

7. Fliegen und Luftfahrt

- 7.1 Statischer Auftrieb: Heißluftballon und Zeppelin
- 7.2 Dynamischer Auftrieb: Flugzeug
- 7.3 Vortrieb: Düsentriebwerk
- 7.4 Vogelflug
- 7.5 Biographie: Otto Lilienthal

Das Fliegen ist seit dem Altertum ein Traum der Menschheit gewesen, wie man z.B. im Mythos von Dädalus und Ikarus nachlesen kann. Aber erst im Jahre 1783 konnte dieser Traum zum ersten Male realisiert werden, und zwar durch Erfindungen der Brüder Montgolfier und ihres Landsmannes Jacques Alexandre Charles. Während die Montgolfiers es als erste schafften, Menschen mit einem Heißluftballon von der Erde abheben zu lassen, gelang dies Jacques Charles nur wenige Wochen später mit einem Wasserstoffballon. Weitere wichtige Stationen in der Geschichte der Luftfahrt waren der erste Gleitflug von Otto Lilienthal (1891) und der erste Motorflug der Gebrüder Wright (1903).

Beim Fliegen gibt es ähnlich wie beim Schwimmen zwei prinzipielle physikalische Probleme, die gelöst werden müssen: das des Auftriebs und des Vortriebs. Der Auftrieb bestimmt die für die Bewegung in vertikaler Richtung, der Vortrieb den Bewegungsanteil in horizontaler Richtung. Während im Wasser ein genügend großer Auftrieb im Wasser durch eine geeignete Formgebung erreicht werden kann, stellt der Auftrieb beim Fliegen das entscheidende Problem dar. Dieses Problem musste gelöst werden, bevor sich der Mensch in die Lüfte erheben konnte.

7.1 Statischer Auftrieb: Heißluftballon und Zeppelin

Das Archimedische Prinzip besagt, dass ein Körper im Wasser eine Auftriebskraft erfährt, die gerade der Gewichtskraft der verdrängten Wassermenge entspricht. Natürlich erfährt auch ein Körper in Luft eine entsprechende Auftriebskraft, die der Gewichtskraft der verdrängten Luftmenge entspricht. Da jedoch die Dichte der Luft etwa 1000 mal kleiner ist als die des Wassers, ist die entsprechende Auftriebskraft sehr gering. Ein Beispiel: Ein Mensch von 70 kg erfährt in Luft eine Auftriebskraft, die etwa einer Masse von 100 g entspricht, d.h. sein Gewicht wäre im Vakuum würde um diesen Betrag größer.

Versuch: Statischer Auftrieb in Luft

An den Armen einer kleinen Balkenwaage hängen zwei Körper gleicher Masse, aber mit sehr unterschiedlichem Volumen. Bringt man diese Anordnung unter eine Vakuummglocke und pumpt die Luft ab, so senkt sich die Seite mit dem voluminösen Körper.

Dennoch lässt sich - im Prinzip und in der Praxis - das Archimedische Prinzip auch für die Luftfahrt verwenden. Den daraus resultierenden Auftrieb nennt man den statischen Auftrieb, da er auch auf ruhende Körper wirkt, im Unterschied zum dynamischen Auftrieb, der erst bei sich bewegenden Flugkörper wirksam wird.

Da der statische Auftrieb in Luft sehr klein ist, müssen die Volumina der verdrängten Luftmenge sehr groß sein, um selbst kleine Massen in die Luft heben zu können. Die

Kraft für den statischen Auftrieb F_{st} und die Gesamtkraft F berechnen sich aus den Formeln

$$F_{st} = \rho_L \cdot V_B \cdot g,$$

$$F = m_B \cdot g - F_{st}$$

worin V_B das Volumen des Ballons, m_B seine gesamte Masse einschließlich des Füllgases, z.B. der heißen Luft, ρ_L die Dichte der Umgebungsluft und g die Erdbeschleunigung sind. Beim Heißluftballon nutzt man aus, dass heiße Luft eine kleinere Dichte als kalte hat. Jeder kennt die Beobachtung, dass heiße Luft aufsteigt. Um ein Beispiel zu geben: Wenn Luft auf 300 °C erhitzt wird, hat sie gerade die halbe Dichte der Luft bei 20°C. Ein Ballon von 100 m³ Fassungsvermögen, der mit Luft von 300°C gefüllt ist, könnte dann gerade einen Menschen hochheben. Bei den Gebrüder Montgolfier hatte der erste Ballon ein Volumen von 600 m³. Heute haben Heißluftballons für den kommerziellen Gästetransport ein Volumen von ca. 6000 m³ und können bis zu etwa 10 Passagiere befördern.

