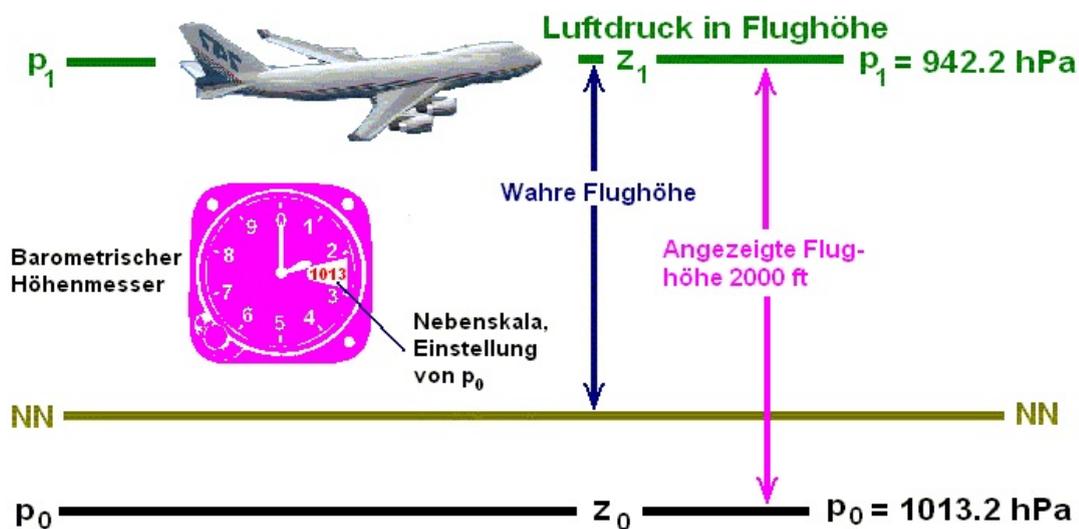


# Wolkenschnüffler



## Flugmeteorologie



## Barometrische Höhenmessung

Michael F. H. Krutina

# Inhaltsverzeichnis

	<b>Seite</b>
1. Allgemeines	1
1.1 Barometrische Höhenformel	2
1.1.1 Statische Grundgleichung	2
1.1.2 Barometrische Höhenformel in Differentialform	3
1.1.3 Barometrische Höhenstufe	4
1.1.4 Barometrische Höhenformel in integrierter Form	5
1.2 ICAO-Standardatmosphäre (ISA)	6
1.2.1 Definition und Gleichungen	6
1.2.2 Pressure altitude (PA)	7
1.2.3 Density altitude (DA) oder Leistungshöhe	8
1.3 QFE, QNE und QNH	10
1.3.1 QFE	10
1.3.2 QNE	11
1.3.3 QNH	11
2. Barometrische Höhenmessung	13
2.1 Einstellmöglichkeiten des Höhenmessers	14
2.2 Einstellverfahren in der zivilen Luftfahrt	17
2.2.1 QNH-Verfahren	18
2.2.2 Standard-Höhenmessereinstellung	19
2.2.3 Halbkreisflugregeln	21
2.3 Fehler der barometrischen Höhenmessung	23
2.3.1 Instrumentenfehler	23
2.3.1.1 Eich- und Kompensationsfehler	23
2.3.1.2 Hysterese- und Elastizitätsfehler	23
2.3.1.3 Statikdruckquellenfehler	24
2.3.2 Atmosphärische Fehler	24
2.3.2.1 Temperaturfehler	24
2.3.2.2 Druckfehler	26
2.3.2.3 Wasserdampffehler	28
Literaturverzeichnis	28

## Verwendete Abkürzungen und Besonderheiten

- Abb. : Abbildung
- Form. : Formel
- Tab. : Tabelle
- s. : siehe

Bei Zahlenangaben wird anstatt eines Dezimalkommata ein Dezimalpunkt verwendet.

## 1. Allgemeines

Für die Sicherheit des Luftverkehrs ist die mehr oder minder genaue Kenntnis der Höhe von essentieller Bedeutung. Exakte Höhenwerte über Grund sollten vor allem in der Steig- und Sinkflugphase nach dem Start und vor der Landung vorliegen. Besonders Verkehrsflugzeuge legen heute große Entfernungen in und oberhalb von ausgedehnten Wolkenschichten auf zum Teil stark frequentierten Flugrouten zurück. Ihre Starts und Landungen erfolgen speziell in Mitteleuropa häufig bei tiefen Wolkenuntergrenzen, im Nebel oder bei schlechter Bodensicht. Solche An- und Abflüge unter schwierigsten Wetterbedingungen (Instrumental flight rules, IFR) verlangen nicht nur einen speziell geschulten und erfahrenen Flugzeugführer, sondern auch eine angemessene instrumentelle Ausrüstung des Luftfahrzeuges. Neben Fluglage-Instrumenten, Radar-Antwortgeräten (Transponder) und Funknavigationsystemen gehören deshalb auch Höhenmesser zur technischen Grundausstattung. Die von der jeweiligen Flugphase abhängenden stark differierenden Anforderungen an die Höhenmessung bedingen allerdings, dass zwei auf unterschiedlichen physikalischen Prinzipien basierende Messgeräte im Einsatz sind:

- Erstens werden Höhenangaben über Grund bzw. über dem Flugplatzniveau zur Kontrolle des Hindernisabstandes während des Reisefluges über Gebirgen und für einen präzisen und zuverlässigen Instrumentenan- und -abflug bei geringen Sichten und tiefer Wolkenbasis benötigt. Spezielle Geräte (Radio altimeter) liefern dazu für große Flughöhen eine annähernde Anzeige und für Schlechtwetteran- und -abflüge die genaue Flughöhe (Low range altimeter) über Grund (agl: above ground level; Height).
- Zweitens staffelt der Flugverkehrskontrolldienst (FVK) Luftfahrzeuge vertikal, um den verfügbaren Luftraum optimal nutzen zu können. Weil bei diesem Verfahren die von der FVK vorgeschriebene Flughöhe unbedingt einzuhalten ist, muss sich die Höhenanzeige auf ein einheitliches Bezugsniveau, das mittlere Meeresniveau NN (msl: Mean sea level) beziehen. Messwerte der Flughöhe über Grund wären zwar über dem Meer für die Höhenstaffelung durchaus nutzbar, über dem Land jedoch zeigt der Höhenmesser aufgrund der von Ort zu Ort vielfältigen unterschiedlichen Oberflächengestalt der Erde mehr oder minder starke Schwankungen. Eine Bestimmung der absoluten Höhe über NN kann dann nur erfolgen, wenn die genaue Ortshöhe des gerade überflogenen Gebietes bekannt ist. Technische Methoden zur Berechnung dieser Werte - z.B. GPS in Verbindung mit topographischen Karten bzw. Datenbanken auf CD-ROM - werden zwar in Einzelfällen bereits eingesetzt, sie sind aber teuer und für die zivile Verkehrsluftfahrt noch nicht ausreichend erprobt worden.

Um Luftfahrzeuge vertikal staffeln zu können, werden deshalb auch heute noch preiswerte, aber relativ ungenaue Instrumente verwendet, deren Messprinzip auf der vertikalen Änderung des Luftdruckes beruht. Bei diesem Verfahren wird eine Höhenmessung durch eine Luftdruckbestimmung ersetzt und die Beziehung zwischen Luftdruck und Höhe verdeutlicht die aus der statischen Grundgleichung der Meteorologie abgeleitete barometrische Höhenformel (s. Form. 8).

## 1.1 Barometrische Höhenformel

### 1.1.1 Statische Grundgleichung

Der Druck, den eine ruhende Flüssigkeit aufgrund ihrer Schwerkraft ausübt, lässt sich aus seiner physikalischen Beziehung 'Druck ist gleich dem Quotienten aus Kraft und Fläche' ableiten (s. Form. 1).

#### Schweredruck in Flüssigkeiten (Form. 1)

$$p = \frac{F}{A} = \frac{F_G}{A}$$

$$p = \frac{m g}{A} = \frac{\rho_{Fl} V g}{A}$$

$$p = \frac{\rho_{Fl} A h g}{A} = g \rho_{Fl} h \text{ [N m}^{-2}\text{]}$$

- p : Druck [Pa], den die Flüssigkeit ausübt;  
1 Pa = 1 N m<sup>-2</sup> (Pa: Pascal)
- A : Basisfläche (Area) [m<sup>2</sup>] der Flüssigkeitssäule
- F : Kraft (Force) [N]; 1 N = 1 kg m s<sup>-2</sup>
- F<sub>G</sub> : Gewichtskraft; F<sub>G</sub> = m g
- m : Masse [kg] der Flüssigkeitssäule; m = ρ<sub>Fl</sub> V
- g : Erdbeschleunigung [m s<sup>-2</sup>];  
g<sub>0</sub> = 9.80665 m s<sup>-2</sup> (Normwert der ICAO)
- ρ<sub>Fl</sub> : Dichte [kg m<sup>-3</sup>] der Flüssigkeit
- V : Volumen [m<sup>3</sup>] der Flüssigkeitssäule
- h : Höhe [m] der Flüssigkeitssäule

Kräfte sind Vektoren. Die im Allgemeinen üblichen Pfeile über vektoriellen Größen werden in dieser Ausarbeitung einerseits der Einfachheit halber und andererseits aus schreibtechnischen Gründen nicht gesetzt.

Wird die Gleichung des Schweredruckes in Flüssigkeiten (p = g ρ<sub>Fl</sub> h) differenziert und anschließend integriert, ist der Schweredruck von Flüssigkeiten leicht berechenbar, weil ihre Dichte als annähernd konstant angesehen werden kann (s. Form. 2).

#### Hydrostatischer Druck (Form. 2)

$$dp = g \rho_{Fl} dh$$

$$\int_{p_0}^p dp = g \rho_{Fl} \int_{h_0}^h dh$$

$$p - p_0 = g \rho_{Fl} (h - h_0) \text{ [m s}^{-2} \text{ kg m}^{-3} \text{ m]}$$

$$p = p_0 + g \rho_{Fl} (h - h_0) \text{ [Pa]}$$

- p : Druck der Flüssigkeitssäule in der Tiefe h;  
1 Pa = 1 N m<sup>-2</sup>
- p<sub>0</sub> : Druck in der Ausgangshöhe h<sub>0</sub>
- h<sub>0</sub> : Ausgangshöhe h<sub>0</sub> [m]
- g : Erdbeschleunigung [m s<sup>-2</sup>]
- h : Höhe der Flüssigkeitssäule [m]
- ρ<sub>Fl</sub> : Dichte [kg m<sup>-3</sup>] der Flüssigkeit

#### Beispiel: Druck in einer Wassertiefe von 10 m (Form. 3)

$$p = p_0 + g_0 \rho_{Fl} (h - h_0)$$

$$p = 101325 \text{ Pa} + 9.80665 \text{ m s}^{-2} \cdot 1000 \text{ kg m}^{-3} \cdot 10 \text{ m}$$

$$p = 101325 \text{ Pa} + 98066.5 \text{ Pa}$$

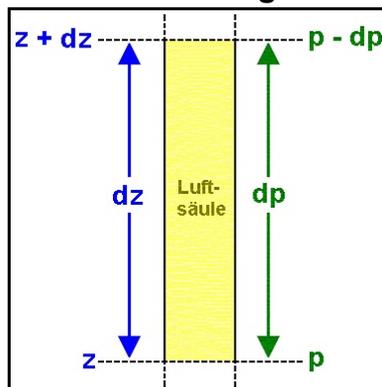
$$p = 1993.915 \text{ hPa}$$

- p<sub>0</sub> : 1013.25 hPa (Luftdruck an der Obergrenze (h<sub>0</sub> = 0 m) der Wasserfläche)
- ρ<sub>Fl</sub> : 1000 kg m<sup>-3</sup> (Dichte von Wasser)
- h : 10 m (Wassertiefe)
- h<sub>0</sub> : Obergrenze der Wasseroberfläche [m]
- g<sub>0</sub> : 9.80665 [m s<sup>-2</sup>]

Betrachtet man dagegen atmosphärische Verhältnisse, so ist Luft im Gegensatz zu Flüssigkeiten kompressibel und die Luftdichte ρ nimmt mit zunehmender Höhe ab.

Aus diesem Grund ist die Gleichung " $dp = g \rho dh$ " nur für kleine  $dh$ -Werte - also für Luftschichten mit geringer vertikaler Ausdehnung - nutzbar, für welche die Luftdichte  $\rho$  als hinreichend konstant angenommen werden kann. Weil meteorologische Elemente wie z.B. der Luftdruck  $p$  in Raum  $(x, y, z)$  und Zeit  $(t)$  variieren und sie sich anschaulich im rechtwinkligen kartesischen Koordinatensystem, einem Rechtssystem mit den Achsen  $x, y, z$  darstellen lassen, wird der Buchstabe  $h$  der Höhe nun durch  $z$  ersetzt.

### Statische Grundgleichung (Abb. 1)



- $p - dp$  : Luftdruck [Pa] in der Höhe  $z + dz$
- $dz$  : Höhenintervall [m] zwischen den Höhen  $z$  und  $z + dz$
- $dp$  : Druckunterschied [Pa] zwischen den Druckflächen  $p$  und  $p - dp$
- $z$  : Höhe im Ausgangsniveau [m]
- $p$  : Luftdruck [Pa] im Ausgangsniveau

*Meteorologische Elemente wie der Luftdruck  $p$  variieren in Raum  $(x, y, z)$  und Zeit  $(t)$  und werden deshalb physikalisch als Feldgrößen bezeichnet. Sie sind Funktionen der vier Feldkoordinaten  $x, y, z, t$ , ihre Änderungen lassen sich mathematisch mit der Differentialrechnung erfassen und ihre Darstellung erfolgt oft in dem rechtwinkligen kartesischen Koordinatensystem, das den dreidimensionalen Raum mit den beiden horizontalen Achsen  $x, y$  und der vertikalen Achse  $z$  beschreibt. Der Buchstabe  $h$  der Höhe wird deshalb in den folgenden Gleichungen durch  $z$  ersetzt.*

Weil der Luftdruck mit der Höhe abnimmt, ist seine Änderung  $dp$  negativ. Für einen Druckunterschied im Höhenintervall  $dz$  gilt dann die nachstehende Beziehung, die als statische Grundgleichung der Meteorologie bezeichnet wird (s. Form. 4).

