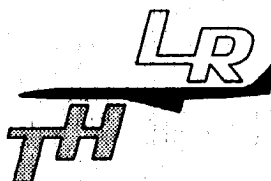


TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT

LUCHTVAART- EN RUIMTEVAARTTECHNIEK



TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT
AFDELING DER LUCHTVAART- EN RUIMTEVAARTTECHNIEK

Memorandum M-328

Raketvoortstuwing,
Enige Nieuwe Ontwikkelingen,
Problemen en Onderzoek

H.F.R. Schöyer

Delft - Nederland
mei 1979

Samenvatting

Aan het einde van de jaren zeventig lijkt voor de rakettechniek, zeker voor wat de vaste stuwstof raket motor betreft, een periode van vernieuwing te zijn aangebroken. Op stuwstofgebied doet zich een aantal interessante ontwikkelingen voor. Het is mogelijk een flexibele double base stuwstof te vervaardigen, die zich leent om in de raket motor te worden ingegoten. De composiet stuwstoffen vertonen een paar interessante vernieuwingen. Het klassieke, op Ammonium Perchloraat (AP) gebaseerde composiet kruit bevatte meestal een hoeveelheid aluminium. Dit had tot doel instabiele verbranding te onderdrukken en de prestaties te verhogen. Om rookvorming tegen te gaan wordt getracht het aluminium uit deze composiet kruitsoorten weg te laten, zonder de prestaties nadelig te beïnvloeden. Hiernaast is een aantal onderzoeken gedaan, waaruit blijkt dat composiet stuwstoffen met nitramine (HMX) i.p.v. AP zeer veel belovend zijn. Behalve dat de vlam temperatuur van nitramine composiet stuwstoffen lager is dan van AP composiet stuwstoffen, is de prestatie hoger.

Het is mogelijk nitramine stuwstoffen zodanig samen te stellen dat de verbrandingsproducten zeer weinig, of geen water en kool-dioxide bevatten. Hierdoor wordt de infra-rood emissie aanzienlijk verminderd. De verbrandingsproducten van double base en nitramine composiet stuwstoffen zijn sterk onder geoxideerd. Het is daarom mogelijk om ramlucht aan de verbrandingsproducten toe te voeren zodat nog extra verbranding plaats vindt en de stuwkracht aanzienlijk kan worden verhoogd. Deze ontwikkeling staat bekend als de "Air Augmented Rocket". Een nog verder gaande ontwikkeling is de Integrated Ram Rocket. Hierbij wordt de raket door een klassieke vaste- of vloeibare stuwstof motor versneld. Als deze motor uitgewerkt is, en de voertuigsnelheid hoog genoeg is, wordt een vloeibare, vaste of hybride gas generator ontstoken. Deze levert een uitermate brandstofrijk mengsel dat met de ramlucht verbrandt, zodat het voertuig nu door een ramjet wordt aangedreven.

Instabiele verbranding kan bij vaste stuwstof motoren op allerlei wijzen optreden. In de meeste gevallen is er sprake van een koppeling tussen een acoustische frequentie van de motor en de response van het

brandende kruit op de optredende drukfluctuaties. Zowel voor AP als voor nitramine composiet kruit wordt verwacht dat ook in de toekomst zich hier nog veel moeilijkheden zullen voordoen. De besturing door middel van richtingsveranderingen van de stuwkrachts vector (Thrust Vector Control) kent twee belangrijke nieuwe ontwikkelingen. De ene berust op het principe van de kantelbare straalpijp maar dan met zeer hoge rotatie snelheid: ca 15 rad/s. Dit maakt zeer snelle manoeuvres tijdens de gestuwde vlucht mogelijk. De andere berust op kunstmatige eenzijdige loslating in de straalpijp. Dit kan o.a. geschieden door injectie van een vloeistof of gas. De constructieve ontwikkelingen bewegen zich in twee verschillende richtingen. Enerzijds is er de tendens naar hoogwaardige gewapende kunststoffen om tot zeer sterke, lichte constructies te komen; anderzijds is er de tendens om van handelsmaterialen, zoals standaard stalen buis, gebruik te maken bij de bouw van de kleine raketten om zodoende de kosten te verminderen.

Inhoud

	blz
Samenvatting	1
Inhoud	2
1. Inleiding	4
2. Stuwstoffen	4
2.1 Huidige Situatie	4
2.2 Toekomstige Ontwikkelingen	7
2.2.1 Flexibel Double Base Kruit	7
2.2.2 Composiet Gemodificeerd Double Base Kruit	7
2.2.3 Composiet Stuwstof zonder Aluminium	7
2.2.4 Nitramine Stuwstoffen	7
3. Luchtgebruikende Voortstuwings Methoden	12
3.1 Raket Motoren met Secundaire Luchttoevoer (Air Augmented Rockets)	12
3.2 Geïntegreerde Ram Raket (Integrated Rocket Ramjet)	12
4. Instabiele Verbranding	13
5. Stuwkrachts Besturing	14
6. Constructiematerialen	15
7. Conclusies	16
8. Literatuur	18

1. Inleiding

Sinds het einde van de jaren zestig zijn er in de technologie van de vaste stuwstofraketmotoren weinig opzienbarende vernieuwingen opgetreden. De enige technische doorbraak van betekenis was wellicht het verschijnen van de beweegbare straalpijp voor dat type motor. Dit betekent dat richtingsverandering van de stuwkracht (Thrust Vector Control, TVC) nu ook bij vaste stuwstof motoren mogelijk is geworden zonder dat dit met aanzienlijke stuwkrachtsverliezen gepaard gaat.

