

Straalmotoren

Het bouwen van een pulsejet motor



Auteurs: **Rob Bierbooms**
 Joris Goudsmits
Profiel: **Natuur & Techniek**
Onderwerp: **Straalmotoren**
Vakken: **Natuurkunde**
 Scheikunde

Profielwerkstuk “Straalmotoren” “Het bouwen van een pulsejet motor”

naam: **Rob Bierbooms & Joris Goudsmits**
© havovwo.nl februari 2004

INHOUDSOPGAVE

Voorwoord	2
Inleiding	2
De oriëntatie	
Geschiedenis	3
Soorten en werking	8
Toepassing	11
Het onderzoek	
Het bezoek aan de KLM Technische Dienst	
Vraagstelling	12
Opzet en uitvoering	12
Resultaten	12
Conclusie	17
Het technisch ontwerp van een pulsejet	
Vraagstelling	18
Uitvoering, resultaten en conclusie	18
Discussie	24
Evaluatie	25
Literatuurlijst	26

VOORWOORD

Wij hebben gekozen als onderwerp voor ons profielwerkstuk Straalmotoren en Pulsejets. Ons beider interesse lag in de richting van de luchtvaart. Hierbij gingen wij op zoek naar een onderwerp dat in deze richting lag en wat ons een uitdaging bood. Wij vonden hierbij als onderwerp de krachtbronnen van vliegtuigen ofwel de straalmotoren. Als uitdaging die wij dan aan zouden gaan, zouden wij een eigen pulsejet gaan bouwen.

Graag willen wij een aantal personen bedanken die ons tijdens de voortgang van ons profielwerkstuk enorm hebben geholpen; dit zijn:

Dhr. G.A. van Rooijen werkzaam bij de KLM Technische Dienst op de motorenafdeling op de afdeling ‘Engine outside services’.

Dhr. Berry Smetsers voor het laswerk en het leveren van de basismaterialen voor de pulsejet.

Dhr. Jan Goudsmits voor het beschikbaar stellen van het juiste gereedschap.

Guus Bertens voor het soldeerwerk en het leveren van de bougie.

INLEIDING

Wij hebben als onderwerp gekozen straalmotoren en het zelf bouwen van een pulsejet. Het basisprincipe van deze motoren is hetzelfde. Daarom willen wij ook de theorie van beiden gaan behandelen. Als hoofdvraag voor ons onderzoek hebben we gekozen voor:

Hoe bouwen we zelf een eenvoudige, maar zo optimaal mogelijk presterende straalmotor?

Als oriëntatie willen wij niet alleen de techniek van de diverse straalmotoren behandelen, maar willen wij ook kijken naar de geschiedenis achter de straalmotoren, hoe men tot het ontwerp van een moderne straalmotor van vandaag de dag is gekomen. Daarnaast willen we alle toepassingen van straalmotoren gaan bekijken. Zo zijn we tot de volgende deelvragen gekomen:

- Hoe heeft de straalmotor zich in de geschiedenis ontwikkeld?
- Hoe werken de verschillende soorten straalmotoren?
- Waarvoor worden de verschillende soorten straalmotoren ingezet?

Naast dit zijn wij nog bij de KLM Technische Dienst geweest om nader in te gaan op de praktijkuitvoering van straalmotoren in de burgerluchtvaart. Ook proberen wij daardoor een beter beeld te krijgen van de opbouw van een straalmotor. Als subvraag hebben we gekozen voor dit onderdeel:

- Wat komt er bij de praktijktoepassing van straalmotoren in de luchtvaart allemaal kijken?

Hiernaast, en hier draait ons hele onderzoek om, maken wij zelf een technisch ontwerp van een pulsejet. Hierbij proberen wij een vast proces te doorlopen wat uiteindelijk moet resulteren in ons definitief ontwerp. Hieronder staat dit proces beschreven:

- Hoe ziet het ontwerp van een simpele straalmotor eruit?
- Hoe gaan we ons ontwerp bouwen?
- Welke metingen kunnen we verrichten (en daarbij verwerken) aan ons prototype?
- Hoe kunnen we ons prototypeontwerp optimaliseren?
- Wat zijn de optimale omstandigheden voor een zo goed mogelijk functionerende motor?

DE ORIËNTATIE

Geschiedenis

De ontwikkeling van gas turbines kwam al zeer vroeg op gang. De theorie van de gas turbines was dan al ook lang bekend voordat de geschikte materialen voorhanden waren. Voor het bouwen van een gas turbine waren de materialen vereist die bestand waren tegen hoge temperaturen en waarbij de materialen efficiënter waren te verwerken dan dat ze tot dan toe waren.

De ontwikkeling van de gas turbines wordt gekenmerkt door een grote reeks met patenten aangevraagd door diverse ontwerpers. De eerste die dit deed was John Barber die in 1791 een patent vastlegde op een zeer eenvoudige gas turbine. Pas in 1939 was het Brown Boveri gelukt om als eerste een werkend exemplaar te bouwen.

De gas turbine werd in eerste instantie niet ontwikkeld voor de toepassing in de luchtvaart. De eerste exemplaren werden gebruikt in elektriciteitscentrales, meestal als stand-by elektriciteit leverancier omdat deze modellen nog niet de rendabiliteit van meer conventionele manieren van stroomopwekking hadden. Belangrijk was hier dat deze noodaggregaten de basis vormden van de verdere ontwikkeling van de gas turbines tot hoe ze op de dag van vandaag zijn; uiterst gecompliceerde krachtbronnen die aan alle eisen van vandaag de dag voldoen zoals geluidsproductie, brandstofverbruik en betrouwbaarheid.

Periode van 1791 tot 1930

Ondanks de vele patenten die sinds 1791 op diverse ontwerpen van gas turbines zijn gelegd zijn er nauwelijks ontwerpen geweest die het rendement hadden om de moeite waard te zijn om over te gaan op de bouw van deze ontwerpen. Het begon allemaal met John Barber in 1791 die het eerste patent legde op zijn ontwerp van een gas turbine. Het is nog steeds niet zeker of dit model ooit gebouwd is, echter was het een goede basis voor de latere ontwerpen.

De volgende die een belangrijke rol speelde in de ontwikkeling was de Heer Stolz. In 1872 legde hij een patent op een model dat op verschillende gebieden vooruitgang bood. Het had onder andere een turbine die uit meerdere stages bestond, maar wel in dezelfde schacht zat. Deze motor had ook een aparte verbrandingsruimte. Het ontwerp van Stolz begon in de grote lijnen al te lijken op het huidige model en legde toentertijd opnieuw een goede basis voor verdere ontwikkeling.

Na het ontwerp van Stolz zijn diverse mensen verdergegaan met ontwerpen met als doel een niet alleen werkend model te maken, maar ook nog eens een model dat rendabel was. Op 24 juni 1985 kwam Charles G. Curtis, woonachtig in de USA, met een patent op een ontwerp van een volledige gas turbine.

In Frankrijk stonden ze ook niet stil. De heer Stolze bouwde namelijk een eerste werkende gas turbine rond 1900. Dit leidde echter nog steeds niet tot een model dat voldeed aan de eisen die er gesteld werden om hem in te zetten. Het was vooral de lage efficiëntie die Stolze ontmoedigde.

Wat meer succes hadden de twee Armangand broers. Zij bouwden op grote schaal een gas turbine. De eerste tests werden gedaan met de ‘25-hp de Laval Turbine’ en zij maakten daarbij gebruik van compressor lucht uit de centrales bij Parijs. Een later motor die zij bouwden had onder andere een Curtiss wiel voor de Turbine met een diameter van 95 cm die draaide met 4250 toeren per minuut. Zij maten tijdens tests een temperatuur van 560 °C. Deze motor leverde gecomprimeerde lucht in plaats van mechanische kracht. Van de kracht van de motor ging 97% verloren aan warmte.

Van 1930 tot 1945

Brown Boveri

Deze periode wordt gekenmerkt door Brown Boveri. Hij is in deze periode een pionier geweest voor de ontwikkeling van gas turbines voor het gebruik in stroomcentrales. Het begon bij hem allemaal bij de ontwikkeling van lucht compressors door verbranding van een brandstof. Deze werden gebruikt in Velox boilers in 1932. De eerste modellen die hij ontwierp hadden nog aanvullende kracht nodig van buitenaf om te blijven draaien, latere ontwerpen konden door middel van zelfherladende sets genoeg kracht krijgen om zelf te blijven draaien. In november 1936 werd Boveri benaderd door Sun Oil company gevestigd in Philadelphia om een Superlader te maken die genoeg energie kon opleveren om koolstof residuen op te laten branden. Dit was een geheel nieuwe inzet van de gas turbine technologie voor Boveri.

naam: **Rob Bierbooms & Joris Goudsmits**

© havovwo.nl februari 2004

In 1939 slaagde Brown Boveri erin een redelijke gas turbine te bouwen voor een elektriciteitscentrale. Deze leverde een vermogen van 4000 kW. Deze motor werd gedemonstreerd tijdens de ‘Swiss National Exhibition’ in Zurich in 1939. In 1940 werd deze ingebouwd als noodgenerator in de ondergrondse elektriciteitscentrales van Neuchatel. In 1953 had deze slechts 1200 uur gedraaid, voornamelijk omdat het maar een back-up stroomvoorziening was.

Table 1.1 Results of tests run by Stodola of the Neuchatel Gas Turbine

Item	Test I	Test II	Test III
Load (kW)	Light	4.021	3.067
Fuel	Fuel oil	Fuel oil	Fuel oil
Compressor Pressure Ratio	3,82	4,38	4,28
Compressor efficiency (%)	86,4	86,6	86,9
Compressor speed (rpm)	3.020	3.020	3.030
Compressor air flow, lb/h	499,620	498,176	498,049
Turbine inlet temperature (°F)	705,2	1.067	987,8
Turbine efficiency	85,4	88,4	88,4
Fuel consumption (lb/kWH)	--	1,078	1,193
Thermal efficiency (%)	--	18,04	16,37

Bron: A. Stodola, Loads of tests of a combustion gas-turbine built by Brown Boveri

Hierboven zijn de testresultaten van de bovengenoemde motor te zien. Wat als eerste opvalt, is de lage Thermal efficiency wat weergeeft dat dit model nog verre van optimaal is alhoewel het wel naar behoren functioneert. Ook is er te zien dat hier olie wordt gebruikt als brandstof. Waarschijnlijk hebben ze dit gebruikt vanwege het hoge octaangetal van olie. Nu gebruiken wij kerosine voor de straalmotoren.

Te zien is dat het vermogen oploopt tot meer dan 4000 kW. In de turbine lopen de temperaturen dan ook hoog op, tot 1000 graden Celsius.

