

Understanding Pressures and Altitudes

Ich höre sie schon die Stimmen der Experten und gestandenen Piloten: Luftdruck und Altitudes, ja, wer das nicht kann, das muß man doch nicht erst groß erklären, das ist doch PPL Stoff usw. Fragt man konkret nach, so wirkt die ein oder andere Erklärung doch oft etwas wackelig. Ich denke es ist keine schlechte Idee, auch dieses Thema einmal etwas tiefergehender zu beleuchten.

Physikalische Grundlage

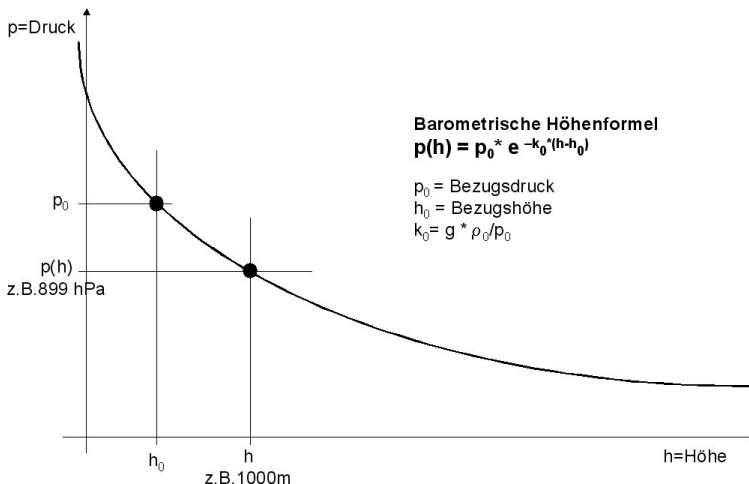
Die physikalische Grundlage der Höhenmessung ist die sogenannte barometrische Höhenformel, die besagt, daß der Luftdruck in der Atmosphäre exponentiell mit der Höhe abnimmt. Die Druckdifferenz, gleichzeitig gemessen

in zwei verschiedenen Höhen, läßt sich folglich nutzen, um eine Höhendifferenz zu berechnen. In einer Formel ausgedrückt, heißt das:

$$h - h_0 \equiv \frac{p_0}{g * \rho_0} \ln\left(\frac{p_0}{p}\right) \equiv \frac{1}{k_0} * \ln\left(\frac{p_0}{p}\right)$$

Der Term direkt hinter dem Gleichheitszeichen enthält zusätzlich die Erdbeschleunigung g und die Luftdichte ρ_0 am Ort der Messung in h_0 .

Wir stellen uns jetzt einmal vor, wir sind auf einem Flugplatz, dessen wahre Höhe h_0 wir kennen, sagen wir einmal er liegt in 500 m Höhe. Wir messen die Temperatur T_0 sagen wir einmal mit 12°C und mit einem Barometer den Luftdruck p_0 sagen wir einmal mit 950 hPa. Wir steigen zusammen mit dem Barometer in ein Flugzeug, heben ab und steigen. Der Luftdruck wird natürlich mit der Höhe weiter abnehmen. Wir lesen zu einem bestimmten Zeitpunkt 900 hPa ab. Wie hoch sind wir? Nachrechnen der rechten Seite gibt 493,5 m, d.h. wir sind 493,5 m über dem Platz und also angeblich insgesamt 993,5 m hoch. Wir haben



Barometrische Höhenformel
 $p(h) = p_0 * e^{-k_0 * (h-h_0)}$

p_0 = Bezugsdruck
 h_0 = Bezugshöhe
 $k_0 = g * \rho_0 / p_0$

gerade einen Luftfahrthöhenmesser gebaut. Eins ist schon mal klar. Wäre ein zweites Flugzeug mit der gleichen Meßeinrichtung gestartet, würde es direkt neben uns jetzt die gleiche Luftdruck- respektive Höhenanzeige haben. Wie verlässlich ist aber der Absolutwert unserer Angabe? Ist dieser Wert die wahre Höhe des Flugzeuges? Die Antwort lautet: im

berechnet die barometrische Formel die wahre Höhe.

Berechnet man einige weitere Werte (siehe Tabelle), so kann man feststellen, daß in einem engeren Bereich um die Platzhöhe der barometrische Höhenmesser zwar einen relativ geringen Fehler macht bei größeren Höhenunterschieden aber unbrauchbar wird. Ein in Meereshöhe

Berechnung der Höhe aus der barometrischen Höhenformel

Platzhöhe h0 [m]	0,00	500,00	750,00	0,00	1000,00	2000,00
Luftdichte bei h0 [kg/m ³]	1,2250	1,1673	1,1393	1,2250	1,1117	1,0066
Luftdruck bei h0 [hPa]	1013,25	954,61	926,36	1013,25	898,76	795,01
Erdbeschleunigung	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81
Luftdruck der Meßhöhe [hPa]	900,00	900,00	900,00	500,00	500,00	500,00
Berechnete Höhe [m]	999	991	989	5.955	5.833	5.734
Berechnete Höhe ft]	3.279	3.252	3.246	19.539	19.136	18.811
Delta ggü. kleinstem Wert	1,02%	0,19%		3,87%	1,73%	

allgemeinen nicht. Der Grund liegt im Meßverfahren. Wir haben bei der Konstante k₀ einen Fehler zugelassen. Es herrscht ja in der größeren Höhe eine andere Temperatur bzw. Luftdichte als am Punkt unserer Eichung (Flugplatz). Also hängt alles am Term, der durch k₀ abgekürzt wurde.

