

Die Physik des Fliegens



und die Rolle der Antriebstechnik

Lucas Sichardt

Dieses Buch wurde ursprünglich als sog. Besondere Lernleistung verfasst und ersetzt damit eine Abiturprüfung. Thema war die Antriebstechnik von Flugzeugen, während der Teil über die physikalischen Grundlagen des Fliegens das Verständnis nur unterstützen sollte.

Hier das Original-Deckblatt:

Antriebstechnik von Verkehrsflugzeugen



Abb. 1

unter besonderer Berücksichtigung des Propfan-Antriebs

von Lucas Sichardt

zur Einbringung ins Abitur als „besondere Lernleistung“

vorgelegt am 29.03.2007

Inhalt

1. Vorwort	4
2. Physikalische Grundlagen des Fliegens	5
2.1 Wie kommt der nötige Auftrieb zustande?	5
2.2 Wie wird ein Flugzeug gesteuert?	12
2.3 Welche Rolle spielt der Antrieb beim Fliegen?	21
3. Die Historie des Antriebs von Flugzeugen	23
3.1 Ab 1903: Der Kolbenmotor mit Propeller	23
3.2 Ab 1939: Die Gasturbine	26
3.2.1 Das Turboprop-Triebwerk	29
3.2.2 Turbofan-Triebwerke	33
3.2.3 Der Propfan-Antrieb (kurzer Überblick)	37
4. Der Propfan-Antrieb im Detail	39
4.1 Bisherige Historie des Propfans	39
4.2 Funktionsweise des Propfans	42
4.3 Vor- und Nachteile	45
4.4 Zukunftsaussichten	46
5. Ausblick in die Zukunft der Flugzeugantriebe	48
6. Anhang	50
6.1 Bildnachweis	50
6.2 Quellenverzeichnis	53
6.3 Erklärung der Originalität der Arbeit	53

1. Vorwort

Im Jahre 1903 war es endlich so weit: Im beschaulichen Örtchen Kitty Hawk im US-Bundesstaat North Carolina gelingt es den Brüdern Orville und Wilbur Wright ihre Vision eines motorgetriebenen Flugzeugs in die Tat umzusetzen und damit einen der ältesten Träume der Menschheit wahr werden zu lassen. Zwar gab es schon vor den Gebrüdern Wright flugfähige Apparate, doch funktionierten diese ausschließlich dadurch, dass ihre Dichte mit Hilfe leichter Gase unter die Dichte der Luft abgesenkt wurden. So entstanden einige Ballone, die sich jedoch kaum in eine gewünschte Richtung steuern ließen – man war vom Wind abhängig. Auch die vereinzelt entwickelten Gleiter waren zu sehr von Thermik abhängig und deren Flüge glichen oft eher einem verlangsamten Fall.

Doch die Entwicklung der Gebrüder Wright war in der Lage, ohne begünstigende Umstände wie Thermik zu fliegen, ja sogar aus eigener Kraft deutlich an Höhe zu gewinnen. Die Flüge waren steuerbar und es war erstmals denkbar auch Fracht oder einen Passagier an einen vorher bestimmten Ort zu befördern. Natürlich war das erste Flugzeug der Wrights noch nicht so weit, doch lösten die gelungenen, kontrollierten Flüge – wie wir heute wissen gerechtfertigterweise – solche Visionen aus. So kam es, dass bereits im Jahre 1909 die „Wright Company“ als einer der ersten kommerziellen Flugzeughersteller von Wilbur und Orville gegründet wurde. Bis 1916 wurden mindestens 16 verschiedene Flugzeugtypen hergestellt. Das Unternehmen fusionierte seit dem unzählige Male mit anderen in der Luftfahrt tätigen Firmen; das letztes Überbleibsel der Wright Company steckt heute in der Firma „Curtiss-Wright“, die zum Beispiel Airbus und Boeing beliefert.

Die Entwicklung der Wrights war ein Erfolgsmodell; wer könnte sich die heutige Welt – nur 100 Jahre nach dem ersten kontrollierten Motorflug – ohne Flugzeuge vorstellen? In dieser Erfolgsgeschichte spielten die Antriebe immer eine sehr wichtige Rolle. Viele der ersten gescheiterten Fluggeräte der Anfangsjahre wären mit heutigen Antrieben flugfähig gewesen und wären nicht nach dem Start immer langsamer geworden bis sie schließlich zu Boden fielen. Die Antriebe machen den größten Unterschied zwischen den ersten Flugzeugen und den heutigen Jets aus; schon optisch ist dies der auffälligste Unterschied zu den Maschinen der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Die heute üblichen Flughöhen, Reichweiten und Geschwindigkeiten, nicht zuletzt auch der relativ geringe Treibstoffverbrauch heutiger Flugzeuge sind zu größten Teilen der Weiterentwicklung und der Erfindung neuer Antriebstechniken zu verdanken.

Aus diesem Grund soll sich diese Arbeit mit der Entwicklung und der Funktionsweise der verschiedenen Antriebsprinzipien der Luftfahrt befassen. Eine besondere Betrachtung erhält das in den Achtziger Jahren entwickelte „Propfan“- Triebwerk, welches vom damaligen Flugzeughersteller McDonnell Douglas fast bis zur Serienreife entwickelt, dann jedoch unter dem Druck der Fluggesellschaften wieder verworfen wurde (McDonnell Douglas wurde inzwischen von Boeing übernommen). Das Triebwerk sollte durch eine hohe Reisegeschwindigkeit und niedrigen Treibstoffverbrauch bestechen und scheint heute wieder Interesse zu wecken. Vielleicht liegt in dieser Technologie die Zukunft.

Um die Rolle des Antriebs in der Luftfahrt gänzlich zu verdeutlichen, folgt zunächst ein Kapitel über die physikalischen Grundlagen des Fliegens, welches auch mit dem weit verbreiteten Irrtum aufräumt, allein der Bernoullische Effekt würde ein Flugzeug in der Luft halten...

2. Physikalische Grundlagen des Fliegens

2.1 Wie kommt der nötige Auftrieb zustande?

Schon Leonardo Da Vinci wollte den uralten Traum vom Fliegen endlich verwirklichen. Doch auch Da Vinci war dem Geheimnis des Fliegens noch nicht gänzlich auf die Spur gekommen. Überhaupt waren fast alle Versuche, einen flugfähigen Apparat zu bauen, vor Ende des 19. bzw. Anfang des 20. Jahrhunderts gleichermaßen aussichtslos wie trivial: Zwar hatten einige Visionäre wie Da Vinci sich durchaus mit der Physik des Fliegens beschäftigt, doch waren ihre Konstruktionen eher Nachbauten eines Vogels als Flugzeuge. Wie Kutschen und später Automobile sich nicht wie in der Natur auf Beinen und Füßen fortbewegten, sondern der Erfindung des Rades bedurften, so musste man davon abkommen, den komplexen Flügel eines Vogels, der Antrieb und Auftrieb zugleich erzeugt und aus hunderten von Knochen besteht, nachbauen zu wollen. Man musste zunächst die physikalischen Grundlagen des Auftriebs verstehen und unter Anwendung dieser Kenntnisse einen einfacheren, auf das Wesentliche konzentrierten Weg finden, einen Körper in die Luft zu bringen und dort zu halten. Zwar gab es schon seit 1783 Heißluftballone, doch konnte man mit diesen Geräten weder eine bestimmte Flugrichtung einschlagen noch eine befriedigende Geschwindigkeit erreichen. Man war gänzlich von der Umwelt, vor allem dem Wind, abhängig.

Doch seit der Erfindung des im Vergleich zur Dampfmaschine sehr leichten Kolbenmotors besaß die Menschheit theoretisch die Möglichkeit, ein Flugzeug zu konstruieren. Auf die Bedeutung dieser Erfindung wird in Kapitel 2.3 noch genauer eingegangen. Quasi gleichzeitig zur Erfindung des Kolbenmotors beschäftigten sich auch immer mehr „Träumer“ oder Visionäre mit dem Traum des Fliegens, da man immer wieder von waagemutigen Erfindern hörte, die sich mit ihrer Konstruktion von Brücken in Flüsse stürzten, oder mit hubschrauberähnlichen Konstrukten unkontrolliert in Bäume taumelten. So versuchten also auch die Gebrüder Wright in den USA ihr Glück und hatten mit einer ihrer Konstruktionen wohl eher zufällig Erfolg. Der heute „Wright Flyer“ genannte Apparat war tatsächlich flugfähig und verfügte über die grundlegenden Voraussetzungen des Fliegens. Was also machte dieses Flugzeug flügge?

Zunächst muss man zwischen statischem und dynamischem Auftrieb unterscheiden: Der statische Auftrieb war schon lange bekannt, er ist es, der zum Beispiel den Heißluftballon aufsteigen lässt und hat seine Ursache in der unterschiedlichen Dichte verschiedener Stoffe. Ein Heißluftballon kann also nur fliegen, wenn seine Dichte geringer ist als die der Luft, die er verdrängt.

Die zweite Form des Auftriebs, der dynamische Auftrieb, ist es jedoch, der ein Flugzeug, welches weitaus mehr Masse auf die Waage bringt als das gleiche Volumen an Luft, am Himmel hält. Allgemein wird oft – selbst in Schulbüchern – der Bernoulli-Effekt allein für den Auftrieb eines Flugzeuges verantwortlich gemacht. Es wird dann erklärt, dass das Profil einer Tragfläche so geformt sei, dass die Strecke, die Luft beim Vorbeiströmen über der Tragfläche zurücklegt, länger sei als unter der Tragfläche (wie in Abb.2 zu sehen).

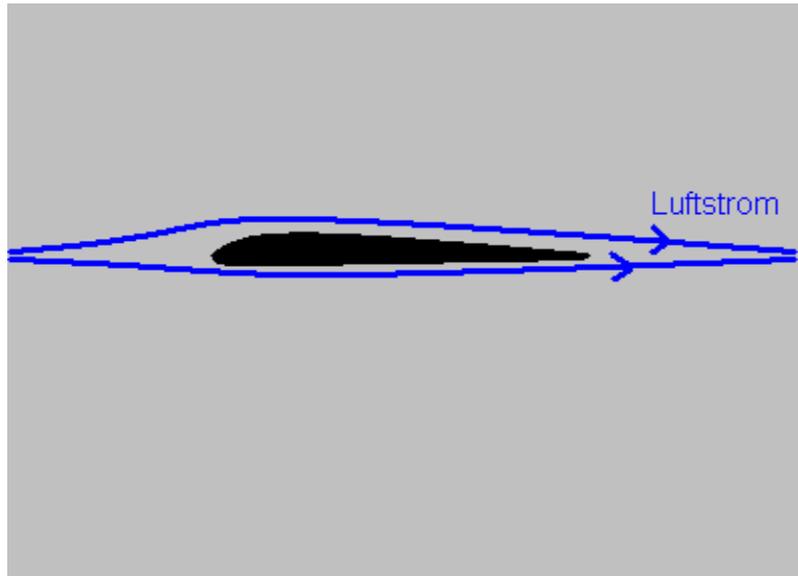


Abb.2

Folglich müsse der Luftstrom über der Tragfläche schneller strömen als der unter der Tragfläche, sodass die Moleküle des Luftstroms, die vor der Tragfläche benachbart waren und durch diese getrennt wurden, hinter der Tragfläche wieder benachbart sind. In der Tat lässt sich nachweisen, dass der Luftstrom über der Tragfläche schneller ist, jedoch ist er auch weit hinter dieser noch schneller als der andere Luftstrom, wodurch sich die eingangs benachbarten Moleküle wohl nie wieder „begegnen“ (Abb. 3).

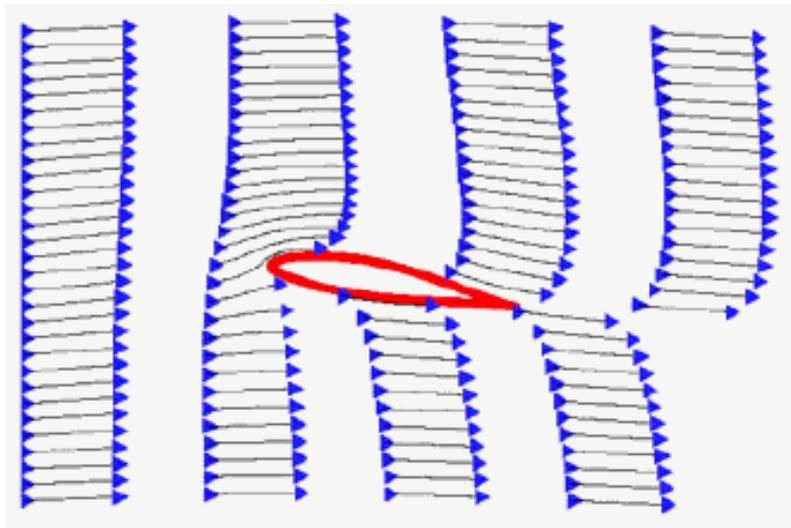


Abb.3

Wahr ist jedoch durchaus, dass der Luftstrom über der Tragfläche schneller ist als der unter der Tragfläche, hier kommt Bernoulli (Daniel Bernoulli, schweizer Physiker) ins Spiel:

Bernoulli fand heraus, dass ein sich schneller bewegendes Luftstrom einen geringeren Luftdruck aufweist, der Bernoulli-Effekt. Eine exakte physikalische Erklärung für diesen Effekt ist nur schwer zu geben, jedoch belegen Experimente immer wieder den antiproportionalen Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit eines Gases oder einer Flüssigkeit und dessen Druck. Der geringere Luftdruck über der Tragfläche „saugt“ nun diese nach oben, so die populäre Erklärung des Auftriebs weiter.

Dieser Druckunterschied allein soll nun also ein Flugzeug in der Luft halten? So zumindest die weit verbreitete Erklärung, die zum Beispiel auch auf der Internetseite einer großen europäischen Fluggesellschaft in der Rubrik „Ask Captain“ gegeben wird. Betrachtet man diese Erklärung jedoch genauer, kommt man in Schwierigkeiten:

Eigentlich wäre also nur das Flügelprofil, die asymmetrische Form der Tragfläche, für den Auftrieb verantwortlich. Aber wie kann es dann sein, dass ein Flugzeug dauerhaft über Kopf fliegen kann (siehe Beweis in Abb.4)?



Abb.4

Weiterhin gibt es viele Flugzeuge, die über Tragflächen mit achsensymmetrischem Profil verfügen. Diese Flugzeuge dürften also auch nicht fliegen.

Berechnet man den durch einen solchen Druckunterschied erzeugten Auftrieb einmal für eine Cessna (1045kg), so wird deutlich, dass die Erklärung des Auftriebs mit Hilfe des Bernoulli-Effekts nicht alles sein kann, wie ein Beispiel aus „A Physical Description of Flight“ von David Anderson zeigt:

Die Tragflächenoberkante einer Cessna 172 ist nur 1,5% länger als die Tragflächenunterkante. Die Tragflächen müssen bei vollbesetzter Maschine ein Gewicht von 1045kg in der Luft halten. Legt man einer Berechnung des entstehenden Auftriebs die Bernoulli-Erklärung zu Grunde, so erhält man nur etwa 2% des benötigten Auftriebs oder die Maschine müsste bei etwa 640km/h abheben. In der Realität fliegt die Maschine jedoch schon bei nur 104km/h.

Es muss also zwangsläufig eine andere Erklärung für den Auftrieb geben, wie er in der Realität ja offensichtlich auftritt. Viel einleuchtender ist die Erklärung mit Hilfe der physikalischen Gesetze Newtons – außerdem kann man mit ihr jede beliebige Fluglage erklären. Betrachtet man die Tragfläche eines Flugzeugs während des Fluges, so bewegt sich diese zwar eigentlich durch die Luft, jedoch könnte man die Situation auch aus Sicht des Flugzeugs selbst betrachten; in diesem Fall würden die Luftmassen am Flugzeug –und somit auch an den Tragflächen - vorbeiströmen. Beide Betrachtungen sind gleichwertig, was sich gut an einem Drachen veranschaulichen lässt. Dieser hält sich bei genügend Gegenwind in der Luft, ohne dass er in Bezug auf den Boden seine Position ändern würde. Da die Betrachtungsweise der vorbeiströmenden Luft für das Verständnis einfacher ist, ist es sinnvoll eben diese zu wählen.

Strömt Luft von vorn an eine Tragfläche, so entstehen zwei Luftströme; einer oberhalb und einer unterhalb der Tragfläche. Betrachtet man den unteren Luftstrom, so erkennt man, dass er

nach unten hin abgelenkt wird, da die Tragfläche bezogen auf die Horizontale etwas geneigt ist (siehe Abb.5).

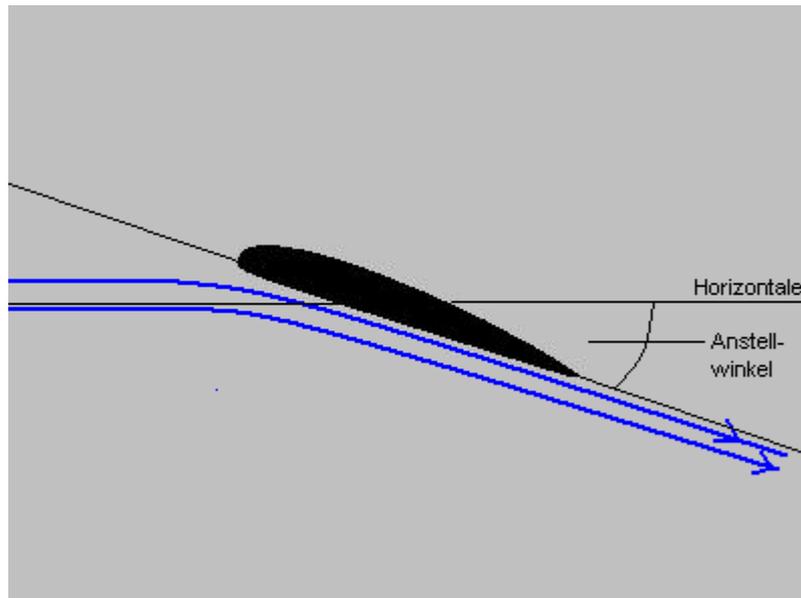


Abb.5

Den Winkel, um den die Tragfläche gegenüber der Horizontalen geneigt oder „angestellt“ ist, nennt man Anstellwinkel. Der Anstellwinkel ist ausschlaggebend dafür, wie stark der untere Luftstrom abgelenkt wird. Das zweite Newtonsche Axiom lehrt, dass die Änderung des Bewegungszustandes eines Körpers immer durch eine Kraft ausgelöst wird, die in Richtung der Bewegungszustandsänderung wirkt. Hier wird die Luft nach unten hin abgelenkt, folglich muss nach Newton eine nach unten hin gerichtete Kraft auf die Moleküle der Luft wirken. Diese Kraft wird von der Tragfläche aufgebracht, da diese ja aufgrund ihres Anstellwinkels für die Richtungsänderung der Luft verantwortlich ist. Zeiht man nun Newtons drittes Axiom hinzu, welches aussagt, dass jede Kraft eines Körpers auf einen anderen Körper eine Gegenkraft bedingt, die gleichgroß und entgegengesetzt auf den ersten Körper wirkt, so wird klar, dass die Tragfläche eine Kraft nach oben erfährt.

Diese Kraft ist zum einen abhängig davon, wie viel Luft pro Zeiteinheit nach unten hin beschleunigt wird (also von Größe der Tragfläche und Geschwindigkeit des Flugzeug im Bezug auf die Luft) und wie stark diese nach unten hin beschleunigt wird (also vom Anstellwinkel).

