

**„Diejenigen, welche sich für die Praxis ohne Wissen begeistern, sind wie Seeleute, die ohne Kompass ein Schiff besteigen und nie ganz sicher sind, wohin sie fahren.“**

**Leonardo da Vinci**

Zumindest der Spätherbst, der Winter und das zeitige Frühjahr, sind die Jahreszeiten in denen für Sportflieger und Ballonfahrer oft ungünstige Wetterbedingungen herrschen. Es ist die Zeit der Aus- und Weiterbildung, der Lehrgänge und der Theorieprüfungen. Ich möchte diese „flugarme“ Jahreszeit nutzen und in den nächsten „adler-Artikeln“ meteorologische Grundlagen wiederholen, vor allem aber helfen die Theorieprüfungen zur PPL und für die Fluglehreranwärter vorzubereiten.

Wir werden uns zuerst mit den sogenannten meteorologischen Grundelementen, dem *Luftdruck*, der *Luftdichte*, dem *Wind*, der *Lufttemperatur* und der *Luftfeuchtigkeit* beschäftigen. Diese Grundelemente beschreiben den physikalischen Zustand der Atmosphäre und sind aber auch schon als einzelne Parameter für das Fliegen und Ballonfahren relevant. In ihrem komplexen Zusammenwirken miteinander, angetrieben von der Energiequelle Sonne, entsteht dann das Wetter in der unendlichen Vielfalt seiner Erscheinungen und Prozesse, als typisches Wetter im Hoch- bzw. Tiefdruckgebiet, in Warm- und Kaltfronten, Okklusionen usw. Befassen wir uns uzunächst mit dem Luftdruck.

**Thema: „Die Bedeutung des Luftdruckes für das Fliegen“**

**1. Definition und Maßeinheiten**

Wie jeder andere Körper auf der Erde unterliegt auch die Luft der Anziehungskraft. Dadurch erhält sie ein Gewicht und drückt mit der Kraft dieses Gewichtes auf die Unterlage. Sie übt also einen Druck aus. Um das besser zu verstehen schneiden wir uns gedanklich aus der Atmosphäre eine Luftsäule heraus (siehe Abbildung 1), die von der Erdoberfläche bis an die Obergrenze der Erdatmosphäre reichen soll.

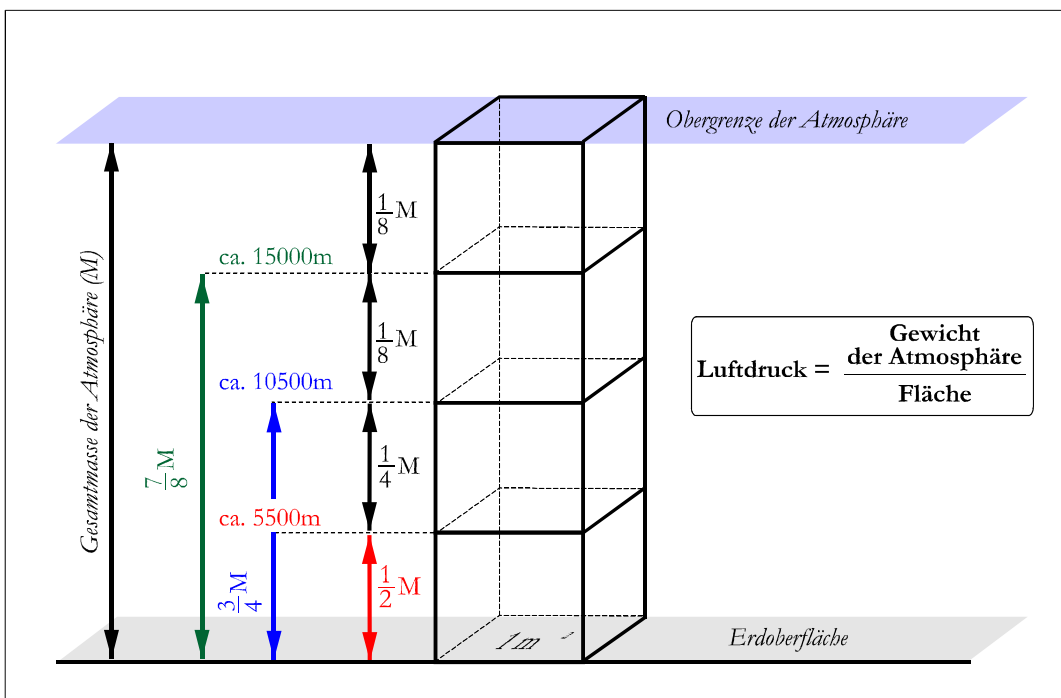


Abbildung 1: Zur Entstehung des Luftdruckes

Der Luftdruck an der Erdoberfläche ist also gleich dem Gesamtgewicht der in dieser Luftsäule enthaltenen Luft. Aus der Abbildung 1 wird klar:

*Der Luftdruck ist an der Erdoberfläche am größten, er nimmt mit zunehmender Höhe ab, weil die Länge der Luftsäule nach oben hin immer kürzer und damit ihr Gewicht immer geringer wird.*

Unter Verwendung der international vereinbarten SI-Einheiten wird der Luftdruck in der Maßeinheit:

$$N/m^2$$

gemessen, wobei  $N$  (Newton) die Einheit für das Gewicht bzw. die Kraft,  $m^2$  die Einheit für die Fläche ist. Anstelle der Einheit  $N/m^2$  setzt man in der Physik üblicherweise, in der Meteorologie immer, *Pascal (Pa)* bzw. seinen hundertfachen Wert, das *Hektopascal (hPa)*. Dann gilt:

$$1 N/m^2 = 1 Pa$$

$$100 N/m^2 = 1 hPa$$

Vor einigen Jahren wurde in der Meteorologie als Druckeinheit noch ausschließlich das Millibar (mbar) verwendet, das gegenwärtig und sicher auch in Zukunft noch neben dem Pascal bestehen wird. Das ist ganz einfach deshalb so, weil viele Messgeräte, z.B. barometrische Höhenmesser in Flugzeugen, ihre Skaleneinteilung noch in Millibar haben. Das ist aber auch völlig unproblematisch, weil die Zahlenwerte von Millibar und Hektopascal identisch sind. Es gilt nämlich:

$$1 \text{ mbar} = 100 N/m^2 = 100 Pa = 1 hPa$$

Nur noch selten verwendete Maßeinheiten für den Luftdruck sind das *Torr* sowie die Einheit *Millimeter Quecksilbersäule* (Abkürzung: *mm Hg-Säule*). Sie lassen sich mit Hilfe folgender Beziehung in hPa umrechnen:

$$760 \text{ Torr} = 760 \text{ mm Hg-Säule} = 1013,25 \text{ hPa}$$

In einigen Ländern, vor allem in den USA, wird der Luftdruck in inches angegeben. Für die Umrechnung in hPa, bzw. Torr gilt folgende Beziehung:

$$29,92 \text{ inches} = 760 \text{ Torr} = 1013,25 \text{ hPa}$$

## **2. Die Abnahme des Luftdruckes mit zunehmender Höhe und die barometrische Höhenmessung**

Der Luftdruck ist also um so höher, je schwerer die Luftsäule ist, die über dem Messort lastet.

Luft ist außerdem, wie jedes andere Gas auch, kompressibel. Das heißt, sie wird durch ihr eigenes Gewicht in Erdbodenhöhe stärker zusammengedrückt als in höheren Schichten. Ihre Dichte ist also in Erdbodennähe hoch und sie nimmt mit zunehmender Höhe ab.

Welche fünf, für das Fliegen bzw. Ballonfahren wichtigen Schlussfolgerungen müssen wir daraus ableiten?

*2.1 Druck und Höhe sind miteinander gesetzmäßig verknüpft.* Nimmt die Höhe zu, dann nimmt der Druck ab, nimmt die Höhe ab, dann nimmt der Druck zu. Die Höhe lässt sich also mittels eines Barometers messen. Deshalb bezeichnet man diese Methode als „barometrische Höhenmessung“. Der Zusammenhang zwischen Druck und Höhe ist allerdings nicht linear. Der Druck nimmt mit zunehmender Höhe nach einem logarithmischen Gesetz ab (siehe Abbildung 2).

