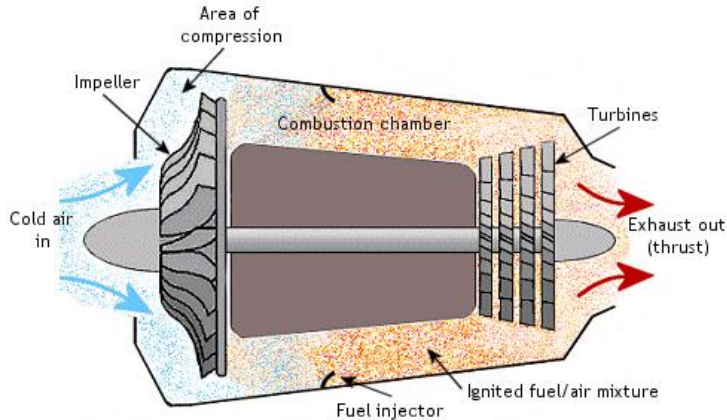


## De turbofan

De straalmotor is goed beschouwd een doorontwikkeling van de stoomturbine. Hij kent vele gedaanten zoals de turbojet, de turboprop, de turboshaft (of gasturbine) -die helicopters en elektrische generatoren aandrijft- en de turbofan. De turbofan is het type waarmee alle huidige straalverkeersvliegtuigen zijn uitgerust.



Het verhaal van de straalmotor begint met de Britse RAF Captain Frank Whittle. Al op jonge leeftijd denkt hij na over een motor zonder propeller die een vliegtuig een hoge snelheid kan geven. In 1931 krijgt hij patent op zijn straalmotor. Hij kiest voor een centrifugale compressor die wordt aangedreven door een turbine (zie de tekening). De turbine vormt een grote uitdaging. Zijn enige voorbeeld is de stoomturbine. Geen wonder dat zijn turbine nog sterk lijkt op de stoomturbines uit die tijd. Whittle's eerste turbines worden zelfs bij de stoomturbine fabrikant British Thomson-Houston gemaakt.

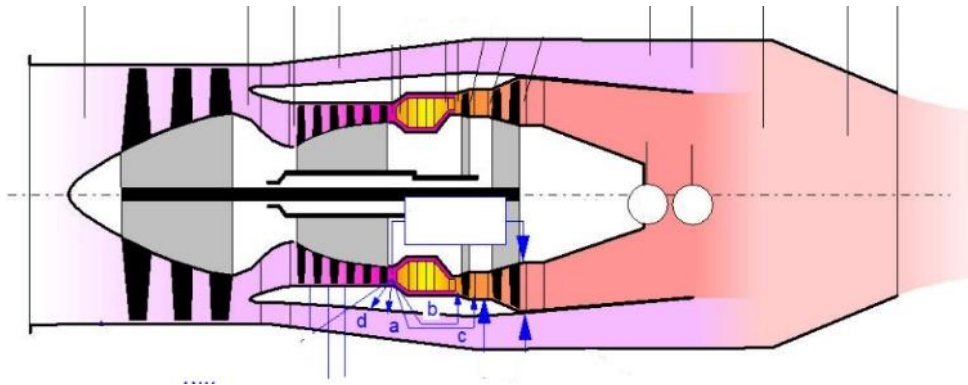
Kort door de bocht werkt een straalmotor zo: lucht wordt aangezogen en gecomprimeerd, in de verbrandingskamer wordt brandstof toegevoerd, het zo ontstane hete gas wordt afgevoerd door de uitlaat, wat het vliegtuig voortstuwt omdat er uit de uitlaat meer gas komt dan dat er als lucht in ging. Tegelijkertijd laat de turbine de compressor weer draaien en dat kost veel energie, zoals we nog zullen zien.

De motor op de tekening hierboven is een *turbo-jet*. Frank Whittle's experimentele uitvoering draaide in april 1937 en pas zijn vierde motor, de W1, was luchtwaardig. Die vloog in 1941 in een testvliegtuig. De opvolger W2B was bedoeld voor de eerste Britse straaljager. Rolls Royce (RR) nam de productie op zich, verbeterde het ontwerp en dit werd de RR Derwent. (Ook te vinden op <http://www.hansonline.eu/artikelen/>).

Whittle's W2B vloog in 1943 in de Gloster Meteor, bij zo'n 800 km/h. De turbo-jet is echter geschikt voor vliegtuigen die 1100 km/h of sneller vliegen. Dus die Meteor vloog niet economisch. Straaljagers werden daarom in die tijd ook wel "*fuel to noise converters*" genoemd. En herrie maakten ze zeker!

Ook de eerste straalverkeersvliegtuigen zoals de Boeing 707 en de Douglas DC-8 vlogen tussen de 800 en 900 km/h met motoren die eigenlijk niet zo geschikt waren.

