



Flugphysik

Warum fliegen Flugzeuge?

Geschwindigkeit, Luftwiderstand und die Form der Flügel beeinflussen den Auftrieb. Dank der Theorien von Newton, Bernoulli und moderner Wissenschaftler ist Fliegen physikalisch kein Geheimnis mehr. Konstrukteure lernen auch von der Vielfalt des Tierreichs: Wie kommen Vögel gegen den Luftwiderstand an und warum weisen die Schuppen von Haien Längsrillen auf?



Die Aerodynamik

Kraftverhältnisse

Ein großes Verkehrsflugzeug wiegt mehrere hundert Tonnen und doch hebt es scheinbar mühelos ab. Daran beteiligt sind die Luft, der Wind und verschiedene physikalische Kräfte. Die Aerodynamik führt in die Welt der Luftströmungen, der Auf- und der Wirbelwinde. Wie aber entsteht der Auftrieb, der Flugzeuge in die Höhe steigen lässt? In der Geschichte der Physik haben bedeutende Wissenschaftler unterschiedliche Erklärungsansätze dafür gefunden.

Auftrieb und Strömung: Theorien der „Flugkräfte“

Vier Kräfte wirken auf ein fliegendes Flugzeug ein: Auftrieb, Gewicht des Flugzeugs (also die Schwerkraft), Schub und Widerstand.

Die Reibung, die zwischen der Luft und dem Flugzeug entsteht, nennen wir Widerstand. Schub und Widerstand wirken gegeneinander. Die Größe des Widerstands hängt von der Geschwindigkeit und der Form des Körpers ab, der sich durch die Luft bewegt. Du kannst es selbst ausprobieren: Halte eine Hand aus dem Fenster eines fahrenden Autos. Verändere dabei die Stellung der Hand. Wenn du die Hand leicht schräg stellst, wird sie nach oben gedrückt: Auftrieb ist entstanden.

Zwei Kräfte bestimmen den Auftrieb: der Schub und die Geschwindigkeit. Ohne Luft und Bewegung hat ein Flugzeug keinen Auftrieb.

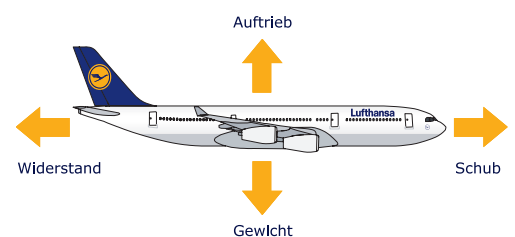
Druck und Gegendruck: Rückstoßtheorie nach Newton

Wie erklären Wissenschaftler aber nun den entscheidenden Auftrieb eines Flugzeugs? – Bei näherem Hinsehen sehr unterschiedlich: Recht einfach erscheint zum Beispiel die Rückstoßtheorie von Isaac Newton (1643–1727): Stößt die Luft auf die Unterseite eines Flügels, dann wird sie von ihm zurückgeworfen. Der Rückstoß der Luftteilchen drückt dabei den Flugzeugflügel nach oben. Jede Kraft, die auf ein Objekt einwirkt, ruft nämlich eine gleich große Gegenkraft hervor.

Nach dem Rückstoßprinzip lenkt also der Flügel die Luft um: Die Luft wird nach unten, der Flügel nach oben gedrückt. Folgen wir der Erklärung Isaac Newtons, dann müsste ein Flügel mit einem rechteckigen Profil und gleicher Größe über vergleichbare Auftriebskräfte verfügen. Bei einem rechteckigen Flügel ist der Auftrieb jedoch wesentlich schwächer als bei einem gerundeten. Versuche im Windkanal belegen: Es ist die Form des Flügels, die



Eine Boeing 747-400 beim Start



Die vier Kräfte



... **Die Aerodynamik** Kraftverhältnisse

über den Auftrieb entscheidet. Die Rückstoßtheorie von Newton greift in diesem Zusammenhang also eindeutig zu kurz.

Luftströme: die Theorie von Bernoulli

Eine zweite Erklärung geht auf den Schweizer Physiker Daniel Bernoulli (1700–1782) zurück. Sie verweist auf den unterschiedlichen Luftdruck ober- und unterhalb des Flugzeugflügels. Und die Form des Flügels beeinflusst diesen Druck ganz entscheidend.