### Statische Grundgleichung der Meteorologie (Form. 4)

$$-dp = g \rho_d dz$$

- $dp$  : Druckunterschied [Pa] zwischen den Druckflächen  $p$  und  $p - dp$
- $g$  : Erdbeschleunigung [ $m s^{-2}$ ]
- $\rho_d$  : Dichte trockener Luft [ $kg m^{-3}$ ]
- $dz$  : Höhenintervall [m] zwischen den Höhen  $z$  und  $z + dz$

*Die Luft ist hier in Ruhe (statisch) und bewegt sich nicht, so dass dynamische Luftdruckänderungen ausgeschlossen sind.*

## 1.1.2 Barometrische Höhenformel in Differentialform

Der vertikale Druckunterschied  $-dp$  einer Luftsäule vom Druckniveau  $p$  bis  $p - dp$  und das Höhenintervall  $dz$  von der Höhe  $z$  bis  $z + dz$  sind durch die statische Grundgleichung gegeben. Weil die Luftdichte  $\rho_d$  meteorologisch nicht messbar ist, wird sie mit Hilfe der individuellen Gasgleichung für trockene Luft ausgetauscht. Setzt man nun noch für die Erdbeschleunigung den Normwert von  $g_0 = 9.80665 m s^{-2}$  ein und löst die statische Grundgleichung nach  $dz$  auf, so erhält man die barometrische Höhenformel in Differentialform.

### Barometrische Höhenformel in Differentialform (Form. 5)

$$-dp = g \rho_d dz \quad \rho_d = \frac{p}{R_d T_v}$$

$$dz = -\frac{R_d T_v}{g} \frac{dp}{p} = -\frac{287.05}{9.80665} T_v \frac{dp}{p} \left[ \frac{m^2 K s^2}{s^2 K m} \right]$$

$$dz = -29.27 T_v \frac{dp}{p} [m]$$

$p$  : Luftdruck [hPa]  
 $g$  : Erdbeschleunigung [ $m s^{-2}$ ];  
 $g_0 = 9.80665 m s^{-2}$  (ISA, s.1.2)  
 $\rho_d$  : Dichte trockener Luft [ $kg m^{-3}$ ]  
 $R_d$  : Individuelle Gaskonstante trockener Luft;  
 $R_d = 287.05 J kg^{-1} K^{-1}$   
 $T_v$  : Virtuelle Temperatur [K]  
 $dz$  : Änderung der Höhe z [m]  
 $dp$  : Luftdruckänderung [hPa]

Die Formelgröße  $R_d$  wird im Skript "Aerologie, Grundlagen der Thermodynamik und Vorgangskurven im Stüvediagramm" erläutert.  $T_v$  ist die Temperatur, die trockene Luft annehmen muss, damit sie bei gleichem Druck die gleiche Dichte hat wie feuchte Luft (siehe auch Ausarbeitung "Aerologie: Meteorologische Parameter im thermodynamischen Diagrammpapier (nach G. Stüve)").

### 1.1.3 Barometrische Höhenstufe

Wird die barometrischen Höhenformel in Differentialform nach  $-dz/dp$  aufgelöst und für  $dp$  der Wert 1 hPa eingesetzt, so erhält man die barometrische Höhenstufe, die angibt, wie viel Meter Höhenänderung einer Luftdruckabnahme von 1 hPa entsprechen.

#### Barometrische Höhenstufe in NN (Form. 6)

$$-\frac{dz}{dp} = 29.27 \frac{T_v}{p} \left[ \frac{m}{hPa} \right]$$

$$-\frac{dz}{dp} = 29.27 \frac{273.15}{1000} = 7.9951 m hPa^{-1}$$

$p$  : Luftdruck [hPa]  
 $T_v$  : Virtuelle Temperatur [K] (s. Form. 5)  
 $dz$  : Änderung der Höhe z [m]  
 $-dp$  : vertikale Abnahme des Luftdruckes;  
 $-dp = 1 hPa$   
 273.15 : Lufttemperatur [K] in NN;  $t_v = 0^\circ C$   
 1000 : Luftdruck [hPa] in NN

Bei einem Luftdruck von 1000 hPa und einer Temperatur von  $0^\circ C$  - also bei Druck- und Temperaturverhältnissen, wie sie im Meeresniveau vorkommen - hat die barometrische Höhenstufe einen Wert von 8 m und sie beträgt unter ICAO-Standardbedingungen in NN (s. 1.2)  $8.3 m hPa^{-1}$  bzw. 28 ft pro Hektopascal.

#### Barometrische Höhenstufe in NN nach der ICAO-Standardatmosphäre (Form. 7)

$$-\frac{dz}{1 hPa} = 29.27 \frac{T}{p} \left[ \frac{m}{hPa} \right]$$

$$-\frac{dz}{1 hPa} = 29.27 \frac{288.15}{1013.25}$$

$$-\frac{dz}{1 hPa} \approx 8.3 m hPa^{-1} \approx 27.3 ft hPa^{-1} \approx 28 ft hPa^{-1}$$

$p$  : Luftdruck [hPa]  
 $T$  : Temperatur [K]  
 $dz$  : Änderung der Höhe z [m]  
 288.15 : ISA-Lufttemperatur [K] in NN;  $t_0 = 15^\circ C$   
 1013.25 : ISA- Luftdruck [hPa] in NN  
 ISA : ICAO-Standardatmosphäre

### 1.1.4 Barometrische Höhenformel in integrierter Form

Um Schichtdicken für größere Druckintervalle als  $dp$  zu erhalten, wird die barometrische Höhenformel in Differentialform unter der Voraussetzung einer konstanten Temperatur in den Grenzen  $z_1$  bis  $z_2$  und  $p_1$  bis  $p_2$  integriert.

#### Barometrische Höhenformel in integrierter Form (Form. 8)

$$\int_{z_1}^{z_2} dz = -29.27 T_{vm} \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p}$$

$$z_2 - z_1 = -29.27 T_{vm} (\ln p_2 - \ln p_1)$$

$$z_2 - z_1 = 29.27 T_{vm} \ln \frac{p_1}{p_2} [m]$$

$z_2 - z_1$  : Schichtdicke zwischen den Druckflächen  $p_1$  und  $p_2$  [m]  
 $p_1$  : Untere Druckfläche [hPa]  
 $p_2$  : Obere Druckfläche [hPa]  
 $T_{vm}$  : Virtuelle Mitteltemperatur [K] der Schichtdicke  $p_2$  und  $p_1$

Diese Gleichung zeigt, dass der Abstand der beiden Isobarenflächen  $p_1$  und  $p_2$  nur eine Funktion der mittleren virtuellen Temperatur  $T_{vm}$  ist.

Beträgt z.B. die Temperatur  $t_{vm} = 11.75 \text{ °C}$ , der Luftdruck  $p_1 = 1013.25 \text{ hPa}$ , der Luftdruck  $p_2 = 898.75 \text{ hPa}$  und die Höhe  $z_1 = 0 \text{ m}$ , dann ist  $z_2 = 1000 \text{ m}$  (s. Form. 9).

#### Berechnung der Höhe der Druckfläche 898.75 hPa (Form. 9)

$$z_2 - z_1 = 29.27 T_{vm} \ln \frac{p_1}{p_2}$$

$$z_2 = 29.27 \text{ m K}^{-1} \cdot 284.9 \text{ K} \cdot \ln \frac{1013.25 \text{ hPa}}{898.75 \text{ hPa}}$$

$$z_2 = 1000 \text{ m}$$

$z_1$  : 0 m  
 $p_1$  : 1013.25 hPa  
 $p_2$  : 898.75 hPa  
 $T_{vm}$  : 284.9 K bzw.  $t_{vm} = 11.75 \text{ °C}$

Sind die virtuelle Schichtmitteltemperatur  $T_{vm}$ , der Luftdruck  $p_1$  und sein Niveau  $z_1$  bekannt, so ist die Höhe  $z_2$  eine eindeutige Funktion des Luftdruckes  $p_2$ . Wird eine fiktive Atmosphäre vorgegeben, deren vertikale Luftdichteverteilung in etwa den tatsächlichen atmosphärischen Verhältnissen entspricht, dann lässt sich mit der Gleichung 8 die Höhe  $z_2$  berechnen, wenn  $p_2$  vorliegt. Die ICAO (International Civil Aviation Organization) hat so eine Normatmosphäre definiert, die ICAO-Standardatmosphäre bzw. International Standard Atmosphere (ISA), welche die Zusammensetzung der Luft, das vertikale Temperaturprofil und den Luftdruck im Meeresniveau (NN) festlegt. Das Prinzip der barometrischen Höhenmessung besteht damit darin, den Luftdruck  $p_2$  in Flughöhe zu bestimmen und auf der Grundlage der ISA-Werte die Schichtdicke  $z_2 - z_1$  zu ermitteln.

Eine Höhen- wird hiermit durch eine Luftdruckmessung ersetzt. Weil die ICAO-Standardatmosphäre (ISA) eine absolut trockene, keinen Wasserdampf beinhaltende Normatmosphäre darstellt, wird in der Formel 8 die Größe  $T_{vm}$  durch  $T_m$  ersetzt.

## 1.2 ICAO-Standardatmosphäre (ISA)

### 1.2.1 Definition und Gleichungen

Für die von der ICAO (International Civil Aviation Organization) für die Luftfahrt definierte Normatmosphäre gelten nachfolgende Bedingungen:

- Luft wird als ein absolut trockenes Gas ( $U = 0\%$ ) betrachtet.
- die Konstanten in NN lauten:
  - Lufttemperatur :  $T_0 = 288.15 \text{ K}$  ( $t_0 = 15 \text{ °C}$ )
  - Luftdruck :  $p_0 = 1013.25 \text{ hPa}$
  - Luftdichte :  $\rho_0 = 1.2250 \text{ kg m}^{-3}$
- die vertikale Temperaturänderung (–: Abnahme; +: Zunahme) beträgt:
  - 5000 m unter NN bis 11000 m ü. NN :  $-0.0065 \text{ K m}^{-1}$
  - 11000 m bis 20000 m ü. NN :  $0 \text{ K}$
  - 20000m bis 32000 m ü. NN :  $0.0010 \text{ K m}^{-1}$

#### Berechnung des ISA-Luftdruckes $p_1$ und $p_2$ bis 20 km Höhe (Form. 10)

##### *polytrope Atmosphäre bis 11 km Höhe (Troposphäre)*

$$p_1 = 1013.25 \left( 1 + \frac{\gamma z_1}{288.15} \right)^{\frac{-g_0}{R_d \gamma}} \text{ [hPa]}$$

- $p_1$  : Luftdruck [hPa] der polytropen Atmosphäre in der Höhe  $z_1$
- $z_1$  : Höhe [m];  $z_1 \leq 11000 \text{ m}$
- 1013.25 : Luftdruck der ICAO-Standardatmosphäre in NN [hPa]
- 288.15 : Lufttemperatur [K] der ICAO-Standardatmosphäre in NN;  $t_0 = 15 \text{ °C}$

##### *isotherme Atmosphäre von 11 bis 20 km Höhe (Stratosphäre)*

$$p_2 = 226.32 \cdot e^{\frac{-g_0 (z_2 - 11000)}{R_d \cdot 216.65}} \text{ [hPa]}$$

- $\gamma$  : Temperaturgradient der ICAO-Standardatmosphäre bis 11 km Höhe;  $\gamma = -0.0065 \text{ K m}^{-1}$
- $g_0$  : Erdbeschleunigung der ICAO-Standardatmosphäre;  $g_0 = 9.80665 \text{ m s}^{-2}$
- $R_d$  : Individuelle Gaskonstante von trockener Luft;  $R_d = 287.05 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- $p_2$  : Luftdruck [hPa] der isothermen Atmosphäre in der Höhe  $z_2$ ;  $11000 \leq z_2 \leq 20000 \text{ m}$
- 226.32 : Luftdruck [hPa] der ICAO-Standardatmosphäre im Niveau der Tropopause
- 11000 : Höhe [m] der Tropopause
- $e$  : Basis des natürlichen Logarithmus;  $e = 2,7182818284590452$  (Eulersche Zahl)
- 216.650 : Lufttemperatur [K] der ICAO-Standardatmosphäre im Niveau der Tropopause
- $z_2$  : Höhe [m] in der Stratosphäre;  $11000 \leq z_1 \leq 20000 \text{ m}$

### Berechnung der ISA-Höhe in der Troposphäre (Form. 11)

$$z_1 = \frac{288.15}{0.0065} \left[ 1 - \left( \frac{p_1}{1013.25} \right)^{\frac{287.05 \cdot 0.0065}{9.80665}} \right] [m]$$

- $z_1$  : Höhe der troposphärischen Druckfläche  $p_1$ ;  $z_1 \leq 11000$  m
- 288.15 : ICAO-Standardtemperatur [K] in NN
- 0.0065 : Vertikaler Temperaturgradient [ $K m^{-1}$ ] der ICAO-Standardatmosphäre in der Troposphäre
- $p_1$  : Luftdruck [hPa] bis  $\geq 226.32$  hPa (Tropopause)
- 1013.25 : ICAO-Standardluftdruck [hPa] in NN
- 287.05 : Individuelle Gaskonstante [ $J kg^{-1} K^{-1}$ ] für trockene Luft
- 9.80665 : Erdbeschleunigung [ $m s^{-2}$ ] der ICAO-Standardatmosphäre

Die ICAO-Standardatmosphäre zeigt eine lineare Temperaturabnahme (polytrope Atmosphäre) bis 11 km Höhe und von 11 bis 20 km ist der Temperaturverlauf isotherm (s. Form. 10).

