

Roger P. Frey

A dramatic landscape photograph of a road leading to a storm with lightning. The road is paved and has a dashed white line down the center, receding into the distance. On the left, there is a large green tree and a field of yellow flowers. On the right, there is a green field and a utility pole. The sky is dark and cloudy, with several bright lightning bolts striking down. The overall mood is intense and atmospheric.

Donnerwetter

Flugmeteorologie von A bis Z



Der Autor:

Roger Peter Frey wurde in Bern (CH) geboren. Er machte sein Hobby zum Beruf und wurde Gleitschirmfluglehrer SHV, DHV und ÖAeC. Auf der Kanareninsel San Miguel de La Palma entwickelte er zusammen mit dem spanischen Fluglehrer Javier López Redondo in der Flugschule Palmaclub einen „GuideService“ für Gleitschirmpiloten und spezialisierte sich auf deren Weiterbildung. Roger lebt und arbeitet auf La Palma und in der Schweiz.

„Akzeptiere, dass du dich nach dem Wetter zu richten hast.
Es ist älter - lasse ihm höflich den Vortritt“.

Indianische Weisheit

„Meteorologie ist keine Religion. Es ist deshalb weise, sich
am Startplatz nicht von Glauben, sondern von Fakten leiten
zu lassen.“

Roger P. Frey

Inhaltsverzeichnis

1. **Vorwort**

2. **Die Atmosphäre**

2.1 Der Aufbau der Atmosphäre

2.1.1 Die Tropopause

2.1.2 Die Troposphäre

2.1.3 Die konvektive Grundschicht

2.1.4 Die Tropopause

2.2 Strahlungshaushalt der Erde

2.3 Eigenschaften der Luft

2.4 Luftdruck und Luftdichte

2.5 Vertikale Druckabnahme

2.6 Luftdruckwerte / QNH / QFE / QFF / Standard / QNE

2.6.1 QFE (Query Field Elevation)

2.6.2 QNH (Query Normal Height)

2.6.3 QFF

2.6.4 Standarddruck

2.6.5 QNE (Query Normal Elevation)

2.7 Bodenhoch und -tief

2.7.1 Warmlufthoch

2.7.2 Kaltlufttief

2.7.3 Warmlufttief

2.7.4 Kaltlufthoch

- 2.8 Verlagerung des Druckgebietes in der Höhe
- 2.9 Veränderungen in der Atmosphäre
- 2.10 Die Internationale Standardatmosphäre (ISA)

3. **Der Wind**

- 3.1 Gradientkraft
- 3.2 Zentrifugalkraft
- 3.3 Corioliskraft
- 3.4 Geostrophischer Wind
- 3.5 Zyklotrophischer Wind
- 3.6 Gradientwind
- 3.7 Reibungseinfluss
- 3.8 Windkreislauf
- 3.9 Windmessung
- 3.10 Globale Windzirkulation
 - 3.10.1 Die Hadley Zelle
 - 3.10.2 Die Ferrel Zelle
 - 3.10.3 Die Polarzelle
- 3.11 Land- und Seewind
- 3.12 Berg- und Talwind
- 3.13 Lee
- 3.14 Leewellen
- 3.15 Föhn
- 3.16 Konvergenz und Divergenz
- 3.17 Turbulenzen
 - 3.17.1 Windscherung
 - 3.17.2 Reibungsturbulenz
 - 3.17.3 Thermische Turbulenz
 - 3.17.4 Inversionsbedingte Turbulenz
 - 3.17.5 Orographische Turbulenz

- 3.18 Downburst
- 3.19 Kármán Wellen
- 3.20 Jetstream
 - 3.20.1 Polarfront Jetstream
 - 3.20.2 Subtropen Jetstream
 - 3.20.3 Low Level Jetstream
- 3.21 Einige Windsysteme in Europa
 - 3.21.1 Bise
 - 3.21.2 Bora
 - 3.21.3 Etesien
 - 3.21.4 Levante
 - 3.21.5 Mistral
 - 3.21.6 Poniente
 - 3.21.7 Scirocco
 - 3.21.8 Tramontana