Deze tests zijn toentertijd uitgevoerd door Stodola die door Brown Boveri hiervoor speciaal was uitgenodigd. Deze zijn samengevoegd in een bundel, waar deze tests ook uit komen.

Britse pogingen

In de periode tussen 1930 en 1940 zijn er in Engeland twee groepen mensen geweest die begonnen met de ontwikkeling, bouw en het testen van Gas Turbines, met als functie een vliegtuig aan te drijven. Deze twee waren Whittle en Griffith & Constant. Van deze twee behaalde Whittle de meest vooruitstrevende resultaten.

Het eerste patent dat Whittle op een ontwerp legde was in 1930, een turbojet met een zogenaamde ‘centrifugal flow compressor’. Dit ontwerp kwam echter niet verder dan het papier wegens geldgebrek. Whittle was hier druk mee bezig; hij probeerde meerdere malen subsidie te krijgen bij de overheid of met de steun van diverse bedrijven maar dit was niet erg erg succesvol. Dit resulteerde erin dat in de periode van 1930 tot 1936 alleen maar papierwerk werd geleverd. Testen kwam hij niet aan toe wegens geldgebrek.

Na 1936 was het voor Whittle wel mogelijk diverse tests te doen. Dankzij zijn inzet ontstond Power Jets Ltd. Zij hadden als ontwerp een simpele jet engine, straalmotor, met een centrifugaal compressor die uit één stage bestond, een aparte verbrandingsruimte in de motor en een verbeterde luchtinlaat. Zij startten met testen van dit model op 12 april 1937. Uit deze tests werd al snel duidelijk dat er grote problemen waren met dit model omtrent de verbrandingsruimte. Het rendement van de motor was ook niet erg hoog.

Als gevolg van deze problemen kwam Power Jets op 16 april 1938 met een nieuw ontwerp. Dit ontwerp liep tijdens een van de tests grote schade op aan de bladen van de turbine. Daarom kwamen ze snel hierna met een 3e ontwerp. Dit was in oktober van het jaar 1938. Het verantwoordelijke Engelse ministerie zag dankzij de goede vooruitgang nu wel toekomst in Power Jets en vandaar besloten zij in de zomer van 1939 een contract met hen voor de ontwikkeling van de W1 met als toepassing de luchtvaart aan te gaan. De tests met deze motor begonnen in 1941. Enkele resultaten zijn hieronder weergegeven.

naam: Rob Bierbooms & Joris Goudsmits

© havovwo.nl februari 2004

Table 1.2 Leading Particulars of the W1 Engine

Compressor impeller		
Tip diameter (inch.)		19
Tip width (inch.)		2
Number of blades		29
Type		Centrifugal
Turbine		
Mean diameter of blades (inch.)		14
Blade length (inch.)		2,4
Number of blades		72
Typical performance at 16.500 rpm		
	Design	Test
Air flow (lb/s)	22,6	20,6
Delivery pressure (psig)	33	31,5
Thrust (lb)	900	850
Exhaust temperature (°C)	530	560
Thrust specific fuel consumption (lb/lb h)	1,19	1,39

Bron: R. Schlaifer, Development of Aircraft engines and fuels

Te zien is dat deze motor Thrust (=stuwkracht) levert in plaats van elektrische kracht. Dit is het kenmerk van de toepassing in de luchtvaart. Dit model levert al aardig wat stuwkracht en Whittle was dan ook goed op weg met dit model.

Amerikaanse pogingen

In Amerika waren ze vooral bezig met het bestuderen van de theorie. Hierbij werden er diverse modellen ontworpen, geen van hen behaalde de successen die ze tot dan toe in Europa hadden behaald. Dit werkte enigszins ontmoedigend en daarom had het niet zo'n hoge prioriteit in Amerika.

Van 1945 tot 1950

In deze periode ging de ontwikkeling snel vooruit. In de 2^e wereld oorlog lag de gehele ontwikkeling op een laag pitje maar daarna zat iedereen weer in de race. Subsidie van de overheid kon makkelijk worden verkregen. In het begin begonnen er veel met het ontwerpen van een straalmotor, slechts enkelen van hen bleven over. Op de volgende pagina staat een tabel waarin de eigenschappen op een rij staan van de motoren/motorenbouwers die successen hadden behaald met hun motor.

Profielwerkstuk “Straalmotoren” “Het bouwen van een pulsejet motor”

naam: **Rob Bierbooms & Joris Goudsmits**
 © havovwo.nl februari 2004

Data van de verschillende ontwerpen jet engines in 1946						
Model	I-16	I-40	Welland I	Derwent I	Nene	Jumo 004-B4
Manufacturer	General Electric	General Electric	Rolls Royce	Rolls Royce	Rolls Royce	Junkers
Type	Turbojet	Turbojet	Turbojet	Turbojet	Turbojet	Turbojet
Compressor:						
Type	Centrifugal, double entry	Centrifugal, double entry	Centrifugal, double entry	Centrifugal, double entry	Centrifugal, double entry	Axial flow
Stages	1	1	1	1	1	8
Pressure ratio	3,8	4,1	-	3,9	-	3,0
Combustion chamber						
Type	10 chambers, reverse flow	14 chambers, straight-through flow	10 chambers, reverse flow	10 chambers. Straight-through flow	9 chambers, straight-through flow	6 chambers. Straight-through flow
Turbine:						
Type	Axial	Axial	Axial	Axial	Axial	Axial
Stages	1	1	1	1	1	1
Inlet temp.	1472 °F	1472 °F	-	1560 °F	-	1472 °F
Efficiency	90%	-	-	-	-	80-85%
Exit temp.	1220 °F	1170 °F	1202 °F	1256 °F	1238 °F	1150 °F
Air flow (lb/s)	33	79	-	-	-	43
Weight/thrust	0,53	0,46	0,53	0,49	0,31	0,82
Frontal area (ft ²)	9,39	14,7	10,1	10,1	13,4	4,9
Fuel Cons. (lb/lbt/h)	1,20	1,18	1,12	1,17	1,06	1,40
Rating, take-off thrust						
Normal (lb t)	1425	3200	1150	1550	4360	1900
Military (lb t)	1600	4000	1600	2000	5000	1980

In de tabel is te zien dat het drie fabrikanten zijn die concurreren op het gebied van de ontwikkeling van de straalmotor. General Electric en Rolls Royce zijn op het moment een van de grootste motorenbouwers.

In bijna alle motoren wordt dezelfde compressor gebruikt, de centrifugaal. Opvallend is dat degene zonder conventionele compressor betere resultaten behaald als je kijkt naar het gewicht/stuwkracht ratio. Voor de rest is er te zien dat er onderling weinig afwijking zit in de resultaten. Het is dus een nek aan nek race voor het beste ontwerp van jet engine.

In de Tweede Wereldoorlog was de W1 al ingezet als motor voor vliegtuigen. Ook hierna werd hier breed op getest. General Electric ging zijn ontwerpen op grotere schaal bouwen om meer kracht te kunnen leveren. Hieruit ontstonden respectievelijk de I-14, de I-16, de I-20 en de I40's. Deze I-40 kon een kracht leveren tot 4000 lb zoals in de bovenstaande tabel al te zien is. Ondanks dat de I-20 minder brandstof verbruikten was de I-40 de meest populaire vanwege zijn enorme stuwkracht.

1950 tot 2003

Na de periode 1950 ging alles snel. Het basisprincipe was er, de ontwerpen lagen er, er waren fabrikanten die ontwerpen hadden en in staat waren ze te bouwen. In het begin werden ze al breed toegepast.

In de periode 1950-1960 werden ze dus al wel toegepast maar op een introducerende manier. Er werd die periode qua ontwikkeling vooral gewerkt aan materialenstudie om alternatieven te bestuderen, koeling in de motoren en de brandstof. Enkele kleinere motorbouwers werden gedwongen eruit te stappen; zij waren te zwak in deze sector en werden gedwongen te stoppen wegens te weinig belangstelling.

Profielwerkstuk “Straalmotoren” “Het bouwen van een pulsejet motor”

naam: **Rob Bierbooms & Joris Goudsmits**
© havovwo.nl februari 2004

In de jaren 1960 tot 1970 werd er in de ontwikkeling vooral veel aandacht besteed aan de efficiëntie van de motoren en de kosten die daarbij gepaard gaan. Immers hoe efficiënter een straalmotor draait, hoe minder verlies van vermogen je hebt. Ook werden er in deze periode andere en betere materialen gevonden en kon de koeling nog verder geoptimaliseerd worden.

Het brandstofverbruik werd verbeterd en met een resultaat van een vermindering van 15% door de toepassing van nieuwe turbofans waren de bouwers erg tevreden. In deze periode werd door Rolls Royce een serie motoren geïntroduceerd die we vandaag de dag nog kennen. De Trent serie begon in december 1967. Om even een voorbeeld te geven, gloednieuwe Boeing 777's met Rolls Royce motoren zijn uitgerust met de Trent896. De grondslag hiervan ligt dus in 1967. Ook diende de nieuwe Trent serie als basis voor de RB211 die we nog steeds op de 747's kennen.

Van 1970 tot 1980 werd er veel aandacht besteed aan de richting van de uitkomende lucht uit de motoren. Met de grootschalige invoering van straalmotor aangedreven vliegtuigen ontstond er geluidsoverlast. Vanwege ingevoerde normen was het noodzakelijk hiernaar te kijken. Ook werd er aandacht besteed aan het brandstofverbruik. De prijs van de brandstof was gestegen dus keek men opnieuw hoe ze het huidige ontwerp beter konden maken in de zin van gewicht, betrouwbaarheid, prijs, hoe gemakkelijk het te bouwen valt en prestatie.

In de periode na 1980 is men gaan doorontwikkelen op huidige modellen. De motorenfabrikanten zijn vooral gaan kijken naar de vliegtuigbouwers om een motor te ontwikkelen die op een bepaald type is afgestemd. Ook is er sinds 1980 veel gedaan om het geluid te verminderen. De normen op dit gebied worden steeds strenger. Om deze reden koos Airbus ervoor om een toestel niet met 2 luidruchtige maar met 4 stille motoren (die per stuk minder kracht leveren) uit te rusten. Ook proberen de motorenfabrikanten steeds weer naar manieren te zoeken om het brandstofverbruik te verlagen. Immers is de afstand dat een vliegtuig kan vliegen voor een groot deel afhankelijk van het brandstofverbruik en stoppen onderweg zou bovenop de hogere kosten voor groter verbruik nog meer extra kosten met zich meeslepen.

