

Einführung in die Meteorologie Teil I

Struktur der Atmosphäre

**Entwicklungsgeschichte, Bestandteile und
vertikale Struktur der Atmosphäre**

➤ **Wird erst später im Semester diskutiert.**

Zusammensetzung der Atmosphäre bis 100 km Höhe

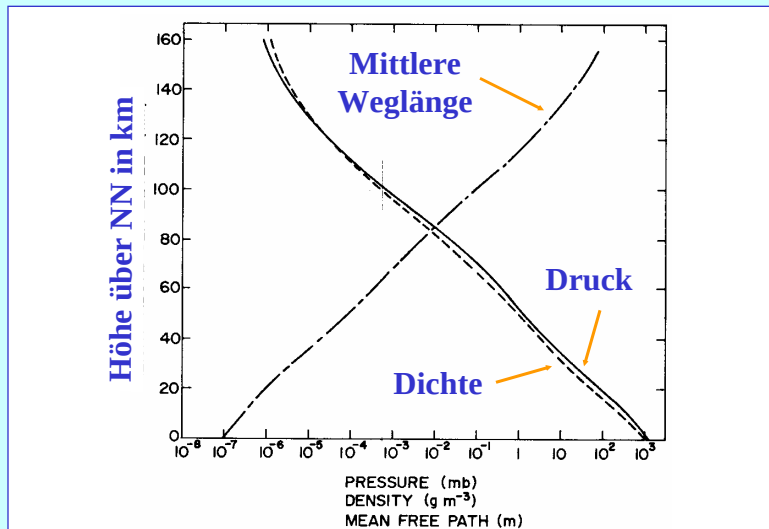
Gas	Molekülmasse in g/mol	Anteil am Gesamt- volumen an der trockenen (feuchten) Luft	Anteil der Gesamtmasse der trockenen Luft
Stickstoff (N ₂)	28,02	78,08% (74,96%)	75,51%
Sauerstoff (O ₂)	32,00	20,95% (20,11%)	23,15%
Argon (Ar)	39,94	0,93% (0,89%)	1,28%
Wasserdampf (H ₂ O)	18,02	— (4,00%)	
Kohlendioxid (CO ₂)	44,01	347 ppm = 347·10 ⁻⁴ %	
Neon (Ne)	20,18	18,2 ppm	
Helium (He)	4,00	5,2 ppm	
Methan (CH ₄)	16,04	2,0 ppm	
Krypton (Kr)	83,80	1,1 ppm	
Wasserstoff (H ₂)	2,02	0,5 ppm	
Distickstoffoxid (N ₂ O)	44,02	0,5 ppm	
Ozon (O ₃)			
Troposphäre	48,00	0,06 ppm	
Stratosphäre	48,00	5-10 ppm	

Höhenabhängigkeit von Luftdruck und Luftdichte

- Die Änderung von Druck und Dichte mit der Höhe ist wesentlich größer als die Schwankung dieser Größen im zeitlichen Verlauf an einem bestimmten Ort.
- 300 m Höhenänderung entsprechen dem Unterschied zwischen Hochdruck- und Tiefdruckgebiet.
- Mittelt man die Meßwerte von verschiedenen Orten zeitlich, so bleibt nur noch die Höhenabhängigkeit übrig.
- Diese Mittelwerte für alle Weltstationen über einem Jahr definieren die **Standardatmosphäre**.

die Standardatmosphäre

Die Standardatmosphäre

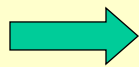


Bis zu einer Höhe von 100 km ergibt sich, daß der Logarithmus des Luftdrucks p mit zunehmender Höhe z linear abnimmt.

