ppb	10 ⁻⁵ – 5.1·10 ⁻⁴	2.6·10 ¹¹ – 1.3·10 ¹³
Ammoniak		17.031	10 ⁻¹¹ – 10 ⁻⁹	= 10 ppt–1ppb	10 ⁻⁸ – 10 ⁻⁶	2.6·10 ⁸ – 2.6·10 ¹⁰
Wasserstoffperoxid	H ₂ O ₂	34.015	10 ⁻¹⁰ – 10 ⁻⁸	= 0.1–10 ppb	10 ⁻⁷ – 10 ⁻⁵	2.6·10 ⁹ – 2.6·10 ¹¹
Formaldehyd	CH ₂ O	30.026	10 ⁻¹⁰ – 10 ⁻⁹	= 0.1–1 ppb	10 ⁻⁷ – 10 ⁻⁶	2.6·10 ⁹ – 2.6·10 ¹⁰
Schwefeldioxid	SO ₂	64.065	10 ⁻¹¹ – 10 ⁻⁹	= 10 ppt–1ppb	10 ⁻⁸ – 10 ⁻⁶	2.6·10 ⁸ – 2.6·10 ¹⁰
Wasser	H ₂ O	18.015	stark variabel			Wasserkreislauf
\sum Gase = Luft		$M_L = 28.964$	1.0	= 100 %	1013.25	$2.55 \cdot 10^{19}$

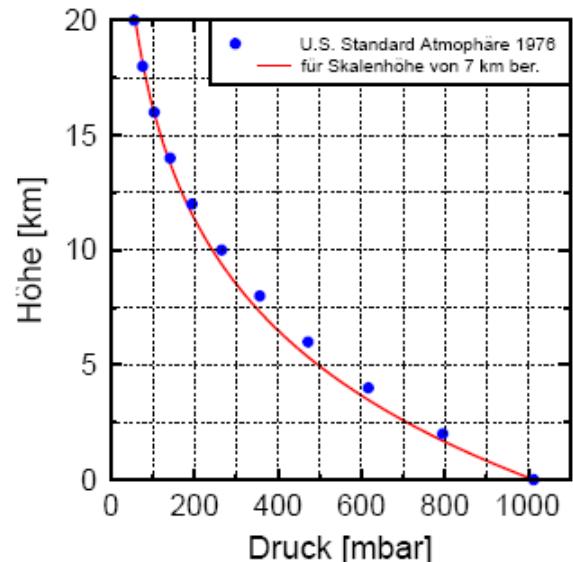
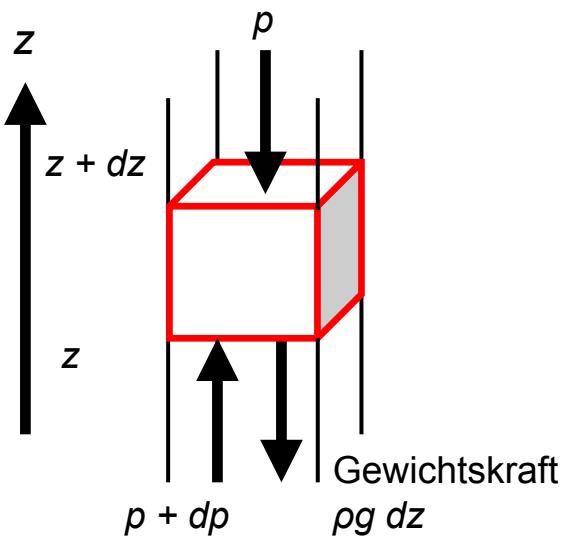
M_L ist die molare Masse von Luft.

* bedeutet mol Gas pro mol Luft = Moleküle Gas pro Luftmolekül = Partialdruck Gas pro Gesamtluftdruck.

† Quellen: Seinfeld und Pandis [1997]; Brasseur, Orlando, und Tyndall [1999]



- Der Druck der Atmosphäre ist bestimmt durch das Gewicht der über einer Fläche A lastenden vertikalen (Luft-) Säule: $p = F/A$.
- Druck wird in der **SI-Einheit** $\text{Pa} = \text{N/m}^2$ angegeben.
- Weitere gebräuchliche Einheiten:
 - $1 \text{ atm} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
 - $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ ($1 \text{ mb} = 100 \text{ Pa} = 1 \text{ hPa}$)
 - $1 \text{ torr} = 1 \text{ mm Hg} = 134 \text{ Pa}$.
- Der **mittlere atmosphärische Druck** (auf NN) beträgt **$1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$**
- Gesamtmasse der Atmosphäre: $m_a = 4pR^2P_S/g = 5.2 \cdot 10^{18} \text{ kg}$ (Erdradius $R = 6400 \text{ km}$). Gesamtzahl der Atmosphäre: $N_a = m_a/M_a = 1.8 \cdot 10^{20} \text{ mol}$.