Egal, wie also eine Tragfläche geformt ist, kann sie mit dem richtigen Anstellwinkel einen Auftrieb erzeugen, der das Flugzeug in der Luft hält. So lässt sich zum Beispiel auch der Rückenflug (Abb.4) erklären. Je größer jedoch der Anstellwinkel ist, desto größer wird der Luftwiderstand, den das Flugzeug überwinden muss, um die Geschwindigkeit zu halten, da sich ja dadurch die Fläche vergrößert, auf die die Luftmassen treffen. Auch energetisch betrachtet ist dies einleuchtend: Vergrößert sich der Anstellwinkel bei gleich bleibender Geschwindigkeit, so vergrößert sich die „Luftmasse“, die in der gleichen Zeit nach unten beschleunigt werden muss. Dies erfordert einen größeren Energieaufwand.

Berechnet man zudem anhand dieser Erklärung des Auftriebs die Menge an Luft, die nach unten bewegt werden müsste, um zum Beispiel eine Boeing 747 in der Luft zu halten, kommt man auf ein sehr großes Volumen. Es muss noch einen weiteren Faktor für den Auftrieb geben. Und warum haben die Tragflächen eigentlich dieses merkwürdige Profil, wenn das nicht der Grund für den Auftrieb ist?

Man betrachte also den Luftstrom, der über die Tragfläche hinweg strömt: Strömt ein Gas oder eine Flüssigkeit über eine gekrümmte Oberfläche, folgt sie dieser in einem gewissen Maße. Dieser Effekt ist der Reibung zu verdanken. Die Moleküle, die direkt an der

gekrümmten Oberfläche anliegen, werden durch die Reibung an der Oberfläche sehr stark abgebremst, die zweite, etwas von der Oberfläche entfernte Schicht an Molekülen wird nun nur noch durch die sehr langsamen Moleküle, die direkt an der Oberfläche anliegen, abgebremst und behalten daher eine etwas höhere Geschwindigkeit bei. Jedes Molekül der vorbeiströmenden Flüssigkeit oder des vorbeiströmenden Gases wird so mehr oder weniger stark auf der der gekrümmten Oberfläche zugewandten Seite abgebremst. Es ergibt sich eine Ablenkung jedes Moleküls in Richtung der Oberfläche (man betrachte zum Vergleich die Steuerung eines Schlittens mit den Füßen). Je weiter also ein Molekül von der gekrümmten Oberfläche entfernt ist, desto weniger wird es abgebremst – behält also seine ursprüngliche Geschwindigkeit und Richtung zu einem größeren Teil bei. Diesen „Coanda-Effekt“ (nach Henri Coanda, 1886-1972, rumänischer Physiker) kann man leicht mit einem Löffel, einer Schüssel oder einem Glas in einem Wasserstrahl beobachten (Abb.6).



Abb.6

Führt man das Experiment durch, merkt man sofort, dass Löffel, Glas bzw. Schüssel zum Wasserstrahl hin gezogen werden. Dies erklärt sich natürlich auch über Newtons Axiome; die Kraft, die man mit Löffel, Glas bzw. Schüssel auf das Wasser ausgeübt hat, sodass dies seine Richtung ändert, bedingt eine Gegenkraft, die nun den Löffel, das Glas oder die Schüssel in Richtung des Wasserstrahls zieht. Genau nach diesem Prinzip funktioniert der Effekt auch am Flugzeug und seiner Tragfläche. Hier folgt die Luft auch der Krümmung der Tragfläche, wird so nach unten abgelenkt und es entsteht die entsprechende Gegenkraft, der Auftrieb (siehe Abb.7).

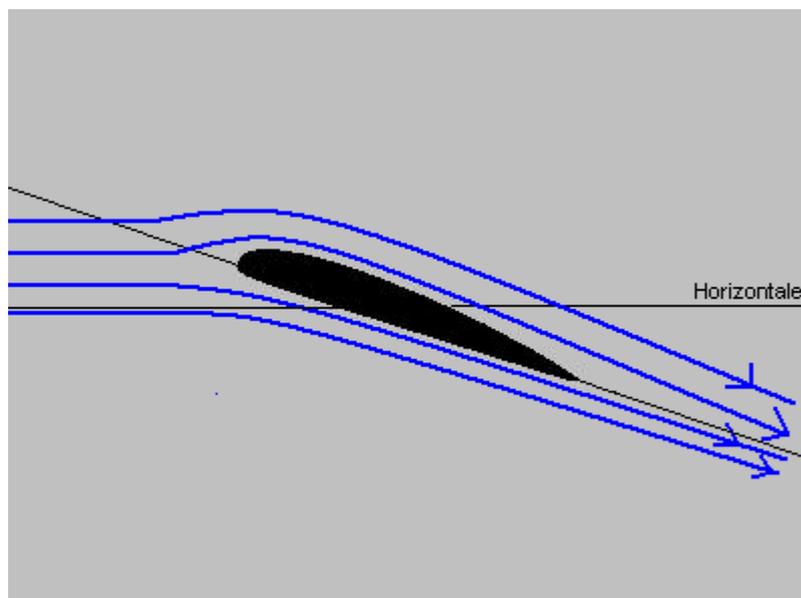


Abb.7

Je schneller sich die Tragfläche durch die Luft bewegt, je mehr Luft also pro Zeiteinheit die Tragfläche umströmt und abgelenkt wird, desto größer ist die Masse der nach unten hin beschleunigten Luft. Nach Newton ($F=m \cdot a$) ist die von der Tragfläche auf alle Luftmoleküle ausgeübte Kraft so insgesamt größer und sie erfährt entsprechend eine größere Gegenkraft von den Luftmolekülen: Es entsteht ein größerer Auftrieb. Außerdem gilt natürlich, dass bei einem höheren Anstellwinkel mehr Auftrieb erzeugt wird (wie schon beim Luftstrom unter der Tragfläche), da die Richtungsänderung der Moleküle der Luft stärker wird (natürlich ist dafür auch mehr Energie notwendig, da die Luft ja stärker nach unten hin beschleunigt wird, also eine höhere vertikale Geschwindigkeit erhält). Jedoch gibt es hier eine Grenze: Wird der Anstellwinkel zu hoch, kann die Luftströmung der Krümmung der Tragfläche aufgrund der Massenträgheit der Moleküle nicht mehr folgen. Die Reibung an der Tragflächenoberfläche reicht dazu nicht mehr aus; es kommt zum Strömungsabriss. Die Luftströmung wird also nur noch schwach abgelenkt (siehe Abb.8). Da die Luft weniger stark abgelenkt wird, ist hierfür auch eine geringere Kraft notwendig. Dadurch ist natürlich auch die Gegenkraft, die die Tragfläche nach oben drückt, geringer und das Flugzeug verliert an Höhe.

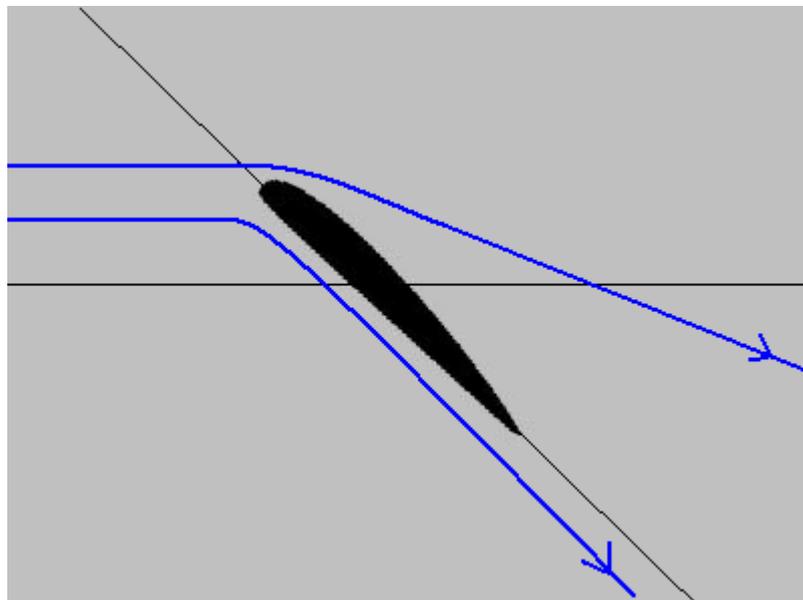


Abb.8

Um zu sehen, dass diese Erklärung des Auftriebs der Realität sehr nahe kommen muss, eignet sich Abbildung 9 sehr gut. Hier sieht man anhand der Wirkung auf eine dünne Wolkenschicht, wie ein Flugzeug, welches über diese hinweg fliegt, Luftmassen nach unten hin beschleunigt.



Abb.9

Messungen haben ergeben, dass die meiste Luft durch die gekrümmte Oberseite einer Tragfläche nach unten hin beschleunigt wird. Daher ist zum Beispiel der Effekt des Strömungsabrisses für ein Flugzeug verheerend. Außerdem ist dies der Grund dafür, dass Anbauteile wie Antennen, Triebwerke oder Zusatztanks fast immer an der Unterseite der Tragfläche angebracht werden. An der Oberseite würden diese Teile den Luftstrom unterbrechen. Es käme zu Verwirbelungen hinter dem jeweiligen Anbauteil, wodurch die Luft an dem Teil der Tragfläche, die hinter dem Anbauteil liegt, nicht mehr eng an der Oberfläche entlang strömt. Hier folgt die Luft also der Krümmung nicht und erzeugt so keinen Auftrieb. Man hätte eine gewisse Fläche der Tragflächenoberseite nicht genutzt. Entscheidend für die Effizienz einer Tragfläche ist somit die effektiv genutzte Fläche der Tragflächenoberseite, da diese einen wesentlichen Teil des Auftriebs erzeugt.

Ein weiterer Gedanke: Für den Rückenflug benötigt man einen extrem hohen Anstellwinkel der Tragfläche, da nun hauptsächlich der Luftstrom unterhalb der Tragfläche das Flugzeug in der Luft hält. Da dabei aber auch der Luftwiderstand steigt, ist der maximale Anstellwinkel bei gleich bleibender Geschwindigkeit von der Leistungsstärke des Motors abhängig. Somit kann ein normal motorisiertes Flugzeug im Rückenflug nur unter vollem Schub des Antriebs seine Höhe (hoher Anstellwinkel erforderlich) und Geschwindigkeit (hoher Schub erforderlich) halten. Ein Steigflug ist quasi undenkbar.

Zusammenfassend wird Auftrieb bei einem Flugzeug dadurch erzeugt, dass Luft mit Hilfe von Tragflächen nach unten hin beschleunigt wird. Dies kann nur durch eine Kraft geschehen, die die Tragfläche auf diese Luft ausübt. Laut Newton muss es zu dieser Kraft eine gleich große, entgegen gesetzte Kraft geben, die auf die Tragfläche des Flugzeugs wirkt und so die Gravitationskraft, die das Flugzeug erfährt, ausgleicht. So bleibt das Flugzeug auf seiner Flughöhe.

2.2 Wie wird ein Flugzeug gesteuert?

Hat man die Prinzipien Newtons, mit denen man den Auftrieb erklären kann, verstanden, so fällt es recht leicht, sich auch zu erklären, wie ein Flugzeug gesteuert wird. Zunächst am wichtigsten ist es, die Flughöhe des Flugzeuges zu beeinflussen. Irgendwie muss man das Flugzeug dazu bringen, an Höhe zu gewinnen, um über Hindernisse hinweg zu fliegen. Außerdem muss das Flugzeug aber auch wieder kontrolliert an Höhe verlieren können, um es zum Boden zurück zu bringen und ein- bzw. auszusteigen. Wie in Kapitel 2.1 ausgeführt, führen eine Erhöhung der Geschwindigkeit sowie eine Erhöhung des Anstellwinkels der Tragflächen eines Flugzeuges gleichermaßen zu einem größeren Auftrieb – das Flugzeug gewinnt an Höhe. Natürlich ist die Variante, nur die Geschwindigkeit zu erhöhen, zunächst einfach umzusetzen, indem man über den Antrieb mehr Schub produziert. Doch abgesehen davon, dass dies allein recht ineffizient wäre, gibt es hier eine Grenze: Der Highspeed Stall (engl. Stall: Strömungsabriss). Bei extrem hohen Geschwindigkeiten nahe der Schallgeschwindigkeit kann die Luftströmung dem Tragflächenprofil aufgrund der eigenen hohen Geschwindigkeit (Massenträgheit) und der sich bildenden Überschall-Schockwelle nicht mehr folgen. Die Strömung reißt ab und der Auftrieb, den der Luftstrom oberhalb der Tragfläche erzeugt, geht verloren. Ab einer gewissen Geschwindigkeit bringt eine noch höhere Geschwindigkeit also keinen vergrößerten Auftrieb mehr. Dieser Prozess ist schleichend, da die Strömung an verschiedenen Stellen der Tragflächenkrümmung abreißen kann, diese Stelle nennt man Ablösepunkt.

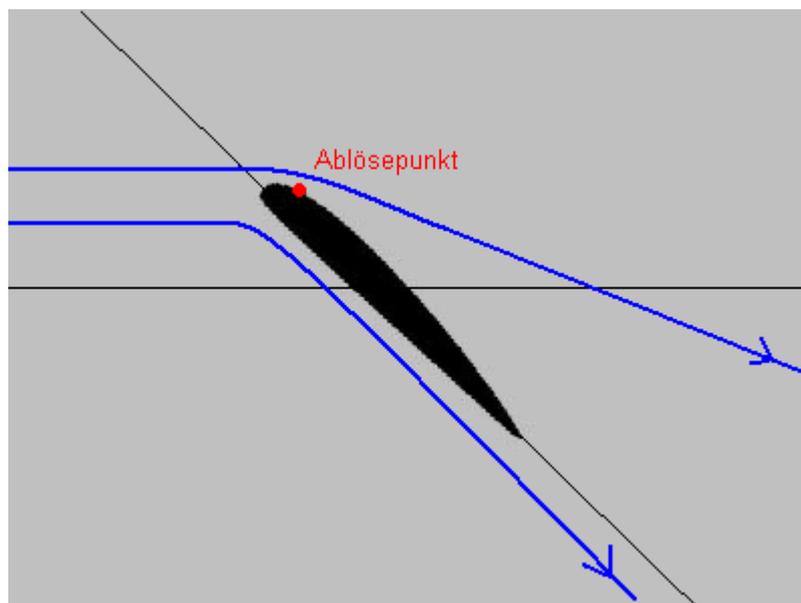


Abb.10

Je weiter der Luftstrom der Krümmung folgen kann, desto mehr Auftrieb wird noch erzeugt. Mit zunehmender Geschwindigkeit (bei gleich bleibendem Anstellwinkel) wandert der Ablösepunkt von der Tragflächenhinterkante in Richtung Tragflächenvorderkante. Somit wird zwar durch die höhere Geschwindigkeit mehr Luft umgelenkt (nach unten hin beschleunigt), diese jedoch weniger stark. Erhöht man die Geschwindigkeit eines Flugzeuges beispielsweise von Null, so erhöht sich der Auftrieb zunächst. Mit zunehmender Geschwindigkeit wandert der Ablösepunkt der Strömung um die Tragfläche zur Vorderkante hin und der Auftriebsgewinn durch die Beschleunigung verringert sich immer mehr. Ab einer gewissen Geschwindigkeit ist er Null und eine weitere Beschleunigung des Flugzeugs würde einen Verlust an Auftrieb zur Folge haben. Dies soll der Graph in Abbildung 11 verdeutlichen.

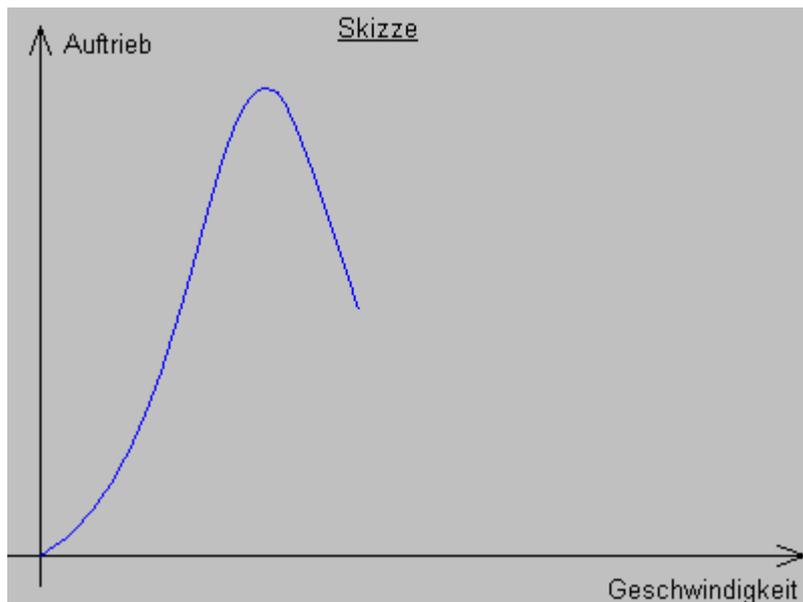


Abb.11

Viel praktikabler ist es demnach, den Anstellwinkel zu verändern, um die Flughöhe zu steuern. Zwar gibt es auch hier bei einem zu hohen Anstellwinkel die Problematik des Strömungsabrisses, jedoch erst bei extrem hohen Winkeln, die man bei normalen Flügen schon aus Komfortgründen vermeidet.

Die Tragflächen sind beim Flugzeug fest mit dem Rumpf verbunden, daher muss man also zur Veränderung des Anstellwinkels, das ganze Flugzeug in seiner Fluglage verändern, das heißt die Nase heben oder senken. Hierzu dient das horizontal angebrachte Höhenleitwerk, welches sich meist am Heck des Flugzeugs befindet (Abb.12).



Abb.12

Auf der Fotografie ist auch erkennbar, dass das Höhenleitwerk auf jeder Seite des Rumpfes über einen „starrten“ Teil verfügt, an dessen Hinterkante das bewegliche Höhenruder angebracht ist. Wird das Höhenruder wie hier nach unten geklappt (der Pilot drückt das Steuer von sich weg), so wird der Luftstrom, der das Höhenleitwerk umströmt, nach dem gleichen Prinzip nach unten hin abgelenkt wie dies bei den Tragflächen der Fall ist (vor allem durch den Coanda-Effekt). Nach Newton erfährt das Höhenleitwerk dadurch eine entsprechende

Gegenkraft und das Heck des Flugzeuges wird nach oben gedrückt. Folglich senkt sich die Nase des Flugzeuges, der Anstellwinkel der Tragflächen verringert sich und das Flugzeug baut Höhe ab.

Wird das Höhenruder nach oben geklappt (Pilot zieht das Steuer zu sich hin), so wird die vorbeiströmende Luft nach oben hin abgelenkt und das Heck des Flugzeuges erfährt eine nach unten gerichtete Gegenkraft, folglich hebt sich die Nase des Flugzeuges und das Flugzeug steigt (Abb.13)

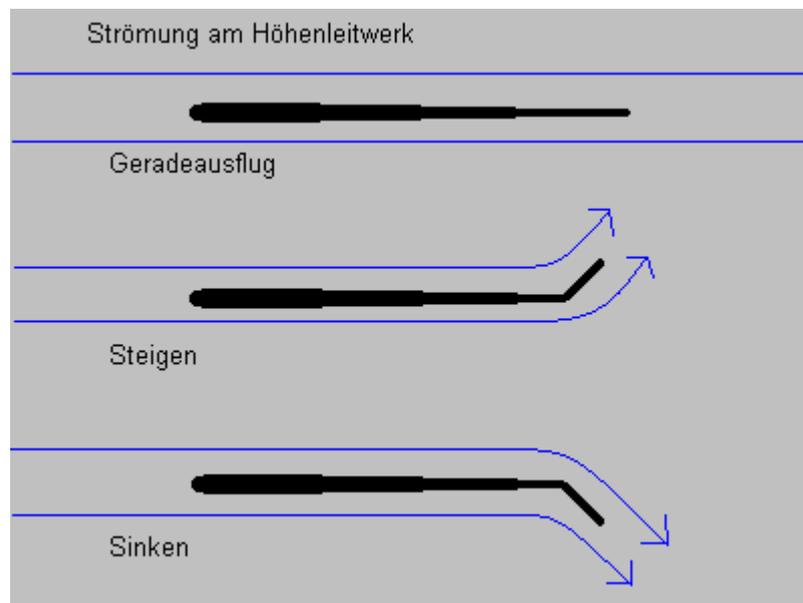


Abb.13

In seiner Funktion ähnelt das Höhenleitwerk den Tragflächen nicht unwesentlich. Dies geht sogar so weit, dass der Anstellwinkel des gesamten Höhenleitwerks verändert werden kann. So kann das Höhenleitwerk auch in Neutralstellung des Höhenruders dazu gebracht werden, etwas Luft nach oben oder unten abzulenken. Auf diese Weise kann die bei jedem Flug schon aufgrund des Treibstoffverbrauchs vorhandene Verschiebung des Schwerpunkts daran gehindert werden, die Nase des Flugzeuges zu heben oder zu senken, ohne dass der Pilot ständig das Steuer festhalten muss. Diese Funktion nennt sich Höhenrudertrimmung und erklärt die metallisch-blanken Bereiche rund um das Höhenleitwerk (erkennbar in Abb.12). Übrigens steuert der Autopilot eines Flugzeuges immer nur die Höhenrudertrimmung, sodass der Pilot auch bei eingeschaltetem Autopilot für schnelles Eingreifen die Kontrolle über das Höhenruder selbst hat und nicht erst den Autopiloten abschalten muss.