En dan verschijnt de turbofan op het toneel. Dat is een motor die uiterst geschikt is voor snelheden tussen de 800 en 1000 km/h. Hierbij stroomt niet alle aangezogen lucht door de verbrandingskamer maar een gedeelte wordt om de motor heen geleid (het parse gedeelte):



In dit voorbeeld wordt een kwart van de hoeveelheid lucht die door de eerste compressor bladen stroomt om de motor geleid (de paarse kleur). Dit maakte bijvoorbeeld de RR "Conway" al 8% zuiniger.

Voor de duidelijkheid breken we de staalmotor op in drie onderdelen: de compressor, de verbrandingskamer en de turbine.

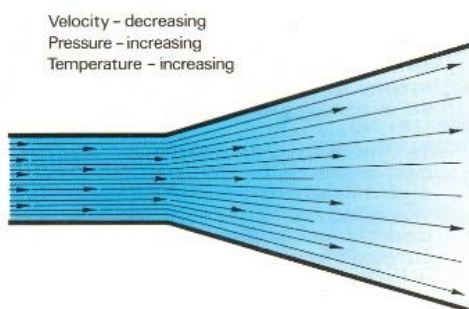
### de compressor

De compressor levert de druk voor het verbrandingsproces en zorgt ervoor dat de druk van de aangezogen lucht hoger wordt. En uiteraard worden bij het comprimeren de druk en de temperatuur ook hoger.

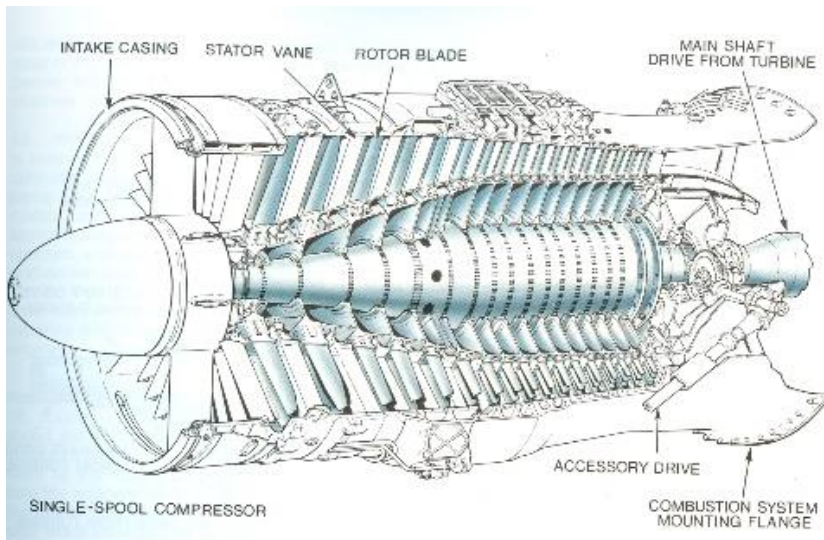
Er zijn twee soorten compressors.

De *centrifugale* compressor (zie de eerste tekening) bestaat uit een schoepenwiel dat de lucht naar buiten slingert en via een aantal buizen stroomt de lucht naar de verbrandingskamers. Maar net na de compressor verwijden die buizen zich en vormen een *divergerende* (of *wijd uitlopende*) doorgang. En dan gebeurt er iets bijzonders: de druk neemt toe. Bij de eerste straalmotoren bereikte men al een druk van 4 bar, uitgaande van de atmosferische druk. De drukverhouding is dan 1 : 4. Dus een divergerende opening zet snelheid om in druk.

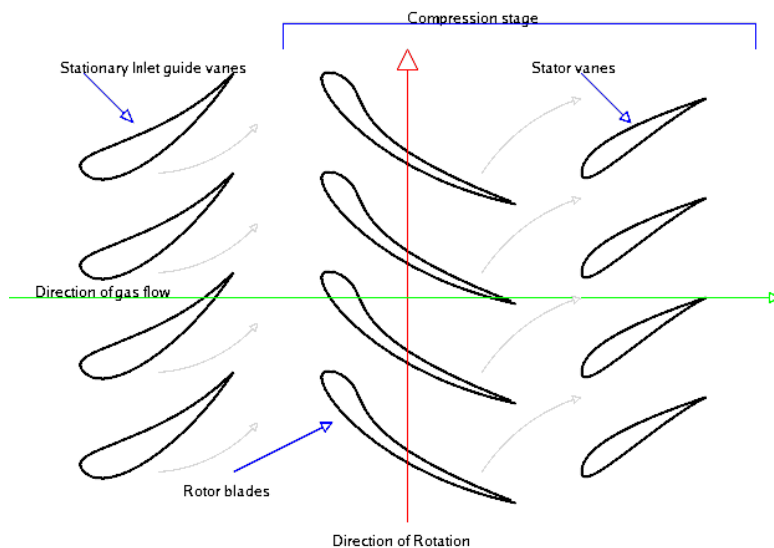
(Het omgekeerde kennen we allemaal: als je een tuinslang dichtknijpt, komt de straal verder doordat de druk van het water dan omgezet wordt in snelheid).