### Werte der ICAO-Standardatmosphäre (Tab. 1)

Höhe [m ü. NN]	Luftdruck	Lufttemperatur	Luftdichte
-1000	1139.29 hPa	21.5 °C	1.3470 kg m <sup>-3</sup>
0	1013.25 hPa	15.0 °C	1.2250 kg m <sup>-3</sup>
1000	898.75 hPa	8.5 °C	1.1116 kg m <sup>-3</sup>
2000	794.95 hPa	2.0 °C	1.0065 kg m <sup>-3</sup>
3000	701.09 hPa	- 4.5 °C	0.9091 kg m <sup>-3</sup>
5000	540.20 hPa	-17.5 °C	0.7361 kg m <sup>-3</sup>
7000	410.61 hPa	-30.5 °C	0.5895 kg m <sup>-3</sup>
9000	307.42 hPa	-43.5 °C	0.4663 kg m <sup>-3</sup>
11000	226.32 hPa	-56.5 °C	0.3692 kg m <sup>-3</sup>
13000	165.10 hPa	-56.5 °C	0.2665 kg m <sup>-3</sup>

Barometrische Höhenstufe	
in NN, bei 1013.25 hPa	8.3 m hPa <sup>-1</sup> oder 27.3 ft hPa <sup>-1</sup>
in 700 hPa	11.2 m hPa <sup>-1</sup> oder 36.7 ft hPa <sup>-1</sup>
in 500 hPa	14.8 m hPa <sup>-1</sup> oder 48.5 ft hPa <sup>-1</sup>
in 300 hPa	22.3 m hPa <sup>-1</sup> oder 73.2 ft hPa <sup>-1</sup>

## 1.2.2 Pressure altitude (PA)

Die Pressure altitude (PA) oder Druckhöhe ist das Niveau in Fuß, das dem herrschenden Luftdruck in Flughöhe nach der ICAO-Standardatmosphäre entspricht.

Die Größe PA wird zur Berechnung der Dichtehöhe (s. 1.2.3), der wahren Höhe und der True airspeed (TAS) verwendet.

### Pressure altitude (PA): Druckhöhe [ft]

Luftdruck, der als die Höhe in Fuß angegeben wird, die dem Druckwert nach der ICAO-Standardatmosphäre entspricht.

**Pressure altitude PA (Tab. 2)**

Luftdruck [hPa]	Pressure altitude PA [ft]
1000	364
850	4782
700	9887
500	18305
400	23598

Luftdruck [hPa]	Pressure altitude [ft]
250	35055
200	38733
150	44743
100	53218
70	60680

**Gleichung der Pressure altitude PA für die Troposphäre (Form. 12)**

$$PA = \frac{288.15}{0.0065} \left[ 1 - \left( \frac{p_1}{1013.25} \right)^{\frac{287.05 \cdot 0.0065}{9.80665}} \right] 3.28083 \text{ [ft]}$$

- PA : Pressure altitude [ft] von  $p_1$ ;  $PA \leq 36089$  ft (11000 m ü. NN, Höhe der Tropopause)
- 288.15 : ICAO-Standardtemperatur [K] in NN;  $t_0 = 15$  °C
- 0.0065 : Vertikaler Temperaturgradient [K m<sup>-1</sup>] der ICAO-Standardatmosphäre in der Troposphäre
- $p_1$  : Luftdruck [hPa];  $p_1 \geq 226.32$  hPa (Luftdruck in Höhe der Tropopause)
- 1013.25 : ICAO-Standardluftdruck [hPa] in NN
- 287.05 : Individuelle Gaskonstante [J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>] für trockene Luft
- 9.80665 : Erdbeschleunigung [m s<sup>-2</sup>] der ICAO-Standardatmosphäre
- 3.28083 : Umrechnungsfaktor für Meter in Fuß [ft m<sup>-1</sup>]

**1.2.3 Density altitude (DA) oder Leistungshöhe**

Als Density altitude (DA), Dichte- bzw. Leistungshöhe wird die Höhe nach der ICAO-Standardatmosphäre bezeichnet, die der in Flughöhe herrschenden tatsächlichen Luftdichte entspricht. Die Dichtehöhe DA bestimmt die Leistung eines Flugzeuges, d.h. Auftrieb, Luftwiderstand, Wirkungsgrad der Triebwerke und Steigleistung sind eine Funktion der Density altitude DA.

**Dichtehöhe DA (Form. 13)**

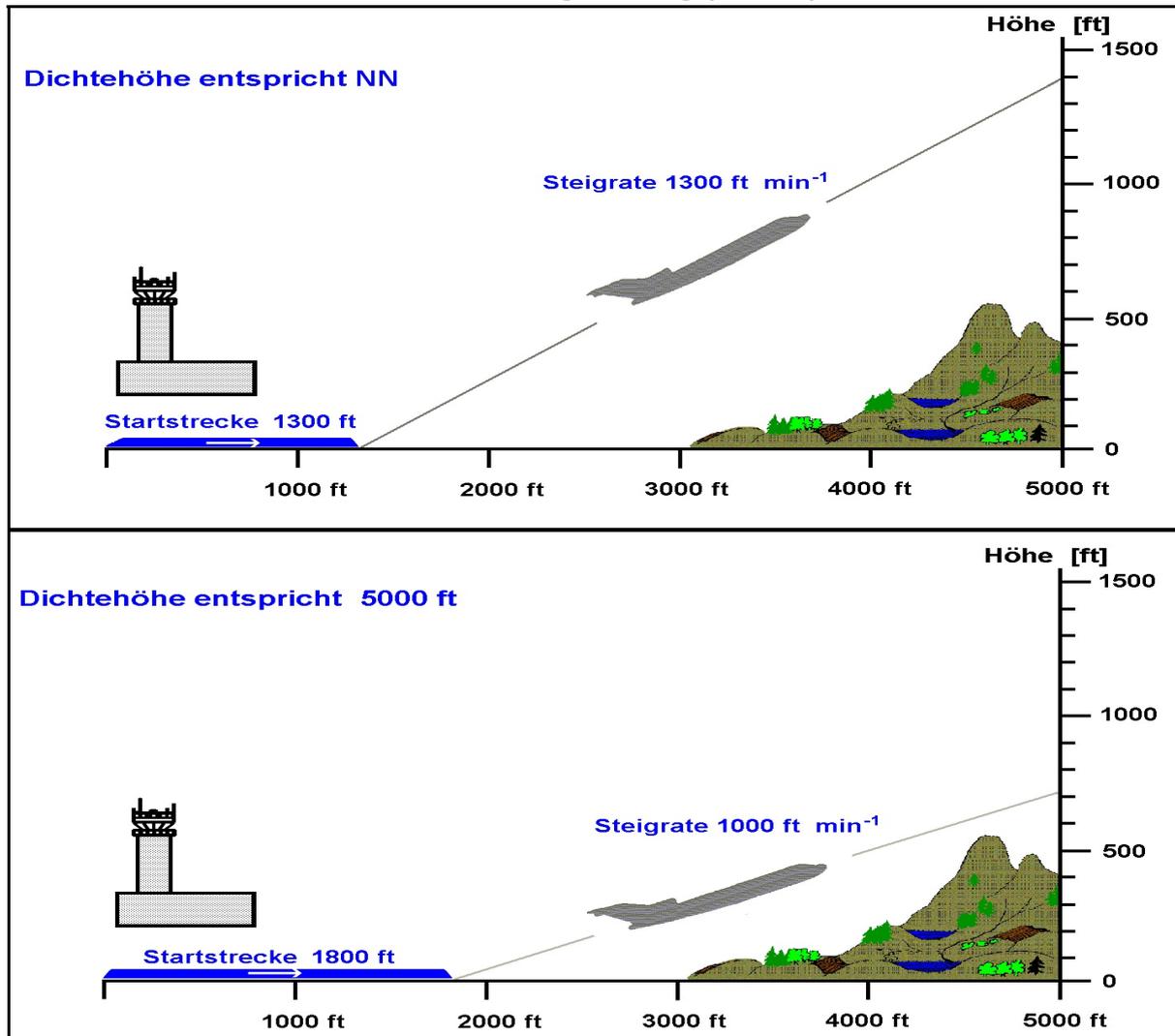
$$DA = \frac{PA}{\sqrt{\frac{\rho_h}{\rho_0}}} \text{ [ft]}$$

- DA : Dichtehöhe [ft] (Density altitude)
- PA : Druckhöhe [ft] (Pressure altitude)
- $\rho_h$  : Luftdichte [kg m<sup>-3</sup>] in Flughöhe
- $\rho_0$  : Luftdichte [kg m<sup>-3</sup>] in NN:  $\rho_0 = 1.225$  kg m<sup>-3</sup>

**Leistung eines Flugzeuges (Tab. 3)**

Auftrieb	Bei gleicher Triebwerksleistung benötigt ein Flugzeug bei einer kleineren Dichtehöhe eine geringere Startrollstrecke als bei höheren Werten. Während des Fluges sinkt der Auftrieb mit zunehmender Dichtehöhe.
Triebwerksleistung	Die Triebwerksleistung ist der Dichtehöhe umgekehrt proportional.
Steigleistung	Mit zunehmender Dichtehöhe nimmt die Steigleistung ab.

## Dichtehöhe DA, Startstrecke und Steigleistung (Abb. 2)



Die Abbildung 2 zeigt, dass sich mit zunehmender Dichtehöhe die Startstrecke verlängert und die Steigrate vermindert. Bei einer dem Meeresniveau entsprechenden DA hat das Flugzeug nach 1300 ft die Abhebegeschwindigkeit erreicht und es steigt danach mit 1300 ft pro Minute. Bei einer Dichtehöhe von 5000 ft benötigt das Flugzeug eine Startstrecke von 1800 ft und der Höhengewinn nach dem Abheben beträgt nur noch 1000 ft pro Minute.

Die Abweichung der Dichtehöhe DA von der Pressure altitude PA beträgt etwa 120 ft pro Grad Celsius und lässt sich mit der nachstehenden Faustformel, die für die Troposphäre gültig ist, berechnen.

### Näherungsgleichung zur Berechnung der DA in der Troposphäre (Form. 14)

$$DA \approx PA + 120 (t_{oat} - t_{isa}) [ft]$$

$$t_{isa} \approx 15 - 0.3048 h_{ft} \cdot 0.0065 [^{\circ}C]$$

- DA : Density altitude [ft]
- PA : Pressure altitude [ft]
- 120 : Faktor [ft K<sup>-1</sup>]
- t<sub>oat</sub> : Lufttemperatur [°C] (Outside air temperature)
- t<sub>isa</sub> : Temperatur [°C] nach ISA in der Flughöhe h<sub>ft</sub>
- h<sub>ft</sub> : Flughöhe [ft]
- 0.0065 : Vertikaler Temperaturgradient [°C m<sup>-1</sup>] der ICAO-Standardatmosphäre in der Troposphäre
- 0.3048 : Umrechnungsfaktor für Fuß in Meter [m ft<sup>-1</sup>]

## 1.3 QFE, QNE und QNH

In den Anfängen der zivilen Verkehrsfluffahrt, als es nur Morsefunk, aber noch keinen Sprechfunkverkehr zwischen den Piloten und der Bodenstelle gab, wurden wichtige Informationen an die Flugzeugführer mit Hilfe der Q-Gruppen-Codierung übermittelt.

Bedeutende flugmeteorologische Relikte der Q-Gruppen aus der Gründerzeit der modernen Luftfahrt sind das QFE, QNE und QNH.

### 1.3.1 QFE

Als QFE wird der Luftdruck in Flugplatzhöhe, der Ortshöhe über NN des höchsten Punktes der Start- und Landebahnen, bezeichnet. Für Instrumentenlandebahnen, deren Schwellen 2 m (6 ft) oder mehr unter der Flugplatzhöhe liegen, bezieht sich das QFE auf die in Betrieb befindliche Landebahnschwelle.

**QFE** : Luftdruck in Flugplatzhöhe (bzw. in Höhe der Landebahnschwelle)

**Flugplatzhöhe** : **Aerodrome elevation**  
Ortshöhe über NN des höchsten Punktes der Start- und Landebahnen

Unterscheiden sich Barometer- und Flugplatzhöhe, so erhält man das QFE durch Umrechnung des am Stationsbarometer abgelesenen und korrigierten Luftdruckwertes auf die Flugplatzhöhe (s. Form. 15). Dieses Umrechnungsverfahren heißt Reduktion.

#### Reduktionsgleichung für das QFE (Form. 15)

$$QFE = p_{St} + \left( 0.034164 \frac{p_{St}}{T_v} \cdot \Delta h \right) [hPa]$$

0.034164 :  $g_0/R_d$  [ $m^{-1} K$ ];  $g_0 = 9.80665 m s^{-2}$ ,  
 $R_d = 287.05 J kg^{-1} K^{-1}$   
 $p_{St}$  : Abgelesener und korrigierter Luftdruck [hPa] in Barometerhöhe  
 $T_v$  : Virtuelle Lufttemperatur [K]  
 $\Delta h$  : Differenz von Barometer- und Flugplatzhöhe [m]

$T_v$  ist die Temperatur, die trockene Luft annehmen muss, damit sie bei gleichem Druck die gleiche Dichte hat wie feuchte Luft (siehe auch Ausarbeitung "Aerologie: Meteorologische Parameter im thermodynamischen Diagrammpapier (nach G. Stüve)").