$$k_0 \equiv \frac{\rho_0 * g}{p_0} \equiv \frac{\rho_1 * g}{p_1} \equiv k_1$$

Die Erdbeschleunigung g ist hierin eine echte Konstante (jedenfalls wenn wir nicht ganz pingelig sind), aber der Quotient aus Luftdichte und Luftdruck ist nicht unabhängig von der Höhe. Übrigens ist k₀ der (hier negative und nicht konstante) sogenannte Wachstumskoeffizient der Exponentialfunktion. Wir fragen einmal, wann denn dieser Wert in der Höhe k₁ gleich dem Wert k₀ am Flugplatz ist. Ohne die Rechnung hier auszuführen (über die allgemeine Gasgleichung), folgt: nur falls T₀=T₁. Das heißt, nur bei Isothermie

gestartetes Flugzeug würde ggü. einem in 2000 m gestarteten Flugzeug bei gleichem Druck von 500 hPa tatsächlich 700 ft Höhenunterschied anzeigen. Der Grund hierfür ist klar: der Fehler durch die „falsche Steigung“ der Kurve nimmt mit dem Abstand vom Referenzpunkt zu.

Wie kann man dem entgehen? Der barometrische Höhenmesser wäre dann exakt, wenn er sich in jeder Höhe dynamisch an das neue Verhältnis Luftdichte/Luftdruck anpassen könnte.

Also definieren wir einfach eine Idealkurve p=p(h), welche die durchschnittlichen Verhältnisse in der Atmosphäre widerspiegelt und verlangen von einem Altimeter, daß er die Höhenwerte dieser Kurve bis auf einen geringen Meßfehler exakt anzeigt, die Standardatmosphäre. Das bedeutet übrigens für die nichtlineare Zeigermechanik, daß sie die Druckdifferenz zum Referenzpunkt nicht nur logarithmisch übersetzt sondern zusätzlich mit einem höhenabhängigen

Faktor vergrößert oder verkleinert.

Die ICAO Standardatmosphäre (ISA)

Die ICAO Standardatmosphäre wurde bereits in der Mitte des letzten Jahrhunderts als Grundlage für die Eichung von Luftfahrthöhenmessern und anderen Eichvorgängen wie z.B. der genauen Bedingungen für die Leistungsmessung von Kolben- oder Turbintriebwerken festgelegt und mehrfach erweitert. Die letzte Erweiterung fand 1993 statt, wobei die Definition der ISA Standardatmosphäre bis 80.000m (262.500 Fuß) definiert wurde. (im ICAO Doc 7488, es kostet übrigens 167 US\$!)

Die folgende Tabelle gibt einige Basiswerte wie Höhe, Luftdruck, Luftdichte und Lufttemperatur bis 30.000m wieder.

Die zweite Spalte von rechts zeigt das Verhältnis von Luftdichte zum Luftdruck, welches mit der Höhe zunimmt (siehe k_0).

Die Luftdruckeichungen in der Luftfahrt

Wie bereits weiter oben geschildert, ist der Höhenmesser eines Flugzeuges nichts anderes als ein Barometer, das den jeweiligen Luftdruck am Ort des Flugzeuges gegenüber einem eingestellten Referenzdruck mißt und ihn als Höhe anzeigt. Der Höhenmesser kann keine Temperatur berücksichtigen¹, er mißt ausschließlich den Druck. Er arbeitet nicht nach der barometrischen Formel sondern nach der ISA-Standardkurve. In der

ICAO Standard Atmosphere (ISA)						
Höhe	Luftdruck	Luftdichte	Temp.	Verhältnis	Abweichung	
m	hPa	kg m ⁻³	°C	1000·ρ/p	prozentual	
- 250	1044	1,25	17	1,1973		
0	1013	1,22	15	1,2043		0,6%
250	984	1,20	13	1,2195		1,9%
500	955	1,17	12	1,2251		2,3%
750	926	1,14	10	1,2311		2,8%
1000	899	1,11	8	1,2347		3,1%
1500	846	1,06	5	1,2530		4,6%
2000	795	1,00	2	1,2579		5,1%
2500	747	0,96	-1	1,2851		7,3%
3000	701	0,91	-4	1,2981		8,4%
3500	658	0,86	-8	1,3070		9,2%
4000	616	0,82	-11	1,3312		11,2%
4500	577	0,78	-14	1,3518		12,9%
5000	540	0,74	-18	1,3704		14,5%
6 000	472	0,66	-24	1,3983		16,8%
7 000	411	0,59	-30	1,4355		19,9%
8 000	356	0,53	-37	1,4888		24,3%
9 000	307	0,47	-44	1,5309		27,9%
10 000	264	0,41	-50	1,5530		29,7%
12 000	193	0,31	-56	1,6062		34,2%
14 000	141	0,23	-56	1,6312		36,2%
16 000	103	0,17	-56	1,6505		37,8%
18 000	75	0,12	-56	1,6000		33,6%
20 000	55	0,09	-56	1,6000		33,6%
22 000	40	0,06	-54	1,6000		33,6%
24 000	29	0,05	-52	1,5862		32,5%
26 000	22	0,03	-50	1,5455		29,1%
28 000	16	0,03	-48	1,5625		30,5%
30 000	12	0,02	-46	1,5000		25,3%

Luftfahrt gibt es nur zwei Eichverfahren, die auf Bodenmessungen beruhen, die Eichung nach QFE und die Eichung nach QNH.