Die schematische Darstellung in der Abbildung 2 zeigt, wie Druckwerte bestimmten Höhen und Höhen bestimmten Druckwerten zugeordnet werden können. Auf diesem Prinzip arbeiten barometrische Höhenmesser. Sie messen also den Druck, ihre Anzeigeskala ist aber in Metern bzw. Fuß geeicht. Für die Standardatmosphäre lässt sich so jedem Druckwert **genau** eine Höhe zuordnen. Weicht die reale Atmosphäre jedoch von der Standardatmosphäre ab, und das ist die Regel, dann zeigt ein auf Standardatmosphäre geeichter Höhenmesser, eine zu große oder zu geringe Höhe an (siehe auch den folgenden Punkt 2.5).

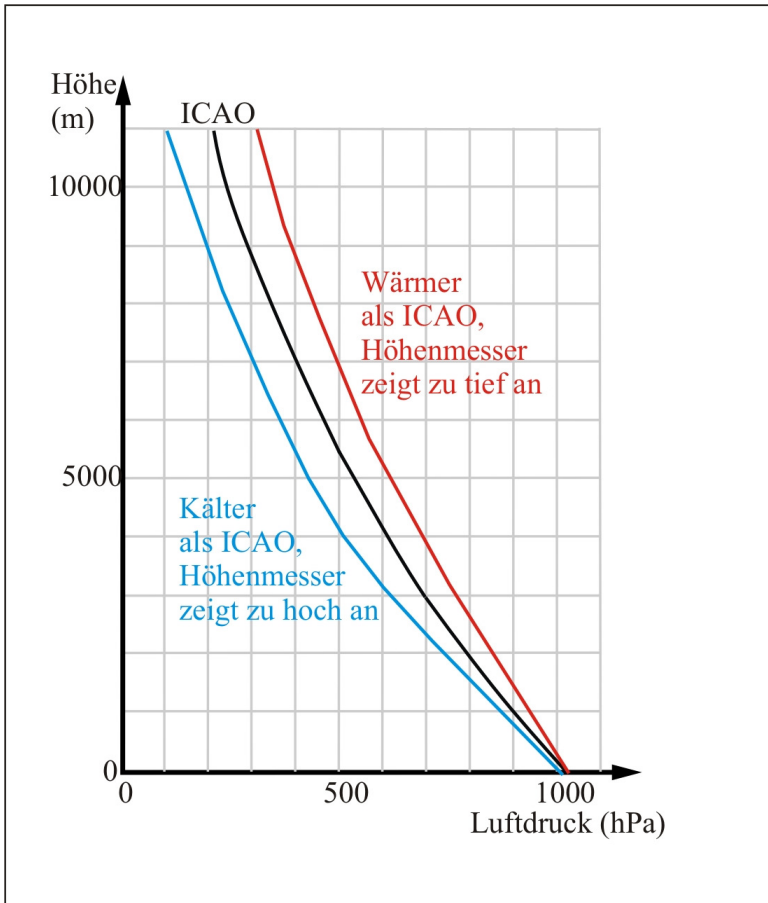


Abbildung 2: a) Luftdruckabnahme nach ICAO-Standardatmosphäre  
 b) für eine Atmosphäre die wärmer ist als die ICAO-Standardatmosphäre  
 c) für eine Atmosphäre die kälter ist als die ICAO-Standardatmosphäre  
 (schematische Darstellung)

2.2 Wegen der *Kompressibilität der Luft* nimmt der Luftdruck mit zunehmender Höhe nicht linear ab. Wenn man z.B. von der Erdoberfläche aus 8 m nach oben steigt, so fällt der Luftdruck etwa um 1 hPa. Befindet man sich aber in 2000 m Höhe, so muss man etwa 10 m, in 5000 m Höhe schon etwa 14 m nach oben steigen, um eine Druckänderung von 1 hPa zu erreichen. Diese Höhendifferenz bezeichnet man als *barometrische Höhenstufe*. Ihre Definition lautet:

*Die barometrische Höhenstufe ist die Höhendifferenz, die zwei Druckflächen mit einem Abstand von 1 hPa haben. Sie wird mit zunehmender Höhe größer.*

Weitere Werte kann man mit hinreichender Genauigkeit der Abbildung 3 entnehmen. Für Druckänderungen in Bodennähe kann man für die *barometrische Höhenstufe* mit folgenden Faustformeln rechnen:

$$1 \text{ hPa} \approx 8 \text{ m} \text{ oder } 1 \text{ hPa} \approx 26 \text{ ft}$$

für grobe Überschlagsrechnungen wird häufig verwendet:  $1 \text{ hPa} \approx 30 \text{ ft}$

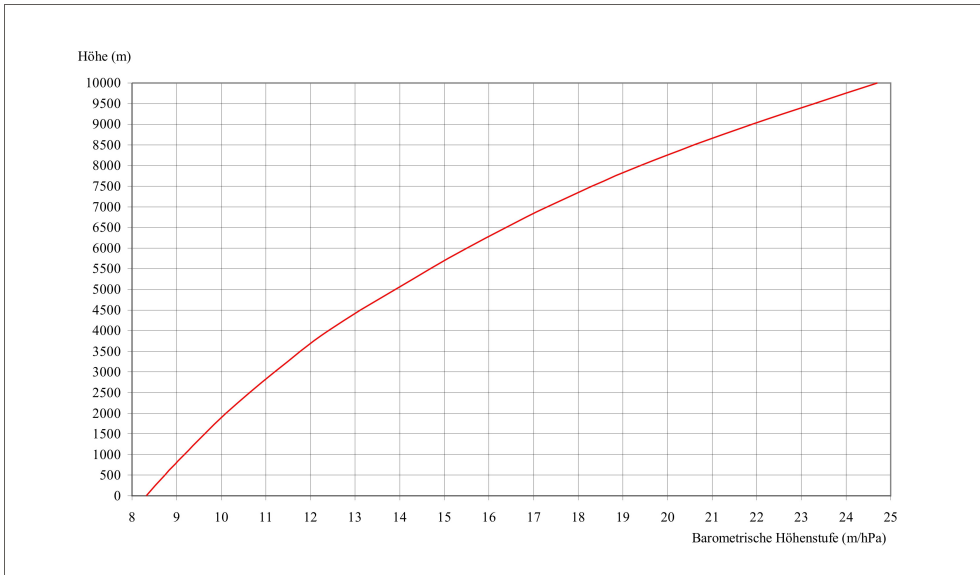


Abbildung 3: Diagramm zur Bestimmung der barometrischen Höhenstufe für Flughöhen bis 10000 m Höhe (Beispiel: die barometrische Höhenstufe in 1000 m Höhe ist 9,2 m/hPa)

Wer die barometrische Höhenstufe genauer bestimmen möchte, kann dies mit Hilfe der *Barometrischen Höhenformel* tun (Details dazu in „Moderne Flugmeteorologie für Ballonfahrer und Flieger“ von Dr. M. Reiber).

2.3 Der barometrische Höhenmesser zeigt aber auch *Druckänderungen als Höhenänderungen* an, die nur infolge von Luftdruckänderungen am Boden zustande kommen.

Fällt z.B. der Luftdruck am Boden, dann zeigt ein barometrischer Höhenmesser zunehmende Höhe, ohne dass er sich nach oben bewegt. Bei einem Druckfall von 1 hPa sind das etwa 8 m. Bei heranziehenden Sturmtiefs ist ein Druckfall von 3 bis 4 hPa pro Stunde, das entspricht also einer Änderung der Höhenanzeige von 24 bis 32 m, nicht selten. In extremen Fällen sind sogar Druckänderungen von -5 hPa pro Stunde möglich. Im Mittel fällt der Luftdruck bei sich annähernden Tiefdruckgebieten um etwa 0,5 hPa bis 3 hPa pro Stunde. Ähnlich große Werte des Druckanstieges sind auch bei heranziehenden Zwischenhochs zu erwarten.

Was ist also z. B. passiert, wenn der barometrische Höhenmesser am nächsten Morgen eine um 24 m größere Höhe als am Vortag anzeigt, ohne dass er bewegt wurde? Ganz einfach, der Luftdruck ist um 3 hPa gefallen.

