

Dieser öffentlich zugängliche Artikel aus „Scientific American“ mit der Überschrift:

No One Can Explain Why Planes Stay in the Air

Do recent explanations solve the mysteries of aerodynamic lift?

geschrieben von [Ed Regis](#)

(<https://www.scientificamerican.com/article/no-one-can-explain-why-planes-stay-in-the-air/>)

wurde vom Redaktionsteam nach bestem Wissen und Gewissen in die deutsche Sprache übersetzt. Alle Rechte liegen beim Autor, bzw. dem Magazin „Scientific American“.

Entstehung des Auftriebs

- Auf rein mathematischer Ebene wissen Ingenieure, wie man Flugzeuge konstruiert, die in der Luft bleiben. Aber die Gleichungen erklären nicht, warum der aerodynamische Auftrieb entsteht.
- Es gibt zwei konkurrierende Theorien, die die Kräfte und Faktoren des Auftriebs beleuchten. Beide sind unvollständige Erklärungen.
- Aerodynamiker haben in letzter Zeit versucht, die Lücken im Verständnis zu schließen. Dennoch gibt es keinen Konsens.

Im Dezember 2003 veröffentlichte die New York Times anlässlich des 100. Jahrestages des ersten Fluges der Gebrüder Wright eine Geschichte mit dem Titel

[*"Staying Aloft; What Does Keep Them Up There?"*](#)

Das Thema des Artikels war eine einfache Frage: Was hält die Flugzeuge in der Luft? Zur Beantwortung dieser Frage wandte sich die Times an [John D. Anderson, Jr., Kurator für Aerodynamik am National Air and Space Museum](#) und Autor mehrerer Lehrbücher auf diesem Gebiet.

[Anderson](#) sagte jedoch, dass es keine Einigkeit darüber gibt, was die als Auftrieb bekannte aerodynamische Kraft erzeugt. "Darauf gibt es keine einfache, einzeilige Antwort", sagte er der Times. Die Menschen geben unterschiedliche Antworten auf diese Frage, manche mit "religiöser Inbrunst".

Mehr als 15 Jahre nach dieser Aussage gibt es immer noch unterschiedliche Erklärungen für die Entstehung des Auftriebs, und jede hat ihre eigenen eifrigen Verfechter. An diesem Punkt in der Geschichte des Fliegens ist diese Situation etwas rätselhaft. Schließlich haben die natürlichen Prozesse der Evolution, die willkürlich und ohne jegliches Verständnis der Physik abliefen, das mechanische Problem des aerodynamischen Auftriebs für Vögel schon vor Äonen gelöst. Warum sollte es den Wissenschaftlern so schwer fallen, zu erklären, was Vögel und Flugzeuge in der Luft hält?

Zur Verwirrung trägt auch die Tatsache bei, dass es zwei verschiedene Abstraktionsebenen für den Auftrieb gibt:

[***die technische und die nichttechnische.***](#)

Sie ergänzen sich eher, als dass sie sich widersprechen, aber sie unterscheiden sich in ihren Zielen. Die eine ist eine streng mathematische Theorie, ein Bereich, in dem das Analysemedium aus Gleichungen, Symbolen, Computersimulationen und Zahlen besteht. Es gibt kaum, wenn überhaupt, ernsthafte Meinungsverschiedenheiten darüber, welches die geeigneten Gleichungen oder deren Lösungen sind.

Das Ziel der technischen mathematischen Theorie ist es, genaue Vorhersagen zu treffen und Ergebnisse zu projizieren, die den Luftfahrtingenieuren bei der komplexen Konstruktion von Flugzeugen von Nutzen sind.

Aber Gleichungen allein sind keine Erklärungen, und ihre Lösungen sind es auch nicht. Es gibt eine zweite, nichttechnische Ebene der Analyse, die uns eine physikalische, vernünftige Erklärung des Auftriebs liefern soll. Ziel dieses nichttechnischen Ansatzes ist es, uns ein intuitives Verständnis für die tatsächlichen Kräfte und Faktoren zu vermitteln, die ein Flugzeug in der Luft halten. Dieser Ansatz beruht nicht auf Zahlen und Gleichungen, sondern auf Konzepten und Prinzipien, die auch Nichtfachleuten vertraut und verständlich sind.

Auf dieser zweiten, nichttechnischen Ebene liegen die Kontroversen. Zur Erklärung des Auftriebs werden im Allgemeinen zwei verschiedene Theorien vorgeschlagen, und die Vertreter beider Seiten vertreten ihre Standpunkte in Artikeln, Büchern und im Internet. Das Problem ist, dass jede dieser beiden nichttechnischen Theorien für sich genommen richtig ist.

Aber keine der beiden Theorien liefert eine vollständige Erklärung des Auftriebs, eine, die alle grundlegenden Kräfte, Faktoren und physikalischen Bedingungen, die den aerodynamischen Auftrieb bestimmen, vollständig berücksichtigt und keine Fragen offen lässt, die nicht geklärt oder unbekannt sind. Gibt es eine solche Theorie überhaupt?