Al met al zijn de ontwerpers en fabrikanten van straalmotoren er in geslaagd straalmotoren van de kwaliteit af te leveren waarbij de betrouwbaarheid zeer goed is.

Soorten en werking

In de periode dat straalmotoren zijn ontwikkeld, zijn er verschillende soorten ontstaan om voor ieder doel een geschikte motor met de juiste eigenschappen te creëren. Over de toepassing van de verschillende types gaat het volgende hoofdstuk. Hier beschrijven we welke straalmotoren er zijn en hoe ze globaal werken. De precieze werking van de huidige straalmotoren houden alle fabrikanten geheim om te kunnen concurreren. Bovendien is het te moeilijk om alle formules te begrijpen die tot de ideale motor moeten leiden.

Soorten

Hoofdzakelijk zijn straalmotor, als je kijkt op welke manier de compressie plaatsvindt, in twee typen te verdelen: de stuwstraalmotor, zonder compressor, en de turbijnstraalmotor, met compressor.

Bij de stuwstraalmotoren zijn er maar twee soorten te onderscheiden. De zogenaamde *ramjet*, een stalen buis met daarin een *ram* en een pulserende straalmotor, *pulsejet*. Een afgeleid type van de *ramjet* is de *scramjet*.

De *pulsejet* is verreweg de meest eenvoudige om zelf te bouwen. Stuwstraalmotoren hebben immers (bijna) geen bewegende onderdelen en zijn eenvoudig qua bouw. Daarnaast zijn *pulsejets* zelf simpel te testen, in tegenstelling tot (*sc*)*ramjets*. Hierover meer in de alinea over de typen motoren.

De verschillende typen turbijnstraalmotoren zijn gebaseerd op één principe, namelijk dat van de *turbojet* (afkomstig van turbine jet engine, turbijnstraalmotor). De drie hoofdzakelijke afgeleide motoren zijn de *turboprop*, de *turbofan* en de *turboshaft*.

Ramjet/Scramjet

Door snelheid waarmee de *ramjet* (fig. 1) door de atmosfeer beweegt, wordt de binnenstromende lucht gecompriemd bij de *ram*. Door deze vorm van compressie zijn grote snelheden, minimaal 600 km/u, noodzakelijk om de motor te laten werken. Boven de geluidssnelheid zijn *scramjets* sneller. Deze bedoelde snelheden zijn echter de snelheden waarmee de luchtstroom de ontbrandingskamer passeert. Een *ramjet* kan zodoende toch tot ongeveer mach 2,5 vliegen, bij de inlaat wordt de lucht namelijk tot onder mach één vertraagd. In de verbrandingskamer verbrandt het daar ingespoten gas. De uitzetting van de hete gassen na de ontbranding in de straalpijp veroorzaakt een versnelling die ervoor zorgt dat de gassen met grotere snelheid de motor verlaten dan waarmee ze binnen zijn gekomen, waardoor een positieve kracht ontstaat.

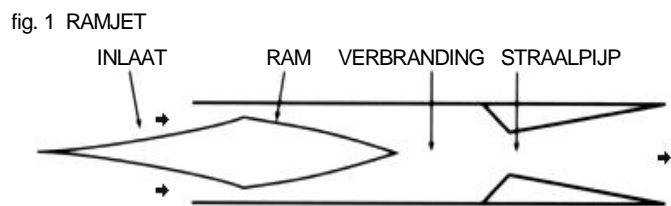
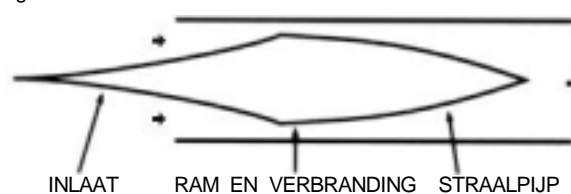


fig. 2 SCRAMJET



Scramjet staat voor Supersonic Combustion Ramjet (supersonische verbrandings ramjet). Het verschil met de *ramjet* is dat de verbranding plaatsvindt met lichtsnelheden door de motor die boven de geluidssnelheid liggen. Mechanisch is dit een erg simpel model (fig. 2), maar aërodynamisch gezien veel complexer. De normaal gebruikte brandstof is waterstof.

Pulsejet

De *pulsejet* is veel meer geschikt voor de lagere snelheden en dus makkelijk zelf te testen.

Er zijn twee soorten: met en zonder luchtventiel, *valve*.

Omdat het technisch ontwerp over dit type straalmotor gaat, beschrijven we in het hoofdstuk over ons onderzoek een uitgebreide verklaring van de werking.

naam: Rob Bierbooms & Joris Goudsmits
 © havovwo.nl februari 2004

Turbojet

Turbojets (fig. 4) zijn theoretisch gezien erg simpel. Ze bestaan uit drie belangrijke onderdelen (fig. 3). Een compressor, die de binnenkomende lucht tot een hoge druk comprimeert. Een ontbrandingskamer, waarin de lucht onder hoge druk en met veel snelheid tot ontbranding wordt gebracht met de ingespoten brandstof. Ten slotte een turbine, die de energie van de uitlaatgassen, die een hoge snelheid hebben, eruit haalt. Deze energie wordt door middel van een as op de compressor overgebracht, zodat het complete systeem zichzelf ronddraait.

fig. 3 TURBOJETPRINCIPE

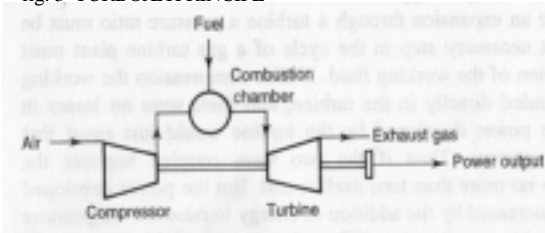
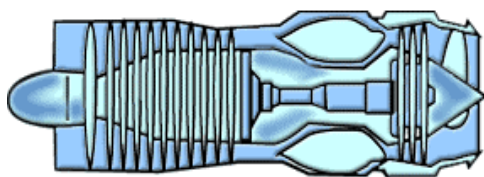


fig. 4 TURBOJET



De resterende (expansie)energie dient in de straalpijp voor de straalvoortstuwing. Door verlies van wrijvingsenergie in het eerste en laatste deel van het systeem, is de motor alleen rendabel als de samengeperste lucht extra energie krijgt door middel van ontbranding. Via wiskundige modellen is de optimale lucht/zuurstof verhouding te berekenen. De maximale belasting hangt echter af van de temperatuur, deze kan oplopen tot rond de duizend graden Celsius, die de onderdelen aankan. Daarom is het van enorm belang dat de materialen van de motor extreem hittebestendig en duurzaam zijn.

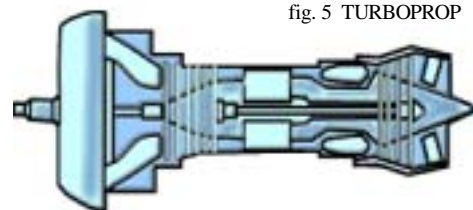
Het is van belang dat elk van de drie onderdelen, in de andere modellen kunnen dit er meer zijn, apart worden ontwikkeld. Juist in die zin, dat ze individueel kunnen worden ontworpen, gebouwd, getest en verbeterd.

Dit basisprincipe van de *turbojet* kan met verschillende onderdelen efficiënter worden gemaakt, zodat je een groter rendement en/of een grotere stuwkracht krijgt. Zo kan er een warmte wisselaar tussen de uitlaat- en de inlaat gassen komen om de temperatuur van de gassen voor de verbranding beter te maken. Daarnaast kan er nog een *afterburner*, een naverbrander, tussen de turbine en de straalpijp worden geplaatst. Extra brandstof zorgt voor aanvullende stuwkracht. Door het lage rendement, wordt deze methode slechts kort en alleen op noodzakelijke momenten gebruikt zoals het plotseling veranderen van de snelheid of het korter maken van een startweg. Andere aanpassingen hebben geleid tot nieuwe typen straalmotoren, zoals de meeste mensen die kennen.

Turboprop

Bij *turboprops* (fig. 5), schroefturbines, wordt (bijna) alle expansie-energie opgevangen door een turbine, die naast de compressor ook een propeller aandrijft. In dit geval is er nauwelijks tot geen sprake van straal aandrijving; de propeller zorgt de benodigde stuwkracht.

fig. 5 TURBOPROP



Vergeleken met *turbojets* zijn dit type motoren tot een snelheid van ongeveer 800 kilometer per uur efficiënter qua stuwkracht. Om bij deze hoge, en nog hogere, snelheden nog goed te kunnen presteren, zijn de propellerbladen korter, maar telt de propeller er meer. Bovendien hebben ze een speciale vorm om de hoge lucht- en draaisnelheden te kunnen accepteren. Dit type wordt ook wel *propfan* genoemd.

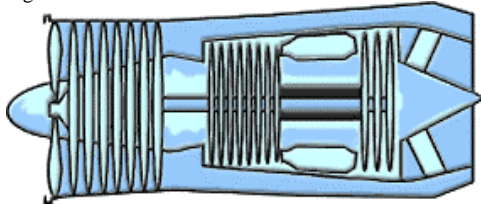
Als het nuttige deel van de expansie-energie ook voor een deel nog wordt omgezet in stuwkracht, spreekt men van een *jetprop*.

naam: Rob Bierbooms & Joris Goudsmits
© havovwo.nl februari 2004

Turbofan

De *turbofan* (fig. 6) lijkt veel op de *turboprop*, omdat ook dit soort straalmotor een soort ventilator, *fan*, aan de as heeft bevestigd. Echter wordt bij *turbofans* een groot deel van de door de fan aangezogen lucht, langs het hele systeem geleid. Bij de uitlaat van de motor wordt als mantel om de hete uitlaatgassen gebruikt. Dit heeft twee voordelen: ten eerste zorgt deze methode voor geluidsreductie; ten tweede, en dit is het voornaamste, veroorzaakt de koude mantel om de hete uitlaatgassen een krachtigere straal van uitlaatgassen. Dit type motor kan daardoor met hetzelfde brandstofverbruik veertig procent meer kracht leveren dan een *turbojet*. Belangrijk voor optimalisering is de omloopverhouding: de verhouding tussen de lucht die om het basissysteem wordt geleid en die erdoorheen wordt geleid.

