

FLUGZEUGANTRIEBE



Inhalt:

Einleitung	3
Ein Jahrhundert das die Welt verändert	4
Die Frühzeit	6
Der Motor des Wright Flyers	8
Motoren in Sternbauweise	9
Umlaufmotoren	9
Sternmotoren in Standbauweise	11
Reihen-, V- und Boxermotoren	13
Die Grenzen des Machbaren	15
Strahltriebwerke	16
Das Verpuffungsstrahltriebwerk	17
Das Düsentriebwerk	17
Frank Whittle und Hans von Ohain revolutionieren die Luftfahrt	17
Radial vs. Axialverdichter	20
Die Evolution nach der Revolution	21
Fan bzw. Mantelstrom Triebwerke	21
Turboprop Triebwerke	22
Propfan Triebwerke	23
Raketenmotoren	23
Das Plus an Kraft...	25
Exoten	27
Die Zukunft	27
GE9X das größte Triebwerk der Welt	27
Staustrahltriebwerke	29
Treibstoffe der Zukunft	30
Zeitleiste	31

Einleitung

In diesem Aufsatz soll es um die Geschichte und die Funktionsweise der Maschinen gehen, welche in Flugapparate verbaut worden sind, aktuell verbaut werden und in Zukunft vermutlich Verwendung finden werden.

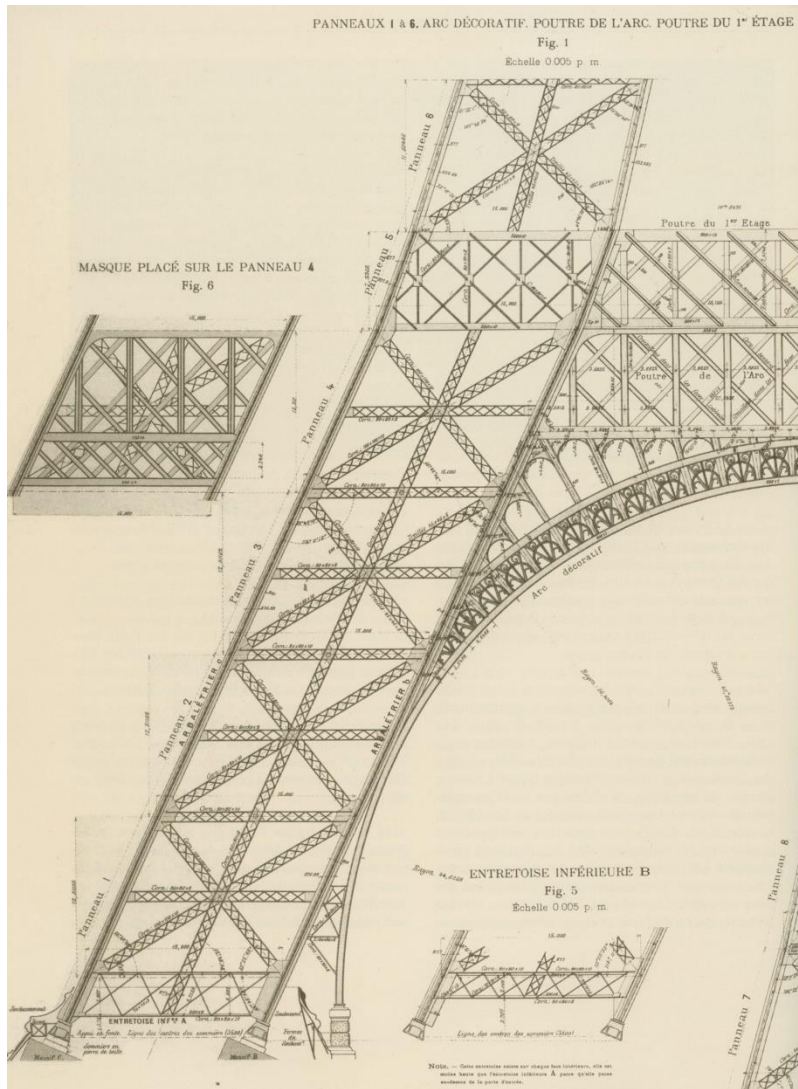
Zuallererst sollten wir uns vor Augen halten, dass die ersten erfolgreichen Flugversuche komplett antriebslos waren. Als die Brüder Joseph Michel und Jacques Étienne Montgolfier mit Heißluftballonen experimentierten und schließlich am 21.11.1783 die ersten Menschen vom Boden von Paris abhoben, war das völlig antriebslos. Auch die ersten ernsthaften Flüge mit einem „Schwerer-als-Luft“ Flugapparat waren ohne Antrieb. Ende des 19ten Jahrhunderts machte Otto Lilienthal seine Flugversuche. Nach sorgfältigen theoretischen Vorarbeiten stellte er seine Segelapparate zunächst in den Wind, und macht dann alsbald die ersten kontrollierten Hüpfer, welche bald in echten Flügen von beachtlicher Weite führten. Dies waren die ersten Flugzeuge; welche in Serie gefertigt und auch kommerziell vertrieben wurden. Die Segelapparate von Otto Lilienthal hatten den Vorteil, dass der Pilot über den Flugweg entscheiden konnte. Der Nachteil war, dass ihm für den Flug nur die Energie zur Verfügung stand; welche er als potentielle Energie vorher in Form von Höhe mitgenommen hat. In den unteren Geschwindigkeitsbereichen kann man also sagen, dass der Antrieb die Aufgabe hat, die Energie, welche durch den Luftwiderstand verloren geht und beim Gleitflug aus der Höhe entnommen wird, nachzuführen.

Wie sieht ein Lastenheft für einen Flugzeugantrieb aus?

1. Ich muss die Energie aufbringen.
2. Ich muss die Energie auf die Umgebung übertragen, also in Vor-, oder Auftrieb umsetzen.

Ein Jahrhundert, das die Welt verändert

Halten wir uns zunächst vor Augen in welcher Zeit diese Entwicklungen begonnen haben. Das 19te Jahrhundert zählt sicher zu den Epochen, die die Welt, in der wir leben, am meisten verändert haben. Das vorherige Jahrhundert endete geprägt von Adel und Klerus. In deren Händen waren materielle und immaterielle Macht vereint. Der Hochadel herrschte mit absoluter Macht über die Untergebenen. Sie gehörten quasi zum Land dazu, und wurden mit ihm beim Wechsel von Besitzverhältnissen übertragen. Der Klerus hatte den Anspruch über die Wahrheit. Er bestimmte über Gut und Böse, den Sinn des Lebens, und die Art und Weise, wie die Welt zu sehen und zu interpretieren war.



Im 19ten Jahrhundert setzte sich die industrielle Revolution durch. Das veränderte bis heute alles. Es wurden Produktionsmittel eingeführt, welche die manufakturellen Möglichkeiten zuvor um ein Vielfaches übertrafen. Materialien wie Eisen und Stahl standen nicht mehr nur in homöopathischen Dosen, sondern als Massenprodukt zur Verfügung. Wollte früher jemand, der nicht aus dem Adel stammte, reich werden, so stand ihm nur der Handel und der Geldverleih offen. Nun ist aber weder der internationale Seehandel, noch der großvolumige Geldverleih ohne ein beträchtliches Startkapital denkbar. Es sind also bürgerliche Erbdynastien entstanden. Die Fugger sind ein Beispiel dafür.

Im 19ten Jahrhundert begann eine Zeit, in der eine Idee und Geschäftssinn ausreichte, um ein Imperium zu gründen. Edison erfand eine ganze

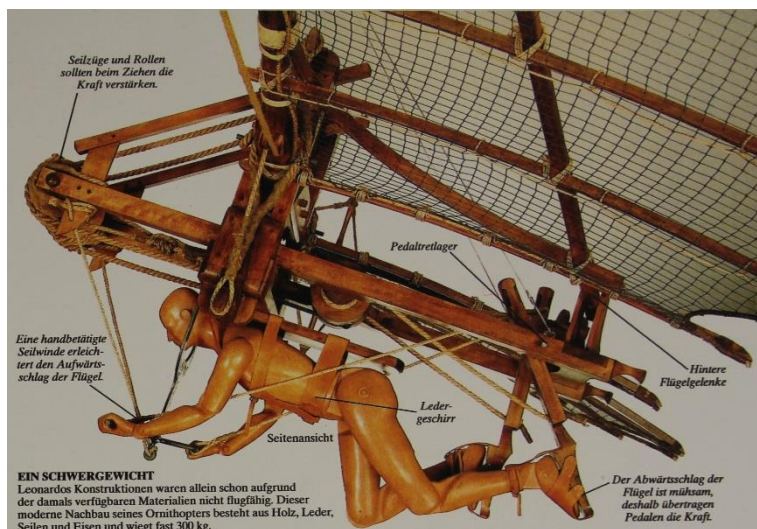
Reihe von Patenten rund um die Elektrizität und gründete General Electric. Krupp erfand den nahtlos geschmiedeten Radreifen für die Eisenbahn und gründete ein Imperium. Plötzlich war es für jeden möglich aus seiner Gesellschaftsschicht herauszuwachsen. Auf der anderen Seite ergaben sich Gesellschaftsverhältnisse, welche völlig neu und ungeregelt waren. Der abhängig Beschäftigte war erfunden. Und da er abhängig war, und

es noch keine gesellschaftlichen Konventionen gab wie man damit gerecht umzugehen hat, war der Unterschied zur Leibeigenschaft nur rudimentär. Doch auch dies begann sich zu wandeln. Auf der einen Seite fanden sich Industrielle, welche sich verantwortlich sahen für ihre Arbeiter. Auf der anderen Seite entstand die Arbeiterbewegung. Die breite Masse lernte, dass sie wichtig ist und Macht hat. Der Streik und Sabotage (Sabot ist der niederländische Holzschuh, der sich sehr störend in Zahnrädern macht) wurde als Machtinstrument eingesetzt. Es wurden Arbeitersiedlungen gebaut, welche weit oberhalb des Standards lagen. Diese sind teilweise bis heute erhalten, und stehen als Kulturerbe unter Denkmalschutz. Es wurden Regeln erlassen, die die Willkür eindämmten. Dies war nicht nur Altruismus. Es wurde bald immer schwieriger Arbeiter zu finden, und so musste man immer mehr Menschen vom Land anlocken, und die eigenen Arbeiter halten. Der Klerus verlor eine Menge seines Anspruches auf die universelle Wahrheit. Es wurden Dinge entdeckt und genutzt, die weit über die biblische Erfahrungswelt hinausgingen. Reichtum und Macht waren nicht mehr gottgegeben (Titel und Reichtum waren zuvor immer ererbt), sondern selbst erworben. Es entstand eine Art von Geldadel. Und es entstand erstmals ein gewisses Mindestmaß an Durchlässigkeit in den Machtstrukturen. Es begann eine Zeit des volkswirtschaftlichen Reichtums. Nur an der Verteilung musste noch gearbeitet werden. Es war eine Zeit des Aufbruchs. Man begann alle Naturwissenschaften miteinander zu verbinden, und in ihrer Kombination die Welt zu erklären und Wahrheit zu finden. Davor waren die Geisteswissenschaften Philosophie und Theologie für Wahrheit und Sinn zuständig. Es schien nichts unmöglich zu sein. Und in dieser Zeit begann man auch, sich sehr systematisch mit dem Vogelflug und der Luftfahrt zu beschäftigen. Plötzlich hatten die innovativsten Köpfe einer Epoche aus eigener Kraft, die Mittel systematisch zu forschen. Denn es waren die innovativen Köpfe, die mit ihren Fabriken sehr viel Geld verdienten.



Die Frühzeit

Wie in jeder Zeit davor begann alles mit der Beobachtung des Vogelfluges. Es gibt schon sehr alte Zeichnungen von Profilen eines Vogelflügels, dass es nicht sehr schwer war dies zu kopieren. Nur das Problem mit der Energienachführung war viel schwerer. Erst mit den Mitteln der Moderne ist es möglich, den Schlag eines Vogelflügels im Detail zu beobachten. Wenn man genau hinschaut, dann befindet sich ein durchschnittlicher Vogel beständig im Gleitflug. Er hebt in Intervallen nur seine Flügel an, um einen neuen Gleitflug von ein paar cm weiter oben neu anzusetzen. Nun haben die Flugpioniere, die diesen Ansatz verfolgten, weder die Flugmechanik des Flügelschlages ausreichend verstanden, noch waren sie in der Lage, die notwendigen Dreh-Kippgelenke für die Flügel zu bauen. Die Natur hat auch ein paar Millionen Jahre gebraucht, um eine funktionierende Schulter in Serie zu fertigen.



