

Zusammenfassung vom Fach 10 „Atmosphäre“:

Erde:

- Erdumfang am Äquator: **40'000 Km**
- Erdbeschleunigung: **9.81 m/sec² = 1g** (auf Meereshöhe bei 45° Latitude)
(Einheit ist Beschleunigung = Geschwindigkeit / Zeit)

Beeinflussende Faktoren:

- Geographische Breite (Latitude)
- Höhe
- Form der Erde
- Zusammensetzung des Erdinneren (Massenkonzentration „MASCON“)
- Fliehkraft infolge Erddrehung

Die Erde zieht auch die Atmosphäre an.

Atmosphäre:

Zusammensetzung:

78% Stickstoff

21 % Sauerstoff

1% Wasserdampf, Edelgase (u.a. Argon) und Kohlendioxyd

[Oberhalb 50 km gibt es Schichten wo Ionisierung stattfindet. D.h. durch UV-Strahlung werden Gasmoleküle in positive Gasionen und freie Elektronen zerlegt. Mann nennt diese Schichten auch Ionosphäre.]

Eigenschaften von Fluiden (bewegte Gase und Flüssigkeiten)

Gase: leicht komprimierbar

Flüssigkeiten (kaum komprimierbar)

Gase und Flüssigkeiten geben den auf sie wirkenden Druck in alle Richtungen weiter

$$\text{Druck} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}} \quad \text{Pressure } \mathbf{p} = \frac{\mathbf{F}}{\mathbf{A}}$$

Im SI (System International d'Unites):

Luftfahrt:

N/m² (Newton pro Quadratmeter)

Pa (pascal)

hPa (Hecto Pascal)

mbar (Millibar)

bar (Bar)

Anglo-amerikanischen Sprachgebiet:

Hg (Inches Quecksilbersäule)

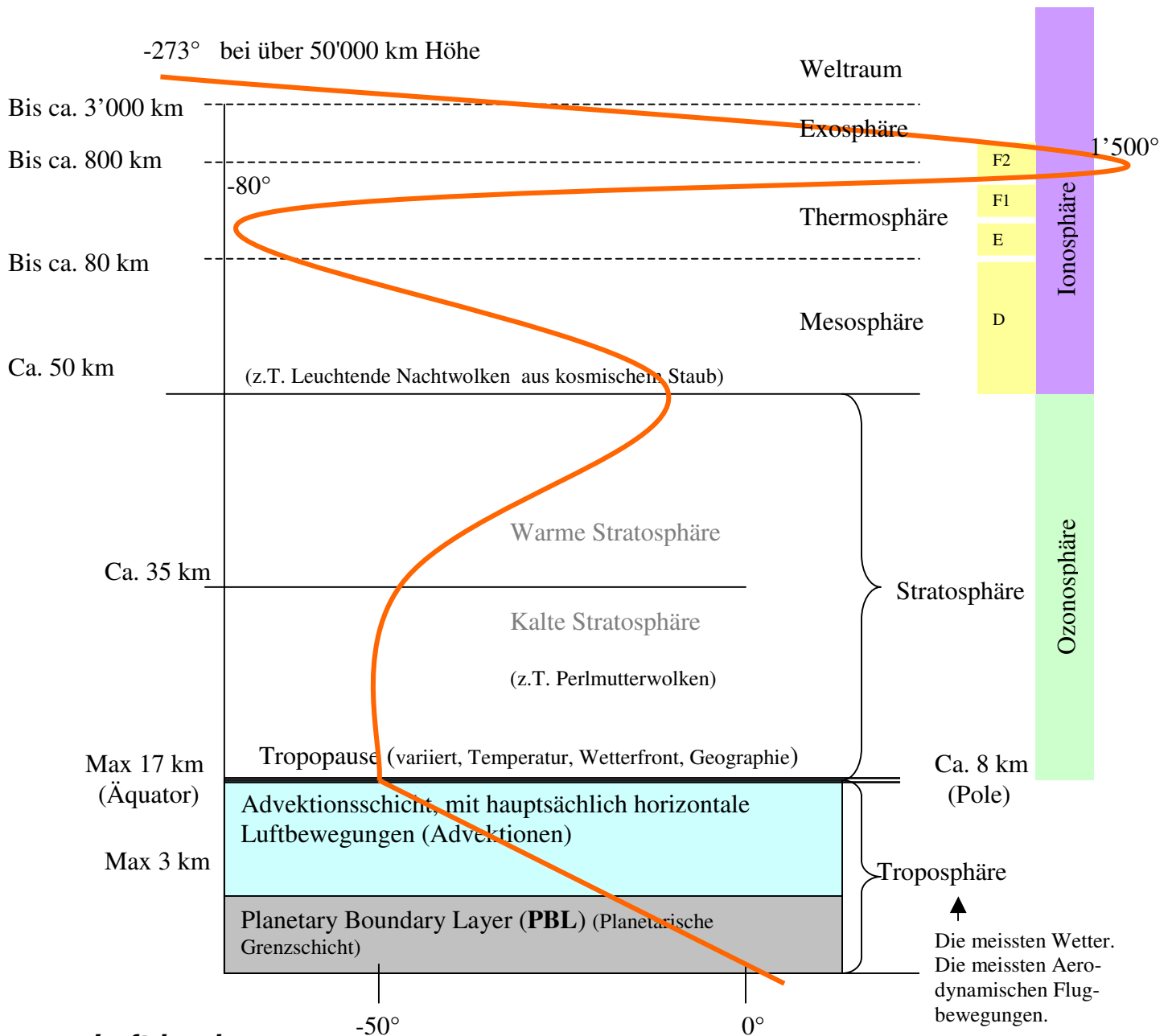
psi (pound per square inches)

Meteorologie:

1 N/m² = 1 Pa

1 hPa = 100 Pa

1 hPa = 1 mbar (früher)



Luftdruck

Atmosphärischer Druck [N] wird auf eine Flächeneinheit [m²] geübt, durch die Erdanziehungskraft. Dieser Luftdruck schwankt, wegen folgender Faktoren:

- Bewegungen von Luftmassen
- Änderungen der Temperatur
- Feuchtigkeit der Luft.

