

NUMMER 1/99

Physik

Ein Informationsdienst des
Deutschen Zentrums
für Luft- und Raumfahrt (DLR)



Der Traum vom Fliegen

Seit jeher übt das Fliegen auf den Menschen eine große Faszination aus. Schon der griechische Mythos von Dädalus und Ikarus erzählt von dem kühnen Versuch, sich mit Hilfe von künstlichen Flügeln in die Lüfte zu heben.

Nach den wenig beachteten Versuchen zahlreicher Flugpioniere des 19. Jahrhunderts war es schließlich Otto Lillenthal, dem im Jahre 1891 als erstem Menschen der Gleitflug gelang und der in den folgenden Jahren viele Flüge mit Ein- und Doppeldeckerkonstruktionen unternahm. Als Flugpioniere gelten auch die Gebrüder Wright, die 1903 erstmals einen gesteuerten Motorflug schafften.

Ein weiterer Meilenstein in der Luftfahrtgeschichte war die Überwindung der sogenannten Schallmauer, die lange Zeit als Geschwindigkeitsgrenze galt. Die Schallgeschwindigkeit – das entspricht etwa 1.000 Kilometern pro Stunde – wird mit Mach 1 bezeichnet. Von der Concorde abgesehen, fliegen heutige Verkehrsflugzeuge, zum Beispiel Großraumjets wie die Boeing 747 („Jumbo-Jet“), im Unterschallbereich bei etwa Mach 0,82. Eines der anspruchsvollsten Flugzeugprojekte der Zukunft ist der geplante Airbus A3XX (Bild), Europas Antwort auf den amerikanischen Jumbo-Jet.

Heute ist das Flugzeug ein alltägliches Fortbewegungsmittel: für Geschäftsreisende, für den Transport von Frachtgütern und natürlich auch für den Flug in den Urlaub. Damit sind auch die Anforderungen an das Fluggerät immer weiter gestiegen: mehr Sicherheit, weniger Lärm und weniger Schadstoffe – das sind die großen Aufgabenstellungen. Die Luftfahrtforschung arbeitet daran, hier permanent Verbesserungen zu erreichen.

Warum fliegt ein Flugzeug?

Woher kommt es, daß Flugzeuge fliegen, obwohl sie doch bekanntlich schwerer als Luft sind? Damit Flugzeuge fliegen, benötigt man eine hinreichend große Kraft, die der Gewichtskraft des Flugzeugs entgegenwirkt: einen Auftrieb.

Die Physik unterscheidet zwei Arten von Auftrieb: den statischen und den dynamischen. Anders als beim statischen Auftrieb, der für „unbewegte“ Körper wie etwa Heißluftballons gilt, muß beim dynamischen Auftrieb entweder das fliegende Objekt oder die das Objekt umströmende Luft in Bewegung versetzt sein. Fragen des dynamischen Auftriebs erforschen die Wissenschaftler vor allem mit Hilfe der Aerodynamik, der Lehre von den Bewegungsgesetzen gasförmiger Stoffe – bezogen auf Flugkörper der umgebenden Luft.

Der dynamische Auftrieb

Der dynamische Auftrieb läßt sich mit Hilfe eines kleinen Experimentes ganz einfach demonstrieren: Hält man ein Blatt Papier, das an einer Seite befestigt ist, ein wenig schräg in einen Luftstrom, dann drückt die ankommende Luft das Papier nach oben: Das Papier erfährt einen dynamischen Auftrieb.

Dynamischer Auftrieb: Druckverteilung

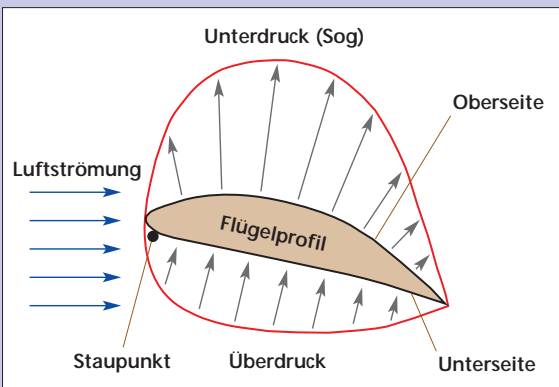


Abb. 1: Schema der Druckverteilungen an einem Flugzeugflügelprofil – durch Unterdruck an der Oberseite und Überdruck an der Unterseite entsteht der dynamische Auftrieb.

