

Physik der Atmosphäre I

Script der Vorlesung während des Wintersemesters 2001/2002, Dienstag,
14:15 - 17:45, Institut für Umweltphysik, INF 229, Seminarraum 108

Thomas Wagner

Gliederung

1. Einführung

1.1 Motivation, Definitionen

1.2. Einführende Beispiele

1.2.1 Bedeutung verschiedener physikalischer Konzepte während der
Entstehung und Entwicklung einer konvektiven Wolke

1.2.2 Entdeckung der Atmosphäre als chaotisches System

1.2.3 Barometrische Höhenformel

1.3 Literatur

2. Strahlungsprozesse in der Atmosphäre

2.1 Motivation

2.2 Grundlegende physikalische Gesetze und Größen

2.3 Einfache Anwendungen

2.4 Beispiele für komplexe Strahlengänge in der Atmosphäre

2.5 Strahlungsbilanz des Systems Erde, (natürlicher) Treibhauseffekt

2.6 Die Evolution der Atmosphäre der solaren Einstrahlung und des
Erdklimas. Die Atmosphären von Venus, Erde und Mars.

2.7 Anthropogener Einfluß auf das Erdklima, Klimaänderungen

3. Atmosphärische Schichtung & Dynamik

3.1 Temperaturschichtung der Atmosphäre

3.2 Bewegungsgleichung in fluiden Systemen (Navier-Stokes-Gleichung)

3.2.1 Herleitung der mittleren freien Weglänge

3.2.2 Kräfte auf ein Luftpaket

3.2.3 Verschiedene Näherungslösungen der Navier-Stokes-Gleichung

3.3 Konzept der (Potentiellen) Vorticity

3.4 Zyklonendynamik

3.5 Diffusion und Turbulenz

3.6 Dynamik der bodennahen Schichten

4. Hydrologischer Kreislauf

4.1 Verdunstung

4.2 Niederschlag

5. Isotopenhydrologie, Stabile Isotope des Wassers

Die Erde vom Weltall aus gesehen

**Tiros 1
1960**



...erstes Bild der Erde

...Die Erde ist blau

**Apollo 11
1969**



**Apollo 17
1972**



~50%
der
Erde
sind mit
Wolken
bedeckt

**Apollo 7
1968**



...Die Atmosphäre ist dünn

Abbildung 1.1 Die Atmosphäre ist eine dünne Haut...

1. Einführung

1.1 Motivation, Definitionen

Warum Atmosphärenphysik?

=> **wegen der Bedeutung und der speziellen Eigenschaften der Atmosphäre, z.B.:**

- Die Atmosphäre ist Teilsystem des Systems Erde
- Die Atmosphäre ist eine äußerst dünne 'Haut' (Schicht von 0.3 mm auf 1 m²)
- Die Atmosphäre hat erstaunliche Historie (z.B. Paradox der schwachen Sonne)
- Die Atmosphärische Zirkulation ist komplex, die Atmosphäre ist ein chaotisches System
- Die Spurenstoffzusammensetzung ist wesentlich für entscheidende atmosphärische Vorgänge (Energiehaushalt, Absorption, Emission und Streuung von Strahlung, Kondensation); sie ist äußerst variabel.

Warum ist die Kenntnis atmosphärischer Vorgänge wichtig?

- Die Atmosphäre ist *direkter* Lebensraum des Lebens außerhalb des Ozeans
- Sie bietet Schutz vor UV-Strahlung (Ozonschicht)
- Atmosphärische Bestandteile sind auch direkte Bestandteile des Stoffwechsels des irdischen Lebens (Sauerstoff, Kohlendioxid, etc.)
- Die Atmosphäre bestimmt Stoff- und Energiekreisläufe (Wärmeausgleich zwischen Äquator und Polen, Wasserkreislauf, Spurenstoffkreisläufe), die Atmosphäre verbindet verschiedene Teilsysteme des Systems Erde (z.B. Klimasystem)
- Die Atmosphäre ist Grundlage von Kommunikation (z.B. Schall, Kurzwelle)