*Vor allem bei längeren Streckenflügen bzw. Ballonfahrten mit Gasserstoffballonen muss man beachten, dass die Anzeige des Höhenmessers sich allein durch wetterbedingte Druckschwankungen im Laufe des Tages erheblich (bis etwa 100 m) ändern kann.*

2.4 *Der Flug vom Hoch ins Tief.* Problematisch kann es werden, wenn man von einem Ort A, wo am Erdboden z.B. ein Luftdruck von 1025 hPa herrscht, zum Ort B fliegt bzw. fährt, der auf der gleichen Höhe über NN (MSL) liegt wie A, aber der Luftdruck dort z.B. 20 hPa tiefer ist, also nur 1005 hPa beträgt. Steigt man am Ort A auf 200 m Höhe, dann entspricht das (lt. barometrischer Höhenstufe) einem Druckwert von 1000 hPa. Wenn der Pilot beim Flug nach B die Höhe von 200 m am barometrischen Höhenmesser hält, dann hat er in B aber gerade noch eine Höhe von 40 m, obwohl sein Höhenmesser immer noch 200 m anzeigt. Hindernisse würden dann, vor allem bei schlechter Sicht oder bei überraschender Hochnebelbildung, zu einer außerordentlichen Gefahr. Abbildung 4 stellt diesen Sachverhalt dar.

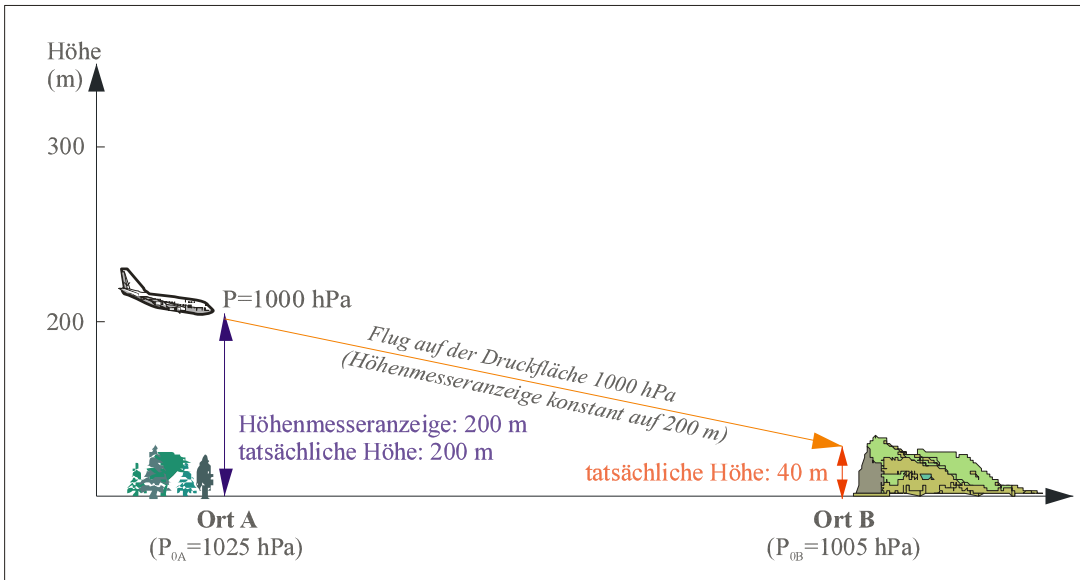


Abbildung 4: Flug von A nach B (vom Hoch ins Tief) auf einer Druckfläche mit konstanter Höhenmesseranzeige aber abnehmender tatsächlicher Flughöhe, weil die Druckfläche von A nach B geneigt ist.

Wir wollen uns deshalb unbedingt merken:

*Der barometrische Höhenmesser zeigt bei einem Flug mit konstanter Höhenanzeige in Wirklichkeit den Flug auf einer Fläche konstanten Luftdruckes an. Ist diese Fläche zum Erdboden hin geneigt (wie bei einem Flug in ein Tiefdruckgebiet hinein), verringert sich die Flughöhe ständig, steigt diese Fläche an (wie bei einem Flug in ein Hochdruckgebiet hinein), nimmt die Flughöhe zu, obwohl der Höhenmesser immer die gleiche Höhe anzeigt. Deshalb ist beim Flug vom Hoch zum Tief besondere Aufmerksamkeit angebracht, weil die am Höhenmesser angezeigte Höhe größer ist, als die wirkliche.*

Daraus leitet sich ja auch die bekannte und leider auch durch schmerzliche Erfahrungen gemachte Fliegerweisheit ab:

„Vom Hoch zum Tief, geht's schief“

Vor allem bei Nachtfahrten, bei Fahrten über größere Distanzen und Fahrten über Gebirgen, aber auch bei schlechten Flugsichten oder Hochnebeleinbrüchen ist dieser Sachverhalt auch von Ballonfahrern unbedingt ins Kalkül zu ziehen. Bei Kurzstanzfahrten mit einem HL-Ballon unter CAVOK-Bedingungen ist das aber eher unproblematisch.

**2.5 Der Temperaturfehler.** Auch die Temperatur bzw. ihre vertikale Verteilung haben Einfluss auf die Anzeigegenauigkeit des barometrischen Höhenmessers.

Da bei der barometrischen Höhenbestimmung auch die Mitteltemperatur der Luftschicht eingerechnet und dafür ebenfalls die Werte der ICAO-Standardatmosphäre verwendet werden, treten dann Fehler bei der Höhenbestimmung auf, wenn die gemessenen Temperaturen von denen der Standardatmosphäre abweichen. Und das ist praktisch immer so, es ist normal, dass die reale Atmosphäre von der Standardatmosphäre abweicht!

Wir wollen uns merken:

*Sind die gemessenen Temperaturen tiefer als die der Standardatmosphäre, dann fliegt das Luftfahrzeug tiefer als der Höhenmesser anzeigt; sind die gemessenen Temperaturen höher, hat es eine größere Flughöhe als angezeigt. Der Fehler für die Höhenanzeige beträgt je Grad Temperaturunterschied zwischen der real vorhandenen und der Standardatmosphäre 0,4 m/100 m Schichtdicke.*

Die Größenordnung des Temperaturfehlers soll durch ein Beispiel demonstriert werden. Wir betrachten die Schicht von 0 bis 2000 m Höhe und nehmen als real gemessene Werte unter

winterlichen Bedingungen an:

$t_0$ real	-5 °C (reale, gemessene Temperatur am Erdboden)
$t_{2000}$ real	-15 °C (reale, gemessene Temperatur in 2000 m Höhe)
$t_m$ real	-10 C (Schichtmitteltemperatur der realen Atmosphäre in der Schicht von 0 bis 2000 m, [das entspricht dem arithmetischen Mittel])
$t_0$ ICAO	15 C (Temperatur am Erdboden nach ICAO-Standardatmosphäre)
$t_{2000}$ ICAO	2 °C (Temperatur in 2000 Höhe nach ICAO-Standardatmosphäre)
$t_m$ ICAO	8,5 °C (Schichtmitteltemperatur nach ICAO-Standardatmosphäre in der Schicht von 0 bis 2000 m)

Die Fehlanzeige des Höhenmessers beträgt dann infolge der Temperaturabweichung von den Werten der ICAO-Standardatmosphäre:

$$18,5 * 0,4 \text{ m}/100 \text{ m} = 7,4 \text{ m}/100 \text{ m}$$

und für die ganze Schicht von 2000 m:

$$20 * 7,4 \text{ m}/2000 \text{ m} = 148 \text{ m}/2000 \text{ m}$$

In 2000 m Höhe fliegt das Luftfahrzeug unter den angenommenen Bedingungen ca. 150 m tiefer als der Höhenmesser anzeigt!