4. Thermodynamik

- 4.1 Aggregatzustände
- 4.2 Luftfeuchtigkeit
 - 4.2.1 Maximale Feuchtigkeit
 - 4.2.2 Relative Luftfeuchte
 - 4.2.3 Absolute Luftfeuchte
 - 4.2.4 Spezifische Luftfeuchte (auch Mischungsverhältnis)
- 4.3 Taupunkt (Td)
- 4.4 Taupunktdifferenz (Dew Point Spread)
- 4.5 Lufttemperatur
- 4.6 Die Inversion
 - 4.6.1 Absink-Inversion
 - 4.6.2 Bodeninversion

4.6.3 Inversion an Reibungsschichten

4.6.4 Inversion an Fronten

4.7 Jahreszeitliche Schwankungen der Lufttemperatur

4.8 Einfluss der Kontinente und Ozeane auf die Temperatur

4.9 Jahreszeiten

4.10 Wärmeübertragung

4.10.1 Konduktion

4.10.2 Konvektion

4.10.3 Advektion

4.11 Einfluss von Wolken auf die Temperatur

4.12 Trockenadiabatischer Gradient

4.13 Feuchtadiabatischer Gradient

4.14 Thermik

4.15 Radio-Sondierungen

4.16 Emagramm

4.17 Thermodynamische Erklärung des Föhns

5. **Wolken und Niederschlag**

5.1 Cirren

5.2 Alto-Wolken

5.3 Stratus

5.4 Cumulus

5.5 Altocumulus lenticularis

5.6 Bedeckungsgrad

5.7 Nebel und Dunst

5.7.1 Advektionsnebel

5.7.2 Strahlungsnebel

5.7.3 Orographischer Nebel

5.7.4 Seerauch (Verdunstungsnebel)

5.8 Niederschlag

5.8.1 Bergeron-Findeisen-Prozess

5.8.2 Langmuir-Prozess

5.8.3 Niederschlagsrekorde

6. **Gewitter**

6.1 Klassifikation von Gewittern

6.1.1 Frontgewitter

6.1.2 Wärmegewitter

6.1.3 Orographische Gewitter

6.2 Lebenszyklus eines Gewitters

6.2.1 Wachstumsphase

6.2.2 Reifephase

6.2.3 Auflösungsphase

6.3 Einzelzellen-Gewitter

6.4 Multizellen-Gewitter

6.5 Superzellengewitter

6.6 Elektrische Erscheinungen

6.6.1 Blitze

6.6.2 Kugelblitz

6.6.3 Sferics

6.7 Gewitter-Indizes

6.7.1 Total-Totals-Index

6.7.2 CAPE

6.7.3 DCAPE (Downdraft Convective Available Potential Energy)

6.7.4 K-Index (Konvektions Index)

6.7.5 KO-Index (Konvektiv Index)

6.7.6 LI-Index (Lifted Index)

6.7.7 Soaring Index

7. **Fronten**

7.1 Entstehung von Zyklonen

7.2 Warmfront

7.3 Kaltfront

7.4 Okklusion

8. **Klimatologie**

8.1 Großwetterlagen im Alpenraum

8.1.1 Hochdrucklage (Schönwetterlage)

8.1.2 Flachdrucklage (Gewitterlage)

8.1.3 Westwindlage

8.1.4 Bisenlage

8.1.5 Tiefdrucklage

8.1.6 Föhnlage

8.1.7 Staulage (Nordföhn)

8.2 Kaltlufttropfen

8.3 Tropische Zyklone

9. **Wetterkarten**

9.1 Bodenwetterkarten

9.2 Höhenwetterkarten

9.2.1 500 hPa-Höhenkarte

9.2.2 700 hPa-Höhenkarte

9.2.3 850 hPa-Höhenkarte

9.3 Wolkenkarte mit relativer Topografie (ReTop)

9.4 Ensembles

9.5 Vorhersagediagramme

9.6 Potenzielle Äquivalente Temperatur (Theta-E)

9.7 Schichtdicke

10. **Wetterprognose**

- 10.1 Verlässlichkeit
- 10.2 Streckenflugwetter
- 10.3 soarWRF, soarGFS

11. **Gefahren**

- 11.1 Kaltfronten
- 11.2 Okklusion mit Kaltfrontcharakter
- 11.3 Gewitter
- 11.4 Zunehmende Windstärke
- 11.5 Fliegen im Regen
- 11.6 Lee
- 11.7 Wolkenflug
- 11.8 Höhenkrankheit

