

Natur und Physik



1

Was ist Luft?

Auch weil wir Luft nicht sehen können, erscheint uns das Phänomen des Fliegens selbst nach über 100 Jahren motorisierter Luftfahrt manchmal unwahrscheinlich. Man muss sich in diesem Zusammenhang stets vor Augen führen, dass Luft ebenso Materie ist wie Wasser – nur eben unsichtbar. Luft hat eine Masse, auf Meereshöhe und bei 20 Grad Celsius sind es etwa 1,2 Kilogramm pro Kubikmeter. Wäre Wasser ebenso unsichtbar wie Luft – ein scheinbar im Nichts schwebender Supertanker oder Flugzeugträger würde uns noch um einiges mehr erstaunen als Flugzeuge am Himmel. Luft ist, wenn man sie physikalisch betrachtet, eine relativ zähe Masse aus Sauerstoff und Stickstoff, und auch etwas Wasserstoff und ein paar Edelgase sind enthalten.

Der Anteil des Wasserdampfes in der Luft bestimmt ihre Feuchte, wobei warme Luft sehr viel mehr Feuchtigkeit aufnehmen kann als kalte. Warme Luft hat eine geringere Masse als kalte – einfach weil die Zufuhr von Energie die Luftmoleküle auseinanderstreben lässt. Pro Volumeneinheit

sind also in warmer Luft weniger Luftmoleküle enthalten als in kalter. Interessanterweise hat feuchte Luft eine geringere Masse als trockene. Folglich ist warme feuchte Luft die am wenigsten dichte Luft – vereinfacht ausgedrückt »trägt« sie Flugzeuge am schlechtesten. Da Luft eine Masse hat und deshalb etwas wiegt, drückt die Atmosphäre auf die Oberfläche der Erde. Wir nennen das Luftdruck. Logischerweise ist der Luftdruck ganz unten, also auf Meereshöhe, am höchsten, schließlich lastet die Masse der gesamten Atmosphäre der Erde auf den untersten Luftteilchen. Bis zum oberen Rand der Atmosphäre nimmt der Luftdruck deshalb immer weiter ab. In 5500 Meter Höhe (in einem Fliegerbuch sollten wir eigentlich von 18000 Fuß sprechen) herrscht nur noch der halbe, in elf Kilometer Höhe (36000 Fuß) nur noch ein Viertel des Luftdrucks am Boden.

2

In welcher Schicht der Atmosphäre fliegen Flugzeuge?

Vom Erdboden bis zu einer Höhe von acht Kilometern über den Polen der Erde und etwa 18 Kilometern über dem Äquator liegt die unterste Schicht der Atmosphäre, die Troposphäre. In ihr ist nicht nur der größte Teil der Luft enthalten, sondern auch annähernd der gesamte Wasserdampf – weshalb es auch nur in der Troposphäre ein Wettergeschehen gibt. In der darüberliegenden Stratosphäre, die bis zu einer Höhe von 50 Kilometern reicht, fliegen nur noch Forschungsflugzeuge oder Wetterballone. Manche erreichen auch kurzzeitig die darüberliegende Mesosphäre. Verkehrsflugzeuge benutzen in der Regel Höhen zwischen acht und 13 Kilometern.

Das Überschall-Verkehrsflugzeug Concorde flog meist in 16 Kilometer Höhe, konnte aber auch bis auf über 18 Kilometer steigen. Militärjets können sogar noch etwas höher klettern. So erreichen die amerikanische F-15 »Eagle« oder der »Eurofighter« beinahe 20 Kilometer, die russische MiG 25 sogar 22 Kilometer. Der legendäre amerikanische Aufklärer SR-71 (»Blackbird«) schaffte sogar 26 Kilometer. Aber ihn kann man heute nur noch im Museum bewundern.

3

Welche Kräfte bewegen ein Flugzeug?