Physikalische Methoden zur Erkundung und Beschreibung der Atmosphäre

- Hydrodynamik, Navier-Stokes-Gleichung
- Quantenmechanik, Wechselwirkung von Strahlung und Materie
- Thermodynamik, Phasenübergänge, Kondensation und Verdunstung
- Zustandsgrößen und vertikale Struktur der Atmosphäre
- Reibung an Grenzflächen
- Löslichkeit von Stoffen in Flüssigkeiten (Wolkentröpfchen, Aerosole)

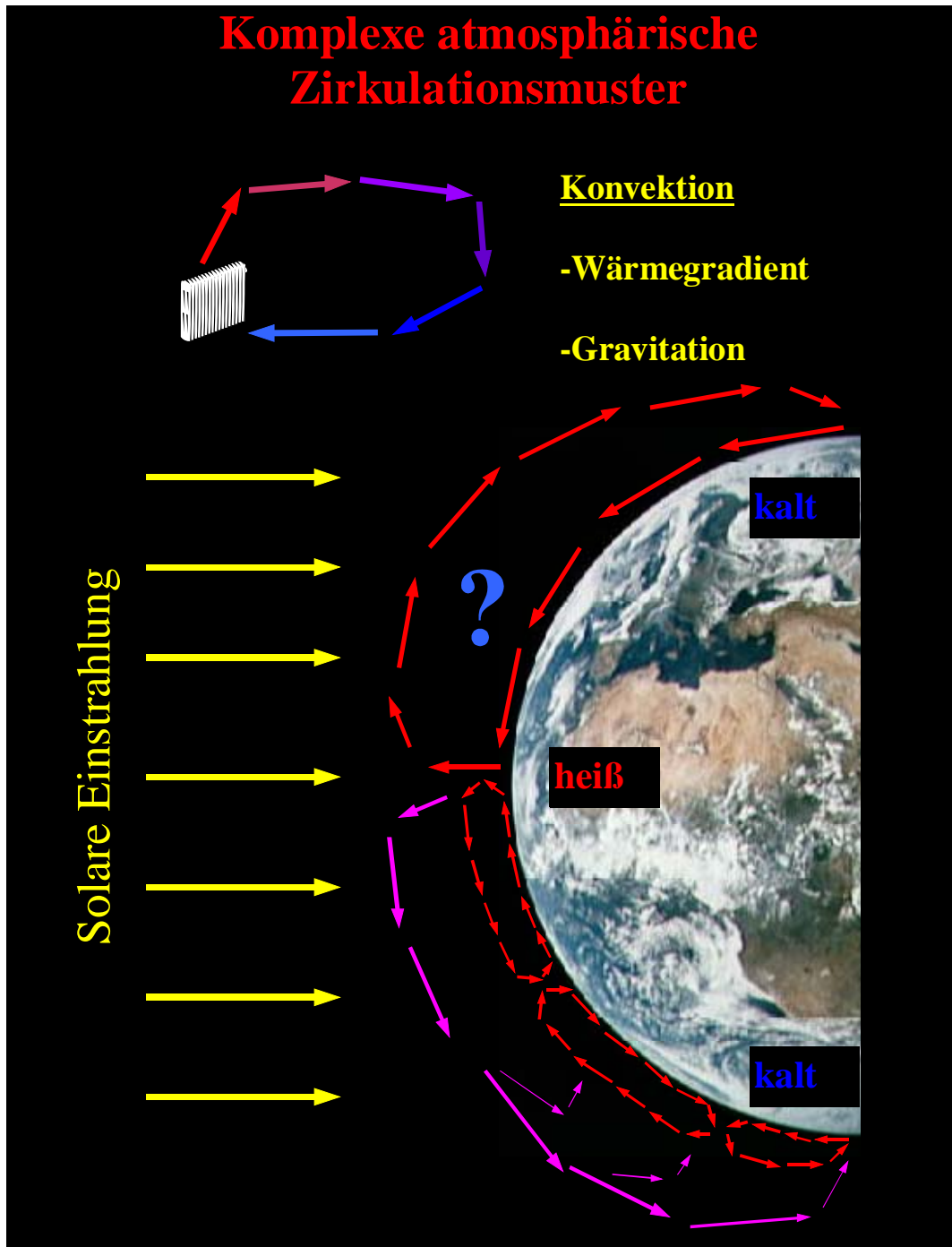


Abbildung 1.2 Die solare Strahlung ist die Triebkraft der atmosphärischen Strömungen. Warum stellt sich in der Erdatmosphäre eine mehrfach unterteilte konvektive Zirkulation ein (kleine rote Pfeile) und nicht nur eine große Konvektionszelle?

