

Flugzeugtriebwerke können in zwei Kategorien eingeteilt werden:

- Turbostrahltriebwerke¹
- Wellenleistungstriebwerke

Innerhalb dieser beiden Kategorien können jeweils die folgenden weitergehenden Unterscheidungen getroffen werden:

- Einwellentriebwerke
- Mehrwellentriebwerke (Zwei- oder Dreiwellentriebwerke).

Unter dem Begriff Welle (*Shaft*) wird eine solche verstanden, die sowohl eine Verdichter- als auch eine Turbinenbeschaufelung trägt. Abbildung 2.1 verdeutlicht diese Definition. Beide dort dargestellten Triebwerke sind sog. Wellenleistungstriebwerke, die über eine Welle einen Propeller bzw. einen Rotor antreiben und primär keinen schnellen Gasstrahl zur Schubzeugung produzieren, so wie es bei den Turbostrahltriebwerken der Fall ist. Der untere Bildteil zeigt ein Triebwerk, das zwar drei Wellen hat, aber dennoch zu den Zweiwellentriebwerken zu zählen ist, da die zentrale dritte Welle nur eine Turbinen- aber keine Verdichter-Beschaufelung trägt. Diese Turbine ist eine sog. Arbeitsturbine (*Free power turbine*), die dem Gasgenerator nachgeschaltet ist und über deren separate Welle Leistung nach außen abgegeben wird. In den Fällen, in denen Wellenabschnitte durch Kupplungen oder Getriebe miteinander verbunden sind, sind diese als eine einzige Welle aufzufassen.

¹ Der Begriff „Turbo“ leitet sich von dem lateinischen Ausdruck „turbare“ ab, der in etwa „sich drehen, herumwirbeln“ bedeutet. Turbo-Strahltriebwerke sind also Triebwerke mit sich drehenden Bauteilen, nämlich Verdichter und Turbine, die als Turbomaschinen bezeichnet werden.

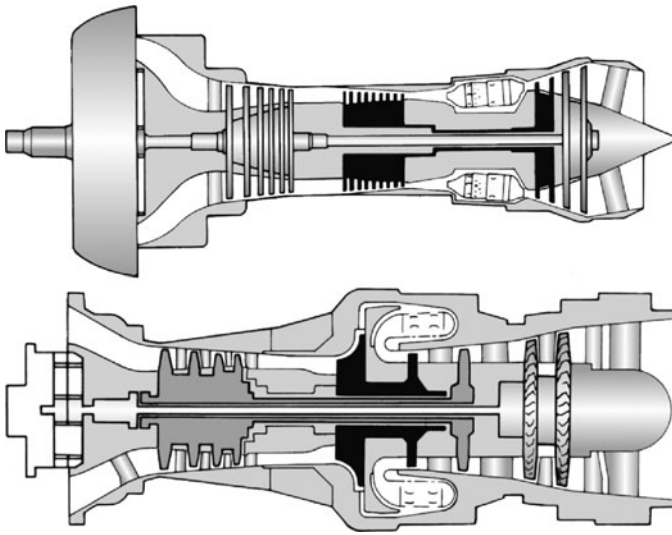


Abb. 2.1 Zur Unterscheidung von Mehrwellentriebwerken; *oben* Zweiwelliges Turboproptriebwerk, *unten* Zweiwelliger Turboshaft mit einer Arbeitsturbine auf einer dritten, separaten Welle

Mehrwellige Triebwerke kommen praktisch immer dann zur Anwendung, wenn das Druckverhältnis des Verdichters (*Compressor*) größer als 8 oder 10 ist und auf verstellbare Leitschaufeln (*Variable inlet guide vanes*) in dessen ersten Stufen² verzichtet werden soll. Andernfalls müssten etwa 40 % der Verdichtereingangsstufen eine Leitschaufelverstellung erhalten. Zusätzlich kann auch das Ausblasen von Verdichterluft (*Bleed air*) aus den mittleren und/oder hinteren Stufen erforderlich sein. Sowohl Leitschaufelverstellung als auch Abblasen von Verdichterluft sind nur für das Anlassen und den unteren Drehzahlbereich, oberhalb des Leerlaufs (*Idle*) relevant. Vielstufige Verdichter mit hohen Druckverhältnissen könnten ansonsten nicht in ihren oberen Drehzahlbereich gefahren werden. Die obere Hälfte des möglichen Schubbereichs eines Triebwerks wird von Drehzahlen oberhalb von 80 ... 90 % der maximal möglichen Verdichterdrehzahl abgedeckt. Nicht nur 1-wellige Triebwerke machen eine Leitschaufelverstellung und das Abblasen von Verdichterluft erforderlich, sondern auch die modernen Mehrwellentriebwerke mit ihren sehr hohen Verdichterdruckverhältnissen von 35 und mehr. Hier ist insbesondere der Hochdruckverdichter angesprochen. Bei 3-Wellen-Triebwerken der Mitteldruckverdichter.