Zwei konkurrierende Theorien

Die bei weitem populärste Erklärung des Auftriebs ist die Bernoulli-Theorie, ein Prinzip, das [der Schweizer Mathematiker Daniel Bernoulli](#) 1738 in seiner Abhandlung „*Hydrodynamica*“ aufstellte. [Bernoulli](#) stammte aus einer Familie von Mathematikern. Sein Vater Johann leistete Beiträge zur Infinitesimalrechnung, und sein Onkel Jakob prägte den Begriff "Integral". Viele von [Daniel Bernoullis](#) Beiträgen hatten mit der Strömung von Flüssigkeiten zu tun:

Luft ist eine Flüssigkeit, und die Theorie, die mit seinem Namen verbunden ist, wird üblicherweise in Begriffen der Strömungslehre ausgedrückt. Einfach ausgedrückt besagt das Bernoulli-Gesetz, dass der Druck einer Flüssigkeit mit zunehmender Geschwindigkeit abnimmt und umgekehrt.

Mit der Bernoulli-Theorie wird versucht, den Auftrieb als Folge der gekrümmten Oberseite eines Tragflügels, der technischen Bezeichnung für einen Flugzeugflügel, zu erklären. Aufgrund dieser Krümmung, so die Idee, bewegt sich die Luft auf der Oberseite des Flügels schneller als die Luft auf der Unterseite des Flügels, die flach ist.

Die Theorie von Bernoulli besagt, dass die höhere Geschwindigkeit an der Oberseite des Flügels mit einem Bereich niedrigeren Drucks verbunden ist, was Auftrieb bedeutet.

Die fehlerhaften Klassiker

Es gibt zwei Theorien, die erklären sollen, was ein Flugzeug in der Luft hält, und zwar auf einer alltäglichen Basis. Die eine ist die **Bernoulli-Theorie**, das den Auftrieb mit dem Bereich höherer Geschwindigkeit und niedrigerem Druck auf der Tragfläche in Verbindung bringt. Die andere ist das **Newton'sche** Prinzip von Aktion und Reaktion, das den Auftrieb als einen Aufwärtsdruck auf die Tragfläche durch die sich bewegende Luft darunter erklärt. Jede dieser Theorien ist auf ihre Weise richtig, und keine widerspricht der anderen, obwohl die Befürworter jeder Theorie ihre Standpunkte mit einem an Manie grenzenden Eifer vertreten. Dennoch bietet keine der beiden Theorien für sich genommen eine vollständige Erklärung des Auftriebs, und auch nicht beide zusammen, denn jede lässt etwas aus. Eine vollständige Erklärung muss alle auf den Flügel wirkenden Kräfte und Faktoren berücksichtigen, ohne dass ein wichtiger oder unwichtiger Punkt unberücksichtigt bleibt.

Theorie von Bernoulli

Angewandt auf einen Flugzeugflügel - technisch gesehen ein Tragflächenprofil - versucht die Bernoulli-Theorie, den Auftrieb als Folge der gekrümmten Oberseite des Flügels zu erklären. Die Idee ist, dass sich die Luft, die sich über die Oberseite des Flügels bewegt, aufgrund dieser Wölbung schneller bewegt als die Luft, die sich entlang der Unterseite des Flügels bewegt, die flach ist. Die Theorie von Bernoulli besagt, dass die erhöhte Geschwindigkeit an der Oberseite Des Flügels mit einem Bereich niedrigeren Drucks verbunden ist, was Auftrieb bedeutet.

Aber ...

Obwohl die Bernoulli-Theorie weitgehend korrekt ist, gibt es mehrere Gründe, warum das Prinzip keine vollständige Erklärung des Auftriebs darstellt. Es ist eine Erfahrungstatsache, dass sich Luft schneller über eine gekrümmte Oberfläche bewegt, aber die Theorie allein erklärt nicht, warum das so ist oder warum die höhere Geschwindigkeit auf der Tragfläche einen niedrigeren Druck mit sich bringt. Und in der Praxis kann ein Flugzeug mit Flügeln, die eine gekrümmte Oberseite haben - oder sogar flache Flächen oben und unten -, auch im Rückenflug fliegen, sofern das Profil in einem geeigneten Winkel angeströmt wird.

Das dritte Newton'sche Gesetz

Luft hat Masse. Daher besagt Newtons drittes Gesetz, dass der Schub des Flügels nach unten einen gleich großen und entgegengesetzten Schub nach oben zur Folge hat. Diese Newton'sche Erklärung des Auftriebs gilt für Tragflächen jeder Form, ob gekrümmt oder flach, symmetrisch oder nicht, und sie gilt auch für Flugzeuge, die kopfüber oder normal (das entscheidende Merkmal ist ein geeigneter Anstellwinkel). Daher ist sie eine umfassendere und universellere Erklärung des Auftriebs als die Theorie von Bernoulli.

Aber ...

Das Prinzip von Aktion und Reaktion für sich genommen Erklärt immer noch nicht den Unterdruck über dem Flügel, der in diesem Bereich unabhängig davon besteht, ob das Profil gewölbt ist oder nicht.



