

Druck-/ Höhenbegriffe

Pascal Frèrebeau

29.04.2014

1 Grundlagen

1.1 Dichte

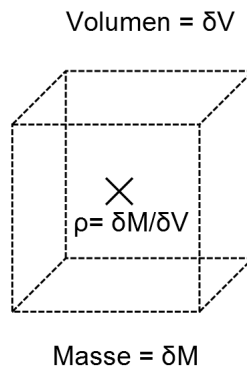
Die Dichte eines Körpers (ρ) ist seine Masse (M) geteilt durch sein Volumen (V):

$$\rho = \frac{M}{V}$$

In einem Medium (zum Beispiel die Atmosphäre der Erde) wird die Dichte üblicherweise als kontinuierliche Funktion in jedem Punkt definiert. Um einen beliebigen Punkt kann man sich ein elementares Volumen δV vorstellen (z.B. ein „Luftteilchen“). Dieses Volumen enthält die Masse δM . In diesem Punkt beträgt die Dichte:

$$\rho = \frac{\delta M}{\delta V}$$

Die Einheit der Dichte im SI-Einheitensystem ist $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.



1.2 Druck

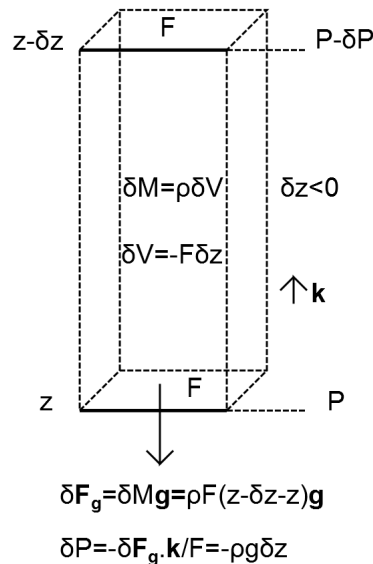
Der Druck (P) ist der Widerstand, den ein Medium auf jeden Körper ausübt, mit dem es in Berührung steht. Er ist eine Kraft pro Flächeneinheit. In der Erdatmosphäre entsteht der Druck durch die

Gewichtskraft der Luftsäule über dem betrachteten Punkt. Er hängt deshalb hauptsächlich von der Höhe ab. Die Variation des Druckes zwischen zwei naheliegenden Niveaus z und $z + \delta z$ lautet:

$$\delta P = -\rho g \delta z$$

wobei g die Erdbeschleunigung ist ($g = 9.81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$). Das Minuszeichen ist vorhanden, weil Druck und Höhe in umgekehrter Richtung variieren.

Die Einheit des Druckes im SI-Einheitensystem ist Pa. Meistens wird stattdessen hPa verwendet. Folgendes Bild verdeutlicht die Druckzunahme mit der Tiefe. F ist dabei die obere und untere Fläche an der Grenze des Volumens δV . P ist der Druck im Niveau z und $P - \delta P$ ist der Druck im Niveau $z - \delta z$ (mit $\delta z < 0$ weil die geometrische Höhe positiv nach oben ist). δM ist die Masse des Volumens δV , ρ ist seine Dichte (als konstant innerhalb des Volumens angenommen). $\delta \mathbf{F}_g$ ist die Gewichtskraft (Vektor), die δV auf einen Körper unter sich ausübt. \mathbf{g} ist der Vektor der Erdbeschleunigung. \mathbf{k} ist der vertikale Einheitsvektor nach oben.