Für Flughäfen in der Bundesrepublik Deutschland mit einem kleineren  $\Delta h$  als 10 m können die Größen  $p_{St}$  und  $T_v$  der Gleichung 15 durch den langjährigen mittleren Stationsluftdruck und die langjährige Mitteltemperatur ersetzt werden.

### 1.3.2 QNE

Das QNE ist kein Luftdruckwert, sondern die Pressure altitude (PA) des QFE und lässt sich mit der Gleichung 16 bzw. näherungsweise mit der Formel 17 bestimmen.

**QNE:** Pressure altitude des QFE oder Höhe der QFE-Druckfläche nach der ICAO-Standardatmosphäre.

#### Gleichung zur Berechnung des QNE (Form. 16)

$$QNE = \frac{288.15}{0.0065} \left( 1 - \left( \frac{QFE}{1013.25} \right)^{\frac{287.05 \cdot 0.0065}{9.80665}} \right) 3.28083 \text{ [ft]}$$

QNE	: Pressure altitude [m] des QFE	QFE	: Luftdruck [hPa] in Flugplatzhöhe
288.15	: ICAO-Temperatur [K] in NN	1013.25	: ICAO-Luftdruck [hPa] in NN
0.0065	: ICAO-Temperaturgradient [K m <sup>-1</sup> ]	287.05	: Individuelle Gaskonstante von trockener Luft [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
9.80665	: Erdbeschleunigung [m s <sup>-2</sup> ]	3.28083	: Umrechnungsfaktor für Meter in Fuß [ft m <sup>-1</sup> ]
28	: Barometrische Höhenstufe [ft hPa <sup>-1</sup> ]		

#### Faustformel zur Berechnung des QNE (Form. 17)

$$QNE \approx 28 (1013 - QFE) \text{ [ft]}$$

### 1.3.3 QNH

Wird das QFE mit den Werten der ICAO-Standardatmosphäre auf NN reduziert, so ergibt sich das QNH.

**QNH** : QFE, auf NN reduziert mit den ICAO-Standardwerten (Standardtemperatur in Flugplatzhöhe, Standardtemperaturgradient, 0 % relative Luftfeuchte)

#### Reduktionsgleichung des QNH (Form. 18)

$$QNH = \left( (QFE)^a + b h_{ae} \right)^{\frac{1}{a}} \text{ [hPa]}$$

$$a = 287.05 \frac{0.0065}{9.80665} = 0.1902612$$

$$b = 0.0065 \frac{(1013.25)^a}{288.15} = 8.417168 \cdot 10^{-5} \text{ [hPa}^a \text{ m}^{-1}\text{]}$$

QNH	: QFE [hPa], auf NN reduziert mit den Werten der ISA	9.80665	: ISA-Erdbeschleunigung [m s <sup>-2</sup> ]
QFE	: Luftdruck [hPa] in Flugplatzhöhe	1013.25	: ISA-Luftdruck [hPa] in NN
h <sub>ae</sub>	: Flugplatzhöhe [m]	288.15	: ISA-Temperatur [K] in NN, t <sub>0</sub> = 15 °C
287.05	: individuelle Gaskonstante [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ] für trockene Luft	0.0065	: ISA-Temperaturgradient [K m <sup>-1</sup> ] der Troposphäre

Die Formel 19 zeigt ein Beispiel für die Berechnung des QNH für den Flughafen Frankfurt/Main (EDDF) mit einer Flugplatzhöhe von 364 ft msl bzw. 110.95 m ü. NN. Das zur Bestimmung notwendige QFE wird dabei mit 1001.3 hPa angenommen.

### Beispiel einer QNH-Reduktion (Form. 19)

$$QNH = \left( (1001.3)^{0.1902612} + 8.417168 \cdot 10^{-5} \cdot 110.95 \right)^{\frac{1}{0.1902612}}$$

QFE : 1001.3 hPa  
h<sub>ae</sub> : Flugplatzhöhe EDDF;  
h<sub>ae</sub> = 110.95 m  
restliche Formelgrößen s. Form. 18

$$QNH = (3.72298 + 8.417168 \cdot 10^{-5} \cdot 110.95)^{5.256}$$
$$QNH = (3.72298 + 0.00934)^{5.256}$$
$$QNH = 1014.7 \text{ hPa}$$

Bei einem QFE von 1001,3 hPa und einer Flugplatzhöhe von 110,95 m ü. NN ergibt sich ein QNH von 1014.7 hPa.

Das zur Höhenmessereinstellung (s. 2.1) verbreitete QNH, das Bestandteil der meist halbstündlich an den internationalen Verkehrsflughäfen ausgegebenen METAR-Meldung, der Routinewettermeldung für die Luftfahrt, ist, wird aus Sicherheitsgründen auf ganze Hektopascal abgerundet, so dass der QNH-Wert des Flughafens Frankfurt/Main (EDDF) dann 1014 hPa beträgt.

### Beispiel einer METAR-Meldung, Flughafen Frankfurt, 21. des Monats, 17:20 UTC

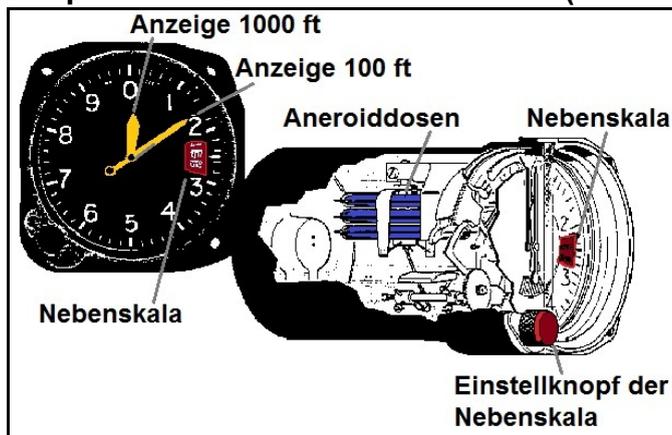
[METAR EDDF 211720Z 25009KT 9999 FEW022 SCT026 BKN033 12/08 Q1014 NOSIG=](#)

METAR : Routinewettermeldung für die Luftfahrt  
EDDF : Flughafenkennung der ICAO, internationaler Verkehrsflughafen Frankfurt/Main  
211720Z : Datum und Uhrzeit der Ausgabe des METAR; 21. des Monats, 17:20 UTC  
25009Kt : Bodenwind aus 250 Grad mit 9 Knoten  
9999 : Horizontale Bodensicht mindestens 10 km  
FEW022 : Bewölkung mit der Angabe des Bedeckungsgrades in Achteln und der Höhe der Untergrenze in Fuß über Grund; 1/8 - 2/8 in 2200 ft, 3/8 - 4/8 in 2600 ft und 5/8 - 7/8 in 3300 ft  
SCT026  
BKN033  
12/08 : Lufttemperatur 12 °C, Taupunkt 8 °C  
Q1014 : QNH 1014 hPa  
NOSIG : in den nächsten 2 Stunden ist keine flugbetrieblich signifikante Abweichung vom aktuellen Wetterzustand zu erwarten  
= : Ende der Wettermeldung

## 2. Barometrische Höhenmessung

Wie bereits angesprochen, ist die barometrische Höhenmessung in der zivilen Luftfahrt auch heute immer noch die einzige Möglichkeit einer preiswerten Bestimmung der Flughöhe über NN. Um in allen Luftfahrzeugen identische Anzeigen zu erhalten, werden die Geräte nach der ICAO-Standardatmosphäre (s. 1.2.1) geeicht.

### Beispiel eines Druck-Höhenmessers (Abb. 3)



Der Höhenmesser (hier mit drei blauen Aneroid- bzw. Vididosen) misst den Luftdruck  $p_2$  in Flughöhe und zeigt die Schichtdicke zwischen  $p_2$  und dem auf der Nebenskala (rot markiert) eingestellten Basisluftdruck  $p_1$  in Fuß an (s. Form. 8). Wird auf der Nebenskala der Standardwert von  $p_1 = 1013.2 \text{ hPa}$  justiert, so gibt das nach der ICAO-Standardatmosphäre geeichte Gerät die ungefähre Flughöhe über NN wieder.

#### **Aneroid- oder Vididose**

Flacher, zylindrischer, fast luftleerer Behälter mit einem Durchmesser von oft 6.8 cm, dessen Verformung durch den Luftdruck mechanisch ange-

zeigt wird. Mehrere hintereinander aufgereichte Dosen vergrößern den Zeigerausschlag.

Der Höhenmesser misst den Luftdruck  $p_2$  (s. 1.1.4, Formel 8) in Flughöhe und zeigt die Schichtdicke zwischen  $p_2$  und dem Basisdruck  $p_1$  (s. 1.1.4, Formel 8) auf der Höhenskala in Fuß an (s. Abb. 3). Mit Hilfe der Nebenskala (in der Abb. 3 rot markiert) lässt sich der Basisdruck  $p_1$  variieren und damit der Nullpunkt der Höhenmesserskala verschieben.

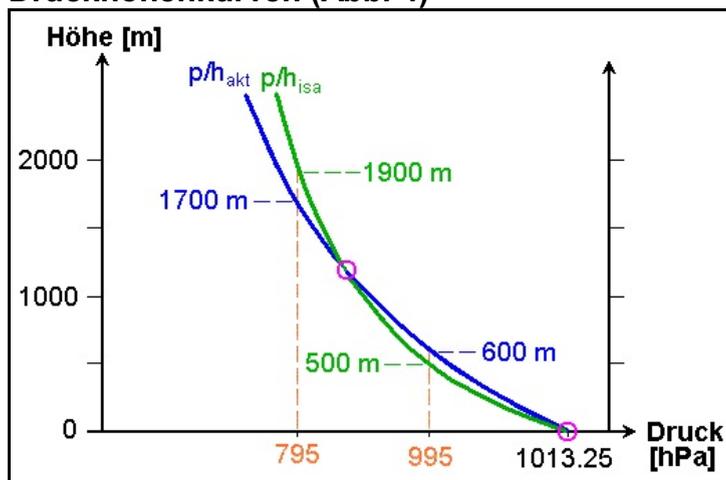
Wird auf der Nebenskala der ICAO-Standardwert 1013.2 hPa eingestellt, so gibt der Druck-Höhenmesser während eines Fluges die ungefähre Höhe über NN an. Die Anzeige ist nicht exakt, weil die tatsächliche vertikale Temperatur- und Druckverteilung der Atmosphäre meistens mehr oder weniger von den Verhältnissen der ICAO-Standardatmosphäre abweicht.

Anzeigefehler, die allein auf Variationen des Luftdruckes in NN vom Standardwert 1013.2 hPa beruhen, lassen sich berichtigen, wenn auf der Nebenskala des Höhenmessers ein Luftdruckwert eingestellt wird, der einerseits dem tatsächlichen Luftdruck in Flugplatzhöhe und andererseits dem in Meereshöhe entspricht. Nach diesen Vorgängen, die besonders bei geringen Flughöhen über Grund von Bedeutung sind, zeigt das Gerät dann beim Aufsetzen auf der Landebahn erstens die genaue Höhe Null und zweitens die exakte Flugplatzhöhe an.

## 2.1 Einstellmöglichkeiten des Höhenmessers

Die tatsächliche vertikale Temperaturverteilung der Atmosphäre entspricht nur selten den festgelegten Temperaturverhältnissen der ICAO-Standardatmosphäre, so dass der Druckhöhenmesser während eines Fluges trotz der Einstellmöglichkeiten auf der Nebenskala kaum die wahre Höhe anzeigt.

**Druckhöhenkurven (Abb. 4)**



$p/h_{akt}$  : Aktuelle Druckhöhenkurve

$p/h_{isa}$  : Druckhöhenkurve der ICAO-Standardatmosphäre

*Die tatsächliche vertikale Temperaturverteilung der Atmosphäre entspricht nur selten den Temperaturverhältnissen der ICAO-Standardatmosphäre, so dass der Druckhöhenmesser während eines Fluges trotz der Einstellmöglichkeiten auf der Nebenskala kaum die wahre Höhe anzeigt.*

*Die Abbildung veranschaulicht, dass die angezeigte (grün) und die wahre Höhe (blau) nur an den beiden durch violette Kreise markierten Schnittpunkten der Druckhöhenkurven übereinstimmen.*

Werden die von der ICAO reglementierten Druckwerte  $p_1$ , die von der Flugart (IFR: Instrumentenflugregeln; VFR: Sichtflugregeln) sowie Flugphase (Start, Landung, Reiseflug) abhängen, auf der Nebenskala eingestellt, lässt sich der Nullpunkt der Höhenmesserskala so verschieben, dass das Gerät für jedes gewählte Druckniveau  $p_1$  zumindest eine Höhe angibt, dessen genaue Anzeige den Piloten bekannt ist.

Die zivile Luftfahrtorganisation ICAO schreibt deshalb vor, dass der barometrische Höhenmesser - je nach Art der Justierung des Basisdruckes  $p_1$  auf der Nebenskala - beim Aufsetzen eines Luftfahrzeuges auf der Landebahn eines Flugplatzes die Höhe Null, die Flugplatzhöhe und die Pressure altitude (PA) des QFE, das QNE, exakt anzeigen soll.