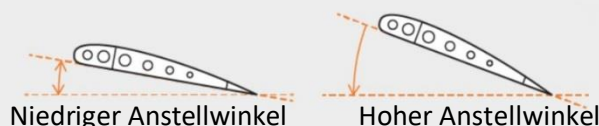
Die untere Druckzone über der Tragfläche wird nicht vollständig berücksichtigt.



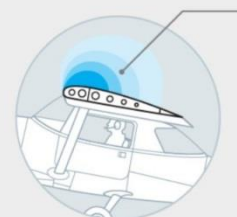
Erklärt nicht, warum zwei Teilchen das hintere Ende gleichzeitig erreichen müssen, und wie man heute weiß, bewegt sich die Luft auf der Oberseite sogar schneller als ihr "gepaartes" Teilchen.



Die Luft unter der Tragfläche wird nach unten gedrückt, was zu einer gleichen und entgegengesetzten Kraft führt: dem Auftrieb.



Der Bereich des geringeren Drucks über dem Flügel wird nicht vollständig berücksichtigt.



Unzählige Mengen von empirischen Daten aus Stromlinien (Linien von Rauchpartikeln) in Windkanaltests, Laborexperimenten an Düsen und Venturi-Röhren usw. liefern überwältigende Beweise dafür, dass das Bernoulli-Prinzip, wie gesagt, richtig und wahr ist. Dennoch gibt es mehrere Gründe dafür, dass die Bernoulli-Theorie allein keine vollständige Erklärung des Auftriebs liefert. Obwohl es eine Erfahrungstatsache ist, dass sich Luft schneller über eine gekrümmte Oberfläche bewegt, erklärt die Bernoulli-Theorie allein nicht, warum dies so ist. Mit anderen Worten: Die Theorie sagt nicht, wie die höhere Geschwindigkeit über dem Flügel zustande kommt.

Neue Ideen zum Auftrieb

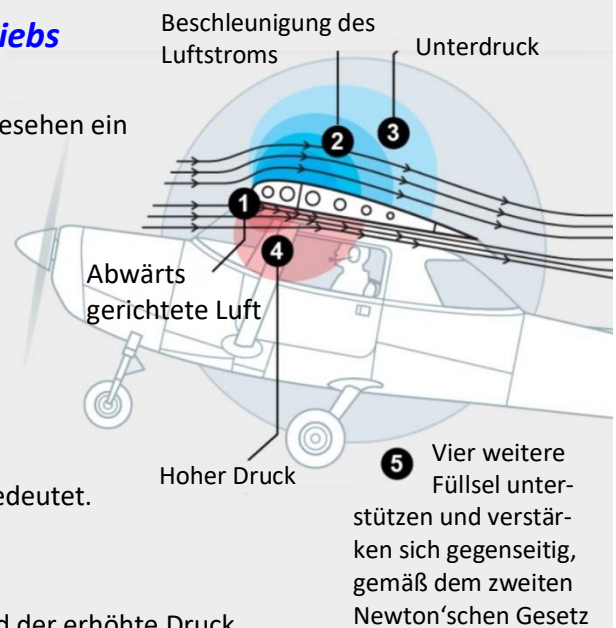
Die heutigen wissenschaftlichen Ansätze für die Konstruktion von Flugzeugen werden durch Simulationen der numerischen Strömungsmechanik (CFD) sowie durch Gleichungen bestimmt, die die tatsächliche Viskosität der realen Luft vollständig berücksichtigen. Obwohl wir immer noch keine eindeutige und zufriedenstellende physikalische, qualitative Erklärung für den Auftrieb haben, sind wir ihm durch neuere Versuche vielleicht ein Stück näher gekommen.

Co-Abhängigkeit der vier Elemente des Auftriebs

Bei der Anwendung auf einen Flugzeugflügel - technisch gesehen ein Tragflächenprofil - versucht die Bernoulli-Theorie, den Auftrieb als Folge der gekrümmten Oberseite des Flügels zu erklären. Der Gedanke dahinter ist, dass sich die Luft, die sich über die Oberseite des Flügels bewegt, aufgrund dieser Krümmung schneller bewegt als die Luft, die sich entlang der Unterseite des Flügels bewegt, die flach ist. Die Theorie von Bernoulli besagt, dass die höhere Geschwindigkeit an der Oberseite des Flügels mit einem Bereich niedrigeren Drucks verbunden ist, was Auftrieb bedeutet.

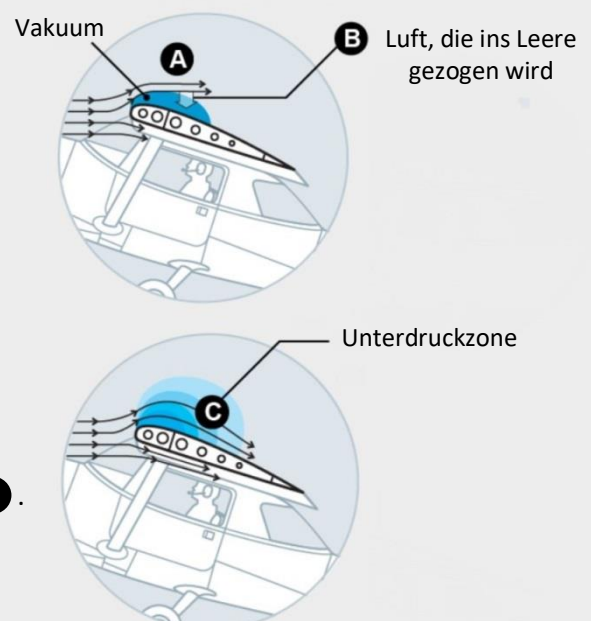
Aber ...