Nachbau eines Entwurfes von Leonardo Da Vinci zum Bau einer vom Menschen angetriebenen Flugmaschine

Erfindung vom Anfang des 19ten Jahrhunderts: Der Schiffspropeller. Dieser musste nur an das neue Medium angepasst werden. Hierbei war es wieder sehr hilfreich, auf die Beobachtung und die Erfahrungen mit dem Flügelprofil von Vögeln zurückgreifen zu können.

Moderner Eindecker von Hans Grade mit primitivem Propeller.

Luftfahrtmuseum Laatzen.

Bild: UF



Es gab andere Versuche, die sich mehr an der Erfahrungswelt der beginnenden Industrialisierung orientierten. Bei Schiffen war der Schaufelradantrieb etabliert, und man hatte sogar durch eine Verstellbarkeit der Schaufeln den desaströsen Wirkungsgrad ein wenig verbessert. Nun musste man aber für Luftfahrzeuge den vorlaufenden Teil des Rades entweder abschirmen, oder die Schaufeln abklappen. Das Schaufelrad erwies sich, selbst für Luftschiffe, als untauglich. Einzig erfolgversprechend war eine

Da die Gesetzmäßigkeiten des Auftriebes, beim Propeller dann des Vortriebes, weiterhin gelten, kam man von der Nachbildung von Blättern (Habe ich mal auf einer Zeichnung gesehen) über schräggestellte Bretter, schließlich zu Propellerblättern, die wie Flügel



Moderner Flugzeugpropeller in Schichtbauweise
Luftfahrtmuseum Laatzen. Bild: UF

profiliert waren, und deren Anstellwinkel und Profil an der Wurzel stärker waren als an den Spitzen. Zu dieser Zeit entwickelten sich auch immer bessere Antriebe. Es konkurrierten damals Wärmekraftmaschinen, wie die Dampfmaschine und der Ottomotor, mit elektrischen Motoren. Speziell im Automobilbau konkurrierten diese Prinzipien noch gleichwertig nebeneinander. Im Flugzeugbau war die Dampfmaschine zu schwer, der Ottomotor zu anfällig und der Elektromotor, dank der Batterien, ebenfalls zu schwer für den Einsatz in Flugzeugen. Die Probleme des Ottomotors hatten aber die Aussicht, durch Erfahrung und Innovation bewältigt zu werden. So war es auch ein 4 Zylinder Ottomotor mit 12 PS und einem Gewicht von knapp über 80 kg, der den Wright Flyer zum ersten gesteuerten Motorflug mit erfolgreicher Landung, antrieb.

Ich finde es faszinierend, sich das enorme Innovationstempo vor Augen zu halten. Um 1891 unternahm Otto Lilienthal erste regelmäßige Gleitflüge mit einem ruderlosen Hängegleiter. Gegen 1902 erfanden die Gebrüder

Wright mit dem Seitenruder das dritte und letzte Basis Steuerelement, welches sich bis heute in Flugzeugen findet. Am 17.12.1903 erfolgten schließlich die ersten Motorflüge. So entwickelte sich die Technik weiter. Im ersten Weltkrieg waren die Flugzeuge dann kunstflugtauglich.

Der Motor des Wright Flyers

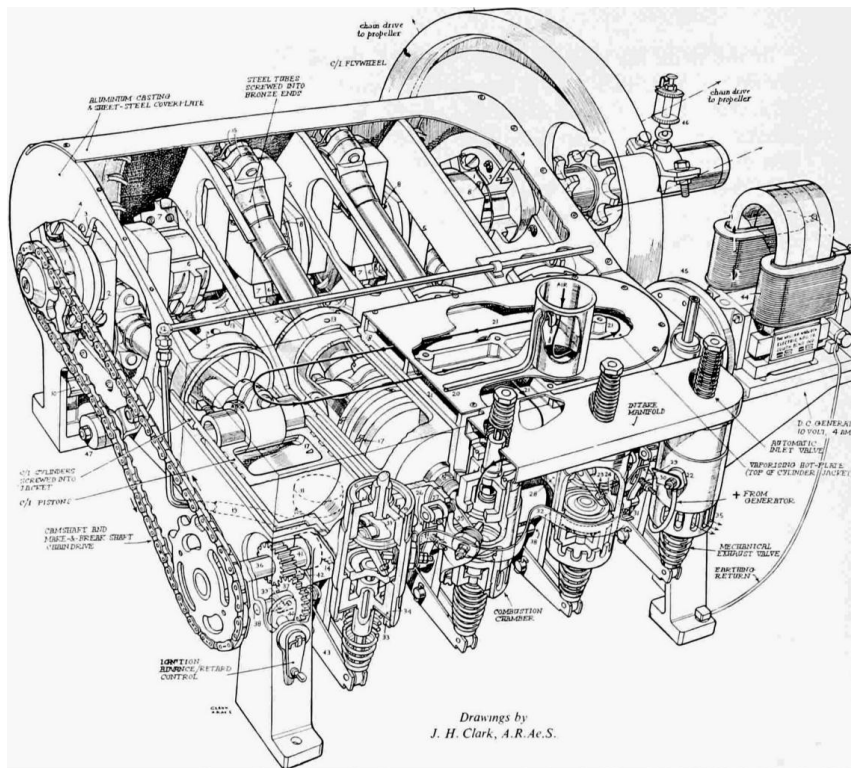


Bild: WWW.Wright Brothers.Org

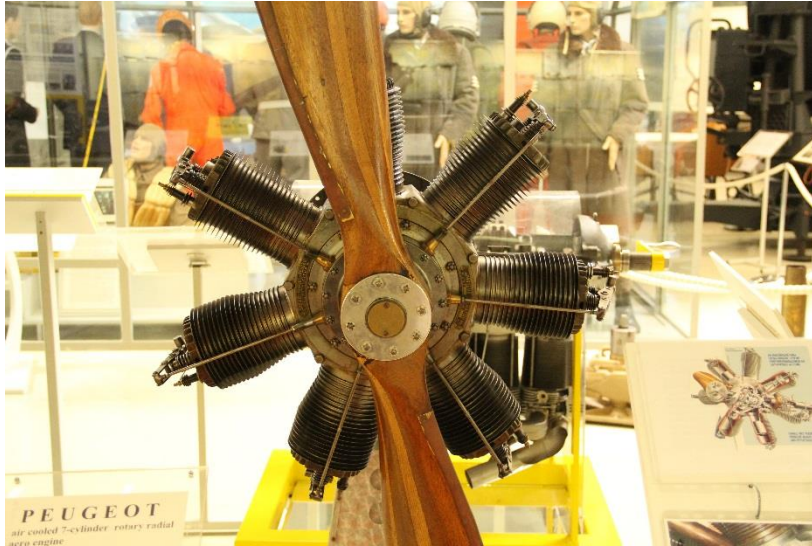
Für den Wright Flyer wurde eigens ein Motor entwickelt, da es zu der Zeit keinen Motor aus dem Automobilbau gab, der den Anforderungen entsprach. Aus den Versuchen mit den Gleitern schlossen die Brüder Wright, dass sie einen Motor benötigen, der mindestens 8 PS leisten und nicht über 200 Pfund (91 kg) wiegen durfte. Das war mit den gewöhnlichen Materialien nicht zu leisten. Aluminium war zwar schon bekannt aber viel zu weich. Glücklicherweise wurden zu der Zeit Aluminiumlegierungen gefunden, welche viel beständiger waren. Auch in

Deutschland wurde zu dieser Zeit mit Aluminiummotoren von Daimler und Benz experimentiert. (Heute ist es leicht zu sagen: nimm doch Alu. Wenn man sich aber vor Augen führt, wie metallisches Aluminium gewonnen wird, so kann man die Leistungen nicht genug bewundern. Al wird aus einer Schmelze von Al_2O_3 in einem elektrochemischen Verfahren gewonnen. Da Al_2O_3 einer der am höchsten schmelzenden Feststoffe ist, wird es in einem eutektischen Verhältnis mit Kryolith vermischt. Dadurch verringert sich der Schmelzpunkt so weit, dass die Schmelze in Graphitiegeln, unter eintauchen von Graphitelektroden zu elementarem Aluminium reduziert werden kann. Dies setzt sich am Boden ab. Der Strom, der dazu nötig ist, hat nur ca. 2,5 Volt aber extrem viele Ampere. Wer einmal eine Thermit Reaktion gesehen hat, hat eine Vorstellung von der Energie, die dafür notwendig ist.)

Viele Dinge, die heute in Ottomotoren selbstverständlich sind, waren zu der Zeit noch nicht erfunden. Der Vergaser war eine simple "Verdampfungskammer", in der die Ansaugluft über das Benzin strich. Dieser Bereich wurde vom Motor erwärmt, um so die Verdampfung zu beschleunigen. Das Zündsystem war ein "make-and-break" System. Dabei gibt es keine Zündkerzen. Es werden im Brennraum zwei Kontakte zusammengebracht und wieder getrennt. Der dadurch entstehende Funke zündet das Gemisch. Zum Zeitpunkt des Startes wurde der Motor mit Batteriespannung vom Boden versorgt. Der Flyer selbst führte keine Batterie mit.

Motoren in Sternbauweise

Umlaufmotoren



Rossel Peugeot 7-Zylinder Umlaufmotor 70PS/120Upm

Luftfahrtmuseum Laatzen.

Bild: UF

Der erste Umlaufmotor wurde ganz zum Ende des 19ten Jahrhunderts 1899 von Stephen Balzer gebaut. (Andere Quellen schreiben dieses Motorprinzip den Gebrüdern Laurent und Louis Seguin zu)

Umlaufmotoren sind Motoren, bei denen das heute gewohnte Bewegungsprinzip umgekehrt ist. Hier steht die Kurbelwelle fest, und der Motor dreht sich darum herum.

Umlaufmotoren haben drei entscheidende Vorteile:

1. Sie sind durch die Rotationsbewegung durch die Luft sehr leicht zu kühlen.
2. Sie können auf eine Schwungmasse an der Kurbelwelle verzichten, da der Motor selbst als Schwungmasse dient. Dadurch waren sie fast um ein Drittel leichter als konkurrierende Motoren, und zeichneten sich trotzdem durch eine hohe Laufruhe aus.
3. Gute Innenkühlung durch das Kraftstoff- Luft- Gemisch, welches durch das Kurbelgehäuse geführt wurde.

Die Nachteile waren:

1. Die Kreiselstabilisierung der großen drehenden Masse wirkte sich dämpfend auf die Manövrierbarkeit des Flugzeuges aus. Die Kräfte, die bei schnellen Steuerbewegungen auf das Flugzeug wirken, können enorm sein. Ggfs. sind sie lebensbedrohlich.
2. Die Corioliskräfte sind bei einem schnell drehenden Motor, bei dem sich drehende Massen periodisch zum Zentrum bewegen, und sich wieder entfernen, extrem. Dadurch ergibt sich ein entsprechender Schmierungsbedarf. Geschmiert werden die Motoren über entsprechende Beimengungen im Treibstoff. Teilweise übertraf dabei die Menge des Schmiermittels die des Kraftstoffes.
3. Bedingt durch die hohe Schwungmasse ein gewaltiges Gegendrehmoment bei Drehzahlwechseln.
4. Durch die Zuführung des Gemisches über das Kurbelgehäuse kann der Ansaugweg wenig optimiert werden.

Zur Schmierung wurde vorzugsweise Rizinusöl verwendet. Es war benzinunlöslich, und wurde somit nicht durch den Kraftstoff verdünnt. Schmierung war bei diesen Motoren extrem wichtig. Durch die großen Seitenkräfte war der Wartungsaufwand ohnehin hoch.