Versuch: Heißluftballon

Ein einfacher Ballon aus dünner Plastikfolie dessen Öffnung mit einem Draht versteift ist, wird über einen Esbitbrenner gehalten und mit heißer Luft gefüllt. Lässt man ihn nach einer gewissen Zeit los, so steigt er nach oben.

Die Gebrüder Montgolfier konnten das Prinzip des Vortriebs noch nicht lösen. Ihr Ballon war nicht steuerbar und wurde wie die heutigen Heißluftballons vom Winde getrieben. Erst Graf Zeppelin benutzte bei seinen Starrluftschiffen motorgetriebene Propeller, um einen mit Wasserstoff gefüllten Ballon in vorgegebener Richtung voranzubringen. Stand der Technik waren im Jahre 1914 Zeppeline mit Längen von 150-160 m und mit Volumina von 22.000 - 25.000 m³, die Nutzlasten bis zu 9 Tonnen tragen konnten. Sie wurden üblicherweise von drei Maybach-Motoren zu je 147 kW (200 PS) angetrieben und erreichten Geschwindigkeiten bis zu etwa 80 km/h.

7.2 Dynamischer Auftrieb: Flugzeug

Das Archimedische Prinzip des statischen Auftriebs hilft nicht, wenn man verstehen will, warum ein Flugzeug sich in die Luft erheben kann. Hierzu muss man den dynamischen Auftrieb studieren. Ein Flugzeug wird sich nur dann in die Luft erheben, wenn es eine bestimmte Geschwindigkeit erreicht hat. Die Auftriebskraft entsteht im Wesentlichen an den Flügeln. Sie sind so geformt, dass die Luft, die oberhalb und unterhalb an ihnen vorbeiströmt, eine Kraft erzeugt, die nach oben gerichtet ist. Man kann diese Kraft qualitativ dadurch verstehen, dass die Luft, die an einem schräg angestellten Flügel nach unten abgelenkt wird. Die Kraft, die dabei am Flügel nach oben wirkt, hat die Form des Luftwiderstands, der auch beim Autofahren auftritt.

Die quantitative Erklärung benutzt die Bernoullische Formel für den Druck in einer strömenden Flüssigkeit oder einem strömenden Gas:

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{constant},$$

worin ρ die Dichte der Flüssigkeit bzw. des Gases und v ihre Geschwindigkeit sind. Der aktuelle Druck p in der Strömung hängt von der Geschwindigkeit ab. je höher die Geschwindigkeit, desto kleiner der Druck. Dieser Ausdruck ist nichts anderes als der

Energiesatz: die Summe aus potentieller und kinetischer Energie ist konstant. Multipliziert man die beiden Terme auf der linken Seite der obigen Gleichung mit dem Volumen V , so ist der Ausdruck $p \cdot V$ gleich der potentiellen und der Ausdruck $\frac{1}{2} \cdot (\rho \cdot V) \cdot v^2$ gleich der kinetischen Energie. In der Tat ist der Druck die Ursache für die Bewegung der Flüssigkeit. Diese Relation lässt sich schön in einem Versuch darstellen.

Versuche:

Ball im Luftstrom

Ein Ball wird zunächst in einen senkrecht nach oben gerichteten Luftstrom gebracht, in dem er in einer gewissen Höhe nahezu schwebt. Hierzu kann man z.B. einen Styroporball und ein Gebläse oder einen Gummiball und Pressluft verwenden.

Neigt man anschließend langsam den Luftstrom, so bleibt der Ball noch lange in der Luft, bevor er schließlich herunterfällt.

Strömende Flüssigkeit durch verschiedene Querschnitte

Eine Glasröhre hat in der Mitte einen kleineren Querschnitt als an den Enden. Lässt man Wasser durch die Röhre strömen, so zeigt sich, dass an der verengten Stelle der Wasserdruk geringer ist als an den Stellen mit größerem Querschnitt.

