

Der Axialverdichter im Flugtriebwerk – gestern, heute und morgen

Uwe L. H. Schmidt-Eisenlohr

Oliver E. Kosing, Atena Engineering

Einleitung

Um das Jahr 1900 war die Dampfturbine im Maschinenbau etabliert. Auch war theoretisch klar, wie die Gasturbine funktionieren müsste, was Patente aus den frühen Jahren des 20. Jahrhunderts belegen (z.B. Guillaume 1921). aber dafür fehlten

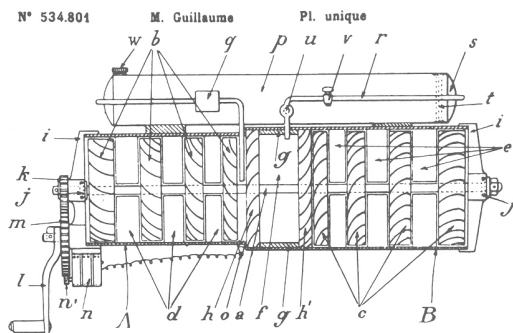


Abb.1: Patentzeichnung von Guillaume

Kühlungskonzepte für die Turbine und auch die Beherrschung des Verdichters - insbesondere des Axialverdichters.

Erste Realisierungskonzepte

Eine der ersten fundierten theoretischen Abhandlungen, wie ein Flugantrieb mit Turbokomponenten aussehen müsste, verfasste A. A. Griffith 1926 am Royal Aircraft Establishment (RAE) in England mit dem Titel „An Aerodynamic Theory of Turbine Design“ und empfahl Profile im Windkanal zu vermessen, um die erforderlichen Wirkungsgrade von ca. 90% in den Turbokomponenten zu erreichen [1]. 1929 präzisierte er seine Vorstellung einer Gasturbine mit dem Entwurf der Contra Flow Engine, einer 14-stufigen Gasturbine – in Wahrheit ein Gaserzeuger – die aus einem gegenläufigen Axialverdichter bestand, an deren Ende eine Brennkammer mit Richtungsumkehr folgte und eine Axialturbine mit entgegengesetzter Durchströmrichtung beaufschlagte, die außen auf den Axialverdichterstufen angeordnet war. Griffith wollte mit der Gasturbine einen Propeller antreiben, also

kein Strahltriebwerk bauen wie zur selben Zeit Frank Whittle. Das Besondere an dieser Maschine war, dass alle Stufen frei, d.h. unabhängig von einander drehten. Diese Architektur hat A. A. Griffith vorgeschlagen, weil ihm theoretisch klar war, dass der starr gekoppelte Axialverdichter bei Teildrehzahl in ein Abstimmungsproblem hineinlaufen muss. Welch eine geniale Weitsicht, wenn man bedenkt, dass bis heute dieses Abstimmungsproblem die Ingenieure vor Herausforderungen stellt, und diese Einsicht zu einem Zeitpunkt formuliert wurde, bevor es einen lauffähigen vielstufigen Axialverdichter gab !

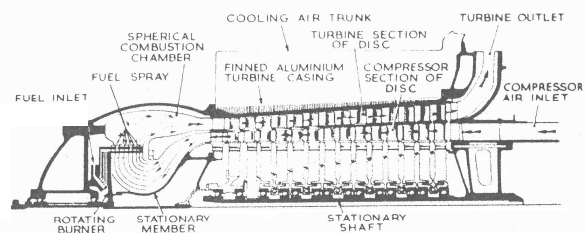


Abb.2: Contra-Flow-Engine von Griffith

1930 befürwortete das Aeronautical Research Committee (ARC) diesen Vorschlag von Griffith, schlug aber vor, zunächst ein contra flow test rig zu bauen, weil ihm das Risiko für die Entwicklung eines Flugantriebs auf dieser Basis sehr hoch erschien. Griffith war von der Beschlusslage enttäuscht, weil er eine stärkere Betonung der Machbarkeit der Turbomaschine erwartet hatte. So wurde am RAE für viele Jahre die Entwicklung des Axialverdichters zurückgestellt und deshalb kam das Flugtriebwerk mit Radialverdichter nach dem Patent von Whittle (1930) in England als erstes 1941 zum Fliegen. 1938 wechselte Griffith zu Rolls Royce, wo er die Contra Flow Engine bauen durfte. Es ist nicht verwunderlich, dass der Wirkungsgrad dieser Maschine nicht den Erwartungen entsprach, denn die Abdichtung der heißen Gase aus der Turbine gegen den Gasstrom

im Verdichter dürfte ein sehr schwieriges Problem darstellen, und auch die radiale Wärmeleitung durch die Stufen ist dem Wirkungsgrad abträglich. Aber von Pumpengrenzproblemen wird nirgends berichtet in Zusammenhang mit der Contra Flow Engine. Für den Autor bleibt die Contra Flow Engine eine bemerkenswerter Vorschlag aus zwei Gründen:

1. bei den geringen Umfangsgeschwindigkeiten, die realisierbar erschienen, ist das ein Konzept hoher Leistungskonzentration
2. die ungekoppelten Schaufelreihen stellen eine optimale Stufenabstimmung auch bei Teildrehzahl sicher.

Im Übrigen wurde der Vorschlag, Gittermessungen durchzuführen, am RAE weiterverfolgt aber in wirklich großem Umfang mehr als ein Jahrzehnt später bei der NACA in den USA umgesetzt.