Bei zweiwelligen Triebwerken teilt sich der Verdichter in einen Niederdruck- und einen Hochdruckverdichter auf (*Low pressure and high pressure compressor*). Die zugehörigen Turbinen heißen entsprechend Niederdruck- und Hochdruckturbine (*Low pressure and*

² Eine Stufe ist bei einem Verdichter die direkte Reihenfolge von Lauf- und Leitrad (Rotor und Stator). Bei einer Turbine sind die Stufen in der Reihenfolge Leit- und Laufrad angeordnet. Diese Zusammenhänge werden im späteren Kap. 8 noch ausführlich behandelt und dargestellt.

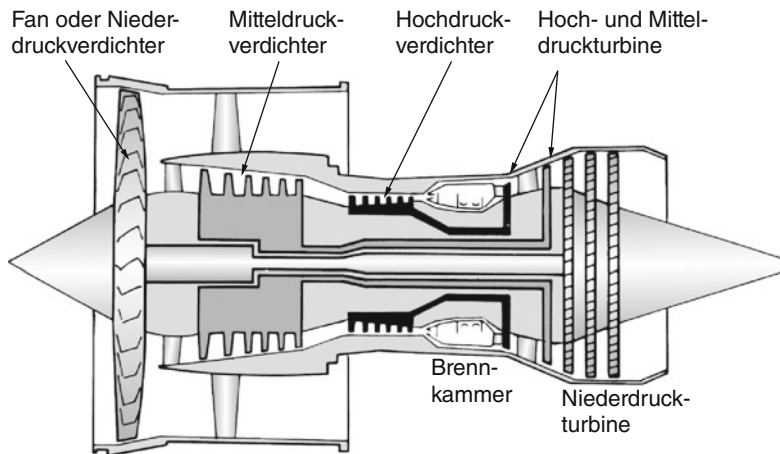


Abb. 2.2 Prinzipieller Aufbau eines modernen Mehrwellen-Turbopan-Triebwerks mit Nieder-, Mittel- und Hochdruckteil. Dreiwellen-Triebwerke, bei denen der Fan als Hauptschubzeuger eine eigene, nur für ihn zuständige Antriebsturbine (Niederdruckturbine) bekommt, sind grundlegende Auslegungsphilosophie der britischen Firma Rolls-Royce

high pressure turbine). Dem Niederdruck- folgt der Hochdruckverdichter und dann – nach der zwischengeschalteten Brennkammer – folgen Hoch- und Niederdruckturbine. Sowohl Niederdruckverdichter und Niederdruckturbine als auch Hochdruckverdichter und Hochdruckturbine befinden sich jeweils auf einer gemeinsamen, separaten Welle, Abb. 2.2. Die Begriffe Hoch- und Niederdruck beziehen sich auf das im jeweiligen Bauteil vorliegende Druckniveau.

Dreiwellige Triebwerke sind i. Allg. nur bei den Zweistromtriebwerken zu finden und eine ausgesprochene Spezialität der britischen Firma Rolls-Royce. Der Gasgenerator erhält dabei zwei Wellen. Die dritte Welle ist für den Fan oder Bläser vorbehalten. Bei dieser Anordnung werden dann bei Verdichter und Turbine zwischen Niederdruck-, Mitteldruck- (*Intermediate pressure*) und Hochdruckteilen unterschieden. Der Fan, der in seiner Funktionsweise wie eine Axialverdichterstufe anzusehen ist, ist hierbei mit seinem unteren Schaufelbereich der Niederdruckverdichter selbst und sitzt auf einer dritten Welle. Die ersten Stufen eines Niederdruckverdichters, die bei Zwei-Wellen-Triebwerken direkt dem Fan folgen, werden auch als Booster oder Booster-Stufen bezeichnet und zeichnen sich heutzutage konstruktiv durch schräg nach hinten geneigte Leit- und Laufschaufeln (*Canted vanes and blades*) aus.

Der Niederdruckteil eines Triebwerks dreht langsamer als sein Hochdruckteil. Diesen Umstand macht der auf der Niederdruckwelle installierte Fan mit seinem großen Außendurchmesser erforderlich. An seinen Blattspitzen soll nach dem derzeitigen Stand der Technik aus Gründen der Festigkeit, der Aerodynamik und des Lärms die **relative Zuströmmachzahl Werte von 1,4** nicht überschreiten. Je größer also der Durchmesser eines Fans ausfällt, umso langsamer muss konsequenterweise die Niederdruckwelle drehen. Die

Steuerung der Wellendrehzahl erfolgt dabei über die Aerodynamik der zugehörigen Niederdruckturbine. Geringe Drehzahlen bei gleichzeitig großen Leistungen, die ebenfalls der große Fan impliziert, führen von daher zu einer Vielzahl von Turbinenstufen, die das Triebwerk zum einen schwerer und zum anderen auch teurer werden lassen. Ein moderner Getriebefan, wie er später noch in diesem Kapitel beschrieben werden wird, kann hier Abhilfe schaffen.