Druckkraft = Gewichtskraft

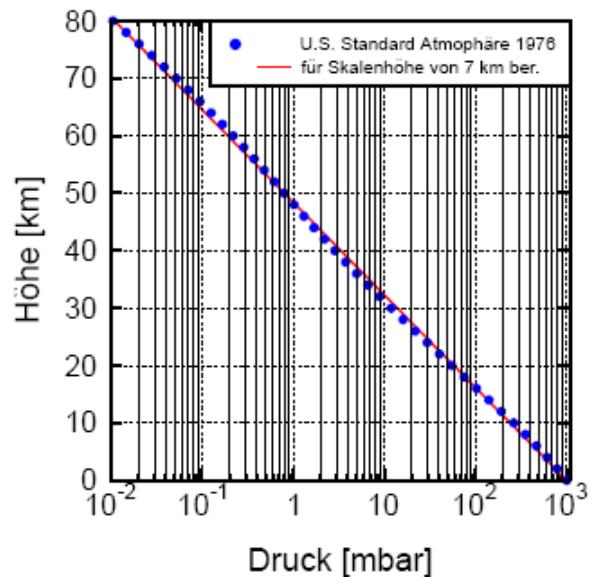
$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{nM}{V} = \frac{pM}{RT}$$

$$dp = -\rho \cdot g dz = -p \cdot \frac{M \cdot g}{RT} dz$$

$$p(z) = \int_{z_0}^z dp = \int_{z_0}^z -p \cdot \frac{M \cdot g}{RT} dz = p_0 \exp\left(-\frac{M \cdot g}{RT} z\right)$$

mit Druck p , Dichte ρ , Erdbeschleunigung g , Höhe z , Masse m , Molmasse M , Molzahl n , Volumen V , allg. Gaskonstante R , Temperatur T

Skalenhöhe
 $H_0 \approx 7-8 \text{ km}$



1. Hauptsatz der
Wärmelehre:
 $dU = dQ + dW$

$$dU = C_v dT$$

$$dQ = dU - dW = C_v dT + pdV$$

Für ein Mol eines idealen
Gases:
 $d(pV) = pdV + Vdp = RdT$

$$\begin{aligned} &= -Vdp + (C_v + R) dT \\ &= -(RT/p)dp + C_p dT \end{aligned}$$

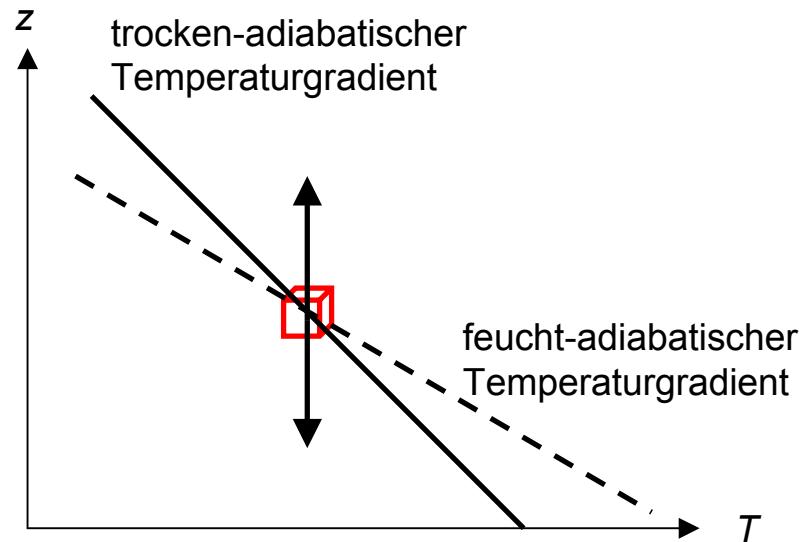
Adiabatische Prozesse
(ohne Wärmeaustausch):
 $dQ = 0$

$$\begin{aligned} &= - (Mg)dz + C_p dT \\ &= 0 \end{aligned}$$

Barometrische
Höhenformel:
 $dp/p = (Mg/RT)dz$

Trocken-adiabatischer Temperaturgradient

$$\begin{aligned} dT/dz &= -Mg/C_p & \text{mit } C_p = 28,97 \text{ J/(K mol)} \\ &= -g/c_p & \text{mit } c_p = C_p/M = 1,00 \text{ J/(K g)} \\ &= -9,8 \text{ K/km} \end{aligned}$$