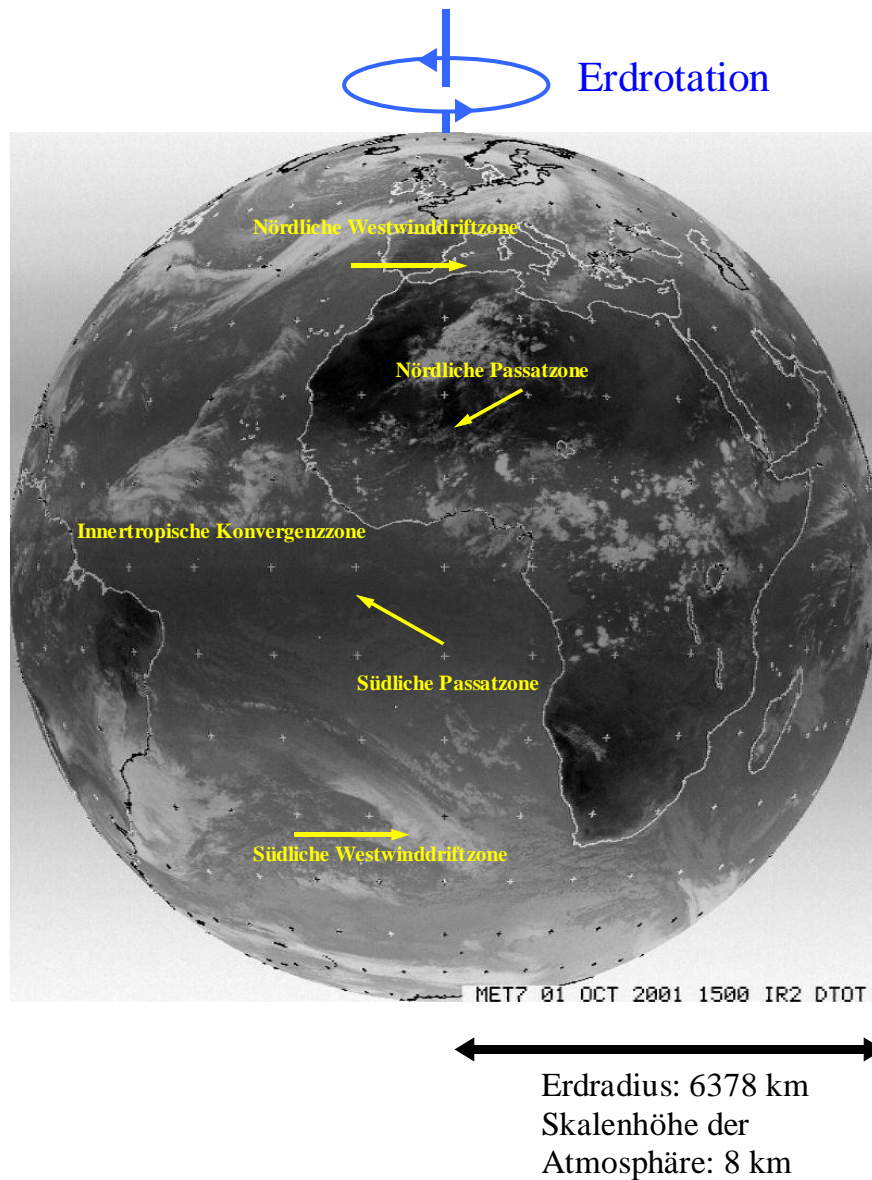


Abbildung 1.3 Die Erdrotation bewirkt bezogen auf die Erdoberfläche Scheinkräfte (Corioliskraft), die die Windrichtungen beeinflussen.

1.2. Einführende Beispiele

1.2.1 Bedeutung verschiedener physikalischer Konzepte während der Entstehung und Entwicklung einer konvektiven Wolke:

1.

Erwärmung der Erdoberfläche durch solare Einstrahlung (Absorption)



2.

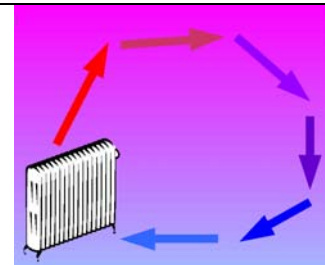


$+\Delta Q$
 $+\text{H}_2\text{O}$

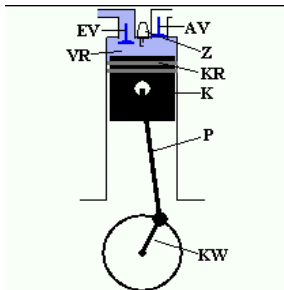
Heizung der Luft (Zufuhr von fühlbarer und latenter Wärme), Zunahme der spezifischen Feuchte (H_2O -Partialdruck) durch Verdunstung

3.

Ausdehnung der Luft, Verringerung der Dichte, Konvektives Aufsteigen



4.



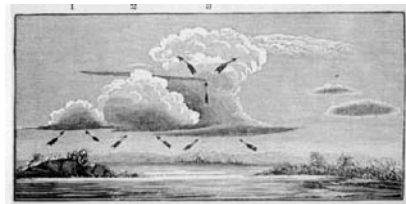
Adiabatisches Ausdehnen während des Aufstiegs, Arbeitsleistung wird innerer Energie entzogen (Abnahme der Temperatur mit der Höhe)