Etwas komplizierter wird es nun bei der Erklärung des Kurvenfluges. Der Kurvenflug ist die einzige noch fehlende Hürde, die die Luftfahrt nehmen musste, damit ein Flugzeug tatsächlich in der Praxis flugfähig war. Denn was nützt einem ein Gerät, mit dem man zwar aufsteigen und fliegen kann, bei dem man jedoch die Richtung nicht steuern kann?

Für den Kurvenflug benötigen Flugzeuge zwei verschiedene so genannte Steuerflächen: Querruder und Seitenruder. Geht man von der Fortbewegung am Boden oder auch im Wasser aus, ist es logisch, mit dem Seitenleitwerk zu beginnen:

Es handelt sich hierbei um die auffällige senkrecht stehende „Rückenflosse“ eines Flugzeuges. Auch hier handelt es sich um einen großen starren Teil und das kleinere bewegliche Seitenruder an der Hinterkante dieses Seitenleitwerks. Zunächst sorgt das Seitenleitwerk für Stabilität im Flug. Ohne dieses würde nichts verhindern, dass ein Flugzeug quer fliegt. Das Flugzeug würde im Spiel des Windes dazu neigen, dass der Rumpf nicht parallel zur Flugrichtung ausgerichtet wäre. Dies hätte fatale Folgen: Im Extremfall würden die Tragflächen quer von Luft angeströmt. Diese würde also nicht nach unten hin abgelenkt und

es würde kein Auftrieb erzeugt. Das Flugzeug würde absacken und ein Absturz wäre die Folge. Ähnlich wie der Schwanz des Wetterhahns sorgt das Seitenleitwerk für Stabilität, dafür, dass in aller Regel Rumpf und Flugrichtung parallel sind. Erklären kann man sich dies wieder mit Newtons Axiomen: Liegt das Seitenleitwerk schräg im Luftstrom, so lenkt es diesen um. Die entsprechende Gegenkraft sorgt dafür, dass das Leitwerk - und somit das Flugzeug - parallel zum Luftstrom ausgerichtet wird (Abb.14).

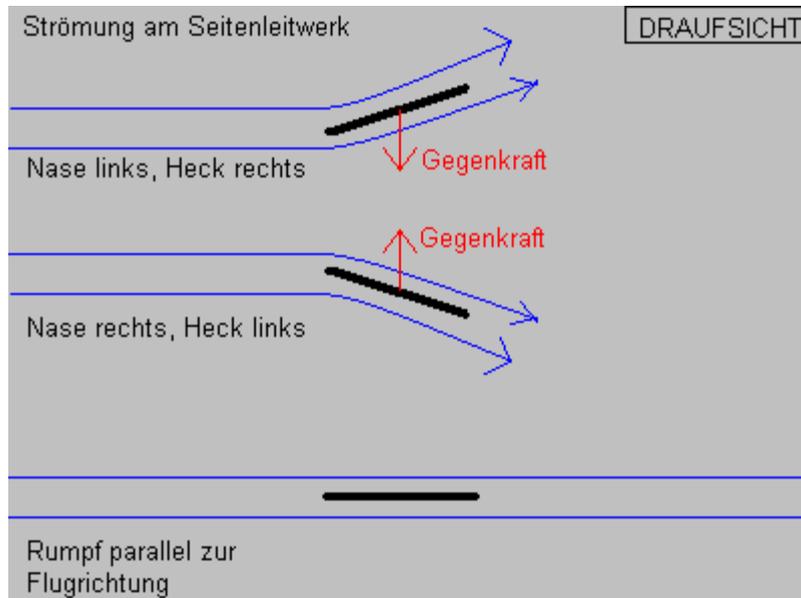


Abb.14

Ein Beispiel: Fliegt das Flugzeug in einem so genannten „linken Slip“, so befindet sich die Nase des Flugzeugs links von der Flugstrecke, die die Mitte des Flugzeugs beschreibt, während sich das Heck rechts davon befindet. Die linke Tragflächenspitze befindet sich also etwas weiter hinten als die rechte Tragflächenspitze. Hierzu passt die erste Situation aus Abb.14. Der Luftstrom um das Seitenleitwerk wird also nach rechts hin abgelenkt und das Seitenleitwerk erfährt die entsprechende Gegenkraft nach links. Somit wird das Heck des Flugzeuges nach links gedrückt und der Rumpf richtet sich wieder parallel zur Flugrichtung aus.

Wie bereits erwähnt verfügt das Seitenleitwerk über ein Seitenruder an der Hinterkante. Mit Hilfe dieses Ruders kann der Pilot absichtlich die Nase des Flugzeuges nach links oder rechts bewegen. Tritt er ins linke Pedal, so klappt das Seitenruder nach links und lenkt somit den Luftstrom ebenfalls nach links hin ab. Das Seitenleitwerk erfährt so die entsprechende Gegenkraft und wird nach rechts gedrückt. Da das Leitwerk am Heck des Flugzeuges angebracht ist, bewegt sich die Nase nach links. Dies wird beim Kurvenflug eines Flugzeuges genutzt. Doch wie schon erwähnt, reicht das Seitenleitwerk dafür allein nicht aus. Das Flugzeug würde sich nur schräg zur Flugrichtung stellen und aufgrund der Massenträgheit seine Flugrichtung weitgehend beibehalten. Die Folge wäre im Extremfall die Ausrichtung quer zur Flugrichtung, was - wie schon beschrieben - zum Absturz führen würde. Um die Flugrichtung eines Flugzeuges zu verändern, bedarf es aufgrund der hohen Geschwindigkeit eines Flugzeuges einer viel größeren Fläche als der des Seitenruders. Es muss eine extrem große Luftmasse in die Gegenrichtung der Kursänderung beschleunigt werden, um die Gegenkraft aufzubringen, die das Flugzeug umlenkt.

Hierfür eignen sich die Tragflächen am besten, denn diese stellen die größte aerodynamisch wirksame Fläche des ganzen Flugzeuges dar. Die Tragflächen eines Flugzeuges verfügen über so genannte Querruder, die an deren Hinterkante angebracht sind. Diese werden immer gegensätzlich betätigt; wird das Querruder der linken Tragfläche nach oben geklappt, wird gleichzeitig das der rechten Tragfläche nach unten geklappt (Abb.15).

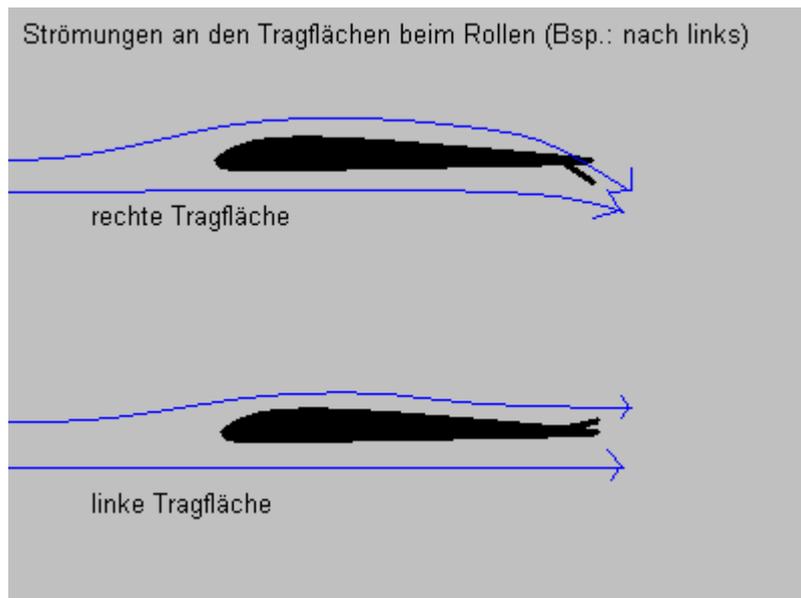


Abb. 15

Bewegt der Pilot also das Steuer nach links, so klappt das rechte Querruder nach unten, während das linke Querruder nach oben klappt. Dadurch wird der Luftstrom an der rechten Tragfläche stärker nach unten hin abgelenkt, also der Auftrieb hier vergrößert. An der rechten Tragfläche wird der Luftstrom dagegen im Vergleich zum normalen Geradeausflug weniger stark abgelenkt und somit hier der Auftrieb verringert. Das Ganze hat zur Folge, dass sich die rechte Tragfläche hebt, während die linke Fläche sich senkt. Das Flugzeug kann mit Hilfe der Querruder also in Schräglage gebracht werden und natürlich auch wieder aufgerichtet werden (d. h. die Tragflächen können aus einer Schräglage hinaus wieder in die Horizontale gebracht werden). Der ganze Vorgang wird in der Luftfahrt Rollen genannt.

Nun wurden alle drei Steuerachsen eines Flugzeuges beschrieben – und alle drei Steuerachsen sind auch für den Kurvenflug nötig: Will der Pilot den Kurs des Flugzeuges zum Beispiel nach rechts hin verändern, also eine Rechtskurve fliegen, so bringt er es zunächst in eine Schräglage, rollt das Flugzeug also. Das hat zur Folge, dass die Richtungen der Kräfte, die auf das Flugzeug wirken, sich ändern. Der von den Tragflächen erzeugte Auftrieb wirkt nämlich immer senkrecht zu den Tragflächen, da die Luftströme ja auch immer senkrecht zur Tragfläche umgelenkt werden. Dadurch verringert sich bei gleich bleibendem von den Tragflächen erzeugtem Auftrieb die Kraft, die das Flugzeug tatsächlich in der Luft hält. Ein Teil des Auftriebs ist nämlich nun dafür verantwortlich, dass das Flugzeug nach rechts hin beschleunigt wird. Dies ergibt sich aus der vektoriellen Zerlegung des Auftriebs in eine senkrechte und eine waagerechte Komponente (Abb.16).

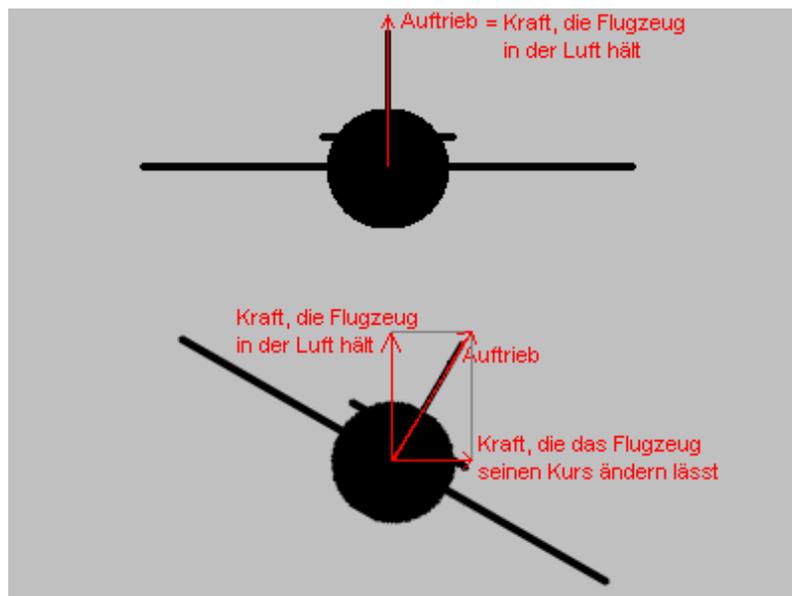


Abb.16

Man erkennt, dass die Aufteilung des Auftriebs in die Kraft, die das Flugzeug in der Luft hält und die Kraft, die das Flugzeug nach rechts ablenkt, vom Grad der Neigung der Tragflächen abhängt. Je weiter das Flugzeug also gerollt wird, desto größer wird zwar die Kraft, die das Flugzeug nach rechts beschleunigt, desto kleiner wird jedoch auch die Kraft, die das Flugzeug in der Luft hält. Daher kann das Flugzeug nicht um 90° gerollt werden – es würde sonst vom Himmel fallen. Im Linienbetrieb von Verkehrsflugzeugen wird ein maximaler Rollwinkel von 30° praktiziert.

Jedoch wird auch bei Rollwinkeln bis 30° der Anteil des Auftriebs, der das Flugzeug tatsächlich noch in der Luft hält, zugunsten der das Flugzeug ablenkenden Kraft verringert. Die Gewichtskraft, die das Flugzeug erfährt, bleibt jedoch gleich und das Flugzeug müsste bei jeder Kurve Höhe verlieren. Doch um dies zu verhindern, kann der Pilot das Steuer zu sich heran ziehen und so den Anstellwinkel der Tragflächen erhöhen. Dadurch wird mehr Auftrieb erzeugt und das Flugzeug kann seine Höhe beibehalten, da mit steigendem Auftrieb auch die Kraft anwächst, die das Flugzeug in der Luft hält. Nebenbei wird dadurch auch die Kraft erhöht, die das Flugzeug umlenkt, was die geflogene Kurve enger macht.

Stellt man sich den Kurvenflug – eingeleitet durch Querruder und unterstützt durch das Höhenruder – einmal räumlich vor, so kommt man zu dem Ergebnis, dass keine wirkliche Kurve geflogen wird. Viel mehr fliegt das Flugzeug in einem Links-Slip. Hier kommt nun die dritte Steuerachse des Flugzeugs ins Spiel – das Seitenruder. Im Kurvenflug tritt der Pilot in diesem Beispiel das rechte Seitenruderpedal, um die Nase des Flugzeugs nach rechts zu bringen. Dadurch wird die das Flugzeug umlenkende Kraft, die ja aus der Zerlegung des Auftriebs resultiert, so ausgerichtet, dass sie in Richtung des Mittelpunktes eines gedachten Kreises zeigt. Das Flugzeug fliegt dann zur Kursänderung auf dieser Kreisbahn und verlässt diese erst wieder, wenn der Pilot das Flugzeug wieder horizontal ausrichtet. Die Umlenkende Kraft wird dabei zur Zentripetalkraft dieser Kreisbewegung, beschleunigt also das Flugzeug gerade so stark zum Kreismittelpunkt hin, dass es ständig seine Richtung ändert, also auf der Kreisbahn bleibt (die Massenträgheit, die einen Körper sich mit gleich bleibender Geschwindigkeit geradeaus weiter bewegen lässt, wird also dadurch überwunden). Abb. 17 verdeutlicht diesen Zusammenhang recht anschaulich.

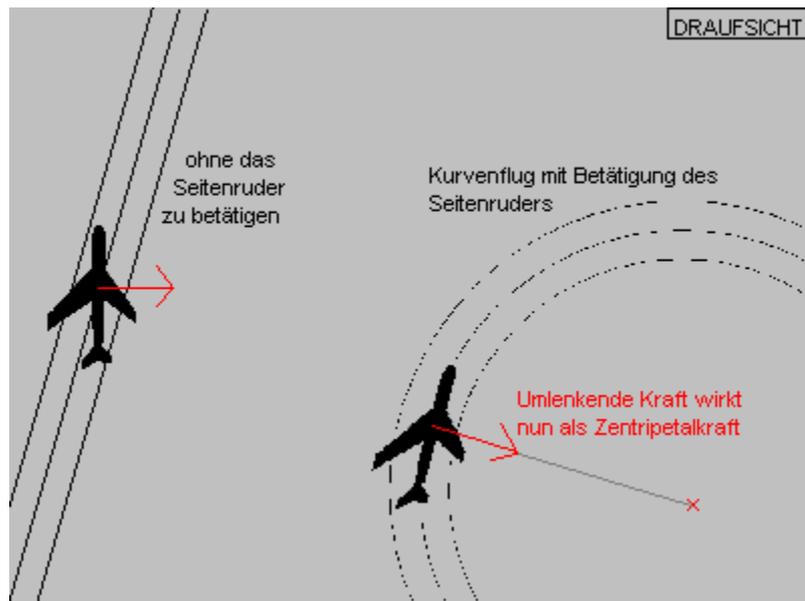


Abb.17

Damit wären die Grundlagen der Steuerung eines Flugzeugs erklärt: Die verschiedenen Ruder arbeiten also ähnlich wie die Tragflächen nach dem Prinzip des Umlenkens von Luftströmen und den daraus resultierenden Gegenkräften. Gesteuert werden so zunächst Höhen-, Seiten- und Querruder, deren Ausschläge immer, vor allem aber beim Kurvenflug, geschickt kombiniert werden müssen. Werden die Ruder nicht betätigt, so sorgen Höhen- und Seitenleitwerk für die nötige Stabilität im Flug, also dafür, dass sich das Flugzeug nicht unwillkürlich um die entsprechenden Steuerachsen bewegt.

Zusätzlich zu den bisher beschriebenen Steuerungsmöglichkeiten verfügen fast alle Verkehrsflugzeuge über zwei weitere aerodynamische Feinheiten, die vor allem bei der Landung von Bedeutung sind. Hierbei handelt es sich zum einen um die Bremsklappen oder Spoiler, zum anderen um die Flaps (zu Deutsch meist Landeklappen genannt).

Die Spoiler befinden sich auf der Oberseite der Tragflächen, also genau dort, wo der größte Teil des Auftriebs eines Flugzeugs erzeugt wird (Abb.18).



Abb.18

Es handelt sich um Klappen an der Tragflächenoberseite, die normalerweise flach an dieser anliegen und bei Bedarf fast senkrecht aufgestellt werden können. Die Funktionsweise der Spoiler ist im Grunde auf zwei Arten zu erklären. Zum einen stellen sie einen recht großen Luftwiderstand dar, was vor allem nach dem Aufsetzen des Flugzeugs auf der Landebahn zum Abbremsen genutzt wird. Andererseits unterbrechen sie natürlich den Luftstrom, der über die Tragfläche strömt. Dieser Luftstrom wird quasi von der Tragfläche abgelöst und nach oben hin abgeleitet. Dadurch wird natürlich auf der gesamten Länge der Tragfläche weniger Luft nach unten hin abgelenkt, wodurch der Auftrieb abnimmt. Dies muss, will man die Flughöhe beibehalten, durch einen höheren Anstellwinkel ausgeglichen werden.

Die Spoiler bremsen also das Flugzeug ab und verringern gleichzeitig dessen Auftrieb. Sie sind das einzige Mittel für die Piloten, mit dem sie ohne Höhengewinn im Flug die Geschwindigkeit verringern können, wenn das Zurücknehmen des Schubes dazu nicht ausreicht. Dies ist vor allem im Sinkflug von der Reiseflughöhe (ohne Geschwindigkeitsbegrenzung) in einen Luftraum unter 10000ft (Geschwindigkeitsbegrenzung von 250 Knoten) zur Landung entscheidend. Auch bei der Landung selbst sind die Spoiler wichtig; so gelingt es, zum Beispiel ein knapp über der Landebahn schwebendes Flugzeug noch vor dem Ende der Piste auf den Boden zu bringen.