Höhenabhängigkeit von Luftdruck und Luftdichte

- Bis zu einer Höhe von 100 km ergibt sich, daß der Logarithmus des Luftdrucks p mit zunehmender Höhe z linear abnimmt, d. h.

$$\log[p(z)] \approx \log[p(0)] - Bz$$



$$p(z) \approx p(0)\exp[-z/H]$$

H = Skalenhöhe
 $\approx 7 \text{ km}$

$$\rho(z) \approx \rho(0)\exp[-z/H]$$

Druck Einheiten

- Der mittlere Druck in Meereshöhe $p(0) = 1013,25 \text{ hPa}$ (**Hektopascal**; $1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa}$).
- Ein Druck von 1 Pa entsteht, wenn auf eine Fläche von 1 m^2 die Kraft von 1 N (Newton) wirkt.
- In der meteorologischen Literatur wird oft noch das Millibar verwendet ($1000 \text{ mbar} = 1 \text{ bar}$; ein Bar war die alte Druckeinheit).
- Die Umrechnung ist jedoch einfach: $1 \text{ mbar (mb)} = 1 \text{ hPa}$!

Die Atmosphäre ist sehr Dünn

- Aus $\rho(z) \approx \rho(0)\exp[-z/H]$ folgt, daß sich die Hälfte der Atmosphärenmasse unterhalb des 500 mb -Niveaus befindet.

Masse unter der Höhe z pro Einheitsfläche

$$\int_0^z \rho(z) dz = \rho(0) \int_0^z e^{-z/H} dz = \rho(0)H(1 - e^{-z/H})$$

Gesamte Masse $\int_0^\infty \rho(z) dz = \rho(0)H$

$$\frac{\text{Masse unter Höhe } z}{\text{Gesamte Masse}} = 1 - e^{-z/H} = \frac{1}{2}$$

Die Atmosphäre ist sehr Dünn

$$\frac{\text{Masse unter Höhe } z}{\text{Gesamte Masse}} = 1 - e^{-z/H} = \frac{1}{2}$$

$$\Rightarrow e^{z/H} = 2 \quad \Rightarrow z = \underbrace{0,69}_{\ln 2} H = 4.8 \text{ km}$$

bei dieser Höhe, $p = 1013,25 \exp(-0,69) = 508 \text{ mb}$

- Die Hälfte der Atmosphärenmasse liegt in einer Höhe weniger als 1/1000 des Erdradius, d.h. die Atmosphäre ist wirklich dünn.
- 99% der Atmosphärenmasse liegt unter 30 km Höhe.

Höhenabhängigkeit der Zusammensetzung der Atmosphäre

- Die Zusammensetzung des Gasgemisches Luft in verschiedenen Höhen ist, weit entfernt von Quellen und Senken, davon abhängig, welcher von zwei physikalischen Vorgängen den größeren Einfluß hat:
 - **Molekulare Diffusion oder Durchmischen auf Grund von Gasströmungen** -
- Die Diffusion entsteht durch die ständigen, rein zufälligen Molekülbewegungen im Erdschwerefeld.
- Weil die Schwerkraft zur Erde hin zunimmt, sammeln sich die schwereren Bestandteile des Gasgemisches hier an:
- d. h. die mittlere Masse nimmt mit der Höhe allmählich ab.

Höhenabhängigkeit der Zusammensetzung der Atmosphäre 2

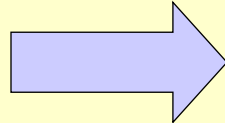
- Die einzelnen Gaskomponenten können unabhängig voneinander betrachtet werden.
- Die Dichte jedes Gases verringert sich exponentiell, aber mit unterschiedlichen Skalenhöhen H . Je schwerer das Gas, desto kleiner ist H .
- In großen Höhen sind also die leichtesten Gase (**Wasserstoff** und **Helium**) angereichert.
- Die molekulare Diffusion gewinnt an Bedeutung, wenn
 - i. die mittlere Geschwindigkeit der zufälligen Molekülbewegungen oder
 - ii. die mittlere freie Weglänge zwischen den Molekülzusammenstößen zunehmen.

Eine Analogie

- Der Einfluß der mittleren freien Weglänge läßt sich vielleicht mit einer Analogie veranschaulichen:
- Es ist am Nachmittag wesentlich schwieriger als am späten Abend, sich durch das Menschengewühl am Marienplatz hindurch durchzudringen, wenn die Weglänge zweier Zusammenstöße recht groß ist.
- In der Atmosphäre nimmt das Gedränge von unten nach oben ab.