12. **Flugwetterdienste**

- 12.1 GAFOR
- 12.2 METAR und TAF
- 12.3 Volmet Sender
- 12.4 Weitere Flugwetterdienste

13. **Internet Meteo**

14. **Abkürzungen**

15. **Glossar**

16. **Maßeinheiten / Umrechnungen**

- 16.1 Höhe
- 16.2 Geschwindigkeit
- 16.3 Entfernung
- 16.4 Temperatur

17. **Vorsätze für Maßeinheiten**

18. **Formelsammlung**

- 18.1 Potenzielle Temperatur
- 18.2 Äquivalenttemperatur (Te)

18.3 Potenzielle Äquivalenttemperatur (Theta-E)

18.4 Luftdichte

18.5 Hennig Formel

19. **Weiterführende Literatur**

20. **Stichwortverzeichnis**



1 Vorwort

Gleitschirm- und Drachenfliegen entwickelten sich in den letzten 30 Jahren zu einem sicheren Breitensport. Material und Ausbildung sind heute auf einem hohen qualitativen Niveau.

Das wichtigste Sicherheitselement überhaupt ist und bleibt die richtige Startentscheidung, denn eine Fehleinschätzung der Wettersituation ist eine häufige Unfallursache. Richtig entscheiden setzt noch vor dem fliegerischen Können an und benötigt ein fundiertes meteorologisches Wissen.

Viele Piloten haben das zu Recht erkannt und wollen über den Prüfungsstoff hinaus mehr über Meteorologie lernen, ohne gleich ein Studium zu absolvieren. Das Buch „Donnerwetter“ füllt diese Lücke.

Viel Spaß beim Lesen und immer „happy landing“!

2 Die Atmosphäre

2.1 Der Aufbau der Atmosphäre

Die Erde ist von einer Lufthülle umgeben, die *Atmosphäre* genannt wird. Sie besteht aus einem Gasgemisch, wobei Stickstoff (N_2) mit 78% Volumen den größten Anteil ausmacht. Sauerstoff (O_2) ist mit rund 21% vertreten. Daneben finden sich in der Luft noch Spuren der Edelgase Argon, Neon, Helium, Krypton und Xenon. Meteorologisch wichtigster Bestandteil ist das Wasser.

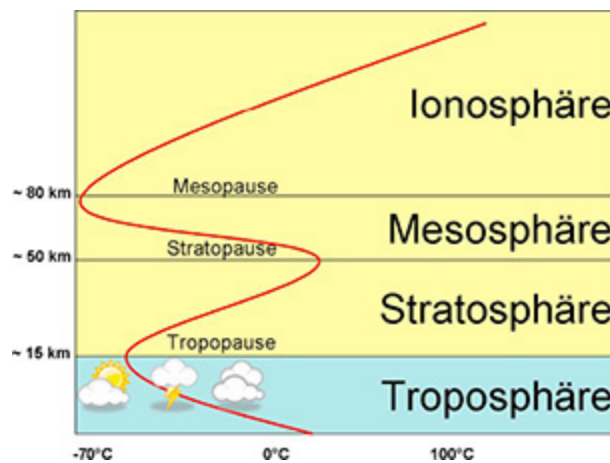


Abb. 2.1: Die Atmosphäre

Dessen Konzentration schwankt stark von 0% bis 4%. Dazu kommen noch Spuren von Kohlendioxid (CO_2), Kohlenmonoxid (CO), Schwefeldioxid (SO_2), Methan (CH_4), Ozon (O_3) u.a..

Die Atmosphäre wird in verschiedene Schichten aufgeteilt, wobei das Wettergeschehen und das zivile Fliegen in der sogenannten Troposphäre bis rund 15 km Höhe stattfinden.

