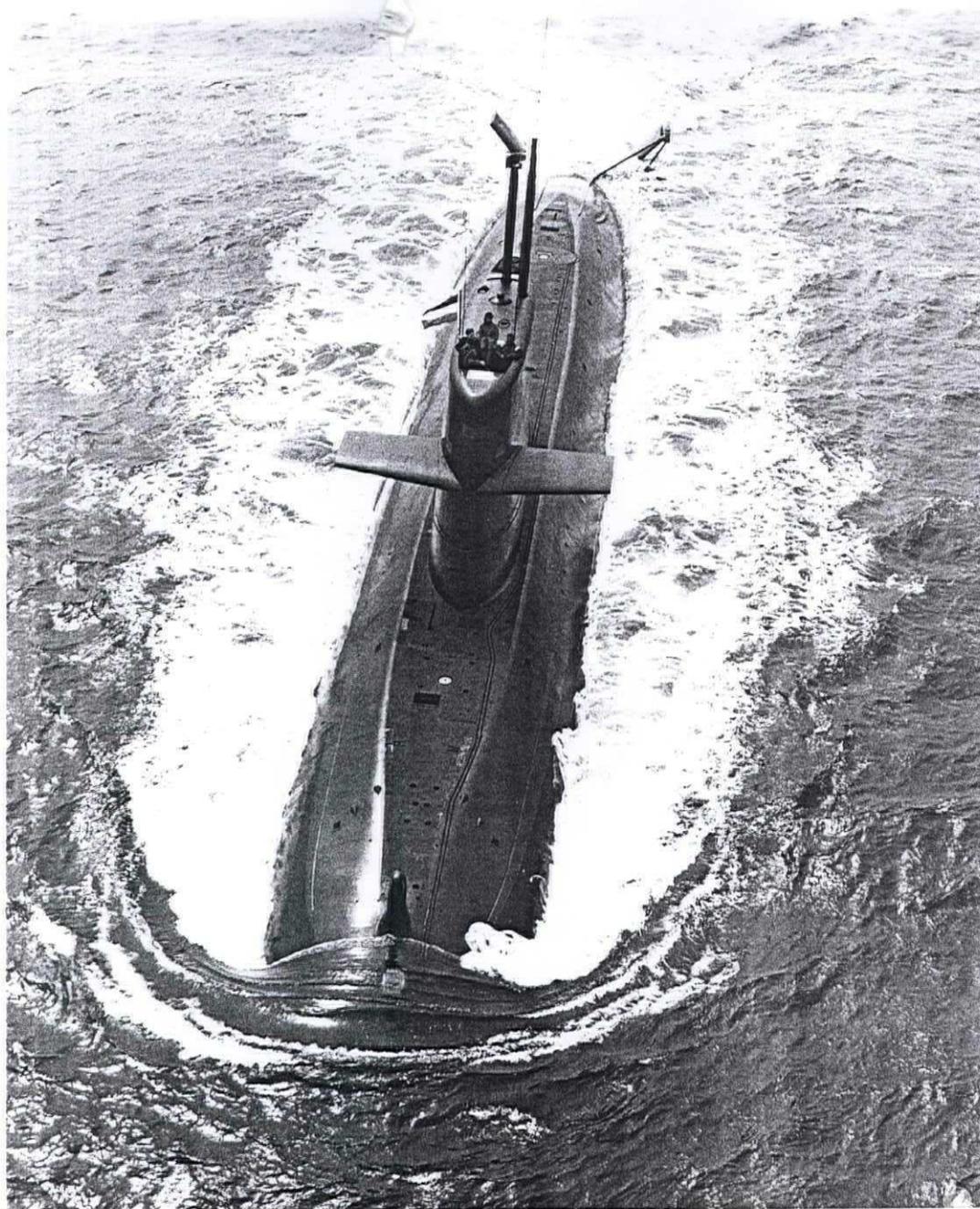


Literatuuronderzoek naar verschillende typen A/P-systemen

Rapport EMO 96/11

Mei 1997

S.J.J. D. niëls



Literatuuronderzoek naar verschillende typen AIP-systemen

S.J.J. Daniëls



Voorwoord

Dit rapport is geschreven in het kader van mijn vierdejaars opdracht voor de vakgroep Werktuigkundige Installaties van de werktuigbouwkunde faculteit van de Technische Universiteit Delft.