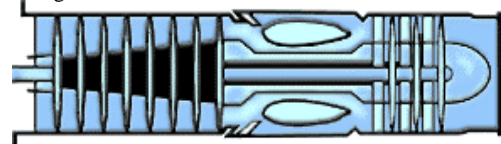
fig. 6 TURBOFAN



Turboshaft

Een *turboshaft* motor (fig. 7) lijkt het meest op een *turboprop*. Dit vanwege het feit dat in beide modellen geen expansie-energie wordt gebruikt voor de stuwkracht. De turbine zet alle energie om in bewegingsenergie. Nu wordt er echter geen propeller aangedreven, maar enkel een as die gebruikt kan worden om energie op te wekken of andere dingen aan te drijven.

fig. 7 TURBOSHAFT



naam: Rob Bierbooms & Joris Goudsmits
 © havovwo.nl februari 2004

Toepassing

Bij elk type van de in de vorige paragraaf beschreven straalmotoren horen bepaalde machines, voertuigen en/of andere doeleinden. De verschillende soorten zijn juist ontstaan vanwege die doelmatigheid.

Ramjet/Scramjet

Dit type stuwstraalmotoren is bestemd voor snelheden (waarmee de motor door de lucht beweegt) vanaf mach één. Tot nog toe gebruikt slechts één bemand militair vliegtuig een *ramjet*, de Lockheed SR-71. Het supersonische vliegtuig, dat tot mach drie kan, benut niet alleen een *ramjet*, eigenlijk is het een speciale *turbojet* die bij zeer hoge snelheden dienst gaat doen als een ramjet.

Momenteel is de NASA bezig met onderzoek naar een (bemande) raket die de ruimte in kan binnen beperkte tijd opnieuw kan vertrekken van de aarde, in tegenstelling tot de conventionele space shuttle. Hiervoor gebruikt ze het type *scramjet*, omdat het prototype ‘X-43’ (fig. 8) extreem hoge snelheden moet bereiken.

fig. 8 ‘X-43’



Pulsejet

De *pulsejet* is als eerste tijdens de tweede wereldoorlog in productie gegaan. Toen diende het voor de Duitsers als motor voor de vliegende bom Argus V-1. Omdat de *pulsejet* nog niet ver ontwikkeld was, had deze motor veel problemen.

In deze tijd is de *pulsejet* erg geschikt voor model(straal)vliegtuigen. Ze worden compleet geleverd door bepaalde fabrikanten, zodat ze perfect werken. Op het internet is echter ook heel veel te vinden over het zelf bouwen van dit type stuwstraalmotor, omdat het relatief makkelijk is.

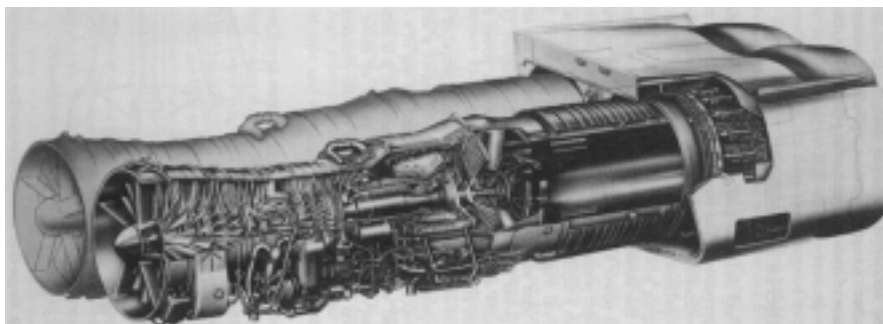
Turbinestraalmotoren

Turbine(straal)motoren zijn erg breed toepasbaar, aangezien ze in meerdere typen zijn onder te verdelen. Ze kunnen elektrische kracht leveren, zorgen voor stuw aandrijving en ze kunnen gecompriëerde lucht leveren.

De drie afgeleide typen kunnen allen gebruikt worden voor de luchtvaart. De *turbofan* is hierbij de meest bekende. Alle grote passagiersvliegtuigen maken gebruik van de techniek. Kleinere vliegtuigen, zoals privé-jets, maken of ook hier gebruik van, of van de turboprop. De *turboshaft* dient voornamelijk als motor voor een helikopter; het geleverde asvermogen wordt dan overgebracht op de rotor. Ten slotte wordt de ‘moeder’ van alle turbinestraalmotoren, de *turbojet* zelf, voornamelijk gebruikt in militaire straalvliegtuigen (fig. 9). Bij deze groep vliegtuigen wordt het principe van de *afterburner* vaak toegepast, omdat gevechtsvliegtuigen buitengewoon wendbaar moeten zijn.

Hoewel de meeste mensen denken dat alleen de luchtvaart gebruikt maakt van straalmotoren, zijn er talloze andere voorbeelden die deze gedachte tegenspreken. Speciale auto’s die sneller dan het geluid gaan en zogenaamde dragster motoren maken ook gebruik van *turbofans* en *turbojets*. Bovendien past men gasturbines toe in de scheepvaart; vanwege de gunstige vermogen/massa verhouding zijn ze erg geschikt om grote schepen aan te drijven. Op het land worden ze ten slotte veel ingezet als aandrijving van gas- of vloeistofpompen en als krachtbron voor het opwekken van elektrische energie.

fig. 9 OLYMPUS TURBOJET



HET ONDERZOEK HET BEZOEK AAN DE KLM TECHNISCHE DIENST

Vraagstelling

Voor dit onderdeel, een bezoek aan de KLM Technische Dienst, hebben we de volgende vraagstelling.

- Wat komt er bij de praktijktoepassing van straalmotoren in de luchtvaart allemaal kijken?

Opzet en uitvoering

Op uitnodiging van Dhr. G.A. van Rooijen gingen wij op woensdag 29 oktober richting Schiphol voor een bezoek aan de Engine Shop die de KLM daar heeft met als doel wat meer inzicht te krijgen in de praktijktoepassing in de burgerluchtvaart van straalmotoren.

Na ontvangst met koffie begon dhr. Van Rooijen met het vertellen van de basistechniek van een straalmotor. Aangezien hierop bij oriëntatie dieper is ingegaan, gaan wij daar hier niet meer verder op in. Naast de theorie kwam ook de praktijk veelvuldig aan bod. Hier wordt immers toch alles voor gedaan in theorie, om het in de praktijk optimaal te laten verlopen.

Resultaten

Onderhoud

Net als alle soorten motoren is een straalmotor ook onderhoudsgevoelig. Elke straalmotor heeft een uniek nummer. Daarnaast heeft elk los onderdeel op een straalmotor ook een uniek nummer. Via dit nummer wordt de geschiedenis van zo'n onderdeel bijgehouden. Op deze manier kunnen monteurs precies zien wanneer en hoe vaak een onderdeel al een onderhoudsbeurt heeft gehad. Bij de aankoop van tweedehands motoronderdelen wordt dan ook erg zorgvuldig erop gelet of de boekhouding van een dergelijk onderdeel in orde is. Blijkt dit niet zo te zijn, dan vervalt de interesse van een maatschappij in zo'n onderdeel meteen. Dit is ook omdat er zware eisen worden gesteld aan onderdelen. Een onderdeel mag namelijk niet bij een vliegtuigramp betrokken zijn geweest en daarom is het belangrijk dat de complete geschiedenis van het maken van het onderdeel tot nu bekend is. Vandaar de boekhouding. Ook is het zo dat bepaalde onderdelen slechts beperkt (meestal in aantal keren) mogen worden onderhouden. Hierbij is het dus ook belangrijk dat precies kan worden aangetoond welk onderdeel wel en welk niet mag worden onderhouden/gerepareerd.

Een straalmotor bestaat voor het overgrote deel uit dure onderdelen. Er zijn echter ook onderdelen die relatief zo goedkoop zijn dat ze bij elke onderhoudsbeurt worden vervangen. Er zijn ook onderdelen die praktisch nooit worden vervangen en altijd wel gerepareerd kunnen/mogen worden. Ondanks de reparaties blijf je onderdelen hebben die vervangen moeten worden. Hierbij worden ze, tot op het wat regeling betreft uiterste, gerepareerd.

De motorenafdeling van de KLM Technische Dienst is in staat twee typen motoren te onderhouden, namelijk de CF6-50 en de CF6-80A/C1. Het grootste deel van de KLM vloot is hiermee voorzien. Dit betekent dat de rest van het onderhoud aan de motoren van de KLM vloot uitbesteed moet worden. Dit is niet alleen met de KLM zo, vrijwel elke maatschappij kan niet alle types in hun vloot behandelen en moet uitbesteden. Zo ontstaat er een soort poule van motoren die uitgewisseld wordt voor onderhoud. Op deze manier worden er ook kosten bespaard doordat iedere technische dienst zich op een bepaald type kan concentreren en deze 'aan de lopende band' kan onderhouden

Line Maintenance

Naast het onderhoud komt het toch nog soms voor dat motoren technische mankementen vertonen. Hiervoor heeft de Technische Dienst van de KLM ook een line maintenance die op het platform plaats vindt. Kleine probleempjes kunnen daar worden opgelost doordat delen van de motoren relatief gemakkelijk toegankelijk zijn. Dit is hiernaast (fig. 10) te zien waar een motor een kleine onderhoudsbeurt krijgt. Hiervoor wordt de motor er niet afgehaald. Mocht het nodig zijn de motor er af te halen wegens mankementen dan wordt deze in overleg met de maatschappij meteen grondig gecontroleerd om eventuele andere mankementen op te merken en te kijken of de diagnose van de maatschappij correct was. Het plaatsvinden van deze controle wordt met de maatschappij overlegd omdat het extra tijd in beslag neemt. In het uiterste geval dat een maatschappij weigert een motor compleet te laten controleren wordt er dan ook vermeld dat een complete controle door de maatschappij geweigerd werd om eventuele aansprakelijkheid te voorkomen.

fig. 10 EEN CF6-80 MOTOR IN KLEINSCHALIG ONDERHOUD



Engine shop

De motorenafdeling van de KLM onderhoudt zoals eerder gezegd op het moment twee typen motoren. Op het moment zijn ze bezig met het bouwen van een nieuwe Engine Shop. Met de komst van de 737 NG (Next Generation) krijgt de KLM ook een nieuw type motor in hun vloot, namelijk de CFM56. In de toekomst moet het mogelijk worden om ook dit type op te nemen in het onderhoudsprogramma. Hiernaast is een compositieschets te zien van de nieuw te bouwen faciliteit op Schiphol-Oost.

fig. 11 DE NIEUWE ENGINE SHOP



Op deze pagina en de pagina's hierna volgen enkele foto's die wij gemaakt hebben in de Engine Shop. Hierbij worden de belangrijkste onderdelen getoond en beschreven. Hierdoor is het bij ons na de theoriestudie ook duidelijk geworden hoe de onderdelen er werkelijk uitzien en in elkaar zitten.