Messung

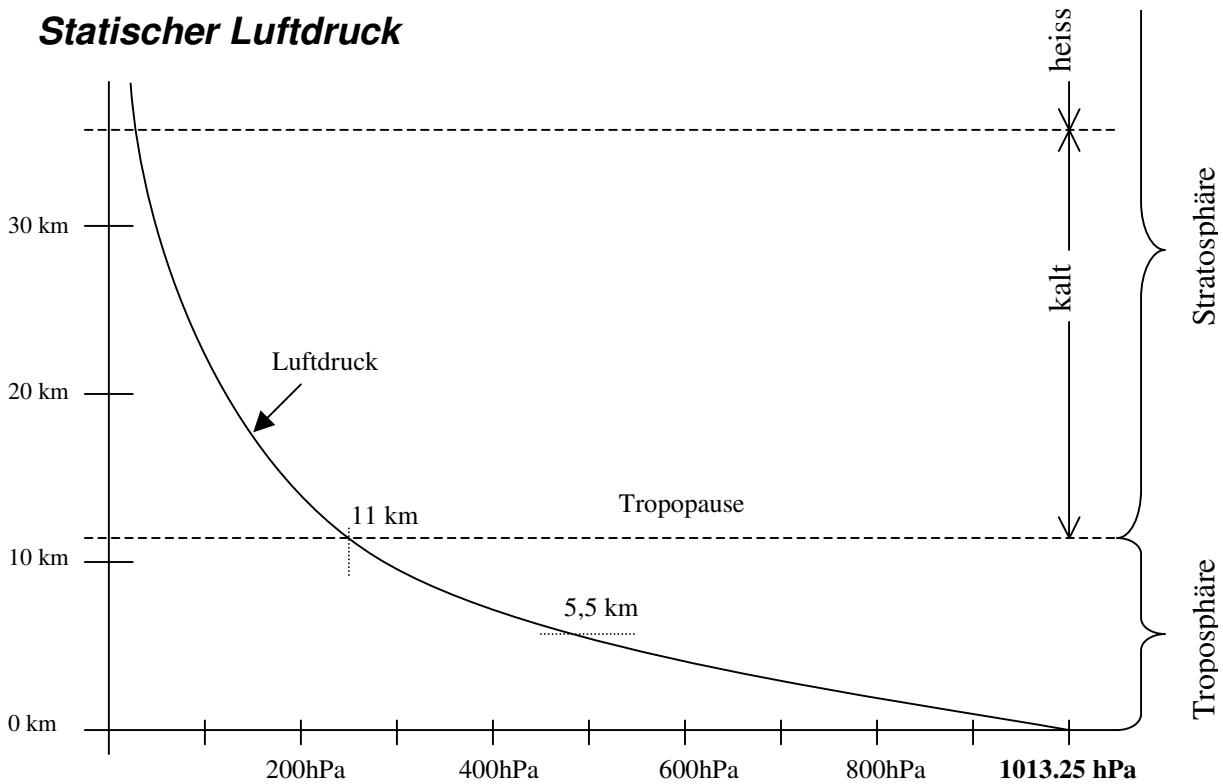
Quecksilberbarometer:

Quecksilber (Hg) Geschlossenes Glasrohr umgekehrt in offenem Gefäß.
Rohr ist luftleer.

Aneroidbarometer:

Aneroiddosen dehnen sich bei kleinerem Aussendruck zusammen. Mechanische Anzeige.

Statischer Luftdruck

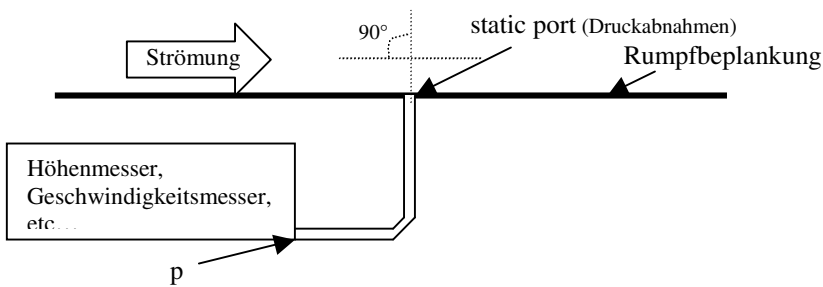


Luftdruck nimmt exponentiell ab:

- Meer = 1013.25 hPa
- 5,5 km = 1/2 1013.25 hPa
- 11 km = 1/4 1013.25 hPa
- 16,5 km = 1/8 1013.25 hPa

Gewicht der Luftsäule wirkt Druck auf die darunterliegende Luft. Auf Meereshöhe ist dies **1013.25 hPa** (oder 29.92 in Hg) Das Symbol für Standard Luftdruck auf Meereshöhe ist „ p_0 “

Messung des Statischen Luftdruckes:

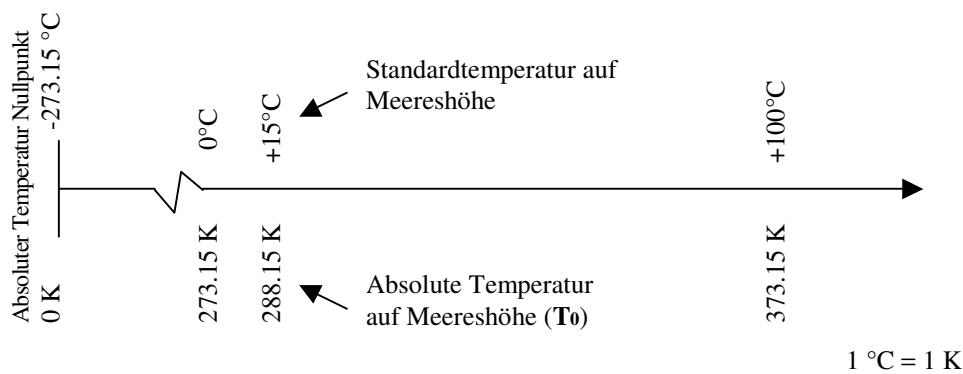
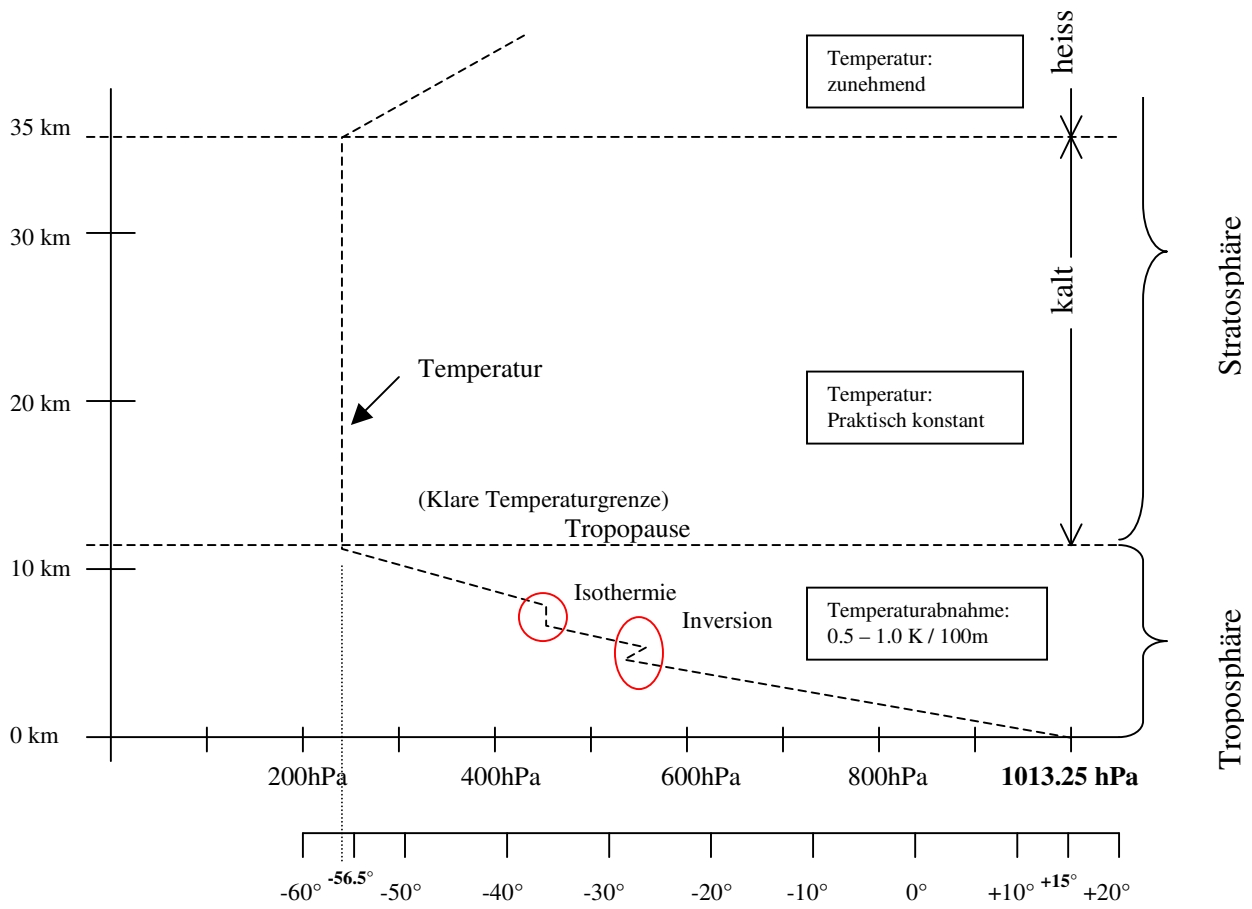


Lufttemperatur:

Temperatur ist ein Mass für den Mittelwert der kinetischen Energie der Gasmoleküle (Luftmoleküle). Erwärmung der Erde hauptsächlich durch die Sonne. Erdoberfläche wird durch Strahlung erwärmt, und damit die darüberliegende Luft. Darum Erdoberfläche am wärmsten (Ausnahme Inversionen). Durch Mischung (Wetter) werden auch die höheren Schichten erwärmt.