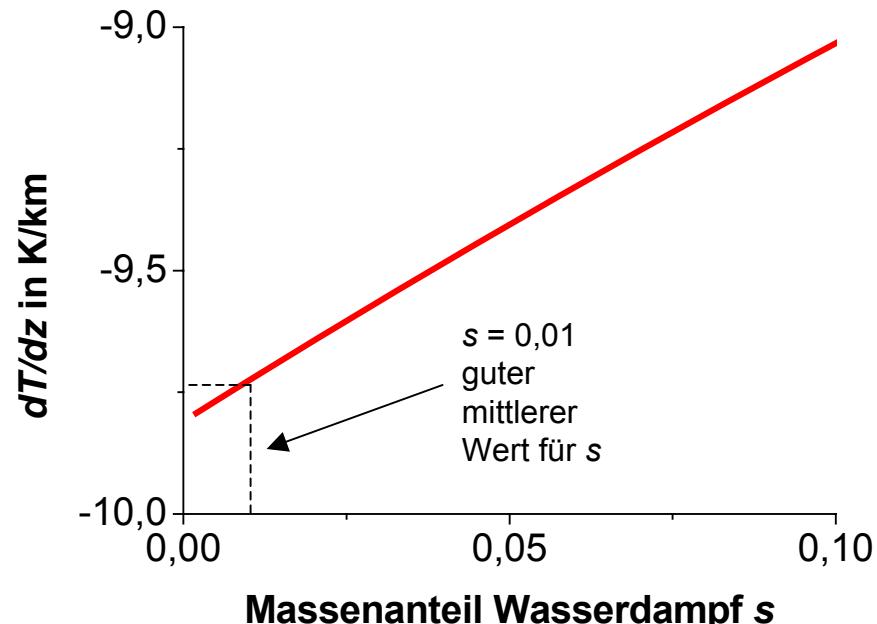


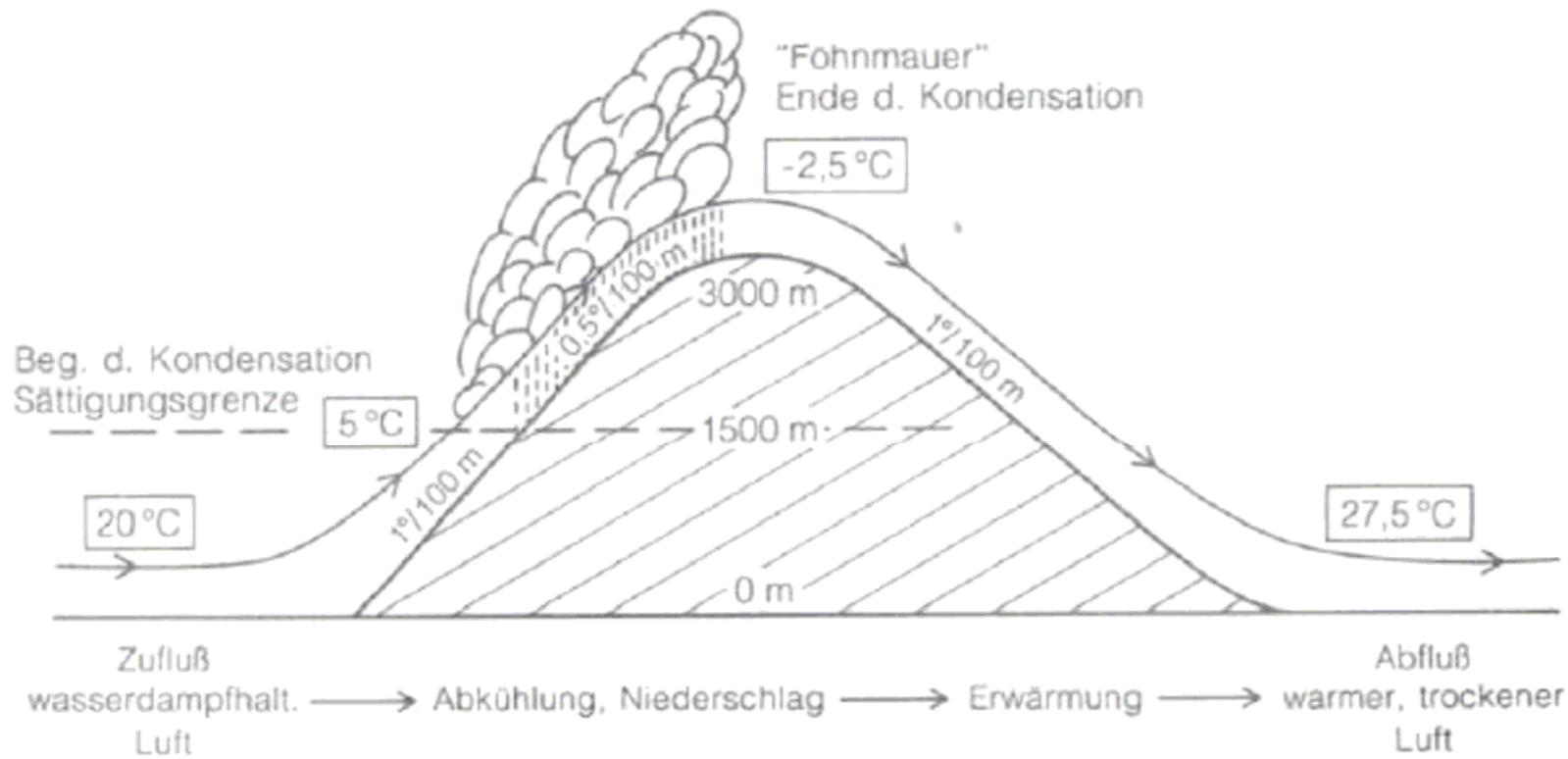
Feucht-adiabatischer