2.1 Turbostrahltriebwerke

Unter den Begriff der Turbostrahltriebwerke fallen alle bereits in Kap. 1 definierten Turbojet-, Turbofan- und Propfantriebwerke (mit und ohne Nachbrenner), also solche, die ihren Schub ausschließlich durch die aerothermodynamische Beschleunigung des sie durchströmenden Gases erzeugen. Prinzipiell könnten auch die Turboproptriebwerke hier eingeordnet werden, da sie in gewisser Weise eine Art Sonderfall der Turbofantriebwerke sind. Es ist jedoch üblich, die Turboproptriebwerke den Wellenleistungstriebwerken zuzuschlagen, da die bei ihnen zur Verfügung stehende Wellenleistung klar definiert werden kann, wogegen aber ihr Schub zur Hauptsache von der Wahl des verwendeten Propellers abhängt. Turbostrahltriebwerke weisen drei weitere Unterscheidungsmerkmale auf:

- Ein- und Zweistromtriebwerke (Turbojet, Turbofan, Propfan)
- Ein- oder Mehrwellentriebwerke (1, 2 oder 3 Wellen)
- Ein- und Zweistromtriebwerke mit Nachbrenner (heute nur noch im Militärbereich)

2.1.1 Einstromtriebwerke

Einstromtriebwerke werden auch als Einkreis- oder Turbojettriebwerke bezeichnet. Es wird zwischen ein- und zweiwelligen Ausführungen unterschieden. Den grundsätzlichen Aufbau verdeutlicht das Triebwerk GE CJ 610 in Abb. 2.3, das die zivile Version des militärischen Turbojets GE J85 ist. In diesem vergleichsweise einfach gehaltenen Triebwerk erhöht der achtsstufige Axialverdichter, der von einer zweistufigen Turbine mit einer Drehzahl von $n = 16\,500\text{ min}^{-1}$ angetrieben wird, den Druck der angesaugten Luft um den Faktor 6.8, man sagt sein Verdichterdruckverhältnis beträgt $\pi_V = 6.8$. In der anschließenden Ringbrennkammer wird die komprimierte Luft auf eine Turbineneintrittstemperatur (*TIT Turbine inlet temperature*) von etwa $T_{t4} = 1\,150\text{ K}$ erhitzt. Bei einem Startschub (*Take-off thrust*) von $F_{TO} = 12.7\text{ kN}$ ist dieses Triebwerk mit einem spezifischen Brennstoffverbrauch (*SFC Specific fuel consumption*) von etwa $B_S \approx 100\text{ (kg/h)/kN}$ im Vergleich zu Zweistromtriebwerken zwar nicht besonders wirtschaftlich, dafür aber in Herstellung, Wartung und Reparatur unübertroffen einfach. Der Luftmassendurchsatz durch das Triebwerk beträgt $\dot{m} = 20\text{ kg/s}$. Das ursprüngliche militärische GE J85 Turbojettriebwerk war als