Genau entgegengesetzt zum Spoiler arbeiten die Flaps. Bei ihnen handelt es sich um auftriebssteigernde Instrumente. Die Flaps sitzen am Ende der Tragflächen und werden bei Bedarf ausgefahren (Abb.19).

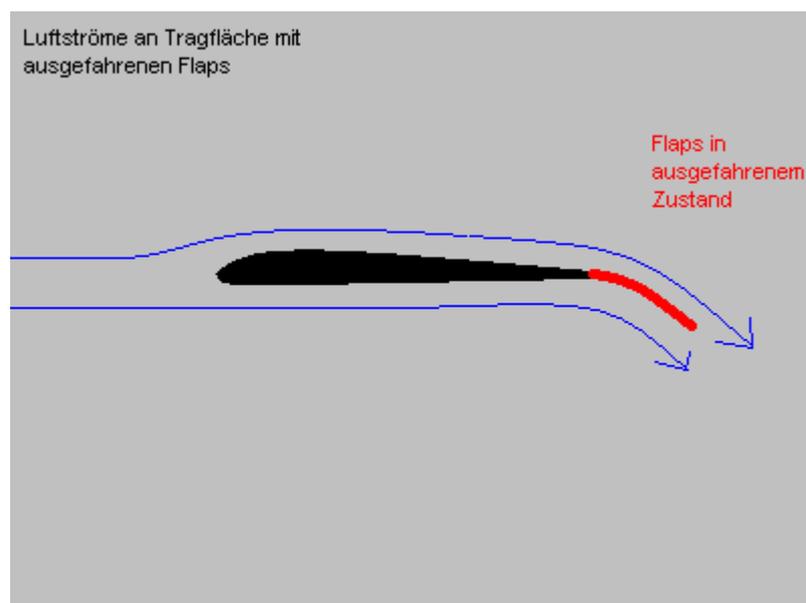


Abb.19

Durch das Ausfahren der Flaps wird die Tragfläche künstlich verlängert und weiter gekrümmt. Dadurch wird die die Tragfläche umströmende Luft noch stärker nach unten hin abgelenkt, wodurch sich der Auftrieb erhöht. Dabei ist natürlich zu beachten, dass das Ganze nur dann effektiv ist, wenn der Luftstrom über der Tragfläche der weiteren Krümmung auch folgen kann, ohne sich abzulösen. Die Luft darf die Tragfläche also nicht zu schnell anströmen. Doch die Flaps werden sowieso nur im Langsamflug eingesetzt. Sie sind eben gerade dazu bestimmt, dem Flugzeug auch bei niedrigen Geschwindigkeiten noch genügend Auftrieb zu liefern, sodass zum Beispiel der Landeanflug langsamer geflogen werden kann. Denn bei einer niedrigeren Geschwindigkeit ist es schlicht einfacher für den Piloten, präzise die Landebahn zu treffen. Nicht zuletzt werden so bei der Landung auch die Reifen geschont. Zwar ließen sich einige Flugzeuge auch ohne Flaps noch so langsam fliegen wie sie es in der Praxis mit Flaps tun, jedoch ließe sich der notwendige Auftrieb dann nur über einen extrem

hohen Anstellwinkel erzeugen, der es dem Piloten unmöglich machen würde, beim Landeanflug die Landebahn zu sehen.

2.3 Welche Rolle spielt der Antrieb beim Fliegen?

Eine der größten – wenn nicht die größte – Angst eines Fluggastes in einem modernen Flugzeug ist, dass die Triebwerke aussetzen könnten. Oft ist damit die Vorstellung verknüpft, dass es nach einem Triebwerkausfall sofort rapide abwärts ginge. Natürlich ist das nicht gleich der Fall, was nicht zuletzt Segelflugzeuge beweisen. Aber trotzdem ist der Antrieb ein entscheidender Faktor in der Fliegerei. Oft wird vermutet, dass schon Leonardo Da Vinci ein flugfähiges Flugzeug hätte konzipieren können, wenn er den geeigneten Antrieb zur Verfügung gehabt hätte. Es ist durchaus auffällig, dass nur relativ kurze Zeit nach Erfindung des Kolbenmotors (Ottomotor, 1876) schon das erste Flugzeug abhob (1903).

Eigentlich ist es für das Abheben eines Flugzeuges nur notwendig, dass Luft die Tragflächen genügend schnell anströmt. Es würde also ausreichen, einen Ventilator vor das Flugzeug zu stellen – oder ihn an die Nase des Flugzeuges zu bauen. Dieser würde den nötigen Luftstrom erzeugen, um das Flugzeug abheben zu lassen. Dass das Flugzeug sich dadurch natürlich auch nach vorne bewegt (es wird ja Luft nach hinten beschleunigt, wodurch eine Gegenkraft das Flugzeug nach vorne schieben muss), wäre dann nur ein positiver Nebeneffekt. Hier besteht der Unterschied zu anderen Fahrzeugen: Während ein Auto durch das Fehlen eines Motors zwar sinnlos wäre, aber bei Ausfall des Motors noch sicher bleibt, braucht das Flugzeug den Antrieb schon, um sich in der Luft zu halten, um den Insassen Sicherheit zu geben (natürlich wäre auch ein Flugzeug, was sich zwar in der Luft halten aber nicht fortbewegen könnte, sinnlos). So jedoch lässt sich die große Bedeutung des Antriebs für die Luftfahrt nachvollziehen. Soll ein Flugzeug aus eigener Kraft starten, sich dauerhaft sicher in der Luft halten, solange es der Mensch wünscht, soll es lange Strecken überwinden und in die Richtung fliegen, in die der Insasse sich bewegen will, so braucht es einen Antrieb. Denn Segelflugzeuge können all das nicht.

Beim Segelfliegen wird die Maschine durch die Luftreibung abgebremst, wodurch sich auch der Auftrieb verringert, da so weniger Luft nach unten hin abgelenkt wird. Damit das Segelflugzeug die Höhe beibehält, müsste man eigentlich den Anstellwinkel erhöhen. Da das Flugzeug aber immer weiter abgebremst wird, müsste man den Anstellwinkel immer weiter erhöhen; die Folge wäre schließlich ein Absturz aufgrund eines Strömungsabrisses. Daher muss das Segelflugzeug immer etwas Höhe abbauen, um so seine Geschwindigkeit zu halten und den nötigen Auftrieb zu erreichen. Befindet sich das Flugzeug in einem Aufwind, also in einem Luftstrom, der schneller nach oben strömt (z. B. Thermik oder Hangaufwinde) als es selbst zum Halten der nötigen Geschwindigkeit in diesem Luftstrom sinkt, so kann auch ein Segelflugzeug dauerhaft in der Luft bleiben oder sogar Höhe gewinnen. Man ist also auf eine Energiezufuhr von Außen in Form von Aufwinden angewiesen, da das Segelflugzeug selbst keinen Motor hat, mit dem es diese Energie aufbringen könnte.

Neben der Tatsache, dass der Antrieb essenziell für das Funktionieren eines Flugzeugs ist und ein reibungsloses Funktionieren des Antriebs die Lebensversicherung der Insassen darstellt, wenn ein Flugzeug zum Beispiel über dem offenen Meer fliegt, ist der Antrieb heute die Komponente des Flugzeugs, die die meisten Aussichten auf Weiterentwicklung hat. Während die Aerodynamik heutzutage so ausgereift ist, dass die Flugzeughersteller scheinbar nur noch aerodynamische Verbesserungen entwickeln können, die die Effizienz des Flugzeugs um maximal 5%, meist jedoch um weniger als 1%, steigern, sind in der Triebwerkstechnik noch wahre „Quantensprünge“ möglich. So soll das Triebwerk der sich in Entwicklung befindenden Boeing 787 um 15% effizienter sein als heutige Triebwerke. Und das bei einem Erstflugtermin des Prototyps noch im Jahre 2007.

Daran lässt sich erkennen, dass hauptsächlich im Bereich der Antriebe noch viel Potential zu stecken scheint. Grundsätzliches, Revolutionäres und vor allem große ökologische und ökonomische Verbesserungen: All das lässt sich nur im Bereich der Antriebe der Flugzeuge erreichen. Die Aerodynamik ist zu ausgereift, wenn gleich es sicher auch hier noch einige

Verbesserungen geben wird. Stellt man sich zum Beispiel ein Szenario vor, in dem der Menschheit das Öl ausgeht, so kann eine aerodynamische Veränderung der Flugzeuge selbst die Luftfahrt nicht retten; allein der Antrieb muss dann neu erfunden werden, muss die Lösung liefern.

Die genauere Beschäftigung mit Funktionsweise und Historie des Flugzeugtriebwerks ist also gerade wegen seines Verbesserungspotentials bei gleichzeitiger Unabdingbarkeit in der Luftfahrt so interessant.

3. Die Historie des Antriebs von Flugzeugen

3.1 Ab 1903: Der Kolbenmotor mit Propeller

1903, als die Luftfahrt ihre ersten Schritte wagte, kam eigentlich nur ein Antrieb in Frage, denn die Dampfmaschine war einfach zu schwer und der Elektromotor war aufgrund des Fehlens geeigneter Batterien nicht brauchbar. So fiel die Wahl also auf den Kolbenmotor. Wie genau funktioniert nun dieses Antriebskonzept, bei dem ein Kolbenmotor einen Propeller antreibt? Zunächst muss einem das Funktionsprinzip eines Ottomotors (Abb.20) klar sein.

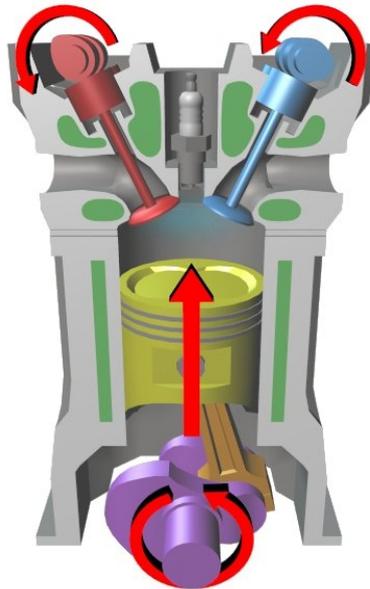


Abb.20

Diese Abbildung stellt einen Viertakt-Motor dar, den auch schon die Wrights in ihrem ersten Flieger verwendet hatten und wie er prinzipiell bis heute funktioniert. Sein Name rührt daher, dass vier verschiedene Arbeitsgänge nötig sind, um die chemische Energie des Treibstoffs in kinetische Energie einer Welle umzuwandeln. Im ersten Arbeitsgang, dem ersten Takt, öffnet sich ein Ventil (hier hellblau) und der Kolben (hier gelb) bewegt sich nach unten, sodass ein Treibstoff-Luftgemisch eingesaugt wird. Die Bewegung des Kolbens im ersten Takt muss beim Starten des Motors von außen erzeugt werden, indem die Kurbelwelle (hier violett) gedreht wird (z.B. durch einen Anlasser oder, wie bei älteren Flugzeugen oft zu sehen, durch das Drehen des Propellers von Hand). Läuft der Motor bereits, so ist diese Bewegung des Kolbens aus dem vorherigen Arbeitsgang aufgrund der Massenträgheit schon vorhanden.

Im hier abgebildeten zweiten Takt schließt sich das Ventil und der Kolben bewegt sich nach oben, wodurch das Treibstoff-Luftgemisch, welches nicht entweichen kann, verdichtet wird. Bekanntlich ist dies gleichbedeutend mit einer hohen Temperatur, die nun ausreicht, das Treibstoff-Luftgemisch zur Verbrennung zu bringen. Ist der Kolben ganz oben angekommen, wird das Gemisch also durch einen elektrisch erzeugten Funken entzündet.

Bei der Verbrennung entstehen heiße Abgase, die ein weit größeres Volumen einnehmen als das Treibstoff-Luftgemisch. Durch diese Ausdehnung wird der Kolben wieder nach unten gedrückt. Dieser dritte Takt ist der eigentliche Arbeitsvorgang des Motors.

Im vierten und letzten Takt öffnet sich ein anderes Ventil (hier rot dargestellt) und der Kolben bewegt sich wiederum nach oben. Dabei schiebt der Kolben die entstandenen Abgase aus dem Verbrennungsraum heraus. Ist dieser Arbeitsgang beendet, folgt wieder der erste Takt.

Die Zeitpunkte für Öffnen der Ventile und Zündung werden durch mechanische Ansteuerungen über die Position der Kurbelwelle bestimmt. Außerdem treibt die Kurbelwelle einen Generator an, der den Zündfunken erzeugt.

Nicht zuletzt ist die Kurbelwelle jedoch das Bauteil, welches die gewonnene kinetische Energie aus dem Motor heraus leitet und so nutzbar macht. Will man größere Leistungen erzielen, so empfiehlt es sich, die Größe des Hubraums und somit die Menge des in einem Arbeitsgang verbrannten Treibstoffes zu erhöhen. Außerdem hat sich das geschickte Koppeln mehrerer Zylinder und Kolben an eine Kurbelwelle bewährt. Befestigt man die Kolben der verschiedenen Zylinder nämlich versetzt an der Kurbelwelle, so kann das Treibstoff-Luftgemisch in den verschiedenen Zylindern zu unterschiedlichen Zeitpunkten entzündet werden. Dadurch lassen sich die „Arbeitspausen“ eines Zylinders während dreier seiner Takte überbrücken., sowie bei geschickter Anordnung der Zylinder Vibrationen abschwächen.

In der Luftfahrt wird seit Beginn im Jahre 1903 meist über ein Getriebe ein Propeller von der Kurbelwelle des Motors angetrieben. Dieser Propeller besteht aus mehreren Blättern, die um eine gemeinsame Achse kreisen (Abb.21 und Abb.22).



Abb.21



Abb.22

Jedes einzelne Propellerblatt funktioniert prinzipiell wie eine kleine Tragfläche: Es besitzt auch ein spezielles Profil, welchem die Luft folgt, wenn das Propellerblatt kreist. Auch beim Propeller besitzen die Blätter einen Anstellwinkel, der sich sogar über eine geschickte mechanische Konstruktion verändern lässt, um die Effizienz des Propellers der jeweiligen Drehzahl und Fluggeschwindigkeit anzupassen. Dies erfolgt über eine Drehung des Propellerblatts um seine Längsachse.

Da das Propellerblatt kreist, legt der nah am Spinner gelegene Teil eine viel kürzere Strecke zurück als die äußere Spitze, wenn eine Umdrehung erfolgt. Daraus folgt, dass das Propellerblatt innen mit einer geringeren Geschwindigkeit durch die Luft fährt als außen. Damit jedoch trotzdem eine optimale Umlenkung der Luftmassen möglich wird, besitzt das Propellerblatt eine geschwungene Form, also ein sich auf der Länge änderndes Profil und auch einen sich auf der Länge ändernden Anstellwinkel, was in Abb.21 und Abb.22 recht gut zu erkennen ist.

Durch die Drehung des Propellers wird also Luft nach hinten hin beschleunigt. Die entsprechende Gegenkraft beschleunigt im Gegenzug das Flugzeug.

Der Pilot konnte natürlich in den Anfangsjahren der Fliegerei noch nicht den Anstellwinkel der Propellerblätter verändern, sondern steuerte den benötigten Schub allein durch Verändern

der Treibstoffzufuhr und somit der Drehzahl des Motors. Doch bereits zur Zeit des zweiten Weltkrieges verfügten die meisten Flugzeuge über die Möglichkeit, den Anstellwinkel der Propellerblätter zu verändern. Somit standen seitdem den Piloten zwei Möglichkeiten zur Verfügung, den Schub zu steuern: Die Veränderung der Drehzahl, also der Geschwindigkeit der Propellerblätter, sowie die Veränderung des Anstellwinkels. Im Grunde stehen also die selben Möglichkeiten zur Steuerung des Vortriebs des Propellers zur Verfügung wie zur Steuerung des Auftriebs der Tragflächen, was sich aus der Ähnlichkeit des Funktionsprinzips ergibt.

Bis heute gab es hunderte verschiedene Variationen dieses Antriebsprinzips. Ob die Anzahl der Propellerblätter oder die der Zylinder variiert wurde; alle diese Variationen basieren auf dem selben Prinzip und unterscheiden sich nur in ihren Spezialisierungen. So braucht ein großes Flugzeug einen großen Motor, der auch entsprechend viel wiegt, während eine viersitzige Maschine einen kleinen Motor benötigt, der vor allem leicht sein muss. Je nach Fluggeschwindigkeit des Flugzeugs sind auch andere Propeller mit anderen Anzahlen von Propellerblättern optimal. Doch bis heute durchgesetzt hat sich eigentlich nur die Anwendung bei kleinen Sportmaschinen, da der Kolbenmotor hier der einzige finanziell sinnvolle Antrieb ist. Im Vergleich zu einer Gasturbine herrschen im Innern eines kleinen Kolbenmotors recht niedrige Temperaturen, was die Verwendung von billigeren und leichteren Metallen möglich macht.

Große Flugzeuge, die vor der Erfindung der Gasturbine von großen Kolbenmotoren angetrieben worden wären, fliegen heute mit Turboprop- oder Turbofan-Antrieben, da diese weitaus mehr Schub und somit höhere Geschwindigkeiten, sowie höhere Nutzlasten möglich machen. Das höhere Gewicht sowie die höheren Kosten aufgrund der durch die höheren Temperaturen benötigten Materialien fallen hier kaum ins Gewicht.

In den letzten Jahren kann jedoch beobachtet werden, dass die Flugzeuge, die mit Gasturbinen-Antrieben ausgestattet werden, immer kleiner werden. Zwar lohnt sich der Einsatz bei Sportflugzeugen noch nicht, aber das könnte sich in Zukunft ändern, da die Gasturbine immer kleiner und billiger wird.

3.2 Ab 1939: Die Gasturbine

Die Gasturbine stellt die größte Errungenschaft der Luftfahrt seit ihrem Bestehen dar. Erst diese dem Kolbenmotor gegenüberstehende Alternative machte die heute üblichen Fluggeschwindigkeiten möglich. Zwar hatte sich schon der Engländer John Barber im Jahre 1791 eine Maschine patentieren lassen, die der heutigen Gasturbine prinzipiell ähnelte, doch funktionierte diese vor allem aufgrund des Fehlens geeigneter Materialien nicht. Das Prinzip wurde als nicht realisierbar oder gar grundsätzlich falsch abgeschrieben und so schnell nicht wieder aufgegriffen.

Erst in der zweiten Hälfte der 1930er Jahre erwog man wieder den Bau einer Gasturbine, jedoch ist nicht bekannt, ob diese Überlegungen auf den Plänen Barbers beruhten oder ob die Gasturbine neu erfunden wurde. Fakt ist jedoch, dass der deutsche Flugzeughersteller Heinkel die Gasturbine für sich entdeckte und mit dem HeS1 das erste Triebwerk herstellte, das auf dem Prinzip der Gasturbine basierte.

Die Gasturbine führt im Grunde die selben Arbeitsgänge aus wie ein Kolbenmotor. Während im Kolbenmotor jedoch in vier Schritten (Takten) alle Arbeitsgänge im gleichen Raum ablaufen, laufen diese Arbeitsgänge in der Gasturbine gleichzeitig, räumlich voneinander getrennt ab (Abb.23).

