

Erste schubstarke und langlebige Zivilturbinen entstehen

Bereits mit der 2. Generation von Strahltriebwerken fächerte sich die Triebwerksentwicklung in Unterschall- und Überschall-Triebwerke auf (letztere meist noch mit Nachbrenner versehen) sowie in militärische und zivile Turbinen. Die zivilen Turbinen nahmen insofern eine Sonderstellung ein,

als diese im Focus der Kostenrechnung konkurrierender Airlines standen, wo nur das preiswerteste, wartungsärmste und kraftstoffsparendste Triebwerk Aussicht auf Verkaufserfolg besaß. In dieser Beziehung entpuppte sich das Zweistrom-Triebwerk (By-Pass) bald als unschlagbar.

Für die 2. Generation von Strahltriebwerken gab es nur eine einzige Prämisse – mehr Schub! Vernünftige Flugzeuge ließen sich erst ab einer Leistung von 2.500 kp bauen, sowohl einmotorige Jäger als auch mehrmotorige Bomber, ganz zu schweigen von zivilen Transportflugzeugen, die Gesamtschübe jenseits von 15.000 kp benötigten.

Das erste Triebwerk dieser Kategorie war das Jumo 012, das noch kurz vor Kriegsende in Dessau auf den Prüfstand kam und auf 3.000 kp Standschub ausgelegt war. Die in Dessau eingerückten Amerikaner nahmen mit, was sie kriegen konnten. Vom zerstörten Jumo 012 werden es wohl nur Reste gewesen sein.

1945 begann auch Rolls-Royce mit der Entwicklung des 3.000-kp-Triebwerkes „Avon“, das 1951/52 Serienreife erreichte und anschließend in großer Zahl für verschiedene Jäger und Bomber gebaut wurde und dann sogar in der „Comet“ und „Caravelle“ zum Einsatz kam.

Eine erstaunliche Aufholjagd legten die Amerikaner hin, die ja erst 1943 in das Geschäft eingestiegen waren. Mit dem J-47 gelang General Electric der Anschluß an die führenden Engländer.

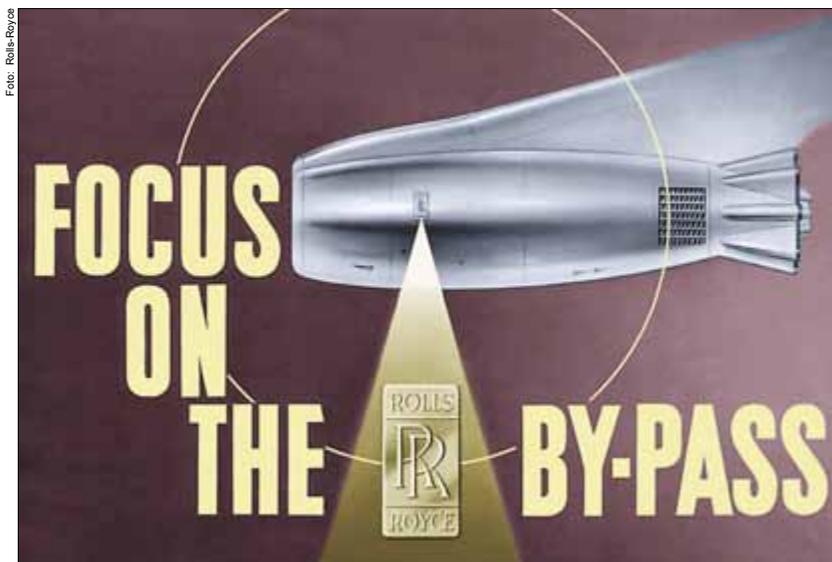


Foto: Rolls-Royce

Dieses schlanke Axialtriebwerk eignete sich mit seinen 2.230 kp Schub zwar nur mäßig für große Flugzeuge (6 Stück waren zum Antrieb der Boeing B-47 vonnöten), aber für den ersten Pfeilflügeljäger F-86 Sabre war das Triebwerk von herausragender Bedeutung, zumal es mit Nachbrenner über die 3.000-kp-Grenze gebracht werden konnte.