Ein weiterer Schwerpunkt der Axialverdichter-Entwicklung für die Gasturbine lag in der Schweiz mit BBC als industriellem Treiber [2]. BBC baute schon 1926 einen 4-stufigen Axialverdichter, bei dem unverwundene und verwundene Schaufeln erprobt und Beschauungen mit 50 und 100% Reaktion vermessen wurden. 1931 wurde ein 8-stufiger Axialverdichter, sehr genau vermessen, um die Rechenverfahren für die aerodynamische Auslegung der Verdichter zu kalibrieren. In den 1930er Jahren wurden mehrere – meist 11stufige - Axialverdichter von BBC an Kunden verschiedener Länder ausgeliefert, 1939 baute BBC die erste Gasturbine, die wirklich Leistung abgab, Abb.3, 4 und 5. Diese Gasturbine war natürlich viel zu schwer, um als Flugmotor geeignet zu sein, aber das war für BBC nicht wichtig.

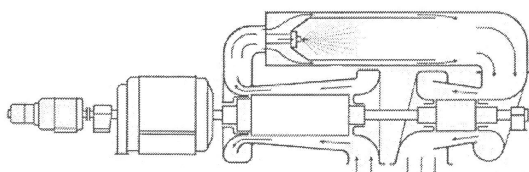


Abb. 3: Prinzipzeichnung der ersten Gasturbine von BBC, (Ref 2)



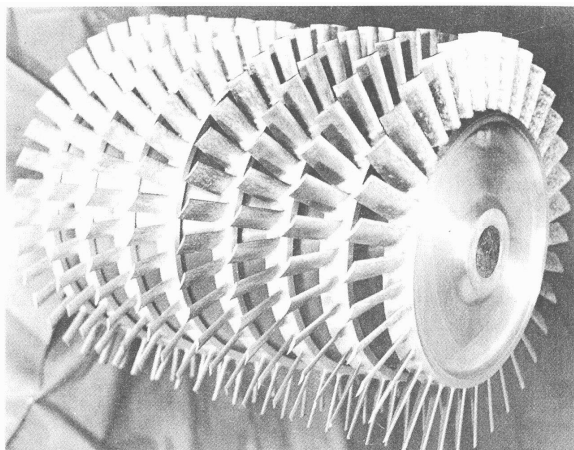
Abb. 4: BBC – Erste Kraftwerksturbine, 4MW, Neuchatel, Schweiz, 1939 - heute bei Alstom in Birr bei Baden restauriert.



Abb. 5: Axialverdichter der ersten Kraftwerksturbine von BBC, 1939.

Zur ETH Zürich gab es bei BBC enge Verbindungen, wo auch die bekannte Dissertation von C. Keller „Axialgebläse vom Standpunkt der Tragflügeltheorie“ vorgelegt wurde, die für viele Jahre ein oft benutztes Handwerkzeug der Verdichter-Aerodynamiker darstellte. Aber auch nach England und Deutschland gab es wissenschaftliche Kontakte und Austausch von Wissenschaftlern.

Das dritte Zentrum für Flügel- und Verdichter-Aerodynamik in Europa lag in Deutschland bei der Aerodynamischen Versuchsanstalt (AVA) in Göttingen [3], [4]. In Göttingen wurden Mitte der 1930er Jahre viele Tragflügelprofile untersucht, jedoch weniger Gitterversuche durchgeführt. Auf dieser Grundlage entwickelte W. Encke einen 6-stufigen Axialverdichter mit gutem Wirkungsgrad und einem Druckverhältnis nahe 4:1. Dieser Verdichter wurde später der Grundstein für die deutsche Flugtriebwurks-Entwicklung mit Axialverdichter.



Quelle: AVA - Archiv aus H.-U. Meier / H. Schubert

Abb.6: Axialverdichter des Jumo 008, gefertigt bei der AVA in Göttingen, 1941

Erste Triebwerke mit Axialverdichter

In den 1930er Jahren wurde sowohl in England als auch in Deutschland an der Fluggasturbine gearbeitet, in beiden Ländern wurden aber die ersten Fluggasturbinen auf Privatinitiative gebaut und zwar mit Radialverdichter, weil der Radialverdichter wegen seiner Einstufigkeit leichter zu beherrschen war. Im Reichsluftfahrt-Ministerium wurde jedoch Ende der 1930er Jahre erkannt, dass die Gasturbine als Flugantrieb das größte Potential mit Axialverdichter hat, und so wurden Flugtriebwerke mit Axialverdichter stark gefördert. Das führte dazu, dass in Deutschland die ersten Flugtriebwerke mit Axialverdichter erprobt (1940) und in der Me 262 geflogen (1942) wurden, nämlich die Triebwerke BMW 003 und Jumo 004.

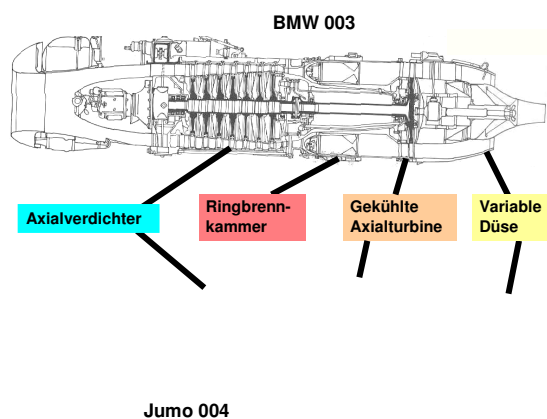


Abb. 7: die ersten Strahltriebwerke mit Axialverdichter, die geflogen sind.