Der Temperaturverlauf sinkt bis zur Tropopause auf ungefähr minus 55 °C. Aufgrund der Absorption von UV-Strahlung durch die Ozonschicht steigt die Temperatur in der anschließenden Stratosphäre an. In etwa 50km Höhe herrscht fast wieder die gleiche Temperatur wie am Boden! Die Atmosphäre reicht bis in rund 640 km, wobei die Gasdurchmischung nur bis rund 100 km Höhe gleich ist (Homosphäre). Ab einer Höhe von 80 km (NASA), respektive 100 km (FAI), beginnt nach deren Definition der Weltraum.

2.1.1 Die Tropopause

Zwischen der Troposphäre und der Stratosphäre besteht eine Trennschicht. Diese Schicht wird *Tropopause*¹ genannt. Sie ist durch eine deutliche Veränderung im Temperaturverlauf geprägt und ist die wichtigste Grenzschicht der Atmosphäre. Die Tropopause stellt eine dünne, aber beständig über den gesamten Globus verlaufende Inversionsschicht dar. Die Tropopause ist sehr wichtig für die Erde. Darunter regnet fast der gesamte Wasserdampf ab, und es kann kaum Wasser durch die Tropopause in die oberen Schichten und letztendlich in den Weltraum entweichen. Ohne diese Sperrschicht würde die Erde in kurzer Zeit ihr gesamtes Wasser verlieren.

2.1.2 Die Troposphäre

Die Troposphäre reicht vom Erdboden bis zur Tropopause. Sie ist an den Polen nur etwa 8km dick, erreicht aber am Äquator eine Höhe von bis zu 16 km. Ferner unterliegt ihre Ausdehnung jahreszeitlichen Schwankungen. In Europa schwankt sie von Winter bis Sommer zwischen einer Höhe von 10 bis 12 km. In der Troposphäre finden sich rund 90% der gesamten Luft des Planeten, sowie fast das gesamte Wassergas der Atmosphäre. Da sich in der Troposphäre der Großteil des Wetters abspielt, spricht man auch von der Wetter- oder Advektionsschicht. Die Troposphäre wird nur in geringem Maß durch Absorption in Wasserdampf, Staub usw. durch die Sonne erwärmt. Der größte Teil der Wärme wird von der Erde aufgenommen. Dies ist einer der Gründe, warum die Lufttemperatur in der Troposphäre im Schnitt um rund $0,65\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro 100 m abnimmt.

2.1.3 Die konvektive Grundschicht

Die konvektive Grundschicht² auch Pephosphäre genannt,³ bildet den untersten Teil der Troposphäre und somit auch den hauptsächlichsten Lebensraum des Menschen. In der Grundschicht hat die Sonneneinstrahlung die größten Auswirkungen. Dies führt zu den thermischen Austauschvorgängen, die nutzbare Aufwinde generieren. Das Gelände gibt aber nicht nur Wärme an die Luft ab, es hat auch einen großen Einfluss auf die lokale Windentstehung. Der geostrophische Wind wird durch Reibung gebremst und weht nicht mehr wie in der freien Atmosphäre parallel zu den Isobaren, sondern in Bodennähe nun in Richtung des tiefen Luftdrucks. Die Windrichtung erfährt also in der nördlichen Hemisphäre mit zunehmender Höhe eine Abweichung nach rechts.

Die Grundsicht ist die Wetterschicht, in welcher Gleitschirme und Hängegleiter hauptsächlich fliegen. In der Grundsicht kommt es häufig zur Bildung einer Dunstschicht, bedingt durch Anreicherung von Aerosolen. Die Höhe der Konvektionsschicht ist abhängig vom Gelände. Die Obergrenze ist deshalb in den Alpen höher, als im Flachland. Im Modell ([Abb. 2.2](#)) ist die Grenze bei rd. 1.500m eingezeichnet. An dieser Grenze findet sich an etwa 50% aller Tage eine Inversion, die sogenannte Peplopause (s. [Kapitel 2.1.4](#)). Sie entsteht durch Absinken von Luft aus größerer Höhe. Während dieses Absinkens erwärmt sich diese Luft adiabatisch um $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro 100 m, kumuliert so unter sich die Wärme und bildet eine Inversion. Als stabile Schicht unterbindet diese Inversion den vertikalen Luftaustausch fast gänzlich. Unter ihr findet hingegen ein reger Austausch der Luftmassen statt. Diese Durchmischung führt dazu, dass der Temperaturgradient bis $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro 100m annimmt, was die Thermikentwicklung fördert. Weil sich auch die Feuchtigkeit gut durchmischt, ist der Gradient des Taupunktes bis zur Peplopause rd. $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro 100 m.