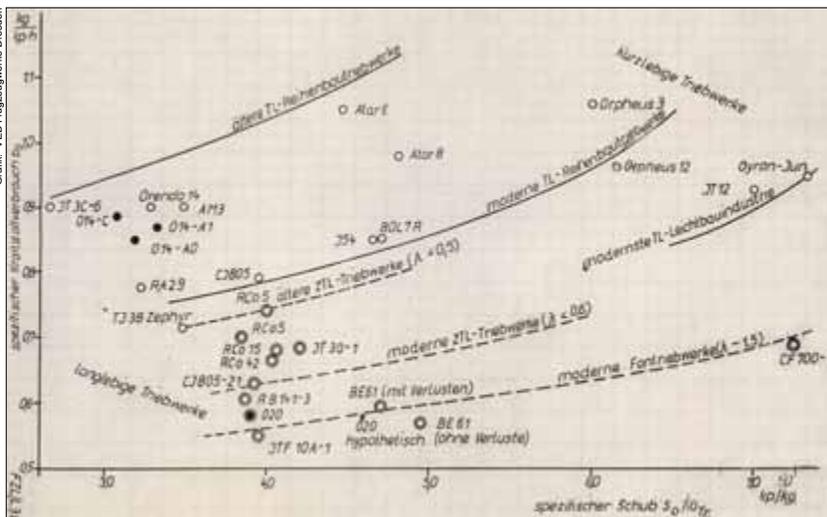
Die Sowjetunion setzte jedoch den größten Paukenschlag, als am 27. April 1952 die Tu-88, ein 73 t schweres Bombenflugzeug, mit nur zwei Triebwerken von je 8.700 kp zum Erstflug startete, wobei der Westen erst drei Jahre später von diesem Flugzeug Kenntnis erhielt, als es als Tu-16 bereits in Großserie vom Band lief. Das Triebwerk AM-3

Das erste Bypass-Triebwerk der Welt baute Rolls-Royce mit dem 2-Wellen-ZTL Conway im Jahre 1952. Es war speziell für den Truppentransporter V.1000 und dessen zivile Ausführung VC.7 in Angriff genommen worden. Sein Einsatz begann jedoch erst 1959 an der Boeing 707-420, weil Englands Regierung das Vickers-Flugzeug 1955 kurz vor Fertigstellung absetzen ließ.

Bild rechts Mitte: Eines der ersten AM-3 von Mikulin im Luftfahrtmuseum Moskau. Beachtenswert ist der Turbinenanlasser S-300 in der Einlaufnabe, der sicherlich von dem PTL Jumo 022 stammt.

Bild rechts: Die Triebwerksgondel der B 707-420 mit dem Conway R.Co 12 Mark 508. Der Stutzen über dem Difusor saugt Kaltluft für die Klimaanlage an.

Grafik: VEB Flugzeugwerke Dresden



Die Grafik zeigt diverse Triebwerke der 1950er Jahre aufgetragen über dem Reziprokwert des Einheitengewichtes (spezifischer Schub S_0/G_T) ins Verhältnis gesetzt zum spezifischen Kraftstoffverbrauch auf der senkrechten Ordinate, woraus sich eine Einteilung der Triebwerkentwicklungen in Bezug auf Lang- und Kurzlebigkeit ergibt. Grob gesprochen ist ein Triebwerk um so besser, je tiefer und weiter rechts es steht. Zivile Turbinen sind meist schwerer, weil langlebiger und wartungsärmer.

Schübe von 4.500 kp hinaus, während Mikulin ein großes und schweres, aber eben auch doppelt so starkes Triebwerk bereits ab 1953 in Großserie bauen lassen konnte, das in der Tu-16, dem strategischen Bomber M-4 und der Tu-104 zum Einsatz kam und schon 1955 auf einen Schub von sogar 9.500 kp gesteigert werden konnte.

Das Besondere des AM-3 ist sein großer Durchmesser von 1,38 m (auch nur 3 cm größer als das Radial-TL „Ghost“ der Comet 1/1A), wodurch riesige Luftmengen von 150 bis 164 kg/s angesaugt werden konnten. Dieser große Massenstrom sorgte bei sonst mäßigen Parametern für den starken Schub. Schaut man sich dazu die spezifischen Leistungen dieses Triebwerkes in der unteren Tabelle an, so ist selbst der Stirnflächenschub höher als beim Olympus und dem Pratt & Whitney J-57. Auch beim Einheitsgewicht liegt das AM-3 nicht wirklich schlechter. Und für Unterschallflugzeuge kann der spezifische Schub schließlich nicht klein genug sein. Das einzige Manko war der relativ hohe Kraftstoffverbrauch, der im Stand bei 1,00 und im Flug bei 0,93 kg/kph lag, was aufgrund der hohen Leistung aber durch mehr Zuladung leicht wieder wett gemacht werden konnte.

aus dem Konstruktionsbüro Alexander Alexandrowitsch Mikulins war so etwas von hemdsärmelig genial, wie es nur die Russen immer wieder vollbringen, weil sie selten „technikverliebt“ werden.