In England folgte 1943 das Triebwerk F2 in reiner Axialbauweise in einer Gloster Meteor.

Der Siegeszug des Strahltriebwerks

Der eigentliche Siegeszug der Gasturbine als Flugantrieb setzte dann in den Jahren nach dem 2. Weltkrieg ein, zunächst militärisch – angetrieben durch den Rüstungswettlauf im Kalten Krieg, dann aber nur mit relativ kleiner zeitlicher Verschiebung auch in der zivilen Luftfahrt. Der Axialverdichter setzte sich bei großen Triebwerken durch und bei Antrieben für schnelle Flugzeuge wegen der geringen Stirnfläche. Der Radialverdichter ist häufig bei Hubschrauberantrieben zu finden, weil seine Robustheit begehrt ist und die kleine Stirnfläche keine große Bedeutung hat. Meilensteine bei der Entwicklung des Axialverdichters stellen die Einführung verstellbarer Leitgitter dar, wie sie ca. 1951 erstmals im J79 von GE (Antrieb des Starfighters und der Phantom) eingeführt wurden, denn das Druckverhältnis stieg bei diesem einwelligen Triebwerk schon auf 13:1. Bei Druckverhältnissen $> ca. 5:1$ holt den Ingenieur die Problematik der Stufenabstimmung bei Teildrehzahl wieder ein. Das Problem hätte Griffith mit der Contra Flow Engine nicht gehabt.

Der nächste bedeutende Schritt bei der Fluggasturbine, war die Einführung der Mehrwelligkeit, die im Hochdruckteil weniger Stufen notwendig machte, weil die Drehzahl erhöht werden konnte. Außerdem wird dadurch das Druckverhältnis auf einer Welle begrenzt und beherrschbar.

Beim Unterschall-Triebwerk war der nächste große Schritt das hohe Nebenstromverhältnis, das erstmals im Triebwerk TF39 für den Antrieb des amerikanischen Transporters Galaxy erprobt wurde und heute in der Zivil-Luftfahrt Standard ist - aus zwei Gründen:

1. niedriger Verbrauch wegen des hohen Propulsionswirkungsgrads
2. geringer Lärmpegel.

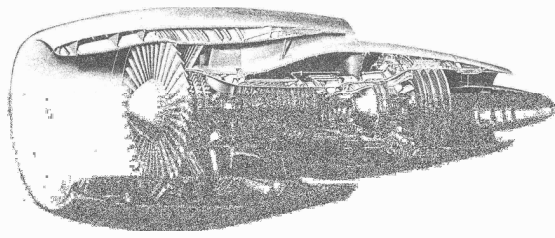


Abb.8: Zweiwelliges Triebwerk CF6 mit hohem Nebenstromverhältnis

Entwicklungsstand heute

Neben der Entwicklung des Axialverdichters waren natürlich für die Entwicklung des Flugtriebwerks die Steigerung der Turbinen-Eintrittstemperatur, die über verbesserte Werkstoffe und über die Schaufelkühlung beherrschbar wurde, ebenso wichtig - anfangs auch die Entwicklung kleiner Brennkammern, aber das soll hier nicht näher betrachtet werden.

Hohe Turbinen-Eintrittstemperaturen erfordern für einen attraktiven thermodynamischen Kreisprozess hohe Druckverhältnisse. Flugtriebwerksverdichter müssen wegen des Gewichts kurz und leicht sein. Die Länge des Verdichtungssystems macht bis heute mehr als die Hälfte der Triebwerkslänge und knapp die Hälfte des Triebwerksgewichts aus. Die Mehrwelligkeit, die den vorderen und den hinteren Stufen angepasste Drehzahlen zugesteht führt zu weniger Verdichterstufen, benötigt aber zusätzliche Übergangskanäle, so dass auch sie kaum zur Längenbegrenzung des Verdichtungssystems beiträgt. Ist es wirklich verwunderlich dass Rolls Royce hier sogar den Schritt zum dreiwelligen System geht, mit dem RR vor allem bei Triebwerken in der hohen Schubklasse punktet, oder wirkt hier noch A.A. Griffith nach?

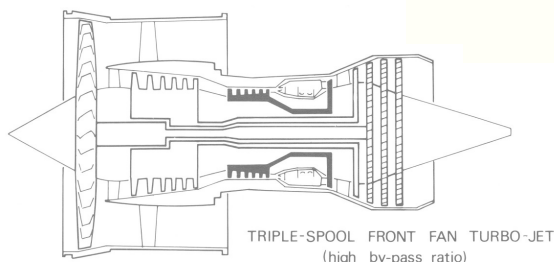


Abb.9: Prinzipskizze eines 3-welligen Turbofans (The Jet Engine von RR)

Heute haben moderne zivile Flugtriebwerke Gesamtdruckverhältnisse $> 40:1$ und ein hohes Nebenstromverhältnis, das Werte bis $1:10$ erreicht. Damit geraten die Verdichtungssysteme konstruktiv in eine Zwickmühle, denn der Bläser (Fan) dreht sehr langsam, hat aber eine sehr große Leistung, was ein großes Drehmoment zur Folge hat und eine dicke Welle zwischen Turbine und Bläser erforderlich macht. Die Niederdruckwelle ist aber bei mehrwelligen Systemen die innen laufende Welle, um die die schnell drehende(n) Welle(n) läuft (laufen) und Verdichter mit kleinem bis sehr kleinem Volumenstrom antreiben. Aerodynamisch führt das zu sehr hohen Nabenverhältnissen am Austritt der HD-Verdichter und damit zu erhöhter Spalt-empfindlichkeit, was den Wirkungsgrad verschlechtert. Außerdem müssen die schnell drehenden Verdichter-Rotoren große Nabenbohrungen haben, was der Strukturmechanik zuwiderläuft. Das Problem durch ein Getriebe nach dem Bläser zu vermeiden, ist prinzipiell möglich, zerstört aber die Einfachheit des Turbotriebwerks, weil der natürliche Ausgleich der großen Achsschübe von Verdichter und Turbine verloren geht und durch mechanische Gegenmaßnahmen ausgeglichen werden muss, was neue Risiken hervorruft.