Später wurde die Ansaugluft manchmal auch am Kurbelgehäuse vorbeigeführt. Dadurch vermied man die Aufheizung der Ansaugluft, und den damit einhergehenden Leistungsverlust.

Bei einigen Motoren verzichtete man auf gesteuerte Einlassventile und verwendete Flatterventile. Der Einfluss auf die Leistung muss verheerend gewesen sein. Die Flammrückschläge bei Drosselung waren aber bestimmt eine Pracht anzusehen.

Später gab es sogar Umlaufmotoren als Gegenläufer. Dadurch wurden einige, Prinzip bedingte, Nachteile verringert. Bis zum Ende des ersten Weltkrieges beherrschten Umlaufmotoren die Luftfahrt.

Im Mai 1918 wurde die Goe III gebaut. Sie hatte bei 27 Litern Hubraum eine Leistung von 118 KW.

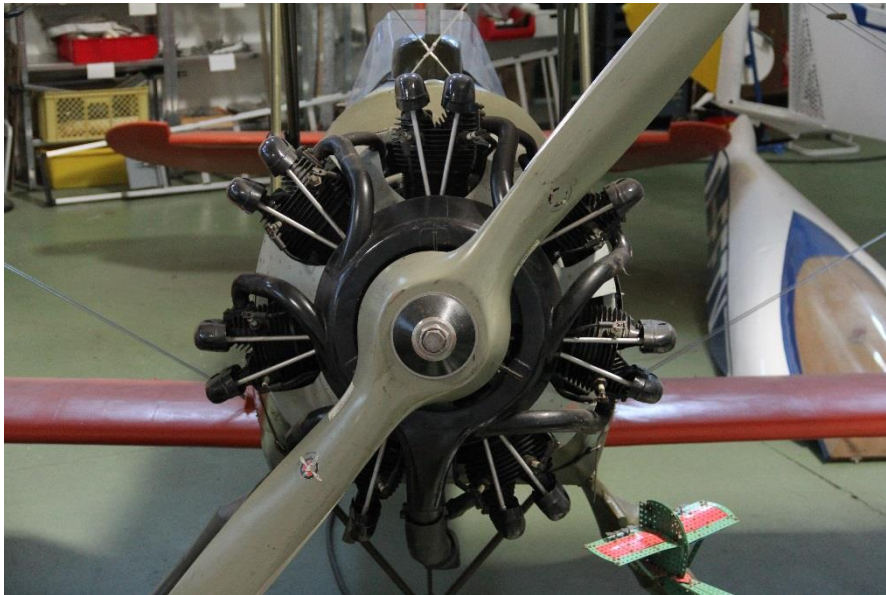
Nach dem Ersten Weltkrieg schlug dann die Stunde der Sternmotoren in Standbauweise. Diese verdrängten die unwirtschaftlichen Umlaufmotoren dann vollständig.



*Umlaufmotor eingebaut. Die Motorverkleidung lenkt die Abgase vom Piloten weg.
Luftfahrtmuseum Laatzen*

Bild: UF

Sternmotoren in Standbauweise



*Sternmotor Siemens Sh 14 A4 einer Focke-Wulf FW-44 Stieglitz
Luftfahrtmuseum Laatzen Bild: UF*

Der wichtigste Unterschied zum Umlaufmotor ist: Nun bewegt sich die Kurbelwelle, und nicht der Motor. Das bringt eine Menge Vorteile mit sich. Man kann die Ver- und Entsorgung des Motors wirklich gestalten. Die Konstrukteure können die Vergaser bis an die Zylinderköpfe bringen, Turbolader einbauen und aufwändige Ventilsteuerungen konstruieren. Auch war es möglich auf eine

Öldruckschmierung zu setzen, und auf die Gemischschmierung zu verzichten. Auch die Kräfte auf die Zylinderwände waren viel geringer, und damit auch der Verschleiß. Sternmotoren hatten einige Vorteile gegenüber anderen damals modernen Konzepten. Sie zeichneten sich durch ein sehr gutes Leistungsgewicht aus. Eine nennenswerte Kurbelwelle gab es nicht, und auf eine Wasserkühlung konnte leicht verzichtet werden, da jeder Zylinder gleichberechtigt ganz vorne im Wind stand.

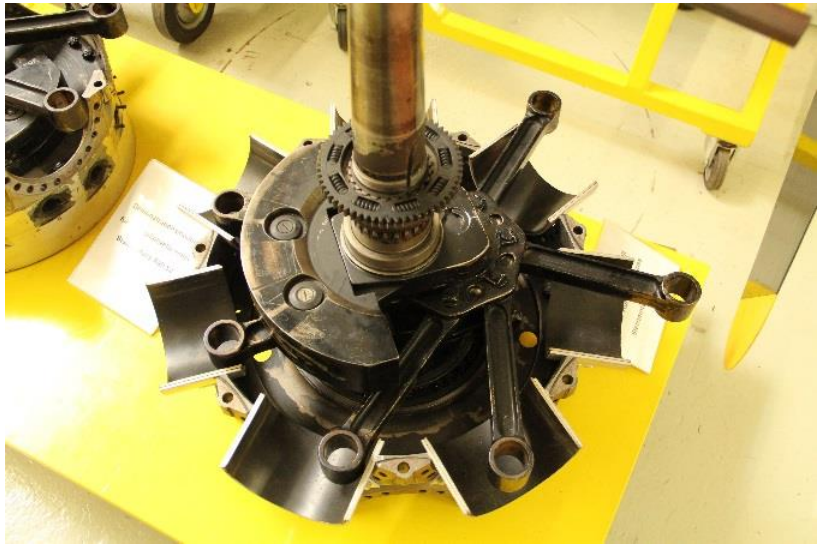


*Replik der Spirit of St. Lewis
Luftfahrtmuseum Laatzen*

Bild: UF

Eine ganze Menge legendärer Flugzeuge wurden von Sternmotoren angetrieben. Die "Spirit of St. Louis" wurde von dem Wright R-790 Whirlwind angetrieben. Einem 9 Zylinder 12,9 l Sternmotor mit 150KW. Dieser Motor war eine komplette Neuentwicklung der Lawrance Aero Engine Company,

bei dem ein besonderes Augenmerk auf eine verbesserte Kühlung und einen geringeren Spritverbrauch gelegt wurde. Andere Legenden, die zwischen den Weltkriegen entwickelt wurden, waren die Ju52 mit ihren drei BMW-132 Sternmotoren. Diese hatten 9 Zylinder und 404 kW bis 526 kW. Sowie die Konkurrenzmaschinen DC-2 und DC-3. Speziell in großen mehrmotorigen Maschinen waren Sternmotoren konkurrenzlos. Sie konnten ihre Vorteile ausspielen, und die Nachteile wie die große Stirnfläche fielen nicht ins Gewicht. In der Folgezeit wurden immer größere und leistungsstärkere Sternmotoren gebaut. Schließlich schrieb der Ingenieur Heinz Gartmann: "Ein einziger Sternmotor leistet so viel wie zwei Schnellzuglokomotiven und wiegt weniger als die Räder von einer."



*Kurbelwelle eines Sternmotors
Luftfahrtmuseum Laatzen
Bild: UF*



*BMW-801A 14 Zylinder Doppelsternmotor
Luftfahrtmuseum Laatzen Bild: UF*

Speziell in den USA und der UDSSR gab es auch schnelle einmotorige Jagdmaschinen, welche mit Sternmotoren ausgerüstet wurden. So schätzte die US Navy die Einfachheit und Zuverlässigkeit der Luftkühlung. Dafür wurde dann die große Stirnfläche, und die damit einhergehenden Nachteile in der Aerodynamik in Kauf genommen. Die Chance Vought F4U "Corsair" der US NAVY, sowie die Polikarpow I-16 aus der UDSSR der 30er Jahre, sind

Beispiele dafür. Seitens der deutschen Luftwaffe wurde die FW190 mit unterschiedlichen Sternmotoren und Leistungen zwischen 1700 und 2100 PS gebaut



und eingebaut in die FW190

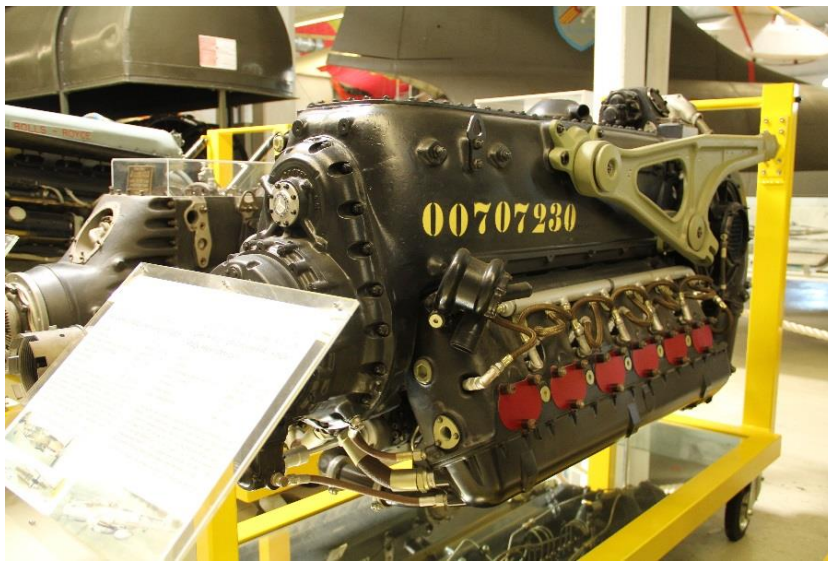
Reihen-, V- und Boxermotoren

Um zu einer kleineren Stirnfläche zu kommen, waren andere Bauweisen nötig. Nun ist es kein Hexenwerk, die Zylinder nicht mehr im Kreis, sondern hintereinander anzuordnen, aber es gehen halt einige Vorteile in Sachen Kühlung und Gewicht verloren. Es sind zwar bei Hochleistungssternmotoren irgendwann auch Wasserkühlungen eingeführt worden, aber bei Reihenmotoren waren sie fast schon obligatorisch.



*Vordergrund: Supermarine Spitfire mit 5 Blatt Propeller und stehendem V12-Motor, dahinter BF109 mit hängendem V12-Motor
Luftfahrtmuseum Laatzen Bild: UF*

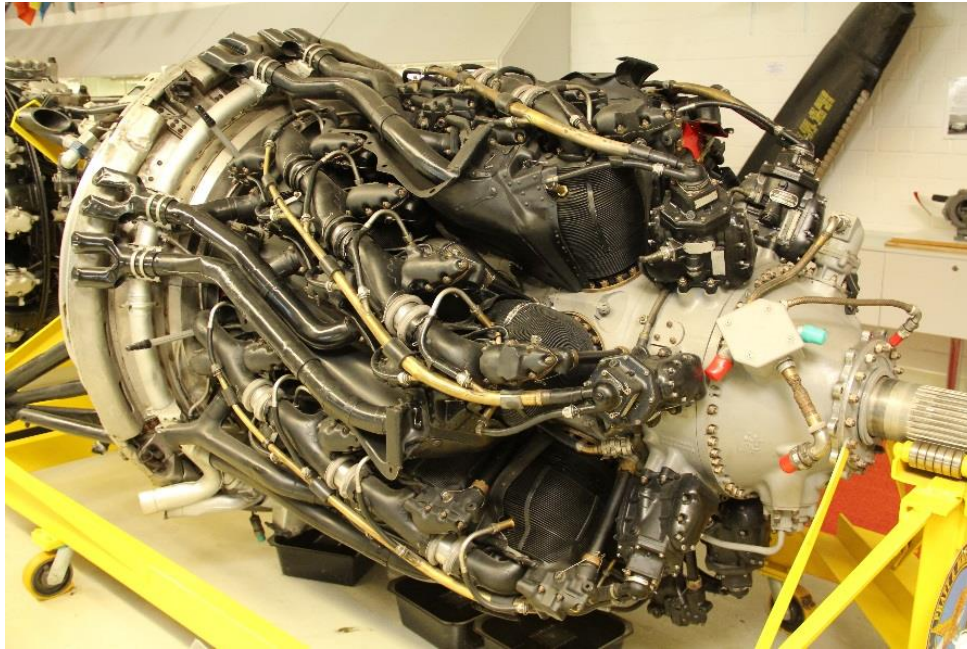
Die Zylinder weitestgehend hintereinander zu bauen, hatte zur Folge, dass man schlanke, aerodynamische Designs verwirklichen konnte. Das hat nicht nur Vorteile in der Luftfahrt zur Folge. Es wurden nun auch Flugzeuge gebaut, die eine Ästhetik hatten welche den Luftfahrtenthusiasten bis heute in den Bann schlägt. Beispiele dafür sind die BF109, welche mit ihrer markanten Abdeckung der