Bij de Koninklijke Marine (KM) en de Rotterdamsche Droogdok Maatschappij (RDM) wordt momenteel onderzoek gedaan naar buitenlucht-onafhankelijke voortstuwing (Air Independent Propulsion, AIP) van onderzeeboten. In een aantal landen worden verschillende systemen ontwikkeld voor deze vorm van voortstuwing.

De RDM heeft een AIP-proefstand gebouwd van een systeem met een Closed Cycle Diesel (CCD) motor (of Closed Cycle Diesel Engine, CCDE). Vanwege de behoefte om dit systeem verder te ontwikkelen werken de KM en RDM samen aan dit onderzoek.

In het kader van dit onderzoek ben ik bij de KM te Den Haag geplaatst voor mijn vierdejaarsopdracht en aansluitend mijn ingenieursopdracht. De vierdejaarsopdracht omvat een literatuuronderzoek naar verschillende typen AIP-systemen. Voor de ingenieursopdracht zal ik mijn aandacht toespitsen op de CCD-motor en doorgaan met het afstudeerwerk van de heer M G J Schasfoort (rapporten OEMO 92.5 en 92.14). Dit rapport omvat de resultaten van het literatuuronderzoek voor de vierdejaarsopdracht.

S J J Daniëls
Den Haag, mei 1997



Inhoudsopgave

Voorwoord	2
1. Inleiding	4
2. Beschrijving van de verschillende systemen voor Air Independent propulsion . . .	5
2.1 Nucleaire vermogensopwekking	5
2.1.1 Autonomous Marine Power Source (AMPS).	5
2.1.2 High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR) als warmtebron in een gesloten gasturbine (Brayton) cyclus	8
2.2 Buitenlucht-onafhankelijke vermogensopwekking met verbrandingsmotoren . . .	12
2.2.1 Closed Cycle Diesel (CCD) motor	12
2.2.2 Closed Cycle Stirling (CCS) motor	16
2.2.3 Closed Cycle Gasturbine (CCG) motor	19
2.2.4 Module d'Energie Sous-Marine Autonome (MESMA)	20
2.3 Vermogenslevering met elektrochemische systemen	22
2.3.1 Brandstofcellen	22
2.3.2 Batterijen	25
3. Beoordeling van de verschillende systemen voor Air Independent Propulsion . . .	27
3.1 Beoordeling op massa	27
3.2 Beoordeling op volume	27
3.3 Beoordeling van het leverbare vermogen	28
3.4 Mogelijkheid tot modulaire inpasbaarheid	29
3.5 Beoordeling van de kosten per systeem	29
3.6 Rendementsbeoordeling	29
3.7 Beoordeling van de geluidsproductie	30
3.8 Emissiebeoordeling	30
3.9 Beoordeling van de infrarood signatuur	31
3.10 Beoordeling van de complexiteit van de systemen	31
3.11 Vergelijking van de verlenging van de onderwatertijden	32
3.12 Redundantie van de systemen	32
3.13 Beoordeling op de extra mee te nemen brandstoffen	33
3.14 Conclusie	33
Literatuurlijst	35
Bijlage	37



1. Inleiding.

Geavanceerde detectie technologie vermindert tegenwoordig de effectiviteit van conventionele onderzeeboten, die regelmatig moeten snorkelen om de batterijen op te laden. Aangezien nucleaire onderzeeboten beperkingen hebben in ondiepe en ingesloten wateren en hoge initiële en operationele kosten met zich meebrengen, zal de interesse voor conventionele onderzeeboten niet afnemen. Wereldwijd neemt de interesse voor conventionele onderzeeboten zelfs toe, ten nadele van de nucleaire onderzeeboten.

Om de detectiekans in het operatiegebied te verkleinen wordt het steeds meer van belang dat een conventionele onderzeeboot langdurig onder water kan opereren. Daarom worden in een aantal landen verschillende buitenlucht-onafhankelijke voortstuwingssystemen (Air Independent Propulsion (AIP) systems) ontwikkeld om de levensvatbaarheid van de conventionele onderzeeboten te vergroten. Alhoewel deze systemen soms als alternatief van nucleair vermogen worden genoemd, zijn de potentiële operationele rollen voor deze onderzeeboten heel anders [Donaldson, 1996]. Dit komt door de beperkingen van grote nucleaire onderzeeboten, zoals hierboven genoemd.