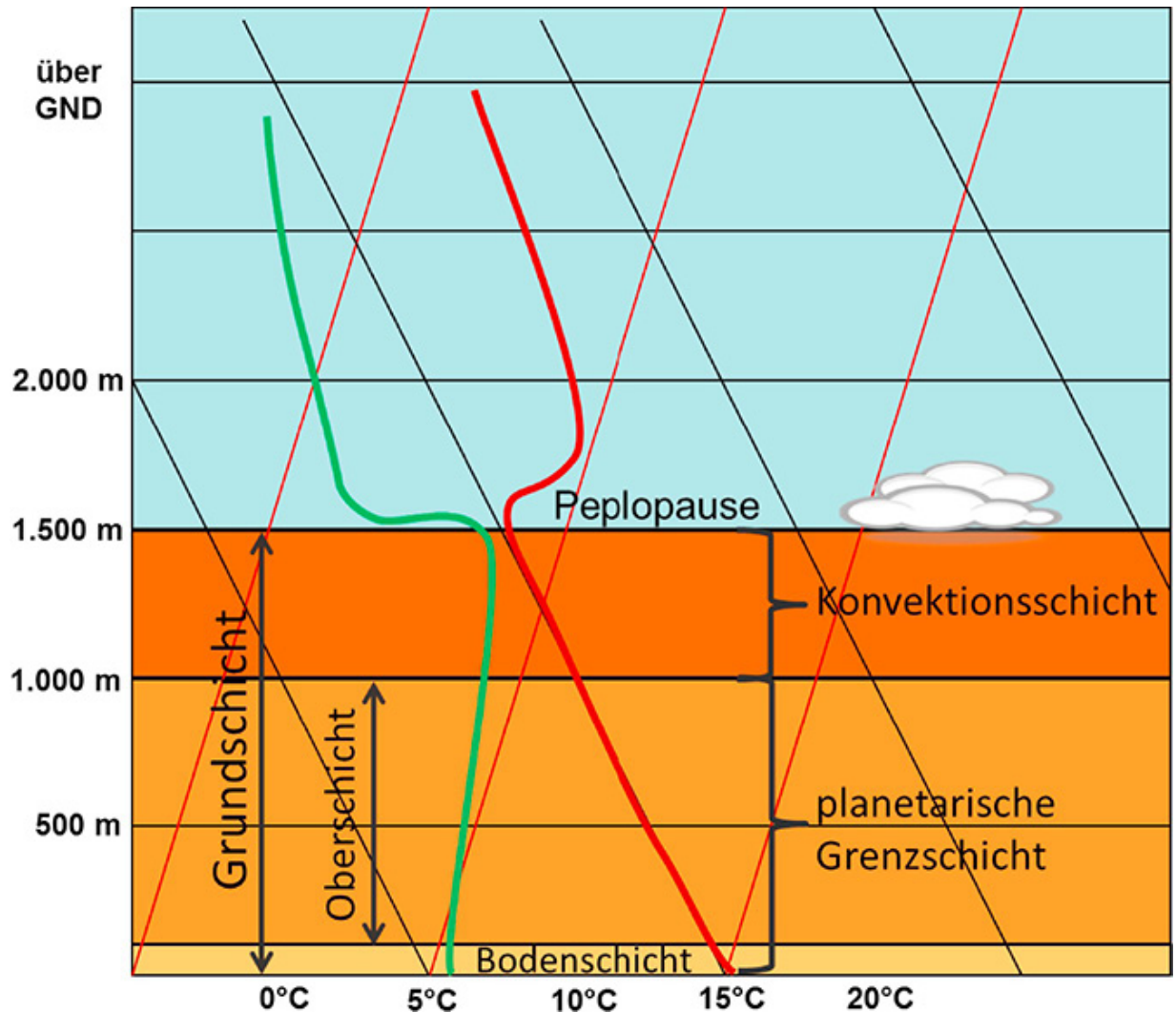


Abb. 2.2: Grundsicht der Troposphäre

2.1.4 Die Peplopause

Die Peplopause ist eine Grenzfläche, bedingt durch Absinkprozesse von Luft aus größerer Höhe. Normalerweise setzen sich diese Absinkvorgänge nicht bis zur Erdoberfläche durch und es entsteht eine Inversion auf 1.000m bis 2.000m über Grund. Die Peplopause begrenzt die darunterliegende atmosphärische Grundsicht (planetary boundary layer) von der freien Atmosphäre. Peplopausen sind relativ häufig anzutreffen. Sie bilden sich

im Winter an ca. 55% der Tage und im Sommer an etwa 35% der Tage.³ Unter der Peplopause bildet sich vielfach ein eigenständiges Wetter aus, da der Luftaustausch mit der darüber liegenden Schicht eingeschränkt ist. Thermiken werden an ihr gebremst oder sogar gestoppt. Windsysteme unter der Peplopause können, speziell bei weiter absinkender Inversion, beschleunigt werden.

2.2 Strahlungshaushalt der Erde

Die kurzwellige Sonnenstrahlung wird zu rund 30% von Atmosphäre und Erde wieder in den Weltraum reflektiert. Die *Albedo*⁴ der Erde entspricht deshalb 0,3. Von den verbleibenden 70% werden rund 20% von der Atmosphäre und 50% von der Erde absorbiert. Diese Energie wird dann wieder durch Konvektion und Wärmestrahlung an die Lufthülle abgegeben und bewirkt so das Wettergeschehen. [Abb. 2.3](#) ist nicht maßstabgetreu, veranschaulicht aber den Prozess des Strahlungshaushaltes.