Das Beispiel macht deutlich, dass größere Temperaturabweichungen von der ICAO-Standardatmosphäre in der Praxis unbedingt Beachtung finden sollten. Wir wollen uns merken:

*Bei Flügen in geringen Höhen über flachem Land ist dieser Fehler von geringerer Relevanz, aber bei Flügen über Gebirgen (auch niedrigen Gebirgen) und ganz besonders bei Alpenüberquerungen mit einem Ballon oder Fugzeug (vor allem im Winter) wird die Nichtbeachtung einer möglichen falschen Anzeige des Höhenmessers zu einem echten Risiko. Bei einem Flug bzw. einer Fahrt in den Wolken steigt das Risiko einer Hindernisberührung signifikant an. Unter Sichtbedingungen ist es wohl weniger die Gefahr einer Hindernisberührung, als die Gefahr in zu geringer Höhe über den Bergen in Turbulenz und/oder abwärtsgerichtete Luftströmungen im Lee der Berge zu geraten.*

Ganz allgemein kann man also sagen, dass bei einem Flug von einer wärmeren Luftmasse in eine kältere Luftmasse hinein, der barometrische Höhenmesser immer eine zu große Flughöhe anzeigt. Alte Fliegersprüche beschreiben dieses Phänomen in der ihr eigenen klaren Sprache:

*„From warm to cold makes you never old“*

oder, wie die Deutschen es treffend ausdrücken:

*„Im Winter sind die Berge höher“ oder „Von Warm nach Kalt wird man nicht alt“*

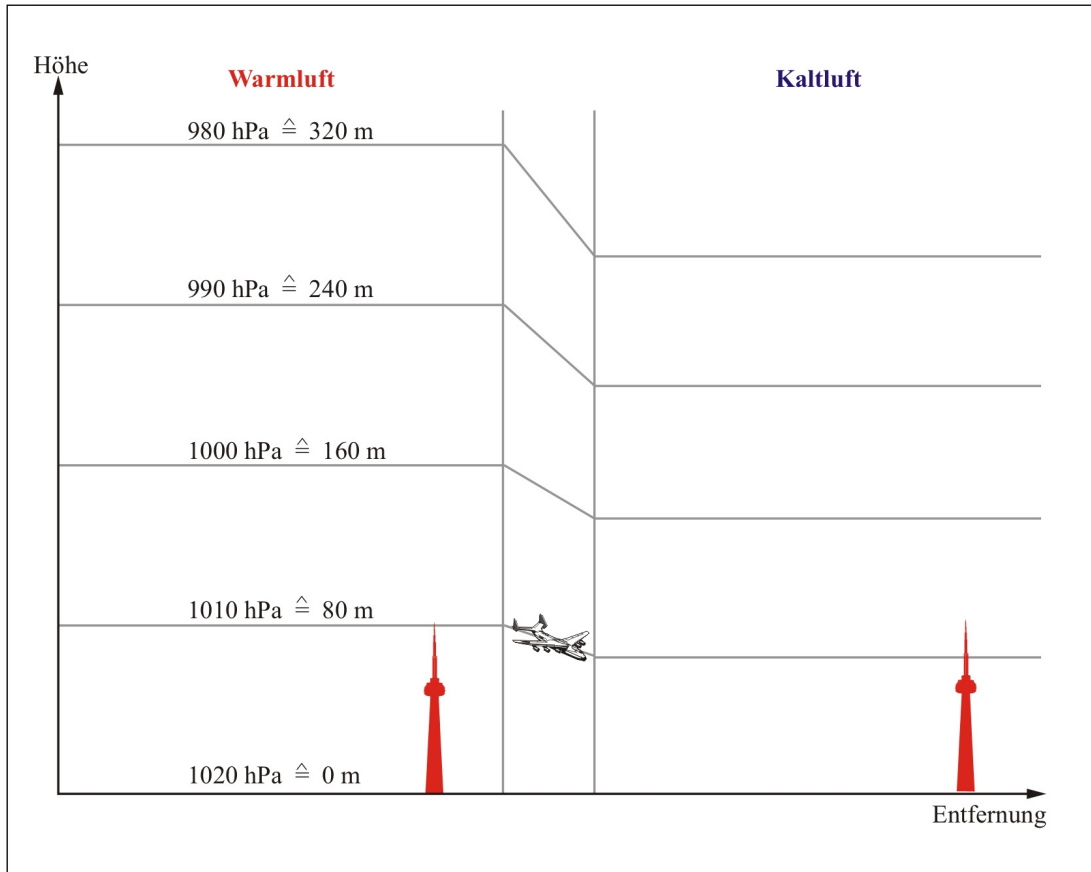


Abbildung 5: Zur Erklärung der Fliegerweisheit „Im Winter sind die Berge höher“. Beim Flug von warmer in kalte Luft zeigt der barometrische Höhenmesser in der Kaltluft zwar die gleiche Höhe wie in der Warmluft an. In Wirklichkeit ist die Flughöhe aber deutlich geringer (siehe auch Abbildung 2).

### 3. Luftdruckreduktion und Einstellung des barometrischen Höhenmessers

Eine wesentliche Grundlage für jede Wetteranalyse und Wettervorhersage, auch von Flugwettervorhersagen, sind Bodenwetterkarten. In diese Wetterkarten werden u.a. Luftdruckwerte von einer großen Anzahl Wetterstationen eingetragen. Diese Werte sind aber nur deshalb miteinander vergleichbar, weil sie alle in gleicher Weise auf NormalNull (NN), oder auch als *mean sea level (MSL)* bezeichnet, umgerechnet sind. Diese Umrechnung des Luftdruckes auf MSL wird als Luftdruckreduktion bezeichnet. Liegt z.B. ein Flugplatz oder Ballonstartplatz 80 m über MSL, so kann man überschlagsmäßig mit Hilfe der barometrischen Höhenstufe für Bodennähe (80 m  $\approx$  10 hPa) den Luftdruck auf MSL umrechnen (in der Fachsprache sagt man *reduzieren*) indem man 10 hPa zum gemessenen Wert dazuzählt. Dadurch erst wird eine Analyse des Druckfeldes möglich, und die Lage von Tief- und Hochdruckgebieten kann erkannt und genau fixiert werden. Die Luftdruckreduktion spielt auch in der Luftfahrt bei der barometrischen Höhenmessung eine bedeutende Rolle. Weil barometrische Höhenmesser zur Grundausrüstung eines jeden Luftfahrzeuges gehören, sollen Prinzip und Vorgehensweise bei der Luftdruckreduktion und der Einstellung dieser Geräte näher erläutert werden.

Aus der Zeit, als der Flugfunk mit Hilfe des Morsealphabetes durchgeführt wurde, stammen heute noch die Bezeichnungen für die verschiedenen, für die Höhenmessung wichtigen Druckwerte. Es sind nach der alten Fungersprache die sogenannten Q-Gruppen *QFF*, *QNH*, und *QFE*.

Übrigens hört man gelegentlich jetzt noch, wenn man mit „alten Hasen“ der Fliegerei spricht, auch von anderen Q-Gruppen z.B. *QNT* für Windspitzen, *QBJ* für Wolkenobergrenze, *QBB* für Wolkenuntergrenze u.a. Offiziell werden diese Bezeichnungen aber nicht mehr verwendet. Wir wollen uns hier ausschließlich den Q-Gruppen für den Luftdruck zuwenden.

### 3.1 Der QFF-Wert

Der QFF-Wert ist der auf MSL reduzierte Luftdruck, wie er in den Wetterdiensten ermittelt und verwendet wird. Es ist eine mathematisch-physikalisch relativ exakt durchgeführte Reduktion, die für die Fliegerei und das Ballonfahren in dieser Genauigkeit nicht relevant ist und deshalb in der Praxis der Flugmeteorologie nicht angewandt wird.

Für diese Art der Reduktion verwendet man die barometrische Höhenformel. Als gemessene Werte gehen in diese Formel die Außentemperatur und die Luftfeuchtigkeit (als virtuelle Temperatur) in Barometerhöhe ein. Für die Berechnung der Schichtmitteltemperatur wird der Einfachheit halber ein Temperaturgradient von  $0,6 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$  angenommen.

Die Berechnung des QFF-Wertes ist relativ aufwändig. In der Wetterdienstpraxis wird das mittels Rechner oder mit Hilfe von Tabellen durchgeführt. Trotz alledem ist auch dieser Wert nicht ganz genau, vor allem dann nicht, wenn der Temperaturgradient von dem vorgegebenen Wert von  $0,6 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$  stark abweicht (bei kräftig ausgebildeten Bodeninversionen). Dann muss man zur Bestimmung des Temperaturgradienten einen nahegelegenen Temp zu Rate ziehen.