5.

H_2O -Sättigungsdampfdruck sinkt unter aktuellen H_2O -Partialdruck \Rightarrow Kondensation (homogene Kondensation erfordert äußerst große Übersättigung), Art und Anzahl der Kondensationskeime bestimmt das Tröpfchengrößenspektrum einer Wolke



6.



Kondensationswärme wird dem Luftpaket zugeführt, Verstärkung der Konvektion

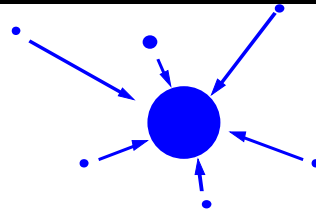
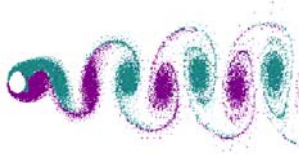
7.

Größenwachstum der Wolkentröpfchen wird durch verschiedene Prozesse kontrolliert

-kleine Tröpfchen: Diffusion

-große Tröpfchen: Tröpfcheneinfang

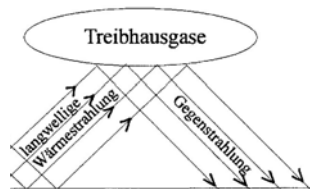
Aerosole werden aus der Atmosphäre ausgewaschen

**8.**

Abhängig von der Tröpfchengröße fällt Regen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten zu Boden (Stokes/Newton-Reibung)

9.