Obwohl [McLean](#) sagt, dass der verringerte Druck oben und der erhöhte Druck unten darauf zurückzuführen ist, dass das Profil "vollständig von strömender Luft umgeben ist", erklärt dies nicht, wie der verringerte Druck oben ursprünglich zustande kam.



Wie sich der Unterdruck über dem Flügel bildet

[Mark Drela](#), ein Experte für Strömungsdynamik, hat versucht zu ergründen, was Newton und Bernoulli entgangen ist: wie die Niederdruckzone oder das Teilvakuum über der Tragfläche zustande kommt. Die Luft oberhalb des Flügels strömt vorübergehend direkt zurück nach **A** und bildet einen Hohlraum oder ein Vakuum. Dieser Unterdruck zieht dann die Luft wieder stark nach unten **B**, füllt sich auf und beseitigt so den größten Teil des Unterdrucks, aber nicht alles. Es bleibt gerade noch genug Vakuum übrig, um die Luft in die gekrümmte Bahn zu ziehen, die dem Flügel folgt **C**.



Es gibt viele schlechte Erklärungen für die höhere Geschwindigkeit. Die gängigste ist die Theorie der "gleichen Durchgangszeit":

Luftpakete, die sich an der Vorderkante des Flügels trennen, müssen sich an der Hinterkante gleichzeitig wieder treffen. Da das obere Luftpaket in einer gegebenen Zeitspanne eine größere Strecke zurücklegt als das untere, muss es schneller fliegen.

Der Trugschluss besteht darin, dass es keinen physikalischen Grund dafür gibt, dass die beiden Pakete die Hinterkante gleichzeitig erreichen müssen. Und in der Tat ist das nicht der Fall: Es ist eine empirische Tatsache, dass sich das Luftpaket viel schneller bewegt, als es die Theorie der gleichen Transitzeit erklären könnte.

Es gibt auch eine berühmte "Demonstration" des Bernoulli-Prinzips, die in vielen populären Berichten, YouTube-Videos und sogar in einigen Lehrbüchern wiederholt wird. Dabei hält man ein Blatt Papier waagrecht vor den Mund und pustet über die gewölbte Oberseite des Papiers. Das Blatt hebt sich, was angeblich den Bernoulli-Effekt veranschaulichen soll. Das umgekehrte Ergebnis sollte eintreten, wenn man über die Unterseite des Blattes pustet: Die Geschwindigkeit der sich bewegenden Luft unter dem Blatt sollte das Blatt nach unten ziehen. Stattdessen hebt sich das Blatt paradoxerweise.

Das Anheben des gebogenen Papiers bei einseitiger Anströmung "liegt nicht daran, dass sich die Luft auf den beiden Seiten unterschiedlich schnell bewegt", erklärt [Holger Babinsky, Professor für Aerodynamik an der Universität Cambridge](#), in seinem Artikel "Wie funktionieren Flügel?".

Um dies zu demonstrieren, bläst man über ein gerades Stück Papier - zum Beispiel eines, das so gehalten wird, dass es senkrecht nach unten hängt - und stellt fest, dass sich das Papier weder in die eine noch in die andere Richtung bewegt, weil "der Druck auf beiden Seiten des Papiers gleich ist, trotz des offensichtlichen Geschwindigkeitsunterschieds".

Der zweite Mangel der Bernoulli-Theorie besteht darin, dass es keine Aussage darüber macht, wie oder warum die höhere Geschwindigkeit oben auf dem Flügel einen niedrigeren Druck und nicht einen höheren Druck mit sich bringt. Man könnte meinen, dass die Krümmung eines Flügels die Luft nach oben verdrängt und diese komprimiert wird, was zu einem höheren Druck auf dem Flügel führt.

Diese Art von "Engpass" verlangsamt die Dinge im normalen Leben eher, als dass sie sie beschleunigt. Wenn sich auf einer Autobahn zwei oder mehr Fahrspuren zu einer vereinigen, fahren die beteiligten Autos nicht schneller, sondern es kommt zu einer Massenverlangsamung und möglicherweise sogar zu einem Stau. Luftmoleküle, die auf einer Tragfläche strömen, verhalten sich nicht so, aber Bernoullis Theorie sagt nicht, warum nicht.

Das dritte Problem liefert das entscheidende Argument dagegen, den Satz von Bernoulli als vollständige Erklärung des Auftriebs zu betrachten: Ein Flugzeug mit einer gekrümmten Oberseite kann auch im Rückenflug fliegen. Im Rückenflug wird die gewölbte Flügeloberfläche zur Unterseite, und nach dem Satz von Bernoulli erzeugt sie dann einen geringeren Druck unter dem Flügel. Dieser geringere Druck, der zur Schwerkraft hinzukommt, sollte insgesamt bewirken, dass das Flugzeug nach unten gezogen wird, anstatt es oben zu halten.