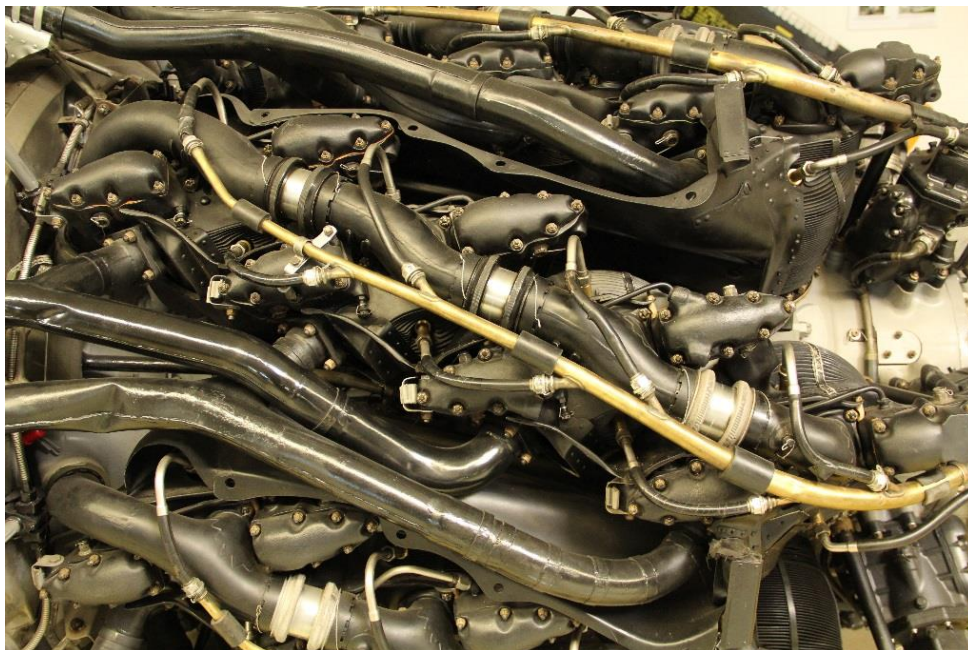
Propellernabe ihr schlankes Design betonte. Ebenso wie die mit herrlichen Schwingen gebaute Spitfire und die P-51 der US Airforce, welche mit einer runden durchsichtigen Kanzel glänzte, und einem unter dem Rumpf angebrachten Lufteinlass für den Kühler. Selten wurden Kampfflugzeuge gebaut, die dem Auge so schmeichelten. Die schlanken Motoren machten es möglich Maschinen, zu bauen, die durch die Gesetzmäßigkeiten der Strömungstechnik bestimmt waren. Damit glichen sie viel mehr den Vögeln als die Pummelchen mit den Sternmotoren. Und dies als gesund und schön zu empfinden, daran hatte sich der Mensch in Jahrmillionen der Evolution gewöhnt. Die Zylinder hintereinander zu bauen erzwingt fast eine Flüssigkeitskühlung. Das ist zwar aufwändiger und anfälliger, aber man kann die Kühlung viel genauer den Notwendigkeiten anpassen.

Daimler-Benz DB605A 12 Zylinder V-Motor vor und nach der Restauration, und eingebaut in eine BF 109. Gut erkennbar an dem Motorträger. Luftfahrtmuseum Laatzen Bild: UF

Die Grenzen des Machbaren



bewegliche Teile ein einziger Zylinder mit sich bringt (Kolben, Pleuel, Kurbelwellen, Vergaser, Ventiltrieb und Steuerung, Zündtechnik: Erzeugung und Verteilung usw. Und alles muss geschmiert, synchronisiert und im Fluge verstellt werden. Außerdem müssen am Boden Techniker an die Baugruppen herankönnen, um Defektteile zu tauschen und zu kontrollieren) dann wird man verstehen warum ein Paradigmenwechsel notwendig

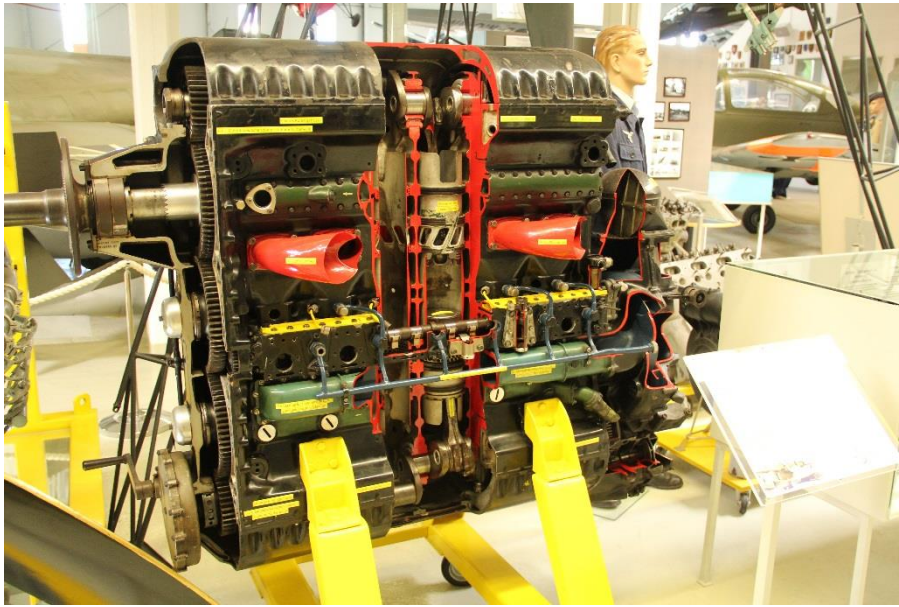


Nun erreichten Kolbenmotoren irgendwann eine Größe und Komplexität, die weder preiswert zu bauen, noch sinnvoll zu warten war.

Viermotorige Bomber hatten mehr Zylinder zum Antrieb als die gesamte Flugzeugbesatzung Finger. Wenn man sich vor Augen hält, wie viele

wurde. Es wurde auch langsam schwierig, die Leistung der Motoren an die Luft zu übergeben.

*Pratt & Whitney
28 Zylinder 4fach
Sternmotor 2575
kW / 2700 RPM
Luftfahrtmuseum
Laatzten
Bild: UF*



*Ein echter Exot: Ein Junkers Jumo 205
2Takt Diesel Flugmotor mit
gegenläufigen Kolben und zwei
Kurbelwellen
16,6 l Hubraum, 880 PS*

Die stärksten Motoren trieben zum Schluss 2 gegenläufige Propeller an, weil die Luftschrauben sonst irrwitzige Ausmaße hätten annehmen müssen.
z.B.: Lycoming XR-7755

Die Fragen waren also: Wie erzeuge ich viel mehr Leistung? Wie bekomme ich diese in Schub umgesetzt? Und wie schaffe ich das mit möglichst wenig bewegten Teilen?
Die Antwort fand sich schließlich in Strahltriebwerken.



*Hochleistungsflugmotor Napir
Sabre
24 Zylinder doppel- V Motor mit 2
Kurbelwellen
36,8 l Hubraum 1790 kW, später
2570 kW*

*Luftfahrtmuseum Laatzen
Bild: UF*

Strahltriebwerke

In Strahltriebwerken laufen die vier Arbeitsschritte eines Verbrennungsmotors (ansaugen, komprimieren, arbeiten und ausstoßen) gleichzeitig und kontinuierlich ab. Eine Ausnahme dazu stellt das Verpuffungsstrahltriebwerk mit Flatterventil dar.

Das Verpuffungsstrahltriebwerk

Dieses Triebwerk bildete den Antrieb für die Flugbombe V1 und bildete das Arbeitsprinzip für die externe Beheizung von LKW Motoren in der Frühzeit der Bundeswehr, die sogenannte Schwingfeuerheizung.

Bei dieser einfachen Form des Strahltriebwerks erfolgt die Verbrennung in Impulsen, und es kommt ohne eine Verdichtung aus.

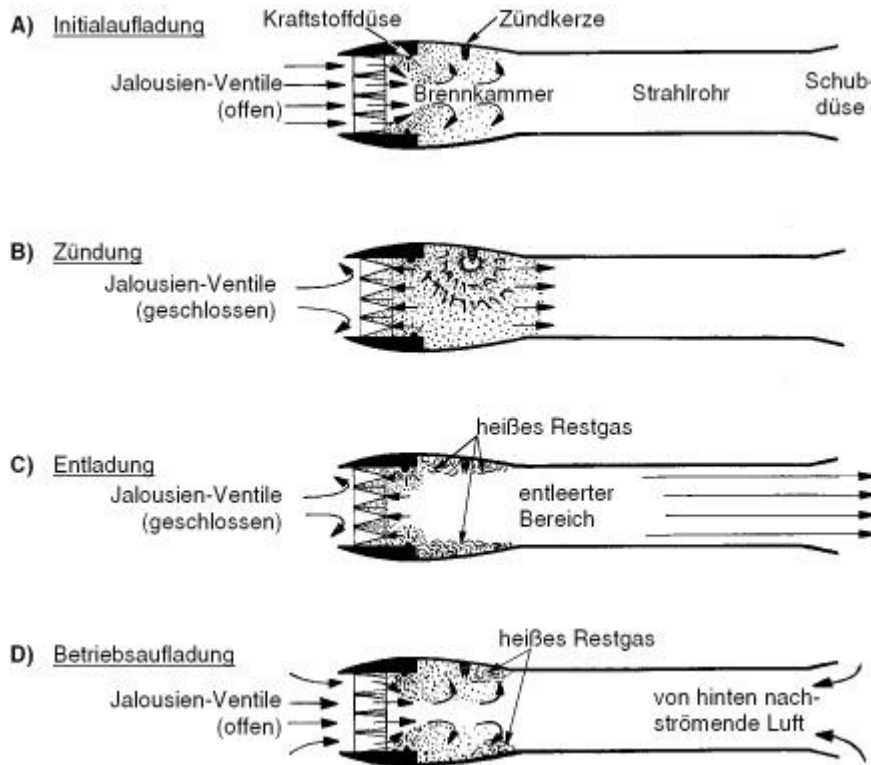


Bild: Wikipedia

Die Luft dringt zunächst durch das Flatterventil (initial wird dies mit Pressluft bewerkstelligt), oder eine Jalousie, in den Brennraum. Dabei wird es mit Kraftstoff angereichert. Durch den Druck der folgenden Explosion wird das Flatterventil geschlossen, und die Explosionsgase können nur nach hinten durch ein langes Rohr entweichen. Durch die kinetische Energie der austretenden Gase entsteht zum Schluss sogar ein Unterdruck.

Dadurch öffnet sich das Flatterventil wieder und

der nächste Zyklus beginnt. Dieses Triebwerk macht einen Höllenlärm, und der Wirkungsgrad ist unterirdisch. Es ist aber sehr einfach zu bauen, und als Luftheizung sehr brauchbar. Wenn man denn mit dem Lärm leben kann.

Das Düsentriebwerk

Frank Whittle und Hans von Ohain revolutionieren die Luftfahrt

Zwischen den Weltkriegen wurde unabhängig voneinander in Deutschland und England die Idee eines kontinuierlichen Verbrennungsmotors zu funktionierenden Prototypen entwickelt. Im Unterschied zu England, wurde aber im Deutschen Reich das Potential erkannt, und die Entwicklung mit Macht vorangetrieben.