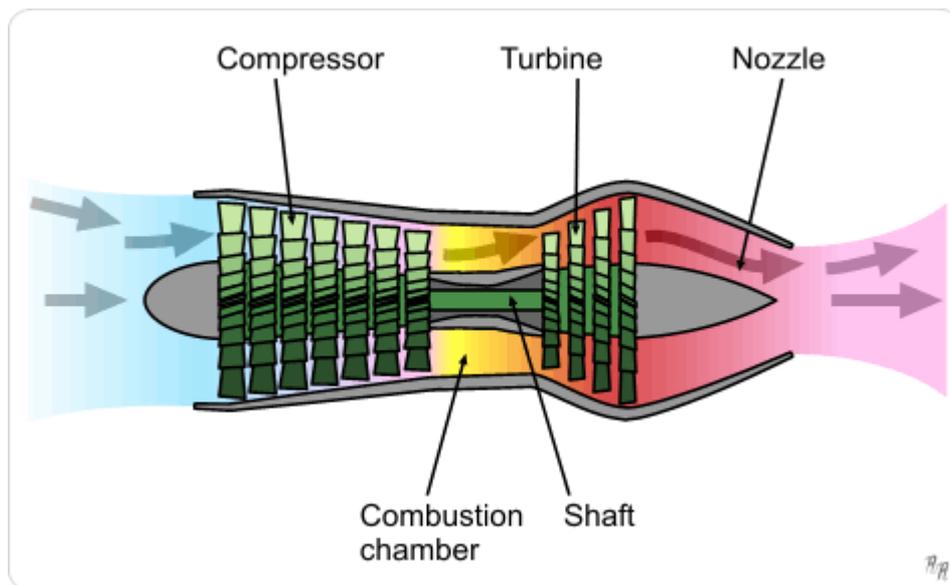


Abb. 23

Für das Funktionieren des Triebwerks ist es unerlässlich, dass Verdichter (Compressor) und Turbine, welche über eine Welle verbunden sind (Shaft), rotieren. Beim Starten des Triebwerks wird dies von außen durch einen Anlasser bzw. per Druckluft bewirkt. Der Verdichter besteht aus vielen Schaufeln, die tragflächenähnliche Profile haben. Sie funktionieren also ähnlich wie Propellerblätter. Die einzelnen Schaufelräder (hier sieben) beschleunigen Luftmassen, die über den Triebwerkeinlass (blauer Luftstrom) in das Triebwerk gelangen. Zwischen den einzelnen Schaufelrädern befinden sich fest angebrachte Leitschaufeln, quasi unbewegliche Schaufelräder (Statoren; hier nicht dargestellt), die verhindern, dass die Luftmassen auch in Drehrichtung des Verdichters beschleunigt werden. Die beschleunigten Luftmassen gewinnen jedoch faktisch nicht an Geschwindigkeit, sondern gewinnen an Druck, da nur begrenzt Raum vorhanden ist. Die immer enger werdende Form

des Triebwerkinnenraums begünstigt dies. Die Vorgänge im Verdichter entsprechen dem zweiten Arbeitsgang eines Kolbenmotors.

Nach Durchlaufen des Verdichters gelangt die unter hohem Druck stehende Luft in die Brennkammer (Combustion Chamber). Hier wird ständig Treibstoff eingespritzt, der sich aufgrund der aus dem hohen Druck der Luftmassen resultierenden hohen Temperatur sofort entzündet. Daraufhin steigen Druck und Temperatur des Gemisches aus Luft und verbrennendem Treibstoff extrem stark an. Die Temperatur am Ende der Brennkammer, also dort, wo der Verbrennungsvorgang endet, beträgt bei heutigen Triebwerken etwa 2000°C. Für diesen Arbeitsgang, der dem dritten Takt im Kolbenmotor entspricht, ist der Verdichter essenziell. Ohne Verdichtung, wären Temperatur und Druck der Luft in der Brennkammer zu niedrig, um den Treibstoff zu entzünden. Im Laufe der Entwicklung der Gasturbine wurde angestrebt, den Verdichter immer mehr zu verbessern (heutige Verdichter bringen es auf eine Drucksteigerung zwischen Triebwerkseinlass und Brennkammereintritt vom bis zu Dreißigfachen), sodass die Luftmassen beim Eintritt in die Brennkammer möglichst hohen Druck und damit eine möglichst hohe Temperatur haben. Denn je höher die Temperatur beim Eintritt in die Brennkammer, desto besser entzündet sich der Treibstoff, desto effizienter wird der Treibstoff verbrannt. So wird erreicht, dass immer weniger unverbrannter Treibstoff und immer weniger schädliche Abgase die Brennkammer verlassen. Außerdem erhöhen sich bei mehr und effizienter verbranntem Treibstoff natürlich Temperatur und Druck des Gemisches beim Brennkammeraustritt.

Das enorm heiße und unter hohem Druck stehende Gemisch muss nun aus der Brennkammer entweichen. Zwar ist die Brennkammer im Gegensatz zum Kolbenmotor zu zwei Seiten hin offen (sowohl zum Verdichter hin als auch in Richtung Turbine), doch verhindern der im Vergleich zur Turbinenseite höhere Druck der Verdichterseite sowie die Formgebung der Brennkammer ein Entweichen zum Verdichter hin.

Das heiße Gas gelangt nun in die Turbine, die im Grunde genau wie ein Verdichter aufgebaut ist, jedoch mit umgekehrten Schaufelrädern. Die ausströmenden Gase werden durch die einzelnen Schaufeln umgelenkt. Nach Newton muss es eine Gegenkraft geben, die wiederum das Schaufelrad in Rotation versetzt, da dieses frei gelagert ist. Hinter jedem Schaufelrad folgt wie beim Verdichter eine Reihe fest montierter Schaufeln, die die Luftmassen wieder in die ursprüngliche Richtung lenken. Die erzeugte Rotation der Welle, auf der die Schaufelräder der Turbine sitzen, entspricht einer kinetischen Energie. Diese Energie wurde den heißen, ausströmenden Gasen entzogen, sodass diese nach durchlaufen der Turbine einen geringeren Druck bzw. eine geringere Temperatur besitzen. Die Turbine ist direkt mit dem Verdichter verbunden, sodass sie diesen antreibt. Daher entzieht sie den ausströmenden Gasen auch nur so viel Energie wie für den Betrieb des Verdichters nötig ist.

Die in der Turbine gewonnene Energie wurde den Luftmassen also im Verdichter zugeführt, sodass die Energiebilanz des Systems Verdichter - Turbine ausgeglichen ist. Die in Form von Treibstoff zugeführte Energie wurde noch nicht genutzt und ist in Form des immer noch relativ hohen Drucks bzw. der immer noch relativ hohen Temperatur der sich nun in der Düse (Nozzle) befindenden Gase vorhanden.

Die Düse ist eigentlich nur der Auslass des Triebwerks, in dem der hohe Druck der heißen Gase abgebaut wird. Die Gase „entspannen“, indem sie sehr schnell durch die Düse aus dem Triebwerk entweichen. Hier entsteht der eigentliche Schub, den ein Triebwerk erzeugt. Die Gase verlassen das Triebwerk schneller als die Luftmassen ins Triebwerk einströmen.

Nach Newton ($F=m \cdot a$) ist dafür eine Kraft verantwortlich, die auf die Luftmassen ausgeübt wird. Diese Kraft erzeugt natürlich auch eine Gegenkraft, die nun das Triebwerk und damit das Flugzeug in die entgegengesetzte Richtung beschleunigt.

Ein bis heute immer wieder auftretendes Problem dieses Antriebes ist zum Beispiel der so genannte Blowout, bei dem die heißen Gase nicht durch die Turbine die Brennkammer verlassen, sondern nach vorne durch den Verdichter entweichen. Dabei wird der Schub, den

das Triebwerk normalerweise erzeugen würde nach vorn hin frei und das Flugzeug wird extrem stark abgebremst. Zwar kommt dieser „Blowout“ sehr selten vor, doch wenn er auftritt, hat er extreme Folgen, wie Abb.24 zeigt.



Abb.24

Bei dieser F-18 kam es kurz nach der Landung am 11. November 2006 zu einem solchen Blowout, sodass das Flugzeug rückwärts von der Piste abkam und mit dem Höhenruder durch den Boden pflügte.

Trotz dieser Gefahr hat die Gasturbine sehr viele Vorteile gegenüber dem Kolbenmotor. So gibt es kein Bauteil, welches sich wie der Kolben eines Kolbenmotors auf und ab bewegt. Alle bewegten Bauteile rotieren um eine gemeinsame Achse, was Lärmpegel und Vibrationen in der Flugzeugkabine drastisch reduziert. Bei einem sehr leistungsstarken Kolbenmotor muss der Motorblock den extremen auftretenden Kräften, die aus der Auf- und Abbewegung des oder der Kolben resultieren, standhalten, was die Verwendung von viel schwereren Materialien notwendig macht. Anders bei der Gasturbine: Aufgrund der hohen Temperaturen sind solch hohe Anforderungen nur an das Material der Turbine gestellt. Der größte Vorteil der Gasturbine liegt in ihrem günstigen Verhältnis zwischen Leistung und Gewicht, was die heutigen Nutzlasten und Geschwindigkeiten von Verkehrsflugzeugen erst möglich macht.

Im Jahre 1939 flog das erste Flugzeug mit einer Gasturbine als Antrieb. Es handelte sich um das HeW3-Triebwerk von Heinkel. Mit Ausnahme der Sportfliegerei, in der der Kolbenmotor aufgrund der geringen Leistungsanforderungen effizient arbeitet und in der Anschaffung billiger ist als eine Gasturbine, basieren alle Triebwerke, die heute Verwendung in der Fliegerei finden, auf dem Funktionsprinzip der Gasturbine, wenngleich es einige Variationen und Spezialisierungen gibt. Wird die Gasturbine wie hier beschrieben ohne Spezialisierung oder Variation verwendet, spricht man vom Jetantrieb, der heute jedoch aufgrund seines großen Treibstoffdurstes kaum mehr eingesetzt wird. Die heute eingesetzten Variationen sollen im Folgenden vorgestellt werden.

3.2.1 Das Turboprop-Triebwerk

Noch im Jahre 1939 begann man unter anderem in Budapest mit ersten Überlegungen, die Gasturbine nicht als eigentlichen Antrieb zu nutzen, sondern mit ihr einen gewöhnlichen Propeller anzutreiben. Zunächst erscheint diese Idee etwas unlogisch, doch erhoffte man sich so eine entscheidende Leistungssteigerung der Gasturbine. Die Idee beruht auf der Tatsache, dass nach Newton eine Kraft gleich der durch die Kraft beschleunigten Masse multipliziert mit der durch die Kraft bewirkten Beschleunigung dieser Masse ist. Übertragen auf einen Flugzeugantrieb bedeutet dies, dass ein Triebwerk, welches große Luftmassen nur gering beschleunigt, also die Geschwindigkeit der Luftmassen nur geringfügig erhöht, die selbe Kraft aufbringen kann wie ein Triebwerk, welches geringere Luftmassen extrem stark beschleunigt. Entsprechend erfährt das Flugzeug auch die gleiche Gegenkraft und wird genau so stark beschleunigt. Die Gasturbine in unveränderter Form arbeitet mit relativ geringen Luftmassen und beschleunigt diese extrem stark – der Abgasstrahl, der das Triebwerk verlässt, ist also extrem schnell im Vergleich zur umgebenden Luft. Das Prinzip des Turboprops stellt jedoch die erste Variante dar (Abb. 25).

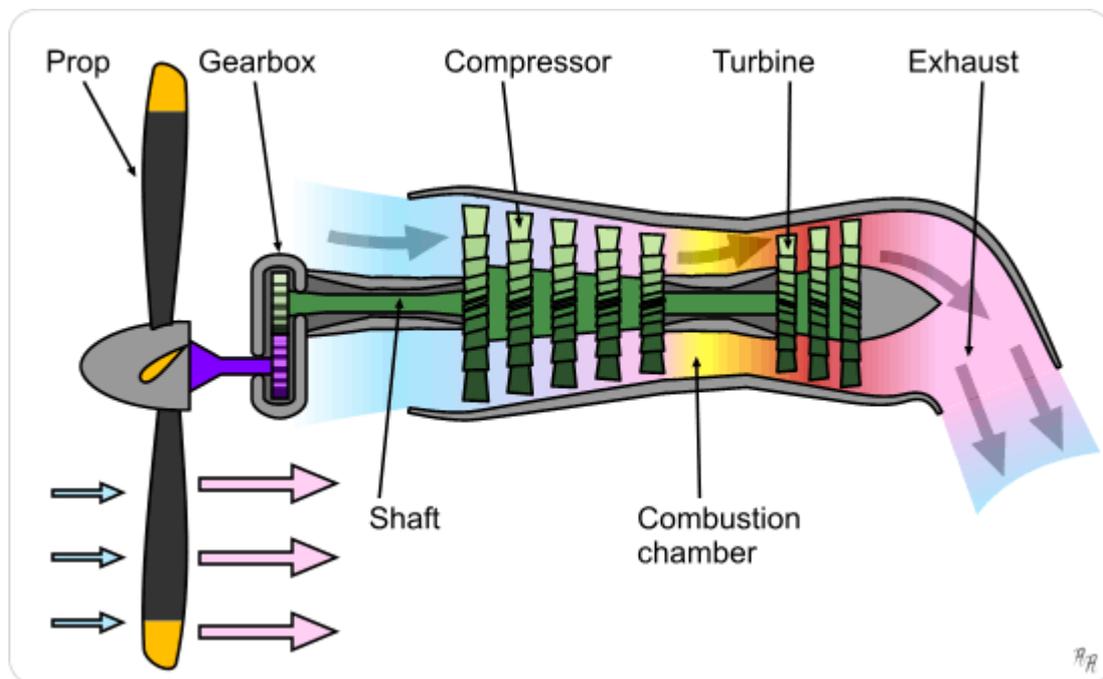


Abb.25

Das Turboprop-Triebwerk beinhaltet die herkömmliche Gasturbine (siehe Kap. 3.2), jedoch zeichnet es sich dadurch aus, dass die Turbinen im hinteren Teil des Triebwerks stärker ausgelegt ist. Sie entzieht, zum Beispiel durch ein zusätzliches Schaufelrad, dem ausströmenden Gas mehr Energie, als zum Betrieb des Verdichters notwendig ist. Dadurch verringert sich zum einen die Geschwindigkeit des letztlich das Triebwerk verlassenden Abgasstrahls optimalerweise auf ein Minimum, zum anderen kann zusätzlich zum Verdichter noch ein Propeller durch die Turbinen angetrieben werden.

Der Propeller sorgt dann wiederum für den nötigen Schub, indem er bedingt durch den großen Durchmesser eine große Luftmasse erfasst und diese nur geringfügig beschleunigt, da der Propeller über ein drehzahlminderndes Getriebe (Gear Box) mit der Turbinen verbunden ist.

Diese Form des Flugzeugantriebs verdrängte in der zivilen Luftfahrt sehr schnell die Jetantriebe. Der Vorteil lag auf der Hand: Der Turboprop war leiser und verbrauchte weniger Treibstoff als jeder Jet. Beim Jetantrieb geht viel Energie verloren. So erhöht sich die Reibung

(zum Beispiel in der Turbine oder der Düse) quadratisch mit der Geschwindigkeit des Abgasstrahls – diese Energie geht letztlich in Form von Wärme verloren. Es wird also klar, dass eine geringere Geschwindigkeit bzw. eine geringere Beschleunigung der Luftmassen einen Effizienzvorteil darstellt, da man so extreme Reibungsverluste vermeidet. Der bereits erwähnte Vorteil im Geräuschpegel findet seine Ursache auch in der weniger stark beschleunigten Luft. So entstehen bei steigender Geschwindigkeit an der Düse sowie an der Grenzschicht zwischen beschleunigter Luft und umgebender Luft immer extremere Verwirbelungen, je größer der Geschwindigkeitsunterschied zwischen Abgasstrahl und Umgebungsluft ist. Sehr schnelle und relativ langsame Moleküle treffen aufeinander und es entstehen die Verwirbelungen, die sich in Form von Schallwellen bemerkbar machen. So wie ein starker Herbststurm „heult“, erzeugt der schnelle Abgasstrahl des Jettriebwerks so extremen Lärm.

Weiterhin sorgen diese starken Verwirbelungen dafür, dass der Jet erst bei hohen Geschwindigkeiten jenseits der Schallgeschwindigkeit einigermaßen effizient arbeiten kann, wenn also der Geschwindigkeitsunterschied zwischen Abgasstrahl und Umgebungsluft relativ gering wird. Denn die Verwirbelungen entstehen aufgrund dieses Geschwindigkeitsunterschiedes, was gleichbedeutend ist mit einem Druckunterschied. Der Abgasstrahl ist sehr schnell und stellt somit ein Gebiet geringen Luftdrucks dar (Bernoulli-Effekt). Es erfolgt eine Ausgleichsbewegung der Umgebungsluft, die Luftmassen strömen in das Gebiet niedrigeren Drucks. Da die Moleküle in diesem Gebiet stark beschleunigt sind, wird die einströmende Umgebungsluft ebenfalls beschleunigt; es bilden sich Wirbel. Jede Luftverwirbelung stellt einen Effizienzverlust dar. Dies wird vor allem bei einer energetischen Betrachtung deutlich: Die Energie, die das Triebwerk aus dem Treibstoff gewinnt und in Schub umsetzen soll, wird zur Beschleunigung des Abgasstrahls genutzt. Entsteht ein Luftwirbel, so muss die in diesem Wirbel rotierende Luft natürlich kinetische Energie gewonnen haben, die nun in der Rotation zu finden ist. Diese Energie kann letztlich nur vom Triebwerk „erzeugt“ worden sein, da kein weiterer „Energielieferant“ vorhanden ist. Je mehr oder je größere Verwirbelungen entstehen, desto mehr Energie steckt in dessen Rotation. Diese Energie wurde damit nicht in die Beschleunigung des Abgasstrahls gesteckt und geht somit für das Flugzeug verloren.

Je größer nun der Geschwindigkeitsunterschied zwischen Abgasstrahl und Umgebungsluft, desto größer ist auch der Druckunterschied und desto größer sind die Auswirkungen. Das Flugzeug hat also einen umso größeren Energieverlust, je größer der Geschwindigkeitsunterschied zwischen Abgasstrahl und Umgebungsluft ist.

Beim Turboprop wird zwar ein viel größeres Unterdruckgebiet erzeugt, da viel größere Luftmassen beschleunigt werden, doch ist der Geschwindigkeits- und damit auch der Druckunterschied zwischen beschleunigter Luft und Umgebungsluft sehr gering. Dadurch sind auch die Ausgleichsströmungen der Umgebungsluft nur von geringem Ausmaß und das Flugzeug erzeugt nur wenige schwache Verwirbelungen.

Der Jetantrieb schien also keine Zukunft zu haben. Schon 1948 flog das erste Verkehrsflugzeug mit Turboprop-Triebwerken, die Vickers Viscount (Abb.26).



Abb.26

Seit diesem Zeitpunkt bestritt der Turboprop einen wahren Siegeszug. Er wurde immer weiter verbessert und jedes neue Verkehrsflugzeug wurde mit dieser Antriebsart ausgestattet. Man entwickelte zum Beispiel eine automatische Propellerblattverstellung, die den Anstellwinkel der Propellerblätter der jeweiligen Fluggeschwindigkeit anpasst, um eine optimale Antriebsleistung zu ermöglichen. Bis heute gehört auch die Möglichkeit, die Propellerblätter so weit zu drehen, dass sie quasi einen negativen Anstellwinkel erhalten und der ganze Propeller so in seiner Funktion umgekehrt wird, zu den Funktionen eines jeden Turboprop-Triebwerks. Auf diese Weise kann der Antrieb während der Landung zur Bremse umfunktioniert werden.

Natürlich wollte man die Flugzeuge immer schneller machen, was den Turboprop an seine Grenzen brachte. Je schneller das Flugzeug fliegt, desto schneller muss sich auch der Propeller drehen, damit er die Luftmassen weiterhin beschleunigt. Wird der Propeller zu schnell angeströmt, so beschleunigt er die Luftmassen nicht mehr, sondern wird selbst vom Luftstrom beschleunigt, funktioniert also wie eine Turbine und bremst so eher das Flugzeug ab. In der Praxis überschreitet ein Flugzeug natürlich nicht die Geschwindigkeit, ab der der Propeller wirkungslos ist und der Fall, dass der Propeller bremsen würde, tritt nicht ein. Um schneller fliegen zu können, musste der Propeller also mehr Luftmassen stärker beschleunigen, sich schneller drehen.