Gas- of vloeistof injectie, ten behoeve van TVC was al enige tijd mogelijk voor vloeibare stuwstofmotoren, en deze techniek is nu ook beschikbaar voor de vaste stuwstof motoren. Voor het overige richtte de vaste stuwstof technologie zich op het perfectioneren van bestaande systemen en stuwstoffen. Nu, aan het einde van de jaren zeventig staan enkele nieuwe ontwikkelingen voor de deur waarmee zowel de gebruiker als de ontwerper rekening moeten houden.

Deze ontwikkelingen betreffen de technologie van de stuwstoffen, besturing d.m.v. de stuwkracht en de introductie van enige nieuwe materialen. De meest belangwekkende ontwikkelingen lijken echter in de stuwstof technologie aanwezig te zijn. Hieraan zal dan ook de meeste aandacht worden besteed. Hiernaast staan enkele nieuwe voortstuwings technieken voor de deur voor (kleine) geleide wapens. Het is namelijk zeer wel denkbaar dat in de komende tien jaren, voor een aantal typen van geleide wapens, de raketmotor vervangen zal worden door ramjets.

2. Stuwstoffen

2.1 Huidige Situatie

Voor de voortstuwing van vaste stuwstof raket motoren werd tot het einde van de jaren vijftig in hoofdzaak gebruik gemaakt van zogenaamde double base stuwstoffen. Deze stuwstoffen bestaan uit een mengsel van glyceroltrinitraat en cellulosenitraat. De eerste component is een vloeistof; de tweede een vaste stof. Indien deze stoffen worden gemengd kunnen zij uitharden tot een vrij harde, plasticachtige substantie. Deze double base stuwstoffen hebben enkele zeer aantrekkelijke eigenschappen. Zij zijn namelijk qua samenstelling en productie methoden zeer nauw verwant aan kruitsoorten die al meer dan vijftig jaren voor kanonnen en geweren worden gebruikt. Daarom konden deze stuwstoffen in bestaande

kkruitfabrieken worden vervaardigd zonder grote investeringen in nieuwe machines te vergen en zonder dat veel onderzoek nodig was voor de ontwikkeling en fabricage. Daarnaast bezit deze kruitsoort een aantrekkelijke eigenschap voor militaire toepassingen: ze zijn rookloos; vooral bij raketwapens met een korte dracht, zoals anti-tankraketten en grond-lucht afweer raketten, is dat van belang. Een rookspoor verraaft onmiddellijk de lanceerplaats, dan wel de aanwezigheid van het projectiel. Voor bemande ruimtevaart is deze kruitsoort onaantrekkelijk. Het kruit kan exploderen, en wordt daarom door de grote Westerse ruimtevaart instanties, NASA en ESA, niet geaccepteerd als stuwstof voor bemande vluchten. Een ander nadeel van double base kruit is dat het hard en bros is en een hoge elasticiteitsmodulus bezit. Het is mede daardoor niet mogelijk een stuwstoflading in de verbrandingskamer in te gieten, zodanig dat een goede hechting tussen de motorwand en het kruit ontstaat. Tijdens het uitharden krimpt de stuwstof in zo'n mate, dat òf scheuren in de kruitlading ontstaan dan wel loslating van de motorwand optreedt. De pillen worden daarom na fabricage in de raket gelijmd, dan wel geklemd, maar deze methode vergt extra gewicht. Een ander nadeel is dat voor een maximale prestatie de verhouding tussen glyceroltrinitraat en cellulosenitraat zodanig is dat het mengsel niet uithardt tot een vaste substantie maar zeer slap en week blijft. Om deze redenen is men gedurende de jaren vijftig begonnen met de ontwikkeling van z.g. composiet stuwstoffen. Deze stuwstoffen bestaan uit een mengsel van plastic en een oxidator. Voor de oxidator zijn allerlei anorganische zouten beproefd maar de beste resultaten zijn bereikt met Ammonium Perchloraat, NH_4ClO_4 , dat algemeen in de rakettechniek als AP wordt aangeduid. In de loop der tijden zijn diverse plastic binders ontwikkeld en beproefd. Tegenwoordig worden vooral HTPB en CTPB, Hydroxyl of Carboxyl Terminated Poly Butadiene als binders toegepast.

De mechanische eigenschappen van deze stuwstoffen zijn verre superieur aan de double base stuwstoffen. Het is hierbij mogelijk de korrel in de motor kamer in te gieten, waarbij een goede mechanische hechting tussen wand en stuwstof kan ontstaan. Deze techniek, die bekend staat als "case bonding" maakt relatief lichte constructies mogelijk.

Daarenboven is deze stuwstof voldoende veilig om voor bemande vluchten te worden toegepast. De vaste stuwstof boost motoren van de Space Shuttle gebruiken dan ook zo'n composiet stuwstof.

Een volgend voordeel is dat de prestatie van composiet stuwstoffen aanzienlijk heter is dan van de klassieke double base stuwstoffen. Natuurlijk heb-

ben deze stuwstoffen ook hun nadelen. Composiet stuwstoffen geven, in veel sterkere mate dan double base stuwstoffen, aanleiding tot instabiele verbranding. Hierbij kunnen vrij grote druk fluctuaties optreden. Dit kan gepaard gaan met hogere warmte overdracht naar de raket constructie die ten gevolge daarvan kan bezwijken. De optredende trillingen kunnen componenten, zoals het geleidings- en besturings-systeem of andere regelsystemen ernstig hinderen, of zelfs beschadigen, terwijl ook in veel gevallen de lading niet tegen dit soort trillingen is opgewassen. Om deze druk fluctuaties te dempen wordt wel aluminium aan de composiet stuwstof toegevoegd. Het aluminium verhoogt tevens de verbrandings temperatuur en daarmee de raketprestaties. Niet in alle gevallen is de toevoeging van aluminium succesvol. Als nadeel geldt nog dat het aluminium als een vaste stof, aluminium oxide, de raket verlaat, en dus als rook zichtbaar is. In die gevallen waarbij de raket rookloos moet zijn is dit dus een onoverkomelijk bezwaar. Andere methoden om druk fluctuaties te dempen bestaan uit middelen om de energie van de druk fluctuaties te absorberen, b.v. d.m.v. resonantiestaven.