Temperaturgradient

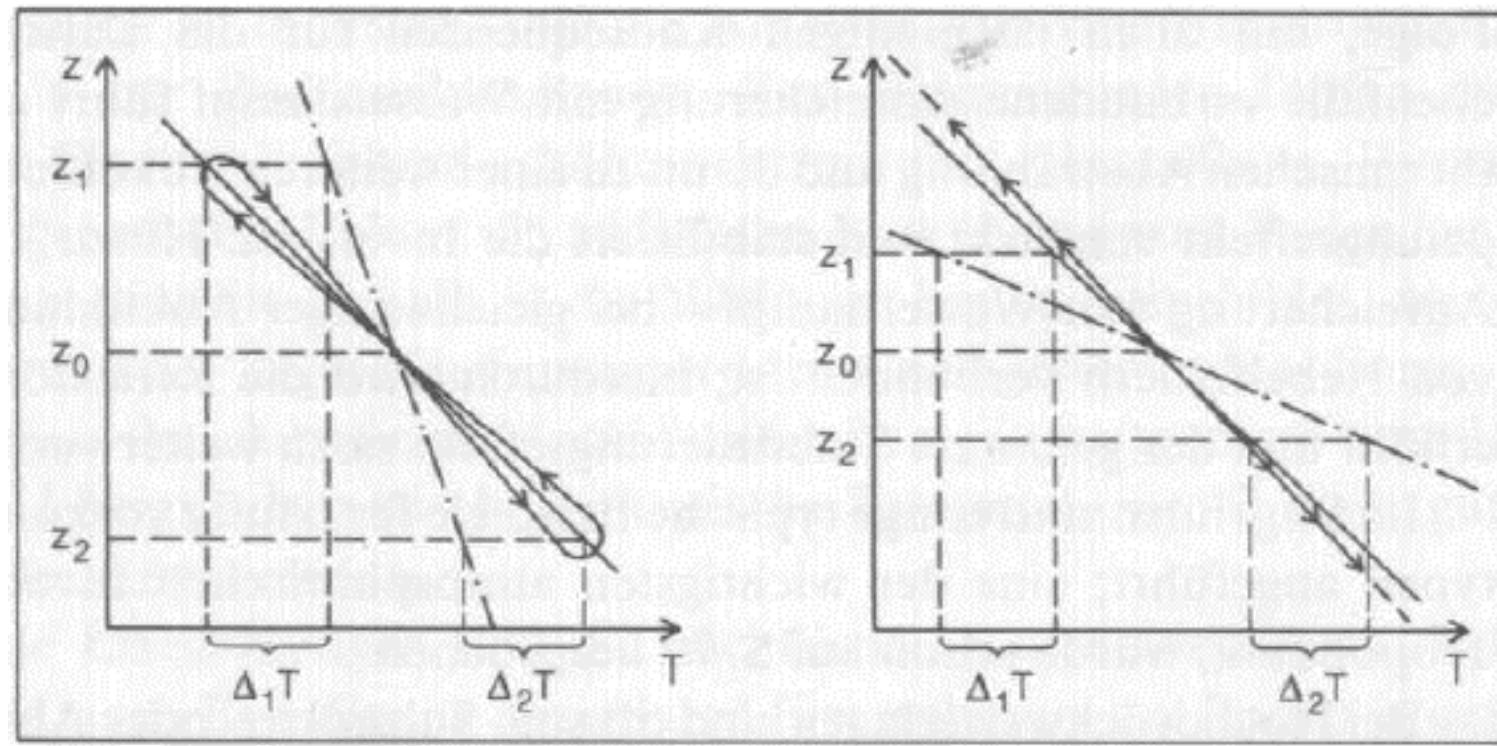
$$dT/dz = -g/(c_{pw} s + c_{pl} (1-s))$$