Abb.10: 3-stufiger militär. „All Blisk Fan“

Die aerodynamische Belastbarkeit von Verdichterschaufeln hängt an der Belastbarkeit der Grenzschicht, die bei Überlastung abreißt. Weitere Steigerungen im Druckverhältnis sind nur noch über die Drehzahl möglich, womit die Verdichter transsonisch werden, d.h. die Rotor-schaufeln werden teilweise mit Überschall angeströmt, was aber Ihren Arbeitsbereich einengt und wiederum das Problem der Verstimmung der Verdichterstufen bei Teillast vergrößert. Außerdem können die hohen Druckverhältnisse in einer Stufe aerodynamisch nur mit axial langen Schaufeln (kleines Höhen/Seitenverhältnis) erreicht werden, was Schaufel und Scheibe zusätzlich schwerer macht. Bei so hohen Umfangsgeschwindigkeiten kommt die konventionelle Schaufel-Scheibe-Verbindung (z.B. Schwalbenschwanzfuß) mechanisch an seine Grenzen, so dass die so genannte Blisk (bladed disk = Scheibe und Schaufeln in einem Stück) eingeführt werden muss. Aerodynamisch ist das kein Problem, sehr wohl aber in Bezug auf Montage und Reparatur. Natürlich wird die Blisk-Technologie auch eingeführt, weil eine Blisk leichter baut als eine beschau-felte Scheibe gleicher Abmessungen mit klassischer Schaufel-Scheibe-Verbindung - vor allem bei militärischen Niederdruck-verdichtern.

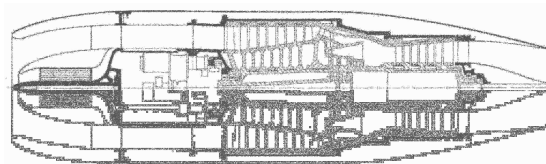
Heutige Zwänge

Der Nachteil der Blisk-Bauweise liegt darin, dass Schaufeln im Triebwerk nicht gewechselt werden können, sondern dass für einen Schaufelwechsel das gesamte Triebwerk zerlegt werden muss. Zusätzlich ist der Schaufeltausch bei Blisks, welche durch Entfernen der beschädigten Schaufel und durch Aufbringen der neuen Schaufel mittels linearem Reibschweißen (große Schaufeln) geschieht, teuer und zeitaufwendig. Für kleine Schaufeln steht seit kurzem das induktive Hochfrequenzpress-schweißen zur Verfügung, bei dem nicht so große Kräfte aufgebracht werden müssen. Für militärische Triebwerke ist das akzeptabel aber bei zivilen Triebwerken, die ja über 20.000 Stunden am Flügel

hängen sollen, muss sich Blisk erst noch bewähren. Die sehr hohen Umfangs-geschwindigkeiten bergen darüber hinaus die Gefahr, dass die Schaufeln erhöhter Erosion unterworfen sind, also öfter ausgetauscht werden müssen. Praktische Erfahrungen im Langzeiteinsatz gibt es noch nicht. Bislang baut man wegen der Reparierbarkeit keine Trommeln in Blisk-Bauweise, was eine Schraubenverbindung zwischen den einzelnen Scheiben erforderlich macht. Dabei muss jede zweite Scheibe mit Bohrungen versehen werden, was die Scheiben mechanisch schwächt und durch zusätzliche Dicke der Scheiben kompensiert werden muss. Das wiederum macht die Scheiben thermisch noch lang-samer als sie gegenüber dem Verdichter-gehäuse ohnehin schon sind, und die Spalt-haltung im transsienten Betrieb (z.B. beim Start) sehr schwierig, sie muss in der Regel durch zusätzliche Masse im Gehäuse kompensiert werden. Zusätzliche Maß-nahmen zur Reduzierung der Schaufelzahl führen zu längeren und deutlich schwereren Verdichtern, das Optimum ist inzwischen deutlich überschritten. Alle klassischen Vorteile des Axialverdichters wie hoher Stirnflächendurchsatz, hohes Leistungsgewicht und hoher Wirkungsgrad sind bei solchen Hochdruckverdichtern geopfert worden für die Trophäe niedriger Stufenzahl, die angeblich kostengünstig ist, was aber einer unabhängigen Überprüfung wohl kaum stand halten dürfte.