Anströmen eines Flügels

Lässt man aus einem Gebläse Luft gegen ein schräg gestelltes Flügelmodell strömen, so hebt sich der Flügel nach oben.

Diesen Effekt nutzt man aus, um einen Auftrieb für das Flugzeug zu erzeugen. Die Flügel müssen so geformt und unter einem solchen Winkel angestellt sein, dass auf der Oberseite des Flügels die Geschwindigkeit höher ist als auf der Unterseite. Dann ergibt sich eine Differenz des Druckes p_o auf der Oberseite und dem p_u auf der Unterseite:

$$p_o - p_u = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (v_u^2 - v_o^2) \approx \rho \cdot (v_u - v_o) \cdot (v_u + v_o) / 2,$$

worin sich die Indizes an den Geschwindigkeiten auf die Ober- bzw. Unterseite beziehen. Die Druckdifferenz ist also proportional zu der Differenz der Geschwindigkeiten $v_u - v_o$ an Unterseite und Oberseite des Flügels und proportional zu der Gesamtgeschwindigkeit $(v_u + v_o) / 2$ des Flugzeugs gegenüber der Luft. Typische Werte für ein modernes Passagierflugzeug sind $40 \text{ m/s} \approx 140 \text{ km/h}$ für die Differenz der Geschwindigkeiten und $250 \text{ m/s} \approx 900 \text{ km/h}$ für die mittlere Geschwindigkeit.

Die Kraft, die auf die Flügel wirkt, ist gleich der Druckdifferenz multipliziert mit der Fläche der Flügel. Bei einem Jumbojet ist die gesamte wirksame Flügelfläche etwa 700 m^2 , wobei die zwei Flügel ca. 500 m^2 , das Höhenleitwerk ca. 100 m^2 und der Rumpf ca. 100 m^2 beitragen. Diese Kraft reicht aus, um ein Flugzeug von ca. 300 t in der Luft zu halten.

7.3 Vortrieb: Düsentriebwerk

Die modernen Passagierflugzeuge werden durch Düsentriebwerke angetrieben: Dieser Antrieb erzeugt Kräfte, die zum größten Teil (ca. 90%) dem Auftrieb dienen, während etwa 10% in den Vortrieb gehen. Das Prinzip der Düsentriebwerke, das Rückstoßprinzip, ist sehr einfach und lässt sich im folgenden Versuch zeigen:

Versuch: Raketenwagen

Auf einem flachen Wagen ist eine Flasche mit Pressluft befestigt. Lässt man die Luft aus dem Ventil ausströmen nach hinten ausströmen, so bewegt sich der Wagen (mit dem Insassen) beschleunigt nach vorne.

Die technisch eingesetzten Triebwerke sind natürlich sehr ausgefeilte Apparate. Wir zeigen ein Schema in Abb. Von links tritt die Luft ein, wo sie von einem rotierenden Schaufelrad („Verdichter“) erfasst und nach rechts beschleunigt wird. In der dahinter liegenden Brennkammer wird Benzin eingespritzt und gezündet, wodurch Temperatur und Druck weiter steigen und die Luft nochmals nach rechts beschleunigt wird. Bevor sie aus dem Triebwerk austreten kann, trifft sie einen Propeller, die Turbine, der mit dem Verdichter verbunden ist, und beschleunigt ihn. Dann tritt das Gas aus und erzeugt den Rückstoß. Typische Werte sind: Das Volumen der pro Sekunde angesaugten und wieder austretenden Luft beträgt ca. 1000 m^3 , ihre Austrittsgeschwindigkeit ca. $160 \text{ m/s} = 580 \text{ km/h}$.

Auch wenn die Flugzeuge ungeheure Mengen von Benzin tanken müssen, ist der spezifische Energieverbrauch beim Fliegen nicht wesentlich größer als bei anderen Formen der Fortbewegung. Wenn man die gesamte verbrauchte Menge Benzin umrechnet auf die Zahl der Passagiere und auf die Strecke, so erhält man einen Verbrauch von $4,5 \text{ l}$ Benzin pro Person und pro 100 km Strecke. Das ist etwa soviel, wie ein normales Personenauto, das mit zwei Personen besetzt ist, verbraucht. Nur sind die mit dem Flugzeug zurückgelegten Strecken i.a. viel größer als die mit dem Auto, so dass der Gesamtverbrauch pro Person eben doch gewaltig ist.