Für die Luftfahrt wurden daher die nachfolgenden Luftdruckwerte zur Einstellung auf der Nebenskala verbindlich festgelegt:

### 1. QFE-Einstellung

Ist der Höhenmesser auf das QFE eines Flugplatzes eingestellt, zeigt das Gerät während des Fluges die annähernde Höhe über diesem Flugplatz und bei der Landung auf diesem Platz den genauen Wert Null an. Diese Einstellung wird nur bei Platzrunden, jedoch nicht für Überlandflüge benutzt.

## 2. QNH-Einstellung

Wird der Höhenmesser auf das QNH eines Flugplatzes eingestellt, so gibt er während des Fluges die annähernde Höhe über NN und bei der Landung auf diesem Flugplatz seine exakte Flugplatzhöhe wieder.

## 3. 1013.2-Einstellung

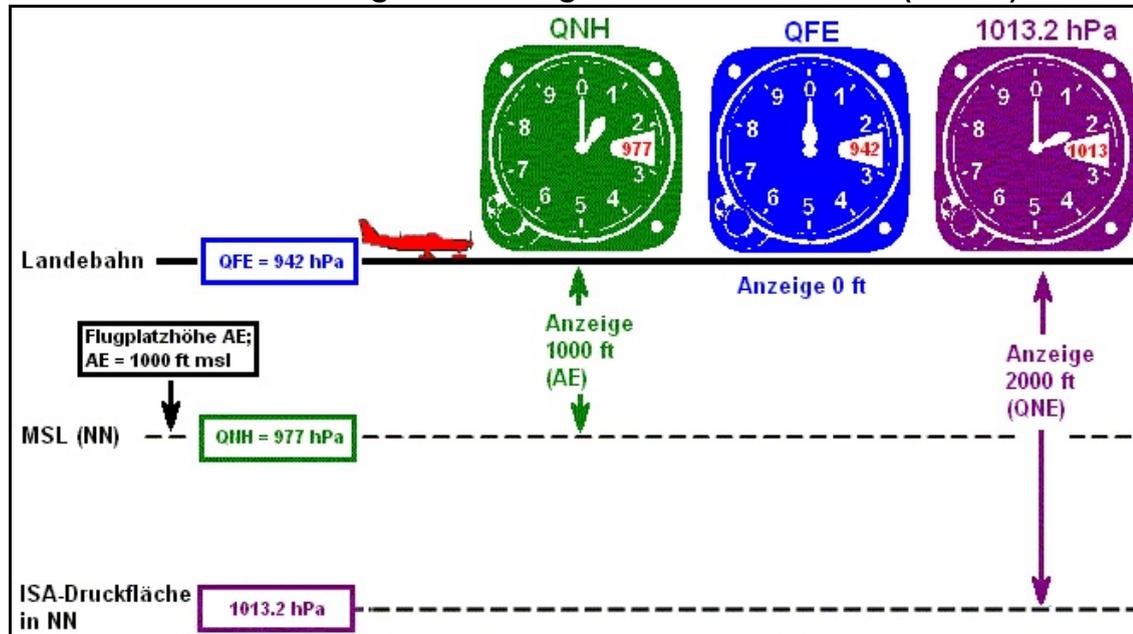
Bei Einstellung auf den Standarddruckwert von 1013.2 hPa zeigt der Höhenmesser während des Fluges die ungenaue Höhe über NN und bei der Landung das QNE an.

### Höhenmessereinstellung (Altimeter setting) (Tab. 4)

Eingestellter Basisluftdruckwert	Anzeige des Höhenmessers eines Luftfahrzeuges	
	auf der Landebahn	während des Fluges
QFE	genau Null	annähernde Höhe über dem Flugplatz
QNH	exakte Flugplatzhöhe	annähernde Höhe über NN
1013.2 hPa	QNE	ungenau Höhe über NN

Das QFE und QNH wird von allen deutschen Flugwetterwarten halbstündlich ermittelt. Das QNH wird dann mit anderen für die Luftfahrt wichtigen Wetterelementen (s. 1.3.3) als METAR-Meldung flughafenintern und extern sowie zusätzlich von der Flugsicherung über den Fluggrundfunkdienst verbreitet.

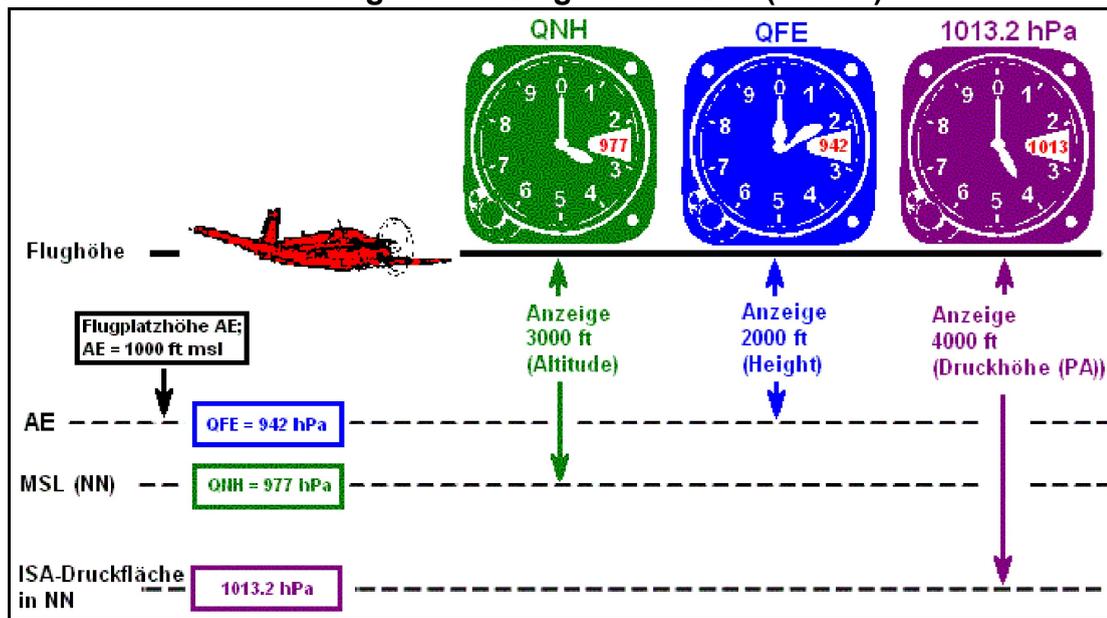
### Höhenmessereinstellung und -anzeige auf der Landebahn (Abb. 5)



AE: Flugplatzhöhe, Aerodrome Elevation

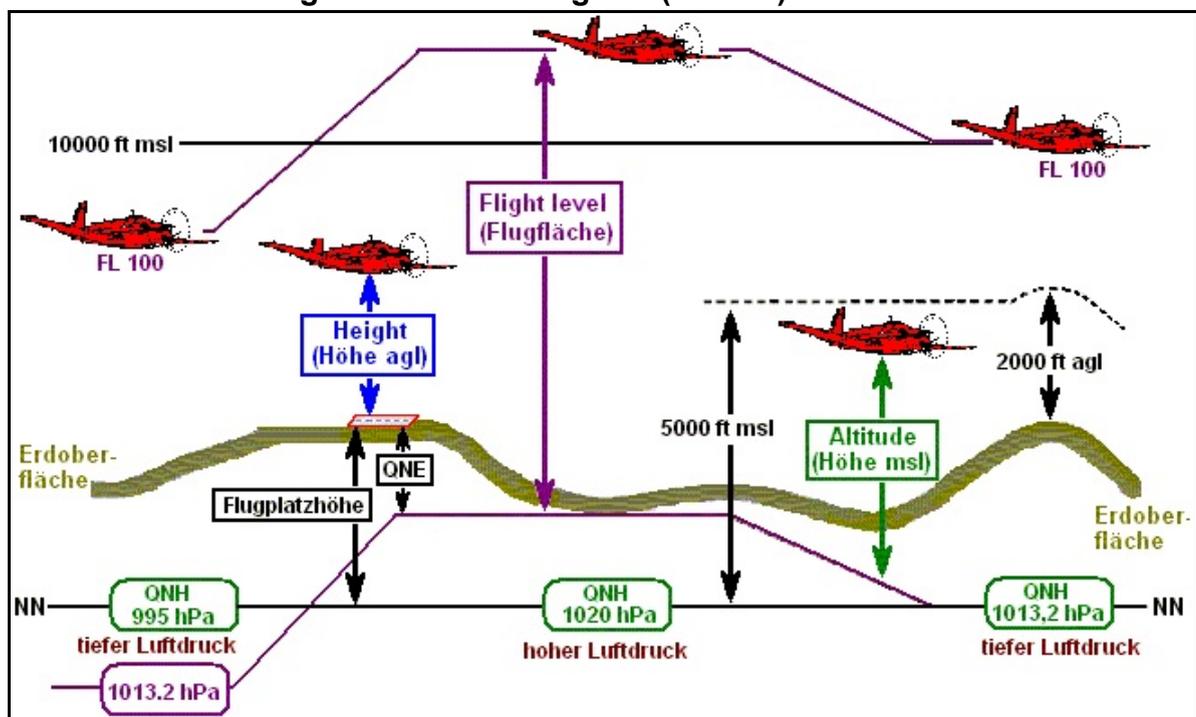
Meldet ein Flugplatz ein QNH von 977 hPa und ein QFE von 942 hPa, so zeigt der barometrische Höhenmesser eines auf der Startbahn dieses Flugplatzes stehenden Luftfahrzeuges bei einer Einstellung der Nebenskala auf die Luftdruckwerte QNH = 977 hPa, QFE = 942 hPa und 1013.2 hPa die Höhenwerte 1000 ft (Flugplatzhöhe), 0 ft und 2000 ft (QNE) an.

### Höhenmessereinstellung und -anzeige in der Luft (Abb. 6)



Meldet ein Flugplatz ein QNH von 977 und ein QFE von 942 hPa, so zeigt der barometrische Höhenmesser eines im Umfeld dieses Flugplatzes fliegenden Luftfahrzeuges bei einer Einstellung der Nebenskala auf die Luftdruckwerte QNH = 977 hPa, QFE = 942 hPa und 1013.2 hPa die Höhenwerte 3000 ft (Altitude, Höhe über NN), 2000 ft (Height, Höhe über Grund) und 4000 ft (Pressure altitude) an.

### Höhenmesseranzeigen und Höhenbegriffe (Abb. 7)



Weil der Luftdruck am Erdboden als auch in der Höhe räumlichen und zeitlichen Schwankungen unterworfen ist, ändert sich auch ständig die wahre Flughöhe eines sich in der Luft befindenden Luftfahrzeuges, wenn der barometrische Höhenmesser auf den Standardwert 1013.2 hPa eingestellt wurde. Wird z.B. ein Streckenflug auf der Flugfläche FL 100 durchgeführt und bewegt sich das Luftfahrzeug aus einem Gebiet mit tieferem Luftdruck in ein Gebiet mit höherem Luftdruck, so gewinnt es an Flughöhe und umgekehrt.

Wird der Höhenmesser in Flughöhen unter 5000 ft msl und unter 2000 ft agl auf das QNH eingestellt und dieser Wert auf einem Streckenflug immer wieder aktualisiert, legt das Luftfahrzeug seinen Flugweg in etwa der gleichen wahren Flughöhe zurück.

Bei extrem hochgelegenen Flugplätzen (s. Beispiele) kann allerdings das QFE so gering sein, dass sich der Druckwert auf der Nebenskala des Höhenmessers nicht mehr einstellen lässt. In diesen Fällen erhält ein Flugzeugführer, der landen will, das QNE und stellt auf der Nebenskala 1013.2 hPa ein. Dieses Verfahren findet aber nur an Flugplätzen Anwendung, an denen aus irgendwelchen Gründen kein QNH ermittelt wird, weil Flugzeuge heute normalerweise mit der QNH-Einstellung starten und landen.

- Beispiele:**
- Nairobi/Kenyatta Airport (HKNA) in Kenia, 1624 m ü. NN;
  - Lhasa/Gongga-Airport (ZULS) in China (Tibet), 3542 m ü. NN;
  - El Alto La Paz (Bolivien), 4086 m ü. NN; El Alto La Paz ist zwar ein Segelflugplatz, wird in Notfällen aber als Ausweichpiste für den gewerblichen Luftverkehr des benachbarten Flughafens La Paz benutzt.

## 2.2 Einstellverfahren in der zivilen Luftfahrt

Die große Dichte des heutigen Luftverkehrs und die zum Teil hohen Geschwindigkeiten der Luftfahrzeuge erfordern eine mehr oder minder exakte Bestimmung der Flughöhe, ohne die eine weitgehende Ausnutzung des Luftraumes bei ausreichender Bodenfreiheit und eine sichere Höhenstaffelung von Flugzeugen nicht möglich wäre. Für die Einstellung des barometrischen Höhenmessers gelten deshalb folgende Grundprinzipien:

- Während eines Fluges in und unterhalb einer festgelegten Höhe über NN, Übergangshöhe oder Transition altitude (s. nächste Seite) genannt, ist der Höhenmesser auf das QNH einzustellen, so dass die Höhe über NN (Altitude) angezeigt wird.
- Während eines Fluges oberhalb der Transition altitude wird auf Flächen konstanten Luftdruckes geflogen, die auf der Höhenmessereinstellung von 1013.2 hPa beruhen. Die Höhe wird dabei in Flight level (s. nächste Seite) ausgedrückt.
- Die Umstellung des barometrischen Höhenmessers auf das QNH oder auf 1013.2 hPa und umgekehrt hat während des Steig- und Sinkfluges nach dem Start und vor der Landung in der Transition layer (Übergangsschicht, s. 2.2.2) zu erfolgen.
- Ausreichende Bodenfreiheit in den einzelnen Flugphasen wird durch die nachstehenden unterschiedlichen Verfahren gewährleistet, die von den im Fluggebiet zur Verfügung stehenden Daten abhängen:
  - Benutzung der für die Teilabschnitte des Fluges repräsentativen QNH-Werte, die durch den Fluggrundfunkdienst der Flugsicherung verbreitet werden;

- Verwendung von nicht repräsentativen QNH-Werten in Verbindung mit dem vom Wetterdienst vorhergesagten tiefsten QNH für die Flugroute bzw. für Teilabschnitte derselben; und
  - wenn zutreffende Informationen nicht abrufbar sind, können auch die kleinsten, aus klimatologischen Daten gewonnenen Werte zur Bestimmung des tiefsten fliegbaren Flight level benutzt werden.
- Um während des Landeanfluges über ausreichend Bodenfreiheit verfügen zu können, wird der Höhenmesser des Luftfahrzeuges auf das QNH des Zielflugplatzes - in Ausnahmefällen auch auf sein QFE - eingestellt.