Een van de verbrandings producten van NH_4ClO_4 is HCl . Zoutzuur geeft in een vochtige atmosfeer een dicht rookspoor en om deze reden is composiet stuwstof voor een aantal militaire typen raketten niet toepasbaar. Het zoutzuur is tevens zeer hinderlijk voor diegenen die zich in de buurt van de lanceerinstallatie bevinden terwijl het in sterke mate corrosief werkt. Met name is dat bezwaarlijk voor de lanceerinstallatie, indien geen speciale maatregelen worden genomen om hieraan tegemoet te komen.

Dit alles maakt dat composiet stuwstoffen voor een aantal toepassingen zoveel nadelen heeft dat hiervoor nog steeds double base stuwstoffen worden toegepast.

Om de prestatie van double base stuwstoffen te verbeteren heeft men hieraan wel AP toegevoegd. Hiermee wordt de hoeveelheid zuurstof in de stuwstof verhoogd, maar doordat een oxidator in vaste vorm is toegevoegd, blijft men een stuwstof van voldoende sterkte en stijfheid behouden. Natuurlijk wordt, gelijktijdig met de voordelen, een gedeelte van de nadelen van composiet stuwstoffen in huis gehaald. Deze stuwstoffen staan bekend als Composite Modified Double Base (CMDB).

2.2 Toekomstige Ontwikkelingen

2.2.1 Flexibel Double Base Kruit

Zoals uit het voorgaande is gebleken, hebben double base stuwstoffen een aantal aantrekkelijke eigenschappen. Als groot bezwaar werd de hoge stijfheid ondervonden, die het ingieten van double base kruit in de motor verhinderde.

Men is er nu in geslaagd experimenteel double base stuwstoffen te ontwikkelen die veel zachter en elastischer zijn dan het klassieke double base kruit. Dit is o.a. bereikt met behulp van polymeer binders en/of mitro-weekmakers. Deze technologische doorbraak maakt "case bonding" van double base stuwstoffen mogelijk. Hiernaast lijken ook de mechanische eigenschappen bij lage temperaturen aanzienlijk verbeterd te zijn. Dit alles is daarom zo belangrijk omdat, zonder afbreuk te doen aan de goede eigenschappen van double base kruit, enkele van de minder goede eigenschappen geelimineerd lijken. Natuurlijk moet nog gezien worden hoe zo'n stuwstof zich op langere termijn zal gedragen. De verouderingseigenschappen zijn voor raketkruit nu eenmaal, naast de mechanische- en prestatie-eigenschappen van groot belang. Het ontbreken van een rookspoor geldt ook bij dit flexibele double base kruit.

2.2.2 Composiet Gemodificeerd Double Base Kruit

Zoals al eerder is vermeld, is het klassieke double base kruit, onder-geoxideerd. D.w.z. indien het gehalte aan glyceroltrinitraat, dat een overmaat aan O_2 bezit, verhoogd zou kunnen worden, zou een stuwstof ontstaan waarbij alle verbrandingsprodukten volledig geoxideerd zouden zijn. Hierbij zou een maximale prestatie worden bereikt. Echter, bij deze stoichiometrische mengverhouding ontstaat geen vaste substantie. Men heeft dat trachten te ondervangen door een anorganische, vaste oxidator, bijv. AP aan double base kruit toe te voegen. Hoewel de prestaties van deze, composiet gemodificeerde double base stuwstoffen beter zijn dan van het klassieke double base kruit, heeft de toepassing geen grote vlucht genomen. Nadelen zijn een niet zo goede hechting tussen AP deeltjes en de double base matrix, zodat de mechanische eigenschappen nog verder verslechterden, en de vorming van HCl damp, die tezamen met waterdamp in de atmosfeer, tot een dichte nevel aanleiding kan geven. Nu de mogelijkheid bestaat flexibel double base kruit te maken, worden ook deze composiet, gemodificeerde double

base stuwstoffen weer interessanter.

Terwijl de prestatie van flexibel double base kruit, die van gewoon double base kruit niet veel ontloopt, is de prestatie van Composiet Gemodificeerd Double Base kruit, aanzienlijk beter.

Dit moge worden geïllustreerd aan de hand van enige getalwaarden. Zoals bekend is een maat voor de prestatie van raketkruit, de impuls die een hoeveelheid kruit in staat is te leveren.

De impuls per gewichtseenheid kruit wordt aangeduid met de specifieke impuls, en deze bedraagt voor een double base kruit ca. 220 s. Voor een CMDB kruit kan deze oplopen tot ruim 260 s.