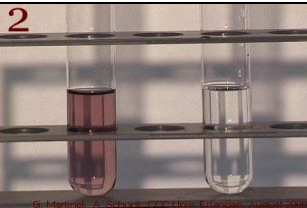
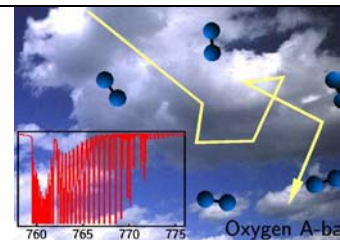
Wolken erhöhen die planetare Albedo (weniger solare Strahlung wird von der Erde absorbiert) => Kühlung

**10.**

Wolken erhöhen die thermische Gegenstrahlung (weniger irdische Infrarotstrahlung entweicht ins All) => Heizung

11.

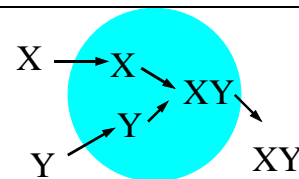
Wolkentröpfchen stellen zusätzliche Streuzentren dar, Photonen aus der Sonne können in Wolken mehrfach gestreut werden (Mie-Streuung), Beschreibung als Photonendiffusion (Lichtwege bis > 100 km)



12. In Wolkentröpfchen können Luftbestandteile gelöst werden (z.B. SO_2) => Saurer Regen

13.

Wolkentröpfchen stellen Oberflächen und Volumina für heterogene chemische Reaktionen zur Verfügung (z.B. Ozonloch-Chemie)



1.2.2 Entdeckung der Atmosphäre als chaotisches System

(<http://library.thinkquest.org/3120/text/c-his1.htm?tqskip=1>)

When was chaos first discovered? The first true experimenter in chaos was a **meteorologist, named Edward Lorenz. In 1960**, he was working on the problem of weather prediction. He had a computer set up, with a set of twelve equations to model the weather. It didn't predict the weather itself. However this computer program did theoretically predict what the weather might be.

One day in 1961, he wanted to see a particular sequence again. To save time, he started in the middle of the sequence, instead of the beginning. He entered the number off his printout and

left to let it run. When he came back an hour later, the sequence had evolved differently. Instead of the same pattern as before, it diverged from the pattern, ending up wildly different from the original. Eventually he figured out what happened. The computer stored the numbers to six decimal places in its memory. To save paper, he only had it print out three decimal places. In the original sequence, the number was .506127, and he had only typed the first three digits, .506.

By all conventional ideas of the time, it should have worked. He should have gotten a sequence very close to the original sequence. A scientist considers himself lucky if he can get measurements with accuracy to three decimal places. **Surely the fourth and fifth, impossible to measure using reasonable methods**, can't have a huge effect on the outcome of the experiment. Lorenz proved this idea wrong. This effect came to be known as the butterfly effect. The amount of difference in the starting points of the two curves is so small that it is comparable to a butterfly flapping its wings.

This phenomenon, common to chaos theory, is also known as **sensitive dependence on initial conditions**. Just a small change in the initial conditions can drastically change the long-term behavior of a system. Such a small amount of difference in a measurement might be considered experimental noise, background noise, or an inaccuracy of the equipment. Such things are impossible to avoid in even the most isolated lab. With a starting number of 2, the final result can be entirely different from the same system with a starting value of 2.000001. It is simply impossible to achieve this level of accuracy - just try and measure something to the nearest millionth of an inch! From this idea, Lorenz stated that it is impossible to predict the weather accurately. However, this discovery led Lorenz on to other aspects of what eventually came to be known as chaos theory.

1.2.3 Barometrische Höhenformel

- Wie 'dick' ist die Atmosphäre? Und: welches Maß für die Dicke ist hier geeignet?
- Wovon hängt die Dicke ab? (z.B. Masse der Atmosphäre, Molekulargewicht, Temperatur, Gravitation, allgemeine Gaskonstante, Stärke der Erdrotation, etc.)