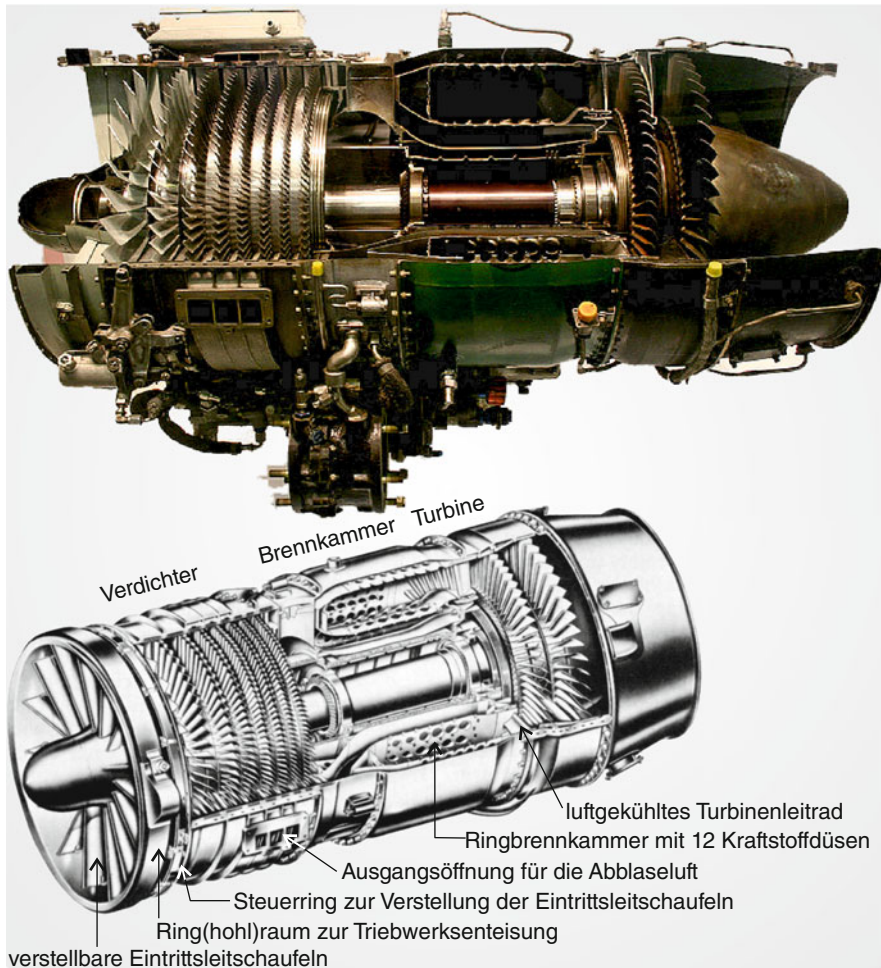


Abb. 2.3 Beispiel für ein einfaches einwelliges Turbojettriebwerk, GE CJ610. Bilder mit freundlicher Genehmigung von General Electric Aircraft Engines

Kurzzeitantrieb für unbemannte Flugkörper (*Missile*) geplant, gewann im Laufe der Jahrzehnte aber mehr und mehr an Bedeutung für Kampf- und Trainingsflugzeuge (*Fighters and trainers*). In der zivilen Version GE CJ 610 wurde es gerne in Geschäftsflugzeugen (*Business jets or Bizjets*) eingesetzt. Alle jemals von diesem Triebwerk hergestellten Varianten überdeckten einen Schubbereich von 12.7 . . . 22.3 kN. Eine Version mit Nachbrenner, das J85-GE-5H, erreichte sogar einen verstärkten Schub von 71.2 kN. Die Produktion der gesamten J85 Triebwerkspalette, die 1953 begann, endete immerhin erst 1988.

Weitere klassische Vertreter von bedeutenden Turbojettriebwerken – die bis heute noch in Betrieb sind bzw. noch gebaut werden – sind das mehr oder weniger französische Triebwerk Snecma ATAR, das britische Triebwerk Rolls-Royce Viper.

Von dem militärischen ATAR³ Turbojettriebwerk, das bis zu einer maximalen Flugmachzahl von 2.2 zum Einsatz kam, wurden mehr als 5 000 Exemplare gebaut. Es ist bzw. war der Antrieb Kampfflugzeuge Dassault-Breguet Mirage F.1/III-V/50 und der Super Étendard. Fast alle ATAR-Triebwerke waren mit Nachbrenner ausgerüstet, lediglich das ATAR 8K-50 für die Super Étendard war eines der wenigen Modelle ohne Nachbrenner. Das ATAR 9K-50 (Abb. 2.4 oben), die letzte Version dieses Triebwerktyps, ist bzw. war der Antrieb aller je produzierten Mirage F1 und Mirage 50 Kampfflugzeuge. Es ist das Leistungsstärkste dieses Typs, das bei einem Gewicht von 1 587 kg und einer Drehzahl von $8\,700\text{ min}^{-1}$ einen Schub zwischen 49.2 kN (ohne Nachbrenner) und 70.6 kN (mit Nachbrenner) produzieren kann. Bei einem Verdichterdruckverhältnis von $\pi_V = 6.2$ ist das Triebwerk in der Lage, einen Luftmassenstrom von bis zu $\dot{m} = 72\text{ kg/s}$ aufzunehmen. Aus dem ATAR-Triebwerk wurde später das sog. Super ATAR, aus dem sich das M53 entwickelte, das schließlich in das einwellige M53-P2 Turbofantriebwerk übergang, den Antrieb der Mirage 2000. Wegen der starken konstruktiven Anlehnung dieses Triebwerks an den ATAR-Turbojet, wird es auch manchmal als M53-P2 Bypass-Turbojet bezeichnet.

Ein seit über 60 Jahren im Dienst befindliches und in weit mehr als 5 000 zivilen und militärischen Exemplaren ausgeliefertes Turbojettriebwerk ohne Nachbrenner ist das Rolls-Royce Viper, Abb. 2.4 unten. Alle je gebauten Viper Triebwerke zusammen dürften im Laufe der Zeit auf eine Laufleistung von mehr als zwölf Millionen Betriebsstunden gekommen sein. Die Viper 600 Serie hat einen achtstufigen Axialverdichter, der von einer zweistufigen Axialturbine angetrieben wird. Das Viper 601 ist eine zivile Version, die den Bizjet BAe 125-600 mit einem maximalen Schub von 16.7 kN antreibt. Die militärische Version, der Turbojet Viper 632 mit einem Schub von 17.8 kN, wird u. a. in Lizenz in Italien, Rumänien und in Ex-Jugoslawien gebaut. Auf der Basis des Vipers 632 wird das Viper 633 produziert, das einzige Triebwerk dieses Typs, das mit einem Nachbrenner ausgestattet ist. Sein maximaler Nachbrennerschub beträgt 22.3 kN. Das leistungsstärkste Triebwerk der Typen ohne Nachbrenner ist das Viper 680, das den Trainer Aermacchi MB339 antreibt und das bei einem Gewicht von 379 kg einen Schub von bis zu 21.7 kN produzieren kann. Bei einem Verdichterdruckverhältnis von $\pi_V = 6.8$ ist das Triebwerk in der Lage, einen Luftmassenstrom von bis zu $\dot{m} = 26.5\text{ kg/s}$ aufzunehmen.

