

Das Luftmeer, die Machzahl und die ominöse Schallmauer

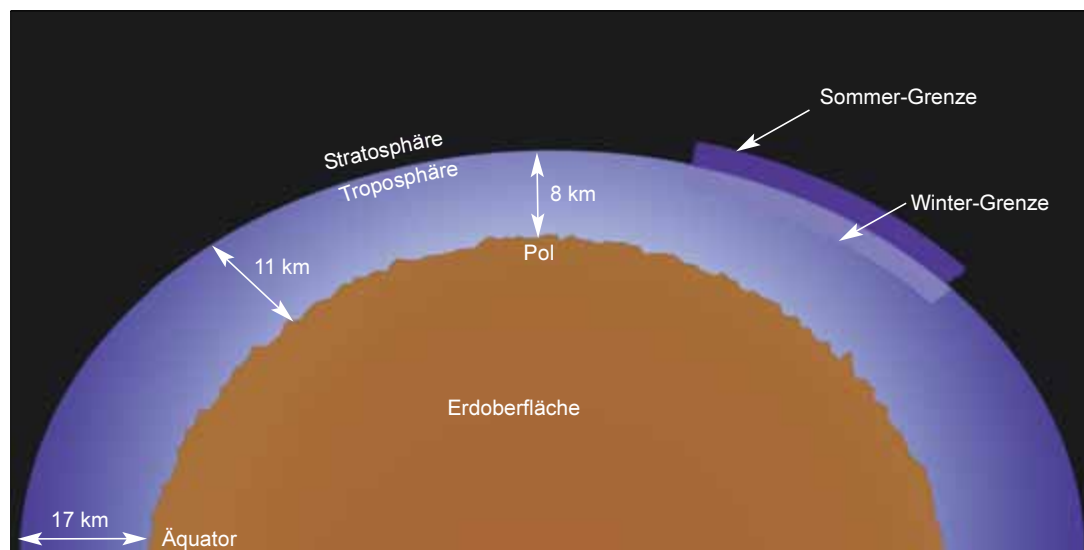
Um das Fliegen in all seiner Komplexität begreifen zu können, muß man sich als erstes mit dem Element beschäftigen, in dem sich das Flugzeug bewegt – dem Luftmeer. Will man darüberhinaus Flugzeuge im Hinblick auf Flugleistungen und Flugeigenschaften vergleichen, wird es unum-

gänglich, überall auf der Welt gleiche Voraussetzungen anzunehmen, also eine Standard-Atmosphäre zu definieren. Alle praktisch erfliegenen Flugleistungen sind anschließend auf diese Standard-Atmosphäre umzurechnen, bevor sie an die Öffentlichkeit gegeben werden.

Es ist schon ein Phänomen, wenn langsamfliegende Flugzeuge mit zunehmender Flughöhe immer schneller werden, während schnellfliegende Flugzeuge dabei immer langsamer werden. Um diesen Widerspruch verstehen zu können, muß man sich mit den Eigenarten der erdnahen Lufthülle auseinandersetzen.

Die Lufthülle der Erde wird als Atmosphäre bezeichnet (griechisch: atmos – Dampf, sphaera – Kugel). Mit der Änderung der Flughöhe verändern sich in verschiedenen Graden auch die partialen Drücke der Gase, aus denen die Atmosphäre besteht, sowie der Gesamtdruck, die Dichte, die Temperatur und die Feuchtigkeit.

Eigentlich gibt es keine Grenze zwischen Erdatmosphäre und interplanetarem Raum. Beide gehen in unendlich kleinen Schritten ineinander über. Da der Mensch aber ohne Grenzen zu ziehen nicht klar denken und definieren kann, darf man die Erdatmosphäre mit einer Dicke von 1.000 km annehmen, ohne einen grundsätzlichen Fehler zu begehen. Interessant ist dabei noch, daß die Gesamtmasse der Atmosphäre rund $5,3 \times 10^{15}$ t beträgt, von der 94 %



Um die wetterbedingten atmosphärischen Widerigkeiten zu eliminieren, mußte eine Standard-Atmosphäre geschaffen werden. Obige Abbildung zeigt die tatsächlichen Verhältnisse schematisch dar. Da die Troposphäre am Äquator dicker ist, fliegt man dort schneller.

in den unteren 20 km konzentriert sind. Im Bereich bis 5,5 km Höhe sind es immerhin schon 50 %.