Das AM-3 erhält seine Sonderstellung aus dem einzigen Grund, weil es par excellence die eingangs erhabende Forderung nach mehr Schub erfüllt. Während die Engländer, Amerikaner und Franzosen nach möglichst kleinen Triebwerken mit geringstem Kraftstoffverbrauch und geringem Gewicht strebten, kamen sie bis 1954 nicht über

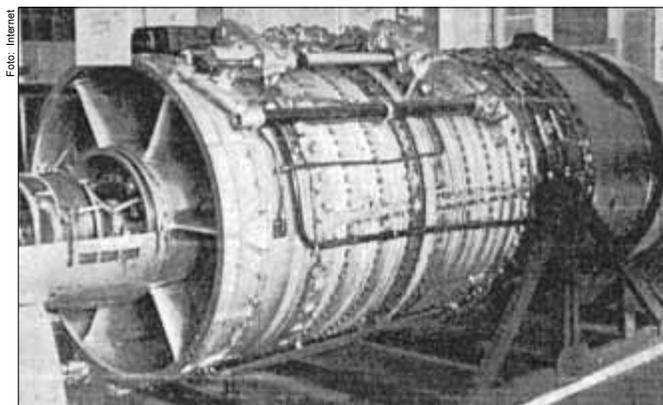


Foto: Internet



Direktvergleich mittels spezif. Kennwerte für die 2. Generation von TL-Triebwerken

Typ	Land - Jahr	Bauart Stand Schub	Stirnflächen- Schub	spez. Kraft- stoffverbrauch	Einheits- gewicht	spezif. Schub	c/v bei 800 km/h	eingebaut in folgende Flugzeuge
Junkers FMW SAG Jumo 012B	Dt./UdSSR - 1948	1-Wellen-ETL 3.000 kp	3.276 kp/m ²	1,093 kg/kph	0,44 kg/kp	495 m/s	2,228	vorgesehen für Ju-287, Ju/EF-132 und MiG-15
General Electric J-47	USA - 1948	1-Wellen-ETL 2.230 kp	3.170 kp/m ²	1,050 kg/kph	0,52 kg/kp	531 m/s	2,389	Boeing B-47, N.A. F-86 „Sabre“
Rolls-Royce Avon RA-3	England - 1950	1-Wellen-ETL 2.956 kp	3.228 kp/m ²	0,900 kg/kph	0,38 kg/kp	537 m/s	2,416	Canberra, Vickers Valiant, Hunter, Swift, (Comet 2)
SNECMA Atar 101D	Dt./Frankr. - 1953	1-Wellen-ETL 3.000 kp	4.515 kp/m ²	1,110 kg/kph	0,32 kg/kp	565 m/s	2,542	Dessault Etandard, Vautour
Alexander A. Mikulin AM-3A	UdSSR - 1952	1-Wellen-ETL 8.700 kp	5.820 kp/m ²	1,000 kg/kph	0,36 kg/kp	569 m/s	2,561	Tu-16, M-4, Tu-104
Bristol Aeroplane C. Olympus Mark 100	England - 1952 (in USA als J-65)	2-Wellen-ETL 4.420 kp	5.467 kp/m ²	0,766 kg/kph	0,36 kg/kp	653 m/s	2,939	Avro Vulcan
Rolls-Royce Conway R.Co 5	England - 1955	2-Wellen-ZTL 5.900 kp	6.626 kp/m ²	0,700 kg/kph	0,25 kg/kp	535 m/s	2,408	extra entwickelt für zivile Vickers VC.7
Pratt & Whitney J-57 / JT-3P	USA - 1952	2-Wellen-ETL 4.500 kp	5.553 kp/m ²	0,820 kg/kph	0,43 kg/kp	538 m/s	2,421	Boeing B-52A u. B 367-80, F-100, F-101, Douglas F-3D
Pratt & Whitney J-75 / JT-4A	USA - 1955	2-Wellen-ETL 7.167 kp	7.684 kp/m ²	0,780 kg/kph	0,32 kg/kp	530 m/s	2,387	Boeing B 707-320 F-105, F-107



Das Ghost 48 für die DH 112 Venom besaß einen Doppelaufbau gegenüber dem einfachen des Ghost der Comet 1 und 1A.