Jeder Flugschüler kennt das Diagramm: die Silhouette eines Flugzeugs, versehen mit vier von ihr ausgehenden Pfeilen. Gewichtskraft wird durch den Pfeil nach unten symbolisiert, der Pfeil nach vorne ist der Schub, den das Triebwerk erzeugt, der Pfeil nach hinten der Luftwiderstand (und am Boden auch der Rollwiderstand der Räder). Der Pfeil nach oben ist derjenige, der den Flieger vor allem interessiert – der Auftrieb. Diese vier Kräfte wirken auf ein Flugzeug im Flug ein. Steht die Maschine am Boden, sind Schub, Widerstand und Auftrieb gleich null. Für diesen Fall hat das Diagramm nur einen Pfeil: den nach unten, denn die Gewichtskraft wirkt ja auch im Stand. Wenn Sie nun das Triebwerk anlassen und zur Startbahn rollen, beginnt, je nachdem wie schnell Sie rollen, der Schubpfeil nach vorne länger zu werden – gleichzeitig aber auch der des Widerstandes nach hinten.

Jetzt ist es so weit: Sie beschleunigen das Flugzeug für den Start und je schneller Sie werden, umso mehr Auftrieb erzeugen die Flügel. Stellen Sie sich einfach vor, dass der Auf-

triebspfeil immer weiter nach oben aus der Tragfläche wächst – und zwar genau rechtwinklig zur »Anströmrichtung« des Flügels. Wenn der Kraft-»Vektor« nach oben größer wird als derjenige der Erdanziehung, hebt das Flugzeug ab und beginnt zu steigen. Die physikalischen Gesetze hinter dem dynamischen Auftrieb gehen auf die Herren Bernoulli und Newton zurück. Aber dazu gleich mehr. Das Flugzeug bleibt im Steigflug – genauso lange wie die Auftriebskraft größer ist als die Gewichtskraft. Auf Reiseflughöhe angekommen, bringen Sie das Flugzeug in den Horizontalflug und reduzieren die Triebwerksleistung. Wenn das Flugzeug auf dem Weg zum Ziel nun mit gleichbleibender Geschwindigkeit in konstanter Höhe fliegt, sieht unser Kräftediagramm so aus: die Pfeile nach vorne und hinten sind exakt gleich lang, Schub und Widerstand also identisch. Und auch die Pfeile nach oben und nach unten haben die gleiche Länge, denn um die Höhe zu halten,



In einer 60-Grad-Steilkurve wirken zwei g auf das Flugzeug ein, der Pilot wird mit seinem zweifachen Gewicht in den Sitz gedrückt.

müssen die Tragflächen exakt die Kraft nach oben erzeugen, die der Gewichtskraft nach unten entspricht. Sie sind nun bald am Ziel und reduzieren den Schub, um sich dem Heimatplaneten wieder zu nähern. Wenn Sie das Gas rausnehmen, erzeugt Ihr Triebwerk weniger Schub und Sie werden langsamer. Folglich sinkt der Auftrieb an den Tragflächen und die Gewichtskraft gewinnt wieder die Oberhand über Ihr Flugzeug. Sie sinken jetzt. Ideal ist es übrigens, wenn der Auftrieb exakt im Moment des Aufsetzens auf null reduziert wird. Ist das Timing bei der Landung schlecht, bleibt der Auftrieb mehrere Meter über der Landebahn weg, das Flugzeug sackt durch und schlägt hart auf. Das sind dann die wenigen Fälle, wo Charterpassagiere nicht klatschen.

4

Wie kann ein 500 Tonnen schweres Flugzeug abheben?

Es spielt grundsätzlich keine Rolle, welche Masse ein Flugzeug hat. Allein entscheidend ist, dass der von den Tragflächen produzierte Auftrieb größer ist als die Gewichtskraft. Es ist natürlich faszinierend, wenn man sieht, mit welcher Leichtigkeit eine mehrere Hundert Tonnen schwere Boeing 747 oder ein Airbus A 380 in den Himmel steigen. Seltener stellt man sich die Frage, wieso ein 250 Meter langes und 70000 Tonnen schweres Kreuzfahrtschiff nicht untergeht. Für Flugzeuge im Reiseflug gilt wie für Schiffe: Die Auftriebskraft ist so groß wie die Kraft, die das Flugzeug in Richtung Erdboden und ein Schiff in Richtung Meeresboden zieht. Aber Vorsicht: Auftrieb bei Schiffen ist etwas ganz anderes als Auftrieb bei Flugzeugen. Grundsätzlich

müssen nämlich zwei Formen unterschieden werden: der statische und der dynamische Auftrieb. Vereinfacht kann man sagen, dass statischer Auftrieb immer dann zutrifft, wenn Flugzeug oder Schiff insgesamt eine geringere Masse haben als das von ihnen verdrängte Medium, also Luft oder Wasser.