Soll ein Triebwerk häufig im Überschallflug zum Einsatz kommen, so ist das Turbojettriebwerk mit Nachbrenner – u. a. wegen seiner geringen Stirnfläche – dafür besonders gut geeignet, Abb. 2.5. Das oben dargestellte Triebwerk GE J79-11A war der Antrieb des Lockheed F-104G Starfighter. Das Einwellentriebwerk wurde in Deutschland bei der MTU-München in Lizenz gebaut. Mit Nachbrenner erreichte es einen Schub von $F_{TO} = 80.8\text{ kN}$

³ ATAR bedeutet „*Atelier Technique Aéronautique Rickenbach*“. Rickenbach ist ein Ort nahe Lindau, am Bodensee, wo 1945 in einem kleinen Ingenieurbüro vom früheren Chefkonstrukteur des BMW 003 Triebwerks, Dr. H. Oestrich, zusammen mit einigen seiner ehemaligen Mitarbeiter, dieses Turbojettriebwerk entwickelt wurde. Das somit ursprünglich deutsche Triebwerk wurde 1946 vom französischen Luftfahrtministerium gekauft und die Weiterentwicklung und Produktion nach Frankreich verlagert, wo es im März 1948 in den damals völlig neuen Werksanlagen in Melun Villaroche montiert wurde. Im Jahr 1950 wurde das ATAR-Triebwerk Eigentum der Firma SNECMA (*Société Nationale d'Études et de Construction des Moteurs d'Aviation*).

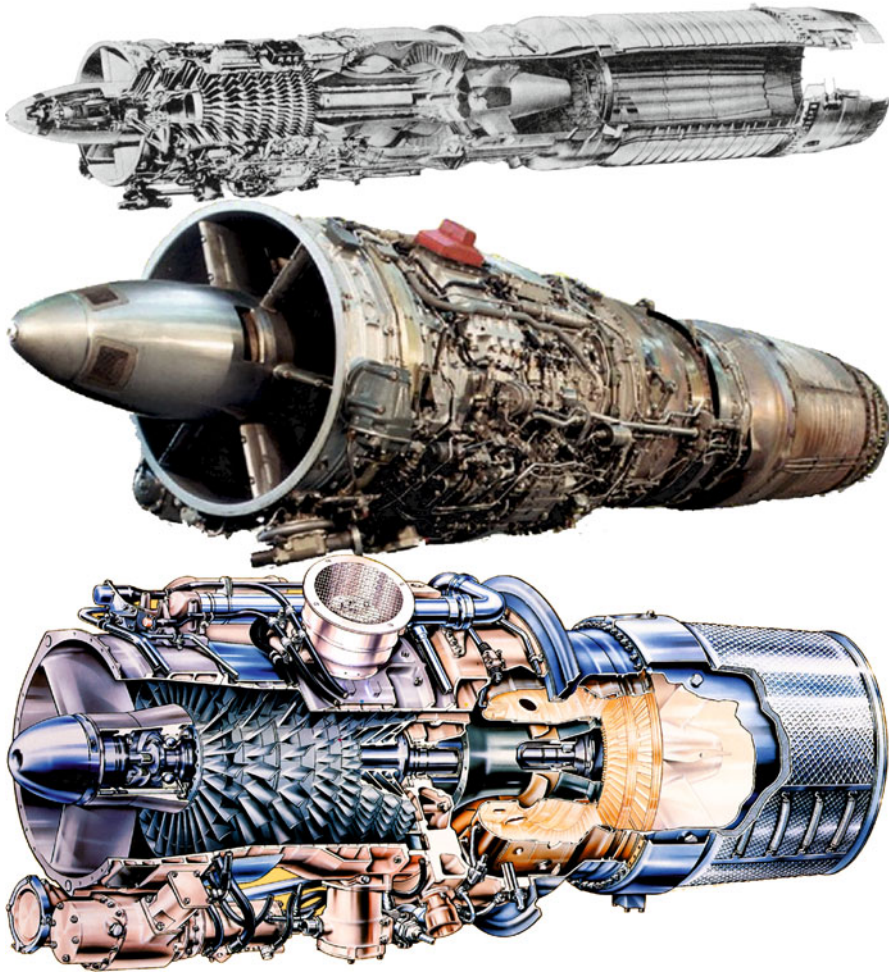


Abb. 2.4 Zwei Beispiele für sehr erfolgreiche Einwellen-Turbojettriebwerke; *oben* das französische Nachbrennertriebwerk ATAR 9K-50, *unten* der bis 2011 im Einsatz gewesene britische Turbojet Rolls-Royce Viper 632. Bilder mit freundlicher Genehmigung von SNECMA und Rolls-Royce plc