Die Erdatmosphäre wird entsprechend ihren physikalisch-meteorologischen Eigenschaften in verschiedene Schichten eingeteilt. Die unterste Schicht heißt Troposphäre, die Schicht darüber heißt Stratosphäre und die oberste Ionosphäre. Flugzeuge fliegen vor allem in der

Troposphäre und der unteren Stratosphäre. Die Abbildung oben zeigt schematisch die Verteilung der Troposphäre um die Erde herum.

Die Troposphäre erstreckt sich bis in eine Höhe von 8 km über den Polen und bis zu 17 km über dem Äquator. In den mittleren Breiten reicht sie bis 11 km.

Die Troposphäre ist gekennzeichnet durch einen ständigen Temperaturabfall

mit wachsender Höhe. Im Durchschnitt nimmt die Temperatur von +15° C über dem Meeresspiegel bis -56,5° C an der Grenze zur Stratosphäre ab, im Mittel also um 6,5° C pro 1 km. Als oberste Grenze der Troposphäre bzw. unterste Grenze der Stratosphäre wird die Höhe angenommen, von der ab keine weitere Absenkung der Lufttemperatur erfolgt. Das ist für ein schallnahes Flugzeug von entscheidender Wichtigkeit, denn die Schallgeschwindigkeit der Luft ist ausschließlich an die Lufttemperatur gebunden, jedoch nicht an den Luftdruck. Und hier beantwortet sich bereits zum Teil das eingangs festgestellte Phänomen: Die Schallgeschwindigkeit nimmt mit der Lufttemperatur bis zur Stratosphäregrenze in rund 11 km Höhe beständig ab und bleibt dann bis 20 km Höhe konstant. Die Geschwindigkeit eines schallschnellen Flugzeuges muß also in derselben Weise mit der Höhe abnehmen, während hingegen ein langsam fliegendes Flugzeug von alledem

nichts bemerkt. Die Stratosphäre übrigens erstreckt sich bis in eine Höhe von 80 bis 85 km. Die Lufttemperatur steigt über 25 km Höhe wieder an, um danach wieder abzufallen und erneut zu steigen. Für Passagierflugzeuge sind Höhen über 15 km wegen der Druckhaltung und der Triebwerke uninteressant.

Alle Luftströmungen, Winde und Böen sind Folge der unterschiedlich intensiven Sonneneinstrahlung. Das Wetter wird letztlich von der Sonne gemacht. Die starken und ständigen Luftströmungen sorgen auch dafür, daß die chemische Zusammensetzung der Luft in den unterschiedlichen Höhen ziemlich konstant bleibt. Gäbe es keine Winde, würden die Gasmoleküle durch die Gravitation nach Gewicht geschichtet auf die Erdoberfläche fallen, unten die schweren Edelgase, darüber Sauerstoff und Stickstoff.

Die Dichte der Luft und damit der Luftdruck sind für das Fliegen schon bei geringsten Geschwindigkeiten we-

Das Geschwindigkeits-schaubild macht alle Zusammenhänge deutlich, denen ein schnellfliegendes Passagierflugzeug ausgesetzt ist. Die Höchstgeschwindigkeit wird durch die Machzahl begrenzt, in tieferen Luftschichten auch durch die Festigkeit der Konstruktion (administrative Staudruckbegrenzung). Der Reiseflughbereich ist ziemlich eng begrenzt (grüner Kasten). Die

gen des Staudrucks von immenser Bedeutung. Sind doch Staudruck und Flügelfläche verantwortlich für die Größe von Auftrieb und Widerstand.