Die Eichung selbst am Altimeter im Flugzeug wird durch Einstellung des jeweiligen Eichwertes (QFE oder QNH) im sogenannten Kollsman Window vor und während des Fluges vorgenommen.

Für die weitere Erklärung der Eichungen verwenden wir den Text aus einem Original ICAO Technical Guide für die Hersteller von Flugplatzzeichgeräten.

Definitionen

“Pressure is measured at the altitude of the barometer installation. The value measured by the barometer is used to calculate QNH and QFE.

QNH is the pressure reduced to mean sea level (MSL), using the ICAO standard profile of the atmosphere (*Manual of the*

¹ Wohl hat er einen Temperaturfehler, den wir hier aber außer acht lassen wollen

ICAO Standard Atmosphere (extended to 80 kilometres (262 500 feet)) (Doc 7488) refers). QNH gives a normalized value of pressure, independent of the altitude of measurement. Altimeters using the same standard profile can deduce the aircraft altitude above a given point, knowing the QNH of this point. When set to a QNH altimeter setting, a pressure type altimeter will indicate altitude above sea level and the official aerodrome altitude when landed.

QFE is the pressure reduced to an official aerodrome altitude, using the most appropriate profile of the atmosphere, thus taking in account, if necessary, the air temperature at the aerodrome. When set to a QFE altimeter setting, an altimeter will indicate height above the QFE reference level, and 0 when landed. The reference level for the computation of QFE should be the (official) aerodrome elevation. For non-precision approach runways with thresholds of 2 m (7 ft) or more below, or above, the aerodrome elevation, and for precision approach runways, additional QFEs should refer to the relevant threshold elevation."

QNH-Eichung zur Bestimmung der QNH-Höhe oder Altitude

„To determine QNH, QFE has to be first calculated no matter whether it is reported or not, ... This calculation can use the *Manual of the ICAO Standard Atmosphere (extended to 80 kilometres (262 500 feet))* (Doc 7488), using the effective air temperature at the time of calculation.

..... QNH is calculated from QFE of the aerodrome (at altitude H_{ref}), using the *Manual of the ICAO Standard Atmosphere (extended to 80 kilometres (262 500 feet))* (Doc 7488) as follows:

First, calculation of the equivalent altitude H in ICAO standard atmosphere:

$$H \equiv 44330,77 - 11880,32 * QFE^{0,190263}$$

and then

$$QNH \equiv 1013,25 * \left(1 - 0,0065 * \frac{(H - H_{ref})}{288,15} \right)^{5,25588}$$

Numerical values have been calculated and rounded from formulae and values of different parameters described in Doc *Manual of the ICAO Standard Atmosphere (extended to 80 kilometres (262 500 feet))* (Doc 7488).

Weiteres zur QFE/QNH-Eichung

Die Hauptfrage bei jeder Eichung ist die Frage nach der Lage des Eichpunktes. Prinzipiell läßt sich der Eichpunkt d.h. der Punkt wo man (h_0, p_0, T_0) mißt und sich darauf dann bezieht, beliebig hinlegen also z.B. bei oder nahe bei $h=0$.

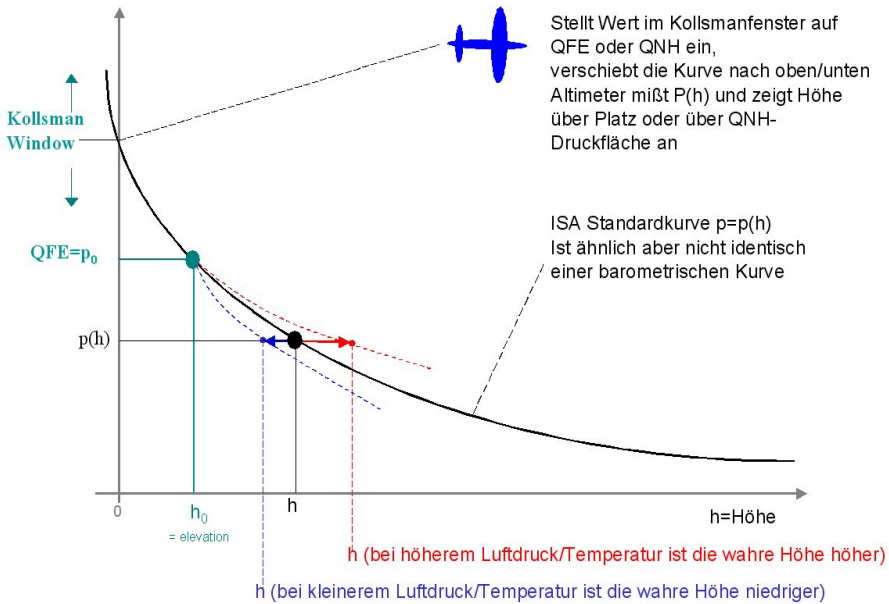
Folgende Auswahl wurde getroffen:

- ▶ Der Eichpunkt liegt sowohl beim QFE als auch beim QNH immer am Eichort also in der Regel auf dem Flugplatz in Flugplatzhöhe.
- ▶ Die Eichtemperatur des Luftdrucks ist nicht etwa die ISA-Temperatur sondern die tatsächliche Temperatur am Eichort auf dem Flugplatz.
- ▶ Damit ist bei der Landung garantiert, daß bei aktuellem QFE exakt null und bei aktuellem QNH exakt die Platzhöhe angezeigt wird.

Was die Eichung auf ISA-Standard angeht darf folgendes ausgesagt werden. Der Höhenmesser ist bezogen auf seine

Zusammenfassung Altimeter-Eichung:

1. (Eichung der Steigung „ $k_0(p)$ “) Der Altimeter ist vom Hersteller auf die

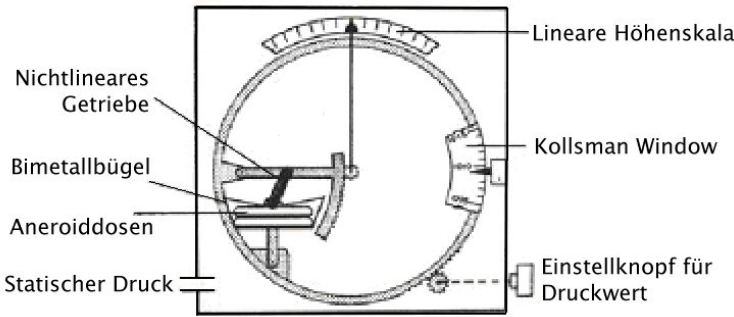


Anzeige bereits vom Hersteller aus auf ISA-Standard geeicht. Das bedeutet, daß seine Anzeigeänderung pro Druckänderung (wieviel der Zeiger steigt pro Druckabnahme in Abhängigkeit der Höhe), also die negative Steigung der ISA-Kurve gehorcht, zumindest bis auf Meßfehler.

Das einzige was man als Pilot macht, ist die Einstellung des Koordinatensystems so, daß der Höhenmesser entweder am Boden 0 anzeigt (QFE-Synchronisation) oder am Boden die Elevation anzeigt (QNH-Synchronisation). Hier nochmal, weil es so wichtig ist: der Eichpunkt wird bei beiden Einstellungen nicht verschoben, es ist in beiden Fällen der Flugplatz und der eigentliche Eichwert ist immer das QFE!

ISA-Standardatmosphäre geeicht, die eine ganz bestimmte Änderung des Luftdrucks mit der Höhe definiert. Das bedeutet, daß die Zeiger des Altimeters für jeden Druckwert im Anzeigebereich bei einer Druckänderung eine Höhenzu- oder -abnahme entsprechend der Änderung der ISA-Standardkurve anzeigen. Diese Eichung steckt im nichtlinearen Getriebe des Altimeters und läßt sich nicht ändern. Das Anzeigeverhalten des Altimeters ist vollkommen unabhängig von der aktuellen Temperatur, es kennt nur Druckänderungen.

2. (Eichung beim aktuellen Luftdruck) Bei beiden, der QFE- und der QNH-Einstellung dient immer der aktuelle Luftdruck bei der aktuellen Temperatur und Luftdichte am



Folge hat, daß man bei der Elevationseinstellung (X;elevation) einen höheren Luftdruck X als Einstellgröße eingeben muß, das sogenannte QNH, welcher bis auf einen

Flugplatz als Referenz. Dieser Eichwert ist zum Meßzeitpunkt unveränderbar vorgegeben.

3. (Synchronisation am Boden) Die Einstellung ist wie beim Directional Gyro eine Synchronisation. Einmal kann man den Anzeigewert bei Flugplatzhöhe auf den Höhenwert Null stellen. Dies sagt dem nichtlinearen Getriebe nur, daß zum aktuellen Druckwert P_0 des Flugplatzes die Höhe 0 in der Anzeige gehört ($P_0;0$). Sinnvoll ist noch die Einstellung (P_0 ;Elevation), da man hiermit eine absolute Höhe als Anzeigewert hat.
4. (Synchronisation in der Luft) Das Kollsman Window ist nichts anderes als die Umkehrfunktion, anstatt einer Höhe kann man den Luftdruck zur

Temperaturfehler mit dem Luftdruck auf Meereshöhe korreliert. Ich denke, daß genau deswegen man zu der falschen Vermutung kommen kann, hier würde ein anderer Referenzpunkt für die Eichung genommen. Man muß folgendes verstehen: Bei der QNH-Einstellung ist die Getriebekopplung im Höhenmesser gleich (Platzdruck; Elevation), die Kollsmankopplung aber (QNH, elevation)!, man hat die Kollsmannanzeige damals auf den ISA-Luftdruck bei Meereshöhe normiert.