Der einfache Aufbau mit nur 8 Verdichterstufen und Schaufeln mit dicken tiefen Profilen, 14 Einzelbrennkammern und 2 Turbinen mit ebenfalls recht kräftigen Schaufeln sorgten für eine Robustheit, wie sie Kampfflugzeuge im Krieg dringendst benötigen. Wie robust das AM-3 war, schildert folgende Episode aus dem Jahre 1960, erzählt von Gerhard Güttel, dem Co-Piloten der „152“:

Für das Training in Vorbereitung auf die Testflüge mit der 152 hatten sich die Dresdner Flugzeugwerke von der CSA eine Tu-104A für eine Woche geborgt. Bei einem meiner Trainingsflüge versagten beim Landen die Bremsen. Die Maschine rollte über die Bahn in den Acker, wobei das Bugrad mehrere Schaufeln Dreck in das linke Triebwerk beförderte. Was tun? Wir hatten in Dresden weder die Lizenz zur Reparatur des AM-3 noch die Zeit dafür. Nachdem wir uns die Bescherung angeschaut und den größten Dreck aus dem Einlauf gekratzt hatten, beschlossen wir, das Triebwerk anzulassen. Nach ein paar zusätzlichen Umdrehungen sprang es tatsächlich an, spuckte mit wachsender Drehzahl den Rest der Erde aus und lief dann bis auf volle Drehzahl hoch. Nach dem Abstellen sah der Einlaufdiffusor wieder wie neu aus.

Die Genialität eines Alexander Mikulin wird aber erst so richtig im Zusammenhang mit der Jäger-Triebwerksentwicklung deutlich. Denn hier baute er das mit nur 68 cm Durchmesser kleinste Axialtriebwerk, das AM-9, das dafür aber für größten spezifischen Schub

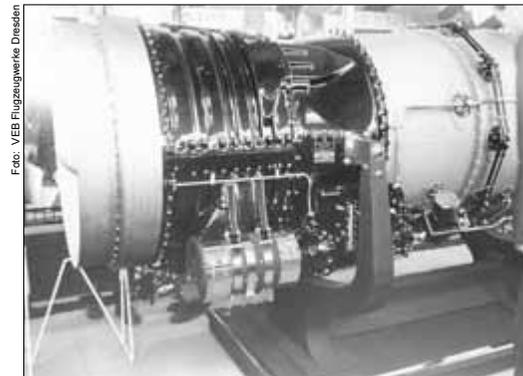
Der in französischer Sprache gedruckte Prospekt gibt auf seiner Titelseite das Avon 14 der neuen Reihe 200 wieder. Das RA-14 wies drei zusätzliche Verdichterstufen auf, die voran gesetzt waren.



von 753 m/s ausgelegt war. Von diesem Triebwerk paßten zwei Stück nebeneinander in den Rumpf der MiG-19, die damit auf 2.170 km/h beschleunigte. Das war am 5.1.1954. Und 1956 startete die berühmte MiG-21 mit einem AM-11. Dieses Flugzeug erreichte Mach 2,5.

Alexander Mikulin war also der erste, der erkannt hatte, daß sich die Triebwerke künftig für Unterschall- und Überschall-Flugzeuge in zwei verschiedene Richtungen entwickeln würden.

Man erkennt dies an dem dunkleren Verdichtergehäuseteil. Die Reihe 200 begann mit Schüben von 4.500 kp, statt rund 3.000 der Reihe 100, und konnte weiter auf über 5.000 kp gesteigert werden, mit Nachbrenner sogar auf über 8.000 kp. Die Serie 200 hatte außerdem eine neue Ringbrennkammer statt der 8 Einzelbrennkammern.



Das ZTL Conway R.Co 5 von Rolls-Royce erbrachte 1955 nicht nur den größten Schub aller westlichen Triebwerke, sondern auch den geringsten Spritverbrauch.

Als eine sowjetische Delegation 1947 den Strahltriebwerksbereich von Rolls-Royce in England besuchte, kaufte sie anschließend mehrere Nene- und Derwent-Triebwerke. Beim Rundgang zeigte man ihr auch kurz das axiale Avon, das aber erst als RA-3 flugfähig wurde. Hätten die Projektanten von de Havilland da erfahren, daß Junkers in der UdSSR mit dem Jumo 012B schon viel weiter gewesen ist, dann hätte man vielleicht das Jumo 012B von der Sowjetunion kaufen können, um es bereits für den 1. Prototyp der Comet 1, der ja am 27. Juli 1949 erstmals flog, zu verwenden. Da hätte man die Cometzelle nicht so ausdünnen müssen und die Flü-



Bristol baute das erste Zweiwellen-Triebwerk. Es hieß Olympus und trieb den zweiten V-Bomber, die Avro „Vulcan“, an.