und ohne Nachbrenner von $F_{TO} = 53.5$ kN. Der siebzehnstufige Axialverdichter mit einem Druckverhältnis von $\pi_V = 13.5$ wurde von einer dreistufigen Axialturbine angetrieben und hatte einen Luftmassendurchsatz von rund $\dot{m} \approx 77$ kg/s. Das in Abb. 2.5 unten dargestellte Triebwerk GE J79-J1K hat identische Leistungsdaten, ist aber eine hinsichtlich der Zuverlässigkeit weiterentwickelte Variante des GE J79-11A und kam später als GE J79-17 in der McDonnell Douglas F-4E Phantom II zum Einsatz.

Eine weitere besondere Eignung des einwelligen Turbojettriebwerks als Hubtriebwerk (*Lift engine*) zeigt Abb. 2.6. Solche Triebwerke sollen senkrechten Schub in der Start- und Landephase von V/STOL-Flugzeugen (*Vertical and Short take-off and landing*) erzeugen.

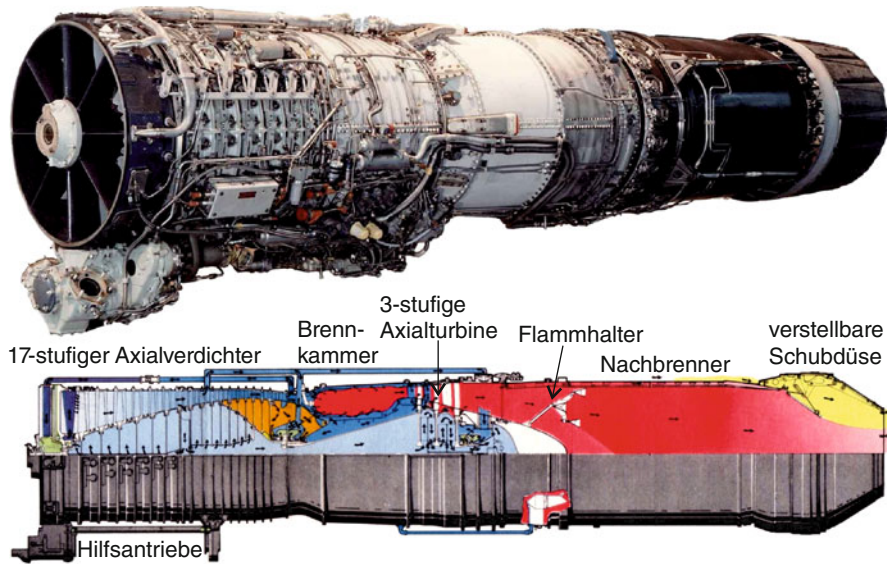


Abb. 2.5 Einwellen-Turbojettriebwerke mit Nachbrenner; *oben* GE J79-11A, das Nachbrennertriebwerk Lockheed F104 Starfighter, *unten* das GE J79-J1K, das ebenfalls im Starfighter zum Einsatz kam. Bilder mit freundlicher Genehmigung von General Electric Aircraft Engines