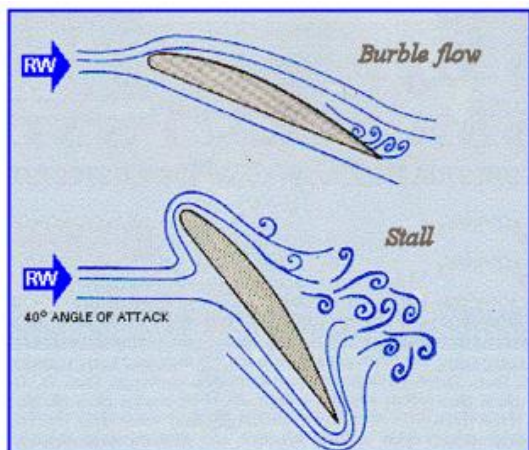
Een centrifugale compressor werkt betrouwbaar en was ook het eerste type dat in Groot-Brittannië en later in Duitsland werd gebruikt. Kleine straalmotoren voor helicopters en propellervliegtuigen maken bijna zonder uitzondering nog steeds gebruik van de centrifugale compressor, want die is "goedkoper". Er is een grens aan dit type, want als de diameter van het schoepenrad te groot wordt, kan het door de middelpuntvliedende kracht in stukken breken.



Bij de *axiale* compressor stromen de gassen parallel aan de as. Daarbij worden vaststaande *statorschoepen* en draaiende *rotorbladen* gebruikt. De *statorschoepen* zijn in de behuizing van de compressor aangebracht net zoals de leischoppen van een stoomturbine. En ook hier bestaat die behuizing uit twee delen. De rotorbladen zijn op een trommel gemonteerd. Aan het begin van de compressor bevindt zich een krans met stilstaande leischoppen om de lucht goed op de eerste set rotorbladen te richten.



Links op bovenstaande tekening zien we een krans met leischoppen. In het midden van de tekening zien we een gedeelte van de krans met draaiende rotorbladen. Die bladen geven de lucht snelheid. Aan de rechterkant zien we de statorschoepen die bij nader inzien divergerend uitlopen. Zij zetten de snelheid van de lucht om in druk. Een krans statorbladen en een krans rotorbladen vormen een *druktrap*. Helaas is de opbrengst per druktrap niet zo hoog. In het beste geval wordt de druk verdubbeld. Daardoor zijn er meerdere van die druktrappen achter elkaar nodig zijn. Op de tekening van de axiale compressor zijn 17 druktrappen te zien.



De rotorbladen van een axiale compressor kennen maar een klein gebied waarin ze goed werken, wat betreft rotorsnelheid, temperatuur en toegevoerde lucht. Het kan snel mis gaan

en dat komt door de vleugelvorm zowel de rotor- als de statorbladen. We kunnen ze het best vergelijken met een vliegtuigvleugel. Bij een vliegtuig geeft die draagkracht, waardoor het stijgt en in de lucht blijft. Stel, dat het vliegtuig te steil wil optrekken, dan wordt de



voorwaartse snelheid lager. Als die snelheid te laag wordt laat de luchtstroom aan de bovenzijde van de vleugel los, waardoor de draagkracht verdwijnt en het vliegtuig naar beneden valt. Dit heet een *stall*.

Bij een axiale compressor kan ook een stall optreden. Dit heet een *compressor stall*. Dat gebeurt bijvoorbeeld omdat er een vogel in de motor vliegt, zoals hierboven. Of als een straaljager vanuit horizontale vlucht plotseling sterk schuin omhoog vliegt. Er komt dan te weinig lucht in de motorinlaat en kan er door "ademnood" ook een compressor stall optreden. In beide gevallen valt de compressie plotseling uit en de opgebouwde druk achter de compressor, die tegenwoordig 20 – 40 bar bedraagt, komt opeens vrij. Dat kan de compressorbladen vernielen.

Bij het opstarten van een straalmotor kan er een situatie ontstaan waarbij de compressor meer druk levert dan de verbrandingskamer en de turbine op dat moment aan kunnen. Die ophoping van lucht kan ook een compressor stall veroorzaken. In dit geval kan men een klep gebruiken die de overtollige perslucht laat weglopen. Maar dat is zonde van de energie.