Ein Überdruck an deren Unterseite vorhanden sein. Die Druckdifferenz entsteht durch die Luftströmung an den Flügeln. Die anströmende Luft, die sich an der Vorderseite der Flügel im Staupunkt teilt, wird sich normalerweise hinter den Flügeln wieder schließen. Die geteilte Strömung fließt

Ein Flugzeug beginnt zu steigen, wenn der Auftrieb größer ist als die Gewichtskraft des Flugzeugs. Der Auftrieb hängt eng mit einer bestimmten Druckverteilung an den Tragflächen, den Flügeln des Flugzeugs, zusammen. Es muß ein Unterdruck an der Oberseite der Tragflächen und

Flugzeug im Steigflug

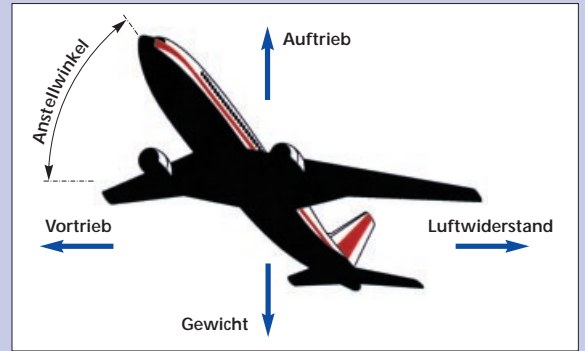


Abb. 2: Vier Kräfte wirken auf ein Flugzeug ein: Auftrieb gleicht Gewicht aus; Vortrieb überwindet Widerstand.

oberhalb des Staupunktes durch einen engeren Querschnitt als auf der Unterseite. Da der Staupunkt auf der Unterseite des Flügels liegt, wird oberhalb des Profils mehr Luft durchgesetzt als vor dem Profil im gleichen Querschnitt ausströmt. Deshalb fließen auf der Oberseite die Luftteilchen schneller als auf der Unterseite. Nach dem => Gesetz von Bernoulli bildet sich an Stellen mit höherer Geschwindigkeit ein Unterdruck: Ein Sog

Laminare, turbulente und verwirbelte Strömung am Flügelprofil

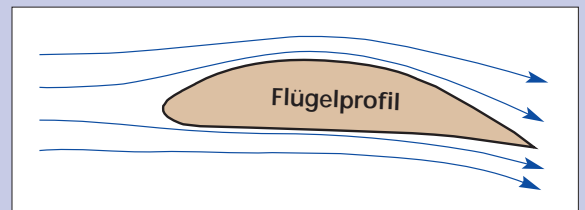


Abb. 3: Laminare Strömung – die Luftteilchen strömen parallel (in einer geordneten Schichtung) über die Oberfläche.

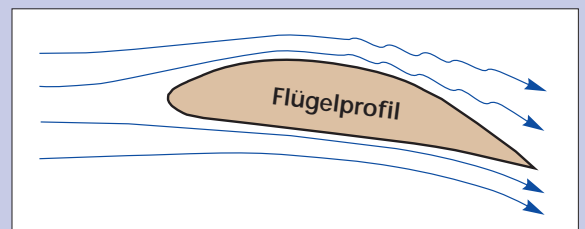


Abb. 4: Turbulente Strömung – die Luftteilchen beginnen (etwa an der dicksten Stelle des Profils) in eine ungeordnete Bewegung überzugehen.

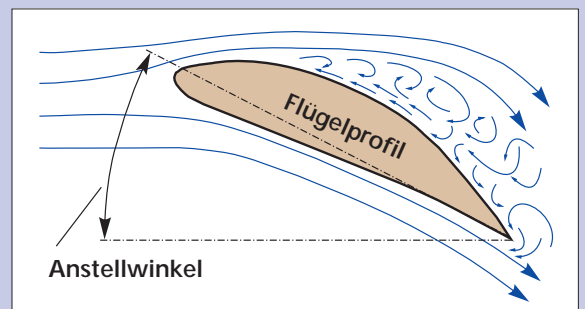


Abb. 5: Verwirbelte Strömung – bei einem großen Anstellwinkel beginnen die Luftteilchen sich von dem umströmten Flügel zu lösen und zu verwirbeln.

nach oben entsteht. Dagegen wird der Druck auf der Unterseite des Profils größer. Beide Kräfte bewirken, daß die Flügel bzw. das Flugzeug zugleich aufwärts „geschoben“ und „gesogen“ werden (siehe Abb. 1).

Der Auftrieb kann auf dreierlei Weise erhöht werden: durch größere Tragflächen, durch schnelleres Fliegen und durch einen steileren Anstellwinkel. Mit wachsender Geschwindigkeit nimmt der Druckunterschied am Flügel und so der Auftrieb zu; ebenso erhöhen eine größere Tragfläche und eine stärkere Krümmung des Flügelprofils den Auftrieb. Gleichzeitig wird der Luftwiderstand größer, das heißt jene Kraft, die einem Flugkörper bei seiner Bewegung durch die Luft entgegenwirkt und ihn abbremst. Ein Flugzeugflügel muß daher so konstruiert sein, daß bei maximalem Auftrieb nur ein minimaler Widerstand vorhanden ist.

Wenn die Strömung abreißt

Eine dritte Möglichkeit zur Auftriebserhöhung ist die Vergrößerung des Anstellwinkels – der Winkel zwischen Luftstrom und Flügelprofil –, der erreicht wird, wenn die Piloten die Flugzeugschneidkante nach oben ziehen. Die Druckdifferenz auf der Oberseite des Flügels wird größer und der Sog stärker: Der Auftrieb nimmt zu. Ein Problem tritt dagegen auf, wenn der Anstellwinkel zu steil ist: Die Luftteilchen können der Profilkrümmung schon nach kurzer Zeit nicht mehr folgen, die Strömung reißt ab und der Luftstrom bricht in Wirbel auf (siehe Abb. 5). Die Wirbel bewirken, daß sich der Luftwiderstand erhöht und die Geschwindigkeit des Flugzeugs abnimmt. Durch den plötzlichen Geschwindigkeitsverlust sackt das Flugzeug nach unten.