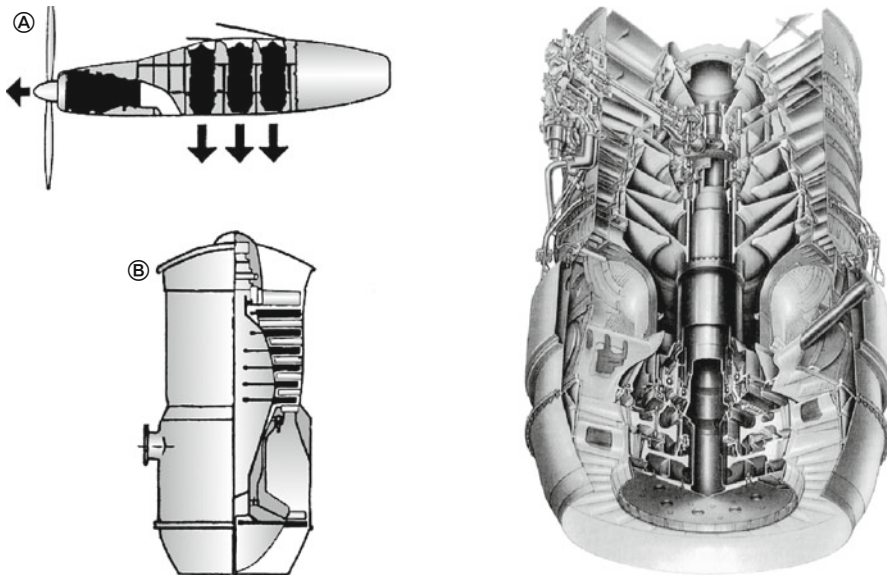


Abb. 2.6 Turbojettriebwerke als Hubtriebwerk; (A) Turboprop/Turbojet-Mischantrieb (Fiat G-222 mit Rolls-Royce Dart Turboprop und drei RB-162/31 Lift Engines), (B) einwelliges Hubtriebwerk Rolls-Royce RB-162, (C) zweiwelliges Rolls-Royce Allison XJ99 Hubtriebwerk

Da diese Triebwerke während der normalen Flugphase nicht benutzt werden, müssen sie möglichst leicht und kleinvolumig ausfallen. Die Firma Rolls-Royce hat hier mit dem in Abb. 2.6 rechts dargestellten XJ99 ein zweiwelliges Exemplar mit einem Schub-zu-Masse-Verhältnis von 200 N/kg entwickelt (40 kN Schub bei 200 kg Masse). Dieser gute Wert wird durch einen möglichst simplen konstruktiven Aufbau und durch extensiven Gebrauch von Kompositmaterialien erreicht. Das XJ99 hat mit einer Baulänge von nur 292 mm die kürzeste je gebaute Brennkammer. Die Brennkammeraustrittstemperatur liegt typischerweise bei 1 635 K. Die der Brennkammer nachfolgende Turbine besteht aus einem Eintrittsleitrad, das Bestandteil der Brennkammer ist, und aus zwei gegenläufigen Rotoren, sodass auf eine weitere Leitradreihe verzichtet werden kann. Bemerkenswert ist auch die sehr kurze Schubdüse dieses Triebwerks. Das XJ99 war für das deutsch-amerikanische Flugzeugprojekt AVS (*Advanced vertical strike aircraft*) vorgesehen, das neben zwei links und rechts vor dem Tragflügel angeordneten Paaren von ein- und ausfahrbaren XJ99-Hubtriebwerken auch zwei Haupt-Nachbrennertriebwerke mit Strahlumlenkung haben sollte. Durch diese sog. Schwenknachbrenner mit „milder Nachverbrennung“, die bei 90° Umlenkung für eine Nachverbrennungstemperatur von ca. 1 300 K vorgesehen waren, sollte der Schub beim Vertikalstart zusätzlich erhöht werden. Das sehr komplexe AVS-Projekt wurde 1968 eingestellt und war, was die Kompliziertheit betrifft, das genaue Gegenstück zu dem viel simpleren Harrier Senkrechtstarterprojekt der Briten, auf der Basis des Rolls-Royce Pegasus Triebwerks (Turbofan mit vier Deflektordüsen), das bekanntlich noch bis heute Bestand hat.

Bei Verdichter und Turbinen können bei Turbojettriebwerken in Abhängigkeit des Luftmassenstroms \dot{m}_0 folgende groben Unterscheidungen getroffen werden:

$\dot{m}_0 \leq 3 \text{ bis } 5 \text{ kg/s}$:	Radialverdichter, angetrieben von einer Axialturbine
$5 \text{ kg/s} \leq \dot{m}_0 \leq 20 \text{ kg/s}$:	Kombinationsverdichter, bestehend aus mehreren Axialstufen und einer abschließenden Radialstufe, die von einer Axialturbine angetrieben werden
$\dot{m}_0 > 20 \text{ kg/s}$:	Ausschließlich Axialverdichter, angetrieben von Axialturbinen

Bei Luftmassenströmen deutlich unter 20 kg/s würden die Schaufelhöhen im Austrittsbereich des Verdichters, auf Grund der Volumenverringerung durch den Verdichtungs Vorgang, sehr klein ausfallen, sodass hier Radialverdichter bevorzugt werden. Je kleiner der Massenstrom ist, umso unumgänglicher wird die Verwendung eines Radialverdichters, da in diesen Fällen der Spalt zwischen Schaufel und Gehäuse im Vergleich zur Schaufelhöhe sehr groß werden würde, wodurch sich die Verdichterwirkungsgrade signifikant verschlechtern, Abb. 2.7. Ansonsten bekommen Axialverdichter i. Allg. immer den Vorzug gegenüber Radialverdichtern, da sie bei vergleichbarem Triebwerksaußendurchmesser mehr Luftmassenstrom fördern können, was für den Triebwerksschub von Bedeutung ist, und bei höheren Verdichterdruckverhältnissen, die den spezifischen Brennstoffverbrauch des Triebwerks senken, den besseren Wirkungsgrad aufweisen.