Foto: Internet



Die G-ALYT war die vierte Serienmaschine aus der Comet-1-Produktion. Sie bekam die Axialturbine Avon RA. 9 Mark 501 anstelle der Ghost-Triebwerke eingebaut und avancierte so zur ersten Comet 2 (Erstflug: 16. Februar 1952).

Foto: Internet



Die erste echte Comet 2 mit Rolls-Royce Avon 25 Mk. 503 war die G-AMXA. Wegen des Einbaus der schwereren Avons mußte der Rumpf vorn aus Schwerpunktgründen um 92 cm verlängert werden (Erstflug: 27. August 1953).



gel im Triebwerksbereich dünner profilieren können. Das hätte außerdem bedeutet, daß man sofort über die „Comet 2“ verfügt hätte, so daß zwei Jahre Entwicklung eingespart worden wären. Die militärische Geheimhaltung, nationales Prestige-Denken und der aufkeimende Kalte Krieg haben eine solche internationale Zusammenarbeit verhindert.

Das Rolls-Royce Avon RA-7, das praktisch dieselben Maße wie das Jumo 012 besaß, kam in ziviler Ableitung als RA-9 Mark 501 zum Einbau in die Comet 2X, G-ALYT, und flog in diesem Muster erstmals am 16. Februar 1952. Das war 3,5 Jahre nach dem 100-Stunden-Staatslauf des Jumo 012B in Kuibyschew, der im Oktober 1948 erfolgt war. Obwohl das 012B in der 94. Stunde bei Vollast

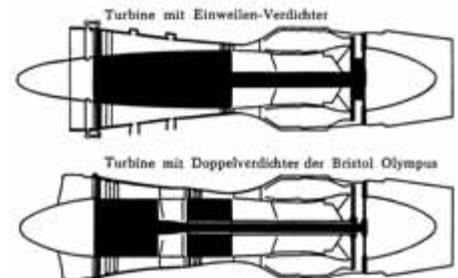
Das Rolls-Royce „Avon“ war das erste britische Axialtriebwerk. Es wurde in zwei Reihen produziert. Die erste Reihe leitet sich aus dem R.A. 3 ab, die zumeist Militärflugzeuge antrieben. Das Avon 7 (Bild) dagegen bildete den Ausgangspunkt für die zivilen Ableitungen für die Comet und die französische Caravelle. Dieses Triebwerk wies zwölf Verdichterstufen mit einem noch ziemlich geringen Stufenverhältnis von ungefähr 1,15 auf. Anschließend wurde bis auf 16 Verdichterstufen beim R.A. 29 erhöht.

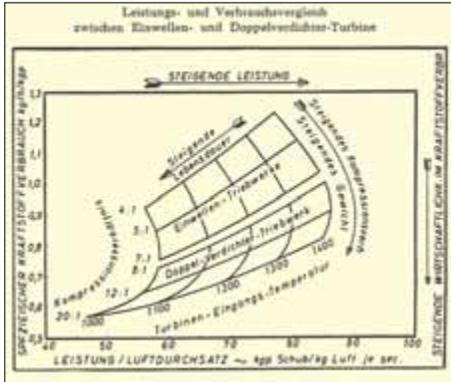
havarierte, erklärte Junkers-Chefkonstrukteur Ferdinand Brandner, daß das 012B serienreif sei, weil die Ursachen der Schaufelbrüche klar erkannt seien.

Eine nötige Entwicklungsrichtung trat die Bristol Aeroplane Company mit dem „Olympus“ los. Das Triebwerk verfügte über zwei getrennte Verdichtergruppen, die von jeweils einer eigenen Welle angetrieben wurden. Es hatte also zwei Wellen. Eine Niederdruck-Turbine trieb einen Niederdruck-Verdichter mit 7 Stufen an. Und eine Hochdruck-Turbine versorgte einen 7-stufigen Hochdruck-Verdichter mit dem nötigen Drehmoment. Nur so war es möglich, Flughöhen von 14 bis 20 km zu erreichen. Denn in großen Höhen führt die starke Luftverdichtung zu gefährlichen Schwingungs-er-