Darüber hinaus können Flugzeuge mit symmetrischen Tragflächen, mit gleicher Krümmung auf der Ober- und Unterseite - oder sogar mit flachen Ober- und Unterseiten - auch im Rückenflug fliegen, solange die Tragfläche in einem geeigneten Anstellwinkel auf den Gegenwind trifft. Das bedeutet, dass die Bernoulli-Theorie allein nicht ausreicht, um diese Tatsachen zu erklären.

Die andere Theorie des Auftriebs beruht auf dem dritten Newton'schen Bewegungsgesetz, dem Prinzip von Aktion und Reaktion. Die Theorie besagt, dass ein Flügel ein Flugzeug in der Luft hält, indem er die Luft nach unten drückt. Luft hat eine Masse, und aus dem dritten Newton'schen Gesetz folgt, dass der Abwärtsdruck des Flügels zu einem gleich großen und entgegengesetzten Aufwärtsdruck führt, also zum Auftrieb. Die Newton'sche Erklärung gilt für

Tragflächen jeder Form, ob gebogen oder flach, symmetrisch oder nicht. Sie gilt auch für Flugzeuge, die auf dem Kopf oder mit der rechten Seite nach oben fliegen. Die wirkenden Kräfte sind auch aus der alltäglichen Erfahrung bekannt - wenn Sie beispielsweise Ihre Hand aus einem fahrenden Auto herausstrecken und nach oben neigen, wird die Luft nach unten abgelenkt, und Ihre Hand hebt sich. Aus diesen Gründen ist das dritte Newton'sche Gesetz eine universellere und umfassendere Erklärung für den Auftrieb als die Theorie von Bernoulli.

Das Prinzip von Aktion und Reaktion allein erklärt aber auch nicht den geringeren Druck über der Tragfläche, der in diesem Bereich unabhängig von der Wölbung des Profils herrscht. Erst wenn ein Flugzeug landet und zum Stillstand kommt, verschwindet der Bereich des niedrigeren Drucks auf der Tragfläche, kehrt zum Umgebungsdruck zurück und wird oben und unten gleich. Solange ein Flugzeug jedoch fliegt, ist dieser Bereich niedrigeren Drucks ein unausweichlicher Bestandteil des aerodynamischen Auftriebs und muss erklärt werden.

Historisches Verständnis

Weder Bernoulli noch Newton versuchten bewusst zu erklären, was Flugzeuge aufrecht hält, denn sie lebten lange vor der eigentlichen Entwicklung des mechanischen Flugs. Ihre jeweiligen Gesetze und Theorien wurden erst wieder aufgegriffen, als die Gebrüder Wright flogen und es zu einer ernsthaften und dringenden Aufgabe für Wissenschaftler wurde, den aerodynamischen Auftrieb zu verstehen.

Die meisten dieser theoretischen Darstellungen kamen aus Europa. In den ersten Jahren des 20. Jahrhunderts entwickelten mehrere britische Wissenschaftler technische, mathematische Erklärungen des Auftriebs, die die Luft als perfektes Fluid betrachteten, d. h. sie war inkompressibel und hatte keine Viskosität. Dies waren unrealistische, aber vielleicht verständliche Annahmen für Wissenschaftler, die sich mit dem neuen Phänomen des kontrollierten, angetriebenen mechanischen Flugs befassten. Diese Annahmen machten auch die zugrundeliegende Mathematik einfacher und überschaubarer, als sie es sonst gewesen wäre, aber diese Einfachheit hatte ihren Preis:

So erfolgreich die Darstellung von Tragflächen, die sich in idealen Gasen bewegen, mathematisch auch sein mochte, empirisch blieb sie mangelhaft.

Einer der Wissenschaftler, die sich in Deutschland mit dem Problem des Auftriebs beschäftigten, war kein Geringerer als [Albert Einstein](#). Im Jahr 1916 veröffentlichte Einstein in der Zeitschrift Die Naturwissenschaften eine kurze Arbeit mit dem Titel *"Elementare Theorie der Wasserwellen und des Fluges"*, in der er zu erklären versuchte, was die Tragfähigkeit der Flügel von Flugmaschinen und Segelvögeln ausmacht.

"Es gibt eine Menge Unklarheiten über diese Fragen", schrieb Einstein. "In der Tat muss ich gestehen, dass ich selbst in der Fachliteratur nie eine einfache Antwort darauf gefunden habe."

Einstein fuhr dann fort, eine Erklärung zu geben, die von einem inkompressiblen, reibungsfreien Fluid - also einem idealen Fluid - ausging. Ohne Bernoulli namentlich zu erwähnen, gab er eine Erklärung, die mit dem Bernoulli-Prinzip übereinstimmt, indem er sagte, dass der Druck einer Flüssigkeit dort größer ist, wo ihre Geschwindigkeit langsamer ist, und umgekehrt. Um diese Druckunterschiede auszunutzen, schlug Einstein ein Tragflächenprofil mit einer Ausbuchtung an der Oberseite vor, so dass die Form die Strömungsgeschwindigkeit über der Ausbuchtung erhöhen und somit den Druck auch dort verringern würde.