7.5 Vogelflug

Auch ein fliegender Vogel muss, wie das Flugzeug, Auf- und Vortrieb erzeugen, um sich in der Luft fortzubewegen. Er erreicht das durch eine geschickte Bewegung der Flügel. Das kinetische Wirkprinzip besteht aus einer gekoppelten Schlag- und Drehbewegung der Flügel. Wir wollen das Prinzip, das schon Lilienthal durch genaue Beobachtung des Vogelfluges herausgefunden hatte, hier kurz beschreiben.

Hierbei wollen wir nicht die komplizierte Beschreibung mit Hilfe der Druckverhältnisse an einem umströmten Flügel benutzen, sondern uns auf die Widerstandskraft beschränken, die der Flügel erfährt, wenn er mit der Geschwindigkeit v durch die Luft bewegt wird:

$$F_R = \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot \rho \cdot A \cdot v^2$$

Hierin sind c_w der Widerstandsbeiwert, ρ die Dichte der Luft und A die Fläche des Flügels senkrecht zur Bewegungsrichtung. Auftrieb und Vortrieb werden durch Auf- und Abschlag der Flügel bewirkt. Beim Abschlag wird die Flügelspitze nach unten gestellt, so dass die wirkende Kraft eine Komponente in Vorwärtsrichtung (Vortrieb) und eine Komponente senkrecht nach oben (Auftrieb) hat. Zum Aufschlag, wird der Flügel gedreht, so dass die Flügelspitze nach oben zeigt. Die resultierende Widerstandskraft hat wieder eine Komponente nach vorne und trägt zum Vortrieb bei, während die senkrechte Komponente nach unten zeigt und dem Auftrieb entgegen wirkt. Schon Leonardo da Vinci hat beobachtet, dass die Schwungfedern eines Flügels dank einer raffinierten gegenseitigen Überdeckung eine variable Spannfläche bilden. Beim Abschlag überlappen sie sich, so dass ein völlig spaltfreies Gefüge entsteht.

Beim Aufschlag heben sich die Federn dagegen voneinander ab, so dass die Luft zwischen ihnen hindurch strömen kann. Damit ergibt sich ein Unterschied im Widerstandsbeiwert zwischen Auf- und Abschwung.

Interessant ist auch, wie viel Energie eine Vogel beim Fliegen verbraucht, insbesondere um zu sehen, ob die Natur effizientere Lösungen als die Technik gefunden hat. Zunächst sieht man aus den Kurven, dass der Energieverbrauch für verschiedene Vögel sehr stark differiert. Vergleicht man den Energieverbrauch beim Vogelflug mit dem der Zivilluftfahrt, findet man, dass der Vogelflug gar nicht soviel sparsamer ist. Bezogen auf gleiche Masse und gleiche Entfernung beträgt der spezifische Energieverbrauch eines Vogels etwa 30 % der auf einen Flugpassagier anfallenden Energie. Da die Masse der Passagiere nur etwa 10 % der Gesamtmasse eines betankten Flugzeugs ausmacht, ist der spezifische Energieverbrauch des gesamten Flugzeugs geringer als der eines Vogels.

7.5 Biographie: Otto Lilienthal (1848 - 1896)

"Von allen, die das Problem des Fliegens im 19. Jahrhundert behandelten, war Otto Lilienthal zweifelsfrei der Bedeutendste."