2.2.3. Composiet Stuwstof zonder Aluminium

Om de prestatie van composiet stuwstoffen te verhogen, en om verbrandingsinstabiliteit te onderdrukken wordt aan composiet stuwstof vaak metaalpoeder, meestal aluminium, toegevoegd. Het aluminium verbrandt gedeeltelijk tot Al_2O_3 , wat ook bij hoge temperaturen een vaste stof is. Deze kleine vaste deeltjes Al_2O_3 , waarvan de diameter, ruw-weg tussen de 50 μm en 400 μm ligt, fungeert als een condensatie term. Om rookvorming enigszins te onderdrukken is men er toe overgegaan het aluminium weg te laten. De prestaties van het kruit dalen hierdoor enigszins terwijl de kans op verbrandingsinstabiliteit toeneemt. Om het zoutzuur, dat met de atmosferische waterdamp een dichte nevel kan geven te binden, wordt wel natrium aan het kruit toegevoegd, zodat in plaats van HCl, NaCl een van de verbrandingsproducten wordt. Hiermee worden de HCl nevel vorming, de corrosie problemen en de hinder voor degenen die zich in de nabijheid van de lanceerinstallatie bevinden, verminderd, maar anderzijds worden nieuwe condensatie termen geïntroduceerd, en de specifieke impuls wordt weer verder verlaagd. Toch kunnen voor bepaalde toepassingen, de voordelen groot genoeg worden geacht om deze composiet stuwstoffen zonder aluminium en eventueel met natrium, toe te passen.

Aangezien bij de veroudering van kruit ook de verbrandingseigenschappen enigszins veranderen, moet de gebruiker van raketten met dit soort stuwstoffen erop bedacht zijn, dat zich op langere duur problemen met instabiele verbranding kunnen voordoen.

2.2.4. Nitramine Stuwstoffen

Een geheel nieuwe ontwikkeling waaraan momenteel in de Verenigde Staten en in Japan intensief wordt gewerkt, zijn de nitramine stuwstoffen. Nitraminen, zoals b.v. Octogen of HMX en Hexogen of RDX zijn reeds geruime tijd in

gebruik als brisante springstoffen. Voor toepassingen als raketstuwstof lijkt vooral HMX zeer interessant o.a. in verband met de mechanische eigenschappen in combinatie met binders. HMX bevat onvoldoende zuurstof voor een volledige verbranding. De belangrijkste reactieproducten zijn H_2O , N_2 , H_2 , CO_2 en CO . In combinatie met de erg grote hoeveelheid energie die bij ontleding vrij komt, levert HMX een vrij hoge specifieke impuls. In combinatie met een plastic binder kan HMX wellicht als een goede raketstuwstof fungeren. In tegenstelling tot composiet kruit fungeert de binder nu niet als brandstof maar als "verdunner". Desondanks kunnen echter zeer hoge specifieke impulsen worden bereikt bij een relatief lage verbrandingstemperatuur.

Kubota⁽¹⁾ heeft de prestaties van een composiet kruit bestaande uit Polybutadieen Acryl zuur en HMX vergeleken met dezelfde binder met AP. Bij een toenemend gehalte aan HMX en AP nemen de verbrandings temperatuur en de specifieke impuls toe. Bij HMX is deze toename monotoon, bij AP worden maximale vlamtemperatuur en specifieke impuls bereikt in de buurt van een stoichiometrische mengverhouding. Bij een gegeven verbrandingstemperatuur blijkt HMX composiet een ca. 15s hogere I_{sp} te geven dan AP composiet of omgekeerd bij een zelfde specifieke impuls ligt de vlamtemperatuur van HMX composiet zo'n 400 K à 500 K lager dan voor AP composiet. Dit is geïllustreerd in Fig. 1. Het is duidelijk dat hierdoor een aanzienlijke vermindering optreedt in de warmtebelasting, en voor het erosiegevaar aan de straalpijp. Daarenboven ontbreken bij HMX composiet corrosieve gassen, die bij AP composiet, o.a. in de vorm van HCl zo kenmerkend zijn.

Een tweede aantrekkelijk aspect van HMX stuwstoffen is gelegen in de samenstelling van de verbrandingsproducten. In Fig. 2 is de samenstelling van de verbrandingsproducten geschetst voor AP en HMX stuwstoffen. Voor AP composiet is tevens het gebied van praktische stuwstoffen aangegeven. Zoals blijkt bevatten de verbrandingsproducten veel water en kooldioxide.

De samenstelling in molaire en gewichtspercentages is gegeven in tabel 1.

Tabel 1.

Globale samenstelling van de verbrandingsproducten van een typisch AP composiet kruid.

	Molaire Concentratie (%)	Gewichts Concentratie (%)	
H ₂	36 - 15	4	1
H ₂ O	13 - 36	12,7	27,5
HCl	12 - 16	23,8	24,7
N ₂	7 - 8	10,7	9,6
CO	32 - 14	48,8	16,7
CO ₂	- 11	-	20,5

Naast vaste deeltjes zijn juist H₂O en CO₂ stoffen die bij hogere temperaturen zeer veel infra rode straling uitzenden zodat met infra rood detectoren, raketten die b.v. AP composiet als stuwstof gebruiken, goed te detecteren zijn. Hetzelfde geldt overigens ook voor double base stuwstoffen. Bekijken we nu de samenstelling van de verbrandingsproducten van HMX stuwstoffen bij een HMX concentratie van ca. 85% dan zien we dat de verbrandingsproducten hoofdzakelijk bestaan uit CO, H₂ en N₂.

De samenstelling is gegeven in tabel 2.

Tabel 2.

Globale samenstelling van de verbrandingsproducten van een HMX composiet bij ca. 85% HMX.

	Molaire concentratie (%)	Gewichts Concentratie (%)
H ₂	34	3,5
CO	42	61,4
N ₂	24	35,1

Het blijkt dat de emissie van IR stralers aanzienlijk gereduceerd is, wat voor militaire toepassingen van groot belang kan zijn.

Voordat tot de toepassing van HMX composiet kan worden overgegaan zijn er nog enkele problemen die moeten worden opgelost. Het eerste is het vinden

van een binder waarmee goede mechanische kruteigenschappen, gecombineerd aan goede prestatie eigenschappen worden bereikt. Hiermee lijkt men op de goede weg te zijn. De mechanische eigenschappen van experimenteel kruit lijken nog slechts iets onder te doen voor de betere soorten AP composiet kruit. Over de verouderings eigenschappen is minder bekend. Een groot voordeel van HMX is, dat het in tegenstelling tot AP niet hygroscopisch is.