1.3 Normatmosphäre (International Standard Atmosphere, ISA)

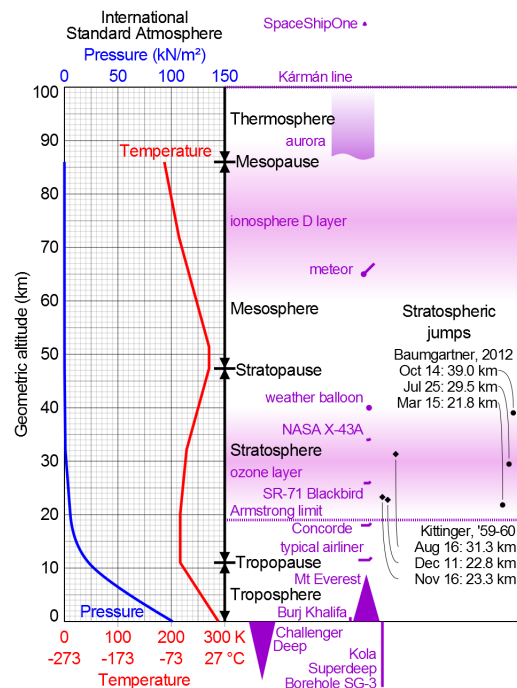
Die Normatmosphäre ist eine idealisierte Darstellung der Erdatmosphäre. In dieser Atmosphäre nehmen die Parameter Druck, Temperatur, Dichte und Viskosität Werte an, die ungefähr ihren Mittelwerten in der Atmosphäre der Erde entsprechen. In der Praxis besteht dieses Modell aus tabellierten Werten in verschiedenen Niveaus der Atmosphäre sowie aus den Formeln, die zur Ableitung dieser Werte verwendet werden. Die Temperatur ändert sich linear innerhalb einer Schicht. Folgende Tabelle fasst die wichtigsten Eigenschaften der Normatmosphäre zusammen:

Schicht	Name	Höhe (km)	dT (°C)	T (°C)	P (Pa)
0	Troposphäre	0.0	-6.5	+15.0	101325
1	Tropopause	11.019	+0.0	-56.5	22632
2	Stratosphäre	20.063	+1.0	-56.5	5474.9
3	Stratosphäre	32.162	+2.8	-44.5	868.02
4	Stratopause	47.350	+0.0	-2.5	110.91
5	Mesosphäre	51.413	-2.8	-2.5	66.939
6	Mesosphäre	71.802	-2.0	-58.5	3.9564
7	Mesopause	86.000	+0.0	-86.28	0.3734

Die Formeln für die Temperatur als Funktion von der Höhe ergeben sich aus der angenommenen Linearität. Zum Beispiel für die 0. Schicht (Troposphäre):

$$T (°C) = 15°C - \frac{6.5°C}{1000 \text{ m}} * \text{Höhe}(m)$$

Folgendes Bild zeigt die Abhängigkeit der Temperatur und des Drucks in einer Normatmosphäre und gibt die Höhe von manchen Objekten in der Atmosphäre sowie von durchgeführten Sprüngen aus der Stratosphäre an.



1.4 Der Fuß als Längeneinheit

Höhen werden in der Luftfahrt oft in Fuß angegeben. Der internationale Fuß ist so definiert, dass er gleich 0,3048 m ist.

1.5 Ideales Gas

Das Ideale Gas ist eine idealisierte Darstellung der Gase. In diesem Modell wird angenommen, dass die Gasteilchen (die als ausdehnungslose Massepunkte betrachtet werden) nur durch Stöße wechselwirken.

Die Teilchen verspüren keine Kräfte, sondern sie bewegen sich geradlinig mit einer konstanten Geschwindigkeit, bis ein Stoß mit einem anderen Teilchen oder mit der Wand sie in eine andere Richtung lenkt sowie ihre Geschwindigkeit ändert.

Bei idealen Gasen gilt insbesondere die allgemeine Gasgleichung:

$$PV = nRT$$

wobei n die Anzahl der Mole (Mengeneinheit) und R die universelle Gaskonstante ($8.3144621 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\text{K}^{-1}$) sind.

Alle Gase tendieren zum idealen Gas bei hinreichend niedrigem Druck. Dieses Modell ist sinnvoll für die ganze Erdatmosphäre.

2 Höhenbegriffe

2.1 Dichtehöhe (density altitude)

Die Dichtehöhe ist die Höhe über dem Meeresspiegel, wo die Dichte in einer Normatmosphäre gleich ihrem gemessenen Wert am Beobachtungsort wäre. Aus der Definition der Dichte folgt, dass eine bestimmte Menge Luft umso weniger Raum nimmt, je dichter sie ist. $PV = nRT$ bedeutet: je kälter eine Luftmasse ist, desto dichter ist sie. Auch gilt: je trockener eine Luftmasse ist, desto dichter ist sie. Als Konsequenz davon steigt die Dichtehöhe (bei gleicher geographischer Höhe) mit der Temperatur und der Feuchte der Atmosphäre.