Wilbur Wright

Otto Lilienthal war der älteste Sprössling einer kinderreichen Familie, doch außer seinem Bruder Gustav (1849 - 1933) und seiner 8 Jahre jüngeren Schwester starben alle weiteren Kinder bereits in den ersten Lebensjahren. Sein Vater war ein Kaufmann, der sich sehr für Mathematik und Technik interessierte. Als die Geschäfte schlecht liefen, beschloss die Familie, nach Amerika auszuwandern. Der plötzliche Tod des Vaters machte diesen Plänen ein jähes Ende. Damals war Otto 12 Jahre alt und besuchte das Gymnasium in seiner Heimatstadt Anklam in Mecklenburg-Vorpommern. Unter großen Anstrengungen schaffte es die Mutter, den beiden Brüdern eine gute Ausbildung zu ermöglichen. Bereits während ihrer Gymnasialzeit beobachteten die beiden den Flug großer Vögel, insbesondere der Störche in ihrer pommerschen Heimat. Dabei stellten sie fest, dass die Vögel sich beim Losfliegen immer gegen den Wind stellten, und folgerten daraus, dass beim Anströmen der Luft auf der Oberseite des Flügels ein Sog entsteht, der für den nötigen Auftrieb sorgt. Auf Grund dieser Beobachtungen und Erkenntnisse bauten die beiden Brüder bereits 1862 ihren ersten Flugapparat.



Mit 16 Jahren machte Otto seinen Schulabschluss mit sehr guten Noten, besuchte anschließend 2 Jahre lang die Potsdamer Provinzialgewerbeschule und fing danach ein Praktikum in einer Berliner Maschinenfabrik an. Im Oktober 1867 begann er sein Studium an der Gewerbeakademie Berlin, der späteren TU Charlottenburg. Ein Stipendium, das er wohl auch wegen seiner flugtechnischen Aktivitäten erhalten hatte, verbesserte seine Lebenssituation beträchtlich. Nach dem Ende seiner Ausbildung im Jahre 1870 wollte ihn der Leiter der Akademie zu seinem Assistenten machen, doch Lilienthal verzichtete und zog stattdessen als "Einjährig-Freiwilliger" in den Deutsch-Französischen Krieg von 1870/71.

Über die folgende Dekade wird relativ wenig berichtet. Otto war in einer Berliner Maschinenbaufirma angestellt und bemühte sich zusammen mit seinem Bruder, ein eigenes Unternehmen zu gründen. Doch zunächst waren die beiden nicht erfolgreich, da u.a. eine Patentanmeldung fehlschlug und die Vermarktung eines Baukastens für Kinder, der von einer anderen Firma übernommen wurde und auch heute noch mit großem Erfolg verkauft wird, nicht gelang. In diese Zeit fällt auch Otto Lilienthals erster öffentlicher Vortrag über die Theorie des Vogelflugs sowie der Eintritt der beiden Brüder in die Aeronautical Society of Great Britain, ferner die Hochzeit Otto Lilienthals mit Agnes Fischer und die Geburt des Sohnes Otto, des ersten von 4 Kindern.

Im Jahre 1881 wurde die Maschinen- und Dampfkesselfabrik Otto Lilienthal gegründet, die unter diesem Namen bis zum Ersten Weltkrieg existierte. Es waren einige Patente, die den erhofften Erfolg brachten. Die Fabrik beschäftigte bald etwa 60 Mitarbeiter und stellte u.a. kleinere Dampfmaschinen und Motoren her. Sie wurde überaus modern geführt, schon nach einigen Jahren erhielten die Arbeiter eine Gewinnbeteiligung von 25 % des Reingewinns. Nun hatte Lilienthal das Geld, um sich seinen Traum vom Fliegen zu erfüllen. Zunächst leistete er zusammen mit seinem Bruder die theoretischen Vorarbeiten, die er 1889 in seinem Buch "Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst" veröffentlichte. Auch wenn die Zeitgenossen dieses Werk nicht sonderlich beachteten, so gilt es auch heute noch als die wichtigste flugtechnische Arbeit des 19. Jahrhunderts.

Die Brüder Lilienthal hatten erkannt, dass die Form der Flügel von entscheidender Bedeutung ist für das Fliegen mit Apparaten, die schwerer als Luft sind. Hierbei kamen sie durch klug angelegte Versuche zu dem wichtigen Ergebnis, dass gewölbte Tragflächen einen größeren Auftrieb als ebene liefern. Die Gebrüder Wright bezeichneten später die Lilienthalschen Tabellen als das Beste, was zu jener Zeit verfügbar war.

Nach der Veröffentlichung des Buches betrachtete Otto Lilienthal die Phase der Vorarbeiten als abgeschlossen. Er besaß nun ausreichend theoretische Kenntnisse, um praktische Flugversuche zu wagen. Da sich sein Bruder hieran nicht beteiligte, wird der erste Menschenflug heute ausschließlich Otto Lilienthal zugeschrieben.