Der Widerstand ist entscheidend für die notwendige Motorleistung und die damit zu erzielende Fluggeschwindigkeit. Da Wichte, Dichte und Druck mit der Höhe abnehmen, sinkt der Widerstand und steigt also die Fluggeschwindigkeit (bei gleichbleibender Motorleistung). Der Luftdruck nimmt von Meereshöhe bis 5,5 km Höhe auf die Hälfte ab, bis 11 km auf ein Viertel, bis 22 km



Minimalgeschwindigkeit steigt steil mit der Höhe an und wird nach unten begrenzt durch den maximalen Anstellwinkel bei eingefahrenen Klappen bzw. dem Strömungsabriss wegen zu geringer Fahrt. Allen Minimal- und Maximalgeschwindigkeiten ist für die Praxis ein Sicherheitsfaktor beigegeben. Das Verlassen des normalen Einsatzbereiches muß durch Hupen oder Warnleuchten angezeigt werden.

auf ein Achtel. Das bedeutet für ein Flugzeug, wenn es auf Meereshöhe 300 km/h schnell ist, daß es in 11 km bereits 600 km/h schnell ist. Im obigen Geschwindigkeitsschaubild stellt sich der eingangs gezeigte Widerspruch als mit der Höhe steigende Minimal- und mit der Höhe fallende Maximalgeschwindigkeit dar. Beide Graphen treffen sich dann in der gefürchteten „Sarg-ecke“, wo der Pilot nicht weiß, ob das Schütteln des Flugzeuges von zu großer oder zu geringer Geschwindigkeit herrührt. Aus allem Gesagten geht auch hervor, daß es keine Schallmauer gibt.

Internationale Standard-Atmosphäre (INA)

Höhe	Temperatur	Druck	Dichte	Schallgeschwindigk.	kin. Zähigkeit [10 ⁻⁶ m ² /s]	Erdbeschleunigung
0 km	15,000 °C	101,325 kPa	1,22500 kg/m ³	340,3 m/s	1,4607	9,8067 m/s ²
1 km	8,501 °C	89,876 kPa	1,11166 kg/m ³	336,4 m/s	1,5813	9,8036 m/s ²
2 km	2,004 °C	79,501 kPa	1,00655 kg/m ³	332,5 m/s	1,7147	9,8005 m/s ²
3 km	-4,491 °C	70,121 kPa	0,90925 kg/m ³	328,6 m/s	1,8628	9,7974 m/s ²
4 km	-10,984 °C	61,660 kPa	0,81935 kg/m ³	324,6 m/s	2,0275	9,7943 m/s ²
5 km	-17,474 °C	54,048 kPa	0,73643 kg/m ³	320,5 m/s	2,2110	9,7912 m/s ²
6 km	-23,963 °C	47,218 kPa	0,66011 kg/m ³	316,4 m/s	2,4162	9,7882 m/s ²
7 km	-30,450 °C	41,105 kPa	0,59002 kg/m ³	312,3 m/s	2,6461	9,7851 m/s ²
8 km	-36,935 °C	35,651 kPa	0,52579 kg/m ³	308,1 m/s	2,9044	9,7820 m/s ²
9 km	-43,417 °C	30,800 kPa	0,46707 kg/m ³	303,8 m/s	3,1957	9,7789 m/s ²
10 km	-49,898 °C	26,499 kPa	0,41351 kg/m ³	299,5 m/s	3,5251	9,7739 m/s ²
11 km	-56,500 °C	22,699 kPa	0,36480 kg/m ³	295,1 m/s	3,8988	9,7728 m/s ²
12 km	-56,500 °C	19,399 kPa	0,31194 kg/m ³	295,1 m/s	4,5574	9,7697 m/s ²
13 km	-56,500 °C	16,580 kPa	0,26660 kg/m ³	295,1 m/s	5,3325	9,7667 m/s ²
14 km	-56,500 °C	14,170 kPa	0,22786 kg/m ³	295,1 m/s	6,2391	9,7636 m/s ²
15 km	-56,500 °C	12,112 kPa	0,19476 kg/m ³	295,1 m/s	7,2995	9,7605 m/s ²