Einstromtriebwerke werden bis hin zu Flugmachzahlen von $Ma_0 = 2.5 \dots 3.0$ und in Flughöhen von bis zu $H_0 = 25 \text{ km}$ eingesetzt. Es gibt sehr kompakte Turbojettriebwerke

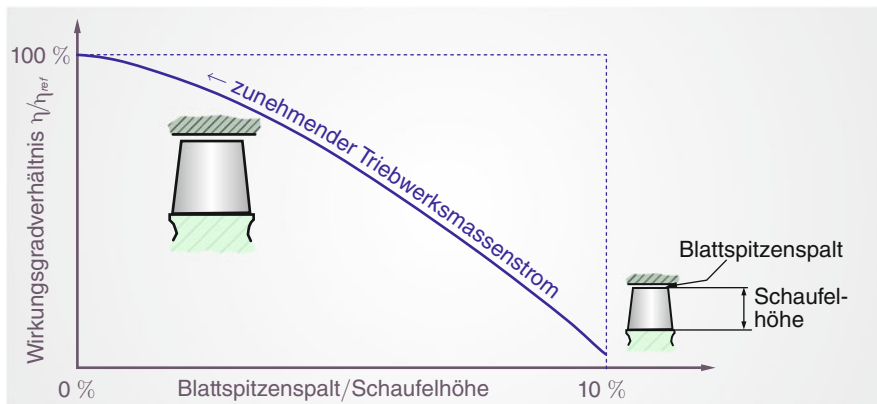


Abb. 2.7 Einfluss des Verhältnisses von Blattspitzenspalt zu Schaufelhöhe auf den Wirkungsgrad von Axialverdichtern

mit Schüben im Bereich von $1 \text{ kN} \leq F \leq 10 \text{ kN}$ (z. B. KHD T117 oder MTU ETJ 1081), die in militärischen Waffensystemen, wie unbemannten Lenkwaffen und Drohnen, Einsatz finden. Etwas größere Turbojettriebwerke mit Schüben im Bereich von $10 \text{ kN} \leq F \leq 25 \text{ kN}$ finden Einsatz bei Reise- und Geschäftsflugzeugen, wie dem Learjet 24/25 (GE CJ610-8A), oder bei militärischen Trainern, wie dem Aermacchi MB339 (RR Viper 680). Noch größere Turbojettriebwerke mit Schüben von $25 \text{ kN} \leq F \leq 75 \text{ kN}$ sind in Kampfflugzeugen, wie der Mirage F1 (Snecma ATAR 9K-50), oder in Transportflugzeugen, wie der B707-320 oder DC8-20 (PW JT4A-3), zu finden. Das PW J58P (Lockheed SR71) und das RR-Olympus 602 (BAC Concorde) schließlich sind sehr leistungsstarke Nachbrennertriebwerke mit 145 bzw. 170 kN Schub.

Die Turbojettriebwerke mit Schüben von bis zu etwa 20 kN weisen im Vergleich zu Turbofantriebwerken i. Allg. immer den höheren spezifischen Brennstoffverbrauch auf. Da aber die Wartungskosten dieser einfach aufgebauten Turbojettriebwerke im Vergleich zu den aufwendiger ausgestatteten Turbofantriebwerken geringer sind, können sie – je nach Einsatzaufgabe – durchaus den Vorzug bekommen. Soll ein Turbojettriebwerk häufiger im Überschallflug zum Einsatz kommen, wie es z. B. bei Kampfflugzeugen der Fall sein kann, so ist die im Vergleich zu Turbofantriebwerken kleinere Stirnfläche hinsichtlich des Flugwiderstandes ein bedenkenswerter Aspekt. Werden solche Triebwerke zudem mit hohen Verdichterdruckverhältnissen ausgeführt, so sind durchaus kleinere und damit günstigere spezifische Brennstoffverbräuche zu erzielen. Zusätzlich angebrachte Nachbrenner erhöhen zwar den Schub dieser Triebwerke um 30 ... 70 %, steigern aber gleichzeitig auch deren spezifischen Brennstoffverbrauch um 80 ... 120 %.

Einstromtriebwerke haben hohe Düsenaustrittsgeschwindigkeiten, die im Überschallbereich liegen und dadurch sehr lärmintensiv sind (Strahlärm). Die sich ständig verschärfenden Lärmvorschriften (z. B. FAR 36 oder Annex 16 of ICAO, Volume I) schränken die Verwendung von Turbojettriebwerken zunehmend ein und/oder verlangen aufwendige Lärmreduzierungsmaßnahmen.

Flugzeugtriebwerke

Grundlagen, Aero-Thermodynamik, ideale und reale

Kreisprozesse, Thermische Turbomaschinen,

Komponenten, Emissionen und Systeme

Bräunling, W.J.G.

2015, LXXXVIII, 2020 S. 1095 Abb., 360 Abb. in Farbe. In

2 Bänden, nicht einzeln erhältlich., Hardcover

ISBN: 978-3-642-34538-8