Ein Gasballon schwebt, weil die gesamte Masse seines Korbes, der Hülle und des darin enthaltenen Gases geringer ist als die Masse der Luft, die er verdrängt. Dasselbe trifft auch auf einen Zeppelin zu – oder eben ein Schiff. Auch dieses muss eine größere Masse an Wasser verdrängen als seine eigene, um nicht unterzugehen. Das gelingt bei einem Schiff aus Stahl nur deshalb, weil es im Verhältnis zu seiner Größe doch eine geringe Masse hat und zum größten Teil aus Hohlräumen besteht. Entscheidend ist nämlich die auf das Volumen des Schiffs bezogene durchschnittliche Masse und nicht nur die des Stahls. Mein Tipp: Lesen Sie zum statischen Auftrieb etwas über das Gesetz des Archimedes! Ganz anders beim Flugzeug. Es wiegt in jedem Fall sehr viel mehr als die Luft, die es verdrängt, ganz egal, wie leicht man es baut. Luft hat eben eine wesentlich geringere Dichte als Wasser. Deshalb benötigt das Flugzeug, um den Erdboden zu verlassen, dynamischen Auftrieb, der durch seine Tragflächen während ihrer Bewegung durch die Luft erzeugt wird.

Durch die Form der Flügel, die besondere Art der Luftströmung und das komplexe Zusammenspiel vieler physikalischer Effekte entsteht mit zunehmender Beschleunigung auf der Startbahn eine nach oben gerichtete Kraft, die schließlich größer wird als das Gewicht des Flugzeugs, also seine durch die Gravitationskraft in Richtung Erdmittelpunkt beschleunigte Masse. Schon fliegt das Flugzeug.

5

Wie entsteht dynamischer Auftrieb?

Die Theorie des Auftriebs eines Tragflügels ist etwas so Komplexes, dass nur wenige Piloten sie wirklich verstehen. Als ich fliegen lernte, erging es mir so wie den meisten anderen Fliegern: Die in der Flugschule angebotene Erklärung des physikalischen Phänomens Auftrieb war ein in Stein gemeißeltes Gesetz, das nicht angezweifelt werden durfte. Jeder Flugschüler musste sich mit dieser stark vereinfachten Definition zufriedengeben – die aber physikalisch unzureichend ist. In der Regel wird der Auftrieb einer Tragfläche damit erklärt, dass die Luft, die über den oberen, stärker gewölbten Teil des Flügels strömt, »einen weiteren Weg zurücklegen muss« als die auf der flacheren Unterseite fließende Luft. Damit die »obere« Luft sich an der Hinterkante des Flügels mit der »unteren« Luft treffen kann, so wird noch heute fabuliert, muss sie eben beschleunigen.

Das Gesetz von Daniel Bernoulli (der keine Flugzeuge kannte und sich nur für die physikalischen Gesetze von Strömung interessierte) besagt, dass in einem Fluid (Luft, Wasser) der Druck abnimmt, wenn es durch eine Engstelle fließt und dadurch beschleunigt wird. Sie wissen aus Erfahrung, dass das Wasser schneller herausspritzt, wenn Sie einen Gartenschlauch vorne zudrücken – aber gleichzeitig sinkt auch der Druck innerhalb der Wasserströmung, was einem natürlich nicht bewusst ist. Der Fluglehrer sagt also: Die Luft auf der Oberseite des Flügels fließt schneller, der Druck nimmt ab – und da der Druck unter dem Flügel gleichgeblieben ist, entsteht eine Kraft nach oben. So einfach könnte Fliegen sein – wenn es stimmen würde.

Die Erklärung wird nur allzu gern akzeptiert – weil jeder Flugschüler sie intuitiv gleich versteht. Der Nachteil: Wenn der Flugschüler später einmal bei der Lufthansa Airbus fliegt, hat er auf ein paar gute Fragen seiner Passagiere keine Antwort. Etwa: »Wenn der Auftrieb allein durch die Wölbung der Tragflächenoberseite entsteht, warum können Flugzeuge dann auch auf dem Rücken fliegen? Und weshalb können auch Flugzeuge fliegen, deren Profil symmetrisch ist, also oben und unten gleichermaßen gewölbt?« Deshalb, weil »Bernoulli« nur ein Teil der Antwort ist. Nicht falsch, aber eben auch nicht ausreichend.