Bei der Entwicklung solcher Triebwerke stellte sich jedoch heraus, dass ein Propeller eine scheinbar unüberwindliche Leistungsgrenze besitzt, dass er also ab einer bestimmten Rotationsgeschwindigkeit keinen zusätzlichen Schub mehr liefert.

Der Grund hierfür ist der Highspeed Stall. Überschreitet die Rotationsgeschwindigkeit des Propellerblattes die Schallgeschwindigkeit, so bilden die sich an der Vorderkante des Propellerblattes sammelnden Schallwellen, die das Propellerblatt nun „überholt“, eine Schockwelle. Diese Schockwelle führt dazu, dass keine Luftströmung mehr dem Profil des Propellerblattes folgen kann, da sich die Schockwelle kegelförmig um das Propellerblatt legt und dieses wie ein Mantel von der Luftströmung isoliert (Abb.27).

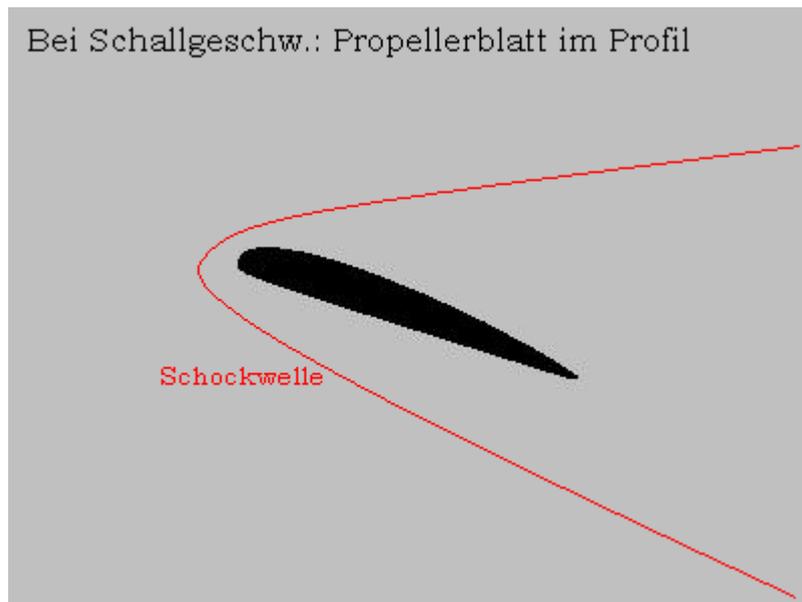


Abb.27

Zusätzlich dazu, dass das Propellerblatt nun keine Luft mehr beschleunigt und somit auch keinen Schub mehr erzeugt, muss es einen sehr hohen Luftwiderstand überwinden, da der Luftwiderstand jenseits der Schallgeschwindigkeit sprunghaft extrem ansteigt.

Da die Propellerblätter rotieren, bewegt sich die Spitze des Blattes natürlich viel schneller als die Wurzel. Somit kommt die Spitze früher in den Highspeed Stall. Hat die Propellerblattspitze die Schallgeschwindigkeit erreicht, ist also auch die Grenze der Effizienz eines Propellers erreicht. Würde man die Rotationsgeschwindigkeit noch erhöhen, so würde ein immer größerer (außen liegender) Teil der Propellerblätter die Schallgeschwindigkeit erreichen und wäre somit nutzlos.

Man entwickelte bis zum heutigen Tag die Turboprop-Triebwerke immer weiter. Die Rotationsgeschwindigkeit des Propellers wurde bis zur Schallgeschwindigkeit an der Propellerblattspitze erhöht. Um die Schubleistung zu erhöhen, wurden aus den anfänglichen Vierblattpropellern mittlerweile bis zu Siebenblattpropeller. Durch die Erhöhung der Blattzahl wird mehr Luft beschleunigt und die Schubleistung des Triebwerks nimmt zu. Doch über eine Geschwindigkeit von etwa 750km/h kommen die Turboprop-Flugzeuge nicht hinaus.

Wenngleich der Turboprop bis heute die effizienteste Antriebsart für Flugzeuge ist, suchte man schon bald nach einem Antrieb, der es Flugzeugen ermöglicht, schneller zu fliegen. Zwar vermag dies der Jetantrieb, doch war er selbst für damalige Verhältnisse viel zu laut und verschlang viel zu viel Treibstoff. Die Bemühungen brachten schließlich den Turbofan-Antrieb hervor.

3.2.2 Turbofan-Triebwerke

Ende der 1940er Jahre hatte man in Großbritannien die Idee, die der Luftfahrt in ein neues Zeitalter verhalf. Während der Turboprop durch seine Effizienz punkten konnte, jedoch in der Geschwindigkeit stark eingeschränkt war und der Jetantrieb einfach zu durstig und laut war, sollte das neue Konzept eines Triebwerkes die Vor- und Nachteile der beiden schon existierenden Antriebe vereinen. Dies gelang den Entwicklern des Flugzeugherstellers DeHavilland mit dem ersten Turbofan-Triebwerk für die Zivilluftfahrt, welches sie Ghost nannten.

Das Turbofan-Triebwerk ist eine optimale Mischung aus Jet und Turboprop (Abb.28).

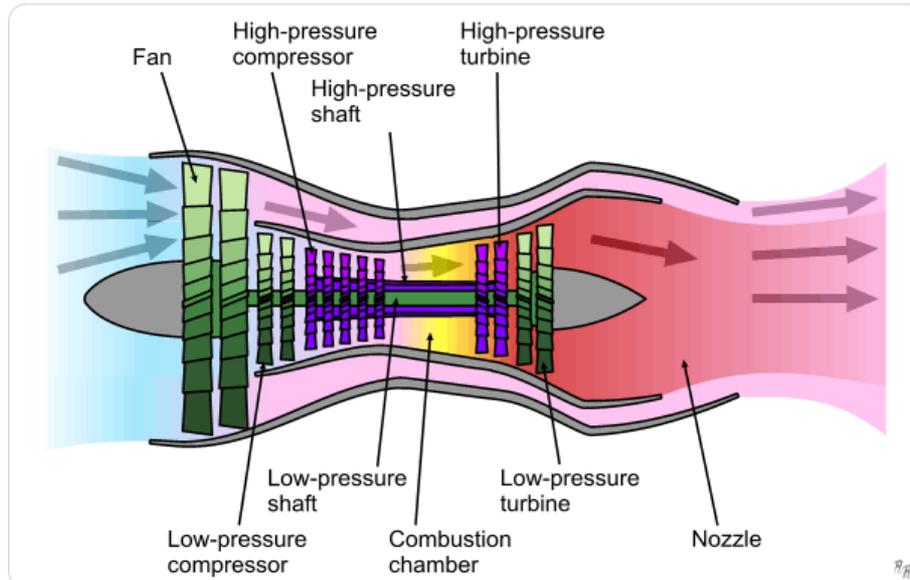


Abb.28

Der Kern des Triebwerks ist nach wie vor die Gasturbine. Wie beim Turboprop gibt es auch beim Turbofan eine zusätzliche Turbine, die jedoch keinen Propeller im klassischen Sinne antreibt, sondern den so genannten Fan (engl. Gebläse, Ventilator). Der Fan ist im Grunde nichts anderes als ein im Durchmesser verkleinerter Propeller mit extrem vielen Propellerblättern. Auf diese Weise kann der Fan eine recht große Luftmasse erfassen und beschleunigen. Der Fan übersteigt im Durchmesser das Kerntriebwerk, also die eigentliche Gasturbine. Dadurch arbeitet der Fan im inneren Bereich als erste Verdichterstufe für das Kerntriebwerk, während er im äußeren Bereich Luftmassen beschleunigt, die außen am Kerntriebwerk vorbei geleitet werden. Durch die Kombination aus stark beschleunigten Luftmassen, die durch das Kerntriebwerk strömen und dieses als heißer Abgasstrahl wieder verlassen, und geringer beschleunigten, größeren Luftmassen, die am Kerntriebwerk vorbei strömen, konnte eine gute Effizienz bei gleichzeitig hoher Fluggeschwindigkeit erreicht werden. Die Vorteile von Jet und Turboprop wurden vereint. Das ganze Turbofan-Triebwerk erhielt von Beginn an eine äußere Hülle, die den äußeren Luftstrom leitet und so auch den Geräuschpegel minimiert.

Außerdem wurden auch die Turbofantriebwerke meist mit einer „Bremsfunktion“ ausgestattet. Dabei wird der beschleunigte Abgasstrahl sowie die vom Fan beschleunigte Luft mit geeigneten Klappen am Triebwerk entgegen der Bewegungsrichtung des Flugzeuges umgelenkt. Dadurch wird das Flugzeug abgebremst (Abb.29 und 30).



Abb.29



Abb.30

Die Mechanismen der Schubumkehr sind wie auf den Abbildungen zu sehen äußerlich sehr unterschiedlich, beruhen aber auf dem selben Prinzip.

Da die Klappen der Schubumkehr immer voll ausgefahren werden müssen, wird immer der gesamte, momentan verfügbare Schub umgelenkt. Daher bremst die Schubumkehr ein Flugzeug sehr stark ab, weshalb die Schubumkehr nur am Boden verwendet wird und im Flug verriegelt ist (hier hat der Turboprop einen Vorteil, da die Propellerblätter stufenlos verstellt werden können und die Schubumkehr des Turboprops auch im Flug angewendet werden kann).

Das erste Flugzeug mit dem Turbofan-Triebwerk Ghost war die DeHavilland DH106 Comet, welche im Jahre 1949 zum ersten Mal abhob. Die Maschine wurde ein schneller Erfolg, da sie ungeahnte Fluggeschwindigkeiten ermöglichte. Die Maschine war mit vier Triebwerken ausgestattet und auch optisch sehr ansprechend. Die Turbofan-Triebwerke ermöglichten es auch erstmals Verkehrsflugzeugen, noch höhere Flughöhen zu erreichen, in denen Turboprops aufgrund der „dünnen Luft“ zu wenig Luftmassen erfassen und beschleunigen können und somit nicht genügend Schub erzeugen, um das Flugzeug in der Luft zu halten. Da man jedoch keine Erfahrungen mit solchen Flughöhen bei so großen Flugzeugen wie der Comet hatte, war auch die Materialermüdung durch das Ausdehnen der Flugzeughülle in hohen Flughöhen und dem damit verbundenen niedrigen Luftdruck noch kaum beobachtet worden, sodass es schon bald eine Unfallserie gab, bei der mehrere Comet einfach im Flug zerbrachen. Erst diese Erfahrungen machen heutige Flugzeuge sicher. Seit der Unfallserie der Comet wird bei Flugzeugen die Materialermüdung sowohl in der Produktion als auch in der Wartung beachtet.

Nach einigen Verbesserungen in der Konstruktion gewann die Comet und mit ihr auch der Turbofan das Vertrauen der Fluggesellschaften und Passagiere wieder zurück. Die Comet flog schließlich bis Anfang der 1990er Jahre zuverlässig im Liniendienst (Abb.31: De Havilland Comet).



Abb.31

Seit der DeHavilland Comet ist der Turbofan-Antrieb nicht mehr aus der zivilen Luftfahrt wegzudenken. Natürlich wurde auch dieser weiter entwickelt, so wurden die Triebwerke vor allem größer. Aber auch im Inneren änderte sich etwas. Während das Verhältnis des Luftstroms, der um das Kerntriebwerk herum geleitet wird, zu jenem, der durch das Kerntriebwerk verläuft, beim Ghost noch recht gering war, so stieg das so genannte Nebenstromverhältnis bis heute immer weiter an.

Das Nebenstromverhältnis (Menge der Luft, die pro Zeiteinheit um das Triebwerk herum strömt und nur vom Fan beschleunigt wird, geteilt durch die Menge der Luft, die pro Zeiteinheit durch das Kerntriebwerk strömt) ist heute nach der Schubkraft, die ein Triebwerk erzeugt, das entscheidende Charakteristikum. Grundsätzlich lässt sich sagen, je höher das Nebenstromverhältnis, desto geringer Treibstoffverbrauch und Schadstoffausstoß, desto geringer jedoch die maximale und somit auch die optimale Fluggeschwindigkeit des Triebwerks. Diese Regel trifft für alle Triebwerke zu, die auf dem Prinzip der Gasturbine basieren.

So ergibt sich für den Jetantrieb, also die reine Gasturbine, ein Nebenstromverhältnis von genau Null, während das Nebenstromverhältnis eines Turboprops bei über 100 liegt. Somit ist der Turboprop das effizienteste Triebwerk, der Jet das ineffizienteste. Auf Kurzstrecken ist also ein Turboprop-Flugzeug die erste Wahl, denn hier kommt es nicht auf eine hohe Fluggeschwindigkeit an. Auf der Langstrecke fliegt man jedoch mit Turbofan-Flugzeugen, da sie eine hohe Geschwindigkeit mit noch vertretbarem Treibstoffverbrauch kombiniert.

Es wird deutlich, dass die Entwicklung bei den Turbofans hin zu immer größeren Fandurchmessern und damit immer größeren Nebenstromverhältnissen führt, um die Effizienz der Triebwerke zu verbessern. Die Schwierigkeit besteht also allein darin, ein möglichst hohes Nebenstromverhältnis zu erzielen, ohne die Fluggeschwindigkeit des Triebwerks zu verringern. Dies ist der Punkt, an dem alle Triebwerkhersteller heutzutage arbeiten und an dem die Verbesserungen in der Effizienz neuer Triebwerke erzielt werden.

Der Graph in Abbildung 32 zeigt, in welchen Geschwindigkeitsbereichen welche Antriebsart heutzutage die effizienteste ist (Mach 1 entspricht der Schallgeschwindigkeit; Mach 0,5 der halben Schallgeschwindigkeit).

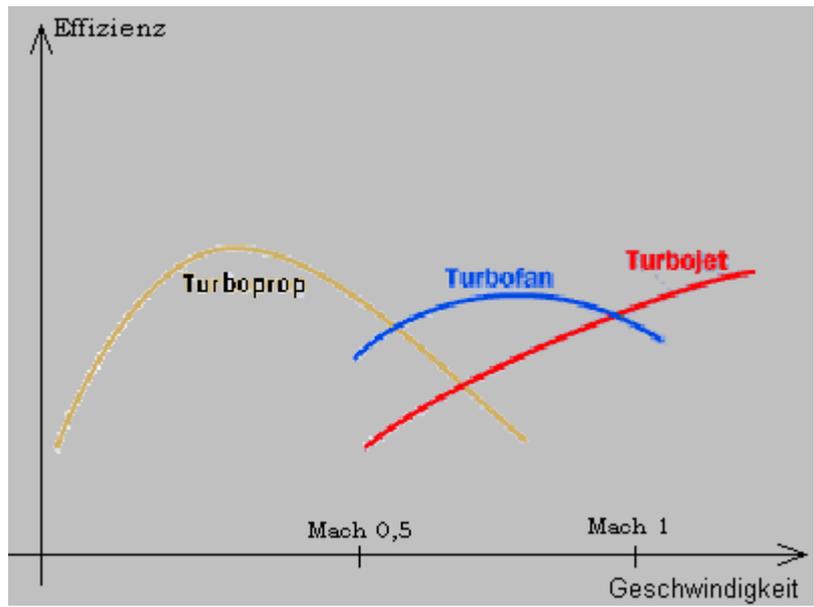


Abb.32

Man erkennt sehr gut, dass der Hochpunkt des Graphen für den Turbofan, also dessen maximale Effizienz, heute noch weitaus niedriger ist als die des Turboprops oder des Turbojets in deren jeweiligen Geschwindigkeitsbereichen. Dieses Defizit könnte der Propfan eventuell ausgleichen.

3.2.3 Der Propfan-Antrieb (kurzer Überblick)

In den 1980er Jahren wollte man bei General Electric, einem auch heute noch bedeutenden Triebwerkhersteller, einen neuen Antrieb entwickeln, der ein noch weitaus größeres Nebenstromverhältnis als die bis dahin gekannten Turboprops, jedoch nahezu die gleichen Leistungsdaten bei geringerem Treibstoffverbrauch aufweisen sollte.

Der neue Antrieb sollte die Luftfahrt revolutionieren. Ein leiserer, sparsamerer Antrieb mit den gleichen Leistungsdaten; das war das erklärte Ziel. All das sollte erreicht werden, indem man das Prinzip des Turboprops mit dem des Turbofans kombinierte, was zunächst nichts anderes bedeutete als eine Erhöhung des Nebenstromverhältnisses. Da man auch die äußere Verkleidung des Turbofans entfernte, aber einen Fan mit relativ geringem Durchmesser und vielen Schaufeln verwendete, war das Triebwerk auch optisch revolutionär. Nicht zuletzt die Optik gab dem Triebwerk den Namen Propfan (Abb.33).



Abb.33

Ein weiteres Novum dieses Triebwerks war, dass zwei Fans hintereinander angebracht waren und gegenläufig rotieren sollten, was vor allem die Lärmbelastung reduzieren sollte.

Das UDF (unducted fan: unummantelter Fan) von GE (General Electric) wurde jedoch nur zweimal gebaut. Das Triebwerk war nicht ganz ausgereift und die Airlines waren zur damaligen Zeit nicht sehr interessiert an einer Senkung des Treibstoffverbrauchs. So wurde das UDF und damit das Propfan-Triebwerk zunächst vergessen. Erst in den letzten Jahren wird das Propfan-Triebwerk wieder diskutiert, da die Treibstoffpreise rasant gestiegen sind. An eine so ausgefallene Bauweise und Optik wie in den 1980er Jahren denkt dabei jedoch niemand mehr. Während auch gegenläufige Fans heute in der Entwicklung sind, ist das hohe Nebenstromverhältnis des Propfans die interessante Neuerung, die die Triebwerkhersteller beschäftigt.

Oft werden große Turboprops mit dem Propfan verwechselt. Daher ist es wichtig, klare Definitionen für die einzelnen Triebwerkstypen festzulegen. In der Luftfahrt hat man sich verständigt:

Ein Triebwerk mit einem Nebenstromverhältnis von Null wird natürlich Jet genannt. Ein Nebenstromverhältnis bis etwa 20 (eigentlich 20 zu 1) ist dem Turbofan vorbehalten. Ab einem Nebenstromverhältnis von etwa 80 bis 100 spricht man vom Turboprop.

Das Propfan-Triebwerk ist also theoretisch auf ein Nebenstromverhältnis von etwa 20 bis 80 oder gar 100 festgelegt, während es keineswegs gegenläufige Fans besitzen muss. In der Praxis jedoch gab es noch kein serienreifes Propfan, womit abzuwarten bleibt, welches Nebenstromverhältnis für ein Propfan-Triebwerk tatsächlich sinnvoll ist.

Es steht fest, dass man sich ihm von unten her nähern wird, da die Turbofans immer größere Nebenstromverhältnisse aufweisen. Mittlerweile ist man bei Nebenstromverhältnissen von knapp unter 10 angelangt.

Im folgenden Kapitel soll das Propfan-Triebwerk und vor allem dessen Potential genauer untersucht werden.

4. Der Propfan-Antrieb im Detail

4.1 Bisherige Historie des Propfans

Mit Beginn der 1980er Jahre hatte sich eine Kooperation zwischen der NASA und einer Forschungsgruppe des Triebwerkherstellers General Electric (GE) gebildet. Die selbst gestellte Aufgabe bestand darin, den bestehenden Entwurf eines neuartigen Triebwerks zu einem Prototypen zu entwickeln, um das Triebwerk nach ausgiebigen Tests in Serie produzieren zu können.

Der Entwurf sah zwar viele Neuerungen vor, jedoch basierte auch dieses Triebwerk auf der Gasturbine. Aus diesem Grund entschied man sich dafür, als Grundlage die schon existierende Gasturbine des militärischen Turbofan-Triebwerks F404 von GE zu verwenden. So wurde viel Zeit gespart – man musste keine Gasturbine entwickeln, sondern konnte sich voll und ganz auf die zu verwirklichenden Neuerungen konzentrieren.