### 3.2 Der QNH-Wert, QNH-Höhe, wahre Höhe (true altitude)

Der QNH-Wert ist der in Höhe der Landebahnschwelle gemessene und auf MSL reduzierte Luftdruck. Die Reduktion wird hier auf Basis der Werte der ICAO-Standardatmosphäre durchgeführt. Deshalb ist dieser Wert in der Regel etwas ungenauer als der QFF-Wert, für die barometrische Höhenmessung ist er aber ausreichend genau. Er ist wie folgt definiert:

*Ist an der Druckskala des barometrischen Höhenmessers der QNH-Wert eingestellt, dann wird an der Hauptskala die Höhe über MSL angezeigt. Befindet sich das Flugzeug (der Ballon) auf der Start- und Landebahn (dem Startplatz), dann zeigt der Höhenmesser die Höhe des Flugplatzes (des Startplatzes) über MSL an. Diese Höhe bezeichnet man als **QNH-Höhe**. Sie ist für Flüge unterhalb von 5000 ft MSL oder 2000 ft über Grund zu verwenden. Die **wahre Höhe** ergibt sich, wenn die QNH-Höhe um die Temperaturabweichung von der Standardatmosphäre korrigiert wurde. Ist die Temperaturabweichung Null, dann ist die QNH-Höhe gleich der wahren Höhe.*

### 3.3 Der QFE-Wert

Der QFE-Wert ist der Luftdruck, gemessen in Höhe der Landebahnschwelle bzw. am Startplatz des Ballons. Wir wollen uns merken:

*Ist an der Druckskala des barometrischen Höhenmessers der QFE-Wert eingestellt, dann wird an der Hauptskala die Höhe über der Landebahnschwelle, bzw. die Höhe über dem Startplatz des Ballons angezeigt. Befindet sich das Flugzeug auf der Start- und Landebahn bzw. der Ballon noch am Startplatz, dann zeigt der Höhenmesser die Höhe 0 m an. Im Flug wird also nicht die Höhe über Grund, sondern die Höhe über dem Startplatz angezeigt.*

Der QFE-Wert ist immer kleiner als der QNH-Wert, wenn der Flugplatz, bzw. der Startplatz über MSL liegt. Befindet sich die Landebahnschwelle eines Flugplatzes, bzw. der Startplatz des Ballons genau auf MSL, dann sind QFE und QNH gleich groß. Liegen Flug- bzw. Startplatz unterhalb MSL (z.B. Amsterdam), dann ist der QFE-Wert größer als der QNH-Wert. Ist z. B. die Start- und Landebahn eines Flugplatzes stärker geneigt, werden für die beiden Landebahnschwellen sogar unterschiedliche QFE- bzw. QNH-Werte bestimmt.

Für das Fliegen hat der QFE-Wert den Vorteil, dass bei der Landung am gleichen Ort (bei Rückkehr zum Startflugplatz) der Höhenmesser auf Null zeigt. Er ist aber nicht geeignet zur Feststellung der Höhe über MSL oder über Grund während des Fluges bzw. während einer Ballonfahrt.

### 3.4 Fliegen bzw. Fahren nach Standarddruck, Druckhöhe (pressure altitude)

Beim Fliegen bzw. Fahren nach Standarddruck wird, ohne Rücksicht auf den gerade herrschenden Luftdruck, an der Druckskala der Druckwert 1013,25 hPa eingestellt. Wir merken uns:

*Stellt man am barometrischen Höhenmesser den Druckwert von 1013,25 hPa ein, dann zeigt er genau die Höhe über der Druckfläche 1013,25 hPa an. Diese Höhe bezeichnet man als **Druckhöhe** oder **pressure altitude**. Die Einstellung auf Standarddruck ist für Flüge nach Sichtflugregeln vorgeschrieben, wenn sie 5000 ft MSL oder 2000 ft über Grund überschreiten. Ist er aktuelle Luftdruck höher als 1013,25 hPa, dann fliegt das Flugzeug höher als der Höhenmesser anzeigt, ist der aktuelle Luftdruck niedriger als 1013,25 hPa, dann fliegt das Flugzeug tiefer als der Höhenmesser anzeigt.*

Fliegen nach Standarddruck ist Voraussetzung für die Höhenstaffelung und hat somit einen sehr wichtigen Flugsicherungsaspekt.

Als **Flight-Level** bezeichnet man die Höhe über der Druckfläche 1013,25 hPa in Fuß, geteilt durch 100.

Zum Beispiel bedeutet FL 100; 10000 ft über dem Niveau, in dem der Luftdruck 1013,25 hPa beträgt, oder FL 180; 18000 ft über dem Niveau, in dem der Luftdruck 1013,25 hPa beträgt usw.

Noch zwei Definitionen in diesem Zusammenhang:

**Übergangshöhe:** ist die Höhe in und unterhalb derer der Luftfahrzeugführer den Höhenmesser auf den von der Flugverkehrskontrolle übermittelten QNH-Wert einzustellen hat (5000 ft MSL, 2000 ft über Grund)

**Übergangsfläche:** festgelegte erste nutzbare Flugfläche (FL), die mindestens 1000 ft oberhalb der Übergangshöhe von 5000 ft liegt.

#### 4. **Horizontale Luftdruckverteilung und Darstellung des Luftdruckfeldes auf Boden- und Höhenwetterkarten**

Für die Wetteranalyse und -vorhersage ist das Bodendruckfeld eine wichtige Ausgangsgröße. Die Lage von Hoch- bzw. Tiefdruckgebieten ist wesentlicher Bestandteil dieser Analyse.

Aus der Kenntnis der Bodendruckverteilung kann ein meteorologisch geschulter Pilot aber wesentliche qualitative Aussagen ableiten. Deshalb sollen hier zunächst einmal typische Druckgebilde, wie sie in den Wetterkarten immer wieder vorkommen, dargestellt und beschrieben werden (weitere Details in „Moderne Flugmeteorologie für Ballonfahrer und Flieger“ von Dr. M. Reiber).

Unter anderem enthalten die von den Wetterdiensten gezeichneten Bodenwetterkarten an jeder Wetterstation die Eintragung des Luftdruckwertes. Das sind QFF-Werte mit einer Genauigkeit von 1/10 hPa. Wenn alle QFF-Werte eingetragen sind, kann man durch Vergleich der Einzelwerte Isobaren einzeichnen.

*Isobaren sind Linien gleichen Luftdruckes; sie verbinden also Orte mit gleichem Luftdruck.*

Auf Wetterkarten mit größeren geographischen Ausschnitten (etwa ganz Europa und Atlantik bis zur Küste Nordamerikas) zeichnet man die Isobaren in der Regel im Abstand von 5 zu 5 hPa, auf Karten mit kleineren geographischen Ausschnitten (etwa Bundesrepublik Deutschland und angrenzende Staaten) auch von 1 zu 1 hPa. Für die genaue Bestimmung des Windfeldes sind natürlich *Feinanalysen* des Druckfeldes mit einem Isobarenabstand von einem hPa deutlich besser, als größere Isobarenabstände. Vor allem für die Praxis des Ballonfahrens ist es deshalb durchaus nützlich das Druckfeld mit einem Isobarenabstand von einem hPa, bei sehr geringen Druckunterschieden vielleicht sogar nur 0,5 hPa, darzustellen. Auf diese Weise kann man kleinräumige Zirkulationen erkennen und für das Ballonfahren nutzen (z.B. kleine Lee- oder kleine Hitzetiefs). Solche kleinräumigen Zirkulationen treten bei schwachwindigen Wetterlagen deutlich häufiger auf, als allgemein angenommen wird.

Charakteristische Isobarenformen haben in der Meteorologie Bezeichnungen erhalten, die durch die

Darstellung von Wetterkarten in der Presse und im Fernsehen auch weithin bekannt sind. In der Abbildung 6 sind häufig vorkommende Formen dargestellt, die einer weiteren Beschreibung wohl nicht bedürfen.