Einstein dachte wahrscheinlich, dass seine Analyse des idealen Fluids auch für reale Strömungen gelten würde. Auf der Grundlage seiner Theorie entwarf [Einstein](#) 1917 ein Tragflächenprofil, das später wegen seiner Ähnlichkeit mit dem Buckel einer sich streckenden Katze als Katzenrückenflügel bekannt wurde. Er brachte den Entwurf zum Flugzeughersteller LVG (Luftverkehrsgesellschaft) in Berlin, der daraufhin eine neue Flugmaschine baute.

Ein Testpilot berichtete, dass das Flugzeug in der Luft herumwatschelte wie "eine schwangere Ente". Viel später, im Jahr 1954, bezeichnete Einstein selbst seinen Ausflug in die Luftfahrt als "Jugendtorheit". Der Mensch, der uns radikal neue Theorien lieferte, die sowohl die kleinsten als auch die größten Bestandteile des Universums durchdrangen,

hat es dennoch nicht geschafft, einen positiven Beitrag zum Verständnis des Auftriebs zu leisten oder ein praktisches Tragflächenprofil zu entwerfen.

Auf dem Weg zu einer vollständigen Theorie des Auftriebs

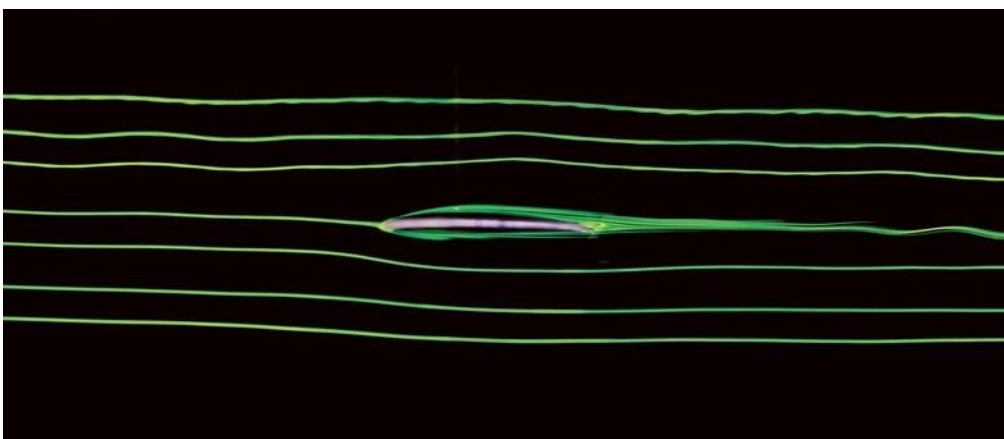
Heutige wissenschaftliche Ansätze für die Konstruktion von Flugzeugen beruhen auf CFD-Simulationen (Computational Fluid Dynamics) und den so genannten Navier-Stokes-Gleichungen, die die tatsächliche Viskosität der realen Luft vollständig berücksichtigen. Die Lösungen dieser Gleichungen und die Ergebnisse der CFD-Simulationen liefern Vorhersagen über die Druckverteilung, Luftströmungsmuster und quantitative Ergebnisse, die die Grundlage für die hochmodernen Flugzeugkonstruktionen von heute bilden. Dennoch liefern sie allein keine physikalische, qualitative Erklärung des Auftriebs.

In den letzten Jahren hat der führende Aerodynamiker [Doug McLean](#) jedoch versucht, über den reinen mathematischen Formalismus hinauszugehen und sich mit den physikalischen Ursache-Wirkungs-Beziehungen auseinanderzusetzen, die den Auftrieb in all seinen realen Erscheinungsformen erklären. [McLean](#), der die meiste Zeit seiner beruflichen Laufbahn als Ingenieur bei [Boeing Commercial Airplanes](#) verbracht hat, wo er sich auf die Entwicklung von CFD-Codes spezialisiert hat, veröffentlichte seine neuen Ideen 2012 in dem Buch [Understanding Aerodynamics: Arguing from the Real Physics](#).

In Anbetracht der Tatsache, dass das Buch mehr als 500 Seiten mit ziemlich dichten technischen Analysen umfasst, ist es überraschend, dass es einen Abschnitt (7.3.3) mit dem Titel ["A Basic Explanation of Lift on an Airfoil, Accessible to a Nontechnical Audience"](#) enthält. Die Erstellung dieser 16 Seiten war für [McLean](#), einen Meister des Fachs, nicht einfach; in der Tat war dies "wahrscheinlich der am schwierigsten zu schreibende Teil des Buches", sagt der Autor. "Er wurde öfter überarbeitet, als ich zählen kann. Ich war nie ganz zufrieden damit."

[McLeans](#) komplexe Erklärung des Auftriebs beginnt mit der Grundannahme der gesamten gewöhnlichen Aerodynamik: Die Luft um einen Flügel wirkt wie "ein kontinuierliches Material, das sich verformt, um den Konturen des Tragflügels zu folgen". Diese Verformung besteht in Form einer tiefen Strömungsspur sowohl über als auch unter dem Flügel.