Mögliche Lösungsansätze

Zur Verringerung von Länge und Gewicht des Verdichtungssystems sowie der Probleme der Spalthaltung im transsienten Betrieb lohnt es sich vielleicht über den

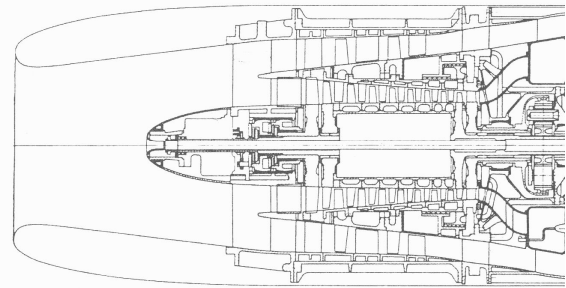


Quelle: H.-U. Meier / H. Schubert

Abb.11: Weinrich Triebwerk mit gegen-läufigem Verdichter, Brennkammer und Turbine

Gegenlauf-Verdichter nachzudenken. 1938 schlug Helmut Weinrich ein Strahltriebwerk mit Gegenlaufverdichter vor, das von BMW aufgegriffen und bis 1942 verfolgt wurde, bei dem Verdichter, Brennkammer und Turbine gegenläufig ausgeführt waren. Bei einem Gegenlaufverdichter steht für die Arbeit in zwei Schaufelreihen die Summe der Umfangsgeschwindigkeiten beider Schaufelreihen Verfügung, was die Leistungsaufnahme bei langsam drehenden Schaufelreihen deutlich erhöht, was ja auch schon Griffith für seine Contra Flow Engine nutzte. Gegenläufige Verdichter mit hoher Umfangsgeschwindigkeit bauen zu wollen macht keinen Sinn, weil dann alle Schaufelreihen hoch transsonisch werden und senkrechte Stufenkennlinien haben, die man nicht sinnvoll abstimmen kann. Ersetzt man eine Umfangsgeschwindigkeit von 475 m/s an der Schaufelspitze des Rotors bei stehenden Leiträdern durch eine Umfangsgeschwindigkeit von 350 m/s an der Rotorspitze und lässt den Stator mit 125 m/s in entgegengesetzter Richtung drehen, dann haben beide Schaufelreihen zusammen die selbe Umfangsgeschwindigkeit zur Verfügung und es ergibt sich ein leichter und mechanisch problemloser Rotor und ein langsam drehender Stator, der die Schaufeln gegen das Außendeckband abstützen kann und auch leicht baut. Geht man dann noch mit der aerodynamischen Belastung zurück, indem man den Rotor mit 375 m/s drehen lässt, dann kann man die Schaufeln axial kürzer bauen. Das Weinrich Triebwerk von 1938 hat Probleme gehabt, weil sich die Teile durch die ungleichmäßige Wärmezufuhr über der Brennkammer verwarfen, was dazu führte, dass sich die Schaufelreihen berührten und Schäden verursachten. Unter dem Zeitdruck des Krieges konnten die Schwierigkeiten nicht so schnell behoben werden und deshalb wurde diese Triebwerks-Entwicklung 1942 nicht weiterverfolgt. Es spricht aber nichts dagegen, dass man einen Gegenlauf-Verdichter beherrschen kann.

Auch das Triebwerks von Daimler Benz DB 007, das ab 1941 entwickelt wurde, hatte einen Gegenlauf-Verdichter, dessen langsam drehender Stator neben den Schaufeln des Verdichters im Innenkreis die Schaufeln des Verdichters im Außenkreis trug, hatte aber ein Getriebe zwischen Turbine und Verdichter, um die Gegenläufigkeit von Brennkammer und Turbine zu vermeiden.



Quelle: H.-U. Meier / H. Schubert

Abb.12: Daimler Benz TWK DB 007:
Gegenlaufverdichter im Innenkreis
2stufiger Verdichter im Außenkreis

In alten Messprotokollen wird viel von Problemen mit der Brennkammer berichtet, aber nicht von Pumpen bei Teillast. Beim Gegenlauf-Verdichter mit relativ langsam laufendem Rotor und drehendem Stator würden sich die Fliehkraftdehnung beider Schaufelträger und die thermischen Eigenschaften annähern was die Spalt-haltung im transsienten Betrieb auch ohne Zusatzgewicht im Gehäuse erheblich verbessern würde.

Booster nennt man die Aufladestufen nach dem Bläser auf der Niederdruckwelle. Da sie sehr wenig Umfangsgeschwindigkeit zur Verfügung haben, können sie auch nur sehr kleine Druckverhältnisse aufbauen, tragen aber nicht unerheblich zur Länge des Verdichtungssystems bei. Dass sie im Zuge von einer Leistungssteigerung in einem Triebwerk eingeführt werden, muss man akzeptieren, dass aber neue Triebwerke schon mit 4 Boosterstufen anfangen, ist weniger überzeugend.

Im Übrigen sei hier darauf hingewiesen, dass ein Gegenlauf-Verdichter nur als sinnvoll angesehen wird, wenn er von einer Gegenlauf-Turbine angetrieben wird. Dass eine Gegenlauf-Turbine funktioniert, wurde in den 1980er Jahren von GE mit dem UDF unter Beweis gestellt [5]. Ein Getriebe hat in einer Turbomaschine nichts zu suchen (außer für den Antrieb der Hilfsantriebe, der aber gemessen an der Gasturbine nur kleine Leistungen übertragen muss). Allerdings scheint ein gegenläufiges Niederdrucksystem zum Antrieb eines gegenläufigen Blägers wegen des erhöhten Lärmpegels in einer Triebwerksgondel - wie es mit dem CRISP von DVL und MTU Mitte der 1980er Jahre angedacht war [6] – nicht optimal zu sein, weil ein extrem niedriger Lärmpegel in Zukunft eines der wichtigsten Ziele für alternative Triebwerkskonzepte sein wird [7].