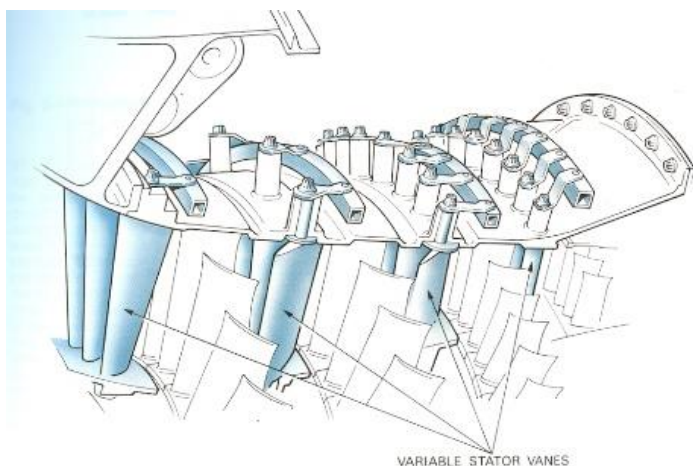


Fig. 3-15 Typical variable stator vanes.

Een betere oplossing wordt gevormd door de *variable guide vanes* of variabele leischoepen. Dat zijn ook stator schoepen die in de behuizing gemonteerd zijn, maar ze kunnen om een as draaien. Men hoeft ze niet voor alle druktrappen te gebruiken, maar alleen in de eerste drie of vijf van de compressor. Ze zijn via armpjes verbonden met een ring en alle ringen worden tegelijkertijd verdraaid. Uiteindelijk zet één hydraulische cilinder alles in beweging en een elektronische regelunit zorgt voor de juiste uitslag. Vergelijk het met luxaflex. Als we minder zonlicht willen, dan draaien we de lamellen wat dichter.

De tekening van de axiale compressor laat ook zien dat de rotor- en statorbladen steeds korter worden naarmate de druk -en ook de temperatuur- hoger wordt. Bij elke druktrap horen een bepaalde druk en temperatuur. Op diverse plaatsen in de compressor kan die lucht afgetapt worden. Vooraan, waar de druk nog niet zo hoog is, wordt de lucht afgetapt voor de cabine van het vliegtuig Maar die lucht is al behoorlijk warm en moet dus gekoeld worden. Op de grond gebeurt dat door de airco en hoog in de lucht door de  $-50^{\circ}\text{C}$  omgeving. Voor ontijzing van de vleugels wordt hetere lucht gebruikt. Aan het eind van de compressor kan de temperatuur van de luchtstroom wel  $550^{\circ}\text{C}$ . bedragen. Die hete lucht gaat naar de verbrandingskamers, maar een klein gedeelte wordt ook gebruikt om de turbinebladen te koelen. Gezien de tegenwoordige temperaturen en krachten worden voor de compressor titanium en nikkel gebruikt.

### de verbrandingskamer

Dat is het hart van de straalmotor, waar grote hoeveelheden brandstof met enorme volumes lucht uit de compressor worden verbrand. Na de verbrandingskamer is er een gelijkmatige stroom gas ontstaan met een temperatuur van maximaal  $1700^{\circ}\text{C}$ . De verbrandingskamer zorgt voor een stabiele verbranding over een groot bereik aan werkcondities.

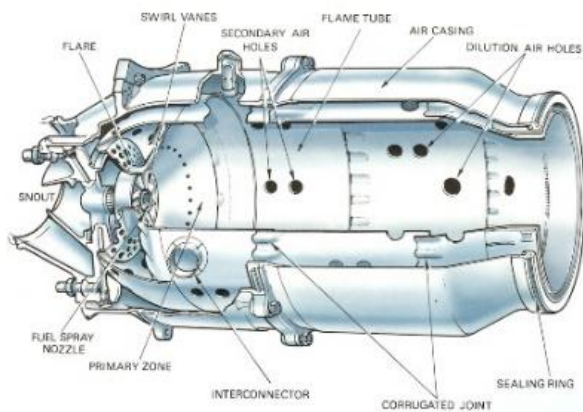


Fig. 4-1 An early combustion chamber.

De klassieke verbrandingskamer is een buis waarin een vlambuis zit. In de vlambuis is het gebied waar de verbranding plaatsvindt. Meestal werden er een stuk of negen in een krans toegepast. De inkomende lucht heeft een snelheid van 550 km/h. Een vlam heeft daarin geen kans om te blijven branden. Gelukkig heeft de verbrandingskamer een divergerende ingang, dus de luchtsnelheid van de compressor wordt meteen al omgezet in druk. De luchtsnelheid is in de verbrandingskamer al lager, maar nog steeds te hoog voor de vlam want kerosine (een zuivere soort petroleum) verbrandt met een snelheid van  $\pm 60$  cm/sec. Daarom heeft men voor de vlam een beschermingsschild geplaatst. De mengverhouding in de verbrandingskamer is 15:1 (dus 15 gewichtseenheden lucht en 1 gewichtseenheid brandstof).

Om voor een goede verbranding te zorgen wordt de brandstof heel fijn verstoven. Van alle lucht die in de verbrandingskamer stroomt is 20% voor de verbranding zelf en de rest is voor de koeling van de vlambuis en om de temperatuur naar beneden te brengen voordat de gassen in de turbine komen, want de kerosinevlam in de vlambuis kan een temperatuur hebben van  $1800^\circ$  tot  $2000^\circ$ .