Voor al voor militaire toepassingen is het wenselijk dat raketkruit bij de operationele drukken plateau brandend is, d.w.z. dat bij een drukverandering het kruit niet sneller of langzamer gaat branden. De reden hiervoor ligt niet zozeer in de motorprestaties maar in het geleidingssysteem. Het geleidingssysteem van kleine militaire raketten is meestal zeer eenvoudig en houdt niet of nauwelijks rekening met motorprestaties die (sterk) afwijken van de nominale. Vinden deze afwijkingen toch plaats, dan schiet het geleidingssysteem tekort en kan het wapen zijn doel missen. Het is om deze reden dat de raketfabrikanten geconfronteerd worden met de eis dat het stuwkrachtsverloop nauwelijks beïnvloed mag worden door externe omstandigheden. Men tracht hieraan te voldoen door een kruit te selecteren waarbij in het werkgebied van de motor de brandsnelheid nauwelijks van de druk afhangt. Bij double base kruit kan dat heel goed gerealiseerd worden. Bij composiet kruit is dit al moeilijker, maar de drukafhankelijkheid van de brandsnelheid kan vrij beperkt worden gehouden. Bij HMX composiet is dit niet het geval. Hier blijkt dat de brandsnelheids exponent van de orde 0,4 kan zijn bij lagere drukken om voor hogere drukken snel toe te nemen tot waarden die in de buurt van 1 liggen. Het punt waarbij deze omslag optreedt, wordt volgens Kumar en Strand⁽²⁾ o.a. bepaald door de deeltjes grootte der nitramine kristallen. Fig. 3 geeft het verloop van de brandsnelheid schematisch weer. Zeer hoge brandsnelheidsexponenten, in de buurt van 1 moeten vermeden worden i.v.m. de onmogelijkheid dan een stabiele evenwichtsdruk te bereiken.

Tot op heden is men er niet in geslaagd nitramine composiet kruit te vervaardigen dat plateau brandend is. Ook de brandsnelheids exponent is niet varieerbaar. Deze ligt of in de buurt van 0,4 à 0,5 of in de buurt van 1. Bij toepassing in geleide raketten zullen dus hogere eisen aan het geleidingssysteem moeten worden gesteld om dit bezwaar te overkomen.

Andere toepassingen van nitraminen zijn het toevoegen hiervan aan double base kruit, zodat weer een composiet gemodificeerd double base kruit ontstaat. Het blijkt dat men dan een hogere I_{sp} en een reductie in rook t.g.v. onverbrande deeltjes verkrijgt.

Ook aan op AP gebaseerd composiet kruit kunnen nitraminen worden toegevoegd. Hier treedt eveneens een verbetering van de prestaties op.

3. Luchtgebruikende Voortstuwingsmethoden

3.1. Raketmotor met Secundaire Luchttoevoer (Air Augmented Rocket).

Zoals uit het voorgaande al is gebleken zijn de verbrandingsproducten van (vaste stuwstof) raketten vaak brandstofrijk. Dit is vooral het geval bij double base en nitramine composiet stuwstoffen. Door deze verbrandingsproducten met de atmosferische lucht verder te verbranden, kan een extra stuwkracht worden verkregen. Fig. 4 toont hoe een dergelijk systeem kan worden uitgevoerd. Een vaste stuwstof raketmotor produceert een brandstofrijke, hete gasstraal. Via luchthappers wordt een luchtstroom toegevoerd. Op het grensvlak van beide stralen vindt een sterke turbulente menging plaats, gevolgd door naverbranding in de secundaire verbrandingskamer. De stuwkracht wordt in eerste instantie door de raket geleverd. Er is geen tweede straalpijp zodat dit type raket ook geschikt is om zonder aanvangsnelheid te worden gelanceerd. Bij dit systeem kan ca. 10% van de massa in de uiteindelijke stuwstraal uit bijgemengde lucht bestaan. Afhankelijk van de uitvoering en de vlucht snelheid kunnen stuwkrachtsverhogingen van 50% tot 200% worden bereikt.

3.2. De Geïntegreerde Ram Raket. (Integral Rocket Ramjet)^(3,4).

De ramraket is een combinatie van een raketmotor en ramjet. De raketmotor is in feite een gasgenerator die zeer brandstofrijke, hete gassen produceert, terwijl de atmosferische lucht in een secundaire verbrandingskamer met deze gassen wordt gemengd om tot volledige verbranding te komen. Er is een zeer grote variëteit aan uitvoeringen denkbaar. De raketmotoren kunnen gebaseerd zijn op

- vloeibare stuwstoffen
- vaste stuwstoffen of op
- hybride stuwstoffen.

In de Verenigde Staten wordt veel onderzoek verricht naar dit type voortstuwert met vloeibare stuwstoffen terwijl in Duitsland de ontwikkeling sterk gericht is op vaste stuwstofmotoren. Ook aan de mogelijkheden die de hybride raketmotor in deze biedt wordt in Duitsland aandacht besteed.