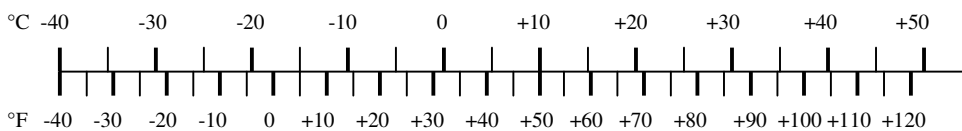
Tropopause:

Über den Polen auf 8 km Höhe, Temperatur -50°C
 Über mittleren Breiten auf 11 km Höhe, Temperatur -60°C
 Über dem Äquator auf 17 km Höhe, Temperatur -90°C



Aktuelle Temperatur ist **T** oder **OAT** (Outside Air Temperature)
 OAT wird per Temperaturfühler gemessen. (Langsame Flugzeuge: **Bimetallthermometer**)
 Absolute Temperatur, sowie Temperatur**differenz** werden in **K** (Kelvin) angegeben.

$$^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5} \cdot ^{\circ}\text{C} + 32 \quad ^{\circ}\text{C} = (^{\circ}\text{F} - 32) \cdot \frac{5}{9}$$



Luftdichte

Luftmasse die auf Meereshöhe 1m^3 einnimmt, dehnt sich in grosser Höhe auf ein grösseres Volumen aus. Luftdichte ist Masse (kg) einer Luftmenge pro Volumen (m^3)
Symbol „ ρ “ (rho) steht für Luftdichte. „ ρ_0 “ ist die Luftdichte auf Meereshöhe.

$$\text{Luftdichte } \rho = \frac{\text{Masse (kg)}}{\text{Volumen (m}^3\text{)}} \quad \text{„slugs per cubic foot“}$$

Luftdichte hängt vom Druck und der Temperatur ab:

- Bei abnehmendem Luftdruck und konstanter Temperatur wird die Luftdichte kleiner.
- Bei abnehmender Temperatur und konstantem Luftdruck wird die Luftdichte grösser.

$$\text{Luftdichte } \rho = \frac{\text{Luftdruck}}{\text{Gaskonstante} \cdot \text{absolute Temperatur}} = \frac{p}{R \cdot T}$$

Konstante Luft: $R = 287 \text{ J/kg K}$

Einfluss der Druckabnahme auf die Dichte ist grösser als der Einfluss der Temperaturabnahme.

BSP: Höhen für halben Luftdruck ($p/p_0 = 0.5$) und halbe Luftdichte ($\rho/\rho_0 = 0.5$) (in der ICAO Standardatmosphäre)

$$p/p_0 = 0.5 : \quad \text{Höhe} = 5477\text{m} = 17'970 \text{ ft} \quad (p = 506.62 \text{ hPa}, t = -20.6^\circ\text{C})$$

$$\rho/\rho_0 = 0.5 : \quad \text{Höhe} = 6663\text{m} = 21'860 \text{ ft} \quad (p = 430.48 \text{ hPa}, t = -28.3^\circ\text{C})$$

Da das Volumen einer Masse wird mit zunehmender Höhe grösser, nimmt die Luftdichte ab. Erwärmt sich ein Teil der Luftmasse, so wird die Dichte geringer (leichter) als die Dichte der Umgebung. Die erwärmte Luft steigt.

Viskosität (Zähigkeit)

Nützlich im Zusammenhang mit der Strömung um einen Körper. Die Viskosität beeinflusst Reibungs- und Ablöseeffekte.

Dynamische Viskosität

Die dynamische Viskosität, resp. Scherzähigkeit, ist im allgemeinen nur von der Temperatur abhängig. Man bezeichnet sie mit dem griechischen Buchstaben „ μ “ (mü).

Bei hohen Temperaturen ist die Viskosität der Luft grösser.

Kinematische Viskosität

Für viele Gebiete der Aerodynamik ist das Verhältnis zwischen der dynamischen Viskosität und der Dichte wichtig. Dieses Verhältnis nennt man **kinematische Viskosität** und bezeichnet sie mit „ ν “ (nü). (Wird gebraucht zur Berechnung der Reynold'schen Zahl, „Re-Zahl“)

Internationale ICAO-Standardatmosphäre (ISA)

ISA = Internationale Standard Atmosphäre = Mittelwerte auf 45° Latitude, für MSL (Mean Sea Level):
SI = System Internationale d'Unite

1. Luftdruck **760 Torr (mm Hg)**

760 Torr = 1013.25 hPa (nach SI festgelegter Druckeinheit) [1 hPa = 100 N/m²]

2. Temperatur **+15°C**

3. Temperaturgradient bis zur Tropopause **0.65 K/100m**

0.65 K/100m => Mittelwert zwischen

-1K/100 m in wolkenfreier Atmosphäre (isentropie Zustandsänderung) und

-0.5K/100 m in Wolken (geringere Temperaturabnahme infolge Kondensationswärme)