Bei einem Düsentriebwerk werden die Schritte Kompression und Arbeit von Turbinen geleistet. Dabei sind die beiden Turbinen mit einer Antriebswelle, wie bei einem Turbolader, miteinander verbunden. Genauso wie bei einem Kolbenmotor wird so mit der

geleisteten Arbeit die Luft komprimiert. Nur braucht man beim Kolbenmotor eine Schwungmasse, um die Energie bis zum Zeitpunkt der Kompression im Motor zu bewahren. Da bei einer Gasturbine aber Arbeit und Kompression räumlich voneinander getrennt sind, können sie gleichzeitig ablaufen, und eine Schwungmasse ist nicht erforderlich.

Wieder war es das Ende des 19ten und der Anfang des 20sten Jahrhundert, in dem die Grundlagen gelegt wurden. Der Norweger Aegidius Elling legte mit der ersten selbstständig laufenden Gasturbine 1903 den ersten Grundstein. Zwischen den Weltkriegen entwickelten der Engländer Frank Whittle und der deutsche Hans von Ohain unabhängig voneinander die Idee eines rückstoßbasierenden Triebwerkes, welches kontinuierlich arbeiten sollte.

Frank Whittle bemühte sich bereits 1928 um Partner zur Entwicklung von Strahltriebwerken. Er traf im sehr konservativen und hierarchischen England, als Arbeiterkind, auf wenig Unterstützung. Aber er war von seiner Idee so überzeugt, dass er sie wie besessen selbst weiter nach vorne trieb. Er erarbeitete sich so einen Vorsprung, den er sehr lange halten sollte.

Hans von Ohain war ein ganz anderer Typus von Erfinder. Während Whittle ein dekorierte Airforce Pilot war, ein Tüftler, jemand, der praktische Lösungen finden konnte, war v. Ohain ein studierter Physiker. Er hatte große Schwierigkeiten, seine Ideen in etwas Greifbares zu verwandeln. Hans v. Ohain wandte sich an seinen Automechanikermeister Max Hahn. Dieser hatte alle handwerklichen Qualifikationen, die er brauchte, und die nötige Begeisterungsfähigkeit für das Projekt.

Hans von Ohain begann erst 1934 mit theoretischen Untersuchungen, fand aber 1936 in Ernst Heinkel einen begeisterten, wenn auch sehr ungedulden, Förderer. Heinkel richtete ihm in seiner Firma eigens eine Abteilung zur Entwicklung eines Düsentriebwerkes ein. Dort leitete er einen Stab von Ingenieuren, die ihn unterstützen sollten. Zu seinem Leidwesen war es aber für ihn, als Theoretiker und Physiker, sehr schwer, die Praktiker und Ingenieure zur Mitarbeit zu bewegen. Hätte er seinen Mechanikermeister Max Hahn nicht mit im Team gehabt, so wäre er vermutlich gescheitert.

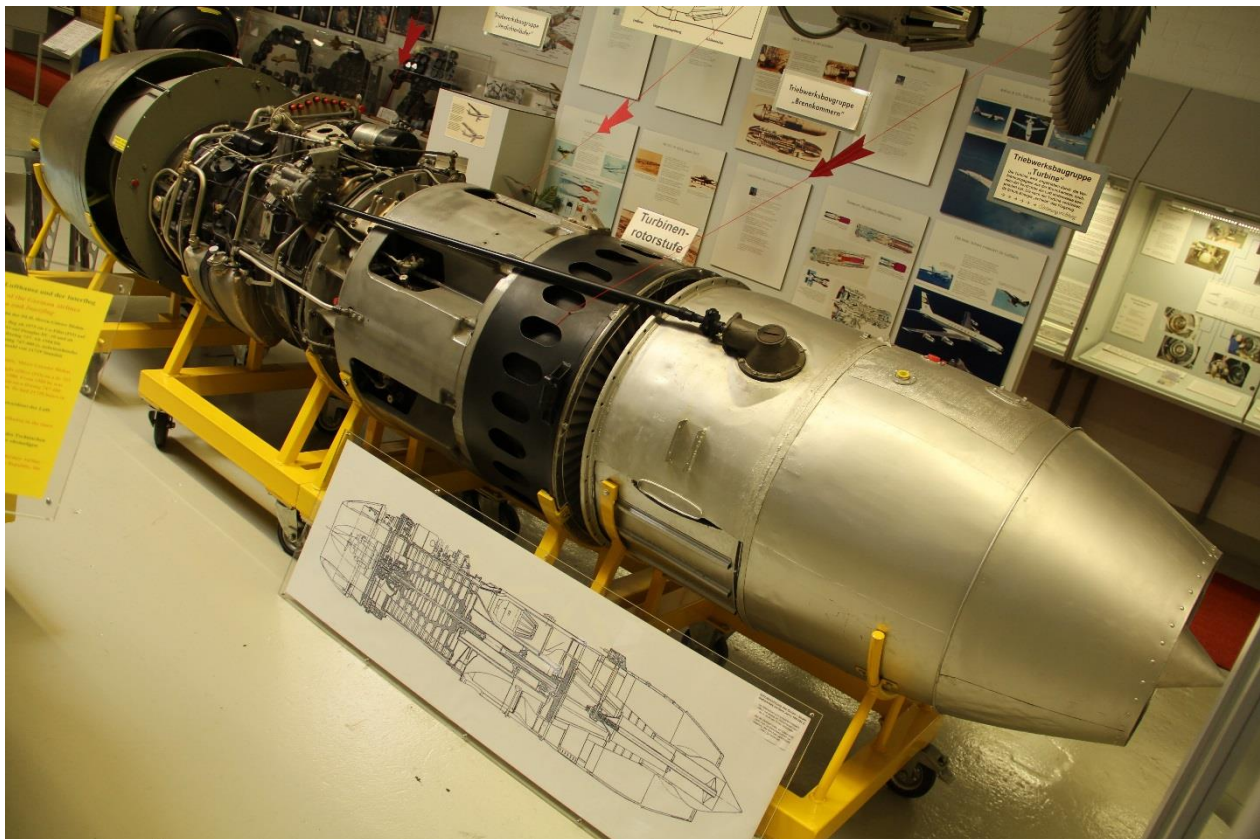
Der Umstand, dass Heinkel innerhalb von kürzester Zeit Ergebnisse forderte, veranlasste v. Ohain zunächst das Problem der Konstruktion des Brenners hinten an zu stellen. Er implementierte einen Wasserstoffbrenner. Dieser war zwar in einem Flugzeug unbrauchbar, aber es war möglich einen funktionierenden Prototyp zu bauen, und daran sehr viel Erfahrungen zu sammeln. Hans von Ohain sah später in diesem Umstand einen Grund für seine schnellen Erfolge.

Frank Whittle gewann erst 1935 eine Investmentfirma als Förderer. Er gründete die Firma Power Jets und begann seine Pläne umzusetzen. Zu diesem Zeitpunkt hatte er schon sehr viel Erfahrung gesammelt. Hans von Ohain stand ganz am Anfang.

Der erste Düsenflug fand am 27.8.1939 in Rostock statt. Die Heinkel He 178 war das erste Düsenflugzeug, und wurde speziell um diesen Antrieb herum gebaut. Wenige Tage später, am 1.9.1939, begann mit dem Überfall auf Polen der zweite Weltkrieg. Dadurch ist dieses Ereignis fast untergegangen. Nach nur 12 Testflügen wurden die Flugversuche eingestellt. Die Technik sollte für ein zweistrahliges Jagdflugzeug weiterentwickelt werden.

Frank Whittle gelang es am 15.5.1941 die Gloster E28/39 zum Erstflug zu bringen. Sie flog mit einer Flugzeit von über 20 Min. wesentlich länger als die He 178.

Man kann also sagen, dass England seinen Entwicklungsvorsprung bei Strahltriebwerken zwischen 1935 und 1939 verloren hat. Selbst nach dem Erstflug der Gloster E28/39 zeigte sich die RAF nicht sehr interessiert. Das waren aber die USA umso mehr. Sie waren sehr beeindruckt von dem neuen Konzept und brachten Whittle und die Gloster E28/39 in die USA. Dort gründete Whittle bei General Electric eine Abteilung zur Entwicklung von Düsenantrieben. Nun hatte Frank Whittle erstmals all die Mittel und Unterstützung zur Verfügung, die er brauchte. Nun war er von Leuten umgeben, die seine Vision teilten. Nach dem Erstflug der Bell P-59, welche aus dieser Zusammenarbeit entstand, kehrte er nach England zurück. Dort baute er bei Rolls-Royce die Triebwerksentwicklung auf. So hatte Frank Whittle entscheidenden Anteil am Aufbau der beiden größten Triebwerkshersteller der westlichen Welt.



Einziges erhaltenes Testtriebwerk vom Typ Jumo 004. Luftströmung von links nach rechts. Auf der davorstehenden Schemazeichnung lassen sich sehr schön die einzelnen Baugruppen erkennen. Hinter dem Einlass liegt der achttufige Axialverdichter. Dahinter liegen die Brennkammern (hellgrauer Ring) Danach folgt die einstufige Axialturbine (dunkler durchbrochener Ring) und die Düse mit Verstellkonus. Auf dem Triebwerk ist die Antriebswelle für den Konus gut zu erkennen, und auf der Schemazeichnung deren Funktion.

Luftfahrtmuseum Laatzen Bild: UF

Das sich die beiden Visionäre Frank Whittle und Hans von Ohain in einem verbissenen Wettstreit befanden, war für beide sehr lange völlig unbekannt. Nur Frank Whittle wusste schon vor dem Erstflug seiner Düsenmaschine, dass ihm ein Deutscher zuvorgekommen sein musste. Er wurde einmal gebeten bei der Auswertung von Luftbildern zu helfen, auf denen Spuren zu sehen waren, welche sich die RAF nicht erklären konnte. Er erkannte sofort, dass die geraden Linien verbranntes Gras sein mussten, welches von Düsenmaschinen auf den Flugplatz gezeichnet worden waren. Erst nach dem Krieg lernten sich die Beiden persönlich kennen. Es verband sie bis zu ihrem Tode eine tiefe Freundschaft.

Axial vs. Radialverdichter

So ähnlich das Funktionsprinzip ist, welches die beiden Entwickler nutzten, so



RD-45 Rolls Royce „Nene“ Triebwerk mit Radialverdichter. Gut zu erkennen sind die außen um das Triebwerk angeordneten Brennkammern die auf die Axialturbine führen. Luftfahrtmuseum Laatzen Bild: UF

unterschiedlich sehen die Lösungen aus. Während die ersten deutschen Serientriebwerke schon einen axialen Verdichter hatten, so hatten die englischen Triebwerke über lange Jahre radiale Verdichterstufen. Diese Triebwerke zeichneten sich durch ihre kurze gedrungene Bauweise aus. Auffällig waren auch die birnenförmigen Brennkammern,

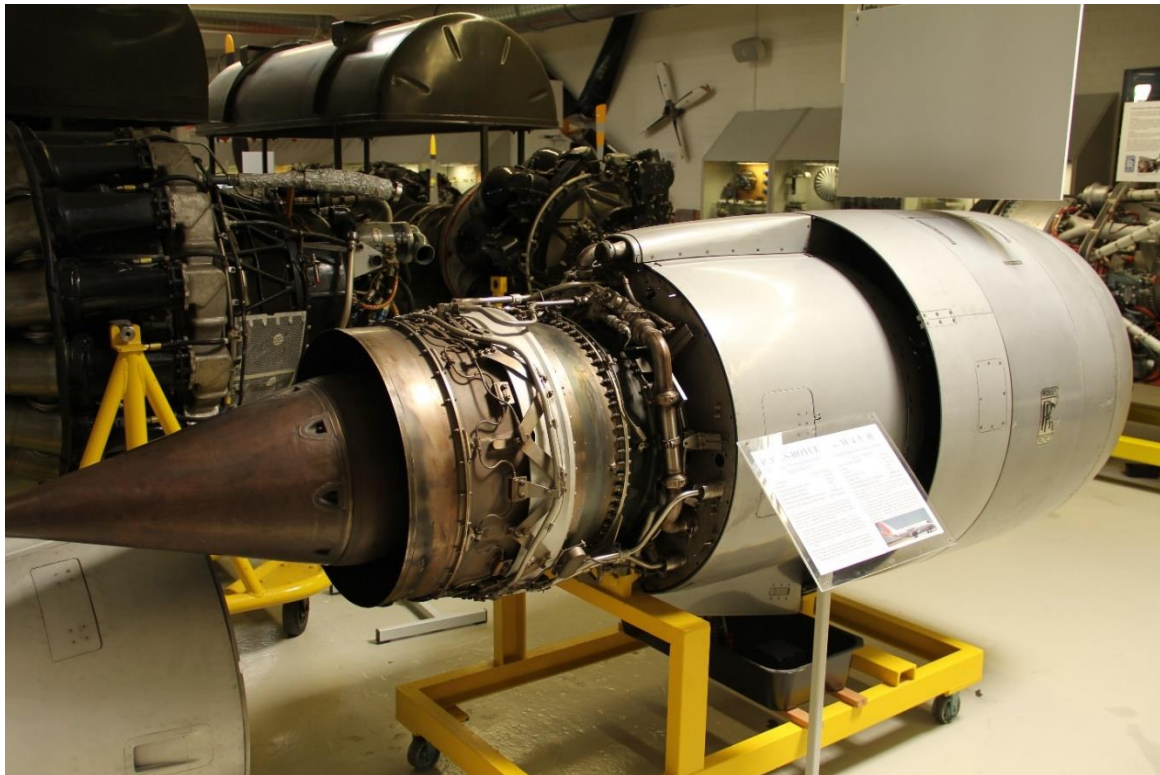
welche sich in einem Ring um das Triebwerk anordneten. Schließlich haben sich die axialen Verdichter und Turbinen Stufen durchgesetzt. Sie ermöglichen schlanke Designs, und lassen sich sehr einfach kaskadieren.