Een principeschema van een geïntegreerde ram raket is gegeven in Fig. 5. De raket wordt eerst versneld door, b.v. een vaste stuwstofraketmotor. Bij het uitbranden ontsteekt deze de vaste stuwstof gasgenerator en werpt de raket straalpijp af. Dit is noodzakelijk omdat de vaste stuwstof aanjaagraket een werkdruk van ca. 10 à 15 MPa heeft, en dus een grote expansie verhouding behoeft, terwijl de ram jet werkt bij een druk tussen ruwweg 0,5 à 1 MPa. De expansie verhouding moet dan dus veel kleiner zijn. Het huis van de vaste stuwstof raketmotor doet nu dienst als verbrandingskamer, terwijl via de geopende inlaatpoorten ramlucht binnen treedt. Voor de hoogenergetische gasgenerator kan b.v. gedacht worden aan een mengsel bestaande uit 4,2% Boron, 25% AP, 7% Aluminium en de rest binder⁽⁴⁾.

Beide nieuwe voortstuwings methoden, de raketmotor met secundaire lucht toevoer, en de ene of andere uitvoerings vorm van een geïntegreerde ram-raket kunnen in de naaste toekomst een belangrijke rol gaan spelen voor die raketten waarvan de gehele vlucht binnen de atmosfeer plaats heeft. Dat zijn naast velerlei soorten militaire raketten bijvoorbeeld booster-motoren van draagraketten en sondeerraketten.

Om met de technische ontwikkelingen op dit gebied op de hoogte te blijven is het zeker wenselijk binnen Nederland aandacht aan deze ontwikkelingen te blijven schenken. Ook op het experimentele vlak zijn hier, zij het in beperkte mate, middelen voor aanwezig.

4. Instabiele Verbranding

Instabiele verbranding is nog steeds een van de grote problemen die zich bij het ontwikkelen van nieuwe raketmotoren voordoen. In het huidige kader kan hieraan niet veel aandacht worden besteed maar er zal worden aangegeven waar zich problemen voordoen. Het blijkt namelijk, dat ten gevolge van veroudering, oorspronkelijk stabiele motoren op den duur ook weer instabiel kunnen worden⁽⁵⁾. Dit is een probleem dat door veel gebruikers van raketten in onvoldoende mate wordt onderkend. In het volgende zullen wij ons beperken tot het bespreken van instabiele verbranding bij vaste stuwstofmotoren. Dat wil echter niet zeggen dat zulk soort problemen zich bij ram raketten of vloeibare stuwstof raketten niet voor kunnen doen. Zeker van vloeibare stuwstof raketten is bekend dat instabiele verbranding ernstige problemen kan opleveren.

Bij vaste stuwstofraketten hangt verbrandingsinstabiliteit ten nauwste samen met de wijze waarop het branden van raketkruit op kleine drukschommelingen

reageert. In het algemeen zal het kruit enige tijd nodig hebben om ten gevolge aan een kleine toename in de druk sneller te gaan branden. Anderzijds zal een druk stijging in een drukvat zich via drukslingeringen weer op het evenwichts niveau trachten in te stellen. Wat dat betreft gedraagt een raketmotor zich min of meer als een gesloten orgelpijp. Indien nu de tijd die het kruit nodig heeft om een extra hoeveelheid verbrandingsgassen af te geven, juist samen valt met de periode van de acoustische trilling van de drukgolf, zullen deze effecten elkaar versterken en ontstaat een sterk fluctuerende druk in de verbrandingskamer. Dit heeft diverse nadelige gevolgen. De nuttige lading en het geleidings- en besturingssysteem kunnen door de optredende trillingen beschadigd worden en niet goed meer functioneren. Ook is het mogelijk dat lokaal, de warmteoverdracht zo hoog wordt dat de constructie bezwijkt, en zelfs is het mogelijk dat de motor explodeert of dooft.

Hoewel double base kruit relatief weinig last van instabiele verbranding heeft, is het verschijnsel hier ook veelvuldig waargenomen. Bij op AP gebaseerd composiet kruit zijn de instabiliteitsproblemen berucht. Door het toevoegen van aluminium poeder is men er in het verleden in geslaagd de druk fluctuaties geheel of gedeeltelijk te onderdrukken, maar met de ontwikkeling van rookzwakke kruitsoorten, waar aluminium wordt weggelaten uit de samenstelling, zal het probleem van oscillerende verbranding zeker zijn kop weer opsteken. Ook ten aanzien van nitramine stuwstoffen verwacht men problemen met oscillerende verbranding. Juist omdat dit probleem zich niet alleen in de ontwerpfase voordoet, maar ten gevolge van veroudering zich ook aan gebruikers kan voordoen is het wenselijk dat gebruikers goed op de hoogte zijn met dat soort moeilijkheden. Het Prins Maurits Laboratorium, in samenwerking met de afdeling der Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek, verricht al sinds enige tijd, niet zonder succes, onderzoek op dat gebied^(6,7).

5. Stuwkrachts Besturing

Een overzicht van enige klassieke methoden voor besturing door middel van de stuwkrachtsvector (Thrust Vector Central) zijn gegeven door Lloyd⁽⁸⁾. Deze systemen zijn in het algemeen bekend en geven voor een groot deel een aanzienlijk stuwkrachts verlies.

Een tiental jaren geleden was het technisch niet mogelijk vaste stuwstof motoren met kantelbare straalpijpen uit te rusten. Sinds enige tijd is

Aan het einde van de jaren zestig waren er weinig nieuwe ontwikkelingen in de rakettechniek te bespeuren. De tijd tussen 1960 en 1970 was gekenmerkt door vele snelle ontwikkelingen in de rakettechniek, en het eind van de jaren zestig bood dan ook meer uitzicht op consolidatie en perfectionering van deze ontwikkelingen, dan op invoering van vernieuwingen. Nu, aan het einde van de jaren zeventig kondigen zich veel vernieuwingen aan, en verwacht mag worden dat een aantal hiervan in de komende tijd operationeel zal worden.