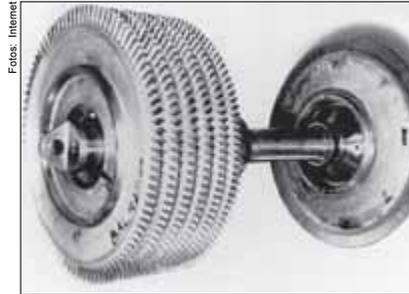
scheinungen der Luftsäule im Verdichterttrakt, weshalb die Kompressionsrate zurückgenommen werden muß. Mit einem Doppelverdichter jedoch speist sozusagen die erste Verdichtergruppe die zweite, was zu einer Multiplikation der beiden Verdichtungsverhältnisse führt, so daß trotz kleiner einzelner Verdichtungsgrade ein großer Gesamtverdichtungsgrad erreicht wird (z.B. $3 \times 3 = 9$).

Diese Art von Verdichter erreicht mit weniger Verdichterstufen größere π . Die beiden Wellen drehen mit unterschiedlichen Drehzahlen, wodurch sie sich selber regeln, der Regelaufwand also geringer wird. Durch die höheren π sinkt der Kraftstoffverbrauch, und wie gesagt, es können größere Flughöhen erreicht werden. So stellte 1953 ein Canberra-Bomber mit dem Olympus statt dem Avon einen Höhenrekord von 19.406 m auf.

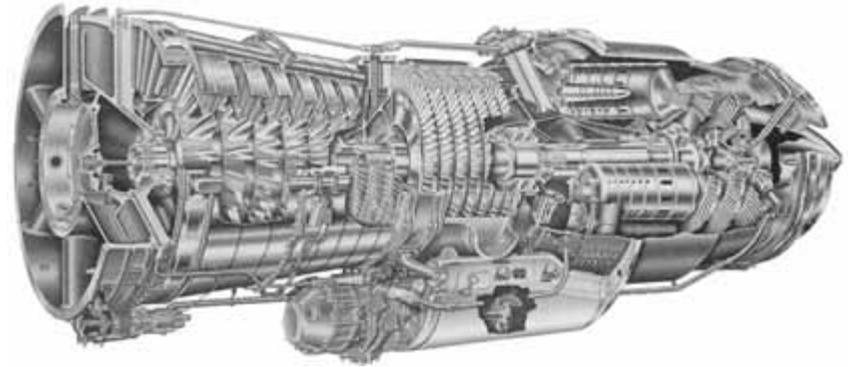




Grafik links: Prinzipvergleich zwischen Einwellen-Verdichter und Zweiwellen-Verdichter bezüglich des Bristol „Olympus“. Die Vorteile des Doppelverdichters gelten natürlich auch für das P&W J-57 und JT3. Die höhere Verdichtung führt zu einem geringeren spezifischen Kraftstoffverbrauch.



Bilder rechts und unten: Das Pratt & Whitney J-57 bzw. JT3. Oben ist der Hochdruckverdichter mit der Hochdruckturbinen auf der gemeinsamen Welle zu sehen. Rechts das Schnittbild, wo man die Brennkammer mal innwändig sehen kann. Wie beim Olympus läuft das Verdichtergehäuse konisch zu, ganz im Gegensatz zu Junkerstriebwerken, wo man das Gehäuse zylindrisch gestaltet hatte wegen der einfacheren Abdichtung der Schaufeln. Unten ein JT3-Modell in Le Bourget 1959.