Die Flugeigenschaften (aerodynamische Leistung, Reibungen...) hängen von der Dichte ab. Folgendermaßen wird die Dichtehöhe in der Luftfahrt als Leistungshöhe verwendet (das ist die „vom Flugzeug empfundene“ Höhe) aber nicht um die Position des Flugzeugs zu bestimmen. Je höher die Dichtehöhe, desto geringer der Auftrieb (eine höhere Geschwindigkeit ist beim Start notwendig), desto geringer die Reibung. Bei hoher Dichtehöhe wird ein Flugzeug langsamer aufsteigen. Insbesondere für die Pistenlänge beim Start des Flugzeugs (und bei der Landung) ist die Angabe der Dichtehöhe wichtig: je größer die Dichtehöhe, desto länger ist die Startstrecke (auch wegen geringerer Beschleunigung, geringerer Propulsion durch reduzierte Effektivität des Propellers). An hoch gelegenen Flughäfen sind (insbesondere an wärmeren Tagen) Start und Landung teilweise nur am Morgen und am späten Abend möglich.

Die Dichtehöhe für trockene Luft berechnet sich aus:

$$h_d = \frac{T_{\text{SL}}}{\gamma} \left[1 - \left(\frac{P}{P_{\text{SL}}} \right)^{\frac{\Gamma R}{gM' - \Gamma R}} \right]$$

wobei h_d die Dichtehöhe (in Fuß), P der Druck am Beobachtungsort (in hPa), P_{SL} der mittlere Bodendruck am Meeresspiegel (in hPa), T die Temperatur am Beobachtungsort (in K), T_{SL} die Bodentemperatur am Meeresspiegel in der Normatmosphäre (in K), γ das Temperaturgefälle (in $\text{K}\cdot\text{ft}^{-1}$), Γ das Temperaturgefälle (in $\text{K}\cdot\text{m}^{-1}$), R die Gaskonstante ($8.3144621 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\text{K}^{-1}$), g die Erdbeschleunigung ($9.80665 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$) und M' die Molmasse der trockenen Luft ($0.0289644 \text{ kg}\cdot\text{mol}^{-1}$) sind.

Eine einfache Beziehung zwischen Dichtehöhe und Druckhöhe lautet:

$$h_d = h_p + 118.8 \left(T' - 15 + \frac{1.98}{1000} h_p \right)$$

wobei h_d die Dichtehöhe (in Fuß), h_p die Druckhöhe (in Fuß) und T' die Temperatur (in °C) sind.

2.2 Druckhöhe (pressure altitude)

Die Druckhöhe ist die Höhe über dem Meeresspiegel, wo der Druck in einer Normatmosphäre gleich seinem gemessenen Wert am Beobachtungsort wäre. In der hohen Atmosphäre wird aus praktischen Gründen der Druck als Höhenmessung verwendet, um die Position des Flugzeugs zu bestimmen. Dagegen ist ihre Verwendung in den unteren Schichten gefährlich: der Druck ist von der Wettersituation abhängig und die Bodennähe wird von der Druckhöhe nicht gut wiedergegeben. In den oberen Schichten ist die Kenntnis der richtigen Höhe aber nicht notwendig, insofern alle Flugzeuge dieselbe Referenz verwenden (alle Flugzeuge in einem Bereich mit derselben angezeigten Druckhöhe fliegen auch mit derselben richtigen Höhe). Das Altimeter dient zur Messung der Druckhöhe. Wenn er auf den Druckwert 1013.25 hPa (oder 960 mmHg oder 29.92 In Hg) festgelegt ist, gibt er die Druckhöhe an. Der Wert der Druckhöhe in Hectofeet entspricht dem Flugniveau („Flight Level“, „FL“).

In einer Normatmosphäre sind die Dichtehöhe und die Druckhöhe gleich der richtigen Höhe.