mit dem Massenanteil von Wasserdampf in
Luft (spezifische Feuchte)

$$s = M_{\text{Wasserdampf}}/(M_{\text{Wasserdampf}} + M_{\text{Luft}})$$







stabile Schichtung

instabile Schichtung

Schichtungsstabilität: links stabile Schichtung, rechts instabile Schichtung. Die durchgezogene Linie stellt die Adiabate dar, auf der das Luftpaket verschoben wird, die strichpunktierte Gerade kennzeichnet den Verlauf der Umgebungstemperatur.

Vertikale Beschleunigung eines Luftpaketes:

$$F = ma = V\rho \frac{d^2z}{dt^2} = V(\rho^* - \rho)g$$

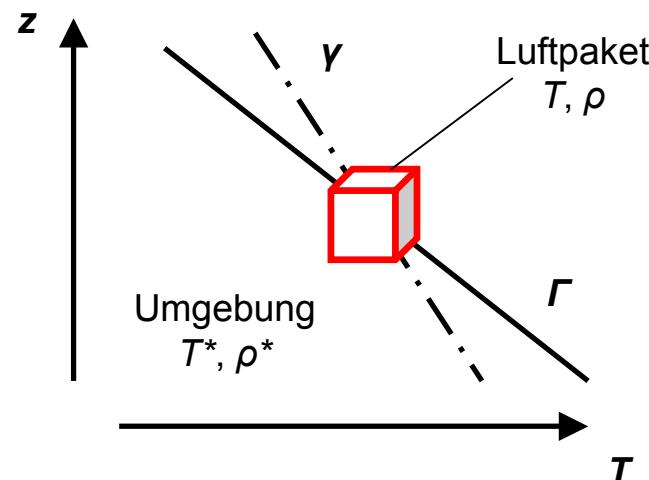
$$\frac{d^2z}{dt^2} = \left(\frac{\rho^* - \rho}{\rho} \right) g$$

Mit $\rho \sim 1/T$ (ideale Gasgleichung) ergibt sich:

$$\frac{d^2z}{dt^2} = \left(\frac{T - T^*}{T^*} \right) g \approx g \left(\frac{\Gamma - \gamma}{T_0} \right) z$$

→ harmonischer Oszillator mit der Frequenz :

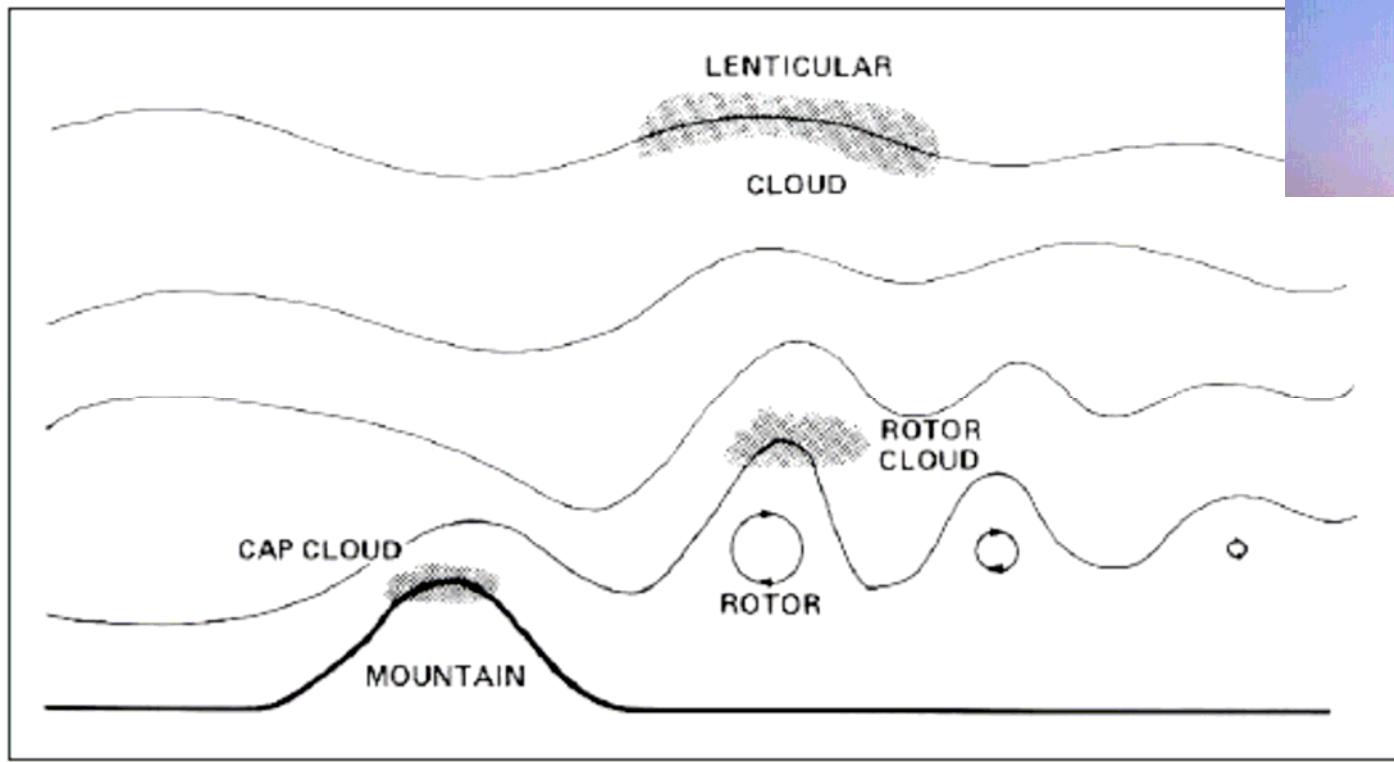
$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(\Gamma - \gamma)g}{T_0}}$$