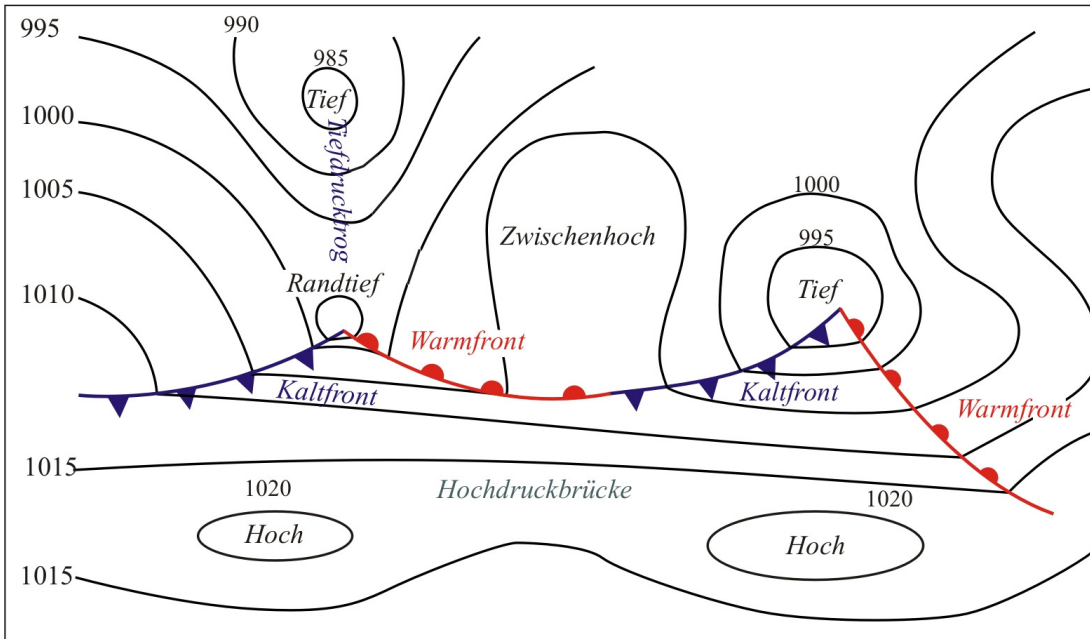


Abbildung 6: Charakteristische Isobarenformen und ihre Bezeichnungen; typische Wetterfronten

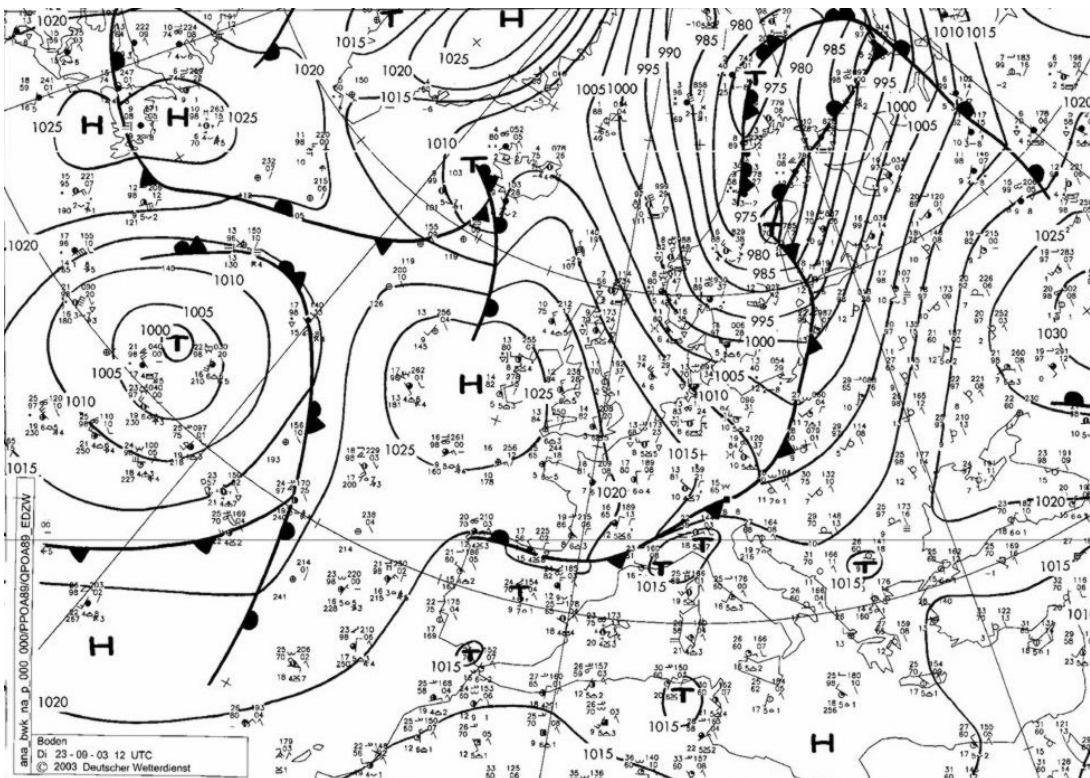


Abbildung 7: Das Original einer Bodenwetterkarte vom 23.09.2003 12.00 UTC

In Höhenwetterkarten werden keine Isobaren eingezeichnet. Hier werden Linien gleicher Höhe für konstante Druckflächen, z. B. für 850, 700, 500 hPa usw. gezeichnet. Diese Linien bezeichnet als Isohypsen. Wir merken uns:

*Isohypsen sind Linien gleicher Höhe einer bestimmten Druckfläche. Diese Darstellungsform wendet man bei Höhenwetterkarten an, die auch als Topographien bezeichnet werden. Der Abstand der*

Isohypsen wird in geopotenziellen Metern (gpm) angegeben. Die Zahlenwerte in gpm sind etwa gleich den Zahlenwerten in m. Meist werden die Isohypsen in einem Abstand von 40 gpm oder 80 gpm gezeichnet. Diese Abstände entsprechen etwa 5 bzw. 10 hPa (unter Verwendung der barometrischen Höhenstufe  $8\text{ m} = 1\text{ hPa}$ ).

Höhenwetterkarten haben, neben der Bodenwetterkarte, eine große Bedeutung für die Wettervorhersage. In der Flugmeteorologie verwendet man vorzugsweise die Topographien folgender Druckflächen:

Druckfläche (hPa)	Flight level	Höhe in m über MSL (nach ICAO-Standard)	Temperatur in °C (nach ICAO-Standard)
850	FL 50	1457 (in praxi 1500)	5,53 (in praxi 5,5)
700	FL 100	3012 (in praxi 3000)	-4,58 (in praxi -4,5)
500	FL 180	5574 (in praxi 5500)	-21,23 (in praxi -21,0)
300	FL 300	9164 (in praxi 9000)	-44,57 (in praxi -44,5)
200	FL 385	11784 (in praxi 12000)	-56,5 (in praxi -56,5)
100	FL 530	16180 (in praxi 16000)	-56,5 (in praxi -56,5)

Tabelle 1: Wichtige Druckflächen mit FL-, Temperatur- und Höhenangabe

Die Abbildung 8 ist ein Beispiel für eine Topographie einer 500 hPa Fläche, deren mittlere Höhe in etwa 5500 m liegt, das entspricht FL 180. Die in der Abbildung enthaltenen Zahlenwerte sind in geopotenziellen Dekametern (gpdam) angegeben. Z. B. bedeutet der Zahlenwert 576, dass der Druckwert von 500 hPa entlang dieser Isohypse 5760 gpm hoch liegt.