5. Der Altimeter zeigt die Höhe nur dann korrekt als wahre Höhe an, wenn die tatsächliche Atmosphäre bezüglich ihres Druckgradienten (Druckänderung pro Höhenänderung) gleich der

		QFE-Synchronisation		QNH-Synchronisation		Andere-Synchronisation	
Wahre Höhe	Wahrer Luftdruck	Kollsman Window	angezeigte Höhe	Kollsman Window	angezeigte Höhe	Kollsman Window	angezeigte Höhe
0	$p(0)$		ca. (- elev.)		ca. 0		0
Elevation	p_0	p_0	0	QNH	Elevation	p_0	Elevation
h	$p(h)$		Höhe ü. Platz		ISA-Höhe		ISA-Höhe

Einstellung verwenden. Auch hierbei hat man die gleiche Freiheit der Kopplung. Man könnte z.B. (P_0 ;Elevation) miteinander koppeln, so daß in einem Fenster bei der Elevation der Luftdruck des Platzes erscheinen würde. Man hat sich aber für die Kopplung ($P_0;0$) entschieden, was zur

ISA-Standardatmosphäre ist. Dies ist im allgemeinen nicht der Fall. Bei anderen Temperaturgradienten – die tatsächliche Atmosphäre kann sich wetterbedingt in verschiedenen Schichten vollkommen anders verhalten (trockenadiabatische Schichten, feuchtadiabatische

Schichten, Inversionen usw.) – stimmen die bei ISA normierten Steigungsgradienten nicht mehr.

Pressure Altitude oder Standarddruckhöhe (auch QNE-Höhe)

Bei größeren Höhen verwendet man die Eichung auf 1013,25 hPa und erhält die sogenannte Standarddruckhöhe oder pressure altitude. Eichungsseitig kann man sich das so vorstellen, daß die Höhe über einem virtuellen Flugplatz mit ($p=1013,25$, $h=0$) angezeigt wird (Höhe über dem Drucklevel 1013).

Temperaturkorrektur der barometrischen Höhenformel

Machen wir zunächst wieder einen Ausflug zur barometrischen Höhenformel.

Für selbige gilt folgende Formel für die Temperaturkorrektur nach dem Gay-Lussac'schen Gesetz:

$$h - h_0 \equiv \frac{p_0}{g * \rho_0} * (1 + \alpha(T - T_0)) * \ln\left(\frac{p_0}{p}\right)$$

$$\equiv \frac{1}{k_0} * (1 + \alpha(T - T_0)) * \ln\left(\frac{p_0}{p}\right)$$

α ist dabei der Ausdehnungskoeffizient der Luft, nämlich 0,00367/grad. Etwas einfacher ausgedrückt heißt es, daß man pro Grad Abweichung von einer Eichtemperatur 0,367% korrigieren muß. Das Ganze ist eine Gleichung mit zwei Meßwerten (p, T) und vier Eichgrößen (h_0, p_0, ρ_0, T_0). Wir können die Luftdichte ρ_0 durch die Temperatur T_0 über die allgemeine Zustandsgleichung der Gase ersetzen.

$$\rho_0 = \frac{p_0}{R * T_0}$$

Damit kommen wir zur barometrischen Höhenformel mit Temperaturkorrektur als Gleichung mit nur zwei Meßwerten (p, T) und drei Eichgrößen (h_0, p_0, T_0), aus der wir das gesuchte h exakt berechnen können.

$$h - h_0 \equiv \frac{R}{g} * T_0 * (1 + \alpha(T - T_0)) * \ln\left(\frac{p_0}{p}\right)$$

Aus beiden Formel können wir erkennen, daß die Temperaturkorrektur eine Korrektur ist, die nur vom Eichpunkt aus in beide Richtungen d.h. nach oben oder nach unten wirkt. Das ist klar, denn der Term vor dem Logarithmus ist ja die Wachstumsrate der Kurve. T_0 ist ja die tatsächlich gemessene Temperatur am Eichpunkt (Flugplatz) und T selbige am Meßpunkt (Flugzeug). Auf dem Flugplatz ist $T=T_0$ und damit entfällt hier die Temperaturkorrektur.

True Altitude oder wahre Höhe

Wir haben bereits festgestellt, daß ein Altimeter nach der ISA-Standardatmosphäre geeicht ist. Bei ISA nimmt die Temperatur mit 2°C pro 1000ft (0,65°C pro 100m) ab und der Höhenmesser verwendet dies bei den Druckabfallwerten für seine Anzeige. Falls die Temperaturbedingungen nicht mit ISA übereinstimmen macht der Höhenmesser einen Temperaturfehler, der proportional zur Temperaturdifferenz zwischen der tatsächlichen Temperatur und der Eichtemperatur T_{ISA} ist. Wir brauchen also eine Temperaturkorrektur um die wahre Höhe aus dem Druckunterschied bzw. aus der angezeigten QNH-Höhe zu berechnen. Zunächst gilt es festzuhalten, daß wie bei der Temperaturkorrektur der

barometrischen Höhenformel, daß am Eichort h_0 keine Korrektur erfolgen darf, wir haben ja hier bereits die korrekte Höhe, nämlich die Elevation.