Die ersten sicheren Gleitflüge gelangen ihm in Jahre 1891 nach der Methode " vom Sprung zum Flug". Die Flügel bestanden aus Weidholzrahmen, die mit gewachstem Baumwollstoff bespannt wurden; sie hatten eine Spannweite von etwa 6,6 m und eine Tragfläche von ca. 14 m². Die ersten Flüge, die ihn nur 6 bis 7 Meter weit trugen führte er in seinem Garten aus. Doch schon bald suchte er geeignete "Flugplätze" in der Nähe von Berlin, die schon bald Flüge mit größeren Weiten ermöglichten. Wichtig für die Auswahl dieser Plätze war, dass er bei jeder Windrichtung starten konnte. Sein Hauptübungsplatz ab 1893 lag bei Stölln; dort gelangen ihm Flugweiten bis zu 250 m. Auf diesem Gelände führte er im Jahre 1896 auch seinen letzten Flug durch. Er konnte eine plötzlich aufkommende Windbö nicht mehr aussteuern und stürzte aus 15 m Höhe ab. Obwohl er noch in eine Berliner Klinik gebracht werden konnte, starb er am darauffolgenden Tage an den beim Aufprall erlittenen Verletzungen.

Otto Lilienthal hat insgesamt mindestens 21 Fugapparate gebaut, darunter auch einige mit beweglichen Flügeln, sog. Flügelschlagapparate. Im Jahre 1894 ging sogar eines seiner Gleitflugzeuge, der sog. Normalsegelapparat in seiner Maschinenfabrik in Serienproduktion.

Nach dem Tode Otto Lilienthals arbeiteten viele Flugpioniere nach seiner Methode weiter, wodurch im Jahre 1903 der Motorflug durch die Gebrüder Wright verwirklicht werden konnte.

Otto Lilienthal gilt heute als der erste erfolgreiche Flieger der Menschheit, nach dem heute viele Straßen und Plätze und der Berliner Flughafen Tegel benannt sind. Er selbst stellte in einem Vortrag im November 1894 seine Leistung recht bescheiden dar. Er sagte damals: *"Zum Schluß möchte ich Sie noch bitten, das von mir Erreichte nicht für mehr zu halten, als es an und für sich ist. Auf den Photographien, wo Sie mich hoch in der Luft dahinfliegen sehen, macht es den Eindruck, als wäre das Problem schon gelöst. Das ist durchaus nicht der Fall. Ich muß bekennen, dass es noch sehr vieler Arbeit bedarf, um dieses einfache Segeln in den dauerhaften Flug des Menschen zu verwandeln. Das bisher Erreichte ist für den Flug des Menschen nichts anderes, als die ersten unsicheren Kinderschritte für den Gang des Mannes bedeuten."*

Quellen:

1. <http://www.lilienthal-museum.de>
2. http://www.teachersparadise.com/ency/de/wikipedia/o/ot/otto_lilienthal.html
3. http://www.geschichte.aero/geschichte/zivile_luftfahrt/
4. <http://www.nordkurier.de/datze/deutsch/ot>
5. <http://www.lilienthal-museum.de/olma/12127.htm>
6. http://de.wikipedia.org/wiki/Otto_Lilienthal

<http://www.ornithopter.de/prinzip.htm>
www.aniprop.de/dpg96_vortrag_send.pdf

Zur Geschichte der Luftfahrt:

- 1783 Heißluftballon der Brüder Montgolfier
Wasserstoffballon von J.A.C. Charles
- 1784 erste Überquerung des Ärmelkanals mit einem Ballon
- 1852 erste Fahrtversuche bemannter Luftschiffe mit Dampfmaschinenantrieb
- 1891 erste bemannte Gleitflüge mit einem Luftfahrzeug schwerer als Luft (Otto Lilienthal)
- 1900 erstes Starrluftschiff (Graf Zeppelin, 1838 - 1917)
- 1901 erster ungesteuerter Motorflug
- 1903 erste gesteuerte Motorflüge der Brüder O. und W. Wright
- 1907 erster bemannter Hubschrauberflug (O. Cornu)
- 1910 Beginn des kommerziellen Luftverkehrs mit Luftschiffen
- 1926 Gründung der Deutschen Lufthansa