=> **Wird die Atmosphäre dicker, wenn man die Masse der Atmosphäre erhöht?**

Grundannahmen:

- A) $p = F/A$ p Druck, F Kraft, A Fläche
- B) $F = mg$ m Masse, g Graviationskonstante
- C) $pV = RT$ V Molvolumen, T Temperatur,
R Universelle Gaskonstante (8.315 Ws/K· Mol)

$$p = mg/A = m/V \cdot gz = \rho gz \quad \rho \text{ Luftdichte, } z \text{ Höhe} \quad (1,1)$$

$$dp = \rho g dz \quad (1,2)$$

$$dp = (Mp)/(RT) \cdot g dz \quad M \text{ Molmasse} \quad (1,3)$$

Integration von p_0 bis p und z_0 bis z ergibt:

$$p = p_0 \exp[-(Mg)/(RT)z] \quad (1,4)$$

$$= p_0 \exp[-(Mg)/(kT)z] \quad \begin{array}{l} M \text{ Masse eines Moleküls,} \\ k \text{ Boltzmann-Konstante (1.38e-23 Ws/K)} \end{array}$$

$$kT/Mg = RT/Mg = Z \approx 8 \text{ km} \quad \text{Skalenhöhe der Atmosphäre}$$

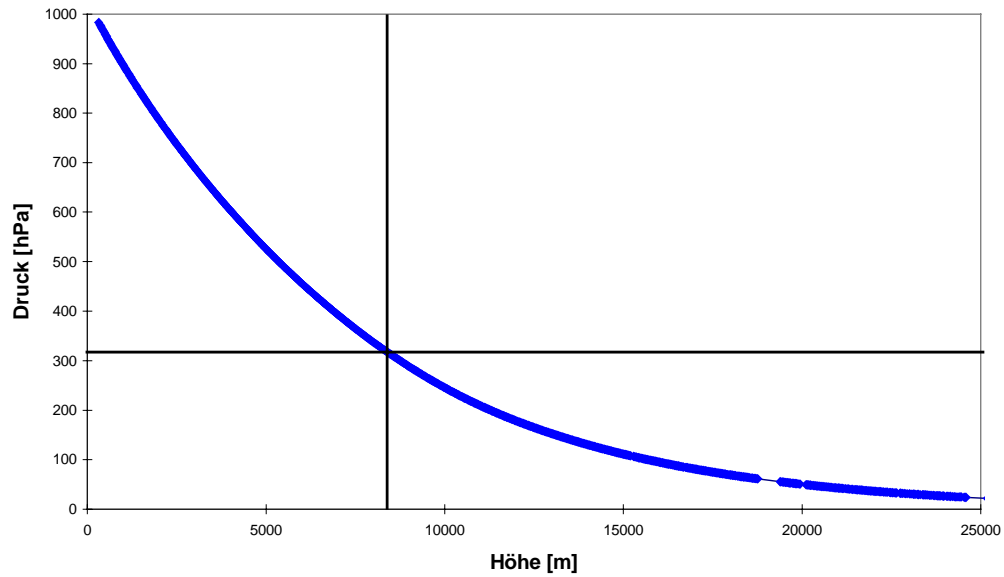
=> Die Skalenhöhe ('Dicke') hängt von der Molmasse, der Graviation, sowie der Temperatur ab

=> Verschiedene Gase haben unterschiedliche Skalenhöhen:

Argon:	$Z \approx 6 \text{ km}$
Sauerstoff:	$Z \approx 7.5 \text{ km}$
Wasserstoff:	$Z \approx 120 \text{ km}$

Aufgrund von Turbulenz findet Entmischung aber erst oberhalb etwa 80 km statt (Heterosphäre)