Während der Entwicklung wurde deutlich, dass das Konzept eine erhebliche Einsparung beim Treibstoffverbrauch bringen würde. Daraufhin wurden sehr schnell Flugzeughersteller gefunden, die interessiert waren, das Triebwerk bei zukünftigen Verkehrsflugzeugen einzusetzen. Die beiden damals größten Flugzeughersteller in den USA Boeing und McDonnell Douglas beteiligten sich fortan an dem Programm. Sie erhofften sich, durch die versprochenen 25% weniger Treibstoffverbrauch ihre Auftragsbücher sprunghaft zu füllen. Während Boeing das Triebwerk testen wollte, sobald es fertig gestellt und betriebsbereit sei, vertraute McDonnell Douglas den GE- und NASA-Forschern blind und entschied sich prompt, das sich in Planung befindende Verkehrsflugzeug MD-90 mit dem GE-36 UDF, wie das neue Triebwerk heißen sollte, auszurüsten.

Die Entwicklung ging nun immer schneller voran, nicht zuletzt durch die finanzstarke Unterstützung von McDonnell Douglas. So konnte im Jahre 1987 das erste GE-36 auf einem Triebwerkteststand laufen und nur Monate später der Prototyp an McDonnell Douglas übergeben werden. Fortan war die Entwicklung für die NASA abgeschlossen. Das GE-36 wurde nun nur noch von General Electric in Zusammenarbeit mit McDonnell Douglas verfeinert. Noch 1987 wurde das Triebwerk so an der firmeneigenen MD-80 von McDonnell Douglas installiert, um es im Flug zu erproben (Abb.34).



Abb.34

Es zeigte sich, dass tatsächlich Treibstoffeinsparungen von 30% gegenüber der serienmäßigen, mit Turbofans ausgestatteten MD-80 erzielt wurden. Gleichzeitig waren die Flugleistungen kaum zu unterscheiden. Damit stand dem Start des MD-90 – Programms nichts mehr im Wege. McDonnell Douglas begann 1988 mit der endgültigen Planung des MD-80 – Nachfolgers MD-90, serienmäßig mit dem GE-36 UDF als Antrieb. Das Flugzeug sollte 1993 seinen Erstflug durchführen.

Während General Electric und McDonnell Douglas mit der modifizierten MD-80 von Luftfahrtausstellung zu Luftfahrtausstellung um die ganze Welt zogen, wurde ein zweites GE-36 gebaut und an Boeing geliefert, wo man das Triebwerk an einer Boeing 727 testete. Wie auch bei der MD-80 von McDonnell Douglas wurde nur eins der zwei bzw. drei serienmäßigen Turbofan-Triebwerke durch ein GE-36 UDF ersetzt (Abb.35).



Abb.35

So ergibt sich der Umstand, dass sich nie ein Flugzeug ausschließlich durch GE-36 UDF angetrieben in die Luft erhob. Denn die Tests von Boeing und McDonnell Douglas ergaben nicht nur, dass das neue Triebwerk die versprochenen Einsparungen sowie Leistungen ermöglichte, sie ergaben auch, dass das Triebwerk sehr laut war. Besonders in der Kabine lag der Lärm deutlich über dem eines konventionellen Turbofan-Antriebes. Aus diesem Grund verlor Boeing das Interesse – man setzte auf Passagier-Komfort.

Im Hause McDonnell Douglas setzte man auf die wirtschaftlichen Interessen und das ökologische Gewissen der Airlines und ging davon aus, dass diese den etwas höheren Geräuschpegel dafür in Kauf nehmen würden – man war überzeugt von der Richtigkeit des Propfans, wie das Triebwerk von den Besuchern der zahlreichen Flugshows und Luftfahrtausstellungen, auf denen es präsentiert worden war, genannt wurde.

In der folgenden Zeit hatte McDonnell Douglas einen schweren Kampf um das MD-90 – Programm zu bestreiten. Letztendlich konnte man die MD-90 nur retten, indem man auf den Propfan-Antrieb verzichtete und sich für einen konventionellen Turbofan-Antrieb entschied. Die Airlines wollten die erhöhte Lärmbelastung nicht in Kauf nehmen und die MD-90 daher nur kaufen, wenn sie mit normalen Turbofans ausgestattet würde. Der Propfan scheiterte also an den Airlines, die den Komfort des Passagiers vor dem Hintergrund eher sinkender Treibstoffpreise über die Effizienz stellten.

An diesem Punkt endete die bisherige Geschichte des Propfans. Nur zwei Triebwerke waren gebaut worden und keines stand je im Liniendienst. Bis heute baute kein weiterer Triebwerkhersteller ein Propfan-Triebwerk. Oftmals werden jedoch Turboprop-Triebwerke mit vielen Propellerblättern für Propfans gehalten, doch liegt das Nebenstromverhältnis dieser Triebwerke weit über 100. Diese Triebwerke erzeugen ihren Schub quasi ausschließlich durch den Propeller, was sie zu reinen Turboprop-Triebwerken macht, wenngleich sie manchmal dem GE-36 UDF ähneln.

Erst in den letzten Monaten scheinen die großen Triebwerkhersteller das Konzept des Propfans wiederentdeckt zu haben. Unter dem Einfluss der immer rasanter steigenden Kerosinpreise sowie der Konkurrenz der Billigfluglinien verlangen die großen Airlines immer effizientere Flugzeuge und die Flugzeughersteller können diesen Forderungen nur nachkommen, indem sie effizientere Triebwerke verbauen.

Auf den Triebwerkherstellern lastet heute ein enormer Druck – allein die Triebwerke der neuen Boeing 787 „Dreamliner“ sollen um 15% effizienter sein als ihre Vorgänger. Diese enormen Treibstoffeinsparungen erhoffen sich die Triebwerkhersteller aus der Weiterentwicklung einiger der charakteristischen Merkmale des GE-36 UDF aus den 1980er Jahren. Heute zeigt sich, dass dieses Triebwerk seiner Zeit wohl weit voraus war.

Welche technischen Feinheiten des GE-36 UDF heute besonders interessant sind, und wie das damalige Triebwerk im Detail funktionierte, soll das folgende Kapitel zeigen.

4.2 Funktionsweise des Propfans

Da es bisher nur einen einzigen Triebwerkstyp auf Grundlage des Propfan-Prinzips, das GE-36 UDF, gab, soll hier zunächst nur dieses Triebwerk beschrieben werden, wenngleich nicht alle Besonderheiten des GE-36 UDF auch typisch für ein Propfan-Triebwerk sein müssen.

Wie schon erwähnt ist die Grundlage des GE-36 UDF eine gewöhnliche Gasturbine wie sie in Kapitel 3.2 beschrieben wurde. Im Kerntriebwerk wurde nur eine Veränderung vorgenommen: Zwischen den einzelnen Schaufelrädern der Turbine befinden sich keine fest montierten Statoren, die die Luftmassen leiten. Viel mehr wurden auch diese frei gelagert, sodass sie rotieren können. Durch das aus der Brennkammer entweichende Gas werden also neben den Turbinenstufen, die die Verdichter antreiben, auch zwei Turbinen angetrieben, die aufgrund ihrer seitenverkehrten Formgebung gegenläufig rotieren. Diese beiden Turbinen sind direkt ohne Getriebe mit den beiden außen liegenden Fans verbunden, sodass auch diese sich gegenläufig drehen. Auf diese Weise erhoffte man sich eine erhebliche Reduzierung der Lärmbelastung, da die Schallwellen des einen Fans durch die des anderen zu Teilen ausgelöscht werden. Während dieser Effekt scheinbar nicht spürbar erreicht werden konnte (das GE-36 war relativ laut), hatte die Verwendung zweier Fans hintereinander den Vorteil, bei etwas geringerem Fandurchmesser und somit geringerer Rotationsgeschwindigkeit der Schaufelspitzen, relativ viel Luft erfassen zu können. So konnten die nötigen Rotationsgeschwindigkeiten unter der Schallgeschwindigkeit gehalten werden.

Ein weiteres Merkmal ist, dass die einzelnen Schaufeln der Fans in ihrem Anstellwinkel verstellt werden können – ähnlich den Blättern eines Propellers. Diese Verstellung erfolgt automatisch und passt die Fans der jeweiligen Drehzahl und Fluggeschwindigkeit an, um die bestmögliche Effizienz zu erzielen.

Das entscheidende und einzige von außen direkt sichtbare Merkmal sind die nicht ummantelten, außen liegenden Fans. Durch den großen Durchmesser der Fans schien eine Ummantelung den damaligen Konstrukteuren nicht sinnvoll. Zwar hätte sie den Luftstrom optimal zu den Fans leiten können, doch hätte sie bei dieser Größe einen relativ großen Luftwiderstand dargestellt.

Die Anordnung der Fans selbst, bringt vor allem Gewichtseinsparungen mit sich. Dadurch dass die Fans aufgrund ihres großen Durchmessers relativ langsam laufen müssen, können sie nicht direkt an die gewöhnlichen Turbinen gekoppelt werden. Die Spitzen würden sonst Schallgeschwindigkeit erreichen. Wollte man die Fans wie gewöhnlich direkt in den Einlass des Triebwerkes montieren, müsste man also entweder ein Getriebe, welches die Umdrehungszahl verringert, oder eine zweite Welle, die die Fans mit einer sich langsam drehenden Turbine hinter der Brennkammer verbindet, einbauen. Beide Varianten würden ein großes zusätzliches Gewicht mit sich bringen. Daher installierte man die Fans außen liegend am Heck des Triebwerks, um sie direkt mit sich langsam drehenden Turbinen verbinden zu können (Abb.36).

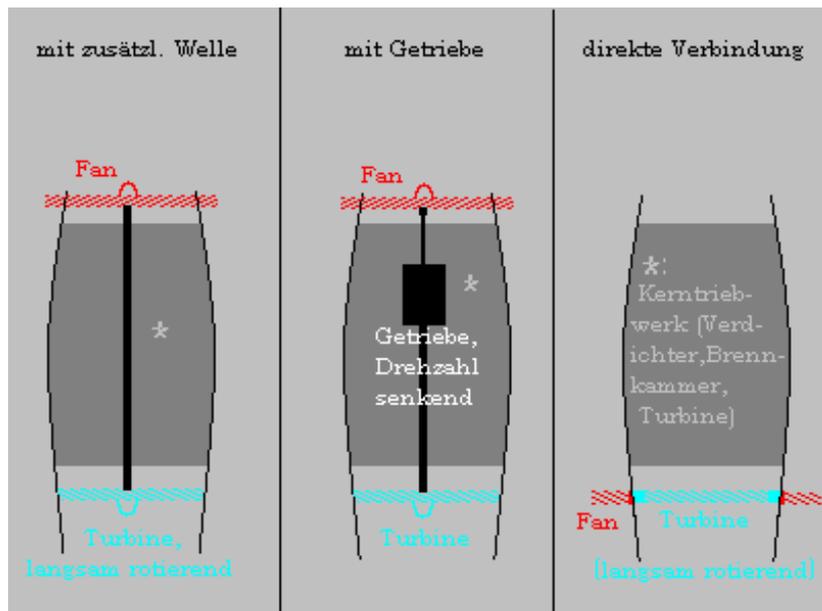


Abb. 36

Sicherlich spielen diese Gewichtseinsparungen eine Rolle bei der Effizienz eines Triebwerkes, doch die eigentlichen Einsparungen im Treibstoffverbrauch werden nicht durch diese Verbesserungen erzielt. Vielmehr ist es das eigentliche Propfan-Prinzip in Verbindung mit den optimal verstellbaren Schaufeln der Fans.

Das Prinzip des Propfans, nämlich ein hohes Nebenstromverhältnis, ist der Faktor, der es dem GE-36 erlaubte, eine Treibstoffeinsparung von bis zu 30% mit sich zu bringen. Das UDF hat einen so großen Fandurchmesser, dass das Nebenstromverhältnis bei 36:1 liegt, was dem Triebwerk erst die firmeninterne Bezeichnung GE-36 einbrachte. Die Erhöhung des Nebenstromverhältnisses hat zur Folge, dass ein größerer Anteil des Schubs durch den Fan oder gar Propeller und ein geringerer Anteil des Schubs durch das Kerntriebwerk und dessen Düse erzeugt wird. Normalerweise bedeutet dies neben der Treibstoffersparnis aber auch, dass die maximale Geschwindigkeit des Flugzeuges sinkt, da der Fan oder Propeller sich bekanntlich nicht unbegrenzt schnell drehen kann, wenn er noch Luftmassen beschleunigen soll. Erreicht ein Teil einer Fanschaufel oder eines Propellerblattes die Schallgeschwindigkeit, so beschleunigt dieser Teil wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben keine Luftmassen mehr, da sich die Überschallschockwelle um das Profil der Fanschaufel oder des Propellerblattes legt und das Profil so von der anströmenden Luft abgeschirmt wird. Somit folgt die Luft dem Profil nicht mehr und wird nicht beschleunigt. Die Geschwindigkeit, auf die die Luftmassen von einem Propeller oder Fan beschleunigt werden, ist also begrenzt.

Das erklärte Ziel der Konstrukteure des GE-36 war aber, die Effizienzvorteile des Propellers mit der Geschwindigkeit des Turbofans zu verbinden. Die große Herausforderung bestand also darin, den Fan so auszulegen, dass er die Luftmassen möglichst auch noch bei hohen Fluggeschwindigkeiten stark genug beschleunigt, um das Flugzeug anzutreiben.

Man ging also vom herkömmlichen Propeller aus und versuchte, ihn zu verbessern. Der erste Schritt ist die Erhöhung der Anzahl der Propellerblätter bzw. der Schaufeln des Fans. Dadurch wird mehr Luft durch den Propeller bzw. Fan erfasst, ohne dessen Durchmesser und damit die Rotationsgeschwindigkeit der Spitzen zu erhöhen, und es ist eine geringere Beschleunigung dieser Luft ausreichend, um einen bestimmten Schub zu erzeugen. Bei gleicher Rotationsgeschwindigkeit erzeugt der Fan also mehr Schub. Dieser zusätzliche Schub kommt der maximal möglichen Fluggeschwindigkeit des Flugzeuges zu gute, wenn die Schaufelspitzen des Fans ihre maximal sinnvolle Geschwindigkeit, die Schallgeschwindigkeit erreichen.

Doch auch die Erhöhung der Propellerblätter bzw. Fanschaufeln reicht natürlich nicht aus, um dieselbe Fluggeschwindigkeit zu ermöglichen, wie ein entsprechendes Turbofan-Triebwerk. Die entscheidende Neuerung des GE-36, die ein so hohes Nebenstromverhältnis und den damit verbundenen niedrigen Treibstoffverbrauch möglich gemacht hat, war eine grundlegende Veränderung der Fanschaufelspitzen bzw. Propellerblattspitzen (Abb.37).

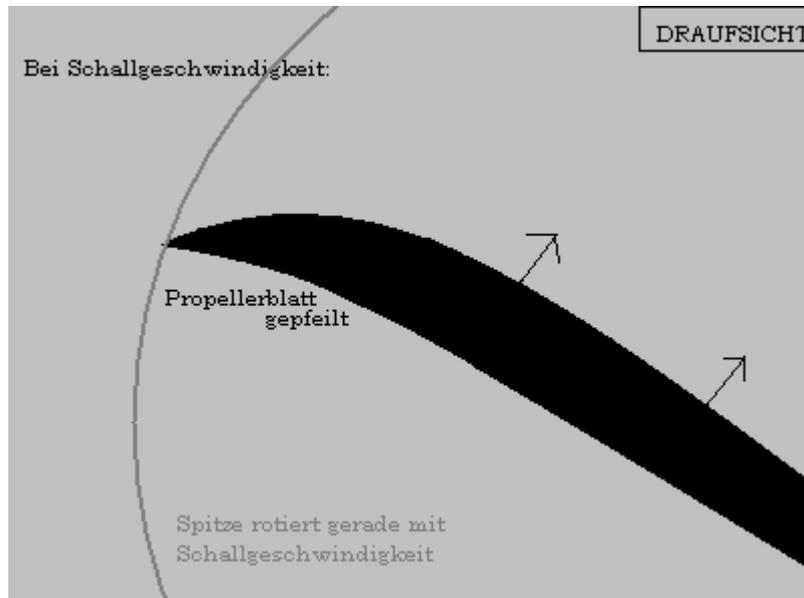


Abb.37

Durch das Zurückpfeilen der Propellerblatenden vergrößerte man die Vorderkante sowie die aerodynamisch wirksame Fläche des Propellerblattes bzw. der Fanschaufel, ohne dabei jedoch den Durchmesser des Propellers oder Fans zu erhöhen. Auf diese Weise kann das Propellerblatt bzw. die Fanschaufel mehr Luft nach hinten beschleunigen, ohne dabei schneller rotieren zu müssen. Die Geschwindigkeit der Spitze bleibt unter der Schallgeschwindigkeit, der Schub des Propellers bzw. des Fans erhöht sich. Zusätzlich fand man Wege, durch geschickte aerodynamische Formgebung der Spitze, diese auch knapp über der Schallgeschwindigkeit in die Lage zu versetzen, weiterhin Luftmassen zu beschleunigen. Zwar ist diese Formgebung sehr kompliziert zu berechnen, zusammen mit dem durch die Pfeilung der Propellerblätter bzw. Fanblätter erreichten Nebeneffekt eines geringeren Luftwiderstandes war es jedoch nun möglich, einen Propeller bzw. Fan zu konstruieren, der knapp schneller als der Schall rotierte und einen deutlich höheren Wirkungsgrad bei hohen Geschwindigkeiten ermöglichte.

Die Veränderung der Form der Fan- oder Propellerblätter war das entscheidende Kriterium, das einen Propfan mit all seinen Vorteilen möglich machte. Natürlich ist das Zurückpfeilen der Tragflächen nur eine Verschiebung der natürlichen Geschwindigkeitsgrenze für einen Propeller oder Fan. Die Maßnahme bringt nur in sehr begrenztem Maße Erfolg und es erweist sich bis heute als äußerst kompliziert, die Formgebung der Propellerblattspitzen bzw. Fanschaufelspitzen optimal zu berechnen.

Der Propfan ist zwar über das Nebenstromverhältnis zwischen 20 und 80 bzw. 100 definiert, doch ist es keineswegs ein Problem, ein solches Nebenstromverhältnis für ein Triebwerk zu erreichen – viel mehr liegt das Problem darin, bei einem solchen Nebenstromverhältnis noch die angestrebte Fluggeschwindigkeit für das Flugzeug zu erreichen. Im niedrigeren Geschwindigkeitsbereich braucht man keine Alternativen, der Turboprop arbeitet hier effizienter als es je ein Propfan könnte.

4.3 Vor- und Nachteile

Wie kann es sein, dass ein Antriebsprinzip, welches eine Treibstoffersparnis von bis zu 30% brachte, sich nicht durchgesetzt hat? Warum gibt es heute, 20 Jahre nach dem ersten Propfan, kein einziges Serienflugzeug, welches diesen Antrieb nutzt?

Die Vorteile liegen doch klar auf der Hand: Das GE-36 UDF war leichter als jedes Turbofan- oder auch Turboprop-Triebwerk in der gleichen Schubklasse. Das Fehlen eines Untersetzungsgetriebes oder einer zusätzlichen Welle zur Verbindung von langsam rotierender Turbine und Fan machte das GE-36 extrem leicht. Allein dieser Umstand reduziert den Treibstoffverbrauch bzw. erhöht die maximale Nutzlast eines Flugzeuges. Doch hinzu kommt noch, dass das GE-36 aufgrund seines Nebenstromverhältnisses von 36 viel weniger Treibstoff benötigte, um die selben Leistungsdaten aufzuweisen wie ein damals aktuelles Turbofan-Triebwerk.