Für die Korrektur selbst gilt wie oben ein Korrekturterm mit dem Ausdehnungskoeffizienten der Luft. Es gilt

$$h \equiv Alt_{QNH} \equiv h_0 + \frac{1}{k_0} \ln\left(\frac{p_0}{p}\right)$$

und mit Ergänzung des Korrekturterms

$$\begin{aligned} Alt_{true} &\equiv h_0 + (1 + \alpha(T - T_{ISA})) \frac{1}{k_0} \ln\left(\frac{p_0}{p}\right) \\ &\equiv h_0 + \frac{1}{k_0} \ln\left(\frac{p_0}{p}\right) + \alpha(T - T_{ISA}) \frac{1}{k_0} \ln\left(\frac{p_0}{p}\right) \end{aligned}$$

Der ersten beiden Glieder sind wiederum Alt_{QNH} und wenn wir im letzten Glied durch $(h-h_0)$ ersetzen folgt:

$$\begin{aligned} Alt_{true} &\equiv Alt_{QNH} + \alpha(T - T_{ISA}) \frac{1}{k_0} \ln\left(\frac{p_0}{p}\right) \\ &\equiv Alt_{QNH} + \alpha(T - T_{ISA})(h - h_0) \end{aligned}$$

Also gilt als Umrechnungsformel QNH in wahre Höhe mit aufgerundet $\alpha=0,4\%$

$$\begin{aligned} Alt_{true} &\equiv Alt_{QNH} + 0,004(T - T_{ISA}) \\ &\quad * (Alt_{QNH} - elevation) \end{aligned}$$

Man sieht, daß sich der Korrekturterm durch den letzten Term auch dann in Platzhöhe zusammenfaltet, wenn die Temperatur an Platz ungleich T_{isa} ist, so wie es sein muß.

Wenn Alt_{QNH} sehr viel größer ist als die Elevation und letztere nahe bei 0 ist, also z.B. beim Flight Level, kann man folgende Näherung verwenden (elevation = 0):

$$\begin{aligned} Alt_{true} &\cong Alt_{QNH} (1 + 0,004(T - T_{ISA})) \\ &\text{falls } Alt_{QNH} \gg \text{Elevation, nahe bei MSL} \end{aligned}$$

Ein Hinweis zur Genauigkeit: Die so errechnete wahre Höhe ist im allgemeinen

ungleich der tatsächlichen wahren Höhe, da die Korrektur wie ISA einen idealisierten Verlauf des Temperaturgradienten voraussetzt und in sofern ist die berechnete wahre Höhe nichts weiter als ein akademisches Vexierspiel für angehende Piloten. Die tatsächliche wahre Höhe läßt sich nicht berechnen, sondern nur physikalisch messen.

Höhe über MSL oder Elevation

Die Höhe eines Flugplatzes oder etwa eines geographischen Objekts wie eines Berggipfels, einer Bergkuppe, eines Turmes oder Ähnlichem ist die Höhe über dem Meeresspiegel oder die sogenannte Elevation.

Density Altitude oder Dichtehöhe

Die Density Altitude ist keine Flughöhe sondern ein Äquivalenzwert. Sie entspricht der äquivalenten Höhe, in der die Standardatmosphäre den zur gemessenen Temperatur entsprechenden Luftdichtewert hat. Startet man also auf einem Platz mit einer Elevation von 2000 ft bei einer Dichtehöhe von sagen wir einmal 5000 ft, so entspricht das einem Start von einem Platz mit einer Elevation 5000ft unter Standardbedingungen.

QFF-Eichung

Die QFF-Eichung wird ausschließlich von Meteorologen z.B. für Bodenwetterkarten verwendet. Sie verwendet einen Eichpunkt auf Meereshöhe (0 MSL) und die aktuelle Temperatur auf MSL. QNH läßt sich näherungsweise nach QFF umrechnen (siehe Formeln). QFF und QNH unterscheiden sich nur gering.

Darüberhinaus ist das Wissen um QFF ist für Piloten vollkommen überflüssig.

Barometrische Höhenstufe

Die Änderung der Kurvenwerte der ISA-Kurve (reziproke Steigung bzw. Reziprokwert der Ableitung) bei $h=0$ heißt barometrische Höhenstufe und beträgt ca. 27ft/hPa oder 8m/hPa, bei $h=5,5\text{km}$ (Halbwertspunkt) ist der Wert doppelt so hoch (54ft/hPa).