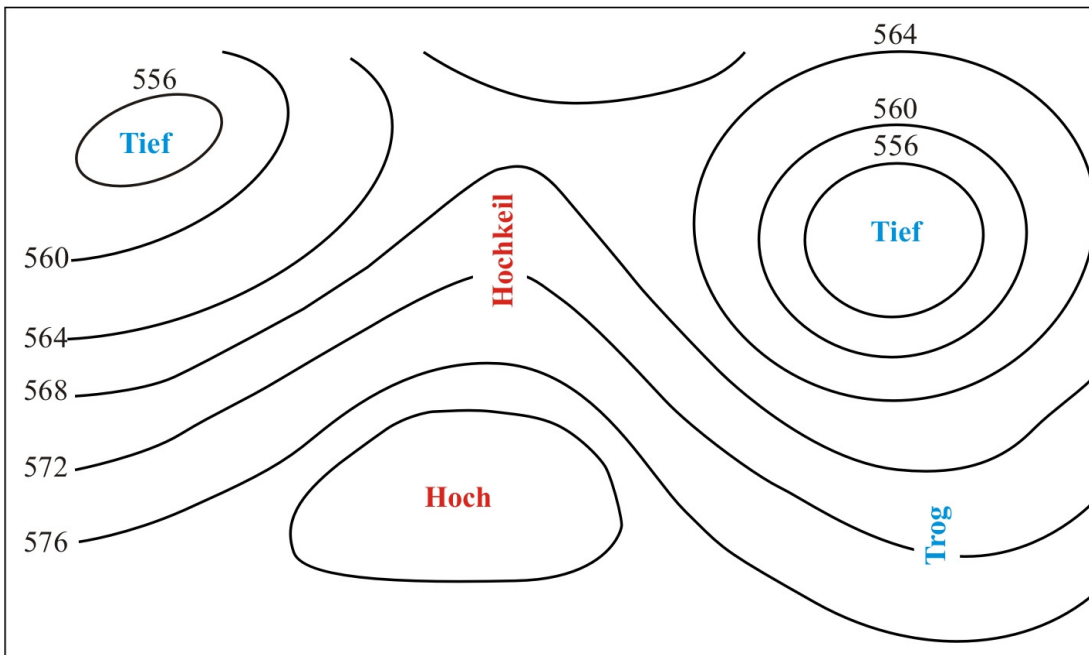


Abbildung 8: Topographie einer 500-hPa-Fläche (schematisch)

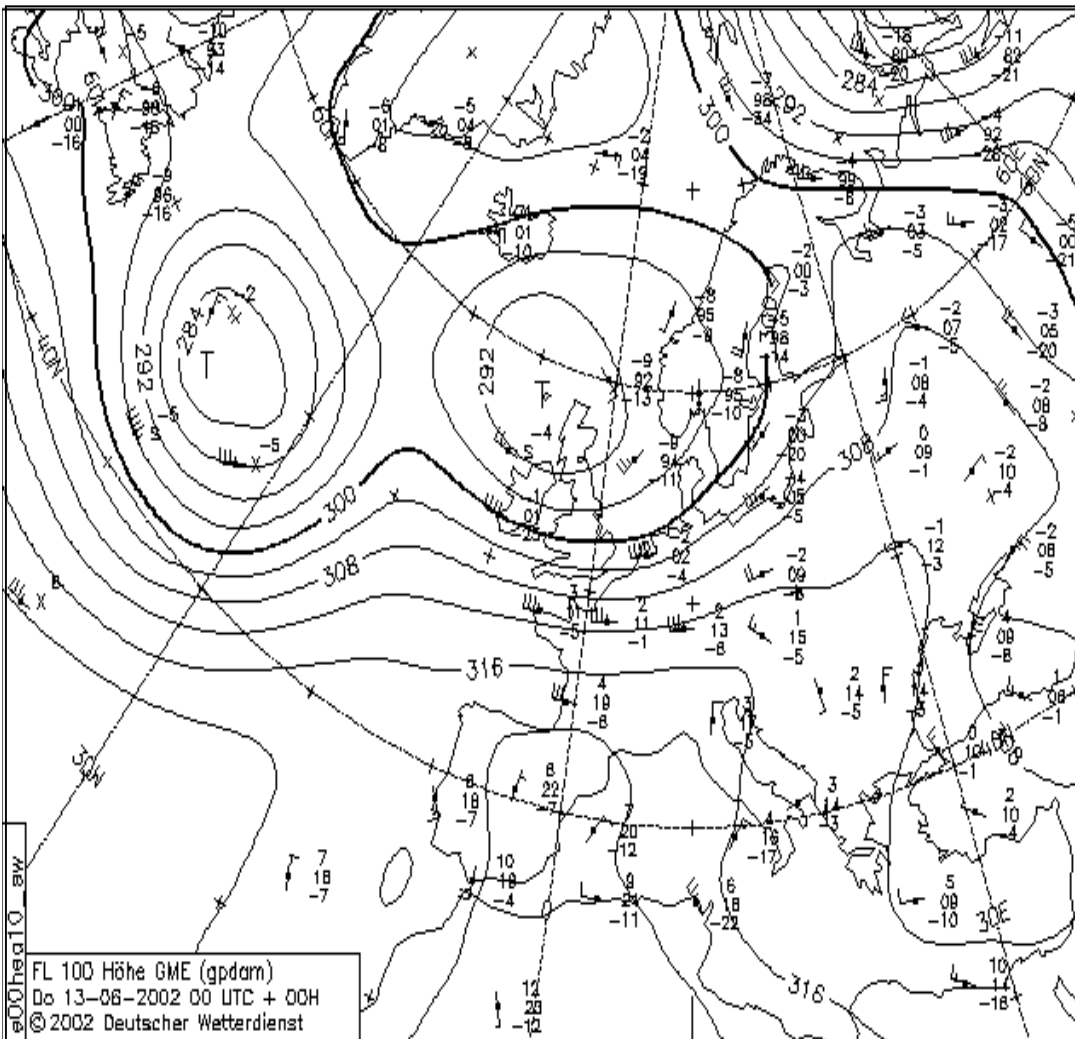


Abbildung 9: Das Original einer Topographie 700 hPa (FL 100) vom 13.06.2002 00.00 UTC (eingetragen werden in einer absoluten Topographie immer: der Windpfeil, die Temperatur, der Taupunkt und die Höhe der Druckfläche in gpdam [siehe Isohypsen])

Höhenwetterkarten haben in der Wettervorhersage eine besondere Bedeutung. Kurz zusammengefasst gilt:

Die *Topographie 700 hPa* und die Feuchteverteilung in dieser Höhe gibt einen guten Anhalt für den Bedeckungsgrad mit mittelhohen Wolken und für eine Niederschlagsprognose (Details dazu siehe „Moderne Flugmeteorologie für Ballonfahrer und Flieger“ von Dr. M. Reiber). Zur Bestimmung der Verlagerungsrichtung und -geschwindigkeit von Fronten, hochreichenden Gewittern und Niederschlagsgebieten, verwendet man die *Topographie 500 hPa*. Für die Navigation im low level und für die Vorhersage des Bedeckungsgrades mit tiefen Wolken und ihrer Verlagerung wird die *Topographie 850 hPa* gebraucht. Eine besondere Bedeutung haben die Topographien 700 und 500 hPa für die Vorbereitung und Durchführung von *Alpentraversionen* mit Flugzeugen bzw. Ballonen, weil aus ihr die Strömungs- und Turbulenzverhältnisse zwischen etwa 3000 und 5500 m Höhe ableitbar sind. Die Topographien 300, 200, und 100 hPa spielen bei der Diagnose und Prognose von Strahlströmungen (Jetstream) und CAT (clear air turbulence, das ist Turbulenz im wolkenfreien Raum) eine wichtige Rolle.

## 5. Der Sauerstoffpartialdruck und seine Bedeutung für das Leistungsvermögen von Piloten

Der Gesamtluftdruck ist die Summe aller Teil- oder Partialdrücke der einzelnen Komponenten eines

Gases. Das physikalische Gesetz dafür, das sogenannte *Dalton'sche Gesetz* lautet:

$$P_{\text{gesamt}} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + \dots + P_n$$

und in Anwendung auf das Gasgemisch Luft gilt:

$$P_{\text{Luft}} = P_{\text{Stickstoff}} + P_{\text{Sauerstoff}} + P_{\text{Kohlendioxid}} + P_{\text{Argon}} + P_{\text{Wasserdampf}} + \dots + P_{\text{andere Gase}}$$

Der Partialdruck einer Gaskomponente ergibt sich dann aus dem Produkt des prozentualen Volumenanteils des jeweiligen Gases und dem Gesamtluftdruck. Dafür sollen folgende Beispiele stehen:

➤ Der Partialdruck des Stickstoffes

a) in Bodennähe (1013,25 hPa):

$$P_{\text{Stickstoff}} = 0,78 * 1013,25 = 790,3 \text{ hPa}$$

b) in etwa 5500 m Höhe (500 hPa):

$$P_{\text{Stickstoff}} = 0,78 * 500 = 390 \text{ hPa}$$

➤ Der Partialdruck des Sauerstoffes

a) in Bodennähe (1013,25 hPa):

$$P_{\text{Sauerstoff}} = 0,21 * 1013,25 = 212,78 \text{ hPa}$$

b) in etwa 5500 m Höhe (500 hPa):

$$P_{\text{Sauerstoff}} = 0,21 * 500 = 105 \text{ hPa}$$

Wir sehen, der Partialdruck des Sauerstoffes beträgt am Erdboden unter Normalbedingungen etwa 212 hPa, der des Stickstoffes etwa 790 hPa, der des Argon etwa 10 hPa usw. Der Gesamtluftdruck ergibt sich dann als Summe dieser Partialdrücke zu 1013,25 hPa. In der Höhe nimmt der Gesamtluftdruck ab und damit auch die Partialdrücke der einzelnen Gase. In 5500 m Höhe sind die Partialdrücke etwa auf die Hälfte ihres Wertes in Bodennähe gefallen.