6

Wie entsteht der Auftrieb also *wirklich*?

Wie oben erwähnt gehört das Phänomen Auftrieb zu den physikalischen Gesetzen, die sich einer einfachen und allzu populären Beschreibung entziehen. Sicher, man kann visuell eindrucksvolle oder leicht zu verstehende Analogien und Bilder bemühen, diese aber berücksichtigen nicht die gesamte Komplexität des Phänomens. Zunächst: Luft, die oberhalb einer gewölbten Tragfläche fließt, hat keinerlei Absichten, sich an der Hinterkante der Tragfläche mit der unteren Luft »zu verabreden«. Sie wird sogar sehr viel stärker beschleunigt, was man bei der Visualisierung von Tragflügelströmungen eindeutig sehen kann, wie man sie etwa im Internet auf vielen Seiten findet. Richtig ist, dass die Luft über der Tragfläche beschleunigt wird und deshalb ein Unterdruck entsteht. Unterhalb der Tragfläche aber wird die anströmende Luft verzögert, weshalb – wegen Bernoulli – unter dem Flügel ein Überdruck entsteht. Um eine Vorstellung von der Relation der Kräfte zu bekom-

men: Die Sogkraft über der Tragfläche ist circa dreimal so groß wie die Druckkraft unterhalb des Flügels. Wenn Sie während einer Autofahrt die Hand aus dem Fenster halten und in einem flachen Winkel gegen die anströmende Luft anstellen, geschieht dasselbe. Entgegen Ihrer Intuition ist es vor allem der Sog, der Ihre Hand nach oben zieht – und nicht der Druck der anströmenden Luft.

Eine andere einfache Theorie, die auf Isaac Newton zurückgeht, erklärt die Auftriebskraft mit der Ablenkung der um die Tragfläche strömenden Luft schräg nach unten. Eine 1000 Kilogramm schwere Cessna, die mit 200 Stundenkilometern fliegt, muss für ihren Auftrieb in jeder Sekunde eine Luftmasse von circa fünf Tonnen umlenken. Die nach unten abgelenkte Luft bewirkt nach Newtons Gesetz eine Kraft nach oben.

Die beiden Erklärungsmodelle – Bernoulli und Newton – reichen den Flugzeugherstellern allerdings nicht aus für die Berechnung von Tragflügeln. Sie verwenden komplexere Rechenmodelle. Als Stichwort sei hier nur die Theorie der »Zirkulationsströmung« genannt.

Unter Privatpiloten herrscht ohnehin eine völlig andere Sichtweise darüber, was Flugzeuge vom Boden wegbringt: Das Geld für den Sprit.

7

Gibt es eine maximale Größe für Flugzeuge?

Einer der wichtigsten Gründe, warum Flugzeuge nicht einfach immer größer und größer werden können, ist operationeller Natur: die Flughäfen wären gar nicht für sie ausgelegt! Bereits für den doppelstöckigen Airbus A 380 mussten Airport-Betreiber in der ganzen Welt ihre Termini-

nals und Passagierbrücken modifizieren, und auch die Rollwege und Pisten wären zu schmal für noch größere Maschinen.