Die theoretische Beziehung zwischen dem Druck und der Druckhöhe sei hier zur Information auch angegeben (Exkurs). Bei der Verwendung des Drucks in einem Niveau z der Atmosphäre muss berücksichtigt werden, dass die Dichte nicht konstant ist, sondern mit der Höhe abnimmt. Deshalb wird die Atmosphäre in viele dünne Schichten zerlegt, wo die Dichte näherungsweise als konstant betrachtet werden kann und in jeder dieser Schichten wird $\delta P = -\rho g \delta z$ verwendet. Das heißt:

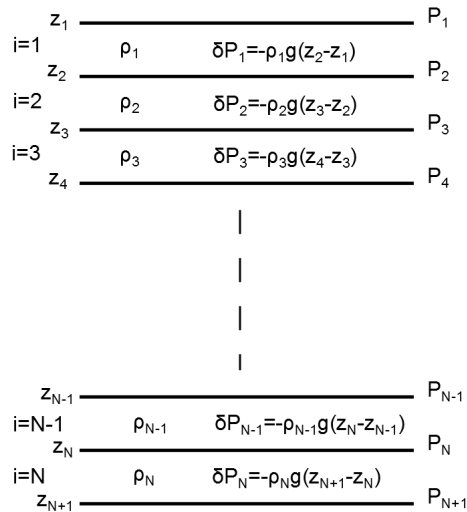
$$P(z) = \sum_{i=1}^N -\rho_i g (z_{i+1} - z_i)$$

wobei N die Anzahl der Schichten vom „oberen Rand der Atmosphäre“ bis zur Höhe z , ρ_i die Dichte der i . Schicht, z_i und z_{i+1} jeweils die Höhe des i . und des $(i+1)$. Niveaus sind. Für extrem dünne Schichten geht die Summe in Integral über:

$$P(z) = - \int_{z_{\text{top}}}^z \rho(z) g dz$$

wobei z_{top} die Höhe des „oberen Rands der Atmosphäre“ ist. In einer Normatmosphäre werde die Dichte als Funktion von der Höhe $\rho_{\text{ISA}}(z)$ geschrieben. Der Druck in der Druckhöhe h_p berechnet sich aus:

$$P(h_p) = - \int_{z_{\text{top}}}^{h_p} \rho_{\text{ISA}}(z) g dz$$



2.3 Q-Schlüssel (Q code)

Der Q-Schlüssel ist ein Ensemble von kodierten Aussagen, die alle drei Buchstaben enthalten und immer mit Q beginnen („Qxx“). Die drei Buchstaben können ein Fragezeichen, eine Information oder nichts nach sich ziehen (im ersten Fall wird eine Frage gestellt, im zweiten und dritten Fall wird geantwortet). Ursprünglich wurde der Q-Schlüssel für die Morsetelegrafie entwickelt, er wird heute noch von Funkdiensten verwendet. Insbesondere in der Luftfahrt ist er noch von Bedeutung. In der Flugmeteorologie sind insbesondere folgende Schlüssel relevant:

2.3.1 QNE

QNE ist der mittlere Luftdruck auf Meeresniveau. Das ist eine Konstante. $QNE = 1013.25 \text{ hPa}$.

Wenn das Altimeter eines Flugzeugs auf den QNE festgelegt ist, gibt er die Druckhöhe an. Diese Höhe ist die beste Angabe für die Höhenseparation zwischen Flugzeugen.

2.3.2 QNH

QNH bezieht sich auf den Bodendruck auf Meeresniveau reduziert, wobei bei der Druckkorrektur angenommen wird, dass zwischen der Höhe des Flughafens und dem Meeresniveau eine Normatmosphäre vorhanden ist. Zur Bestimmung des QNH misst der Meteorologe zuerst den Bodendruck. Auf einer Tabelle der Normatmosphäre liest er dann, welcher Druckhöhe dieser Druck entspricht. Er zieht diesem Wert die richtige Höhe des Flughafens ab. Schließlich liest er auf der Tabelle, welchem Druck die berechnete Höhendifferenz entspricht. Das Ergebnis ist QNH. Als Frage bedeutet QNH: „Was ist der Bodendruck auf Meeresniveau reduziert am Flughafen?“. Als Antwort bedeutet QNH: „Der Bodendruck auf Meeresniveau reduziert am Flughafen beträgt...“.