$$T(z) = T_0 - \Gamma \cdot z$$

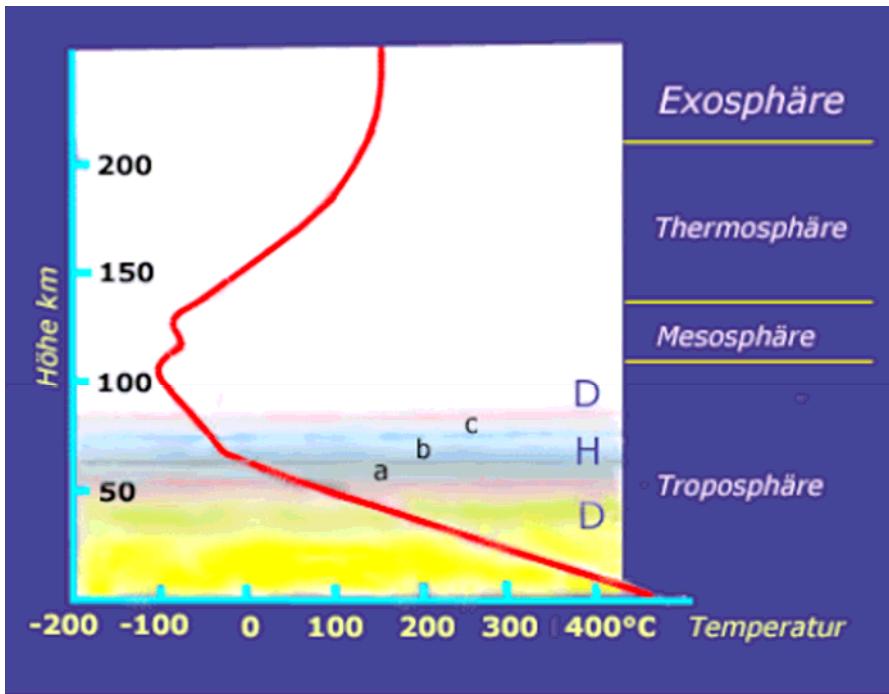
$$T^*(z) = T_0 - \gamma \cdot z$$

Entstehung von Leewellen an einem Gebirge. Infolge dieser Wellen kann es zur Bildung von Polaren Stratosphärenwolken durch adiabatische Abkühlung im aufsteigenden Teil der Welle kommen.