fig. 12 STRAALMOTOR, HIER NOG IN ELKAAR



Op deze foto is een complete straalmotor te zien die van een vliegtuig is losgemaakt. Aan deze is nog vrijwel niets gedaan. In deze hal hingen ongeveer 6 motoren naast elkaar, en hoe verder naar links hoe meer er vanaf was gehaald. Er was toen ook goed te zien dat het onderhouden van straalmotor aan de lopende band gebeurt. Elke motor doorloopt een standaard proces en als die klaar is staat de volgende al klaar. Het is hier niet te zien, maar voorop (aan de andere kant) zit de grote fan die lucht inzuigt.

naam: Rob Bierbooms & Joris Goudsmits
 © havovwo.nl februari 2004

Hiernaast is de *Gearbox*, versnellingsbak, te zien. Deze is net van een motor afgehaald (hier niet te zien maar de motor hang erboven) en de man in de blauwe jas duwt het karretje waar het op is gelegd weg. De *Gearbox* regelt de verhouding in snelheid tussen de hoofdas die door de hele motor loopt, met daarop de turbine en de compressor, en de fan die voorop staat.

fig. 13 GEARBOX, ZOJUIST VAN EEN STRAALMOTOR AFGEHAALD



Het onderdeel hiernaast afgebeeld is de *Combustion chamber* ofwel de verbrandingsruimte. Aan de buitenkant zitten de leidingen voor brandstoftoevoer. De buitenste dikkere buis zorgt voor de toevoer, de kleinere binnenste buis is een leiding waarin de brandstof terecht komt als er een lek is op dit punt. Op die manier wordt een lek meteen opgemerkt. Niet te zien op deze foto's zijn de twee bougies die erop zitten. Deze worden alleen gebruikt bij het opstarten van de motor

fig. 14 COMBUSTION CHAMBER



Rechts en op de volgende pagina boven een foto van de Compressor zowel van de binnenkant als van de buitenkant. De *vanes* (=soort vleugeltjes) die je in de bovenste foto ziet zijn onderin afstelbaar om de snelheid van de lucht te regelen en om turbulentie te voorkomen. Tijdens het opstarten is er namelijk een andere positie vereist. Van de buitenkant zie je dat de *vanes* op dezelfde hoogte door een ring zijn verbonden en zo de richting collectief kan worden afgesteld van alle *vanes*. De bovenste rij met *vanes* is niet afstelbaar. In deze compressor gaat nog een ronddraaiend gedeelte waar ook weer *vanes* aan zitten die ook niet verstelbaar zijn. Dit gedeelte wordt er in geschoven en het afstellen van de *vanes* is dan ook een werk dat nauwkeurig gedaan moet worden, omdat alles precies moet passen. Bij een onderhoudsbeurt worden alle *vanes* verwijderd en onderhouden. Deze onderdelen worden na enkele jaren vervangen omdat ze gewoonweg niet meer gerepareerd mogen worden. De compressor ruimte zelf wordt nooit vervangen. Dit is een onderdeel dat 600.000 dollar waard is en repareren is altijd wel mogelijk en zeker goedkoper.

fig 15 COMPRESSOR CHAMBER (BUITENKANT)



Profielwerkstuk “Straalmotoren” “Het bouwen van een pulsejet motor”

naam: Rob Bierbooms & Joris Goudsmits
© havovwo.nl februari 2004

fig.16 COMPRESSOR CHAMBER BINNENKANT



De foto rechts toont een uitlaat van een straalmotor. Dit is een onderdeel dat relatief weinig onderhoud nodig heeft. Er stond een exemplaar dat een klein scheurtje had dat gerepareerd moest worden, maar voor de rest is dit een redelijk onderhoudsvrij onderdeel. Bij deze onderdelen is goed te zien of het om een CF6-50 (oude model) of een CF6-80A/C2 (nieuwe model) gaat. De twee uitlaten zijn anders van vorm in die zin dat de ene lager en breder is dan de ander.

fig. 17 UITLAAT



Hiernaast zie je het kenplaatje op de uitlaat waarop onder andere ‘General Electric’ (motorfabrikant) en een serienummer staat.

fig. 18 KENPLAATJE VAN EEN MOTOR



naam: Rob Bierbooms & Joris Goudsmits
 © havovwo.nl februari 2004

Op deze twee foto's is de turbine te zien. Bij de rechterfoto zie je twee lagen *vanes*, bij de foto daaronder is de bovenste laag verwijderd. De temperatuur van deze *vanes* kan oplopen tot 1300 °C omdat deze onderdelen dicht bij de verbrandingsruimte zitten. Daarom zijn deze onderdelen niet alleen uitgerust met een speciale coating die deze temperaturen aankan, maar zitten deze *vanes* ook vol met kleine gaatjes waardoor lucht van rond de 400-500 °C doorstroomt. Aangezien de temperatuur van het onderdeel veel hoger ligt heeft dit een koelende werking. Koude lucht hierin voeren zou onverantwoord zijn gezien het verschil van ongeveer 1300 graden. Het geheel zou dan sneller koelen dan goed is voor de onderdelen, vandaar de warme lucht die op andere plaatsen van de motor wordt afgetapt. Ook hier weer zijn de *vanes* afgesteld om de doorstromende lucht een kracht (richting en snelheid) mee te geven die optimaal is. Hiernaast is ook zo'n *vane* te zien. Op de voorgrond zie je het gedeelte wat in de turbine gaat en waar de lucht wordt ingestroomd. Ook deze onderdelen worden beperkt gerepareerd wegens regelgeving. Aangezien de prijs (6000 dollar per stuk) en het aantal dat je nodig hebt worden deze zo lang mogelijk gerepareerd waar mogelijk en toegestaan.

fig. 19 TURBINE 1



fig. 20 TURBINE 2



fig 21. VANE UIT DE TURBINE



naam: Rob Bierbooms & Joris Goudsmits
© havovwo.nl februari 2004

Hiernaast is één van de twee ovens die te zien zijn van de Engine Shop van de KLM. De meeste onderdelen worden gerepareerd door het te lassen. Door het kleine oppervlak met een lasapparaat te verwarmen en weer af te laten koelen komt er druk te staan op de lasnaad. In deze ovens worden onderdelen verwarmd en afgekoeld zodat het hele onderdeel gelijkmatig kan afkoelen. Dit zorgt dat de druk op de naden verdwijnt. Een onderdeel wordt op het platform onder de oven geplaatst en vervolgens omhoog gehesen in de oven. Iets verder naar links staat een slijpmachine. Hierin worden *vanes* uiterst nauwkeurig en volledig computergestuurd geslepen door ze in een as rond te laten draaien langs een slijpsteen.

fig. 21 OVEN



Dit onderdeel met een waarde van 25.000 dollar bevat twee *vanes* waar heel duidelijk te zien zijn de gaatjes waardoor relatief koude lucht wordt doorgeblazen om zoveel mogelijk te koelen. Dit onderdeel ligt samen met andere onderdelen hier opgeborgen. Elk onderdeel heeft bijgevoegde documentatie waaruit technici de ‘geschiedenis’ van elk onderdeel kunnen aflezen.

fig. 22 VANE MET GAATJES



Conclusie

Naast het theoretische ontwerp en de bouw hebben wij nu een beter beeld van wat er allemaal komt kijken bij de toepassing van straalmotoren in de burgerluchtvaart.

Straalmotoren moeten zorgvuldig onderhouden worden, daar staat de KLM Technische dienst/Engine Shop garant voor. Naast de types die ze zelf behandelen besteden ze ook uit. Hiervoor krijgen ze ook motoren van andere maatschappijen terug. Dit is allemaal omtrent de kostenbesparing. Het zou veel meer kosten als de KLM alle motoren zelf zou onderhouden. Zaak is dat zodra een motor binnenkomt deze zo snel mogelijk weer in dienst gesteld kan worden. Bij de KLM worden motoren dan ook aan de lopende band onderhouden.

naam: Rob Bierbooms & Joris Goudsmits
 © havovwo.nl februari 2004

HET ONDERZOEK HET TECHNISCH ONTWERP VAN EEN PULSEJET

Vraagstelling

Voor het technisch ontwerp zijn we voor de vragen van een procesbeschrijvend idee uitgegaan. Aan de hand van deze stappen is dit hoofdstuk opgebouwd. Per stap/vraag hebben we de uitvoering, resultaten en conclusie gemaakt. Op deze manier creëren we een chronologisch overzicht van de bouw van een *pulsejet*. Daarnaast zijn de vragen afhankelijk van elkaar: de conclusie van een vraag is nodig voor de volgende vraag. De vragen zijn als volgt.

- Hoe ziet het ontwerp van een simpele straalmotor eruit?
- Hoe gaan we ons ontwerp bouwen?
- Welke metingen kunnen we verrichten (en daarbij verwerken) aan ons prototype?
- Hoe kunnen we ons prototypeontwerp optimaliseren?
- Wat zijn de optimale omstandigheden voor een zo goed mogelijk functionerende motor?

Uitvoering, resultaten en conclusie

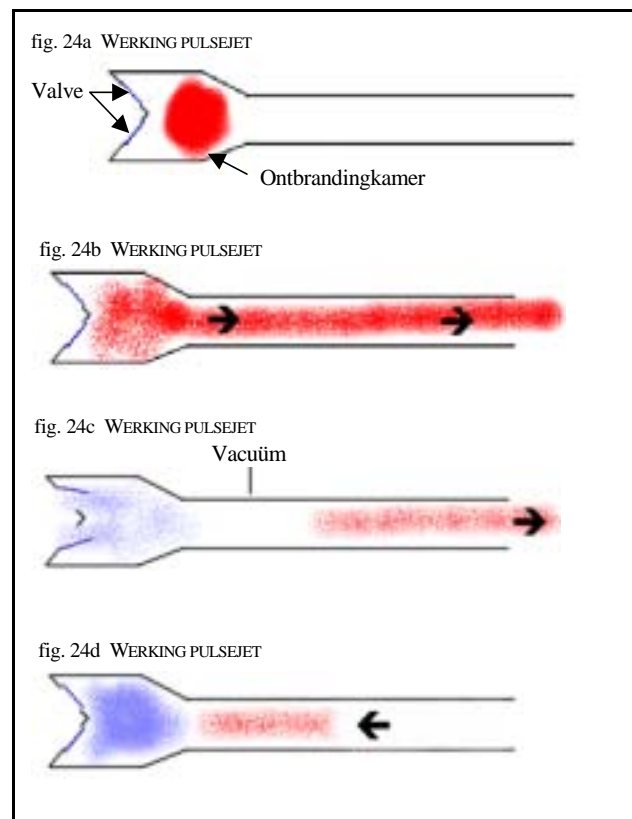
Het ontwerp

Uitvoering en resultaten

Een simpele, maar vooral de makkelijkst zelf te testen straalmotor is, zoals in het vorige hoofdstuk gezegd, de *pulsejet*. Om een goed ontwerp te kunnen maken, is het noodzakelijk de werking van deze stuwstraalmotor te begrijpen.