Flugzeugflügel sind nach oben gewölbt. Sie sind vorne dicker als hinten und schließen mit einer sehr scharfen Hinterkante ab. Strömt nun die Luft von vorn gegen die Tragfläche, so teilt sich der Luftstrom. Die Unterseite der Tragfläche ist kaum gewölbt, deshalb kann die Luft hier relativ ungehindert vorbeiströmen. Die gewölbte Oberseite der Tragfläche verdrängt die Luft stärker. Denn die Luft muss einen längeren Weg zurücklegen.

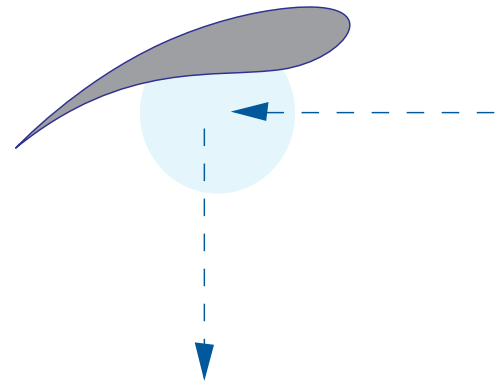
Bernoulli fand nun Folgendes heraus: Strömende Flüssigkeiten und Gase üben einen geringeren Druck auf ihre Umgebung aus als ruhende. Je höher die Geschwindigkeit, desto kleiner der Druck. Deshalb ist der Luftdruck unter der Tragfläche höher als oberhalb. Dieser Druckunterschied löst eine Sogwirkung aus. Die Tragflächen drücken das Flugzeug nach oben. Zwei Drittel des Auftriebs hängen – wie wir heute wissen – von dieser Sogwirkung ab.

Den „Bernoulli-Effekt“ könnt ihr mit einem einfachen Versuch eindrucksvoll selbst nachvollziehen:

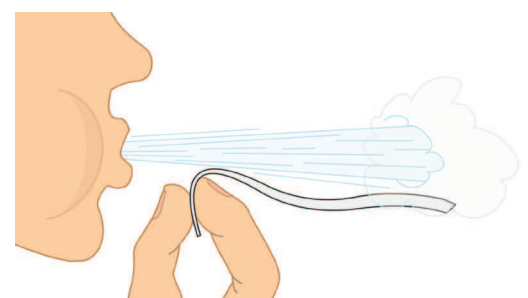
Haltet einen Papierstreifen an die Unterlippe. Pustet kräftig darüber – das Papier wird nach oben gezogen. Die schnell strömende Luft erzeugt einen Unterdruck, der das Papier nach oben drückt.

Die Theorie von Bernoulli kann jedoch nicht alle Auftriebsverhältnisse hinreichend erklären. Wenn Techniker nämlich eine bewegte Platte in einen Windkanal halten, dürfte dabei nach Bernoulli kein Auftrieb entstehen. Nach seiner Erklärung herrschen ohne Wölbung der Oberflächen an Ober- und Unterseite dieselben Druckverhältnisse. Tatsächlich jedoch stellten die Aerodynamiker in diesem Versuch einen schwachen Auftrieb fest.

Auch moderne Lehrbücher stellen häufig den Geschwindigkeitsunterschied der Luftströme oberhalb und unterhalb des Flügels nicht korrekt dar. Die Luft oberhalb und unterhalb des Flügels strömt unterschiedlich schnell, bevor sie auf der anderen Seite des Flügels wieder zusammentrifft. Beide Luftströmungen kommen zeitversetzt auf der anderen Flügelseite an. Die Luft ober- und unterhalb des



Das Rückstoßprinzip



Unterdruck drückt Papier nach oben



... **Die Aerodynamik** Kraftverhältnisse

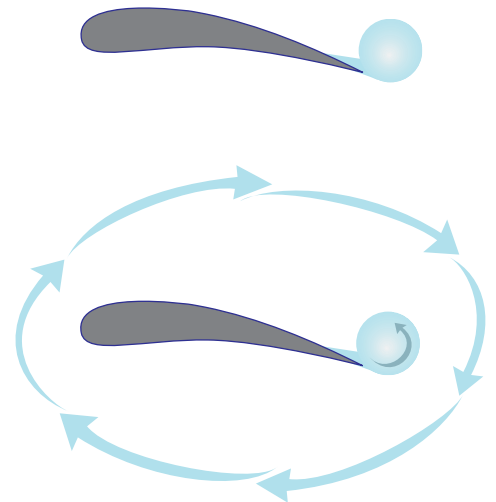
Flügel strömt also vollkommen unabhängig voneinander. Erstaunlicherweise kommen sogar die Luftteilchen an der Oberseite der Tragfläche bei einem längeren Weg früher auf der anderen Seite des Flügels an.