**Transition altitude : Übergangshöhe**

Höhe ü. NN (msl) in der Umgebung eines Flugplatzes, in oder unterhalb welcher die Flughöhe eines Luftfahrzeuges nach Höhen über dem Meer (Altitude) bestimmt wird. Die Transition altitude der internationalen deutschen Verkehrsflughäfen beträgt einheitlich 5000 ft.

**Flight level : Flugfläche**

Druckhöhe (Pressure altitude) nach der ICAO-Standardatmosphäre in 500 ft-Stufen, die in Hektokuß angegeben wird und der Höhenstaffelung von Luftfahrzeugen dient.

**Transition level : Übergangsfäche**

Niedrigste Flugfläche (Flight level), die für die Benutzung oberhalb der Übergangshöhe verfügbar ist.

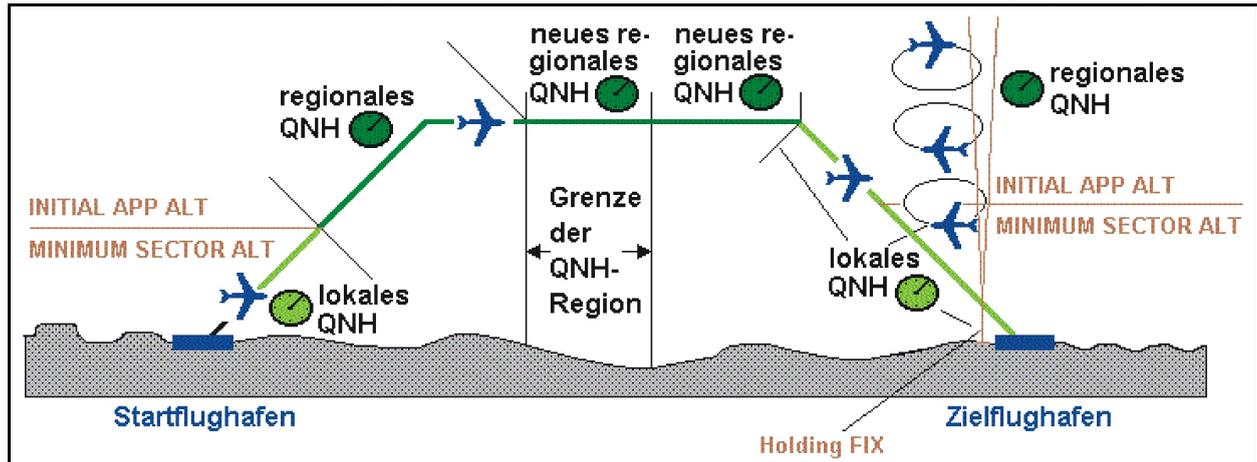
Gemäß diesen Vorgaben der ICAO (Doc 8168-OPS/611 Vol. 1) schreibt die Luftverkehrsordnung (LuftVO) für die Bundesrepublik Deutschland zwei unterschiedliche Arten der Höhenmesserjustierung vor, das QNH- Verfahren und die Standard-Höhenmessereinstellung.

### 2.2.1 QNH-Verfahren

Zum Start und zur Landung wird das QNH des Start- und Zielflughafens, das lokale QNH, verwendet. Nach dem Start wird der Höhenmesser vom lokalen auf das regionale QNH beim Durchsteigen der Sektormindesthöhe umgestellt und beim Beginn des Landeanfluges auf den Zielflughafen erfolgt die Änderung vom regionalen auf das lokale QNH.

Bei VFR-Streckenflügen (Flüge nach Sichtflugregeln) bis zu einer Höhe von 5000 ft msl oder bis zu einer Höhe von 2000 ft agl, sofern dieser Wert 5000 ft msl überschreitet, hat der Pilot den QNH-Wert des zur Flugstrecke nächstgelegenen Flughafens mit Flugverkehrskontrollstelle, das regionale QNH, einzustellen (s. Abb. 8).

## QNH-Verfahren: VFR-Flüge in Höhen $\leq 5000$ ft msl und $\leq 2000$ ft agl (Abb. 8)



Wie die linke Seite der Abbildung zeigt, ist der Höhenmesser nach dem Abheben beim Durchsteigen der Sektormindesthöhe vom lokalen auf das regionale QNH umzustellen. Zu Beginn des Landeanfluges auf den Zielflughafen erfolgt die Änderung vom regionalen auf das lokale QNH. Immer dann, wenn im Reiseflug die Grenze der QNH-Region überflogen wird, ist der Höhenmesser auf das neue regionale QNH zu justieren.

- INITIAL APP : Initial approach altitude, Anfangsanflughöhe; Höhe, in der der Landeanflug beginnt.
- MINIMUM SECTOR ALT : Minimum sector altitude (MSA), Sektormindesthöhe; geringste Höhe über NN, die in Notlagen benutzt werden kann und die einen Mindestabstand von 300 m (1000 ft) über allen Hindernissen im Bereich eines Kreissektors mit einem Radius von 25 Seemeilen um eine Funknavigationseinrichtung gewährleistet.
- Regionales QNH : QNH-Wert, der vom nächstgelegenen Flugplatz mit Flugverkehrskontrolldienst stammt, d.h. von einem autorisierten Beobachter (z.B. Mitarbeiter des Wetterdienstes) ermittelt wurde.
- Lokales QNH : QNH-Wert, der am Start- oder Landeflugplatz bestimmt wird.
- Holding Fix : Wartepunkt, der den Raum der Warteschleife festlegt, in dem sich ein Luftfahrzeug im Fluge aufhalten kann, während es z.B. auf die Landefreigabe wartet.

Immer dann, wenn im Reiseflug die Grenze der QNH-Region überflogen wird, ist der Höhenmesser auf das neue regionale QNH zu justieren.

### 2.2.2 Standard-Höhenmessereinstellung

Bei der Standard-Höhenmessereinstellung wird auf der Höhenmessernebenskala der Wert 1013.2 hPa justiert und die Flughöhe als Flight level bezeichnet. Dieses Verfahren ist - ausgenommen bei Start und Landung - von allen IFR- und von den VFR-Piloten zu benutzen, die Streckenflüge in Höhen oberhalb 5000 ft msl (2000 ft agl) durchführen wollen.

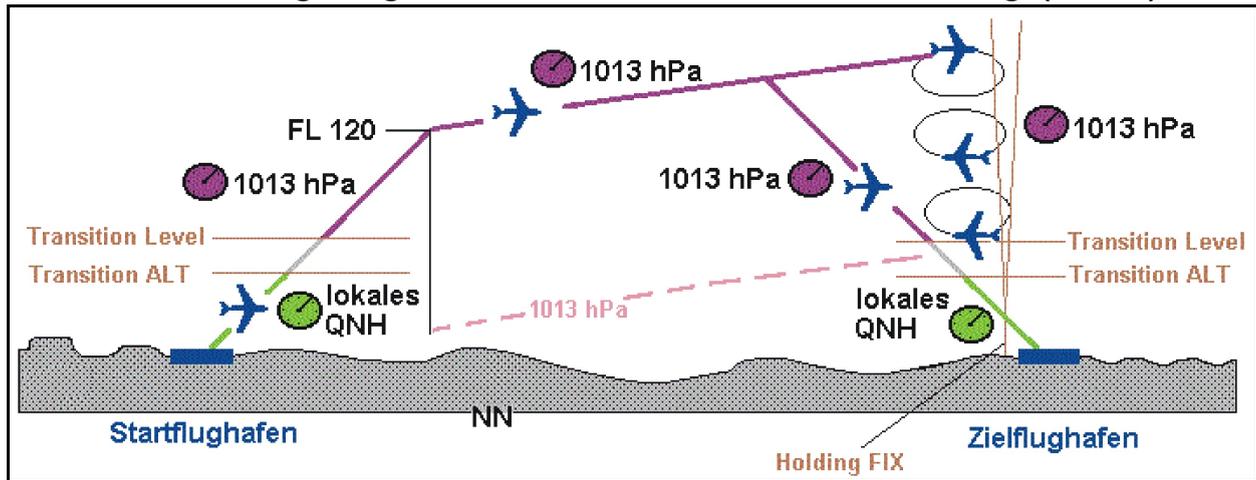
Wie bereits angesprochen wurde, ist die Höhenmessereinstellung für Start und Landung das QNH. IFR- und VFR-Flugzeugführer, die in Höhen oberhalb 5000 ft msl und über 2000 ft agl zu fliegen wünschen, müssen deshalb die Höhenmessereinstellung nach dem Start und vor der Landung ändern. Diese Umstellung geschieht in einer Übergangsschicht, der Transition layer, die eine Dicke von mindestens 1000 ft aufweist.

Die Obergrenze der Transition layer ist der Transition level, die niedrigste Flugfläche, und die untere Begrenzung bildet die Transition altitude.

**Transition layer : Übergangsschicht**

Luftraum zwischen Transition altitude und Transition level; hier wird der Höhenmesser beim Start vom lokalen QNH auf 1013.2 hPa und bei der Landung von 1013.2 hPa auf das lokale QNH umgestellt (s. Abb. 9).

**Standardeinstellung: Flüge in Höhen > 5000 ft msl und > 2000 ft agl (Abb. 9)**



Bei der Standard-Höhenmessereinstellung wird auf der Höhenmessernebenskala der Wert 1013.2 hPa justiert und die Flughöhe als Flight level bezeichnet. Dieses Verfahren ist - ausgenommen bei Start und Landung - von allen IFR- und von den VFR-Piloten zu benutzen, die Reiseflüge in Höhen oberhalb 5000 ft msl oder 2000 ft agl durchführen wollen. Die Übergangshöhe (Transition altitude) sämtlicher deutscher Verkehrsflughäfen wurde einheitlich auf 5000 ft msl festgelegt. Unterhalb der Transition altitude werden die Flughöhen als 'Altitudes', oberhalb als 'Flight level' bezeichnet.

Transition altitude : Übergangshöhe; Höhe ü. NN (msl) in der Umgebung eines Flugplatzes, in oder unterhalb welcher die Flughöhe eines Luftfahrzeuges nach Höhen über dem Meer (Altitude) bestimmt wird. Die Transition altitude der internationalen deutschen Verkehrsflughäfen beträgt einheitlich 5000 ft.

Transition level : Übergangsfläche; Niedrigste Flugfläche (Flight level), die für die Benutzung oberhalb der Übergangshöhe verfügbar ist.

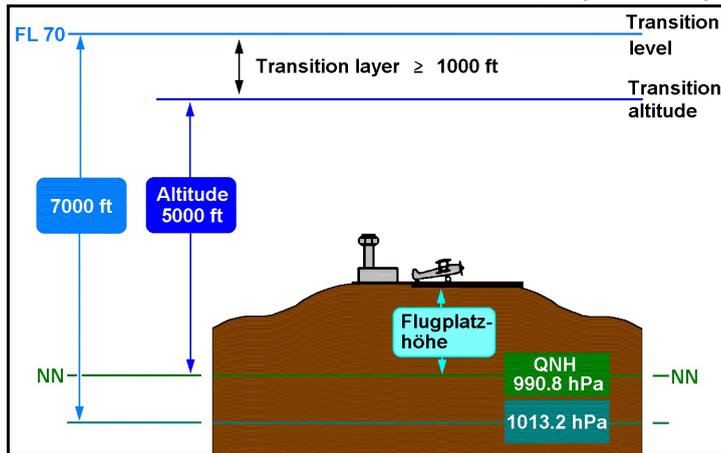
**Flight level (FL), Höhe, Luftdruck und Temperatur (Tab. 5)**

FL	Höhe h [ft]	Druck p [hPa]	t [°C]	FL	Höhe h [ft]	Druck p [hPa]	t [°C]
50	5000	843.1	5.1	340	34000	250.0	-52.4
100	10000	696.8	-4.8	390	39000	196.8	-56.5
180	18000	506.0	-20.7	450	45000	147.5	-56.5
240	24000	392.7	-32.6	530	53000	100.4	-56.5
250	25000	376.0	-34.5	600	60000	71.7	-56.5
300	30000	300.9	-44.4				

Die Übergangshöhe (Transition altitude) sämtlicher deutscher Verkehrsflughäfen wurde einheitlich auf 5000 ft msl festgelegt. Unterhalb der Transition altitude werden die Flughöhen als 'Altitudes', oberhalb als 'Flight level' bezeichnet.