Neben diesen Gründen praktischer Natur gibt es aber auch physikalische und konstruktive Grenzen. Nimmt man ein Flugzeug mit 100 Tonnen Abfluggewicht und 40 Metern Spannweite als Basis und will aus diesem Entwurf ein Flugzeug mit der *vierfachen* Abflugmasse – also 400 Tonnen – machen, so ergibt sich ein Flugzeug mit der *doppelten* Spannweite, also 80 Metern. Der neue Flügel hätte die vierfache Fläche (doppelte Länge mal doppelte Tiefe) und deshalb den vierfachen Auftrieb. Von seiner Geometrie her wäre der 400-Tonner also nicht viermal, sondern nur doppelt so groß wie das Ausgangsmuster. Das Überraschende: Die *Masse* des Flügels mit der vierfachen Fläche ist nicht viermal, sondern achtmal so groß wie beim Ausgangsmuster. »Schuld« ist das sogenannte Wurzel-Kubik-Gesetz. Hatte beim kleineren Flugzeug der Flügel eine Masse von 6,2 Tonnen (6,2 Prozent der Gesamtmasse), sind nun fast 50 Tonnen Masse (12,4 Prozent) notwendig, um dieselbe strukturelle Festigkeit zu erzielen. Das Flugzeug muss also einen im Verhältnis sehr viel schwereren Flügel schleppen, und so sinkt das Verhältnis von Gesamtmasse zu Nutzlast. Das Einzige, was die Ingenieure dagegen tun könnten, wäre, den Flügel relativ zur Gesamtgröße kleiner zu bauen. Dann aber müsste das Flugzeug wesentlich schneller fliegen als das kleinere Vergleichsmuster, damit der nun im Verhältnis kleinere Flügel den notwendigen Auftrieb erzielen kann. Dies wiederum verlangt nach stärkeren Triebwerken, die mehr Sprit brauchen. Und um dem Flugzeug gute Langsamflug-Eigenschaften für Start und Landung zu geben, sind nun noch komplexere Start- und Landeklappensysteme notwendig, denn der »schnellere« Flügel

ist bei niedrigen Geschwindigkeiten ungünstiger als der größere Ursprungsflügel. All dies zieht einen »Rattenschwanz« von Konsequenzen nach sich, was Flugleistungen, Reichweite und Nutzlast betrifft. Ab einer bestimmten Größe jedenfalls würde die Struktur des Flugzeugs so schwer, dass keinerlei Nutzlast für Passagiere oder Fracht mehr übrig bliebe. Eine weitere Verbesserung der Werkstoffe (leichter bei größerer Festigkeit) und neue Konzepte bei der Auslegung der Flugzeuge werden in der Zukunft helfen, das Verhältnis zwischen Strukturmasse und maximaler Abflugmasse weiter zu optimieren. Dennoch gibt es eine natürliche Grenze für die Größe der modernen Flugsaurier.

8

Was bedeutet »die Schallmauer durchbrechen«?

Mit 340 Metern pro Sekunde, 1225 Stundenkilometern, breitet Schall sich in trockener, 15 Grad Celsius warmer Luft aus. Da sich die Geschwindigkeit der Schallwellen mit der Temperatur ändert, sinkt sie bei null Grad Celsius auf 331 Meter pro Sekunde, 1122 Stundenkilometer. Da die Temperatur der Luft mit der Höhe konstant abnimmt (das gilt für die Troposphäre, also bis etwa elf Kilometer Höhe), sinkt parallel dazu auch die Schallgeschwindigkeit.

Wenn nun ein Flugzeug die Schallmauer durchbricht, geschieht Folgendes: Es bewegt sich durch die Luft wie ein Boot durch das Wasser und erzeugt an der Spitze und am Heck zwei Druckwellen, ähnlich denen, die ein Boot im Wasser an Bug und Heck begleiten. Diese Wellen bewegen sich mit Schallgeschwindigkeit durch die Luft. Wenn das



Historischer Moment: Als die X-1 Schallgeschwindigkeit erreichte, drückte der Pilot des Begleitflugzeugs auf den Auslöser.

Flugzeug nun weiter beschleunigt, werden die Bugwellen immer weiter zusammengedrückt («Kompression»). Gleichzeitig erhöht sich der Widerstand, den das Flugzeug überwinden muss, enorm. Eine beinahe undurchdringliche Mauer liegt vor dem Flugzeug. Passiert das Flugzeug die Schallgeschwindigkeit, kann die Druckwelle dem Flugzeug nicht mehr schnell genug ausweichen und wird vom Flugzeug durchstoßen. Die beiden Wellen an Spitze und Heck des Flugzeugs erzeugen dabei einen Doppelknall, dessen Intensität im Wesentlichen von der Masse und der Größe des Flugzeugs abhängt. Auch das Intervall, in dem die beiden Geräusche aufeinanderfolgen, ist von der Größe des Flugzeugs, aber auch von der Entfernung vom Beobachter auf der Erdoberfläche abhängig. Benannt ist die Schallgeschwindigkeit nach dem österreichischen Physiker Ernst Mach.