Letztendlich war die Erfindung des Düsenantriebes ein Quantensprung in der Fliegerei. Durch das Düsentriebwerk reduzierte sich die Zahl der bewegten Teile in einem Triebwerk von einigen tausend auf ein paar wenige. Die zivile Fliegerei entwickelte sich von dem Luxus einiger, die Ära der Super Constellation, zu einem Massenphänomen, die Ära der 707. In der militärischen Luftfahrt ist noch ein weiterer Faktor von Bedeutung: Ein schneller Luftstrahl als Antrieb lässt sich leicht umlenken. Auf diese Weise wurden VTOL und Vector Thrust möglich.

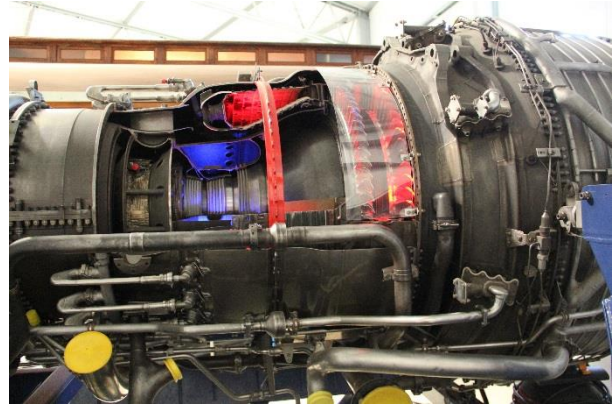
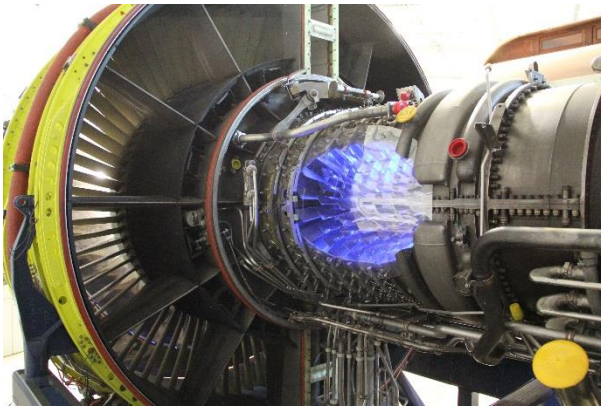
Die Evolution nach der Revolution

Der Grundgedanke bei der Entwicklung des Düsenantriebes war, Luft aufzuheizen, und die sich daraus ergebende Ausdehnung in Rückstoß zu verwandeln. Als man begann immer effektivere Düsentriebwerke zu bauen, wurden diese Triebwerke immer mehr im Sinne einer Wärmekraftmaschine verwendet. Eine Wärmekraftmaschine heizt ein Medium auf, dieses dehnt sich aus und der daraus entstehende Druck wird in Arbeit umgewandelt. Durch das Leisten dieser Arbeit kühlt sich das Medium wieder ab. Wenn es gelänge 100% in Arbeit umzuwandeln, dann wäre das Medium wieder auf der Ausgangstemperatur. Es ist leicht einsehbar, dass dies nicht zu erreichen ist. Dies sagt auch der zweite Hauptsatz der Thermodynamik allgemeinverbindlich aus. Der Wirkungsgrad steigt aber, wenn man das Δt über den Arbeitsschritt möglichst groß hält. Es ist also gut, wenn man möglichst hohe Temperaturen in der Brennkammer erreicht. Das kann man einerseits über eine optimierte Verbrennung erreichen, andererseits aber auch über die Verringerung der Luftmenge, die man aufheizen muss. So kann man ein Triebwerk bauen, welche die vom Brennstoff zur Verfügung gestellte Energie bestmöglich in Bewegung umsetzen. Aber im Gegensatz zu früheren Triebwerken ist hier nicht die Geschwindigkeit des Abgasstrahls das Ziel, sondern die Drehbewegung. Diese Drehbewegung kann nun vielfältig genutzt werden.

Fan bzw. Mantelstrom Triebwerke



Rolls Royce M45H Mantelstromtriebwerk Luftfahrtmuseum Laatzen Bild: UF



Oben: General Electric CF6-50 Fantriebwerk aus dem Airbus A300B2/B4, A310-200. Es ist gut zu sehen wie sich der Anteil des Nebenstromes vervielfacht hat.

Dauerleihgabe der MTU an das Luftfahrtmuseum Laatzen

Bild: UF

Fantriebwerke sind die Bauform, die in Verkehrsflugzeugen heute vorherrscht. Bei diesen Triebwerken wird ein Fan dem Triebwerk vorgeschaltet. Dieser Fan wird vom Triebwerk angetrieben, und beschleunigt große Mengen kalter Luft. Diese ist es fast ausschließlich, die für den Schub sorgt. Die Abgase aus dem Triebwerksteil sind energetisch aufgebraucht.

Nun wird die energetische Umsetzung an einer Turbinenschaufel nicht unerheblich von der Geschwindigkeit der anströmenden Luft bestimmt. Dabei gilt: Die Effektivität steigt mit der Geschwindigkeit. Eine natürliche Grenze ist dabei die Schallgeschwindigkeit. Ab Mach 1 wird die Aerodynamik kompliziert. Die Geschwindigkeit, mit der die Luft die Turbinenschaufeln umströmt, ist dabei von der Länge der Blades und der Drehzahl abhängig. Bei modernen Triebwerken liegen die Geschwindigkeiten der Fanblades im äußeren Bereich bereits jenseits der Schallgrenze. Man kann einen Fan, je nach Größe, nur mit 3000 bis 5000 rpm sinnvoll betreiben. Die Niederdruckturbine hat aber, auf Grund des viel geringeren Durchmessers, eine ideale Drehzahl von ca. 9000 - 15000 rpm. Da der Niederdruckverdichter und der Fan fest mit der Niederdruckturbine gekoppelt sind, müssen strömungstechnische Kompromisse gemacht werden. Da die Tendenz zu immer größeren Fans geht, ist es irgendwann logisch die Drehzahl des Fans gegenüber der Niederdruckstufe der Turbine herabzusetzen. Damit ist das Getriebefan-Triebwerk erfunden. Dank der Aufhebung der direkten Ankopplung an die Turbine sind inzwischen Fandurchmesser von über 3m möglich.

Turboprop Triebwerke

Bei diesen Triebwerken wird die Energie eines Turbinenmotors zum Antrieb eines Propellers genutzt. Da Propeller wesentlich langsamer drehen als eine Turbine, ist eine erhebliche Untersetzung nötig. Man spricht dann von einem Turboprop Triebwerk, wenn der Abgasstrahl keinen Anteil am Schub hat.

Durch den Siegeszug des Düsentriebwerkes hatte der Turboprop Antrieb immer schon einen schweren Stand in der zivilen Luftfahrt. Der Propeller wurde als veraltet und unsicher verkannt, auch wenn der Antrieb eine moderne Turbine war und kein alter Kolbenmotor. Dabei hat der Turboprop einige Vorteile gegenüber dem Jet. Die Effizienz ist besser, und es lassen sich einfach recht große Steig und Sinkwinkel verwirklichen. Moderne Turboprops erreichen Geschwindigkeiten von 500 km/h bis 700 km/h. Jets liegen mit über 800 km/h deutlich darüber. Turboprops sind also im Regionalverkehr der ideale Antrieb. Sie erreichen ihre Reiseflughöhe sehr schnell, und bewegen sich dort mit großer Effizienz. Der Geschwindigkeitsnachteil wirkt sich auf kurzen Strecken kaum aus. Trotzdem konnten sie sich in den industrialisierten Ländern der ersten Welt nicht durchsetzen. Der Passagier lehnte sie einfach ab. So sind Maschinen wie die Dornier DO228, aus den frühen 1980ern, vor allem in Gebieten im Einsatz, wo diese Vorurteile nicht so sehr gepflegt werden. Mit ihrer Kurzstartfähigkeit ist sie auch sehr gut für kleine behelfsmäßige Regionalflughäfen geeignet.

Seit dem Anfang dieses Jahrtausends gibt es aber wieder Firmen wie ATR, die einen neuen Anlauf unternehmen, den Turboprop im Passagierverkehr zu etablieren. Die ATR 42-600 und die ATR 72-600 sind Beispiele dafür.

Propfan Triebwerke

Inzwischen gibt es auch Mischformen zwischen Turboprop und Fan sog. Propfan Triebwerke. Bei diesen Triebwerken werden schnell drehende vielflügelige Propeller für den Antrieb genutzt. Der A400M verwendet solche Triebwerke. Es gibt diese Triebwerke auch mit koaxial angeordneten, gegenläufigen Propellern, wie in der AN-70. Selbstverständlich laufen auch diese nicht mit voller Turbinendrehzahl.

Turbinenmotoren liefern die Energie für eine Vielzahl von Maschinen. Die Spanne reicht vom Hubschrauber bis zum Kampfpanzer.

Der Leistungssprung durch die Düsentriebwerke brachte die Flugzeuge bis an die Schallmauer. Diese zu durchbrechen war aber ein Problem. Um noch schneller zu werden, waren noch stärkere Antriebe nötig. Außerdem ändern sich die Gesetzmäßigkeiten der Aerodynamik bei Erreichen dieser Grenze dramatisch. Es ist also kein Wunder, dass die Schallmauer zuerst mit Hilfe eines anderen, aber nicht neuerem, Antrieb überwunden wurde. Damit kommen wir zum Raketenantrieb.

Raketenmotoren

Der Raketenantrieb ist die Antriebsform, welche lange vor der Zeit der Luftfahrt erfunden wurde. Die Wirkungsweise ist wie beim Düsentriebwerk das Newtonsche „Actio = Reactio“, das Rückstoßprinzip. Die Erzeugung des erforderlichen Gasstrahles ist aber ein völlig anderes. Während es sich beim Düsentriebwerk um eine Wärmekraftmaschine

handelt, bei der man versucht den Wirkungsgrad hoch zu halten, und aus der umgewandelten Energie Vortrieb zu gewinnen, ist das Funktionsprinzip der Rakete viel einfacher. Eine Rakete bringt alles, was sie zum Betrieb braucht, selbst mit. In einem Brennraum kommt es zu einer exothermen Reaktion. Dabei entstehen möglichst viele, möglichst heiße Gase, welche den Reaktionsraum nur in einer Richtung verlassen können. Fertig! Dieses Funktionsprinzip war schon im China Marco Polos bekannt.