Verdichter in Blisk-Bauweise würden leichter bauen, wenn man auf die Schraubverbindungen in den Scheiben verzichten würde. Das wird auch untersucht und bei kleinen Einheiten auch praktiziert, aber das setzt eine sichere Zugankerkonstruktion voraus, die auch im transsienten Betrieb immer eine Zugspannung im Zuganker sicherstellt. Ein Versagen einer solchen Konstruktion führt in der Regel zu einem erheblichen Schaden.

Leichter als ein verschraubter Blisk-Rotor wäre auch eine Trommelbauweise, weil dann die durchbohrten Scheiben und die Schraubverbindungen, die ja oft für die Montage zusätzliche Länge benötigen, entfielen. Heute gibt es das elegante Verfahren des induktiven Hochfrequenzpressschweißens für das Aufbringen von kleinen Schaufeln auf eine Trommel, die ohne die großen Kräfte auskommen, die beim linearen Reibschweißen erforderlich sind. Diese Technologie steht seit kurzem zur Verfügung - vielleicht noch nicht in Serientauglichkeit. Beide genannten Leicht-Bauweisen für einen Blisk-Rotor

machen aber bei ineinander laufenden Wellen die vollständige Demontage des Triebwerks für den Schaufelwechsel erforderlich.

Mögliche Ansätze für die Zukunft.

Die oben genannten Zwänge beim Bläser-Triebwerk mit sehr hohem Nebenstromverhältnis können auch zu unkonventionellen Lösungen führen, die auf die ineinander laufenden Wellen verzichten – man spricht dabei vom „off axis core“ d.h. vom Gaserzeuger mit seitlich verschobener Achse im Triebwerk, an den man ohne Triebwerkszerlegung herankommt, oder einem Gaserzeuger ganz außerhalb des Triebwerks. Als Nachteil wird dabei die Führung des Gasstroms zwischen HD-System (Gaserzeuger) und ND-System (Nutzurbine, die den Bläser antreibt) komplizierter und verursacht zusätzliche Druckverluste. Wenn die hohen Umfangsgeschwindigkeiten wirklich einen erhöhten Schaufelwechsel infolge Erosion erforderlich machen, könnten sogar wirtschaftliche Gründe dafür sprechen, denn ein Triebwerkswechsel am Flugzeug und noch mehr eine vollständige Zerlegung des Triebwerks sind teuer.

Wenn man beim off axis core frei ist von allen Zwängen in der Konstruktion, die sich aus den ineinander laufenden Wellen ergeben, kann man wieder Axialverdichter mit kleinem Nabenvverhältnis am Eintritt vorsehen, die mit kleiner Stirnfläche auskommen und im Wirkungsgrad besser sind, weil die Spaltverluste kleiner werden. Darüber hinaus kann man von zwei oder dreistufigen Verdichtersystemen ausgehen, die auf Verdichtern aufbauen, die trotz hohen Gasamtdruckverhältnisses ohne Verstellgeometrie auskommen.

Bei den großen Strahltriebwerken mit sehr hohem Nebenstromverhältnis erreichen die Bläser Durchmesser von 3m und die Gondeln von fast 4m. Diese Antriebe haben einen enormen Widerstand, was daran zu erkennen ist, dass Flugzeuge mit solchen Triebwerken nur noch einen

Gleitwinkel von 15 haben, während die ersten Passagierflugzeuge mit Strahlantrieb noch Gleitwinkel von 20 aufwiesen. Dieser Widerstand findet im Propulsions-Wirkungsgrad keine Berücksichtigung, er muss aber durch zusätzlichen Schub kompensiert werden. Beim CRISP (Nebenstromverhältnis > 20) wurde deshalb eine schlanke Gondel (slim nacelle) vorgesehen und erprobt, aber bei 25° Anstellwinkel löst eine schlanke Gondel ab, und das wird zurecht von der Zulassungsbehörde aus Sicherheitsgründen nicht akzeptiert.

Fasst man die Problematik der letzten beiden Argumente zusammen, dann drängt sich die Folgerung auf, das Kerntriebwerk durch eine Vielzahl kleiner Gaserzeuger bzw. Turbolader zu ersetzen, und sie in der Gondel zu installieren – am besten oben, so dass man die Ansaugung der Verdichter dazu nutzen kann, die Grenzschicht an der Oberseite abzusaugen und dadurch die Ablösung einer schlanken Gondel bei großen Anstellwinkeln zu vermeiden. Dabei würde der Durchsatz für das Kerntriebwerk gar nicht durch die normale Ansaugöffnung der Gondel angesaugt, so dass die Gondel kleiner gebaut werden könnte, was ihren Widerstand verringert.

Diese Vielzahl kleiner HD-Gaserzeuger und ND-Turbolader des Gaserzeugers würde ähnlich arbeiten, wie die Turbolader bei der Mehrstufenaufladung von großen Dieselmotoren [8] - mit dem Unterschied, dass eine Brennkammer für das Hochdrucksystem benötigt wird. Für ein solches Gaserzeuger-System sind zwei verschiedene Anordnungen denkbar:

1. der Gaserzeuger besteht aus einer (oder zwei parallelen) Hochdruckwelle(n) mit Verdichter, Brennkammer und Turbine, und mit dem Abgas der Turbine werden die Turbinen der Niederdruck-Turbolader des Gaserzeugers beaufschlagt, und mit dem Abgas der ND-Turbinen wird die Nutzturbine beaufschlagt, die den Bläser antreibt.