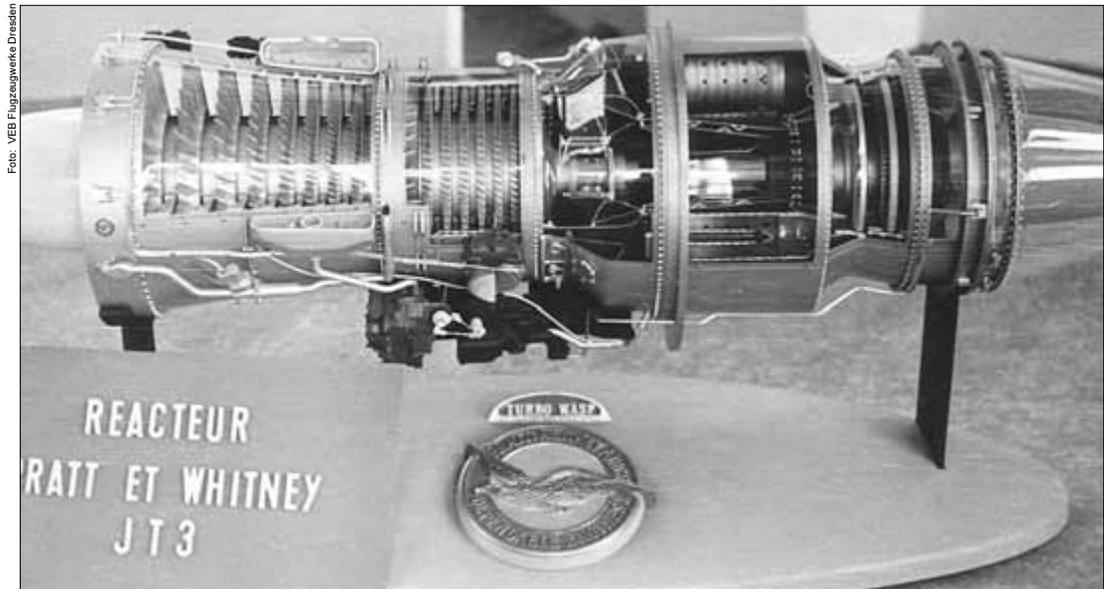
weit fliegen, mit auf 11,34 t reduzierter Nutzlast waren es sogar 5.680 km, wobei beide Male Reserven für etwa anderthalb Flugstunden für eventuelle Ausweichflüge zur Verfügung standen.

Nun sind aber Schub und Kraftstoffverbrauch nur die eine Seite der konstruktiven Arbeit. Die andere Seite ist die, wie man das Triebwerk trotzdem leicht, wartungsarm und langlebig baut. Desweiteren muß ein Triebwerk auch angelassen werden können. Je stärker es aber verdichtet, je mehr Lagerstellen die Wellen haben, je schwerer die Läufer sind, desto stärker muß der Anlas-

ser werden. Ein anderes Problem ist die „Dichtheit“ des Triebwerkes. Luftverluste schmälern den Schub. Aber höhere Verdichtungsverhältnisse erzeugen ja nicht nur den Druck in die gewünsch-

Am 2. Oktober 1952 flog der zweite Prototyp der B-52 mit acht Vorserien-Triebwerken des Pratt & Whitney J-57 zum ersten Mal. Das J-57 war dem Bristol Olympus sehr ähnlich. Es leistete ebenfalls 4.500 kp, hatte genauso einen Doppelverdichter mit den Vorteilen von großer Flughöhe, schneller Anlaßfähigkeit, Beschleunigung und einem geringen spezifischen Kraftstoffverbrauch nahe 0,8 kg/kph. Man kann also sagen, daß Pratt & Whitney, der Hersteller des legendären Doppelkolbenmotors R-2800 für die DC-6B, als erster us-amerikanischer Hersteller 1953 mit den Engländern gleichgezogen hatte. Voraus waren die Amerikaner den Engländern jedoch schon immer bei den Serien-Stückzahlen, was vor allem an den enormen Militärausgaben der Amerikaner lag. So wiesen die Turbinen der Amerikaner dreifache Laufleistungen auf (5,7 Mio. h zu 2,1 Mio. h), was sich natürlich auch auf den Informationsrückfluß von Fehlern und ihre zügige technisch-technologische Beseitigung auswirkte.

Die Zivilausführung des J-57, nämlich das JT3, kam 1954 heraus und ist sogleich in den Prototyp der B 707, der Boeing 367-80, als JT3P (mitunter auch als JT3L bezeichnet) eingebaut worden. In dieser Ausführung leistete es 4.540 kp Schub bei einer Drehzahl von 9.500 zu 6.350 u/min im Stand und in Meereshöhe bei 15 °C. Mit voller Nutzlast von 15 t konnte die B 367-80 4.500 km



te Richtung. Druck breitet sich in alle Richtungen gleichmäßig aus, also auch entgegen der Strömungsrichtung. Der Spalt zwischen Laufschaufeln und Verdichtergehäuse muß daher so klein wie möglich sein, denn die rückströmende Luft kann auch zum gefürchteten „Pumpen“ der Gassäule führen, ganz abgesehen davon, daß die Luftmenge für das Triebwerk verloren geht.

Triebwerke ohne „Lecks“ im Luftkanal gibt es in der Praxis nicht. Aber auch



Foto: Internet



Foto: Internet

Allein die Militäraufträge hätten Pratt & Whitney ein sorgenfreies Leben garantiert. Dasselbe galt natürlich auch für Boeing. Mit dem J-57 flog die B-52 und auch der Tanker B 367-80/KC-135.