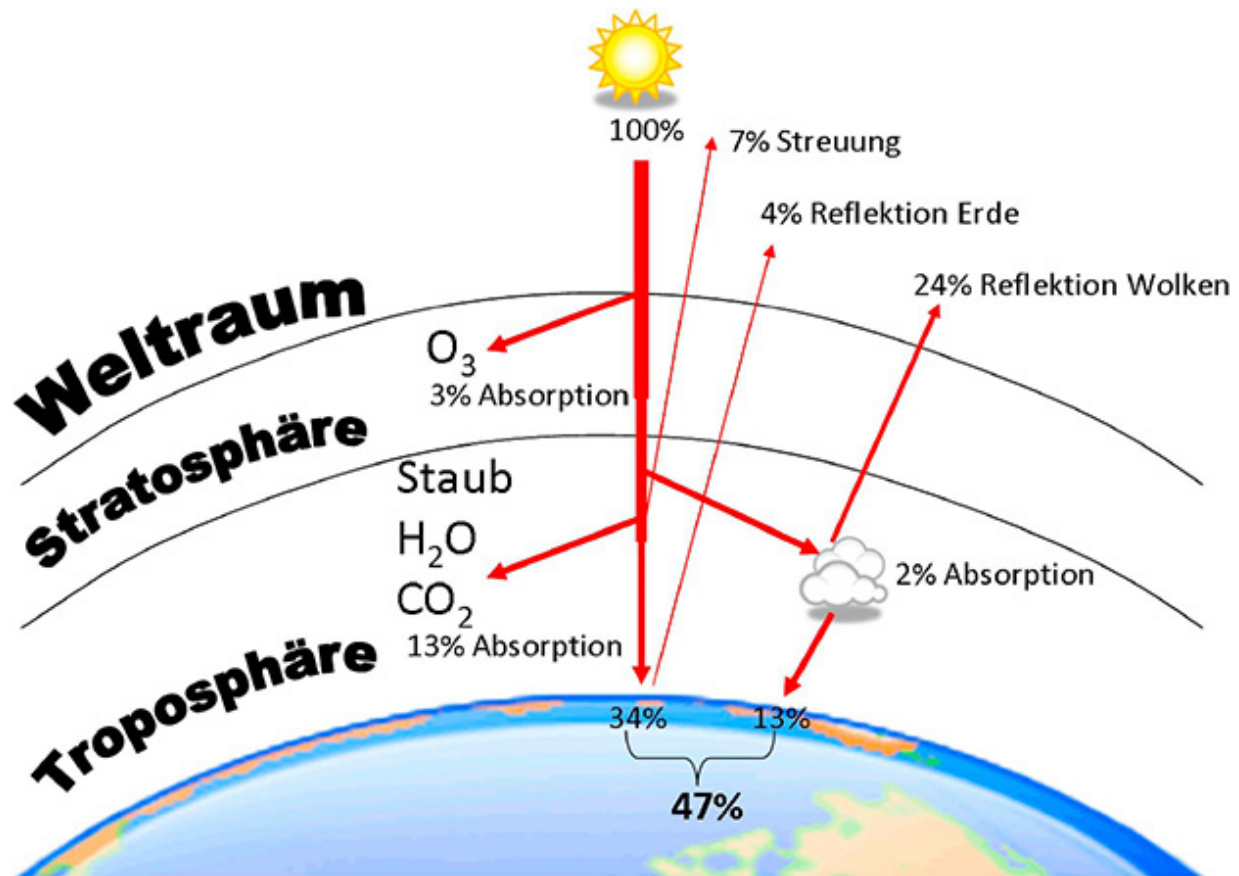


Abb. 2.3: Strahlungsbilanz

2.3 Eigenschaften der Luft

Wie bereits erwähnt, ist die Luft ein Gasgemisch. Luft lässt sich komprimieren und kann je nach Druck und Temperatur unterschiedlich viel Wasser aufnehmen. Im Mittel sind es zwar nur 0,4 %, allerdings verursacht und beeinflusst dieser scheinbar geringe Teil im Wesentlichen das Wettergeschehen. Die Molekülmasse von Wasser⁵ entspricht nur 62,5% der Luft. Wasserhaltige Luft ist deshalb leichter als trockene und kann gegenüber trockener Luft aufsteigen. Weiter enthält die Luft kleine Staubteilchen, die bei der Kondensation von Wassergas eine Rolle spielen. Die

Gesamtmasse der Luft (trocken) beträgt $5,135 \times 10^{15}$ Tonnen, also 5,135 Peta (Billiarden) Tonnen.⁶

2.4 Luftdruck und Luftdichte

Die Luft übt unter dem Einfluss der Schwerkraft einen Druck auf die Erdoberfläche aus. Man kann sich dazu eine Luftsäule vorstellen, bei der sich die Gewichte der übereinanderliegenden Luftmoleküle addieren, um schließlich den