Auf Grund der Einfachheit des Antriebes haben Luftfahrtpioniere schon sehr früh einfache Segelflugzeuge mit Feststoffraketen auszustatten versucht. Dies ist vor allem in der Weimarer Republik geschehen, da der Versailler Vertrag der Luftfahrt enge Grenzen setzte. Dadurch sind alternative Konzepte vorangetrieben worden. Raketenantriebe und der Segelflug sind dafür Beispiele. Fritz Stamer mit der Lippisch Ente, sowie Julius Hatry und Fritz von Opel mit der RAK 1 waren Pioniere des raketengetriebenen Fliegens.

Das erste vollwertige Raketenflugzeug, welches eigenständig starten und landen konnte, war die He 176, welche am 20.6.1939 ihren Erstflug absolvierte. Das einzige Raketen-

flugzeug, welches bis heute nennenswert im Gefecht geflogen wurde, war die Me 163.

*Im Vordergrund der Raketenjäger Me 163, darüber im Hintergrund die Flugbombe V1 und unten der erste Düsenjäger Me262
Deutsches Museum München Bild: UF*



Der Abfangjäger Me 163 war mit einem in vier Stufen einstellbaren,

flüssigkeitsbetriebenen Raketentriebwerk ausgestattet. Der Treibstoff bestand aus zwei Komponenten, welche sich bei Kontakt selbst entzündeten. Auf diese Weise konnte man zwar eine sehr einfache Konstruktion erreichen, aber bezahlte dies mit großen Gefahren für die Besatzung und das Bodenpersonal bei der Handhabung des Treibstoffes und der Betankung. Nach dem Start, welcher auf jedem Behelfsflugplatz stattfinden konnte, wurde das zweirädrige Fahrwerk abgeworfen. Dann stieg die „Komet“ senkrecht in den Himmel auf ihre Ziele zu. Von einer Me 163 angegriffen zu werden, muss ungefähr so gewesen sein wie die Konfrontation in „The Final Countdown“ zwischen den Zeros und den F-14 Jets. Der Geschwindigkeitsunterschied zu den Bombern war ungefähr ein Faktor 2.

Der Raketenantrieb in einem Kurzstrecken Abfangjäger war nicht die einzige Innovation, die die Me 163 auszeichnete. Sie nahm die Flügelpfeilung von supersonic Maschinen vorweg, und war, wie die Horten, ein Nurflügel Design ohne Höhenleitwerk.

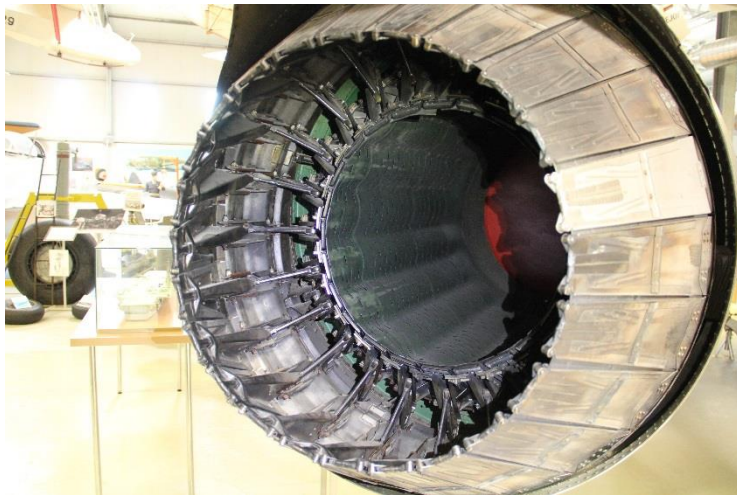
Gelandet wurde die Me 163 im Gleitflug auf einer gefederten Kufe.

Es oblag aber der X-1 mit Charls Yeager am 14.10.1947, den ersten gewollten, und dokumentierten Überschall- Horizontalflug durchzuführen. Seither ist es immer wieder der Raketenantrieb, mit dem Geschwindigkeitsrekorde aufgestellt und gehalten werden.

Das Plus an Kraft...

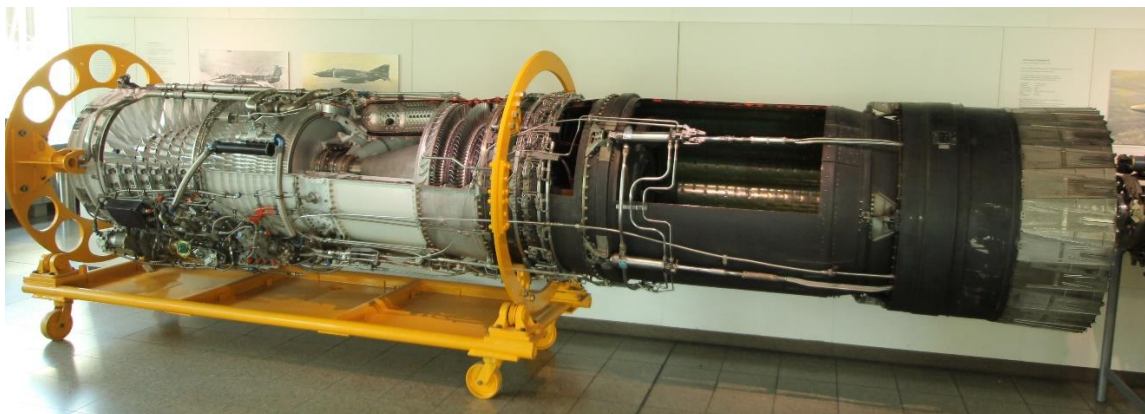
Raketen haben aber einen entscheidenden Nachteil: Sie müssen alles was sie zum Betrieb brauchen mitführen. Das beschränkt ihre Betriebsdauer, und damit die mögliche Reichweite erheblich. Wenn man ein wirtschaftlich arbeitendes Triebwerk will, dann ist man auf das Düsentriebwerk angewiesen. Was aber tun, wenn die sich ergebenden Geschwindigkeiten nicht ausreichen?

Die Lösung ist ganz einfach: Man gebe mehr Energie hinzu, und zwar nachträglich. Dazu spritzt man in den heißen Abgasstrahl noch einmal Kraftstoff ein und bringt ihn zur Zündung. Dieser Nachbrenner heizt die Luft noch einmal stark auf, und diese Energie dient einzig dem Rückstoß. Es gibt keine weiteren Turbinenschaufeln, die noch einmal



Energie entnehmen. Mit solchen Triebwerken war es möglich, die Schallmauer auch mit Düsenflugzeugen zu durchbrechen. Erst in jüngster Zeit geht dies auch ohne Nachbrenner (Supercruise)

*Blick in den Nachbrenner eines F-104 Starfighter. Gut zu sehen der doppelt verstellbare Düsenauslass
Luftfahrtmuseum Laatzen
Bild: UF*



Triebwerk eines F-104 Starfighter Deutsches Museum München Bild: UF

Geschwindigkeiten jenseits der Schallgeschwindigkeit bringen aber am anderen Ende des Triebwerkes auch Probleme mit sich. Der Triebwerkeinlass prallt gegen eine Wand

von Luft, welche bei dieser Geschwindigkeit nicht mehr ausweichen kann. Dadurch gerät das Triebwerk in nicht kontrollierte Betriebszustände. Eventuell wird die Strömungsgeschwindigkeit in der Brennkammer so hoch, dass die Flamme abreißt. Man muss also die Luftmenge ggf. begrenzen, und die Strömungsgeschwindigkeit am Einlass herabsetzen. Wenn man sich nun einmal den Einlassbereich eines Unterschall Verkehrsflugzeug-Triebwerkes ansieht, und mit dem eines Überschalljets vergleicht, so finden sich deutliche Unterschiede. Das Unterschalltriebwerk ist weit geöffnet. All die Luft, die von vorne anströmt, soll eingeatmet und verarbeitet werden.

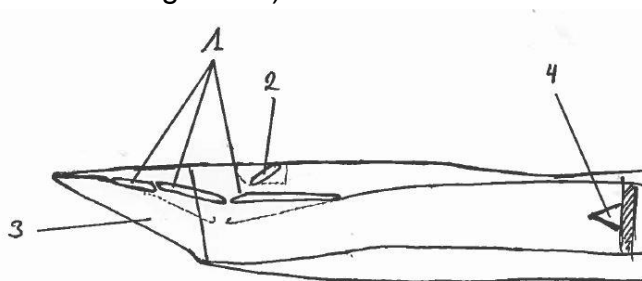


*Triebwerkseinlass mit Diffusor Mig 21
Außenstelle Deutsches Museum
Oberschleißheim Bild: UF*

Überschalltriebwerke sind nicht ganz so offenherzig. Sie haben oft einen spitzen Konus im Einlass (Mig-21, Starfighter, SR-71). Oder der Einlass ist kastenförmig gebaut (F-14, F-15, Tornado, Mig-31, Concorde) Diese Verbauungen, sogenannte Diffusoren,

haben genau den Sinn, die anströmende Luft im Überschallbereich zu verlangsamen und die Luftmenge zu reduzieren. Im Falle der SR-71 kommt noch hinzu, dass der Konus zu einer Vorverdichtung der Luft führt. Bei Geschwindigkeiten von Mach 3 und darüber hinaus, lassen sich schon Effekte der Staustahltechnik nutzen (Siehe unten).

Oftmals sind diese Vorrichtungen auch verstellbar. Der Konus wird dazu nach vorne und hinten verschoben. Auf diese Weise ändert sich der Punkt des Anpralls der Luft und der Querschnitt des Einlasses. (Ein Axial verschiebbarer Konus war schon beim Jumo 004 als aerodynamische Verstellvorrichtung eingebaut. Dort wurde aber der Rückstau im Auslass eingestellt.)



- 1) Verstellbare Diffusor Rampen
- 2) Bypass Klappe
- 3) Einlass
- 4) Triebwerk

In moderneren Jets sind diese Einlässe kastenförmig ausgeführt. Der Grund dafür liegt in einer einfacheren und besseren Verstellbarkeit des Triebwerkseinlasses. Innerhalb von solchen Einlässen lassen sich hydraulisch betätigte Rampen einfügen, welche die Luftgeschwindigkeit variabel herabsetzen.

So gelingt es, im Inneren des Flugzeuges ein Unterschall Biotop für das Triebwerk zu schaffen, in dem es zuverlässig arbeiten kann.

Exoten

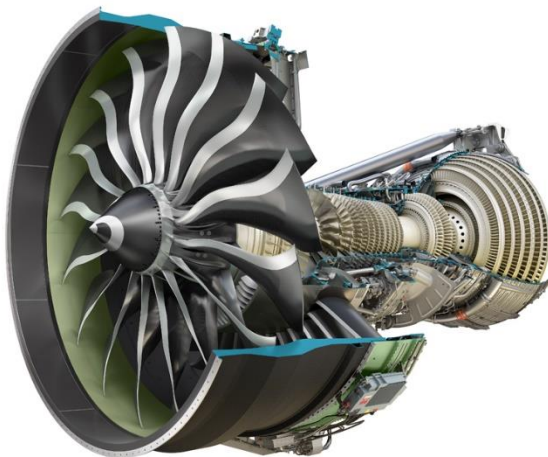
Moderne Werkstoffe, und ein gutes Verständnis der aerodynamischen Gesetzmäßigkeiten haben es möglich gemacht, dass Energiequellen von sehr geringer Energiedichte auch zum Fliegen genutzt werden konnten. So flog die Solar Impulse 2 am 9.3.2015 von Abu Dhabi los, und landete 505 Tage später wieder dort. Angetrieben wurde sie von 17000 Solarzellen, deren Energie in Batterien gepuffert wurde. Eventuell wird es einmal solargetriebene Höhenflugzeuge geben, welche autonom kreisen und dort Aufgaben der Erkundung und Telekommunikation übernehmen können.

Auch das HPA (Human Powered Aircraft) ist mehr eine Technologie-Demonstration denn ein verwertbares Flugzeug. 1962 flog die Hatfield Puffin das erste Mal 900 m in zwei min. Es folgten weitere Projekte wie z.B. Light Eagle und Daedalus. Später folgten sogar Hubschrauber und Quadrocopter. Der Charme an der Sache ist, dass sich hier der Kreis schließt zu den Zeichnungen von fliegenden Menschen aus der Renaissance: Es ist doch möglich, dass der Mensch aus eigener Kraft fliegt.