Daten einer Radiosonde, Kiruna, 09.02.1994



Daten einer Radiosonde, Kiruna, 09.02.1994

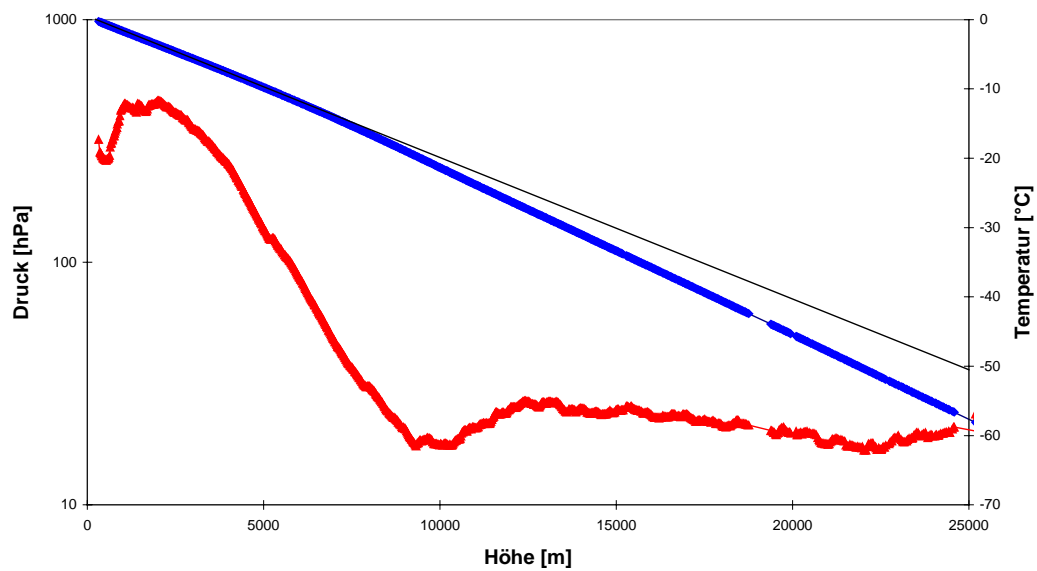


Abbildung 1.4 Luftdruck und Temperatur als Funktion der Höhe im arktischen Winter (unten: logarithmische Darstellung des Drucks).

1.3 Literatur

(IUP xxxx: Buch - Nr. in der Bibliothek des Institutes für Umweltphysik, INF 229, 4. Stock, Raum 410)

Basis der Vorlesung:

1. PHYSIK unserer Umwelt, Die Atmosphäre, Walter Roedel, Springer Verl., Heidelberg, 3. Auflage, 2000, Eine ausgezeichnete Übersicht der physikalischen Prozesse in der Atmosphäre (IUP 1511, 1780).

Zur Vertiefung:

2. The Physics of Atmospheres, J. T. Houghton, Cambridge University Press, Cambridge 2nd Edition, 1986. Eine (recht knapp formulierte) Übersicht der physikalischen Prozesse in der Atmosphäre von den Grundlagen bis zu Klimafragen.
3. Atmospheric Chemistry and Physics, J.H. Seinfeld and S.N. Pandis, John Wiley & Sons, Inc., 1998, Dickes Buch über Dynamik und Chemie von Troposphäre und Stratosphäre (IUP 1724).
4. The Chemistry of Atmospheres, R.P. Wayne, Oxford University Press, 1985. Beschäftigt sich überwiegend mit chemischen Aspekten, insbes. der Sauerstoff- und Ozonchemie (IUP 1512).

Populärwissenschaftliche Werke:

5. Die Luft in der wir leben, E. Keppler, R. Piper Verlag, München, 1988. Populäre Darstellung der physikalischen und chemischen Vorgänge in der Atmosphäre.
6. Atmospheric Change: An Earth Systems Perspective, T. E. Graedel, Paul J. Crutzen, W.E. Freeman and Company New York 1993 (IUP 1469).
7. GAIA, A new look at life on earth, J. E. Lovelock, Oxford University Press, 1989, Eine ganz grundsätzliche (und etwas provozierende) Betrachtung des "Systems Erde".