Bodendruck bzw. das Gewicht pro gegebener Fläche am Boden zu erzeugen. Der *Luftdruck* am Boden hängt von der Höhe der darüber befindlichen Luftsäule, sowie von der Temperatur und *Luftdichte* ab. Weil sich Luft (im Gegensatz z.B. zu Wasser) komprimieren lässt, ist die Luftdichte am Boden am höchsten. Umgekehrt nimmt sie in nichtlinearer Weise mit zunehmender Höhe schnell ab. Torricelli⁷ hat diesen Umstand als erster beschrieben. Indem er ein mit Quecksilber gefülltes, einseitig verschlossenes Rohr in eine ebenfalls mit Quecksilber gefüllte Wanne tauchte, konnte er den, auf das in der Wanne befindliche Quecksilber wirkenden Luftdruck messen. Dieser Luftdruck war so groß, dass er die Säule in 760 mm Höhe halten konnte. Von Torricelli ist auch die heute veraltete Druckbezeichnung Torr abgeleitet. Ein Torr entspricht 1mm Hg, also dem Gewicht, das eine 1 mm hohe Quecksilbersäule ausübt.

760 Torr (die o.g. 760mm) sind demnach 1.013 hPa (= 1atm = 1,013bar = 1.013,0 mbar) und entsprechen dem mittleren Luftdruck auf Meereshöhe.