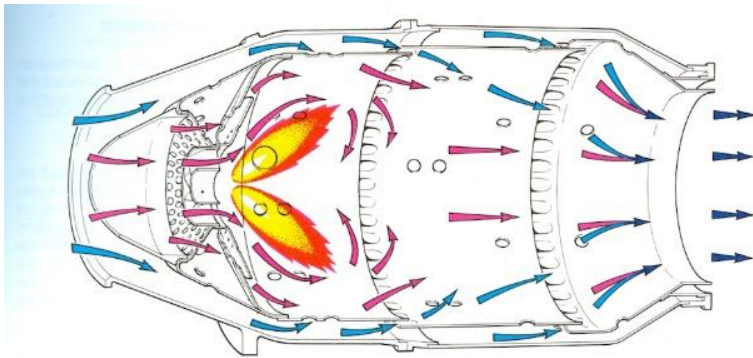


Fig. 4-3 Flame stabilizing and general airflow pattern.

In de tekening zien we dat de koelere lucht die aanvankelijk om de vlambuis stroomt (de blauwe pijltjes) en dan door gaten en openingen in de gegolfde verbindingen de vlampijp binnenstroomt. Daar koelen ze de gassen iets af.

Alle verbrandingskamers zijn met elkaar verbonden door middel van buizen. Een, of hoogstens twee verbrandingskamers hebben een bougie. Die ontsteekt de brandstof tijdens het starten. Daarna moet de verbranding zichzelf onderhouden. Via de verbindingspijpen worden ook de andere verbrandingskamers aangestoken. Indien de vlam in een verbrandingskamer zou doven steken de naburige verbrandingskamers hem weer aan.

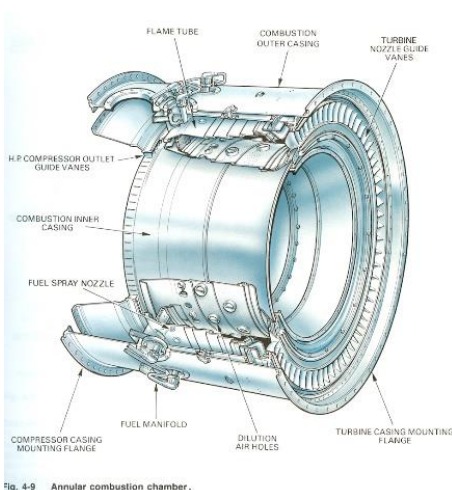


Fig. 4-9 Annular combustion chamber.

De meeste straalmotoren hebben tegenwoordig een ringvormige verbrandingskamer. Die is eenvoudiger van ontwerp. De vlam verspreidt zich snel door de hele verbrandingskamer. Ze kunnen ook meestal een kwart korter gebouwd worden. En dat is weer gunstig om de vorming van stikstof oxiden terug te brengen, want de weg van het verbrandingsproces is korter.

Het gaat er in de verbrandingskamer heftig aan toe. Bij een RR RB211-524, die gebruikt wordt in de Boeing 747, wordt per uur 9360 kg kerosine verstoekt (11.700 liter). Dat levert 22.700 kg stuwdruk op. En dat natuurlijk maal vier. Om dat om te zetten in paardenkrachten is niet zo eenvoudig, want het hangt van een aantal factoren af. Op Aviodrome houden we het voor de 747 die daar staat op 25.000 pk per motor. Het spreekt vanzelf dat men voor de verbrandingskamer de beste hittebestendige materialen kiest, die ook nog bestand moeten zijn tegen corrosie en metaalmoeheid vanwege de enorme trillingen.

### **de turbine**

Die is tot op zekere hoogte goed te vergelijken met de huidige stoomturbines in elektriciteitscentrales. Alleen gaat het hier niet om stoom, maar om zeer hete gassen. We zien ook hier dat naarmate de turbinekransen energie onttrekken aan de gasstroom, de druk ook steeds lager wordt en daardoor de lengte van de turbine- en de statorbladen steeds groter wordt. Dus het omgekeerde proces in vergelijking met de compressor. De turbine onttrekt energie aan de hete gassen om de compressor en de fan te laten draaien. Die fan is eigenlijk de eerste trap van de compressor, maar je kunt hem ook prima vergelijken met een propeller, maar dan een met wel heel veel propellerbladen.

De turbine werkt in een ongelooflijke omgeving. De tips van de turbinebladen draaien met een snelheid van 1650 km/h bij temperaturen tot wel 1700° C. Hieronder zien we heel duidelijk de steeds langere stator- en turbinebladen, richting uitlaat (aan de rechterkant).