Transition Altitude, Transition Level und Transition Layer

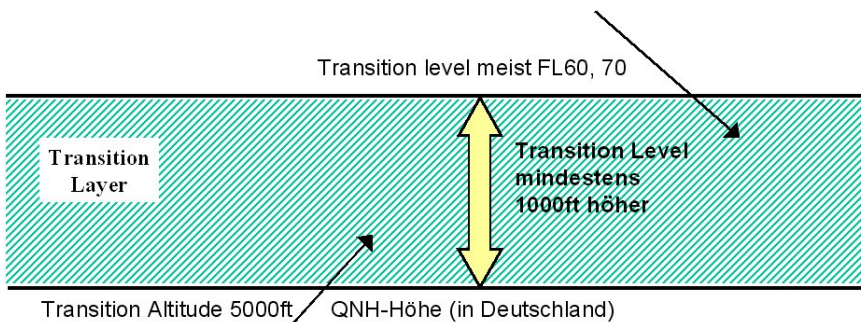
Da gemäß Luftrechtsvorgaben in großen Höhen nach Pressure Altitude und im darunter liegenden Höhenband nach Altitude geflogen wird, ist eine einheitliche Definition für den Übergang zwingend erforderlich. Sie ist wie folgt:

Im Steigflug: Bei der sogenannten Transition Altitude erfolgt das Umschalten von QNH-Höhe (Altitude) auf Pressure Altitude und danach erfolgen alle Höhenangaben in Flight Level (FLxxx). Die

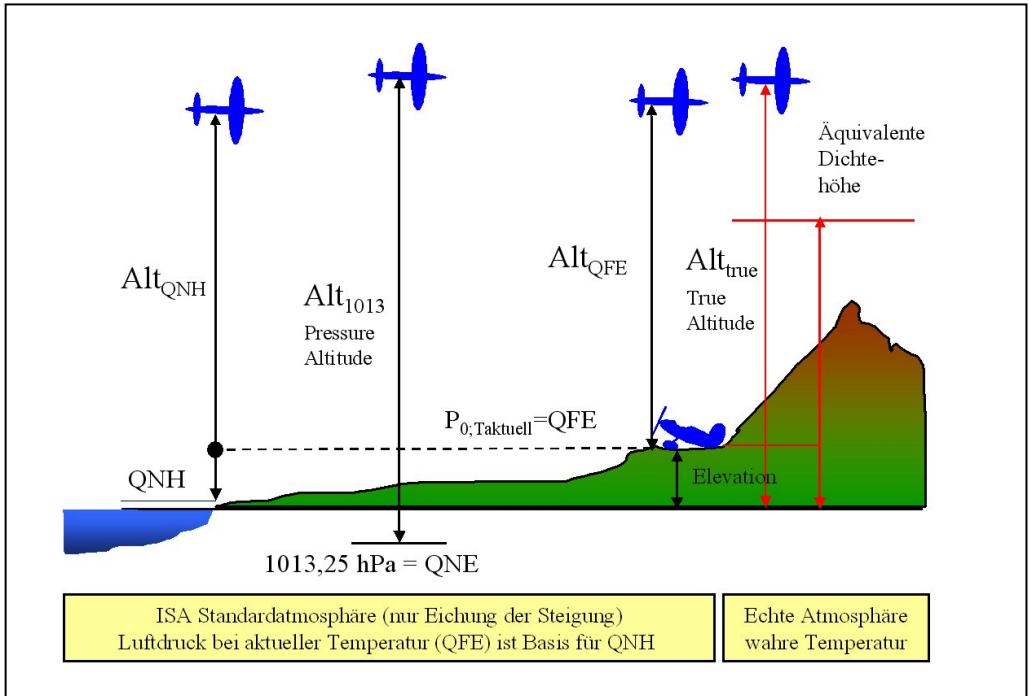
Transition Altitude ist vom Flugplatz abhängig, sie steht bekanntlich auf der jeweiligen SID Karte. In Deutschland liegt die Transition Altitude einheitlich bei 5.000 ft.

Im Sinkflug: Beim sogenannten Transition Level (TL) erfolgt das Umschalten von Pressure Altitude auf QNH-Höhe (Altitude) und danach erfolgen alle Höhenangaben als Altitude. Der Transition Level ist so definiert, daß er mindestens 1000 ft höher als die Pressure Altitude der Transition Altitude sein muß. Hieraus folgt, daß man im unwahrscheinlichen Fall von $QNH < 975$ hPa ein TL von 80 sieht, ein QNH zwischen 976 und 1013 ergibt TL 70, $QNH > 1013$ bis 1050 ergibt TL 60. TL 50 ist wiederum nahezu unmöglich ($QNH > 1050$), siehe auch die Abbildung.

In beiden Fällen d.h. im Steig- und Sinkflug zwischen Transition Altitude und Transition Level befindet man sich bekanntlich im sogenannten Transition Layer.



QNH	ALT _{QNH}	ALT ₁₀₁₃	Trans. Level
975	5000	6026	80
976	5000	5999	70
1013	5000	5000	60
1051	5000	3974	50



Formelsammlung für Altitudeberechnungen

Barometrische Höhenstufe auf MSL mit 27ft pro hPa festgelegt.

Density Altitude berechnet aus Pressure Altitude

$$\text{Density Altitude} = Alt_{1013} + 120 * (T - T_{isa})$$

Pressure Altitude ↔ QNH-Altitude

$$Alt_{QNH} \equiv Alt_{1013} + (QNH - 1013) * 27$$

$$Alt_{1013} \equiv Alt_{QNH} - (QNH - 1013) * 27$$

True Altitude berechnet aus QNH-Altitude

$$Alt_{true} \equiv Alt_{QNH} + 0,004 * (T - T_{ISA}) * (Alt_{QNH} - elevation)$$

$$Alt_{true} \cong Alt_{QNH} * (1 + 0,004 * (T - T_{ISA})) \quad \text{falls } Alt_{QNH} \gg \text{Elevation (Näherung)}$$

QFF Eichwert berechnet aus QNH Eichwert (keine Höhenberechnung!)