"Das Tragflächenprofil beeinflusst den Druck in einem weiten Bereich, dem so genannten Druckfeld", schreibt [McLean](#). "Wenn Auftrieb erzeugt wird, bildet sich immer eine diffuse Wolke niedrigen Drucks über dem Profil und eine diffuse Wolke hohen Drucks gewöhnlich darunter. Dort, wo diese Wolken das Profil berühren, bilden sie die Druckdifferenz, die den Auftrieb auf das Profil ausübt."



Wasserkanaltest der [NASA](#) mit fluoreszierendem Farbstoff, um das Strömungsfeld über einer Flugzeugtragfläche zu visualisieren. Die geraden Linien, die sich von links nach rechts bewegen und sich beim Auftreffen auf die Tragfläche krümmen, helfen, die Physik des Auftriebs zu veranschaulichen.

Der Flügel drückt die Luft nach unten, was zu einer Abwärtsdrehung des Luftstroms führt. Die Luft oberhalb des Flügels wird gemäß dem Bernoulli-Prinzip beschleunigt. Außerdem gibt es unterhalb des Flügels einen Bereich mit hohem Druck und oberhalb ebenso einen Bereich mit niedrigem Druck. Das bedeutet, dass es in [McLeans](#) Erklärung des

Auftriebs vier notwendige Komponenten gibt: eine Abwärtsdrehung des Luftstroms, eine Erhöhung der Geschwindigkeit des Luftstroms, ein Gebiet mit niedrigem Druck und ein Gebiet mit hohem Druck.

Aber es ist die Wechselbeziehung zwischen diesen vier Elementen, die der neuartigste und markanteste Aspekt von [McLeans](#) Erklärung ist. "Sie unterstützen sich gegenseitig in einer wechselseitigen Ursache-Wirkungs-Beziehung, und keines der Elemente würde ohne die anderen existieren", schreibt er. "Die Druckunterschiede üben die Auftriebskraft auf das Profil aus, während die Abwärtsdrehung der Strömung und die Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit die Druckunterschiede aufrechterhalten." Diese Wechselbeziehung ist das fünfte Element von [McLeans](#) Erklärung: die Wechselwirkung zwischen den anderen vier Komponenten. Es ist, als ob sich diese vier Komponenten gemeinsam durch gleichzeitige Akte gegenseitiger Schöpfung und Verursachung selbst ins Leben rufen und erhalten.

In dieser Synergie scheint ein Hauch von Magie zu liegen. Der Prozess, den [McLean](#) beschreibt, scheint so zu sein, als würden sich vier Akteure gegenseitig an den Stiefeln ziehen, um sich gemeinsam in der Luft zu halten. Oder, wie er einräumt, handelt es sich um einen Fall von "zirkulärer Ursache und Wirkung". Wie ist es möglich, dass jedes Element der Interaktion alle anderen unterstützt und stärkt? Und wie kommt es zu dieser gegenseitigen, wechselseitigen, dynamischen Interaktion?

[McLeans](#) Antwort: Das zweite Newton'sche Bewegungsgesetz.

Newtons zweites Gesetz besagt, dass die Beschleunigung eines Körpers oder eines Flüssigkeitspakets proportional zu der auf ihn ausgeübten Kraft ist. "Das zweite Newton'sche Gesetz besagt, dass ein Druckunterschied, der eine Nettokraft auf ein Flüssigkeitspaket ausübt, eine Änderung der Geschwindigkeit oder der Richtung (oder beides) der Bewegung des Pakets bewirken muss", erklärt [McLean](#). Aber umgekehrt hängt der Druckunterschied von der Beschleunigung des Pakets ab und ist deshalb vorhanden.

Bekommen wir hier nicht etwas für nichts? [McLean](#) meint nein: Wenn der Flügel ruhen würde, gäbe es keinen Teil dieses Bündels sich gegenseitig verstärkender Aktivitäten. Aber die Tatsache, dass sich der Flügel durch die Luft bewegt, wobei sich jedes Paket auf alle anderen auswirkt, bringt diese voneinander abhängigen Elemente ins Leben und erhält sie während des gesamten Fluges aufrecht.

Berücksichtigung der Gegenseitigkeit des Auftriebs

Kurz nach der Veröffentlichung von "[Understanding Aerodynamics](#)" erkannte [McLean](#), dass er nicht alle Elemente des aerodynamischen Auftriebs vollständig berücksichtigt hatte, weil er nicht überzeugend erklärt hatte, warum sich der Druck auf den Flügel gegenüber der Umgebung verändert. Daher veröffentlichte [McLean](#) im November 2018 einen zweiteiligen Artikel in [The Physics Teacher](#), in dem er eine "umfassende physikalische Erklärung" des aerodynamischen Auftriebs vorschlägt.

Obwohl der Artikel weitgehend [McLeans](#) frühere Argumentation wieder aufgreift, versucht er auch, eine bessere Erklärung dafür zu liefern, warum das Druckfeld ungleichmäßig ist und die physikalische Form annimmt, die es hat. Insbesondere führt seine neue Argumentation eine gegenseitige Wechselwirkung auf der Ebene des Strömungsfeldes ein, so dass das ungleichmäßige Druckfeld das Ergebnis einer angewandten Kraft ist, nämlich der nach unten gerichteten Kraft, die das Tragflächenprofil auf die Luft ausübt.