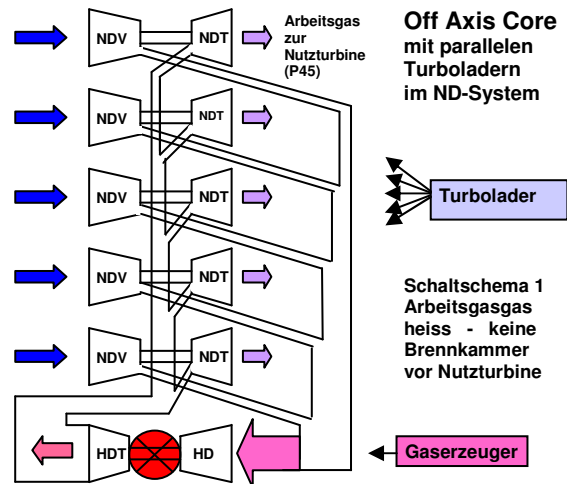


Abb.13: Prinzipskizze „off axis core 1”

2. der Gasstrom der ND-Verdichter wird größtenteils einer zweiten Brennkammer vor der Nutzturbine zugeführt und dort auf hohe Temperatur gebracht. Der kleinere Teil des Gasstroms wird im HD-Teil des Gaserzeugers auf Enddruck verdichtet und in der Brennkammer auf die Maximaltemperatur erhitzt. Für die Turbinen steht ein erhöhtes Druckgefälle zur Verfügung, denn als Gegendruck im ND-System steht der Druck im Nebenstrom an. Diese Anordnung ähnelt in gewisser Weise der sequentiellen Verbrennung, die (selten) bei stationären Gasturbinen anzutreffen ist.

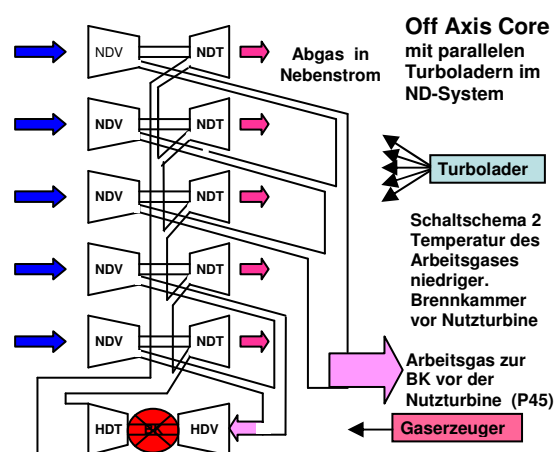


Abb.14: Prinzipskizze „off axis core 2”

Anordnung 1 hat den Vorteil mit einer Brennkammer auszukommen und ist direkt vergleichbar mit dem klassischen Strahlvom Gaserzeuger zur Nutzturbine bei

triebwerk, hat aber den Nachteil, dass Gas relativ hoher Temperatur durch den Nebenstrom von der Gondel ins Zentrum des Triebwerks (z.B. durch hohle Statorschaufeln oder Stützrippen geleitet werden muss.

Anordnung 2 hat den Vorteil dass das Arbeitsgas bei relativ niedriger Temperatur von der Gondel zum Zentrum des Triebwerks geleitet werden kann, und dass das Abgas des Gaserzeugers dem Nebenstrom zugeführt wird, wodurch die Austrittsfläche des Nebenstroms (kurze ungemischte Gondel) vergrößert wird, was den Gondelwiderstand verringert. Darüber hinaus erhöht das Abgas des Gaserzeugers die Temperatur des Nebenstroms und damit die Leistung des Triebwerks, sodass das Triebwerk etwas kleiner konzipiert werden kann. Für die Regelung des Triebwerks ergeben sich zusätzliche Freiheitsgrade durch die beiden Brennkammern. Als Nachteil von Anordnung 2 muss natürlich die zweite Brennkammer genannt werden. Die hohe Temperatur der Nutzturbine macht Kühlung der Nutzturbinenschaufeln erforderlich. Außerdem ist der thermische Wirkungsgrad etwas kleiner, weil die Wärmezufuhr bei der Nutzturbine bei niedrigerem Druckniveau erfolgt. Letzteres wird aber wahrscheinlich durch die genannten Vorteile kompensiert.

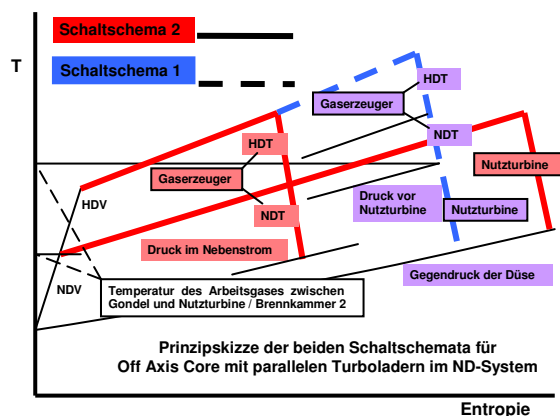


Abb.15: T-S Diagramm (Prinzipskizze)