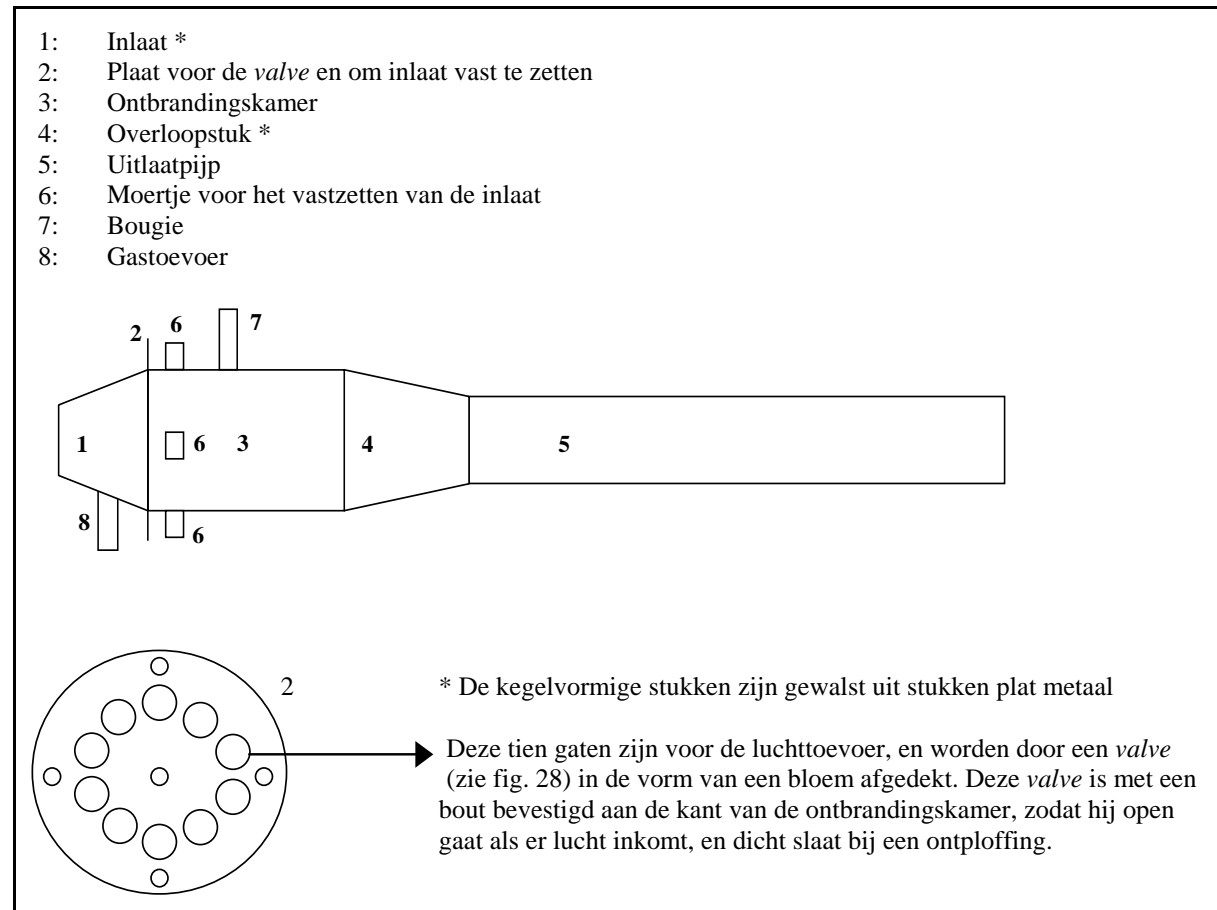
Een *pulsejet* is in principe niets meer dan een buis met aan het begin een verdikking, ook wel de ontbrandingskamer genoemd (hoewel deze naam eigenlijk niet klopt, want ontbranding vindt ook buiten dit gedeelte plaats), met daarop een groot luchtventiel, de *valve*. Hoofdzakelijk bestaat de werking uit vier fasen, die elkaar voortdurend opvolgen. Ten eerste de ontbranding (fig. 24a). Lucht is er al en wordt later door de *valve* toegevoerd; het gas komt gemengd met de lucht binnen of wordt in de ontbrandingskamer geïnjecteerd. Het gas/lucht mengsel komt tot ontbranding; de eerste keer handmatig. In de pijp ontstaat een soort hete vuurbal met een hoge druk. Het luchtventiel is op dit moment dicht geduwd, zodat de vlam alleen de goede kant opgaat. Vervolgens komt de verbrandingsfase (fig. 24b). Het mengsel blijft branden en zet uit in de pijp. Aangezien de gassen vanwege het dichte ventiel maar aan één kant de pijp uitgaan, ontstaat er een kracht die de *pulsejet* in de richting stuwt, tegengesteld aan de richting waarin de gassen ontsnappen. In de derde fase (fig. 24c) wordt er lucht naar binnen gezogen door de *valve*. De (nog brandende) uitlaatgassen blijven namelijk naar buiten stromen, en daardoor ontstaat er een vacuüm aan de kant van het ventiel. Ten slotte wordt de vlam ook weer terug naar binnen gezogen (fig. 24d). Doordat ‘massa (de terugslaaende uitlaatgassen) traag is’, vindt in de ontbrandingskamer enige compressie plaats. Zodra de vlam het brandstofmengsel bereikt begint het proces weer van voor af aan.

Na modellen op internet te hebben bestudeerd en zelf wat aanpassingen te hebben gemaakt, zijn we tot het ontwerp gekomen zoals hieronder is te zien.



naam: Rob Bierbooms & Joris Goudsmits
 © havovwo.nl februari 2004

fig. 25 ONTWERP PULSEJET



Conclusie

Aangezien een visuele voorstelling beter is dan een beschrijving, verwijzen we voor het ontwerp van onze *pulsejet* naar de figuur hierboven.

De bouw

Uitvoering en resultaten

De bouw bestaat uit twee stadia: het zoeken van materiaal en het maken van de *pulsejet* uit alle onderdelen.

Voor het vinden van materiaal zijn we eerst naar een oud-ijzerhandel gegaan, maar daar was niet voldoende te vinden. Daarna hebben we bekeken of het gebruik van een oude verkeersbordpaal mogelijk was. Aangezien daar echter een zinklaag op zit, is het moeilijk deze te bewerken met lassen. De beginfase liep op dat moment wel een kleine achterstand op en we hadden te maken met een klein probleem. Gelukkig kon een oom van Joris, die werkt bij een metaalverwerkingsbedrijf, ons helpen aan het basismateriaal (de totale pijp en de inlaat) op maat. Hij heeft tevens deze belangrijkste onderdelen gelast. Zodoende was de achterstand meteen bijgewerkt, en hadden we vrij snel een onbewerkte *pulsejet* (fig. 26).

Vervolgens moesten de gaatjes in de inlaat geboord worden om deze vast te zetten aan de ontbrandingskamer en ook moesten er gaatjes in voor de *valve*. Dit verliep niet zo eenvoudig als gedacht. We moesten namelijk eerst nog een speciale staalboor regelen. Daarnaast ging het boren minder eenvoudig dan verwacht, aangezien de gaatjes op exact de goede plek moesten komen en het boren in een schuin stuk metaal totaal niet makkelijk is.

Na veel moeite konden we verder met het volgende onderdeel, namelijk de gastoevoer. Voor dit onderdeel gebruikten we een koperen leiding waarvan we één uiteinde dichtmaakten, dicht soldeerden en er een gaatje inboorden. Daarna moest de leiding door een groot gat in de inlaat vast gesoldeerd worden. Dit gat moest groter

naam: **Rob Bierbooms & Joris Goudsmits**
 © havovwo.nl februari 2004

geveild worden, omdat de grootste staalboor nog te klein was. We hebben gekozen voor soldeer, omdat de gastoevoer geen hoge temperatuur zal bereiken, aangezien daar voortdurend koude lucht langs stroomt.

Daarna was het nodig de bougie te bevestigen. In eerste instantie was het onze bedoeling hier een moer voor te gebruiken en die op de ontbrandingskamer te lassen. Aan deze konden we echter nergens aankomen, vanwege de speciale draad, en hebben we een ander systeem bedacht. We besloten de bougie te klemmen tussen twee dubbele blikken plaatjes. Dit was mogelijk, omdat boven de schroefdraad een revetje klem zat tussen de draad en de rest van de bougie. Tussen dit revetje en de rest van de bougie zit speling, waardoor twee plaatjes met een halve cirkel de bougie vast kunnen klemmen. Na veel werk, er moest weer een groot gat voor de bougie geboord en geveild worden en er moest draad getapt worden, is het resultaat (fig. 27) een *pulsejet* die bijna klaar is om te testen.

Ten slotte moest namelijk de *valve* nog gemaakt worden. Met behulp van een mal hebben we deze voor het prototype gemaakt uit blik. Helaas hebben we hier geen foto van, vandaar de schets in fig. 28. Deze *valve* past precies over de gaatje van onderdeel twee in fig. 25.

Conclusie

Om het kort samen te vatten, hebben we onze *pulsejet* gemaakt uit twee stalen buizen, twee gewalste stukken staal en een stalen plaat om de *valve* op te maken. Daarnaast hebben we de *valve* zelf van blik gemaakt en de bougie met twee plaatjes op de ontbrandingskamer gemonteerd.

De volgende paragraaf beschrijft het proces van testmodel tot definitief model. Aangezien de *pulsejet* voortdurend aan verbeteringen onderhevig was, hebben we continu nieuwe metingen gedaan en aan de hand daarvan een betere versie van de *pulsejet* gemaakt. Gevolg is dat de derde en vierde deelvraag in een cyclus herhaald worden. Bij de verwerking hebben we dan ook gekozen voor één chronologische beschrijving van metingen en aanpassingen aan de motor; beide deelvragen zijn bijeengenomen om het geheel overzichtelijker te maken.

Op de meegeleverde cd-rom staan filmpjes, foto's en geluidsfragmenten van (delen van) het proces. Het is echter een selectie van de meest relevante opnamen. Alle opnamen zijn slechts een fractie van de vele uren testen; het opnamemateriaal was namelijk niet voortdurend tot onze beschikking. In de tekst wordt naar bestanden op de cd-rom verwezen.