*v.l.n.r.: hogedruktrap compressor, ringvormige verbrandingskamer en de turbine van de RR Trent 900*

De draaiende bladen van de turbine (en ook die van de compressor) worden met een enorme kracht naar buiten geslingerd. Gelukkig zitten ze heel goed vast aan de schijf of trommel.

Een turbineblad van 130 gram kan door de centrifugale kracht een gewicht krijgen van een paar ton. Dan zijn er ook nog de axiale krachten in de turbine die de bladen willen verbuigen. De hitte van het binnenstromende gas in de turbine heeft een temperatuur die boven het smeltpunt van nikkelstaal ligt. Vandaar dat men tegenwoordig in de hogedruktrap van de turbine soms keramische materialen toepast.

De metalen turbinebladen moeten gekoeld worden. Daarom lopen er in de lengte- en dwarsrichting kleine kanaaltjes waardoor onder zeer grote druk lucht wordt geblazen. Het blad wordt niet alleen van binnenuit gekoeld, maar de lucht stroomt ook als een film rond het turbineblad.



Bij een werkende turbine zijn de turbinebladen roodgloeiend en er zijn bladen die per stuk een equivalent van 800 pk per blad aan de gasstroom onttrekken. Elk turbineblad heeft een draai die bij de tip groter is dan aan de voet van het blad. Hierdoor wordt de gasstroom gelijkmatig over het turbineblad verdeeld.

Net als in een stoomturbine treedt er op zeker moment “creep” op. Dat betekent dat het turbineblad in de loop der tijd iets langer wordt. Dit moment is te voorspellen. De beste metalen turbinebladen zijn daarom tegenwoordig als *single crystal* uitgevoerd. Normaal liggen de kristallen in een metaal schots en scheef door elkaar, als een zak suikerklontjes. Door een speciaal proces kan men alle kristallen oplijnen, zodat ze een strakke structuur krijgen.

Niet alleen de turbinebladen krijgen het te verduren. De leischoppen draaien weliswaar niet, maar moeten ook gekoeld worden met lucht uit de HD compressor.

Als we naar de tekening van de RR Trent 900 kijken, zien we bij de meest rechtse rij turbinebladen dat die bladen in een ring zitten. Die ommanteling wordt gevormd door een platte bovenkant van elk turbineblad (zie hierboven). Dat heeft men gedaan om de speling tussen de turbinebladen en de behuizing zo klein mogelijk te maken om zodoende lekkage van gas te voorkomen. En het geeft meer stevigheid aan de bladen. De speling tussen de turbine en de behuizing is daardoor zeer klein.

Wie nu denkt dat elke straalmotor op het randje van verbranden werkt heeft het mis. Er zijn straalmotoren die in 20.000 uur niet van de vleugel zijn gehaald. Ze zijn zeer betrouwbaar en er zijn veel piloten die gedurende hun loopbaan nog nooit een uitgevallen straalmotor hebben meegemaakt.

De turbine haalt vermogen uit de hete gassen. Bij de turboprop motoren, die propellers aandrijven of de wieken van een helicopter (turboshaft) is dat behoorlijk veel. Zoveel, dat de uitlaatgassen nog maar een bescheiden bijdrage aan de voortstuwing leveren.

Wat haast altijd ontbreekt in de beschrijving van straalmotoren is het vermogen dat de motor zelf weer opslokt. Een paar voorbeelden laten zien hoeveel vermogen er in de motor rond gaat.



Frank Whittle's W1 turbojet had een stuwdruk van 360 kg. Dat was bij 650 km/h te vergelijken met een zuigermotor van 1000 pk. Hij had de compressor van zijn motor graag afzonderlijk willen testen, maar de benodigde 3000 pk elektromotor daarvoor was te zwaar voor het elektriciteitsnet. Die enkele turbine trap slokte dus driemaal zoveel vermogen op als de uiteindelijke stuwdruk.

Een ander voorbeeld komt uit een KLM leerboek voor grondpersoneel over de JT9D turbofan motor van de eerste generatie Boeings 747, rond 1971.

De fan vraagt 32.500 pk, de lagedrukcompressor 13.000 pk en de hogedruk compressor 56.500 pk. Dat is dus totaal 102.000 pk die door de turbine uit de gasstroom wordt gehaald. De fan geeft 15.510 kg stuwdruk en de motor zelf 4225 kg. Dat is dus totaal 19.735 kg stuwdruk, te vergelijken met ongeveer 25.000 pk)