4. Tropopause auf 11 km mit -56.5°C

5. Gleichbleibende Temperatur oberhalb der Tropopause (bis ca. 35 km Höhe)

ISA-Standardatmosphäre

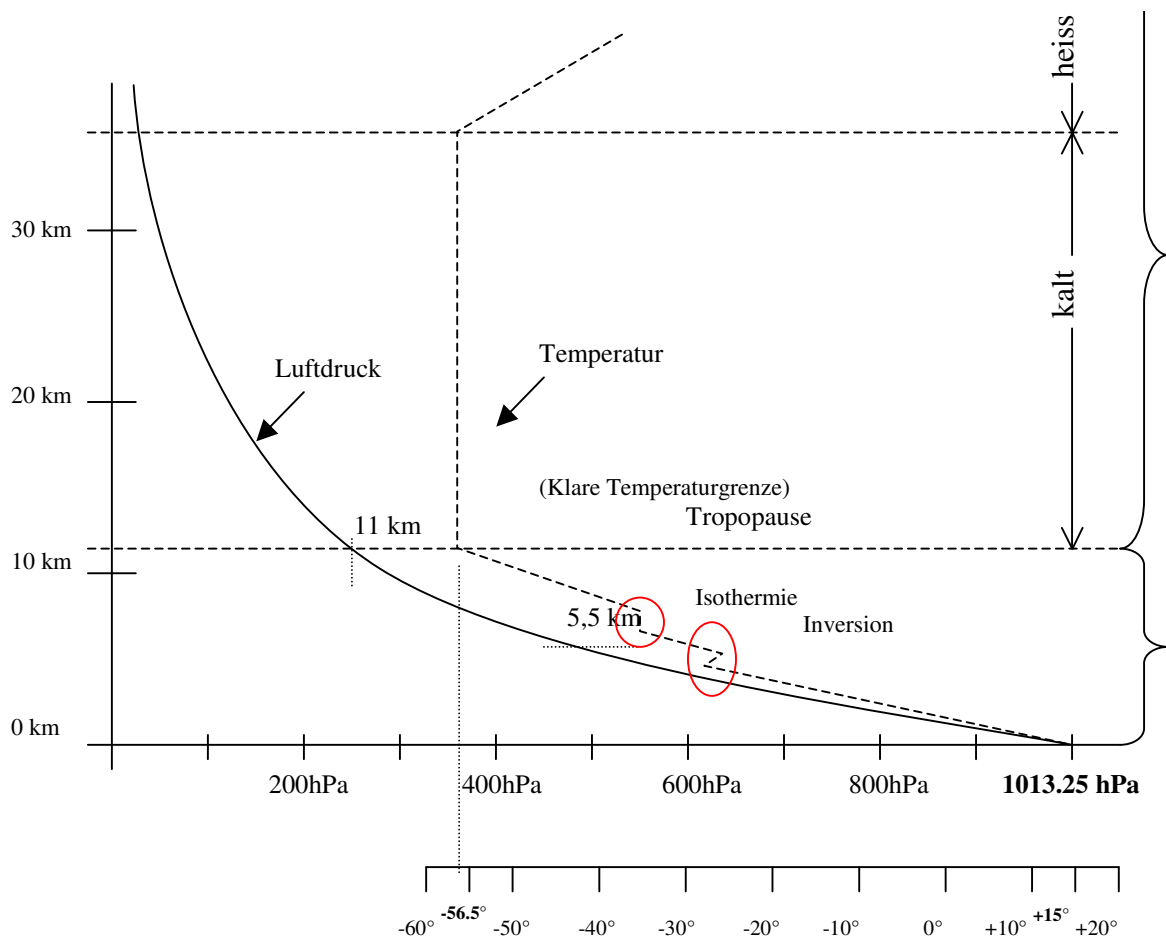
- Auf Meereshöhe (sea level)			
Luftdruck	1013.25 hPa	oder	29.92 in Hg
Luftdichte (Masse)	1.225 kg/m ³		
Lufttemperatur	+15 °C	resp.	228.15 K
- Auf 11 km Höhe (bei einer Tropopause nach ISA)			
Luftdruck	226.32 hPa	oder	6.68 in Hg
Lufttemperatur	-56.5 °C	resp.	216.65 K
- Temperaturabnahme (Temperaturgradient)			
0.65 K pro 100 m			

⇒ Resultierend folgende Annäherungen für die Flugpraxis:

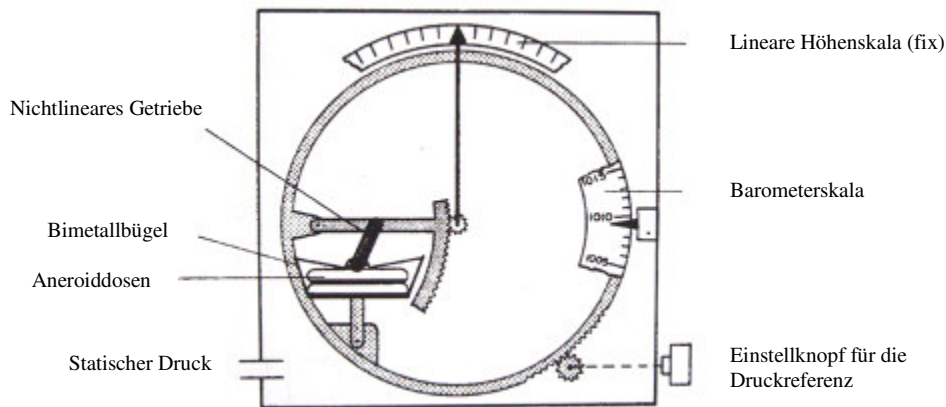
- Temperaturgradient
2 K pro 1'000 ft
- Druckabnahme (Druckgradient), auf MSL:
1 hPa ≅ 28 ft
1 in Hg ≅ 945 ft ≅ 1'000 ft
(in grösser Höhe ändern sich diese Gradienten)

Es müssen Abweichungen der Standards berücksichtigt werden (von 980 hPa bis zu 1045 hPa auf MSL)

Aufbau und Funktion des Flugzeug-Höhenmesser sind ähnlich wie bei Barometer. Er zeigt den Druck (geeicht in Höhe) in der Standardatmosphäre an. Ist der Höhenmesser auf den Standard-Luftdruck von 1013.25 hPa (29.92 in Hg) gesetzt, zeigt er die Druckhöhe (pressure altitude) an.



Barometrischer Höhenmesser (Altimeter)



Der Barometer ist nach ISA geeicht. Bei Abweichungen von der Standardatmosphäre zeigt der Höhenmesser nicht die wahre Höhe an.