Het prototype: testen, meten en verbeteren

Uitvoering en resultaten

Na veel werk kon uiteindelijk aan de testfase begonnen worden. De opstelling die we bij alle tests gebruikten, is zeer eenvoudig. De *pulsejet* leggen we op een verhoging van hout of stenen iets boven de grond. Aan de gastoevoer (we gebruiken voortdurend butaan) is de slang van een gasfles gekoppeld. Het aansteken van de *pulsejet* deden we met behulp van een aansteker. Door wat meer gas toe te voeren, konden we dat aansteken aan

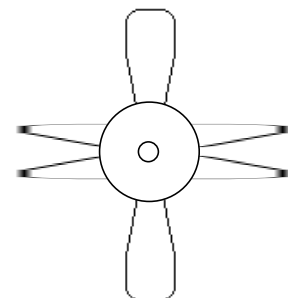
fig. 26 DE ONBEWERKTE PULSJET; LINKSBOVEN DE INLAAT



fig. 27 DE BOUGIE GEKLEMD TUSSEN TWEE PLAATJES



fig. 28 VALVE



naam: Rob Bierbooms & Joris Goudsmits
© havovwo.nl februari 2004

het uiteinde van de pijp. Als we vervolgens de gastoevoer verminderen, zou de vlam naar binnen moeten slaan en zorgen voor een kleine explosie. Ons doel was om hem ten eerste op gang te brengen. In het begin lukte dit echter totaal niet. Er kwam alleen een oranje vlam uit die constant brandde en dus niet pulseerde, of er was te weinig gas en je hoorde een zacht plofje van de naar binnen slaande vlam. Bovendien sloeg de vlam enkele keren terug door het ventiel en kwam uit de inlaat, een teken dat de *valve* niet goed afsluit. Met behulp van een elektriseermachine probeerden we of we met de bougie een pulserende vlam konden genereren. We konden horen dat de bougie kleine hoeveelheden gas ontbrandde. Vreemd genoeg pulseerde de motor echter niet, ook al varieerden we de draaisnelheid van de elektriseermachine.

Conclusie

De *valve* moesten we meteen aanpassen. De vlam kwam namelijk veel te vaak bij de inlaat naar buiten. Daarnaast was de vlam niet blauw, wat duidde op onvolledige verbranding. We moesten dus meer zuurstof toevoeren.

Uitvoering en resultaten

De nieuw aangebrachte *valve*, in eerste instantie van dun koper, bleek niet beter te werken. Meteen hebben we besloten andere materiaal te gebruiken. Namelijk bladstaal van 0,10 mm dik. Het beschikbare bladstaal (van school) was echter in reepjes, en daarom kon het niet een geheel worden. De *valve* bestaat nu uit vijf twebladige reepjes (fig. 29).

De nieuwe *valve* bleek goed te werken. Terwijl de gastoevoer klein was, bliezen we met behulp van een föhn extra lucht bij de inlaat naar binnen. Lucht toevoeren in de gasleiding was namelijk onmogelijk. De gevolgen hiervan waren onmiddellijk merkbaar. De vlam werd blauw en we konden merken dat hij naar binnen wilde slaan. Na enkele keren getest te hebben met variabele gastoevoer en luchttoevoer van de föhn, hebben we een werkende *pulsejet* gekregen. De duur van zijn pulserende fase was slechts tien seconden (MOV001.MPEG). Nadat we de föhn iets te ver van de inlaat af hielden, stopte hij met pulseren. Ondanks lang verder testen, hebben we geen betere resultaten geboekt. De resultaten waren het beste als de föhn op ongeveer vijf tot tien centimeter van de inlaat gehouden wordt. Wat wel erg opviel, is dat de *pulsejet* in de meeste overige gevallen even pulseerde en vervolgens sloeg de vlam weer naar buiten (MOV002.MPEG, MOV003.MPEG). Dit gedrag herhaalde zich net zolang, tot we zelf de lucht en/of gastoevoer stopten. We hebben nog met propaan getest, maar dit leverde geen verbeteringen op. We blijven het verder met butaan testen. Enkele keren kwam het voor dat de vlam terugsliep naar de inlaat.

fig. 29 VALVE VAN BLADSTAAL



Conclusie

De *pulsejet* vertoont duidelijk betere resultaten. Een kleine gastoevoer, extra lucht (en dus zuurstof) toevoeren met behulp van een föhn en een *valve* van bladstaal maken het een (redelijk) werkende motor. De keren dat de vlam toch door de inlaat naar buiten komt, verklaren we met de aanname dat de *valve* soms niet geheel sluit door de extra luchttoevoer. Optimaal is de *pulsejet* nog niet, de pulsen zijn namelijk nog niet blijvend periodiek. We moeten dus oorzaken proberen te vinden voor de opvallende verschijnselen die in MOV002 en MOV003 te zien zijn.

Uitvoering en resultaten

We besloten de pulsen te analyseren en de frequentie te bepalen. Zo kunnen we proberen de bougie te gebruiken om de pulsen te regelen. De frequentie bepalen is eenvoudig te doen met een visuele weergave van de geluidsgolf. De tijd tussen twee pulsen T meten we door de tijd van meerdere pulsen te meten en deze te delen door het aantal intervallen. [$xT = y \text{ sec} \Rightarrow T = y/x \text{ sec}$]

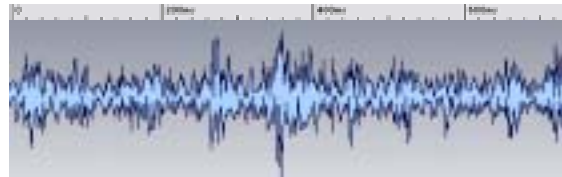
naam: Rob Bierbooms & Joris Goudsmits
 © havovwo.nl februari 2004

Meting 1 (AUD001.WAV)



$T = 0,42 / 9 \text{ intervallen} = 0,047 \text{ sec}$
 $f = 1 / T = 21 \text{ Hz}$

Meting 2 (AUD002.WAV)



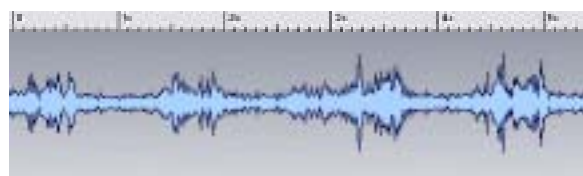
$T = 0,70 / 9 \text{ intervallen} = 0,078 \text{ sec}$
 $f = 1 / T = 1 / 0,078 = 13 \text{ Hz}$

Meting 3 (AUD003.WAV)



Een aantal pulsen, zoals deze ontstaan bij meting 4
 Te zien is dat de frequentie van hoog (nog hoger dan bij meting 1) naar laag gaat

Meting 4 (AUD003.WAV)



Ongeveer 0,5 seconde pulserend en 1 seconde geen puls, gedurende enkele seconden

Van de beste test is in meting 1 het resultaat te zien. Van de overige tests is meting 2 het meest duidelijke; met de minste ruis. Dit fragment komt evenals meting 3 uit een situatie zoals weergegeven bij meting 4. Wat opvalt, is dat de frequentie in enkele gevallen van hoog naar laag gaat tijdens een pulserende periode (meting 3) of dat de (gemiddelde) frequentie constant blijft, maar lager dan zou moeten zoals in meting 1. Voor het voorkomen van beide verschijnselen hebben we geen verklaring kunnen vinden. Wat daarnaast nog opvalt, is dat de tijd tussen twee pulsen niet helemaal constant is (meting 1 en 2) en dat er soms duidelijk pulsen met een grotere amplitude voorkomen. We vermoeden dat dit laatste effect iets te maken heeft met interferentie van geluidsgolven.

Ook wilden we de hoeveelheid gas en lucht berekenen die de per seconde de *pulsejet* instroomden, om na te gaan of er een efficiënte verbranding plaatsvindt. De hoeveelheid lucht meten bleek zeer lastig. Van de luchtstroom uit de föhn passeert slechts een klein deel de *valve*. Daarnaast is de luchtstroom door een niet draaiende *pulsjet* anders dan een draaiende, omdat in het laatste geval de druk en het vacuüm in de pijp tegen- of meewerken. De onzekerheden zouden zo groot zijn, dat het geen nut heeft deze metingen te verwerken. Dit wetend, besloten we ook niet de gastoevoer te meten. Ook al kun je deze (veel) makkelijker bepalen, er zijn immers geen verliezen, je hebt er niet veel aan. Door te berekenen hoeveel gas per seconde door de inlaat moet stromen om een bepaalde puls-frequentie te behalen, moet je nog de (extra) luchttoevoer al testend variëren. Het is praktischer, dat is tenminste in de tests tot nog toe gebleken, het gas zo zacht mogelijk toe te voeren en de daarbij behorende luchtstroom te regelen.

Conclusie

We weten dat de *pulsejet* met een puls-frequentie van ongeveer 20 Hz draait. Metingen aan gas- en luchttoevoer zijn naar onze mening niet zo doelmatig als om testend te bepalen hoe deze stromen moeten zijn.

naam: **Rob Bierbooms & Joris Goudsmits**
 © havovwo.nl februari 2004

Uitvoering en resultaten

We wilden proberen de bougie de pulsen te laten aansturen. Bovendien keken we of het nut had met de bougie de *pulsejet* te starten. Aangezien dit laatst eenvoudiger is, begonnen we daarmee. Door een piëzo-elektrisch element van een aansteker op de contacten van de bougie aan te sluiten, hoopten we het mengsel te kunnen ontbranden. Het gas van een aansteker wordt immers op deze wijze ook ontbrand. Dit werkte echter totaal niet. Verder werken met de bougie had dus geen zin meer.

Conclusie

De *pulsejet* kan niet worden geholpen door het vonken van een bougie. (Dit in tegenstelling tot de waarneming van het eerste gebruik van de bougie, die hoogstwaarschijnlijk fout was.)

We moeten de *pulsejet* dus op een andere wijze optimaliseren.

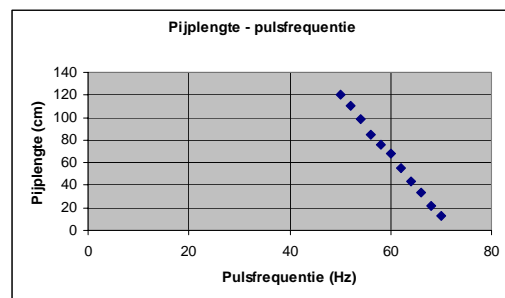
Uitvoering en resultaten

We besluiten de pijplengte te variëren. Met een pijp die om de huidige pijp past, verlengen we de *pulsejet*. Opvulling tussen beide pijpen geschied door middel van papier, zolang er geen zuurstof bij kan, zal dat niet branden. De pijp verlengden we voortdurend met twee centimeter. Van deze metingen hebben we helaas niets kunnen vastleggen, maar het was duidelijk dat de *pulsejet* niet beter ging presteren. Bij een verlenging van meer dan ongeveer 25 centimeter weigerde de motor zelfs ook maar iets te produceren wat op pulsen leek.