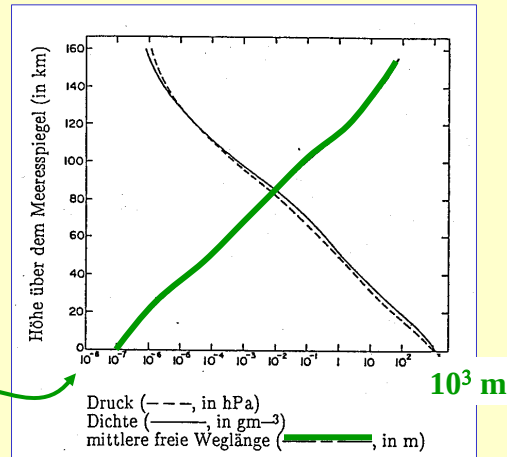
Höhenabhängigkeit der Zusammensetzung der Atmosphäre 3

- In den untersten Luftschichten ist die mittlere freie Weglänge sehr klein.



Konsequenzen

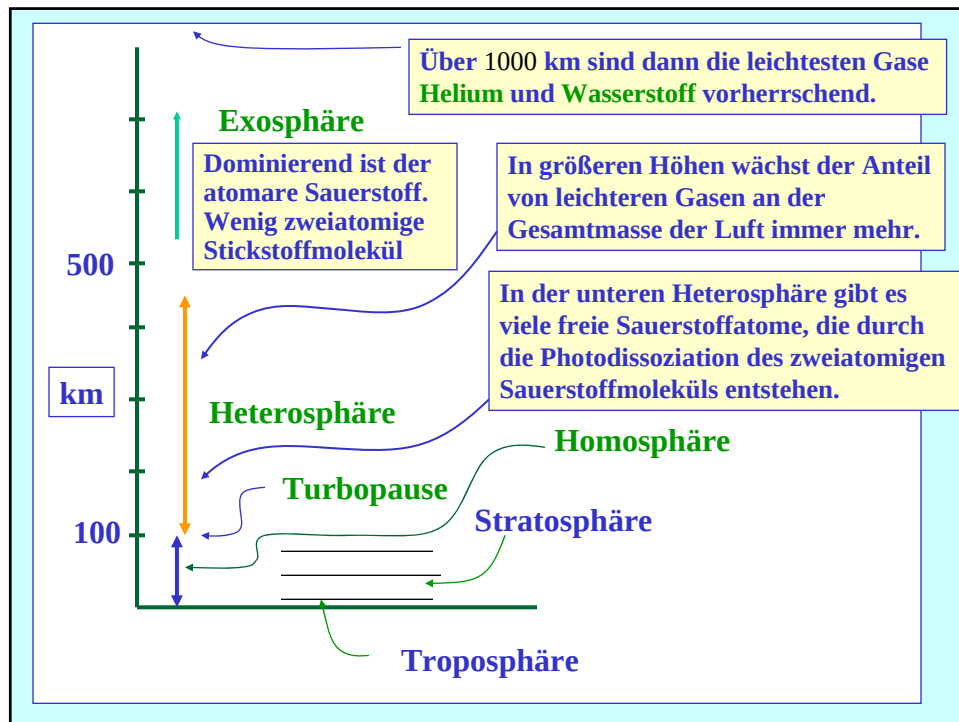
10^{-8} m



10^3 m

Höhenabhängigkeit der Zusammensetzung der Atmosphäre 4

- Die Trennung der leichten von schweren Bestandteilen durch molekulare Diffusion geht deshalb sehr langsam.
- Die ständig stattfindende, viel schnellere turbulente Gasaustausch führt sofort wieder zu einer gleichförmigen Dichte.
- Daraus ergibt sich eine Höhenunabhängige Gaszusammensetzung.
- Die mittlere freie Weglänge nimmt jedoch mit der Höhe stark zu - die Zunahme ist exponentiell.
- Daraus folgt, daß über 100 km Höhe die molekulare Diffusion bestimmend ist **Heterosphäre**.



Entweichen der leichten Bestandteile

- Über 500 km sind Molekülzusammenstöße wegen der großen mittleren freien Weglänge relativ selten.
- Unter diesen Bedingungen können einige der Moleküle, die sich zufällig gerade schnell bewegen, den Schwerfeld der Erde entkommen und in den Weltraum entweichen.
- Die dazu nötige Fluchtgeschwindigkeit ist für alle Moleküle gleich groß - sie hängt nur von der Höhe z ab.
- Damit ein Teilchen mit der Masse m entweichen kann, muß dessen kinetische Energie $\frac{1}{2}mv^2$ größer als das Gravitationspotential GMm/r sein.