Das Verhalten der Strömung hängt vom Flügelprofil, aber auch von den Vorgängen in der Grenzschicht an der Flügeloberfläche ab. Die Grenzschicht ist eine dünne Übergangsschicht zwischen Außenhaut des Flügels und der Außenströmung, in der die Luftströmung geringer ist. Diese Grenzschicht kann entweder turbulent oder laminar (gleichmäßig) sein (siehe Abb. 3 und 4). Die laminare Grenzschicht entsteht, wenn der Flügel bei seiner Bewegung in einer geordneten Schichtung die umgebende Luft mitreißt. Dadurch wird besonders wenig Energie verbraucht, da der Strömungswiderstand gering ist. Bei der turbulenten Grenzschicht wird durch die Reibung in der Grenzschicht auch noch Energie in eine ungeordnete Bewegung der Luftteilchen umgesetzt. Dies verlangt eine zusätzliche Flugeistung. Durch konstruktive Maßnahmen an den Flügelprofilen lassen sich solche unerwünschten Verwirbelungen verhindern.



Exkurs: Windkanäle

Bei der Auslegung und Konstruktion eines Flugzeugs sind die Wissenschaftler und Techniker auf leistungsfähige Versuchs- und Simulationseinrichtungen angewiesen. Neben Höchstleistungsrechnern spielen Windkanäle dabei nach wie vor eine herausragende Rolle. Mit Hilfe eines Windkanals lassen sich die zuvor rechnerisch ermittelten aerodynamischen Eigenschaften eines neuen Flugzeugs im Strömungstest praktisch ermitteln. Dabei kann zum Beispiel das Wechselspiel der Kräfte zwischen Tragflügel, Rumpf oder auch einem ausgefahrenen Fahrwerk genau untersucht werden. Man unterscheidet je nach Aufgabenstellung verschiedene Windkanaltypen. Für Messungen zum Beispiel im Geschwindigkeitsbereich von Start und Landung eignen sich Niedergeschwindigkeitswindkanäle (Strömungsgeschwindigkeit etwa bis 100 m/s), für die Strömungssimulation unter Reiseflugbedingungen nutzen die Wissenschaftler sogenannte transsonische Windkanäle (200 bis 300 m/s). Darüber hinaus gibt es Windkanäle auch für Messungen im Überschallbereich.

Windkanalmessungen sind komplizierter als es auf den ersten Blick erscheint. So ist es beispielsweise nicht möglich, die an einem Modell ermittelten Windkanalmeßwerte einfach auf das reale Flugzeug zu übertragen. Damit die Untersuchungen an den Flugzeugmodellen (beispielsweise im Maßstab 1:25 bis zu 1:50) im Bereich der Reisegeschwindigkeit auch den tatsächlichen Strömungsverhältnissen am realen Flugzeug entsprechen, wenden die Aerodynamiker und Windkanaltechniker einen Trick an: Durch Absenken der Temperatur auf etwa minus 180 Grad Celsius mit Hilfe von eingespritztem Stickstoff verändert sich das Verhältnis von Dichte und Zähigkeit des umströmenden Luftstromes, und zwar so, daß bei dem gegebenen Modellmaßstab die Umströmung des Modells etwa der des realen Flugzeugs im Reiseflug entspricht. Die maßgebliche Kenngröße hierfür ist die \Rightarrow Reynoldszahl. Bei diesen Tieftemperaturmessungen spricht man vom \Rightarrow kryogenen Meßverfahren. Eine weitere Methode zur Erreichung realitätsnaher Strömungsergebnisse ist die Erhöhung des Anströmdruckes.

Das DLR betreibt – gemeinsam mit Partnern aus den Niederlanden – zahlreiche Windkanäle für die unterschiedlichsten Aufgabenstellungen vorwiegend in den Bereichen der Luft- und Raumfahrt und der Automobiltechnik.



Exkurs: Drehflügler – „Motorisierte Kolibris“

An die Stelle von festen Flügeln bei Flugzeugen (Starrflügler) treten bei Hubschraubern (Drehflügler) rotierende Blätter. Den tragenden Flächen beim Flugzeug entspricht dabei beim Hubschrauber der Rotor. Wie sich der Kolibri unter den Vögeln durch seine Wendigkeit auszeichnet, zeigen auch Drehflügler gegenüber Starrflüglern viele Vorteile. Ein Hubschrauber kann in der Luft schweben, sich um seine vertikale Achse drehen, vermag senkrecht zu starten und zu landen und läßt sich in jede Richtung manövrieren.