Pijplengte (cm)	Geluidsbestand	Pulsfrequentie (Hz)
70	AUD004.WAV	13
68	AUD005.WAV	22
66	AUD006.WAV	34
64	AUD007.WAV	43
62	AUD008.WAV	55
60	AUD009.WAV	68
58	AUD010.WAV	76
56	AUD011.WAV	85
54	AUD012.WAV	99
52	AUD013.WAV	1,1 * 10 ²
50	AUD014.WAV	1,2 * 10 ²

Conclusie

Verlenging van de pijp heeft geen beter, maar op den duur een juist slechter effect op de werking van de *pulsejet*.



Uitvoering en resultaten

We proberen de pijp in te korten. Verlenging maakte de *pulsejet* slechter, dus het inkorten van de pijp heeft waarschijnlijk positieve gevolgen. We besluiten de pijp in te korten, steeds twee centimeter, met een minimum totaal lengte van 50 centimeter. Zou de pijp te kort zijn, dan kan de vlam niet meer terugslaan in de pijp, omdat deze al buiten de *pulsejet* is. Deze minimumlengte is op het gevoel genomen, na enkele voorbeelden op internet gezien te hebben. Bij de verschillende pijplengtes testen we de motor en meten we zoals bij meting 1 en 2 de puls-frequentie. De resultaten zijn in de tabel hiernaast weergegeven. Voor de metingen zijn we uitgegaan van de pulswerking als weergegeven in meting 4, bladzijde 26.

Bij het uitzetten van de punten in een grafiek, is te zien dat de punten op een rechte lijn liggen.

Door te extrapoleren kunnen we de conclusie over het effect van pijpverlenging uitbreiden: als de pijp gelijkmatig langer wordt, zal de puls-frequentie gelijkmatig toenemen.

Conclusie

Bij verkorting van de pijp, pulseert de *pulsejet* met een hogere frequentie, die gelijkmatig stijgt met gelijkmatige afname van de lengte. In de motor verbrandt vaker per seconde het mengsel, dus zal het vermogen ook stijgen.

Een blijvend periodieke puls ontstaat echter niet. Nieuwe aanpassingen volgen.

naam: Rob Bierbooms & Joris Goudsmits
 © havovwo.nl februari 2004

Uitvoering en resultaten

We vermoeden dat het mengsel van lucht en gas niet optimaal is (wat kan verklaren dat de ontbranding met bougie niet werkte). Daarom willen we het gas direct in de verbrandingskamer injecteren. Deze optie wordt namelijk bij verschillende modellen die op internet te zien zijn ook toe-gepast. Daartoe halen we de bougie van de ontbrandings-kamer en schroeven een nieuw plaatje op het gat, met daar-op een moer gesoldeerd die op de schroefdraad van de gastoevoer past (fig. 30).

Bij testen blijkt dat het totaal geen verschil uitmaakt. De blijvend periodieke puls ontstaat niet. We besluiten nog metingen uit te voeren aan pulsfrequenties (AUD015). Deze frequentie blijkt ongeveer 120 Hz te zijn, net zo hoog als met dezelfde lengte, maar gastoevoer via de inlaat. Helaas kunnen we niet met bougie testen, omdat haar plaats is ingenomen.

fig. 30 GASAANSLUITING DIRECT OP ONTBRANDINGSKAMER



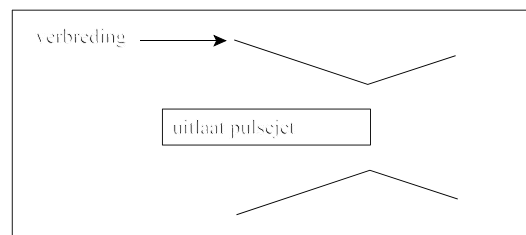
Conclusie

De gastoevoer direct in de ontbrandingskamer heeft geen positieve of negatieve gevolgen voor de werking van de *pulsejet*.

Het uiteindelijke ontwerp

Uitvoering en resultaten

Als we een goed werkend *pulsejet* hadden verkregen, zouden we nog interne en/of externe verbeteringen aan proberen te brengen om het vermogen te verhogen. We dachten aan een soort van verbreding aan het eind van de uitlaatpijp, zodat de hete, uitzettende gassen toch nog kracht kunnen leveren (fig. 31). Door het vele testen en aanpassen hebben we toch een *pulsejet* weten te creëren die kracht levert, ook al is deze niet constant. De optimale omstandigheden hebben we in al deze uren testen reeds bepaald en worden in de conclusie nog eens samengevat.



Conclusie

De optimale omstandigheden voor onze *pulsejet* zijn als volgt: een korte pijplengte (45 cm), extra luchttoevoer door middel van een föhn op vijf tot tien centimeter afstand van de inlaat en een kleine gastoevoer van butaan. Het resultaat is een ‘periodiek periodiek pulserende’ (zie meting 4) *pulsejet*.

Discussie

Bij de eerste testen met de bougie (en elektriseermachine) veronderstelden we dat bougie het gas gemend met lucht kon ontbranden. Later bleek echter het tegengestelde. De eerste waarnemingen waren dus totaal fout. Deze waarnemingen waren op het gehoor, we konden niets zien in de pijp, omdat daar al een vlam uitkwam. Dat we veronderstelden dat het in eerste instantie werkte, was eigenlijk te snel. We hadden toen al, voorzichtig, zichtbaar buiten de *pulsejet* met gas en een bougie moeten testen. Deze incorrecte waarneming heeft echter geen gevolgen gehad voor ons onderzoek.

EVALUATIE

Productevaluatie

Toen wij begonnen aan een profielwerkstuk met dit onderwerp en het gekozen eigen onderzoek, waren wij bewust van het risico dat er aan vast hing. Uiteindelijk viel het bouwen van de pulsejet mee wat een van de zorgen van ons was, dit dankzij een oom van Joris die bereidwillig was ons te helpen met de bouw. Het testen van de motor verliep in de meeste gevallen echter niet zoals wij verwacht hadden. Bij de eerste serie tests constateerden wij alleen een vlam in de pijp. Naarmate we meer gingen variëren en uiteindelijk optimaliseren kwamen wij dicht bij het uiteindelijke resultaat wat wij voor ogen hadden. Helaas is dit resultaat niet bereikt. Ondanks de vele pogingen in tal van uren diverse eigenschappen, bijvoorbeeld lengte en gastoevoer, te variëren zijn wij er niet in geslaagd een goed werkend exemplaar te produceren. Uiteraard vinden we dit jammer.

Ondanks het niet bereikte resultaat, is ons eigen onderzoek een goed leerproces geweest voor ons en naarmate we meer gingen testen vergaarden wij meer kennis over de oorzaken van het niet functioneren van de motor. Door die zaken te optimaliseren zijn wij dicht bij een goed resultaat geweest, echter hebben wij niet kunnen ontdekken wat de factor is geweest die de goede werking van onze pulsejet in de weg zit.

Tijdens de oriëntatiefase met de straalmotoren zijn wij tot een goed inzicht gekomen over de geschiedenis, werking en toepassing van deze motoren. Hiernaast heeft een bezoek aan de Technische Dienst van de KLM extra inzicht gegeven in de praktijktoepassing van de straalmotoren.

Procesevaluatie

Samen met het opstellen van een plan van aanpak hebben wij een tijdschema opgesteld waarin ons profielwerkstuk tot stand moest komen. Hiervoor hebben wij een onderscheid gemaakt in de oriëntatiefase, de onderzoeksfase en de verwerkingsfase. In grote lijnen is onze planning goed na te volgen geweest, alleen bij ons eigen onderzoek is gebleken dat dit meer tijd ging kosten dan wij aanvankelijk dachten.

De oriëntatiefase is redelijk vlot verlopen. Door het verkrijgen van boeken met geschikte informatie via de Technische Universiteit van Eindhoven hoefden wij deze fase alleen de informatie te verwerken.

In de onderzoeksfase hebben wij een bezoek gebracht aan de KLM Technische dienst om alles in de praktijk te bekijken en ook dit heeft erg geholpen. Het voornaamste van de onderzoeksfase, het bouwen van de pulsejet, heeft ons meer tijd gekost dan wij dachten, zoals eerder gezegd. Ondanks de goede hulp die wij kregen, kostte het bouwen op zich al meer tijd dan we gepland hadden. Het testen verliep ook niet erg vlot en er waren diverse complicaties die ervoor zorgden dat wij er meer tijd in moesten steken dan wij in het begin nodig dachten te hebben. Ondanks deze tegenvaller hebben wij alles op tijd afgekregen door de onderzoeksfase door te zetten terwijl wij al diverse gegevens aan het verwerken waren.

De vraagstelling voor de aanpak van dit technisch ontwerp is achteraf gezien niet volledig goed gekozen. We zijn er namelijk vanuit gegaan dat het prototype van de pulsejet al zou werken, zodat we metingen konden verrichten om tot een nog beter ontwerp te komen. In de gehele vraagstelling is echter geen enkele aandacht geschonken aan de problemen die bij de bouw en testen van de pulsejet zouden kunnen optreden en dit is dus een punt van kritiek.

De verwerkingsfase is goed verlopen bij ons. Wij hebben, ondanks dat de onderzoeksfase uitliep, de verwerkingsfase op tijd kunnen afronden.

De samenwerking verliep over het algemeen naar ons beider tevredenheid. Wij hebben door samen niet alleen theoretisch, maar vooral praktisch bezig te zijn dit resultaat voort kunnen brengen.

LITERATUURLIJST

Bathie, W (1984); “Fundamentals of Gas Turbines”; Chichester: Wiley, pp 1-17

Bolt, S (2003); “Scramjet, hypersonisch experiment”; in Kijk, april 2003, pp. 58-63

Cohen, H et al (1996); “Gas Turbine Theory”; Longman Group Limited, pp. 1-36

Internet:

NASA (1991); “Engines 101 - Ultra-Efficient Engine Technology”; <http://www.ueet.nasa.gov/engines101.php>; 01-11-2001

Simpson, B (2001); “How pulsejets work”; <http://www.aardvark.co.nz/pjet/howtheywork.shtml>; 09-06-2001

Westberg, F (2000); “Inside the pulsejet engine”
http://www.aardvark.co.nz/pjet/inside_pj.pdf; 25-04-2000