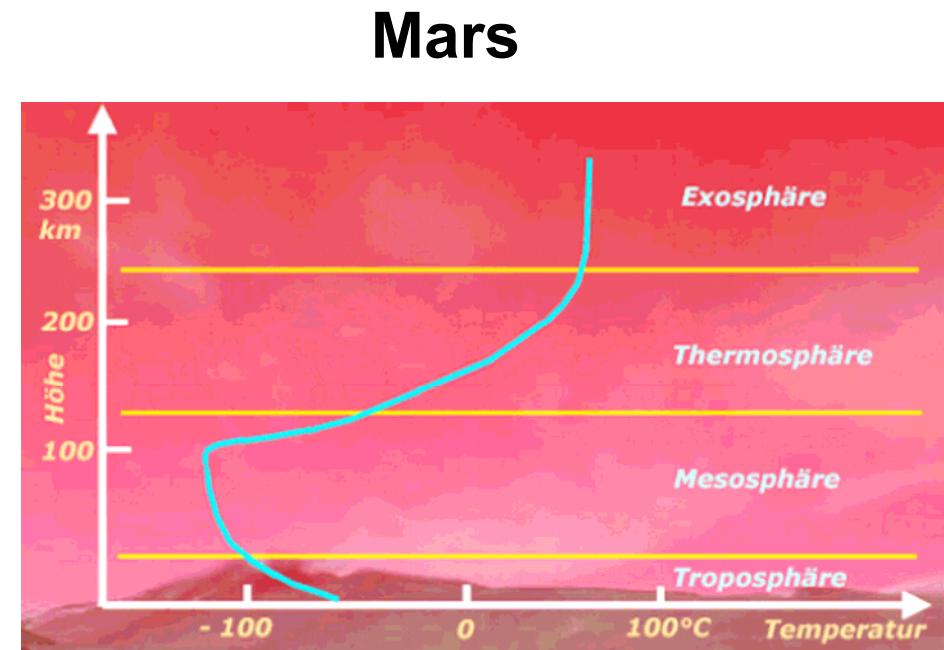




Mittlerer Abstand zur Sonne / 10^8 km	108	150	228
Länge eines Jahres	225	1	1,88
Länge des Tages	243	1	1,03
mittlerer Planetenradius / km	6049	6371	3390
mittlere Dichte g/cm³	5,23	5,52	3,96
Oberflächen-temperatur / K	732	288	223
Treibhauseffekt / K	466	33	3
Druck 10^5 Pa	90	1	0,007
Zusammensetzung der Atmosphäre / %	CO ₂ (0,96) N ₂ (0,035) SO ₂ (1,5 10 ⁻⁴) H ₂ O (1 10 ⁻⁴)	N ₂ (0,78) O ₂ (0,21) Ar (0,0 1)	CO ₂ (0,95) N ₂ (0,03) Ar (0,015)