Wirbelwind: die Zirkulationsströmung

Wieso Luft sich unterschiedlich schnell bewegt, erklärt die Theorie der Zirkulationsströmung. Sie untersucht vor allem das Verhalten der Luftströmungen unmittelbar beim Start des Flugzeugs. Dabei entsteht an der scharfen, hinteren Kante des Flügels ein Luftwirbel. Die Reibung mit der Oberfläche lässt die Luft in unmittelbarer Nähe des Tragflügels nämlich langsamer strömen. Ab einer bestimmten Geschwindigkeit kann sie dem Flügel nicht mehr folgen und löst sich von ihm ab. Die weiter außen liegende Luft ist jedoch einer geringeren Reibung ausgesetzt und wird dadurch weniger abgebremst. Sie kann der Bewegung um die Kante folgen. Hinter dem startenden Flugzeug entstehen dabei rollende Luftschichten. Experten nennen sie auch Anfahrwirbel.

Nach dem physikalischen Gesetz der Drehimpulserhaltung treten Wirbel immer nur paarweise auf. Als Ausgleich zum Anfahrwirbel bildet sich eine Strömung, die ihre Kräfte in der gegenüberliegenden Richtung um den gesamten Flügel herum entfaltet. Diese Strömung bremst die Luft, die unter dem Flügel entlangströmt, beschleunigt jedoch die Luft oberhalb der Tragfläche. Auf diese Weise entsteht oberhalb des Flügels ein Unterdruck und unterhalb ein Überdruck: Das Flugzeug steigt in die Höhe. Dafür verantwortlich ist, wie wir gesehen haben, die Zirkulationsströmung um das Flugzeug herum. Damit sie zustande kommt, sind die scharfen Hinterkanten der Tragflügel wichtig.

Nach dem Start des Flugzeugs bleibt der Anfahrwirbel noch eine gewisse Zeit auf der Startbahn zurück. Das nächste Flugzeug kann erst starten, wenn er sich aufgelöst hat.



Anfahrwirbel – die Animation 1308M: „Zirkulationsströmung“ auf der DVD zeigt, welche Strömungen entstehen



... **Die Aerodynamik** Kraftverhältnisse

Ohne Abriss: Anstellwinkel beim Start

Verfügt die Tragfläche über einen kleinen Anstellwinkel zur Fahrtrichtung, kann das den Auftrieb vergrößern. Ein zu großer Anstellwinkel lässt die Luftströmung eventuell abreißen. Verändern sich stabile Strömungsverhältnisse unkontrolliert und abrupt, kann der fehlende Auftrieb zum Absturz des Flugzeugs führen. Negative Anstellwinkel drücken das Flugzeug sogar auf den Boden. Auch Rennwagen nutzen dieses physikalische Gesetz mit ihren Spoilern, die an Flügel erinnern und den Auftrieb der schnellen Wagen verhindern sollen.

Erst ab einer bestimmten Mindestgeschwindigkeit können Flugzeuge vom Boden abheben. Auch während des Flugs hält eine Mindestgeschwindigkeit die Luftströmungen um die Flügel stabil und vermeidet den „Abriss“. In einem solchen Fall verliert das Flugzeug schnell an Höhe. Nur mit dem „Abfangen“ kann der Pilot die Maschine wieder in eine richtige Position bringen.

Starke Bremse: Landeklappen bei der Landung

Bei der Landung verändert das Flugzeug die Strömungsverhältnisse so, dass die Geschwindigkeit sinkt. Durch das Ausfahren der Landeklappen verstärkt der Pilot die Wölbung der Flügel. Bei manchen Flugzeugtypen lässt sich auch die Fläche der Flügel vergrößern.

Bei einem Jumbo beträgt die Landegeschwindigkeit immer noch etwa 270 Kilometer pro Stunde. Ohne Landeklappen und Flügelverbreiterung aber wäre die Maschine ganze 400 Kilometer pro Stunde schnell. Voll ausgefahrene Klappen bei der Landung ermöglichen einen steileren Anflug. Das schnelle Vermindern der Geschwindigkeit verkürzt die Ausrollstrecke.



Die ausgefahrenen Landeklappen einer Boeing 747-400 bei der Landung



Luftfahrt und Bionik

Tierisch gut

Seit jeher haben Menschen davon geträumt, wie Vögel zu fliegen. Jahrhundertlang beobachteten sie den Vogelflug. Auch moderne Wissenschaftler und Flugzeugbauer lassen sich vom faszinierenden Einfallsreichtum der Natur inspirieren.