M = Erdmasse, r = die Entfernung vom Erdmittelpunkt und G = die Gravitationskonstante.

Entweichen der leichten Bestandteile 2

- Als **Fluchtgeschwindigkeit** ergibt sich

$$v_f = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

- In einer Höhe von 500 km über der Erdoberfläche beträgt:

$$r = (6,37 + 0,5) \times 10^6 \text{ m}$$

- Wenn man in die Formel einsetzt, erhält man:

$$v_f = [2 \times 6,67 \times 10^{-11} \times 5,97 \times 10^{24} \div 6,87 \times 10^6] \approx 11 \text{ km/s}$$

Entweichen der leichten Bestandteile 3

- Die wahrscheinlichste der verschiedenen Geschwindigkeiten von mehreren Teilchen mit der Masse m ist.

$$v_o = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$$

k = Boltzmann_Konstante
 $1,38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$
 T = absolute Temperatur

- Die kinetische Energie $\frac{1}{2}mv_o^2$ hat für alle Bestandteile den konstanten Wert kT .
- $\Rightarrow$ die leichteren Moleküle bewegen sich mit einer höheren Durchschnittsgeschwindigkeit.
- Die Geschwindigkeiten einer Anzahl von Teilchen mit gleicher Masse sind um den wahrscheinlichsten Wert v_o statistisch verteilt.

Entweichen der leichten Bestandteile 4

- Nach der kinetischen Gastheorie haben 2% der Moleküle eine größere Geschwindigkeit als v_0 und nur eines von 10^4 erreicht eine Geschwindigkeit größer als $3v_0$.

v	Bruckteil der Gasmoleküle mit mindestens v
v_0	0,5
$2v_0$	0,02
$3v_0$	10^{-4}
$4v_0$	10^{-6}
$6v_0$	10^{-20}
$10v_0$	10^{-50}
$15v_0$	10^{-90}

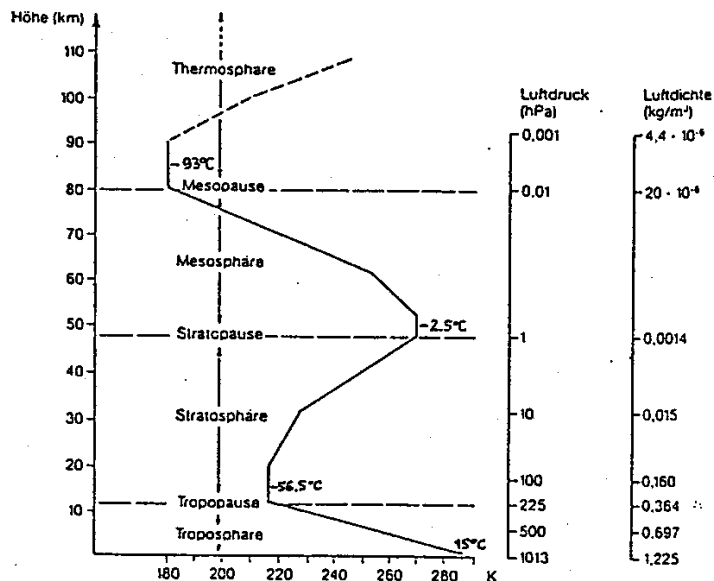
Entweichen der leichten Bestandteile 5

- In der Erdatmosphäre herrschen in der unteren **Exosphäre** Temperaturen von 600 K, wo bestimmte Gase entweichen können.
- Nach $v_0 = \sqrt{2kT/m}$ ergibt sich für ein Wasserstoffatom ($m = 1,67 \times 10^{-27}$ kg) die wahrscheinlichste Geschwindigkeit von 3 km/s.
- Im statistischen Mittel befindet sich unter einigen hunderttausend Atomen ein Atom mit einer Geschwindigkeit von mindestens 11 km/s.
- In erdgeschichtlichen Zeiträumen führt dieser Effekt zu einem völligen Verschwinden des Wasserstoffs aus der Atmosphäre.