Die rotierenden Flügel des Hubschraubers arbeiten wie die Tragflächen eines Flugzeugs. Bei der Drehung wird aber durch den veränderbaren Anstellwinkel (kollektive Blattverstellung) schon im Stand soviel Auftrieb erzeugt, daß der Hubschrauber aufsteigt. Durch Verstellung der Blätter während des Umlaufs (zyklische Blattverstellung) wird zugleich eine Kraftkomponente nach vorne gerichtet, die Schubkraft erzeugt. Die Steuerung über die Blätter kann auch seitliche Kräfte hervorrufen, wodurch sich die große Wendigkeit des Hubschraubers erklärt.

Alle Hubschrauber besitzen zwei Rotoren: in den meisten Fällen einen Hauptrotor mit vertikaler

Drehachse und einen Heckrotor mit horizontaler Drehachse. Wird nun der Hauptrotor durch den Motor im Uhrzeigersinn bewegt, dreht sich der Rumpf des Hubschraubers entgegengesetzt zur Rotationsrichtung. Grund hierfür ist die => Dreh-



Der Hubschrauber BO 105 C wird vom DLR in Braunschweig eingesetzt für Untersuchungen in der Flugführung, Flugmechanik und Entwurfsaerodynamik.

impulserhaltung. Das unerwünschte Drehmoment kann durch gegenläufige Rotoren oder durch Heckrotoren ausgeglichen werden.

Jüngste Hubschrauberkonstruktionen folgen dem sogenannten NOTAR-Prinzip. Das Kürzel steht für No Tail Rotor. Bei Hubschraubern dieses Typs fehlen Heckrotoren. Den notwendigen Drehmomentausgleich erzielen die Konstrukteure durch einen seitlich aus dem Heck austretenden Luftstrahl entgegen der Drehrichtung des Hauptrotors.

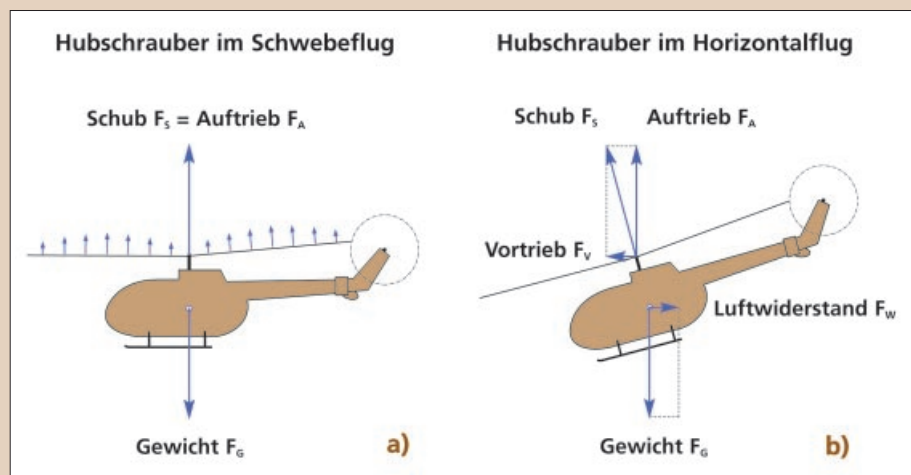


Abb. 6a: Damit ein Hubschrauber in der Luft schweben kann, muß die Kraft F_S (durch die Rotorblätter erzeugt) gleich der Gewichtskraft F_G des Hubschraubers sein.

Abb. 6b: Für den Horizontalflug muß der Hubschrauber nach vorne gekippt werden. Damit der Hubschrauber nicht sinkt (F_A muß F_G entsprechen), wird ein etwas höherer Schub F_S benötigt. Und der Vortrieb F_V muß größer als der Luftwiderstand F_W sein, damit sich der Hubschrauber nach vorne bewegen kann.

Triebwerke: der Antrieb

Bereits in den dreißiger Jahren zeigte sich, daß Flugzeuge mit herkömmlichen Kolben-

motoren leistungsmäßig an ihre Grenzen gelangt waren. Eine Erfindung des jungen Ingenieurs Hans Joachim Pabst von Ohain sollte das Antriebskonzept in der Luftfahrt nachhaltig revolutionieren. Er entwickelte ein Turbinen-Luftstrahltriebwerk, welches am 27. August 1939 – eingebaut in ein Heinkel-Experimentalflugzeug – erfolgreich getestet wurde. Gemeinsam mit der späteren Einführung des => *gepfeilten Tragflügels* bot das Strahltriebwerk gegenüber dem Kolbenmotor eine wesentliche Leistungssteigerung, das heißt vor allem eine deutlich höhere Geschwindigkeit der damaligen Flugzeuge. Heute befinden sich weltweit überwiegend Zweiwellen-Zweikreis-Fantriebwerke im Einsatz.

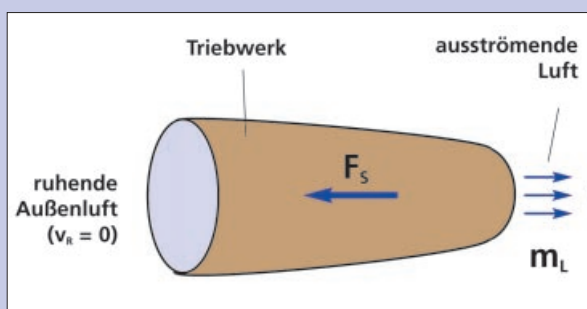
Wie funktioniert ein Strahltriebwerk?