QFF = QNH - 0,1 * (T - T_{isa}) falls elevation >= MSL in hPa (Näherung)

QFF = QNH + 0,1 * (T - T_{isa}) falls elevation < MSL in hPa (Näherung)

GPS- und Radio-Altitude

In diesem Artikel sind bewußt nur die barometrischen Altitudes behandelt, es gibt natürlich noch die GPS-Höhe und die Höhe des Radioaltimeters, doch das ist ein anderes Thema.

Fazit

Ich denke meine kurze Zusammenfassung des Themas P's und A's zeigt, daß es so trivial nicht ist, sowohl in der Theorie als auch in der Praxis. Eine ganze Reihe von typischen CFIT Unfällen resultierten aus vergessenen oder falschen QNH-Umstellungen. Es ist klar, was ein Mensch manuell einstellen muß, muß zwangsläufig nach Murphy irgendwann zu Fehlern führen. Da liegt natürlich die Frage nahe, warum man diesen Part nicht auch automatisiert. Sobald in Flugzeugen eine Ground-to-Air Datalink standardmäßig etabliert ist, sollte dies eigentlich technisch machbar sein. Die Information QNH/Transition Altitude/Transition Level kann elektronisch zum Bordcomputer übertragen werden, der die jeweilige Ein- oder Umstellung am Boden und in der Luft automatisch vornimmt. Der Pilot erhält nur jeweils die aktualisierte Anzeige und ggf. eine Warnung, falls die Automatik einmal versagt haben sollte. Einzig und allein in einem solchen Fall wäre dann die Einstellung noch manuell zu erledigen.

Aber insgesamt scheint das kein vorrangiges Thema zu sein. Man nehme z.B. das vielgepriesene Garmin G1000, dort darf man über den Baro Knob wie bisher das QNH respektive altimeter setting manuell einstellen, wiederholen darf man das beim KAP140 (entfällt beim neuen Garmin GFC700 Autopiloten) und

drittens darf man das Ganze beim Backup-Altimeter aus dem Dreierpack nochmal einstellen. Dabei könnte man das sehr einfach auch ohne Datalink zumindest beim Startup automatisieren. Dort ermittelt das Garmin sowieso die Position per GPS, hat daraufhin die Daten des aktuellen Flughafens und folglich die definierte Höhe H_{ref} desselben. Gleichzeitig ist im Flugzeug durch den elektronischen Drucksensor der aktuelle Luftdruck QFE bekannt. Damit kann man über die schon genannten Formeln das QNH präzise im GDC ausrechnen und automatisch einstellen.

Ich weiß zwar, daß nicht jeder Pilot dieser Meinung ist, aber ich denke, daß jede noch so kleine Einstellarbeit, die zuverlässig automatisiert durch einen Computer erledigt wird, die Sicherheit erhöht und ja, zugegeben, ein Stück Faulheit ist auch dabei.

Noch ein Hinweis zum Einstellen des QNHs am Boden: Man nimmt aus meiner Sicht besser die korrekte, offizielle Platzhöhe als Einstellgröße für den Höhenmesser, es ist die präzisere Einstellmethode. Gibt es dann einen Unterschied vom genannten QNH zum angezeigten Wert im Kollsman Window, dann liegt der Fehler meist in den Getrieben des Höhenmessers an Bord, erlaubt sind maximal 60 ft Abweichung oder ca..2 hPa.

Aber vielleicht ist das ja alles bald das schlechte Wetter von gestern, wenn man zukünftig mit einem weiterentwickelten DGPS/WAAS und Galileo die hinreichende Präzision für die Höhenmessung und die vertikale Navigation erreichen kann.

Klaus.L.Schulte@klspublishing.de

Was ist ein e-Journ?

Ein e-Journ ist ähnlich wie ein e-Book eine elektronische Publikation, nur dass es sich dabei wegen der geringeren Größe (minimal 2, maximal 30 Seiten) nicht um vollständige Bücher handelt, sondern um einzelne Bausteine ähnlich einem Kapitel in einem Buch oder einem journalistischen Beitrag in einer Zeitschrift.

K.L.S. Publishing e-Journs sind allesamt als Fachartikel für Luftfahrtmagazine oder als abgeschlossene Kapitel für Luftfahrtbücher entstanden.

K.L.S. Publishing bietet e-Journs als Einzelwerke zum Kauf an. So hat jeder Leser die Möglichkeit, einzelne Bausteine oder einzelne Artikel jeweils frei nach Interesse selbst zusammenzustellen. Hiermit kann der Leser flexibel eine eigene Wissensbibliothek aufbauen. Die Preise der E-Journs werden auf der Basis eines geringen Seitenpreises errechnet und sind damit kostengünstig im Vergleich zu Büchern.

K.L.S. Publishing, Köln

<http://klspublishing.de/>