Die Turbolader des ND-Systems des Gaserzeugers mit kleinen Abmessungen,

mit Axialverdichtern, die nach dem letzten Rotor tangential in eine Spirale fördern müssen und von Turbinen angetrieben werden, können sehr kostengünstig hergestellt werden. Die Gaserzeuger des HD-Systems unterscheiden sich von gängigen Hochdruckwellen hauptsächlich im kleinen Durchmesser, der auch bei heute üblicher Technologie wie Kühlung zu geringerem Gewicht führt. Wenn man die Turbinen auch noch in Keramik bauen würde, weil mit vielen parallelen Einheiten im Niederdrucksystem des Gaserzeugers genügend Redundanz vorhanden ist, um die Sicherheitsanforderungen im Fehlerfall zu erfüllen, dann würden diese Einheiten auch sehr leicht bauen, leichter als die Wellen eines konventionellen Kerntriebwerks. Darüber hinaus wird die Länge des zentralen Triebwerks – Bläser und Nutzturbine (gegebenenfalls mit Brennkammer) – um das Kerntriebwerk kürzer, was einer erheblichen Gewichtsreduktion entspricht.

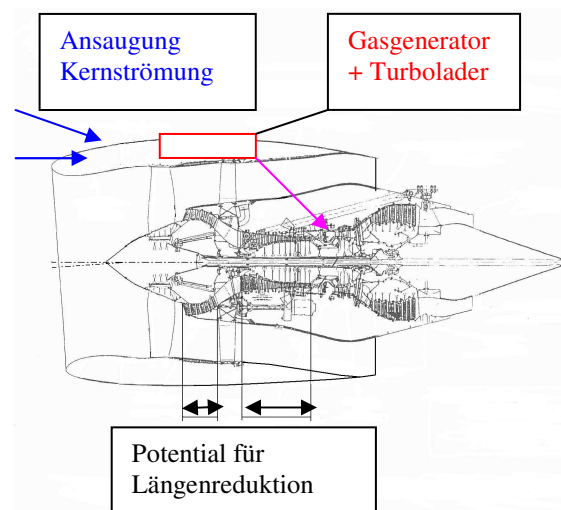


Abb. 16: Bläsertriebwerk mit off axis core

Turbinen-Rotoren aus Keramik ermöglichen sogar einen Berstschutz. Im Schadensfall lässt sich jede dieser Einheiten sehr schnell am Flügel austauschen. Dieselben Einheiten könnten bei Triebwerken unterschiedlicher Leistungsklassen eingesetzt werden, weil der Durchsatz durch die Anzahl der Einheiten gesteuert würde.

Sollte es eines Tages auch bei den Passagierflugzeugen zu starken Veränderungen kommen, bei denen z.B. der Antrieb wieder in die Zelle verlegt wird, dann ließe sich eine solche getrennte Anordnung von Gaserzeuger und Bläser samt Antrieb viel leichter an verschiedene bauliche Randbedingungen des Flugzeugs anpassen, als das mit den heutigen großen Bläsertriebwerken möglich wäre.

Zusammenfassung.

Für die Entwicklung des Strahltriebwerks hatte die Beherrschung des Verdichters entscheidende Bedeutung. Der Axialverdichter wurde wegen seiner Vielstufigkeit als letzter Verdichtertyp beherrscht, obwohl seine Vorteile für die Stirnfläche und das Gewicht des Triebwerks früh erkannt wurden. Heute sind die Axialverdichter in Flugtriebwerken aerodynamisch und mechanisch sehr hoch belastet, das hat zur Einführung von Blisk geführt. Für die Wartung von Triebwerken mit Blisk-Stufen könnte unter ungünstigen Betriebsbedingungen unrentabel werden, weil für einen Schaufelwechsel das gesamte Triebwerk zerlegt werden muss. In der zivilen Luftfahrt wird der Triebwerkslärm eine bedeutsame Zielgröße für Neuentwicklungen werden, was zu hohen Nebenstromverhältnissen führen muss. Es werden Lösungen für Triebwerke sehr hohen Nebenstromverhältnisses vorgestellt, die die ineinander laufenden Wellen verlassen, um bei Reparaturbedarf von Verdichterschaufeln an die einzelnen Komponenten ohne Triebwerkszerlegung heran zu kommen.

Literaturverzeichnis:

- [1] Armstrong, F. W.: "The aero engine and its progress – fifty years after Griffith", Aeronautical Journal, 1976
- [2] Eckardt, D., Rufli, P.; Advanced Gas Turbine Technology - ABB/BBC Historical Firsts, ASME TURBO EXPO 2001, New Orleans

- [3] von Gersdorff, K., Schubert, H., Ebert, S.: „Flugmotoren und Strahltriebwerke“, Bernard & Graefe Verlag, 4. ergänzte und erweiterte Auflage, 2007
- [4] Meier, H.-U.: „Die Pfeilflügelentwicklung in Deutschland bis 1945“ Bernard & Graefe Verlag, 2006
- [5] Gliebe, P., R., Whitfield, C., E., Kraft, R., E. (GE, Cincinnati, OH, USA); „Unducted Fan (UDF) En Route Noise“; DGLR/AIAA Pap. 92-02-101
- [6] Sieber, J.; „Neue Mantelstromtriebwerke für zukünftige Verkehrsflugzeuge – Windkanal- und Technologie Programm CRISP Phase II Abschlussbericht Okt. 1988- Dez. 1991“
- [7] Sieber, J.; „Technologieentwicklung für zukünftige ummantelte Propfanantriebe“, DGLR Jahrestagung, 1993
- [8] Deutschmann, H.; „Neue Verfahren für Dieselmotoren zur Mitteldrucksteigerung auf 30 bar und zur optimalen Nutzung alternativer Kraftstoffe