Ein Strahltriebwerk besteht im wesentlichen aus vier Komponenten, die vier verschiedene Aufgaben erfüllen. Im Lufteinlaß wird mit propellerähnlichen Schaufeln Luft angesaugt, die im *Kompressor* (Verdichter) mit Hilfe der Schaufelräder in mehreren Stufen zusammengepreßt, das heißt verdichtet

wird. Dabei wird die Luft auf weniger als ein Zehntel des ursprünglichen Volumens komprimiert. Mit den letzten Schaufelrädern wird die Luft dann in die *Brennkammer* gedrückt, wo mittels Pumpen auch der Brennstoff (zerstäubtes Kerosin) eingespritzt wird. Das Gemisch aus Kerosin und Luft, das sich beim Verdichten schon stark erhitzt hat, verbrennt fortlaufend, und es entstehen heiße Gase, die fast 2.000 Grad Celsius erreichen können. Diese Abgase, die sich durch die steigende Hitze stark ausdehnen, strömen aus der Brennkammer in die *Turbine*, wo sie auf die Turbinenschaufeln treffen. Die Turbinenschaufeln sind die am höchsten belasteten Bauteile des Triebwerkes. Da sie direkt dem heißen Abgasstrahl der Brennkammer ausgesetzt sind, müssen die Schaufeln permanent gekühlt werden. Ein Teil der Energie des Abgases wird dazu benutzt, die Hauptwelle in Bewegung zu setzen, die wiederum den Verdichter antreibt. Nach dem Durchgang durch die Turbine schießen die Gase stark beschleunigt durch die verengende *Düse* ins Freie. Die Energie, die aus der Schubdüse austritt, liefert schließlich die Schubkraft, die das Flugzeug vorantreibt. Die Kraft, die in umgekehrter Richtung zum Ausstoß zunächst auf das Triebwerksgehäuse, dann auf Flügel und Rumpf wirkt, läßt das ganze Flugzeug vorwärts treiben. Die Schubkraft berechnet sich aus der Menge der ausströmenden Luft multipliziert mit deren Beschleunigung im zeitlichen Mittel.

Der Vorschub

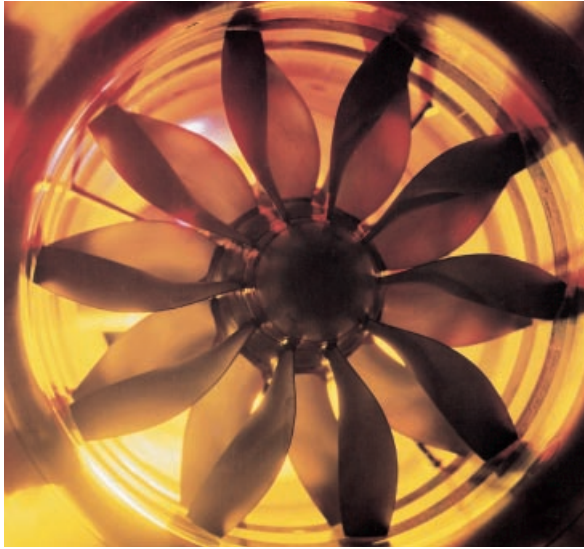
Der Schub, den ein Strahltriebwerk erzeugt, beruht auf dem sogenannten Rückstoßprinzip. Dieses Prinzip läßt sich anhand eines aufgeblasenen Luftballons, den man fliegen läßt, vereinfacht darstellen: Der Luftballon erfährt einen Schub in die Richtung, die der ausströmenden Luft genau entgegengesetzt ist. Grund dafür ist das Newtonsche Wechselwirkungsgesetz (*actio gleich reactio*), nach dem jeder Kraft eine gleich große Kraft entgegensteht. Diese Gegenkraft wird beim Ballon als Rückstoß beziehungsweise als Schub erfahren.



Ein Flugzeug braucht zum Fliegen genügend Schub, um den ihn bremsenden Luftwiderstand zu überwinden. Der Schub wird dabei über die ausströmenden Verbrennungsgase der Triebwerke erzeugt. Die zunächst ruhende Umgebungsluft (v_R) wird im Triebwerk auf eine hohe Geschwindigkeit beschleunigt, bevor sie hinten als Gas wieder austritt. Durch den Impuls des ausströmenden Gases erfährt das Triebwerk eine Reaktionskraft in die entgegengesetzte Richtung. Bei gleichmäßig ausströmender Luft läßt sich diese Schubkraft F_s unter Kenntnis der ausströmenden Luftmasse m_L und Luftgeschwindigkeit v_L vereinfacht wie folgt berechnen:

$$F_s = \frac{m_L}{t} \cdot (v_L - v_R)$$

Nicht berücksichtigt sind hierbei zum Beispiel Auftrieb und Erdanziehung und daß aufgrund des zugeführten Treibstoffs an den Düsen mehr Gase ausströmen als Luft vorne hineinkommt. Zur Erhöhung der Fluggeschwindigkeit muß mehr Schub erzeugt werden. Auf der Startbahn tritt als hemmende Kraft zum Luftwiderstand noch der Rollwiderstand dazu.