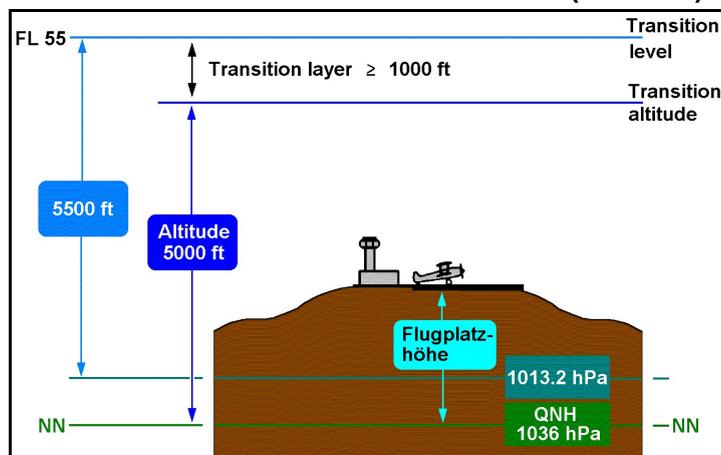
Weil die wahre Höhe einer Flugfläche eine Funktion des Luftdruckes in NN ist, wird der Transition level immer dann neu über ATIS (Automatic Terminal Information Service, automatische Informationsdurchsage für den Flugverkehr an Flughäfen mit IFR-Flugverkehr) verbreitet, wenn definierte QNH-Werte durchschritten werden. Die Abbildungen 10 und 11 zeigen die Abhängigkeit des Transition level vom QNH.

### Transition level und QNH = 990.8 hPa (Abb. 10)



Bei einem QNH von 990.8 hPa und einer Transition altitude von 5000 ft befindet sich der Transition level in FL 70.

### Transition level und QNH = 1036 hPa (Abb. 11)



Bei einem QNH von 1036 hPa und einer Transition altitude von 5000 ft befindet sich der Transition level in FL 55.

## 2.2.3 Halbkreisflughöhen

Flight level oder Flugflächen wurden eingeführt, um Luftfahrzeuge vertikal staffeln zu können und dadurch eine bessere Nutzung des Luftraums zu gewährleisten. Zusätzlich wurden Halbkreisflughöhen definiert, die den Luftverkehr in Deutschland nach IFR- und VFR- Flügen sowie ihrem östlichen und westlichen Kurs trennen und dadurch wesentlich sicherer gestalten.

Der Pilot hat dabei die Höhe unbedingt einzuhalten, die ihm vom Flugverkehrskontrolldienst zugewiesen bzw., wenn er VFR und unkontrolliert fliegt, die sich nach den Regeln der Halbkreisflughöhen aus seinem jeweiligen missweisenden Kurs und der Art seines Fluges (VFR oder IFR) ergibt (s. Tab. 6).

### Halbkreisflughöhen (Tab. 6)

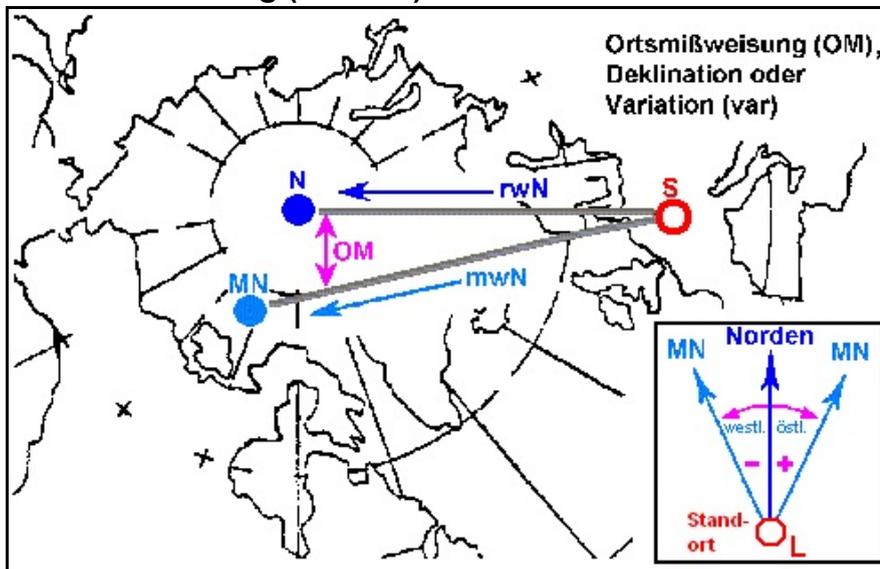
Missweisender Kurs von			
000° bis 179° (östlich)		180° bis 359° (westlich)	
IFR-Flüge	VFR-Flüge	IFR-Flüge	VFR-Flüge
FL 50	FL 55	FL 60	FL 45
FL 70	FL 75	FL 80	FL 65
FL 90	FL 95	FL 100	FL 85
FL 110	FL 115	FL 120	FL 105
FL 130	FL 135	FL 140	FL 125
etc.	etc.	etc.	etc.

#### Missweisung

Da der magnetische Nordpol nicht mit dem geographischen Nordpol (90° N) zusammenfällt, zeigt ein Magnetkompass nie genau in Richtung des geographischen Nordpols.

Die Abweichung zwischen geographisch und magnetisch Nord heißt Missweisung oder Deklination und wird für Orte der Erde in Winkelabständen (Grad) als Ortsmissweisung angegeben.

### Ortsmissweisung (Abb. 12)



- MN : magnetischer Nordpol
- OM : Ortsmissweisung
- N : geographischer Nordpol
- S : Standort des Luftfahrzeuges
- mwN : missweisend Nord (magnetisch Nord)
- rwN : rechtweisend Nord (geographisch Nord)
- L : geographische Länge

Weil der magnetische Nordpol nicht mit dem geographischen Nordpol (90° N) zusammenfällt, zeigt ein Magnetkompass nie genau in Richtung des geographischen Nordpols. Diese Abweichung zwischen geographisch und magnetisch Nord heißt Missweisung oder Deklination und wird für Orte der Erde in Winkelabständen (Grad) als Ortsmissweisung angegeben.

weil der magnetische Nordpol nicht mit dem geographischen Nordpol (90° N) zusammenfällt, zeigt ein Magnetkompass nie genau in Richtung des geographischen Nordpols. Diese Abweichung zwischen geographisch und magnetisch Nord heißt Missweisung oder Deklination und wird für Orte der Erde in Winkelabständen (Grad) als Ortsmissweisung angegeben.

Weil der magnetische Nordpol nicht mit dem geographischen Nordpol (90° N) zusammenfällt, zeigt ein Magnetkompass nie genau in Richtung des geographischen Nordpols. Diese Abweichung zwischen geographisch und magnetisch Nord heißt Missweisung oder Deklination und wird für Orte der Erde in Winkelabständen (Grad) als Ortsmissweisung angegeben.

## 2.3 Fehler der barometrischen Höhenmessung

Wie bereits in Kapitel 2 erwähnt, entspricht die angezeigte Höhe des barometrischen Höhenmessers nur in wenigen Fällen der tatsächlichen Höhe des Luftfahrzeuges über NN bzw. über Grund. Abgesehen von Instrumentenfehlern ergeben sich Abweichungen in der Anzeige, weil die tatsächliche atmosphärische vertikale Luftdichteverteilung praktisch niemals genau den Dichteverhältnissen der ICAO-Standardatmosphäre entspricht. Die einzigen Anzeigen, die den Piloten als genau bekannt sind - Instrumentenfehler werden bei dieser Betrachtung vernachlässigt - sind die in 2.1 angesprochenen Werte nach Tabelle 7.

### Exakte Anzeige des Druckhöhenmessers (Tab. 7)

Eingestellter Luftdruckwert	Höhenmesser zeigt in Flugplatzhöhe genau
QFE	den Wert Null
QNH	die Flugplatzhöhe
1013.2 hPa	das QNE

### 2.3.1 Instrumentenfehler

#### 2.3.1.1 Eich- und Kompensationsfehler

Durch mangelhafte Eichung und schlechte Temperaturkompensation der Druckdosen werden Abweichungen hervorgerufen, die am Boden maximal  $\pm 50$  ft betragen und im Flughandbuch des Luftfahrzeuges aufgeführt sind.

#### 2.3.1.2 Hysterese- und Elastizitätsfehler

Hysteresefehler - Hysterese bedeutet Fortdauer einer Wirkung nach Aufhören der Ursache - zeigen sich besonders bei zügigen Steig- oder Sinkflügen, wenn die elastischen Druckdosen zu langsam auf die rasche Änderung des Luftdruckes reagieren.

Elastizitätsfehler sind die Folge von Reibungswärme, die von der Flugzeugoberfläche über die Instrumentenöffnung an der Außenseite des Luftfahrzeuges in das Innere des Messgerätes gelangt.

### 2.3.1.3 Statikdruckquellenfehler

Es ist im allgemeinen schwierig, den statischen Druck in bewegter Luft an jedem Ort der Flugzeugoberfläche exakt zu bestimmen. Der Luftdruck wird deshalb im Bereich sogenannter 'Static ports' ermittelt, an denen der Strömungsverlauf der Luft nahezu tangential verläuft, so dass der Messfehler klein ist. Als maximale Abweichung sind  $\pm 30$  ft je 100 kn Geschwindigkeit zugelassen.

## 2.3.2 Atmosphärische Fehler

Atmosphärische Fehler sind Abweichungen, die auf Differenzen der aktuellen Luftdichte von den in der ICAO-Standardatmosphäre definierten Dichtewerten beruhen. Da die Luftdichte eine Funktion der Temperatur, des Luftdruckes und des Wasserdampfgehaltes der Luft ist, wird zwischen Temperatur-, Druck- und Wasserdampfgehaltes unterschieden.

### 2.3.2.1 Temperaturfehler

Weil die tatsächlichen Temperaturverhältnisse der Atmosphäre mehr oder weniger von denen der ICAO-Standardatmosphäre abweichen, ist die angezeigte Flughöhe bei höheren aktuellen Lufttemperaturen kleiner als die tatsächliche und bei tieferen größer als die wahre Flughöhe. Der Betrag der Abweichung ist von der Differenz zwischen der aktuellen und der ISA-Temperatur in Flughöhe abhängig (s. Form. 20). Pro Grad Celsius Temperaturdifferenz beträgt die Abweichung von der angezeigten Flughöhe ca. 0.4 % bzw. pro 5 °C Temperaturdifferenz etwa 2 %.

#### Faustformel zur Berechnung des Temperaturfehlers in der Troposphäre (Form. 20)

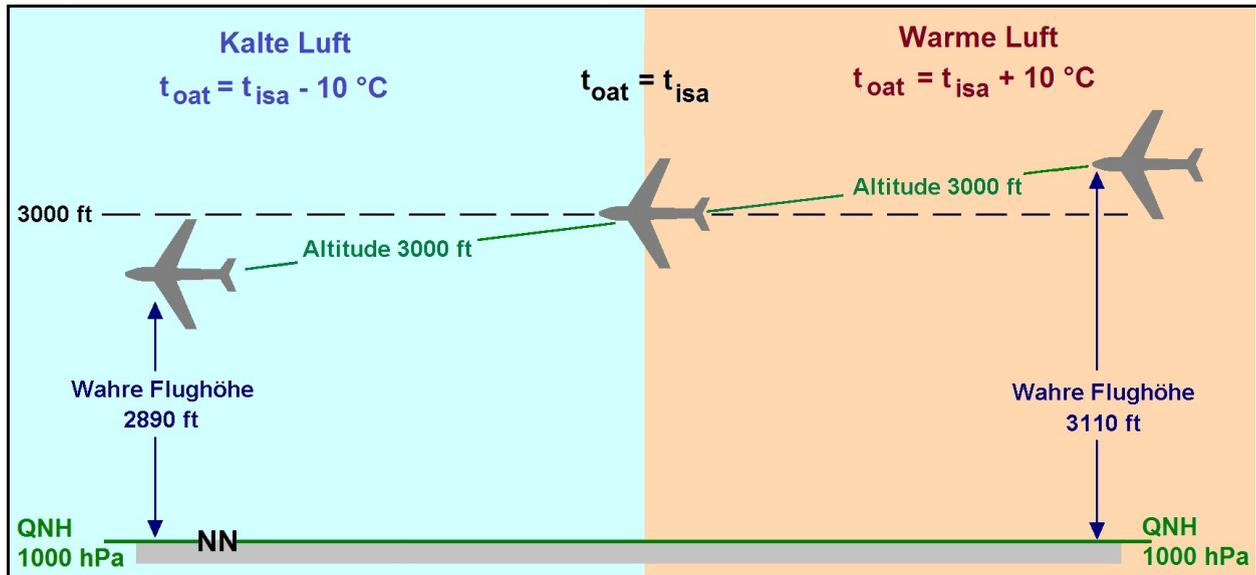
$$\Delta h_t \approx (t_{\text{oat}} - t_{\text{isa}}) \frac{0.3663}{100} h_{\text{ft}} \text{ [ft]}$$

$$t_{\text{isa}} \approx 15 - 0.3048 h_{\text{ft}} \cdot 0.0065 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

- $\Delta h_t$  : Fehler der Höhenmesseranzeige [ft];  
 $\Delta h_{\text{ft}} < 0 \Leftrightarrow$  Anzeige zu hoch;  $\Delta h_{\text{ft}} > 0 \Leftrightarrow$  Anzeige zu tief
- $t_{\text{oat}}$  : Lufttemperatur [ $^\circ\text{C}$ ] in Flughöhe (Outside air temperature)
- $t_{\text{isa}}$  : ICAO-Standardtemperatur [ $^\circ\text{C}$ ] in Flughöhe
- $h_{\text{ft}}$  : Angezeigte Flughöhe [ft]
- $\frac{0.3663}{100}$  : Volumenänderung eines idealen Gases bei einer Temperaturänderung von 1 K;  $1/273 \approx 0.003663 \text{ K}^{-1}$
- 0.0065: Vertikaler Temperaturgradient [ $^\circ\text{C m}^{-1}$ ] der ICAO-Standardatmosphäre in der Troposphäre
- 0.3048: Umrechnungsfaktor für Fuß in Meter [ $\text{m ft}^{-1}$ ]