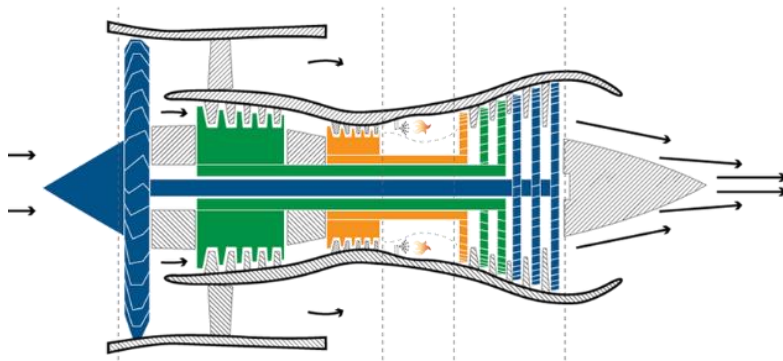


En dan komt de uitlaat. Achteraan de motor van deze RR Trent 500 zit een kegel na de laatste turbine schijf. De kegel is bevestigd met gestroomlijnde platte steunen. Die zorgen voor een gelijkmatige stroming van de gassen. De kegel zelf vormt eigenlijk een deel van divergerende opening in de uitlaatpijp en dus wordt hier weer snelheid omgezet in druk. Uit de foto blijkt duidelijk dat de omkapping van de motor een onmisbaar onderdeel van deze krachtbron uitmaakt. De omkapping van de motor zelf en de grote omkapping voor de luchtstroom van de fan, die op de achtergrond te zien is vormen het kanaal waar de grote luchtstroom passeert.

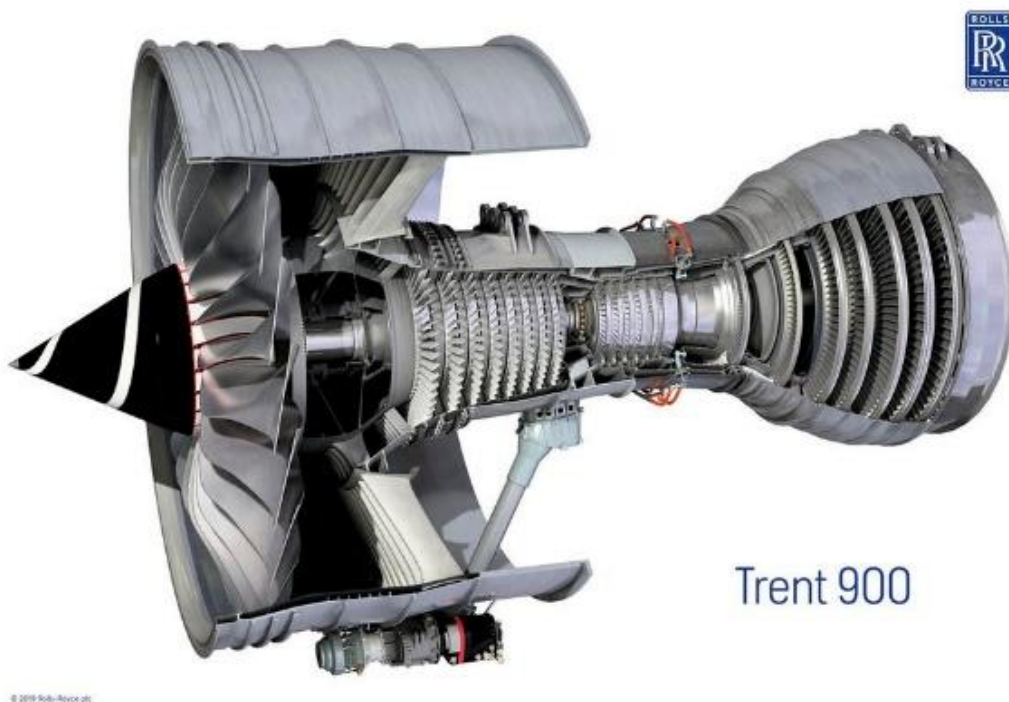
### de "high by pass" turbofan

Dat is het type dat al tientallen jaren wordt gebruikt voor de burgerluchtvaart.

In de jaren 1960 waren de straalmotoren beslist niet zuinig en vreselijk lawaaiig. Toen er veel grotere vliegtuigen op de tekentafels kwamen, moest er wel iets aan de motoren veranderen. En dat lukte door de turbofan sterk te verbeteren. De verhouding van de lucht die rond de motor stroomde ten opzichte van de lucht die door de motor zelf stroomde, de *bypass ratio*, moest omhoog. Die verhouding kreeg men in de nieuwe ontwerpen bijna tot 5 : 1 (dus er stroomt vijf maal zoveel lucht rond de motor als er door de motor zelf stroomt). En dat was te merken. De reusachtige Boeing 747 was veel stiller dan de oudere straalverkeersvliegtuigen. Het geheim zat in het mengen van de omloop luchtstroom met de uitlaatgassen, waardoor die sneller afgekoeld werden.