Der Einfluss der Cockpitterperatur wird mittels eines Bimetallbügels kompensiert. Ein Mechanismus erlaubt das Einstellen einer Druckreferenz. Dabei wird das ganze Messsystem mittels des Einstellknopfes verdreht. Der eingestellte Referenzdruck kann auf der Barometerskala im Fenster abgelesen werden.

Bezeichnung der verschiedenen vertikalen Höhen:

Altitude: AMSL (Above Mean Sea Level)
 Height: Über einem Bezugspunkt, z.B. über der Piste
 Flight Level: Über dem Standardniveau 1013.25 hPa in Hectofeet

Höhen

Indicated Altitude (angezeigte Höhe AMSL am Höhenmesser abgelesen)

Calibrated Altitude „Kalibrierte Höhe“ ist die „indicated altitude“ korrigiert für den Instrumentenfehler (Instrument Error IE) und Positionsfehler (Position Error PE).

Calibrated Altitude = Indicated Altitude – (IE und PE)

IE (Instrument Error):

Ungenauigkeit des Instrumentes (Höhenmesser). Instrumentenfehler wird mittels einer Eich Tabelle mit dem Instrument vom Hersteller geliefert. Eich Tabelle befindet sich in den technischen Akten des Flugzeuges. Der Pilot kennt den Instrumentenfehler nicht.

PE (Position Error, Einbaufehler):

Der Positionsfehler ist bei IFR-Flügen zu berücksichtigen. Er entsteht infolge ungenauer Abnahme des Statischen Druckes am Flugzeug.

Wahre Höhe (True Altitude)

„true altitude“ ist die „calibrated altitude“ korrigiert für Nichtstandardtemperatur.

„true altitude“ = „calibrated altitude“ \pm 0.4% pro K Temperaturabweichung vom Standard

BSP:

„calibrated altitude“	8'000 ft
Temperatur	-11 °C
Abweichung vom Standard	-10 K (Standardtemperatur auf 8'000 ft -1°C)
„true altitude“	7'680 ft [8'000 - (10 · 0.4% = 4% = 320 ft)]

Weitere Fehler des Höhenmessers:

- Hysteresis (Nachhinken der Anzeige bei Höhenveränderung)
- Mechanischer Fehler von \pm 50 bis \pm 100 ft.

Höhenmessertoleranzen:

Die Mechanische Genauigkeit des Höhenmessers für den IFR muss in folgenden Grenzen liegen:

- Für Höhen bis 30'000 ft \pm 60 ft
- Für Höhen bis 50'000 ft \pm 80 ft

Druck-Bezugssysteme und Q-Codes:

QFE = Luftdruck am Messort (Standardeinstellung in Frankreich)

QFE-Einstellung:

- Hier wird die Druckeinstellung auf den aktuellen Druck am Messort (Flugplatz) eingestellt.
- **Höhenmesser zeigt die Höhe über dem Flugplatz an.**
- Es wird entweder vor dem Start auf die Höhe auf 0 gesetzt, oder den von der Flugsicherung angegebenen QFE Wert eingeben.
- **Vorteile:**
 - o Erlaubt Vergleich der angezeigten Flughöhe mit der Höhe eines speziellen Flugplatzes.
- **Nachteile:**
 - o Ein Vergleich der angezeigten Flughöhe mit der auf der Navigationskarte angegebenen Geländehöhe ist nicht möglich. Geländehöhen sind Angaben über Meer, die Flughöhe über Meer muss erst berechnet werden.
 - o Eine Höhenseparation ist nur unter Flugzeugen mit gleicher QFE-Einstellung möglich.

QFF = Auf Meereshöhe umgerechnete Druck (Basis für Bodenwetterkarte)

QFF ist nicht geeignet für Höhenmesseranzeige, da die Druck- und Temperaturverteilung zwischen Messort (Flugplatz) und MSL nicht der Standardatmosphäre entspricht.

Es werden also **QNH** oder **QNE** Einstellungen verwendet:

QNH-Einstellung:

- Hier wird entweder vor dem Start die Höhe des Flugplatzes eingegeben, oder den von der Flugsicherung angegebenen QNH Wert (aktueller Druck MSL) eingegeben.
- **Höhenmesser zeigt die Höhe AMSL an.**
- Hauptsächlich fürs Fliegen unter 3'000 ft AGL (z.B: Start und Landung)
- **Vorteile:**
 - o Ermöglicht Vergleich der angezeigten Flughöhe mit der auf der Navigationskarte angegebenen Geländehöhe.
- **Nachteile:**
 - o Eine Höhenseparation ist nur unter Flugzeugen mit gleicher QNH-Einstellung möglich.
 - o Keine Anzeige der Flughöhe über einem bestimmten Flugplatz.

QNE-Einstellung:

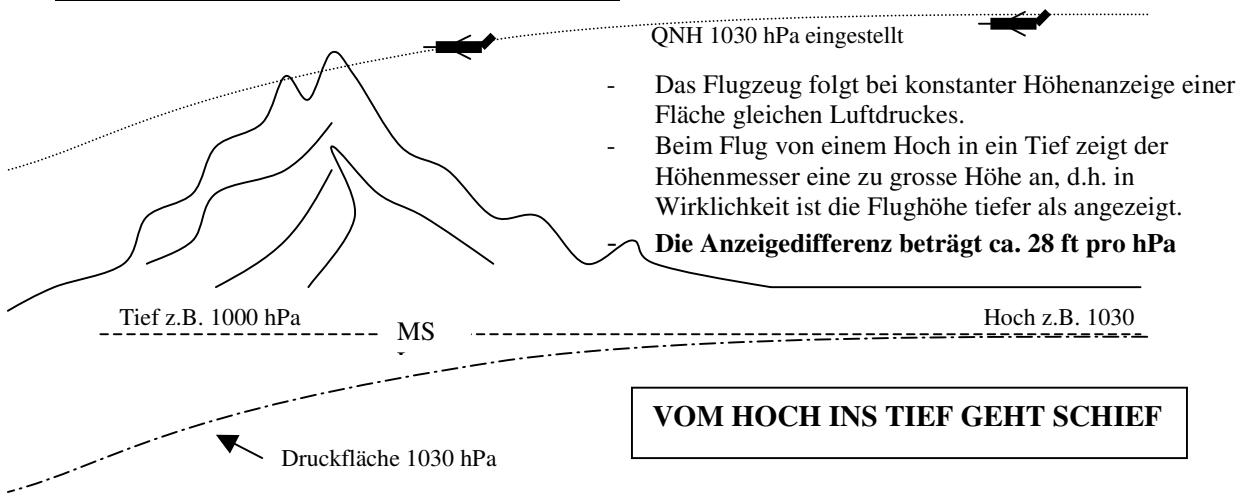
- Hier wird die Druckskala des Höhenmessers auf den Standarddruck (1013.25 hPa / 29.92 in Hg) eingestellt.
- **Der Höhenmesser zeigt die Druckhöhe (pressure altitude) an.**
- Die Höhenangabe erfolgt in „Flight Level (FL)“ (Druckhöhen in Hectofeet werden mit FL bezeichnet)
- Die Umstellung des Höhenmessers auf das QNE ist gesetzlich geregelt.
- **Vorteile:**
 - o Erlaubt eine relativ genaue Höhenseparierung unter den Flugzeugen.
- **Nachteile:**
 - o Ein Vergleich der angezeigten Flughöhe mit der auf der Navigationskarte angegebenen Geländehöhe ist nicht möglich.
 - o Keine Anzeige der Flughöhe über einem bestimmten Flugplatz.
- Zu Flight Level:
 - **Druckhöhe 10'000 ft = FL 100**
 - **Druckhöhe 7'500 ft = FL 75**

Druckeinstellung:

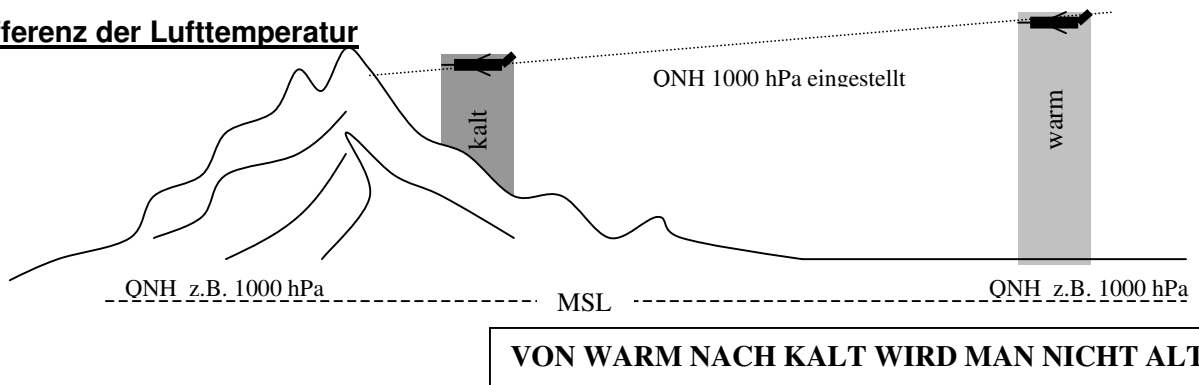
Einstellung auf einen höheren Luftdruck → höhere Anzeige
Einstellung auf einen tieferen Luftdruck → tiefere Anzeige
(1 hPa höhere Einstellung des Luftdruckes ergibt ca. 28 ft höhere Anzeige)

GEFAHREN:

Differenz des Atmosphärischen Druckes



Differenz der Lufttemperatur



- **Kalte Luft ist dichter als warme Luft**
- Isobare Druckfläche liegt also in warmer Luft höher als in kalter Luft.
- Der Höhenmesser zeigt in warmer Luft eine zu geringe Höhe an, d.h. in Wirklichkeit ist die Flughöhe grösser als angezeigt.
- In Kalter Luft zeigt der Höhenmesser eine zu grosse Höhe an, **d.h. in Wirklichkeit ist die Flughöhe tiefer als angezeigt!**
- **Die Anzeigedifferenz beträgt ca. 4% der Flughöhe pro 10 K Temperaturdifferenz gegenüber ISA.**

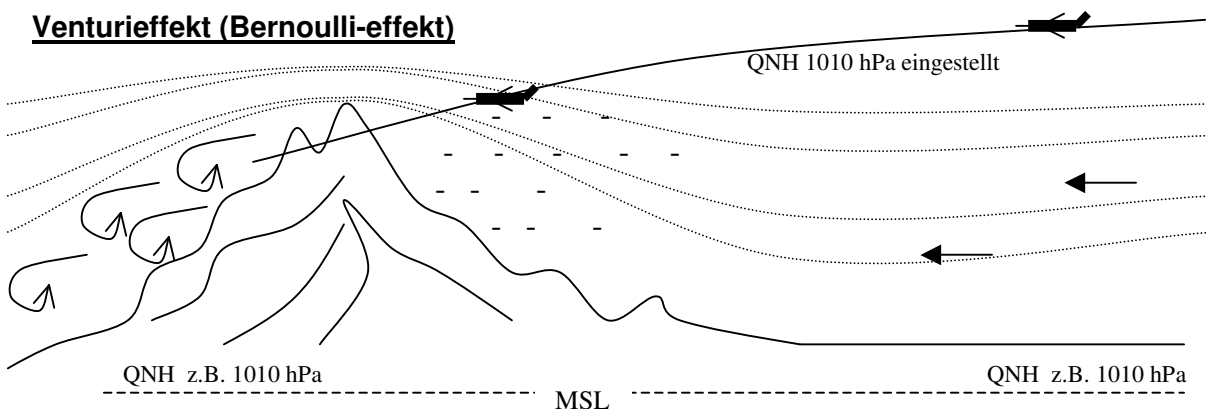
Beispiel:

Anzeige 9'000 ft

Bei ISA-Temperatur: Höhe = 9'000 ft

Bei ISA -10K: Höhe = 9'000 ft - 360 ft ($4 \cdot 90 \text{ ft} = 360 \text{ ft}$) = 8'640 ft

Venturieffekt (Bernoulli-effekt)



Windablenkung → Windbeschleunigung → Druckverminderung → Tiefere Flughöhe

Der Höhenmesser zeigt eine zu grosse Höhe an, **d.h. in Wirklichkeit ist die Flughöhe tiefer als angezeigt!**

Druckhöhe

Eine **angezeigte Höhe, mit Standard-Höhenmessereinstellung nach ISA heisst Druckhöhe PA** (pressure altitude). Im Q-Code wird diese Bezugs-Druckhöhe mit „QNE“ bezeichnet. Die Druckhöhe kann am Höhenmesser abgelesen werden. Dazu muss die Druckskala des Höhenmessers auf den Standard-Luftdruck 1013.25 hPa eingestellt werden.

- je geringer der Luftdruck, desto höher die Druckhöhe
- je höher der Luftdruck, desto tiefer die Druckhöhe

Faustformel:

Korrektur ist 28 ft pro hPa Abweichung des QNH vom Standard-Luftdruck (1013.25 hPa).

- Ist das QNH höher als der Standard-Luftdruck auf Meereshöhe, pro hPa → 28 ft subtrahieren.
- Ist das QNH tiefer als der Standard-Luftdruck auf Meereshöhe, pro hPa → 28 ft addieren.

Beispiel:

Luftdruck auf Meereshöhe (QNH) = 1003 hPa
QNH-Höhe = 9'000 ft

1: Berechnung der Differenz zum Standard-Luftdruck

Standard-Luftdruck MSL = 1013 hPa
Aktueller-Luftdruck = 1003 hPa
Differenz (1013 hPa – 1003 hPa) = 10 hPa

2: Berechnung der Differenz Druckhöhe zur QNH-Höhe

Formel: 28 ft pro hPa (10 · 28ft) = 280 ft

3: Korrektur der Druckhöhe PA

Druckhöhe PA (9'000 ft + 280 ft) = 9'280 ft (addieren, da QNH tiefer)

Die Druckhöhe entspricht wegen folgenden Einflüssen nicht der wirklichen Höhe über Meer

- Temperaturabweichung gegenüber ISA
- Abweichung des Gradienten gegenüber ISA
- Abweichung des Atmosphärischen Druckes gegenüber ISA
- Ungenauigkeiten des Druckmesssystems des Flugzeuges

Dichtehöhe

Die Flugleistungen (performance) eines Flugzeuges sind von der Luftdichte abhängig. Deshalb spricht man häufig von der Dichtehöhe (density altitude). Die Dichtehöhe ist die Höhe, bei welcher die aktuelle Luftdichte gleich der Dichte nach ISA ist.

Faustformel:

Korrektur ist 120 ft pro K Abweichung von ISA:

- OAT tiefer als ISA → Dichtehöhe kleiner als Druckhöhe.
- OAT höher als ISA → Dichtehöhe grösser als Druckhöhe.

Beispiel:

Die Druckverhältnisse auf dem Flugplatz Bern-Belpmoos entsprechen einer Druckhöhe von

PA = 1'500 ft
OAT = +32 °C

1: Berechnung der ISA-Temperatur auf 1'500 ft

2K pro 1'000 ft: (1.5 · 2) = 3 K
ISA-Temperatur auf Meereshöhe = +15 °C
ISA-Temperatur auf PA 1'500 ft = +12 °C (+15 °C – 3K)

2: Berechnung der Abweichung von der ISA-Temperatur

ISA-Temperatur auf 1'500 ft = +12 °C
Aktuelle Temperatur auf 1'500 ft = +32 °C
Abweichung = +20 K

3: Berechnung der Dichtehöhe

120 ft pro K

Abweichung von der ISA = +20 K
20 · 120 ft = 2'400 ft
Dichtehöhe (1'500ft + 2'400 ft) = 3'900 ft (addieren, da OAT höher)

Infolge der hohen Temperatur entsprechen die Flugleistungen (performance) nur noch denjenigen, wie sie auf einem Flugplatz mit einer Druckhöhe von 3'900 ft zu erwarten sind!

Die Dichtehöhe wird zur Bestimmung der Start- und Landeleistungen verwendet.

Die Umrechnung der Druckhöhe auf die Dichtehöhe führen Sie mit einem speziellen Rechner oder mit Hilfe der Faustformel durch. In den meisten Flughandbüchern (AFM) sind statt der Dichtehöhe Leistungstabellen und Leistungsdiagramme abgebildet, welche die Korrektur von Druck- und Temperaturabweichungen erlauben.

In der Standardatmosphäre gilt: Druckhöhe = Dichtehöhe.