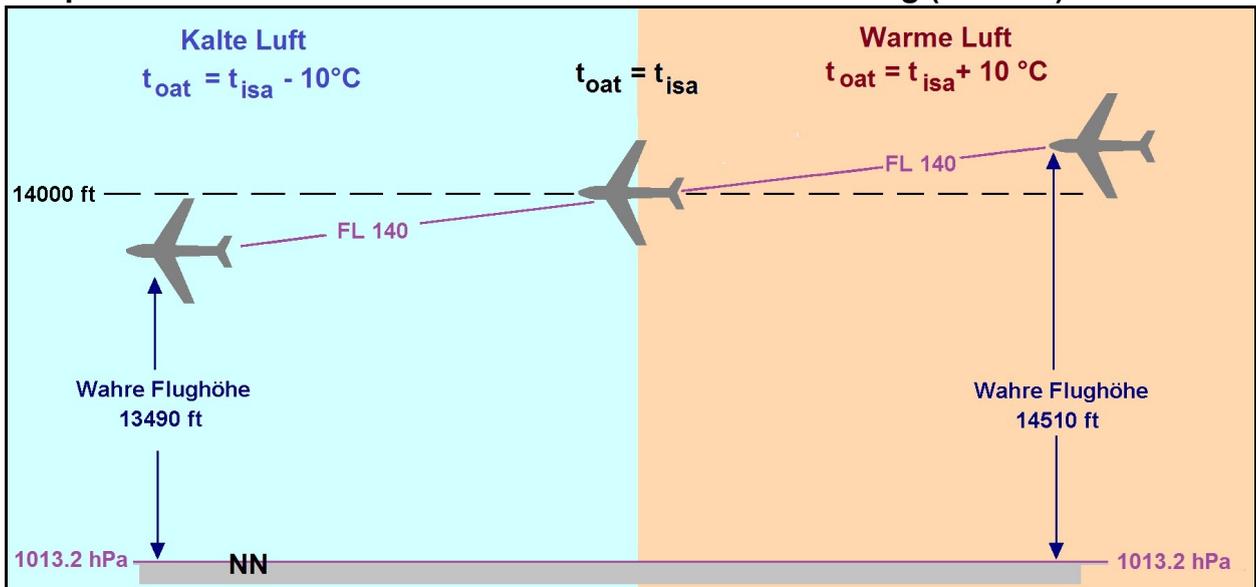
Die nächsten beiden Grafiken verdeutlichen den Temperaturfehler bei einer von der ISA-Temperatur um 10 °C differierenden aktuellen Lufttemperatur. Beim QNH-Verfahren beträgt die Abweichung von der angezeigten Flughöhe 3000 ft msl ca. 110 ft und bei der Standard-Höhenmessereinstellung in FL 140 etwa 510 ft.

### Temperaturfehler beim QNH-Verfahren (Abb. 13)



Liegt die tatsächliche Lufttemperatur in Flughöhe um 10 °C über der ICAO-Standardtemperatur, so befindet sich das Flugzeug ca. 110 ft höher, als es der Höhenmesser wiedergibt. Bei einer um 10 °C geringeren aktuellen Lufttemperatur ist die wahre Höhe um etwa 110 ft geringer als die angezeigte Altitude.

### Temperaturfehler bei der Standard-Höhenmessereinstellung (Abb. 14)



Liegt die tatsächliche Lufttemperatur in Flughöhe um 10 °C über der ICAO-Standardtemperatur, so befindet sich das Flugzeug etwa 510 ft höher, als es der Höhenmesser wiedergibt. Bei einer um 10 °C geringeren aktuellen Lufttemperatur ist die wahre Höhe um ca. 510 ft geringer als die angezeigte Flugfläche (FL).

Weist die aktuelle Lufttemperatur kleinere Werte als die Standardtemperatur in Flughöhe auf, dann ist die wahre Höhe geringer als die angezeigte. Diese Fehlanzeige kann bei Flügen über dem Bergland bei tiefen Wolken und schlechter Flugsicht zu kritischen Flugsituationen führen. Vereinfacht ausgedrückt, lässt sich sagen: **Im Winter sind die Berge höher.**

### 2.3.2.2 Druckfehler

Druckfehler treten auf, wenn der tatsächliche Luftdruck in NN nicht dem Wert entspricht, der auf der Nebenskala des Höhenmessers vom Piloten eingestellt wurde.

Sie sind die Ursache von

- Abweichungen des Luftdruckes in NN von 1013.2 hPa bei der Standard-Höhenmeseinstellung,
- dynamischen Druckänderungen sowie
- Einstell- und Berechnungsfehlern.

Druckfehler führen zu konstanten, der barometrischen Höhenstufe in NN entsprechenden Abweichungen zwischen wahrer und angezeigter Flughöhe. Wird 1013.2 hPa oder das QNH auf der Nebenskala justiert und liegt der tatsächliche Luftdruck in NN unter diesem Basiswert, so ist das angezeigte Flugniveau um ca.  $28 \text{ ft hPa}^{-1}$  größer als das wahre und umgekehrt.

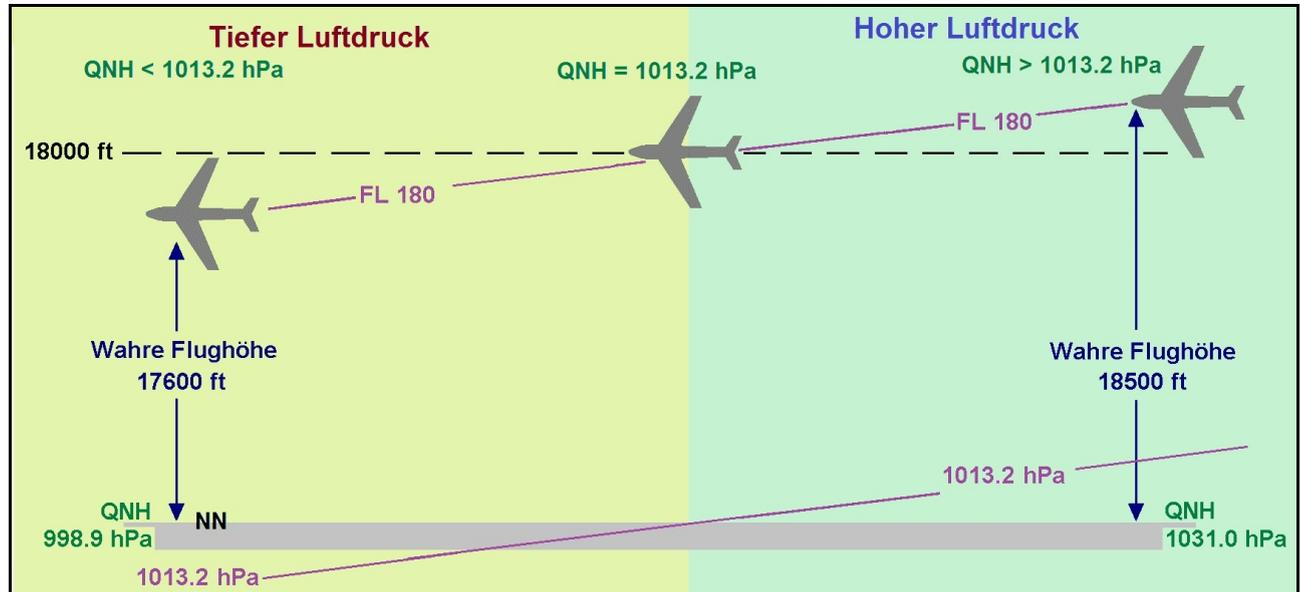
Besonders gefährlich erweist sich dieser Fehler, wenn ein zu hoher Luftdruck eingestellt wurde und bei schlechter Flugsicht und tiefer Bewölkung in geringer Höhe über dem Bergland geflogen wird. Als Merksatz gilt deshalb: **Vom Hoch zum Tief geht's schief.**

#### 2.3.2.2.1 Luftdruck in NN ungleich 1013.2 hPa beim Standard-Verfahren

Bei der Standard-Höhenmessereinstellung tritt außer dem Temperaturfehler noch ein Fehler auf, der auf der Abweichung des Luftdruckes in NN vom ISA-Wert 1013.2 hPa beruht. Ist der Luftdruck in NN ungleich 1013.2 hPa und stimmt die aktuelle vertikale Temperaturverteilung mit der der Standardatmosphäre überein, so ergibt sich entsprechend der barometrischen Höhenstufe eine konstante Abweichung von etwa  $28 \text{ ft hPa}^{-1}$  zwischen wahrer und angezeigter Flughöhe. Bei höheren Werten als 1013.2 hPa ist die angezeigte Höhe um  $28 \text{ ft hPa}^{-1}$  geringer als die wahre und bei kleineren um  $28 \text{ ft hPa}^{-1}$  größer (s. Abb. 15).

Weil bei der Standard-Höhenmessereinstellung Temperatur- und Druckfehler gemeinsam auftreten, addieren bzw. kompensieren sie sich.

### Druckfehler bei der Standard-Höhenmessereinstellung (Abb. 15)



Bei einem QNH = 1031.0 hPa (Differenz 17.8 hPa · 28 ft hPa<sup>-1</sup> ≈ 500 ft) beträgt die Flughöhe 18500 ft anstatt der angezeigten 18000 ft und bei einem QNH = 998.9 hPa (Differenz 14.3 hPa · 28 ft hPa<sup>-1</sup> ≈ 400 ft) ist sie um ca. 400 ft niedriger als der abgelesene Höhenmesserwert.

#### 2.3.2.2.2 Dynamische Druckänderungen

Die barometrische Höhenformel in integrierter Form basiert auf der statischen Grundgleichung (s. 1.1.1), die Luftbewegungen und damit dynamische Druckänderungen, so wie sie z.B. ausgeprägt in der Umgebung von Gebirgen auftreten können, nicht berücksichtigt. Wird Luft gegen einen Höhenzug geführt, so wird dieser, in Abhängigkeit von seiner horizontalen Breite, mehr oder minder überströmt. Auf der Luvseite dieses Strömungshindernisses stellt sich eine aufsteigende Luftbewegung ein, so dass durch vertikale Massenkongruenz - der Luftsäule vor dem Berghindernis wird unten mehr Luft zugeführt, als darüber abfließen kann - der Luftdruck am Erdboden steigt.

Auf der Leeseite dagegen führt die beschleunigte abwärtsgerichtete Luftbewegung zu einer vertikalen Massendivergenz - in der Luftsäule hinter dem Berghindernis fließt in tieferen Luftschichten mehr Luft ab, als darüber zugeführt werden kann, so dass der Luftdruck in Bodennähe fällt.

Der Höhenmesser zeigt bei solch einer Wetterlage deshalb luvseitig zu niedrig und leeseitig zu hoch an.

### 2.3.2.2.3 Einstellungs- und Berechnungsfehler des Luftdruckes

Abweichungen der Höhenmesseranzeige von der tatsächlichen Höhe des Flugzeuges können auch durch das versehentliche Einstellen falscher Luftdruckwerte auf der Nebenskala des Höhenmessers während des Fluges, aufgrund von nicht korrekten Berechnungen des QNH oder QFE durch die Wetterdienststelle bzw. durch Übermittlungsfehler zustandekommen.

### 2.3.2.3 Wasserdampffehler

Die ICAO-Standardatmosphäre wurde als eine absolut trockene Atmosphäre definiert, in der kein Wasserdampf enthalten ist. Tatsächlich jedoch schwankt der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre relativ stark und kann maximal bis zu 4 Volumenprozent betragen, wobei die Troposphäre fast 100 % des gesamten Wasserdampfes der Atmosphäre beinhaltet.

Weil ein Gasgemisch aus Wasserdampf und trockener Luft eine geringere Dichte als trockene Luft aufweist - die Wasserdampfdichte entspricht nur etwa 5/8 der Dichte trockener Luft - ist die wahre Höhe deshalb maximal um 0.5 % größer als die angezeigte Höhe. Dieser Fehler wird - weil er einen positiv ist - vernachlässigt.

### Literaturverzeichnis

- BMV/LBA* : *Grundlagen der Luftfahrzeugtechnik in Theorie und Praxis, Bd. II, Flugwerk; Verlag TÜV Rheinland Pfalz GmbH, Köln 1980*
- Bundesanstalt für Flugsicherung* : *Wörterbuch der ICAO-Terminologie; Frankfurt/M, August 1967*
- DWD* : *BHB Flu (VuB Nr. 7) neu*
- Hering, Prof. Dr. Dr.* : *Physik für Ingenieure, 3. Auflage;*  
*Martin, Prof. Dr.* : *VDI-Verlag GmbH,*  
*Storer, Prof. Dr.* : *Düsseldorf 1989*
- Hesse, F.* : *Hesse 2, Bordinstrumente;*  
*Hesse, W.* : *Verlag Hesse, 3565 Breidenbach, April 1982*
- ICAO* : *Manual of the ICAO Standard Atmosphere;*  
*2. Edition, 1964*
- ICAO* : *PANS 'Aircraft Operations' : Volume 1, Flight Procedures;*  
*Doc 8168-OPS/611, Third Edition 1986*
- Kühr, W.* : *Der Privatflugzeugführer, Band 3, Technik II ;*  
*Verlag Friedrich Schiffmann, 5060 Bergisch Gladbach, Okt. 1988*
- Lufthansa* : *Luftdaten-Instrumente;*  
*DLH Verkehrsfliegerschule Bremen, August 1985*
- Wallbaum F., Prof. Dr.* : *Einführung in die Meteorologie Teil 1, Fachhochschule Bundes für öffentliche Verwaltung, 1998; DWD, BTZ Langen*