Vögel erzeugen den notwendigen Vor- und Auftrieb beim Flug mit ihrem Körper. Die Kraft des Vogels nimmt dabei Einfluss auf seinen Auftrieb. Wiegen Vögel mehr als 15 Kilogramm, haben sie Schwierigkeiten, überhaupt abzuheben. Schwäne und Pelikane gehören zu den schwersten flugfähigen Vögeln. Erstaunliche Flugeigenschaften wiesen Flugsaurier auf, die weit mehr als 50 Kilogramm wogen.

Flügelschlag und Auftrieb: volle Kraft

Die Schlagbewegung, genauer gesagt: die Abwärtsbewegung seiner Flügel, ermöglicht einem Vogel den Auftrieb. Die dazu benötigten starken Brustmuskeln machen mehr als 15 Prozent seines Gewichts aus. Ein Flügelschlag drückt die Luft nach unten: Dadurch entsteht unter den Flügeln ein höherer Druck als über ihnen. Der Vogel bekommt Auftrieb und kann vom Boden abheben.

Ähnlich wie bei Flugzeugen hängt der Vortrieb beim Vogelflug von der gewölbten Form der Flügel ab. Der vorne abgerundete und nach hinten immer schmaler zulaufende Flügel eines Vogels ist der Tragfläche eines Flugzeugs sehr ähnlich. Der Vogelflug bekommt jedoch seinen Schub nach vorn durch das Hin- und Herschwenken und Drehen der Flügel.

Vögel, die ihre Flügel in einem ruhigen Segelflug bewegungslos ausbreiten, haben bei angemessener Geschwindigkeit genügend Auftrieb, um sich in der Luft zu halten.

Wie bei einem Flugzeug stellt sich der Luftwiderstand dem Vortrieb entgegen. Die Form des Flugkörpers und seine Geschwindigkeit beeinflussen den Luftwiderstand im entscheidenden Maße.

Energiemeister: aufgespreizte Flügel und Winglets

Geier, Adler, Falken, aber auch andere Vögel spreizen ihre Flügelenden beim Flug. Diese Flügelform hilft ihnen, mit weniger Kraftaufwand zu fliegen, da an der Ober- und Unterseite eines Flügels unterschiedliche Druckverhältnisse herrschen.

Um die dabei auftretenden Luftwirbel zu verringern, spreizen die Vögel ihre Handschwingen auf. Die Flügelspitzen machen aus einem mächtigen Randwirbel viele kleine Wirbel. Das schauen



Ein Falke im Flug – die Flügelspitzen sind gespreizt
© Alipictures/PIXELIO



... **Luftfahrt und Bionik** Tierisch gut

sich Flugzeugingenieure in der Natur ab und versahen die Tragflächen mit aerodynamischen Anbauten, den Winglets. Ein System von mehrfachen Wirbeln verbraucht nämlich weniger Energie als der einzelne Wirbel eines konventionellen Flügels.

Auch quer zu den Flügeln entstehen Wirbel. Fliegen Vögel oder Flugzeuge zu steil, dann können diese Wirbel abreißen und zu einem Strömungsabriss führen. Vögel richten daher beim Fliegen immer wieder ihr Deckgefieder auf. Auch das nahmen sich die Ingenieure zum Vorbild und rüsteten ihre Flugzeuge mit einem System von Klappen aus.

Strömungsideal: Tierkopf und Flugzeugspitze

Auch bei der Suche nach der strömungsdynamischen Idealform haben sich Forscher und Entwickler in der Natur umgeschaut. Die Form des Vogelkopfs, aber auch der Körperbau von Pinguinen, Delfinen und Fischen standen bei ihren technischen Entwürfen Pate.

Eine lang gestreckte Form mit einer runden Spitze und einer Art Stirnwulst weist die besten Strömungseigenschaften auf. Wer einen Airbus A380 oder das „Traumschiff“, den Dreamliner 787 von Boeing, aus dieser Perspektive betrachtet, wird die Bedeutung natürlicher Vorbilder für die Flugzeugbauer erkennen.

Ein möglichst flacher Körper, einem Rennauto vergleichbar, zeigt nämlich keineswegs die idealen aerodynamischen Eigenschaften. Die Spindelform mit dem Stirnwulst dagegen erzeugt kleinere Wirbel, welche die Luftströmung auch bei sehr hohen Geschwindigkeiten ohne Störungen über den Flugkörper hinwegstreichen lassen.



Ein Winglet an der Spitze einer Tragfläche