Met het krachtiger worden van de straalmotoren begon men eind jaren '40 in te zien dat de turbines niet efficiënt genoeg konden werken en dat het beter zou zijn om de turbine te verdelen in een hogedruk en een lagedruk deel en elke turbine dreef zijn eigen compressor aan. Dat betekende dat er twee assen over elkaar moesten draaien. Dit werd de *two shaft* of *two spool*, zoals de Engelsen dat noemen. RR ging nog een stap verder met de RB-211 (de latere *Trent* familie) Er werd nog een turbine/compressor combinatie toegevoegd en zo ontstond de "three spool" straalmotor. In de tekening hierboven zien we dat er drie turbinerotors nodig zijn voor de fan (LD, blauw), twee voor de middendruk compressor (MD, groen) en een voor de hogedruk compressor (HD, oranje). In een ideale situatie zou elke turbine krans zijn eigen compressor moeten aandrijven, maar dat is technisch niet haalbaar.



De motor hierboven is de RR Trent 900 waarvan er vier onder de vleugels van de Airbus 380 hangen. De stuwdruk is 36.000 kg en de by pass ratio 8,7 : 1. De druk in de verbrandingskamer is 39 bar.

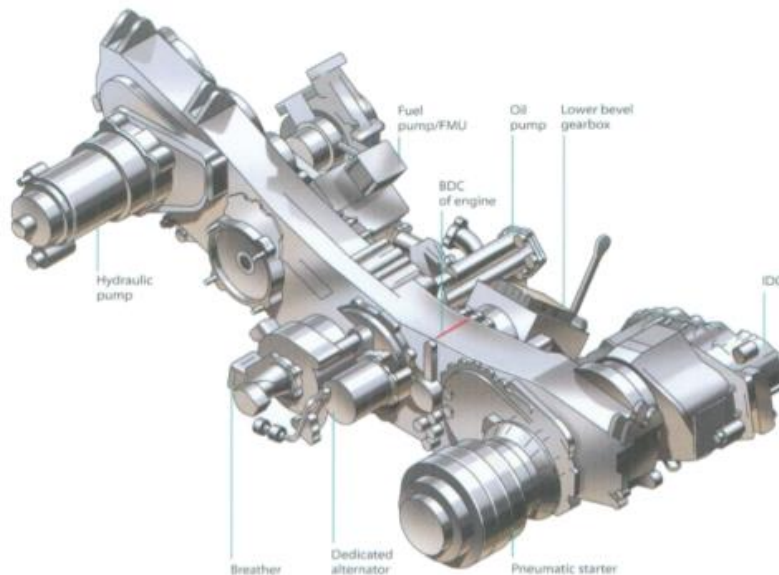
De LD turbine, dus de fan, draait 3000 tpm, aangedreven door een vijftraps turbine.  
 De MD turbine draait 7500 tpm aangedreven door eentrap turbine.  
 De HD turbine draait 12.500 tpm aangedreven door eentrap turbine.

De sterkste straalmotor ter wereld is de General Electric GE-90-115B met een stuwdruk van 51.400 kg. Twee van die 8760 kg wegende krachtpaters stuwen de grote Boeing 777 voort. En nog is de grens niet bereikt...

### starten

Tegenwoordig worden straalmotoren gestart met een *air starter*.

Dat is een kleine turbine die lucht ontvangt van 10 bar druk. Die druk wordt geleverd door de Auxiliary Power Unit (zeg maar hulpmotor) die zich meestal in de staart van het vliegtuig bevindt. Die APU levert ook de verse lucht en elektriciteit als het vliegtuig op de luchthaven staat. Naast de APU worden er ook wel compressorwagens gebruikt en de air starter kan ook werken op de luchtdruk van de andere draaiende motor(en).



De air starter bevindt zich aan de tandwielkast die meestal vooraan onder de motor is gemonteerd, onder de fan-ring. Die tandwielen worden aangedreven door de as van de HD compressor. De tandwielkast drijft de generator, de olie- en brandstofpomp en de hydraulische pomp aan. Door de tandwielen combinatie draait elke accessoire op zijn juiste snelheid.

De airstarter drijft via dezelfde tandwielkast weer de HD compressor aan. De combinatie HD compressor en de bijbehorende HD turbine worden daardoor het eerst op gang gebracht. Als die combinatie ("N2" in het vlieger jargon) op 15% van het nominale toerental draait wordt de brandstof toegevoerd. De motor begint te werken. Al snel komt het toerental op 28%, dat is "stationair". Als het toerental 50% is, wordt de startmotor uitgeschakeld. De gasontwikkeling laat inmiddels ook de combinatie van de LD compressor en de LD turbine ("N1") draaien. Dat geeft aanvankelijk het lage geluid dat we op zeker moment in het vliegtuig horen. (Deze gegevens gelden voor de General Electric CF6-80.)

Hans Walrecht

afbeeldingen Rolls Royce plc. en internet

Zie voor meer info <http://www.hansonline.eu/wright100/straalmotor.htm>

en voor animaties van straalmotoren:

<http://www.hansonline.eu/leerlink/youtubeembedded.htm>