Der *Luftdruck* sollte nicht mit der *Luftdichte* verwechselt werden. Die Luftdichte bezeichnet das Gewicht der Luft bezogen auf das Volumen. Die untenstehenden Werte gelten

für die Standardatmosphäre in vollständig trockener Luft (kein Wassergas).

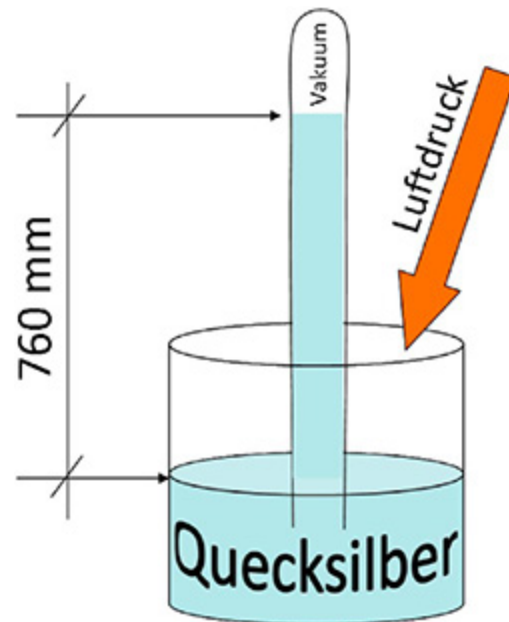


Abb. 2.4: Luftdruck

Luftdruck: 1.013,2 hPa

Luftdichte: 1,225 kg/m³ bei 15 °C

Weil Wassergas eine geringere Dichte als Luft aufweist, ist die Dichte feuchter Luft kleiner als die Dichte trockener Luft.

2.5 Vertikale Druckabnahme

Der Luftdruck halbiert sich etwa alle 5.500 m. Demnach beträgt der Luftdruck, der auf Meereshöhe bei rund 1.000 hPa liegt, in 5.500m Höhe nur noch 500 hPa und in 11.000m Höhe noch 250 hPa. Auf Meereshöhe nimmt der Luftdruck mit zunehmender Höhe pro 8m um ein hPa ab. Auf einer Höhe von 5.000m AMSL (AMSL=Above Mean Sea Level; über Meereshöhe) ist diese Abnahme 16 m pro hPa und auf 10.000 m AMSL bereits 32 m pro hPa.

Als Faustformel für die Luftfahrt wird für die mittleren Höhen und Temperaturen eine Druckabnahme von 1hPa pro 30 ft für überschlägige Berechnungen angenommen. Kennt man Druck und Temperatur, so kann die Luftdichte mit folgender Formel berechnet werden:

$$\rho = \frac{p}{R \cdot T}$$

ρ = Luftdichte (kg/m^3)

p = Druck in Pascal (Meereshöhe also 101.325 Pa)

R = Gaskonstante der Luft (287,058 J/kg · K)

T = Temperatur in Kelvin (0 °C = 273,15 K)

2.6 Luftdruckwerte / QNH / QFE / QFF / Standard / QNE

Eine der wichtigsten Angaben in der Luftfahrt überhaupt ist die Flughöhe. In vielen Bereichen der Luftfahrt wird die Flughöhe barometrisch, also durch Messen des Luftdruckes, abgeschätzt. Weil sich die Wetterstationen, von denen Piloten Luftdruckangaben beziehen können, auf unterschiedlichen Höhen befinden, muss man für Vergleiche auf eine Standardhöhe umrechnen. Dazu wird die Bezugsgröße auf Meereshöhe verwendet, angegeben als NN für Normal Null.⁸ Der Luftdruck hängt aber auch von der Temperatur ab. Mit steigender Temperatur geraten Luftmoleküle zunehmend in Bewegung und benötigen mehr Raum, Luft dehnt sich aus, die Luftdichte nimmt ab. Folglich nimmt auch der Druck ab, den eine solche erwärmte Luftsäule am Boden ausübt. Aus diesem Grund wurde neben dem *Standarddruck* auch eine *Standardtemperatur* festgelegt. Diese Standardtemperatur beträgt 15 °C. Um Luftdruckwerte miteinander vergleichen zu können, wird der