Ob es [McLean](#) in Abschnitt 7.3.3 und in seinem Folgeartikel gelingt, eine vollständige und korrekte Erklärung des Auftriebs zu liefern, ist offen für Interpretationen und Diskussionen. Es gibt Gründe dafür, dass es schwierig ist, eine klare, einfache und zufriedenstellende Darstellung des aerodynamischen Auftriebs zu geben.

Zum einen sind Flüssigkeitsströmungen komplexer und schwieriger zu verstehen als die Bewegungen fester Objekte, insbesondere Flüssigkeitsströmungen, die sich an der Vorderkante des Flügels trennen und an der Ober- und Unterseite unterschiedlichen physikalischen Kräften ausgesetzt sind.

Bei einigen der Streitigkeiten über den Auftrieb geht es nicht um die Fakten selbst, sondern darum, wie diese Fakten zu interpretieren sind, was Fragen aufwerfen kann, die sich unmöglich durch Experimente entscheiden lassen.

Dennoch gibt es an dieser Stelle nur wenige offene Fragen, die einer Erklärung bedürfen. Der Auftrieb ist, wie Sie sich erinnern werden, das Ergebnis der Druckunterschiede zwischen dem oberen und dem unteren Teil eines Tragflügels. Wir haben bereits eine annehmbare Erklärung für das, was am unteren Teil eines Tragflügels geschieht:

Die ankommende Luft drückt sowohl vertikal (erzeugt Auftrieb) als auch horizontal (erzeugt Widerstand) auf den Flügel. Der Schub nach oben besteht in Form eines höheren Drucks unterhalb des Flügels, und dieser höhere Druck ist das Ergebnis einfacher Newtonscher Aktion und Reaktion.

An der Oberseite des Flügels liegen die Dinge jedoch ganz anders. Dort gibt es einen Bereich mit niedrigerem Druck, der ebenfalls Teil der aerodynamischen Auftriebskraft ist. Aber wenn weder das Bernoulli-Prinzip noch das dritte Newton'sche Gesetz eine Erklärung liefern, was dann?

Aus den Stromlinien wissen wir, dass sich die Luft über dem Flügel eng an die nach unten gerichtete Krümmung des Tragflügels anschmiegt. Aber warum müssen die Luftpakete, die sich über die Oberseite des Flügels bewegen, der abwärts gerichteten Krümmung des Flügels folgen? Warum können sie sich nicht von ihr lösen und gerade zurückfliegen?

[Mark Drela](#), Professor für Strömungsdynamik am Massachusetts Institute of Technology und Autor des Buches *Flight Vehicle Aerodynamics*, gibt eine Antwort:

"Wenn die Pakete kurzzeitig tangential zur Oberfläche des Tragflügels fliegen würden, würde unter ihnen buchstäblich ein Vakuum entstehen", erklärt er. "Dieses Vakuum würde dann die Pakete nach unten saugen, bis sie das Vakuum größtenteils ausfüllen, d. h. bis sie sich wieder tangential zur Tragfläche bewegen. Dies ist der physikalische Mechanismus, der die Pakete zwingt, sich entlang der Tragflächenform zu bewegen. Es verbleibt ein leichtes Teilvakuum, um die Pakete auf einer gekrümmten Bahn zu halten.

Dieses Wegziehen oder Herunterziehen der Luftpakete von den darüber liegenden Nachbarkpaketen ist es, was den Bereich niedrigeren Drucks auf dem Flügel erzeugt. Aber es gibt noch einen weiteren Effekt:

Die höhere Geschwindigkeit der Luftströmung über dem Flügel. "Der verringerte Druck über einem Hebeflügel 'zieht' auch horizontal an den Luftpaketen, wenn sie sich von stromaufwärts nähern, so dass sie eine höhere Geschwindigkeit haben, wenn sie oberhalb des Flügels ankommen", sagt [Drela](#). "Die erhöhte Geschwindigkeit über dem Hubflügel kann also als Nebeneffekt des geringeren Drucks dort betrachtet werden."

Aber wie immer, wenn es darum geht, den Auftrieb auf einer nichttechnischen Ebene zu erklären, hat ein anderer Experte eine andere Antwort. Der [Cambridge-Aerodynamiker Babinsky](#) sagt:

"Ich widerspreche nur ungern meinem geschätzten Kollegen [Mark Drela](#), aber wenn die Erzeugung eines Vakuums die Erklärung wäre, dann ist es schwer zu erklären, warum sich die Strömung manchmal trotzdem von der Oberfläche löst. Aber in allem anderen hat er Recht. Das Problem ist, dass es keine schnelle und einfache Erklärung gibt."

[Drela](#) selbst räumt ein, dass seine Erklärung in mancher Hinsicht unbefriedigend ist. "Ein offensichtliches Problem ist, dass es keine Erklärung gibt, die von allen akzeptiert wird", sagt er.

Was bedeutet das für uns? Im Grunde genau da, wo wir angefangen haben: bei [John D. Anderson](#), der feststellte:

"Es gibt keine einfache, einzeilige Antwort auf diese Frage."