8. Literatuur

1. Kubota, N., Masamoto, T., en Hazama, M., Combustion of HMX Composite Propellants. Proceedings of the Twelfth International Symposium on Space Technology and Science, Tokyo, 1977, pp 507-512.
2. R.N. Kumar en L.D. Strand, Theoretical Combustion Modeling Study of Nitramine Propellants J.S.R., vol 14, no 7, July 1977, pp 423-433.
3. T.D. Myers en J.A. Trimble, Transition Technologies for Integral Rocket Ramjets, AIAA-Paper 78-1059 AIAA, New York, 1978.
4. N. Voss, Secundärkamerprozesse in Kombinationstriebwerken. Intern Rapport Messerschmitt-Bölkow-Blohm (ongedateerd).
5. J. Keijzer en R.S. de Boer, Controle Bruikbaarheid van Raketmotoren van 103 mm Lichtraketten. Rapport TL 1976-1, Technologisch Laboratorium TNO, Rijswijk, 1976.
6. R.S. de Boer en H.F.R. Schöyer: Results of L^* Instability Experiments with Double Base Rocket Propellants. Report LR-224/TL R-3050 I, Delft University of Technology, Dept. of Aerospace Engineering/Technological Laboratory TNO, Delft/Rijswijk, 1976.
7. R.S. de Boer, H.F.R. Schöyer and H. Wolff, Results of L^* -Instability Experiments with Double Base Rocket Propellants II Report LR-252/TL R-3050 II, Delft University of Technology, Dept. of Aerospace Eng./Technological Laboratory TNO, Delft/Rijswijk, 1977.
8. R. Lloyd, A Review of Thrust Vector Control Systems for Tactical Missiles, AIAA Paper 78-1071, AIAA, New York, 1978.
9. J.W. Cornelisse, H.F.R. Schöyer en K.F. Wakker, Rocket Propulsion and Spaceflight Dynamics, Pitmann, London, 1979, pp 109-110.
10. J. Vadyad en J.D. Hoffman, Analyses of the Effects of Rotation on the Forces and Moments Developed by Supersonic Propulsion Nozzles, AIAA-paper 78-1046 AIAA-New Yrok, 1978.

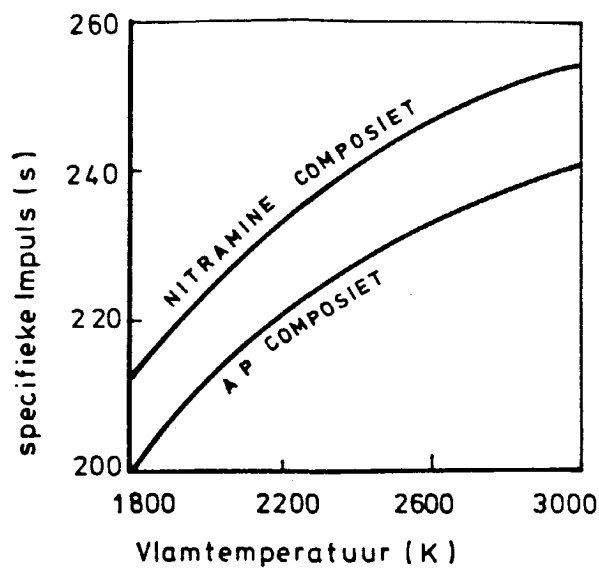


Fig.1: Vergelijking van de prestaties van HMX - en AP-composiet kruit. (bron,ref.1)

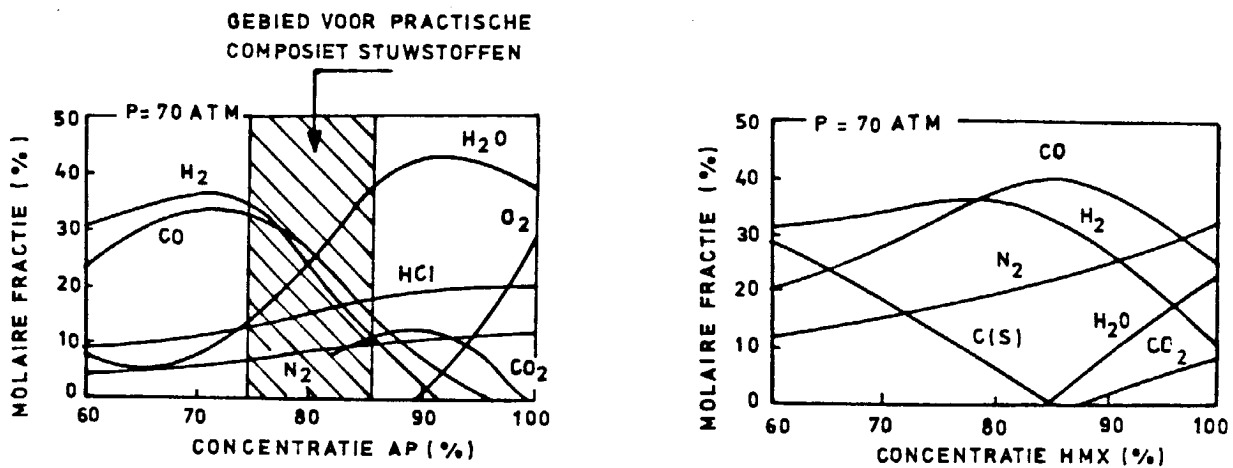


Fig.2: Vergelijking van de prestaties van AP-en HMX-composiet stuwstoffen .
Kamercondities bij 7 MPa. (bron ref.1)