Zu den Aufgaben des DLR gehört die Entwicklung schadstoffarmer Triebwerke – hier ein Propfan.

Triebwerkstypen

Der oben beschriebene Typ eines konventionellen Strahltriebwerks ist ein Einstromtriebwerk. Heute werden bei den meisten Verkehrsflugzeugen ein oder mehrere Zweistromtriebwerke (Turbofans) oder Mantelstromtriebwerke eingesetzt. Diese Triebwerke sind leiser und ökonomischer, da sie größere Mengen Luft weniger stark beschleunigen. Ein Turbofan-Triebwerk hat gegenüber konventionellen Strahltriebwerken einen großen, ummantelten Bläser („Fan“), der gleich mehrere Funktionen sinnvoll miteinander verbindet. Er leitet einen großen Teil der angesaugten Luft außen am Kerntriebwerk vorbei, die kalte Luft umhüllt somit den heißen Abgasstrahl. Die unmittelbare Folge ist eine deutliche Lärmreduzierung durch Verringerung der Strahlgeschwindigkeit. Darüber hinaus trägt der Fan – je nach Triebwerkstyp – zu 40 bis 70 Prozent des Gesamtschubs bei. Die Größe des Fans ist maßgeblich für die Definition des => *Nebenstromverhältnisses*. Moderne Turbofan-Triebwerke haben ein Nebenstromverhältnis bis zu 10, das heißt, die etwa zehnfache Menge der durch das Kerntriebwerk hindurchgeleiteten Luft wird außen am Triebwerk vorbeigeleitet. Neben der Erhöhung der Schubleistung, der Verringerung der => *Lärmemissionen* und der verbesserten Wirtschaftlichkeit ist vor allem die Reduzierung der emittierten Schadstoffe ein großes Ziel der Forschung. So ist das DLR an umfassenden Entwicklungsarbeiten zum Beispiel bei der Optimierung der Brennkammer sowie der Verbrennungsabläufe beteiligt.

Eine weitere Triebwerksvariante, die vor allem bei Kurzstreckenflugzeugen eingesetzt wird, ist der Turboprop, eine Kombination aus Propeller- und Turbinen-Luftstrahltriebwerk. Hier wird ein Propeller über ein Getriebe von der Turbinenwelle angetrieben, der ein Großteil der Energie aufnimmt, die die Gase in der Turbine erzeugen.

Exkurs: Lärminderung bei Flugzeugen

Flugzeuge verursachen Lärm. Vor allem für Flughafenanwohner stellt der Fluglärm ein ernstzunehmendes Problem dar. Daher ist die Lärminderung eines der großen Ziele der Luftfahrtforschung. Für die Lärmentstehung gibt es gleich eine ganze Anzahl von Quellen. Zum einen verursachen die Triebwerke Geräusche, zum anderen ist auch die am Flugzeug vorbeiströmende Luft für bestimmte => *Lärmemissionen* verantwortlich. Wissenschaftler des DLR haben beispielsweise bei Messungen und umfangreichen Windkanaltests festgestellt, daß während des Landeanflugs die Umströmungsgeräusche des ausgefahrenen Fahrwerks sowie der Landeklappen („Hochauftriebshilfen“) annähernd gleich stark sein können wie die Geräusche der (gedrosselten) Triebwerke. Vor dem Hintergrund deutlich verschärfter Umweltschutzbestimmungen sind Flugzeug- und Triebwerkshersteller daher gezwungen, die Lärmemissionen mit modernsten konstruktiven Maßnahmen bereits im Entwurf wesentlich zu senken. Die Technik ist dabei auf dem richtigen Weg; so verursachen moderne Turbofan-Triebwerke nur noch den Bruchteil des „Lärmteppichs“, den frühere Passagierjets mit Einwellen-Triebwerken buchstäblich hinter sich herzogen. Beim DLR beginnen demnächst erste Untersuchungen zur „Active Noise Control“ (aktive Lärmkontrolle) an Triebwerken. Der Trick der Lärmreduzierung liegt dabei in der Hinzuführung von „Gegenschall“. An zahlreichen Stellen nehmen hochempfindliche Mikrofone die Triebwerksgeräusche auf und geben sie phasenversetzt wieder. Schall und Gegenschallwellen neutralisieren so einander weitgehend.

Weitere Möglichkeiten zur Reduzierung des Fluglärms liegen in der aerodynamischen Teilverkleidung von Fahrwerken sowie auch in geänderten An- und Abflugverfahren.