Für das Leben, insbesondere natürlich auch für das menschliche Leben, hat der Sauerstoffpartialdruck große Bedeutung. Sauerstoff wird vom Hämoglobin des Blutes in den Lungen aufgenommen und mit dem Blut zu allen Organen und Muskeln transportiert. Der Sauerstoff wird dort zur Energiegewinnung, also für die Aufrechterhaltung aller lebenswichtigen Prozesse benötigt. Der menschliche Organismus ist in seiner Funktion an den in Bodennähe herrschenden Partialdruck des Sauerstoffes von etwa 210 hPa optimal angepasst. Verringert sich aber der Gesamtluftdruck merklich, z.B. beim Aufstieg im Hochgebirge oder beim Fliegen in größeren Höhen, dann verringert sich auch der Sauerstoffpartialdruck und das verschlechtert das allgemeine Befinden, das Leistungsvermögen und das Reaktionsvermögen des Menschen. Oberhalb von etwa 12000 ft muss man deshalb mit Krankheitssymptomen wie Kopfschmerz, Übelkeit, Erbrechen, verstärktem Kältegefühl bis hin zur Bewusstlosigkeit rechnen. In sehr großen Höhen oder bei längerem Aufenthalt in mittleren Höhen kann ein zu geringer Sauerstoffpartialdruck sogar zum Tod führen. Die Anfälligkeit ist individuell verschieden, junge und gesunde Menschen sind weniger betroffen als ältere und kranke. Besonders gefährdet sind Raucher, weil bei ihnen die Bindungskapazität von Sauerstoff an das Hämoglobin des Blutes vermindert ist. Durch ein gezieltes Anpassungstraining, wie Ausdauersport oder Aufenthalt im Hochgebirge, kann die Anfälligkeit verringert werden. Das ist ja gerade das Phänomen, was Spitzen(ausdauer)sportler beim Höhentaining ausnutzen. Sie trainieren in Höhen um oder über 2000 m über MSL und passen den Organismus an einen geringeren Sauerstoffpartialdruck an. In geringen Höhen, mit höherem Sauerstoffpartialdruck, ist der Sportler dann in der Lage, zumindest vorübergehend, noch bessere Leistungen als vorher zu vollbringen.

Die auch als Höhenkrankheit bezeichneten Krankheitserscheinungen, die infolge des reduzierten Sauerstoffpartialdruckes auftreten, dürfen keinesfalls unterschätzt werden. Es gibt nachweislich Katastrophen, deren Ursache nur darin besteht, dass Piloten dieses Phänomen ignoriert haben.

Dafür ein Beispiel, das sich auf den „aerokurier“ 11/99 bezieht.

Ein Pilot, begleitet von seiner Ehefrau; startete mit seiner Piper PA-28 zu einem Privatflug. Nach knapp zwei Stunden Flugzeit meldet sich der Pilot bei der Flugverkehrskontrollstelle und war bis dahin auf FL 120 gestiegen. Kurz darauf bat der Pilot, weil er in den Wolken mit Vereisung

rechnete, auf FL 140, dann auf FL 160 und schließlich weiter auf 170 steigen zu dürfen. Da hier offenbar immer noch Vereisung herrschte, bat er auf FL 190 steigen zu dürfen und auch dafür wurde die Freigabe erteilt. Der Fluglotse schlug dem Piloten vor, einen südlichen Kurs zu fliegen, da in dieser Richtung bessere Wetterbedingungen herrschten. Dieser Funkspruch wurde vom Piloten nicht bestätigt. Statt dessen flog die Piper keine Linkskurve nach Süden, sondern eine Rechtskurve mit extrem hoher Sinkrate von 50 m/s. Nach Zeugenaussagen stürzte das Flugzeug um die Längsachse drehend aus den Wolken und prallte, mit beiden Insassen an Bord, auf dem Boden auf. Die Obduktion ergab eindeutig, die Absturzursache waren Hirnleistungsstörungen des Piloten infolge von Sauerstoffmangel. Der Pilot war bis auf FL 190 gestiegen ohne eine mobile Sauerstoffanlage an Bord zu haben!

Wir sollten uns merken:

*Die LuftBO schreibt vor, dass eine Luftfahrzeugbesatzung bei Flügen über 12000 ft zusätzlich Sauerstoff atmen muss. Um Risiken rechtzeitig vorzubeugen sollten zumindest Raucher und untrainierte Personen schon mit einer zusätzlichen Sauerstoffbeatmung beginnen, sobald sie längere Zeit (mehr als 30 Minuten) in oder oberhalb 10000 ft Höhe fliegen.*

Die amerikanische Luftfahrtbehörde FAA schreibt ihren Piloten vor, dass sie zusätzlich Sauerstoff atmen müssen, wenn sie länger als 30 Minuten über 12500 ft fliegen.

Die Tabelle 2 gibt genauere Anhaltswerte über den Zusammenhang zwischen Sauerstoffpartialdruck, Flughöhe, Krankheitssymptomen und vorbeugenden Maßnahmen.

<b>Flughöhe</b>	<b>Sauerstoffpartialdruck der Außenluft</b>	<b>Sauerstoffmangelsymptome und Vorbeugung</b>
0 m/0 ft	ca. 210 hPa	keine
<b>Reaktionsschwelle ab 2000 m/6500 ft</b>	ca. 170 hPa	<i>Symptome:</i> bei Untrainierten treten erste Anzeichen von Müdigkeit und Erschöpfung auf <i>Vorbeugung:</i> sportliches Training, schneller und tiefer atmen
<b>Störungsschwelle ab 4000 m/13000 ft</b>	ca. 130 hPa	<i>Symptome:</i> es treten echte Funktionsstörungen auf, Reaktionszeit ist verlängert, logisches Denken beeinträchtigt, es kommt zu Übelkeit, Schwindelgefühl, Kribbeln in den Fingern und in der Zunge, Herzklopfen, Schläfenklopfen und Willenlosigkeit, gelegentlich haben Piloten unter Sauerstoffmangel über euphorische Zustände, ohne subjektive Beschwerden berichtet, das ist eine heimtückische Gefahr! <i>Vorbeugung:</i> Sauerstoffgerät zur künstlichen Beatmung ab 12000 ft Höhe einsetzen
<b>Kritische Schwelle ab 6000 m/20000 ft</b>	ca. 100 hPa	<i>Symptome:</i> wie unter "Störungsschwelle", dazu kommen, rasender Puls, schnelle Atmung, Muskelzuckungen, Lähmungserscheinungen, Bewusstseinstörungen bis zur Bewusstlosigkeit <i>Vorbeugung:</i> Unbedingt Sauerstoffgerät zur künstlichen Beatmung einsetzen, besser Druckanzug oder Druckkabine verwenden
<b>Todesschwelle ab 8000 m/26000 ft</b>	ca. 75 hPa	<i>Symptome:</i> Muskelzuckungen, Krämpfe, Bewusstlosigkeit, Atemstillstand, Herz- und Kreislaufversagen

*Tabelle 2: Flughöhe und Symptome der Höhenkrankheit, infolge des zu geringen Sauerstoffpartialdruckes*

Weitere Literaturangaben und Informationen über den Autor finden Sie Im Internet unter [www.DrMReiber.de](http://www.DrMReiber.de) .