Die Zukunft

Die Zukunft im Unterschall Verkehrsflug gehört sicher der weiteren Optimierung des Fantriebwerkes. Dazu ist es notwendig, den Anteil des Fan Nebenstromes weiter zu erhöhen, und den Wirkungsgrad der Turbine zu steigern. Dazu müssen die Grenzen der verwendeten Materialien weiter ausgedehnt werden. Der Fandurchmesser wird weiter steigen. Dies wird den Einsatz von Getrieben zur Verlangsamung selbstverständlich machen. Ferner werden die Brennkammern höhere Temperaturen liefern, und die Turbinenschaufeln somit noch härteren Bedingungen widerstehen müssen.

GE9X das größte Triebwerk der Welt



Das GE9X von General Electric Aviation ist ein Triebwerk der neuesten Generation, und stellt mit einem Fandurchmesser von 340 cm einen neuen Rekord auf. Das Triebwerk befindet sich zurzeit in der Erprobungs- und Zulassungsphase. Man rechnet mit einer Zulassung im Jahre 2019. Es wird dann das größte Triebwerk der Welt sein.

Das GE9X ist eine Weiterentwicklung des GE90. Es hat einen etwas größeren Fan Durchmesser. Dieser hat nur 16 Blades. Das GE90 hatte derer noch 22. Dadurch wird das Triebwerk leichter, und die mögliche max. Drehzahl des Fans wird gesteigert. Die Fanblades bestehen aus Kohlefaser Verbundwerkstoff mit Vorderkanten aus Metall. Das GE90 hatte noch einen Vorverdichter mit 9 oder 10 Stufen. Das GE9X hat einen 11 stufigen Niederdruckverdichter mit optimiertem Design. Auf diese Weise erreicht der Kompressor eine Gesamtverdichtung von 72:1. Die Brennkammern wurden unter Verwendung von CMP (Ceramic Matrix Composites) gefertigt. Dadurch ließ sich die Temperatur in den Brennkammern steigern, und der Aufwand zur Kühlung verringern. CMC ist noch nicht bei der Turbine in Verwendung. Dies ist erst bei der nächsten Generation für die ersten Stufen der Turbine geplant. Schon jetzt erreicht das GE9X eine Energieeffizienz, die um 10% besser ist als die der Vorgänger.

https://www.youtube.com/watch?v=XEiWwRyq_9E&t=3s



Das ist kein Photoshop Trick. Auf dem Bild ist ein Erprobungsflugzeug von General Electric Aviation zu sehen, welches zu einem Testflug mit 3 gewöhnlichen Triebwerken und einem GE9X. Der Größenunterschied zu den Triebwerken der Boeing 747 ist deutlich zu sehen.

Für den Hoch- und Höchstgeschwindigkeitsbereich kommen Staustrahltriebwerke in Betracht: RAMJET und SCRAMJET. Staustrahltriebwerke sind ähnlich kompliziert aufgebaut wie Verpuffungstriebwerke. Sie bestehen aus nicht viel mehr als einem, mit speziell geformten Profil gefertigten, Rohr und einem Brenner.

Im Unterschied zum Verpuffungsstrahltriebwerk, welches oft auch fälschlicherweise als Staustrahltriebwerk bezeichnet wird, funktionieren diese Triebwerke erst bei hohen Überschall-Geschwindigkeiten. Der Einlassbereich ist so geformt, dass die Luft stark



Modell des Projekts „Sänger“, welches Nutzlasten mit Hilfe von SCRAMJET Triebwerken bis an den Rand der Atmosphäre bringen sollte

Deutsches Museum München

Bild: UF

verlangsamt wird und sich verdichtet. Diese komprimierte und verlangsamte Luft strömt nun in die Brennkammer und wird dort erhitzt. Danach entweicht die heiße schnelle Luft

nach hinten aus der Düse. RAMJET und SCRAMJET unterscheiden sich dadurch, dass die Luft bei ersterem in der Brennkammer auf Unterschallgeschwindigkeit herabgebremst ist, während beim SCRAMJET die Luft am Brenner noch Überschall hat.

Warum funktioniert das aber nur bei hoher Überschallgeschwindigkeit?

Wenn sich ein Gegenstand durch die Luft bewegt, so erhöht sich der Luftdruck an seiner Stirnseite. Diese Zone erhöhten Druckes eilt nun voraus und verdrängt die weitere anströmende Luft. Erreicht der Gegenstand nun aber Schallgeschwindigkeit, so ist diese Zone erhöhten Druckes auf null zusammengepresst. Es findet also kein vorauseilendes Ausweichen der Luft mehr statt. Ein Flugzeug schneidet sich buchstäblich durch die Luft. Deshalb haben Überschallmaschinen so spitze Anprallkanten. Diesen Effekt, des „nicht ausweichen können“, machen sich Staustrahltriebwerke zu nutze. Luft, die sich im Querschnitt des Einlasses befindet, wird fast unweigerlich in den Verdichter eintreten.

Eine weitere Schwierigkeit ist, die Brennkammer und die Düse so zu formen, dass die Flamme nicht abreißt (Im Idealfall entzündet sich der Kraftstoff an der heißen komprimierten Luft selbst), und der Druck der heißen Gase nach hinten entweicht und nicht durch den Einlass. Aber auch hier hilft eine hohe Überschallgeschwindigkeit. Man kann sagen, dass ein sinnvoller Betrieb ab Mach 2 möglich ist.

SCRAMJET ist quasi die logische Fortführung. Dabei bewegt sich das Triebwerk so schnell, dass die Luft in der Brennkammer noch immer mit Überschallgeschwindigkeit einströmt. Das erfordert Initialgeschwindigkeiten von ca. Mach 5. Man erhofft sich von SCRAMJET Triebwerken Geschwindigkeiten von bis zu Mach 15. Bis zu solchen

Geschwindigkeiten sind aber noch viele Probleme zu lösen. Speziell was die Temperaturbeständigkeit der Materialien, und/oder der Kühlung angeht. Denn da es ab Mach 1 keine Druckglocke mehr gibt, welche die Luft ausweichen lässt, ist die Luftreibung enorm.

Treibstoffe der Zukunft

In der Vergangenheit bis in die Gegenwart hinein beherrschten fossile Brennstoffe den Flugbetrieb. Sie haben den Vorteil von hoher Verfügbarkeit, günstigen Preisen und einfacher Handhabung.

Damit sich alternative Kraftstoffe durchsetzen, müssen sich entweder Rahmenbedingungen ergeben, welche dies vorteilhaft erscheinen lassen, oder sich technische Zwänge ergeben. Nur weil es hipp ist, wird niemand versuchen ein Verkehrsflugzeug zu bauen, welches mit Elektroantrieb fliegt. Trotzdem ist es nicht ausgeschlossen, dass der Elektroantrieb auch in der Luftfahrt eine gewisse Bedeutung gewinnt. Dies würde aber neue Flugzeugklassen erfordern. Das können unbemannte Drohnen im Materialtransport sein, oder auch autonome Lufttaxis im Kurzstreckenbetrieb. Immer wieder wird auch der Wasserstoff als Energiequelle genannt. Es hat aber schon seine Gründe, warum davon bisher in Serie noch nichts zu sehen ist. Wasserstoff zu handhaben ist sehr aufwändig und gefährlich. Entweder muss Wasserstoff unter extrem niedrigen Temperaturen, oder unter extremem Druck gelagert werden. Nun muss aber ein Tank auch drucktechnisch so abgesichert sein, dass es nicht gleich zur Katastrophe kommt, wenn sich der Inhalt auf $>-253^{\circ}\text{C}$ erwärmt. Hinzu kommen Tankanlagen, die sicher handhabbar diesen Bedingungen dauerhaft standhalten. Letztendlich ist das Wasserstoffmolekül auch so klein, dass es beständig durch die Wandung diffundiert. Es ist also nicht so einfach.

Trotzdem ist der Wasserstoff als Flugzeugtreibstoff denkbar. Er hat Eigenschaften, die ihn gegenüber anderen Treibstoffen auszeichnen. Die extreme Kälte, unter der er gelagert werden muss, lässt sich zur Kühlung von Baugruppen heranziehen. Und der Umstand, dass Wasserstoffgas nicht erst im Brennraum verdampft werden muss, lässt ihn geeignet erscheinen für Triebwerke mit extrem kurzer Verweildauer im Brennraum. Für SCRAMJET Antriebe erscheint Wasserstoff als einer der möglichen Kraftstoffe.

Eine weitere denkbare Möglichkeit sind synthetische Kraftstoffe, welche die fossilen Kraftstoffe nachbilden. Ich bin aber gespannt, ob es jemals großtechnische Verfahren geben wird die aus CO_2 , Wasser und elektrischer Energie Methan herstellen können.

Dies war ein kurzer Abriss über die Geschichte und die Funktionsweise der Flugzeugmotoren. Es ist gelungen innerhalb von einem Lebensalter Flugzeugantriebe so weiterzuentwickeln, dass sie nicht nur ein paar Hüpfer möglich machten, sondern Menschen bis an den Rand der Atmosphäre brachten. 1903 Flog der Wright Flyer 1957 wurde die U-2 in Dienst gestellt, welche in 20000 m Höhe operieren sollte. Nirgends findet man heutzutage nicht nukleare Maschinen, welche so viel Energie umsetzen wie Flugzeugmotoren, und dabei noch so klein und leicht sind.

Zeitleiste

1903	Wright Flyer, 4 Zylinder Reihenmotor, 3,3 l Hubraum, 81,6 kg, 12 bis 16 PS
1911	Peugeot 7 Cylinder Rotationsmotor 51 kW
1927	Wright R-790 Whirlwind (Spirit of St. Lewis), 9 Zylinder Sternmotor, 12,91 l Hubraum, 236 Kg, 164 kW
1931	Wright R-1820 (B17), 9 Cylinder Sternmotor, 29,9 l Hubraum, 605 kg, 992 kW
1933	BMW 132 (Ju-52), 9 Zylinder Sternmotor, 27,7 l Hubraum, 430-525 kg, 404-526 kW
1936	Jumo 210D (BF109) 12 Zylinder V Motor hängend, 19,4 l Hubraum, 440 kg, 500 kW
1941	Merlin 61 (P51), 12 Zylinder V Motor, 27 l Hubraum, 745 kg, 1170 kW
1944	Pratt & Whitney R-4360 (Boeing C-97), 28 Zylinder 4fach Sternmotor, 71,5 l Hubraum, 1580 bis 1750 kg, 2200 bis 2834 kW
1942	Jumo004 (Me-262) Düsentriebwerk mit 8fach Verdichter und einfach Turbine, 757 kg, 8,7 kN Schub
1945	Rolls-Royce RB.41 „Nene“ (Mig15), Verdichter einstufig radial, Kompressor einstufig Axial, 9 Brennkammern, 725 kg, 22,2 kN Schub
1958	Pratt & Whitney JT3D (Boeing 707), Fantriebwerk, Nebenstromverhältniss 1,37, 80kN Schub
1963	Pratt & Whitney J58, Triebwerk der SR-71, 2835 kg, 151,3 kN mit Nachbrenner, >Mach3
1972	F100-PW-100 (F15), Fantriebwerk in 3 Stufen, Nebenstromverhältniss 0,7, 1482 kg, 100,5 kN Schub mit Nachbrenner
1992	Iwtschenko Progress D-27, Propfan 1650 kg, 10440 kW Propellerdrehzahl 1000 rpm
2008	EJ200 Mk 101, Eurofighter Triebwerk, 1000 kg, 60 kN ohne 90 kN mit Nachbrenner
2016	GE9X, erster Testlauf, Fandurchmesser 3,4 m, 470 kN

Def.: Geschwindigkeiten sind immer auf das Triebwerk referenziert. Das heißt, dass das Triebwerk mit der Geschwindigkeit 0 angenommen wird und sich die Luft bezogen auf das Triebwerk bezogen bewegt.