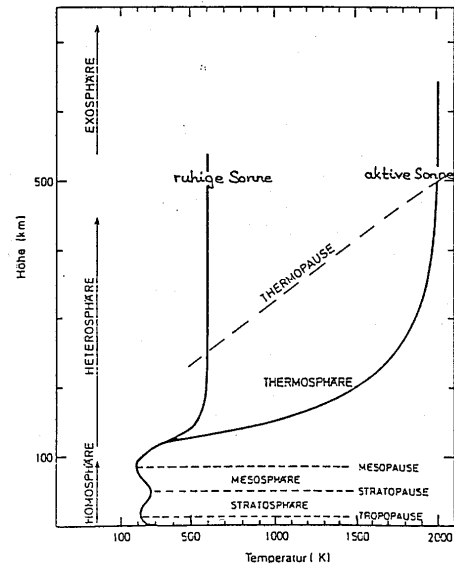
Entweichen der leichten Bestandteile 6

- Geringe Mengen von Wasserstoff sind dennoch vorhanden, weil ständig neuer Wasserstoff produziert wird (z.B. durch Photodissoziation des Wassers).
- Die gleiche Rechnung liefert für atomaren Sauerstoff ($m = 16 \times 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$) die wahrscheinlichste Geschwindigkeit von $v_0 = 0.8 \text{ km/s}$.
- Nur eines von 10^{-84} Atomen erreicht die Fluchtgeschwindigkeit.
- Die Wahrscheinlichkeit für das Entweichen von Sauerstoff ist also sehr klein und kann selbst für die Dauer der gesamten Erdgeschichte vernachlässigt werden.

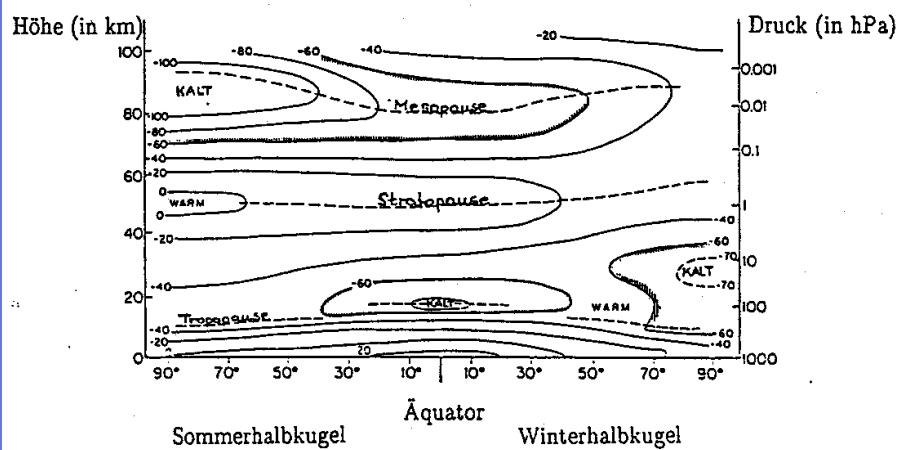
Mittlere vertikale Temperaturverteilung



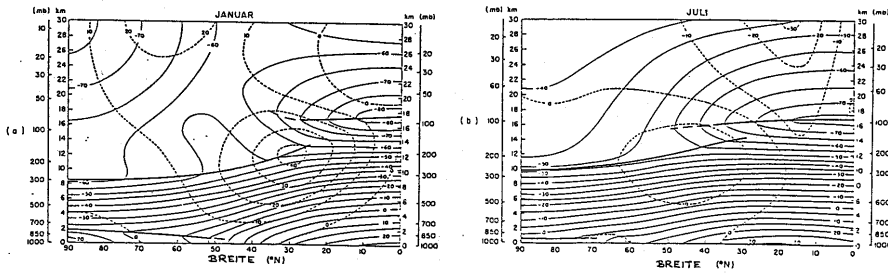
Temperaturschwankungen



Breitenabhängige und zeitliche Temperaturschwankungen



Großräumige Windsysteme in der Erdatmosphäre



Großräumige Windsysteme in der Erdatmosphäre