Bei Hubschraubern ist dieses Problem noch störender, da diese meistens in verhältnismäßig niedrigen Flughöhen zum Einsatz kommen. Neue Formen der Rotorblätter, welche die gewohnten rechteckigen Blattgrundrisse ersetzen, können hier helfen. Eine verstellbare Blattoberkante oder eine mit einem Gelenk versehene und piezogesteuerte (druckgesteuerte) Klappe erhöht nicht nur die Leistungsfähigkeit, sondern senkt auch den Lärmpegel.

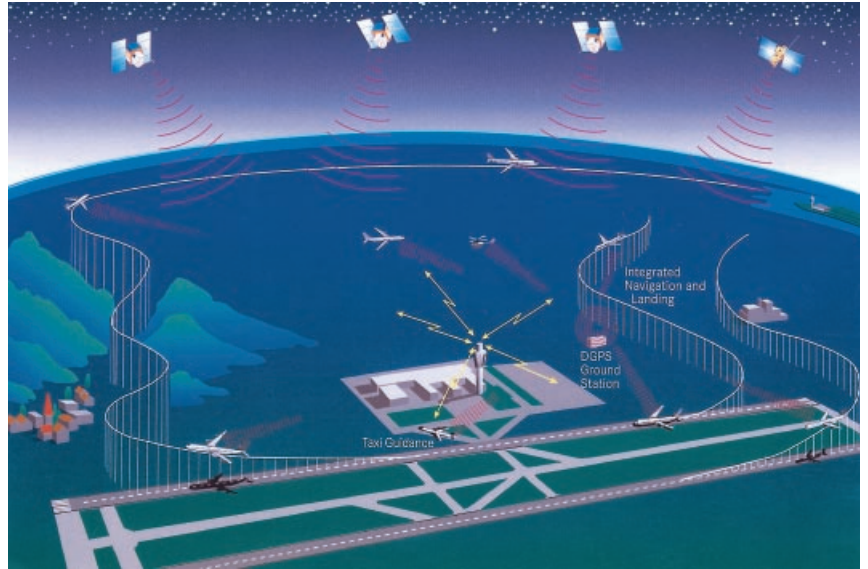
Navigation: die Flug- steuerung

Bei ständig wachsendem Luftverkehrsaufkommen hat neben der optimalen Nutzung

des zur Verfügung stehenden Luftraums selbstverständlich der Sicherheitsaspekt einen hohen Stellenwert. Hochgenaue An- und Abflugverfahren müssen jederzeit gewährleisten, daß sich die Flugzeuge buchstäblich nicht zu nahe kommen.

Piloten verfügen im Cockpit über eine ganze Anzahl von Systemen und Instrumenten, die ihnen bei der Bestimmung ihrer Position und präzisen Einhaltung ihres Flugweges helfen. Das bekannteste und bereits seit mehreren Jahrzehnten bewährte System ist die hochpräzise Trägheitsnavigationsanlage in Verbindung mit Funkpeilungen. Der Pilot „füttert“ das System vor Abflug mit den jeweiligen Kurs- und Zielkoordinaten, welche das Flugzeug dann bei eingeschaltetem Autopiloten „abfliegt“.

Eine völlig neue Präzision wird durch die satellitengestützte Positionierung erreicht. Mit Hilfe von Satelliten werden Funksignale empfangen, die zu einer genauen Positionierung des Flugzeugs verarbeitet werden. Das derzeit leistungsfähigste satellitengestützte System ist das sogenannte Global Positioning System (GPS). GPS besteht aus 24 Satelliten, die auf nahezu kreisförmigen Umlaufbahnen in etwa 20.000 Kilometern Höhe die Erde umkreisen. Zur gleichen Zeit sind von jedem Punkt der Erde mindestens vier Satelliten zu empfangen. Ihre Daten ermöglichen die Bestimmung des Ortes und der Geschwindigkeit des Flugzeugs in Beziehung zur präzisen Zeitbestimmung. Alle drei Faktoren – Ort, Geschwindigkeit und Zeit – sind not-



wendig, um eine dreidimensionale Positionierung vorzunehmen.

Satellitensysteme wie GPS bieten der Entwicklung sicherer und genauer Landesysteme ganz neue Möglichkeiten. Um zentimetergenaue Positionierungen zu erreichen, werden Bodenstationen in Flughafennähe errichtet, die die eingebauten Ungenauigkeiten des GPS korrigieren und an den Piloten weitergeben. So ermöglicht das Differential GPS (DGPS) Präzisionslandungen, die beispielsweise das Radar ersetzen können.

Mittels Satellitennavigation lassen sich präzise Anflüge von Flugzeugen flexibel koordinieren.

Computergesteuerte Flugführung

Eine moderne Flugführung ist zur Sicherheit auf den Flughäfen unerlässlich. Die ankommenden und abfliegenden Flugzeuge sowie der ganze Rollverkehr müssen koordiniert, das heißt „gemanagt“ werden, damit weniger Warteschleifen und Verspätungen entstehen. Denn diese verursachen oft erhebliche Kosten. Zudem steigen mit wachsendem Flugverkehr die Anforderungen an die Navigation. Deshalb werden im DLR moderne Systeme entwickelt, die den Piloten und Lotsen bei ihrer täglichen Arbeit helfen. Ein Beispiel für den funktionellen Einsatz auf dem Rollfeld ist das rechnergestützte System TARMAC (Taxi And Ramp Management And Control). TARMAC errechnet beispielsweise, wie ankommende Flugzeuge möglichst schnell von der Landebahn über das Rollfeld bis zum Abstellplatz geleitet werden können. Dies ist insbesondere bei starkem Luftverkehr notwendig. Unter anderem werden die Anflugvorhersagen und Bahnbelegungszeiten bei den Berechnungen berücksichtigt sowie das Rollfeld und das Vorfeld überwacht und entsprechende Informationen dem Towerlotsen übermittelt.