Wenn das Altimeter eines Flugzeugs auf den QNH festgelegt ist, gibt er die korrigierte Druckhöhe („QNH-Höhe“) an. Da nicht der mittlere, sondern der aktuelle Luftdruck auf Meeresniveau verwendet wird, ist die Höhenangabe genauer. Eine Höhenseparation ist nur unter Flugzeugen mit gleicher

QNH-Einstellung möglich. Aber die QNH-Höhe eignet sich am besten zum Vergleich mit der auf der Navigationskarte angegebenen Geländehöhe. Eine einfache Näherung zur Berechnung der Druckhöhe (in Fuß) aus der QNH-Höhe (in Fuß) lautet: $h_p = \text{QNH-Höhe} + 28 (\text{QNE} - \text{QNH})$.

2.3.3 QFF

QFF bezieht sich ebenfalls auf den Bodendruck auf Meeresebene reduziert, wobei bei der Druckkorrektur diesmal angenommen wird, dass zwischen der Höhe des Flughafens und dem Meeresebene die Eigenschaften der Atmosphäre (insbesondere die Temperatur) denen entsprechen, die am Flughafen gemessen werden. Somit ist QFF genauer als QNH. Als Frage bedeutet QFF: „Was ist der Bodendruck auf Meeresebene reduziert am Flughafen?“. Als Antwort bedeutet QFF: „Der Bodendruck auf Meeresebene reduziert am Flughafen beträgt...“.

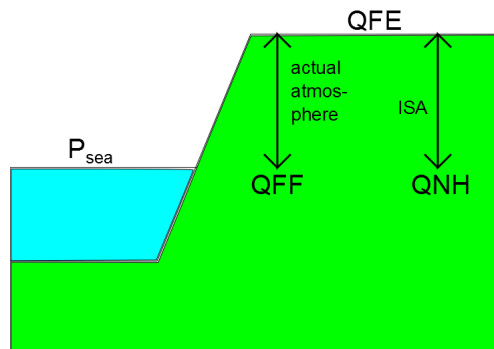
In der Luftfahrt wird der QFF nicht verwendet. Wenn jedoch das Altimeter eines Flugzeugs auf den QFF festgelegt ist, gibt er ebenfalls eine korrigierte Druckhöhe an. Der QFF ist die Druckangabe, die auf den meteorologischen Boden-Wetterkarten zu finden ist.

2.3.4 QFE

QFE bezieht sich auf den Bodendruck. Als Frage bedeutet das: „Was ist der Bodendruck am Flughafen?“ und als Antwort: „Der Bodendruck am Flughafen beträgt...“.

Wenn das Altimeter eines Flugzeugs auf den QFE festgelegt ist, gibt er eine Annäherung der Höhe über dem Flughafen, die „relative Druckhöhe über dem Boden“ (die Druckhöhe minus der Höhe des Bodens) an. Diese Höhe ist gleich 0m am Boden. Sie wird bei Start und Landung verwendet. Eine Höhenseparation ist nur unter Flugzeugen mit gleicher QFE-Einstellung möglich.

P 



Literatur

- [1] Gröger, E., „Bordinstrumente“, Fernschule für Aeronautik GmbH.
- [2] Triplet, J.P., und G. Roche, „Météorologie Générale“ (3ème édition), Météo-France, 1986.
- [3] <http://www.aopa.org/Pilot-Resources/Safety-and-Technique/Weather/Density-Altitude>, zuletzt aufgerufen am 28/04/2014
- [4] <http://www.gosos.com/zzzfly/imagesFly/ZusammenfassungAtmosphaere.pdf> , zuletzt aufgerufen am 28/04/2014
- [5] http://www.youtube.com/watch?v=Kv_p1dU2-gQ, zuletzt aufgerufen am 28/04/2014
- [6] <http://www.youtube.com/watch?v=QujxZyK8qtQ>, zuletzt aufgerufen am 28/04/2014