England hatte zwar das Conway, aber keine Stückzahlen. Rechts der Werdegang des RR Conway vom R.Co2 bis zum R.Co15. Das R.Co2 hatte 2+2 Turbinen und 4+8 Verdichter, das R.Co5 kam mit einer Turbine weniger aus, hatte dafür aber 6+9 Verdichter und gab 5.900 kp ab, das R.Co 12 trieb die Langstreckenversionen der B 707 und DC-8 an. Es hatte größere Schaufeln an der 1. Stufe und neue Profile im Hochdruckteil und an den Turbinen. Das R.Co15 hatte weniger Leckverluste. Foto unten: Vom R.CO2 ist nur eine einzige Turbine hergestellt worden.

schon in der Theorie werden Leckmengen für die vielfältigsten Aufgaben herangezogen. Als erstes natürlich für die Herabsetzung der Gastemperatur in der Brennkammer und vor der Turbine, um die Wärmefestigkeit des Materials nicht zu überschreiten. Dann wird kalte vorverdichtete Luft zur Kühlung der Turbinenscheibe, der Turbinenschaufeln und der Leitschaufeln benötigt, desweiteren für die Kühlung der Schubdüse und der Innenteile im Schubrohr. Vielleicht ist sogar die Idee für das Conway-Zweistromtriebwerk aus dem Wunsch entstanden, die gesamte Triebwerksaußenseite mit einem kühlenden Luftstrom zu

umgeben, um es sicher in Verschwindbauweise im Flügel oder Rumpf unterbringen zu können.

Das allererste Zweistromtriebwerk baute übrigens nicht Rolls-Royce, sondern Daimler-Benz 1943. Das war aber kein richtiges Zweistrom-ZTL, denn es

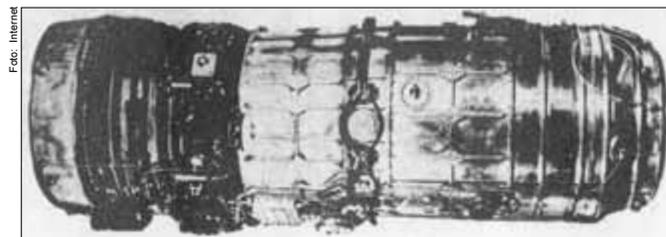


Foto: Internet

hatte ein zusätzliches Getriebe, das die äußeren drei Verdichterstufen antrieb, und auch nur eine einzige Turbine. Das Triebwerk DB 007 (1.400 kp, Gewicht 970 kg) war zu kompliziert, um serienreif zu werden und mußte aufgegeben.

Aus dem Projekt RB.80 (R: RollsRoyce; B: Bypass) mit 9.250 lb (4.196 kp) Schub für die Vickers-Flugzeuge „Pathfinder“ und „Valiant Mk.2“ entstand ab Januar 1950 das Rolls-Royce „Conway“ RCo.2, das erste Zweistrom-Zweistrom-Triebwerk mit 10.000 lb (4.536 kp) Schub. Es hatte 2 x 2 Turbinen sowie vier Niederdruckkompressorstufen und acht Hochdruckkompressorstufen. Es wurde nur ein Exemplar gebaut, das

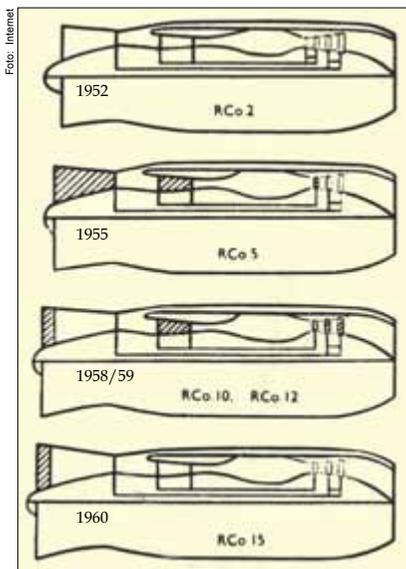


Foto: Internet

133 Stunden lief. Im Januar 1953 erreichte es seine volle Leistung. Im selben Monat gab Vickers die Entwicklung des Transporters V.1000 bzw. VC.7 bekannt. In dieses große Langstreckenverkehrsflugzeug sollten R.Co-5-Triebwerke für sichere Transatlantiküberquerungen sorgen. Das erste von 13 Triebwerken lief im Juli 1953. Im August 1955 erreichte es 13.000 lb. Doch im Oktober 1955 kam das Aus für die V.1000 und damit im Prinzip auch für das Conway.