Ein Nachteil des Triebwerks war jedoch, dass der Fan außen lag und direkt mit der Turbine verbunden war. So musste man die Hülle des Triebwerks, welche Fan und Turbine trennte und mit beiden rotierte, gegenüber der restlichen Triebwerkhülle abdichten, damit kein Druck schon vor der Turbine entweichen konnte. Diese Abdichtung erwies sich als äußerst wartungsaufwendig und hätte in langwierigen Tests erst ihre Zuverlässigkeit beweisen müssen.

Das eigentliche Problem mit dem GE-36 war jedoch wie bereits in Kapitel 4.1 erwähnt der deutlich über den Bestimmungen liegende Lärmpegel. Heute weiß man, dass dieser Lärmpegel vor allem durch das Fehlen der Ummantelung der Fans zu Stande kam. Die durch die Spitzen der Fanschaufeln ausgelösten Verwirbelungen würden durch eine Ummantelung großteils verhindert bzw. abgeschwächt.

Dieser einzige greifbare Nachteil fand bei den Airlines der damaligen Zeit große Beachtung. Da die Airlines damals hauptsächlich mit Komfort warben und die Treibstoffpreise sogar eher sanken als stiegen, war die Lärmbelastung für die Airlines Grund genug, das neue Triebwerk nicht zu ordern, ja sogar McDonnell Douglas dazu zu bewegen, das Projekt aufzugeben.

Ein weiterer Nachteil des GE-36 war wirtschaftlicher Natur. Das Triebwerk war natürlich noch nicht serienreif. Noch waren Wartungsarbeiten sehr aufwendig und es gab noch keine Zulassung oder gar Betriebs- und Wartungsrichtlinien. Um das Triebwerk tatsächlich in Serie produzieren und verkaufen zu können, hätte man es langwierigen Tests unterziehen, es das Zulassungsverfahren durchlaufen lassen und schließlich die Betriebsrichtlinien ausarbeiten müssen. Weiterhin hätte ein weltweites Ersatzteilnetzwerk für den neuen Triebwerkstyp aufgebaut werden und das örtliche Personal geschult werden müssen. All diese Kosten fallen zwar bei jedem neuen Triebwerk an, doch wollte man dieses finanzielle Risiko bei GE nicht mehr eingehen, nachdem sich die Airlines dem neuen Antrieb gegenüber so skeptisch zeigten und McDonnell Douglas als Kunde abgesprungen war. Wäre das Triebwerk bereits serienreif gewesen, hätte man vielleicht noch Kunden gefunden, doch als Neuentwicklung war das finanzielle Risiko für GE wohl zu groß. Wahrscheinlich war die Entscheidung, das Propfan-Prinzip zunächst aufzugeben, wirtschaftlich gesehen richtig, denn GE ist heute immer noch einer der bedeutendsten Triebwerkhersteller der Welt.

Man könnte sich nun die Frage stellen, warum man nicht heute, da die Treibstoffkosten so stark ansteigen und die Effizienz eines Triebwerks zum primären Verkaufsargument wird, einfach das Propfan-Triebwerk von 1987 aus der Schublade holt, das Lärmproblem zum Beispiel in Form einer Ummantelung löst und es dann verkauft. Doch so einfach ist es nicht, wie das nächste Kapitel zeigt.

4.4 Zukunftsaussichten

Im Jahre 1987 versprach man den Airlines mit dem GE-36 UDF ein Triebwerk, welches den Treibstoffverbrauch stark reduzieren aber dabei die selben Leistungsdaten wie ein Turbofan aufweisen sollte. Im Jahre 1987 vermochte das Propfan-Triebwerk es auch, diese Versprechen einzuhalten. Doch bis heute hat sich viel geändert. Zum einen sind die Turbofan-Flugzeuge um etwa 150km/h schneller geworden. Diesen Geschwindigkeitsgewinn wollen die Airlines natürlich nicht wieder einbüßen. Somit müsste ein heutiges Propfan-Triebwerk auch bei einer noch höheren Geschwindigkeit arbeiten können als das GE-36 vor 20 Jahren. Damit ergibt sich heute erneut die Problematik der Fanschaufelspitzen. Man müsste sie neu formen, um die Rotationsgeschwindigkeit erneut zu erhöhen, noch weiter in den Bereich der Schallgeschwindigkeit vorzudringen, ohne dass der Fan seine schuberzeugende Wirkung verliert. Außerdem haben sich die Turboprop-Triebwerke der Geschwindigkeit des Propfans genähert. Durch die Verwendung geschwungener Propellerblätter konnte die Höchstgeschwindigkeit eines Turboprop-Flugzeuges beachtlich angehoben werden, wenn sie auch noch nicht an die des Propfans oder Turbofans heranreicht. Der Anreiz, einen Propfan als Ersatz für einen Turboprop einzusetzen ist damit auch sehr gering.

Zum anderen hat man bis heute auch die Turbofan-Triebwerke weiter entwickelt. Auch sie verbrauchen heute weitaus weniger Treibstoff als noch vor 20 Jahren. Damit ist der Vorteil in der Effizienz des Propfans von 1987 heute quasi nicht mehr vorhanden. Um heute ein Propfan-Triebwerk verkaufen zu können, müsste man es also komplett neu entwickeln.

Ein solcher Vorstoß eines Triebwerkherstellers scheint heute jedoch sehr unwahrscheinlich zu sein. Zu groß sind die finanziellen Risiken. Außerdem sind die Entwickler gänzlich damit beschäftigt, die Forderungen der Flugzeughersteller für neue Triebwerke und deren Leistungsdaten zu erfüllen. Es bleibt damit nur wenig Spielraum für die Verwirklichung außergewöhnlicher Ideen oder Konzepte.

Vielmehr beschränken sich die Triebwerkhersteller darauf, das Nebenstromverhältnis ihrer existierenden Triebwerkstypen zu vergrößern, ohne dabei an Höchstgeschwindigkeit einzubüßen.

Weiterhin gibt es einige Merkmale des GE-36 UDF, die heute das Interesse der Triebwerkhersteller geweckt haben. Einzelne dieser Techniken wie zum Beispiel die geschwungenen Fanblattspitzen finden ihre Anwendung bei aktuellen Triebwerkstypen wie zum Beispiel dem Turboprop-Triebwerk Progress D-27, welches Verwendung an der Antonow An-70 findet (Abb.38).



Abb.38

Auch die Technik zweier sich gegenläufig drehender Propeller fand beim Progress D-27 Verwendung, wodurch dieses Triebwerk oft als Propfan-Antrieb bezeichnet wird. Es handelt sich jedoch mit einem Nebenstromverhältnis von weit über 100 um ein typisches Turboprop-Triebwerk. Äußerlich ist dies vor allem dadurch zu erkennen, dass der Auslass des Kerntriebwerks nicht gerade nach hinten gerichtet ist, sondern wie ein gewöhnlicher Auspuff die Abgase von der Tragfläche weg leitet.

Während einige der technischen Feinheiten des GE-36 UDF gerade im Bereich der Turboprops Anwendung finden, ist die Luftfahrt von einem serienreifen Propfan noch weit entfernt. Es wird noch einige Jahre dauern, bis ein solches Triebwerk Verwendung findet und vielleicht tatsächlich den Turbofan ablöst. Wenn es soweit ist, wird sich der Propfan jedoch auf Grundlage des Turbofans völlig neu entwickelt haben. Das GE-36 wird wohl kaum eine Vorbildrolle einnehmen. Viel mehr war es ein Triebwerk, welches seiner Zeit weit voraus war. Das Ge-36 UDF selbst hat keine Zukunft, das Prinzip Propfan jedoch mit hoher Wahrscheinlichkeit.

5. Ausblick in die Zukunft der Flugzeugantriebe

Seit dem Ghost-Triebwerk der DH-106 Comet hat sich in der Triebwerkstechnik der Turbofans viel getan. Während das Ghost einen so geringen Durchmesser hatte, dass es in die Tragfläche der Comet integriert werden konnte, ist der Fandurchmesser des Antriebs des A380 heute etwa so groß wie der Durchmesser des Rumpfes eines Airbus A321. Die Entwicklung bis zur Gegenwart hat vor allem die Vergrößerung des Fans und damit die Vergrößerung des Nebenstromverhältnisses mit sich gebracht. Dadurch konnte der Treibstoffverbrauch gesenkt und gleichzeitig sogar die Höchstgeschwindigkeit eines Turbofan-Flugzeuges gesteigert werden. Bis heute hat sich jedoch sonst kein weiterer Faktor grundsätzlich verändert. Erst heute ist man in einem Bereich angekommen, in dem die Geschwindigkeit des Fans die Schallgeschwindigkeit erreichen würde, wenn man das Nebenstromverhältnis noch weiter anheben wollte. Daher musste das A380-Triebwerk als erstes Turbofan-Triebwerk auf geschwungene Fanschaufeln zurückgreifen und damit eine Idee des Propfans von 1987 aufgreifen (Abb.39).



Abb.39

Ein weiteres Problem, an dem heute verstärkt gearbeitet wird, ist, dass die Fans immer größer gebaut werden, um mehr Luftmassen erfassen und somit bei einem Flugzeug mit weniger Triebwerken auskommen zu können. Damit die Schaufelspitzen dieser Fans nicht zu schnell, also weit schneller als der Schall, rotieren, müssen die Fans mit geringerer Drehzahl laufen als das bisher bei Triebwerken der Fall war. Hier gehen die Triebwerkhersteller sehr unterschiedliche Wege: Zum einen gibt es Konzepte, die einen so genannten Getriebefan vorsehen, also zur Reduzierung der Drehzahl auf ein Getriebe innerhalb des Triebwerks bauen. Zum anderen will man jedoch möglichst das zusätzliche Gewicht eines Getriebes einsparen und erwägt den Einsatz einer langsamer rotierenden Turbine. Damit ergäbe sich jedoch ein neues Problem. Während heute meist Fan und Verdichter auf einer gemeinsamen Welle sitzen und damit mit der gleichen Drehzahl rotieren, würde ein langsamer rotierender Verdichter heutiger Bauweise keinen ausreichenden Druck aufbauen. Will man also die aufwendige Entwicklung völlig neuer Verdichter vermeiden, muss man Verdichter und Fan trennen und auf unterschiedlichen Wellen montieren, sodass sie von unterschiedlichen Turbinen angetrieben werden können. Die zusätzliche Welle sowie die zusätzliche Turbine würden jedoch zusätzliches Gewicht mit sich bringen. Die unterschiedlichen Hersteller gehen hier unterschiedliche Wege. Ein außen liegender Fan wie beim GE-36 UDF spielt heute keine Rolle mehr. Zu aufwendig ist die Konstruktion vor allem in Bezug auf die Abdichtung

zwischen statischem und rotierendem Teil der Triebwerkshülle und zu hoch ist der Aufwand, die Lärmbelastung zu reduzieren.

Neben der weiteren Effizienzsteigerung der Triebwerke durch Erhöhung des Fandurchmessers und des Nebenstromverhältnisses ist heute auch die Lärmreduzierung ein wichtiges Thema der Triebwerkentwicklung. Man weiß, dass die Schallwellen zweier direkt hintereinander montierter, gegenläufig rotierender Fans sich zu großen Teilen aufheben (destruktive Interferenz). Doch auch hier stellt sich erneut die Frage, ob man die Gegenläufigkeit beider Fans durch ein Getriebe oder durch eine zusätzliche Turbine realisieren soll. Auch hier gehen die Triebwerkhersteller verschiedene Wege. Man scheint jedoch mit dem Konzept eines Getriebes schon weit vorangeschritten zu sein. Das Getriebe hat den Vorteil, dass weiterhin nur eine Turbine über nur eine Welle beide Fans sowie den Verdichter antreiben kann. Das Getriebe kann dann sowohl die Drehzahl der Fans reduzieren sowie die Rotationsrichtung des einen Fans umkehren. Solche Triebwerke, Getriebefan genannt, sind bereits auf Triebwerktestständen gelaufen, bedürfen aber noch einer Detailabstimmung bis sie ausgereift sein werden. Die bereits getesteten Prototypen von Getriebefans erreichten eine Lärmreduktion um etwa 15% sowie ein Nebenstromverhältnis von 12 bis 13.

Die absehbare Zukunft der Luftfahrt scheint also im Getriebefan zu liegen. Schon in wenigen Jahren könnten die ersten Flugzeuge mit dieser Technik ausgestattet werden und so dem Turbofan mit zusätzlichen Turbinen zuvor kommen.

In den nächsten Jahrzehnten wird sich das Nebenstromverhältnis sicher noch stark erhöhen. Im Zeitraum bis etwa 2025 kann damit gerechnet werden, dass die definierte Grenze des Nebenstromverhältnisses von 20 überschritten wird und somit der erste Propfan in Serie produziert wird. Dieser wird sich jedoch äußerlich kaum von heutigen Turbofans unterscheiden. Der Durchmesser der Triebwerke wird wohl noch zunehmen und die Form der Fanschaufeln wird optimiert werden.

Während es bei den Turbofan-Triebwerken noch viel Entwicklungspotential gibt, scheinen Turboprop-Triebwerke ausgereift zu sein. Zwar werden sie auch noch effizienter werden, doch grundsätzlich werden sie sich wohl kaum noch verändern. Die Turboprops sind schon heute mit Getriebe ausgestattet. Sie verfügen heute oftmals schon über geschwungene Propellerblätter und gegenläufige Propeller. Außerdem haben diese Triebwerke ihren Anwendungsbereich inne, in welchem sie äußerst effizient arbeiten. Wie auch der Kolbenmotor schon vor Jahrzehnten seinen Anwendungsbereich in der Allgemeinen Luftfahrt, also bei kleinen Sportmaschinen gefunden hat, wird auch der Turboprop sich auf den Bereich der Regionalluftfahrt beschränken, da hier aufgrund der kurzen Strecken Effizienz wichtiger ist als die Geschwindigkeit.

Die Bemühungen der Triebwerkhersteller bekunden zwar, dass Ökologie und Ökonomie mittlerweile eine große Rolle spielen, doch gibt es noch keine Bemühungen, alternative Antriebsmöglichkeiten zu erforschen. Die Luftfahrt wird noch lange Zeit auf die Verbrennung fossiler Brennstoffe angewiesen sein. Es ist nicht absehbar, dass sich dies ändern wird.

6. Anhang

6.1 Bildnachweis

- Abb.1: Datenbank von <http://www.airliners.net>,
(Titelbild) Fotograf und Copyrightinhaber: Ian Kirby
- Abb.2: eigene Zeichnung
- Abb.3: „Simulation of the airflow over a wing in a wing tunnel with, with smoke to
show the acceleration and deceleration of the air“
aus <http://www.allstar.fiu.edu/AERO/airflylv13.htm>
- Abb.4: Datenbank von <http://www.airliners.net>,
Fotograf und Copyrightinhaber: Anton Pettersson
- Abb.5: eigene Zeichnung
- Abb.6: „The Coanda effect #2“
aus <http://jnaudin.free.fr/html/coanda.htm>
- Abb.7: eigene Zeichnung
- Abb.8: eigene Zeichnung
- Abb.9: „Downwash and wing vortices in the fog“,
Fotograf und Copyrightinhaber: Paul Bowen, Cessna Aircraft Company
- Abb.10: eigene Zeichnung
- Abb.11: eigene Zeichnung
- Abb.12: Datenbank von <http://www.airliners.net>,
Fotograf und Copyrightinhaber: Ricardo Morales
- Abb.13: eigene Zeichnung
- Abb.14: eigene Zeichnung
- Abb.15: eigene Zeichnung
- Abb.16: eigene Zeichnung
- Abb.17: eigene Zeichnung
- Abb.18: Datenbank von <http://www.airliners.net>,
Fotograf und Copyrightinhaber: Benny Bartels
- Abb.19: eigene Zeichnung

- Abb.20: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f7/Four_stroke_cycle_compression.jpg,
Copyright: GNU Free Documentation License
Autor: Eric Piercing
- Abb.21: aus "Engine and propeller issues now to be considered in Airworthiness Concern Process",
Copyright: Aircraft Owners and Pilots Association
- Abb.22: aus „Propellerentwicklung bei DG Flugzeugbau“,
Copyright: DG Flugzeugbau
- Abb.23: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e3/Turbojet_operation-_axial_flow.png,
Copyright: GNU Free Documentation License
Autor: K. Aainsqatsi
- Abb.24: Datenbank von <http://www.airliners.net>,
Fotograf und Copyrightinhaber: Tommy Booth
- Abb.25: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4e/Turboprop_operation.png,
Copyright: GNU Free Documentation License
Autor: K. Aainsqatsi
- Abb.26: Datenbank von <http://www.airliners.net>,
Fotograf und Copyrightinhaber: Bob Garrard
- Abb.27: eigene Zeichnung
- Abb.28: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/49/Turbofan_operation_%28lbp%29.png,
Copyright: GNU Free Documentation License
Autor: K. Aainsqatsi
- Abb.29: http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Thrust_reverser_fokker70 arp.detail.jpg,
Copyright: GNU Free Documentation License
Autor: Adrian Pingstone
- Abb.30: Datenbank von <http://www.airliners.net>,
Fotograf und Copyrightinhaber: Roel Kroes
- Abb.31: Datenbank von <http://www.airliners.net>,
Fotograf und Copyrightinhaber: Mel Lawrence
- Abb.32: eigene Zeichnung
- Abb.33: Datenbank von <http://www.airliners.net>,
Fotograf und Copyrightinhaber: Ian Kirby

- Abb.34: Datenbank von <http://www.airliners.net>,
Fotograf und Copyrightinhaber: AirNikon
- Abb.35: Datenbank von <http://www.airliners.net>,
Fotograf und Copyrightinhaber: AirNikon
- Abb.36: eigene Zeichnung
- Abb.37: eigene Zeichnung
- Abb.38: [http://en.wikipedia.org/wiki/Image:
Antonow_An_70_prop_detail_rvb_jno_MACS_2001_0037.03.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Antonow_An_70_prop_detail_rvb_jno_MACS_2001_0037.03.jpg),
Copyright: GNU Free Documentation License
Autor: unbekannt
- Abb.39: Datenbank von <http://www.airliners.net>,
Fotograf und Copyrightinhaber: Phil Cooke

ACHTUNG: Zu den meisten Bildern liegt dankenswerterweise das Einverständnis der Urheber zur nicht kommerziellen Veröffentlichung vor, sofern sie nicht von mir selbst stammen. Einige Urheber konnten jedoch nicht ausfindig gemacht werden. Für Hinweise bin ich dankbar: Lucas.Sichardt@posteo.de

6.2 Quellenverzeichnis

- 1.: „Flug Revue“, Heft 6/89
- 2.: <http://www.wikipedia.org>, Stand vom xx.xx.2007
- 3.: „Wie erklärt man das Fliegen in der Schule?“ von Rita Wodzinski
- 4.: „A Physical Description of Flight“ von David Anderson
- 5.: Luft- und Raumfahrtforum der DGLR
- 6.: interne Präsentation für Mitarbeiter der MTU Aero Engines
- 7.: <http://www.verbrennungsmotor.de>, Stand vom 28.11.2006
- 8.: „Aero International“, Hefte 6/04, 11/04, 3/05, 6/05, 6/06
- 9.: <http://www.exl.at/helicopter/turbinen/turbinen.htm>, Stand vom 12.12.2006
- 10.: <http://www.airliners.de/industrie/sonderthemen/passagierluftfahrt/>, Stand vom 19.12.2006
- 11.: „Meilensteine der Luftfahrt“ von Mike Spick
- 12.: „Full Scale Technology Demonstration of a Modern Counterrotating Unducted Fan Engine Comcept - Design Report“, NASA und GE Aircraft Engines, 1987
- 13.: „Full Scale Technology Demonstration of a Modern Counterrotating Unducted Fan Engine Comcept – Engine Test“, NASA und GE Aircraft Engines, 1987

6.3 Erklärung der Originalität der Arbeit

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe; ferner, dass diejenigen Stellen der Arbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen wurden, als solche kenntlich gemacht sind.

Lucas Sichardt

Neuenstein, 28.03.2007
aktualisiert im April 2009