Cockpit eines Flugzeugs mit Instrumententafel

Glossar

Drehimpulserhaltung: Nach dem Impulserhaltungssatz ist die Summe aller => *Impulse* in einem (geschlossenen) System konstant.

gepfeilter Tragflügel: Name, der dem Aussehen der so bezeichneten Tragflügel (als Pfeile) entlehnt ist.

Gesetz von Bernoulli: Nach Daniel Bernoulli benanntes physikalisches Gesetz, das besagt, daß sich an verengenden Stellen aufgrund eines erhöhten Massendurchsatzes die Strömungsgeschwindigkeit von Gasen oder Flüssigkeiten erhöht. Zwar bleibt dabei der Gesamtdruck erhalten, doch ändern sich die dortigen Druckverhältnisse.

kryogenes Meßverfahren: Ein Verfahren, mit dem physikalische Größen bei tiefen Temperaturen gemessen werden.

Impuls: Bewegungsgröße, die aus dem Produkt von Masse und Geschwindigkeit eines Körpers gebildet wird.

Lärmemission: Emission bedeutet im Wortsinne Aussendung; gemeint ist hier die Ausbreitung von starken Geräuschen.

Mach-Zahl: Die nach Ernst Mach benannte Zahl gibt das Verhältnis eines in einem Medium (z.B. Luft) bewegten Körpers und der Schallgeschwindigkeit in diesem Medium an. Ein mit Schallgeschwindigkeit fliegendes Flugzeug hat den Wert Mach 1.

Nebenstromverhältnis: Das Verhältnis der durch das Strahltriebwerk geleiteten heißen Luft und der um das Triebwerk herumgeführten kalten Luft.

Reynoldszahl: Eine Kenngröße der Strömungslehre; die kritische Reynoldszahl bezeichnet den Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung.

Überschall: Geschwindigkeiten größer als die Schallgeschwindigkeit.

Unterschall: Geschwindigkeiten kleiner als die Schallgeschwindigkeit.

Internetadressen

Neben vielen Büchern gibt es auch eine Reihe von Interneteinstellungen, die sich in unterschiedlicher Weise mit den Themen Luftfahrt und Fliegen beschäftigen. Hier eine kleine Auswahl deutschsprachiger Internetadressen:

<http://www.dlr.de>

Auf den Seiten des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) sind Links zu den einzelnen Instituten des DLR zu finden, die insbesondere in Göttingen und Braunschweig zu vielen Bereichen der Luftfahrt ihre Forschungen präsentieren.

http://www.laudaair.com/produkt/kidsclub_fragen.htm

Hier werden einige grundlegende Fragen zum Thema „Flugzeuge“ einfach und leicht verständlich dargestellt.

<http://amor.rz.hu-berlin.de/~h0444wvt/flugzeug.htm>

Hier gibt es kurze Beschreibungen über einige Aspekte der Luftfahrt, die das Verhältnis von Mensch und Maschine (Flugzeug) betreffen.

<http://www.luftfahrt-presse-club.de>

Die Homepage des Luftfahrt-Presse-Clubs, auf der auch viele Links zu Airlines und Airports sowie zu Luftfahrt-Unternehmen und -Organisationen zu finden sind.

<http://home.t-online.de/home/LilienthalMuseum/index.htm>

Die Homepage des Otto-Lilienthal-Museums, wo einiges zur Aerodynamik und Biographie Lilienthals aufgeführt ist.

Luftfahrt-Museen

Auto- und Technik-Museum
Obere Au 2
74889 Sinsheim

Deutsches Museum
Museumsinsel 1
80538 München

Deutsches Segelflugmuseum
Wasserkuppe Rhön
36129 Gersfeld

Internationales Luftfahrt-Museum
Am Flugplatz
78056 Villingen-Schwenningen

Luftfahrt-Museum
Ulmer Str. 2
30880 Laatzen

Otto-Lilienthal-Museum
Eilbogenstr. 1
17389 Anklam

Zeppelin-Museum
Schloßplatz 8
88709 Meersburg

Zeppelin-Museum Friedrichshafen
Seestr. 22
88045 Friedrichshafen



Die Schulinformation Raumfahrt wird herausgegeben von:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

D-51170 Köln
Fax: 0 22 03 / 6 01-32 49

Redaktion und Satz:
Kesberg, Bütfering & Partner

Bildnachweis:
Dasa, DLR, KB&P

Druck:
Richard Thierbach GmbH,
Mülheim an der Ruhr