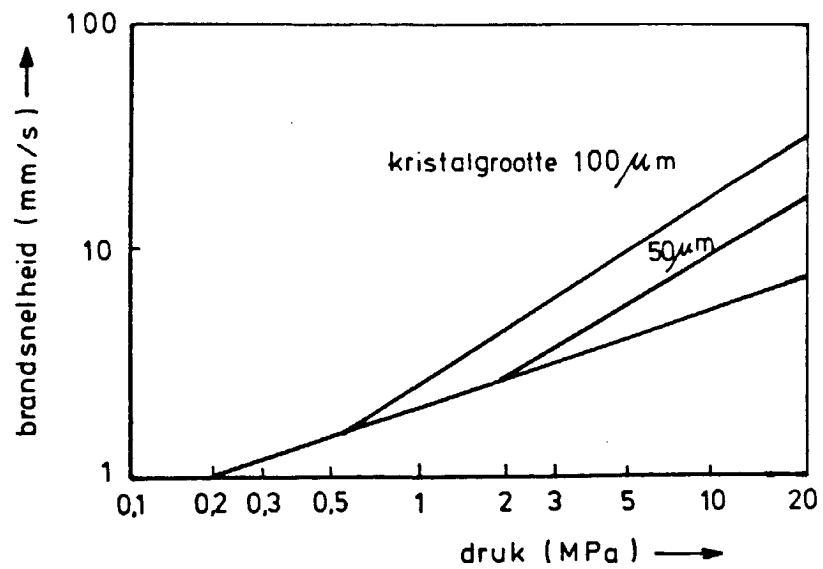


Fig. 3 : De brandsnelheid van Nitramine stuwstoffen, in afhankelijkheid van de kristal grootte.

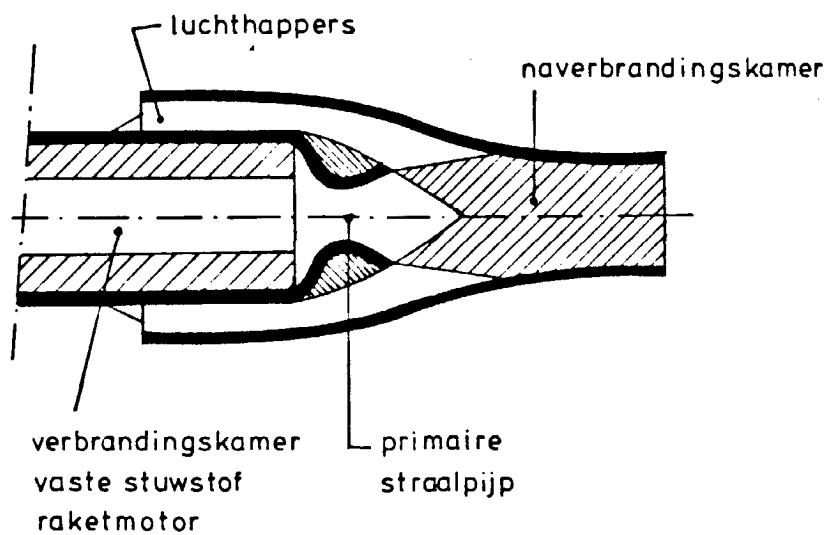
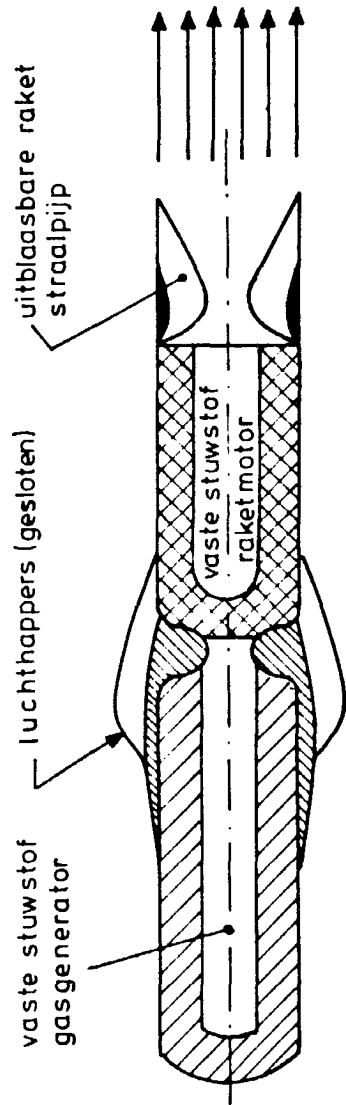
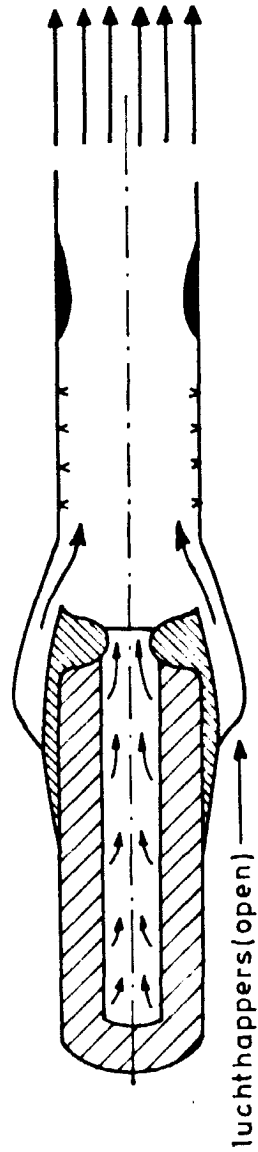


Fig. 4 : Principe schema van een vaste stuwstofraket met secundaire ram-lucht toevoer.



1e fase : versnelling door raket



2e fase : vaste stuwstof motor uitgebrand
raketstraalpijp afgeworpen
voortstuwing als ramjet

Fig. 5 : Principe van de Geïntegreerde RamRaket.

Memorandum 328



60142081077