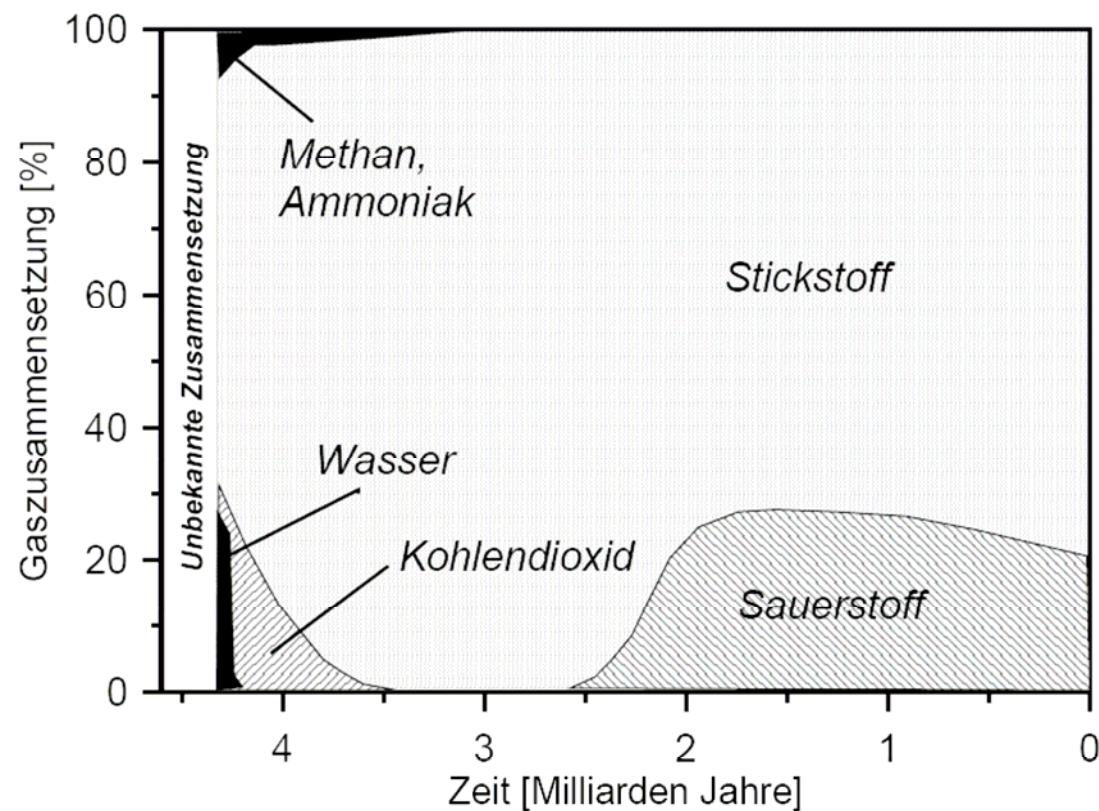


Venus

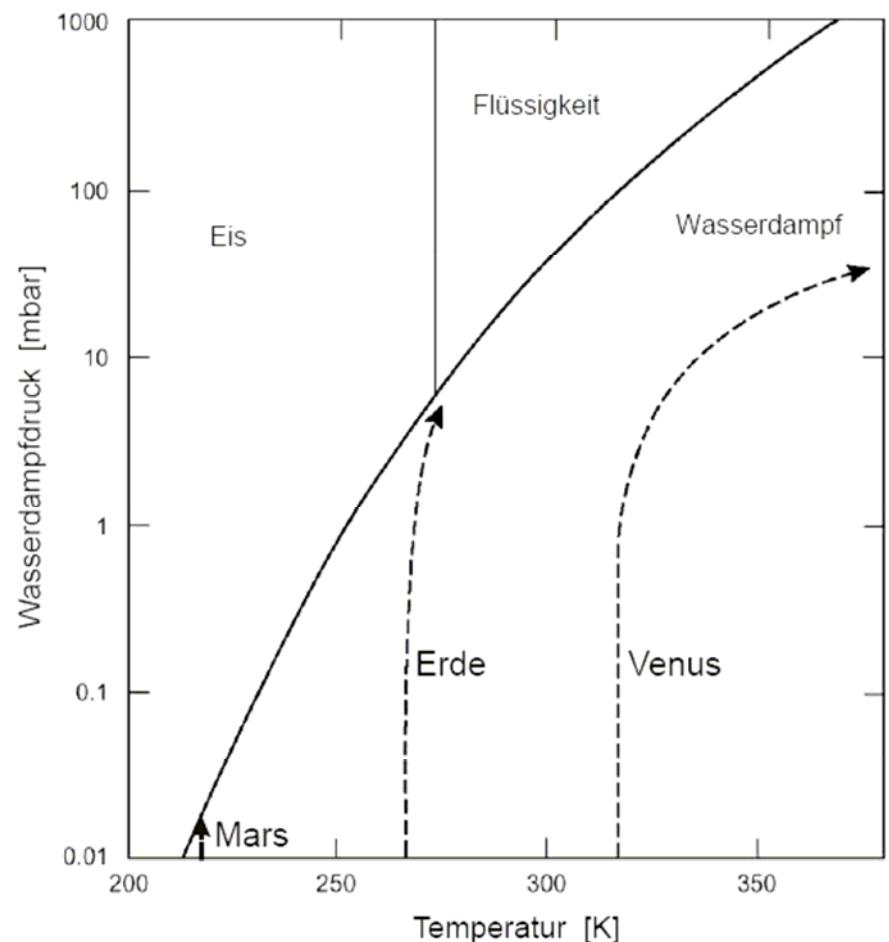


Mars

- Die Uratmosphäre der Erde (u. a. von Venus und Mars) bei ihrer Entstehung vor ca. 4,5 Mrd. Jahren bestand aus N_2 , CH_4 , NH_3 , H_2O und CO_2 .
- Auswaschung von CO_2 in der Erdatmosphäre durch flüssiges Wasser.
- Bindung von CO_2 im globalen C-Kreislauf.
- Anreicherung von Sauerstoff in der Erdatmosphäre durch die Entwicklung von Leben auf der Erde vor ca. 2,5-2 Mrd. Jahren.



- Wasser wird i. a. als Grundvoraussetzung für Leben angesehen.
- Das Wasser auf Venus, Erde und Mars stammt aus Entgasungen aus dem Planeteninneren.
- Während auf der Venus aufgrund von Druck und Temperatur Wasser nur im gasförmigen Aggregatzustand vorkommt (und zudem aus der Atmosphäre entweicht), kommt es auf dem Mars nur in Form von Eis vor. Lediglich auf der Erde kommt Wasser in allen drei Aggregatzuständen vor.
- Flüssiges Wasser wiederum ist wesentlicher Antriebsmotor für den globalen C-Kreislauf.



Evolution der Temperatur von Mars, Erde und Venus im Phasendiagramm von Wasser.