De ontwikkeling van AIP-systemen in een aantal landen heeft tot verschillende ontwerpen geleid. Zo is in Zweden veel onderzoek gedaan naar een systeem met een Stirlingmotor als vermogensopwekker, in Duitsland naar de Closed Cycle Diesel motor en de variant met brandstofcellen, in Nederland naar de Closed Cycle Diesel, in Frankrijk naar de gesloten gasturbinecyclus en in Canada en Amerika naar twee kleine nucleaire opties.

Het doel van dit rapport is een overzicht te verkrijgen van de werking, de eigenschappen en de toekomstverwachtingen van deze AIP-systemen, om daarna de verschillende systemen en ontwerpen met elkaar te kunnen vergelijken.

Dit rapport is geschreven aan de hand van een literatuuronderzoek. De gegevens zijn gehaald uit rapporten van de Koninklijke Marine, de Rotterdamsche Droogdok Maatschappij en de TU Delft. Tevens zijn artikelen uit de Marinebibliotheek, het Maritiem Informatie Centrum en het TDCK-bestand van de KM, geraadpleegd. Als laatste zijn er nog een aantal stukken op Internet gevonden.

Het geven van een objectief oordeel over de levensvatbaarheid van de verschillende systemen wordt bemoeilijkt, omdat de auteurs van de verschillende rapporten en artikelen meestal hun eigen systeem proberen te promoten en er geen echte onderzoeksrapporten beschikbaar zijn.

De opbouw van het rapport is als volgt. In hoofdstuk 2 wordt de werking van alle systemen beschreven, waarna de eigenschappen, de voor- en nadelen worden opgesomd en de toekomstverwachtingen worden geschetst.

In hoofdstuk 3 wordt geprobeerd om aan de hand van deze gegevens tot een vergelijking van de verschillende ontwerpen te komen. Tevens wordt van alle systemen een schatting gegeven van de periode die benodigd is voordat de verschillende systemen commercieel beschikbaar zijn. Het vergelijk van de systemen zal globaal zijn aan de hand van eigenschappen als vermogensdichtheid, kosten, rendement, massa en volume, modulaire inpasbaarheid en nog een aantal parameters.



2. Beschrijving van de verschillende systemen voor Air Independent Propulsion.

In dit hoofdstuk zullen de verschillende systemen voor buitenlucht-onafhankelijke voortstuwing worden besproken. De werking zal in het kort worden beschreven, alsmede de eigenschappen en toekomstverwachtingen. In paragraaf 2.1 zal dit worden gedaan voor de nucleaire vermogensoptie, in paragraaf 2.2 voor de variant met verbrandingsmotoren en in paragraaf 2.3 de electrochemische AIP-systemen.

2.1 Nucleaire vermogensoptie.

De voortstuwings- en aanverwante machine systemen van een nucleaire onderzeeboot nemen ongeveer 50% van het inwendig volume in. Dit komt doordat in het verleden voortstuwingssystemen met veel vermogen werden geïnstalleerd vanwege de hoge snelheidseisen. De behuizing van de reactorkern is ook debet aan het grote gewicht en volume. Samen met sensor- en wapensystemen leidde dit tot een grote (nucleaire) onderzeeboot.

Wil een nucleaire onderzeeboot in de belangstelling komen voor de kleinere marines (de publieke opinie niet meerekenend), dan zal er een significante reductie van de grootte van de onderzeeboot en kosten gerealiseerd moeten worden. Dit kan door of de missie-eisen te verlagen of door om te zien naar een innovatieve techniek voor het ontwerp van de scheepsvortstuwing.

Het verlagen van de missie-eisen zoals kruissnelheid, actie radius en patrouille vaart maken de niet-nucleaire opties voor buitenlucht-onafhankelijke voortstuwing interessant, in het bijzonder voor gespecialiseerde rollen. Voor deze aanpassing van de missie-eisen is tevens een nucleaire variant ontworpen: de autonomous marine power source (AMPS). Dit is een ontwerp voor een additionele nucleaire AIP-sectie, om in te passen in conventionele onderzeeboten. Dit ontwerp zal hieronder worden behandeld.

Als een kleinere nucleaire onderzeeboot met hoge snelheids capaciteit gewenst is, dan zullen substantiële volumereducties van de voortstuwingsinstallatie vragen om innovatieve technologieën. Een van deze technologieën is de high temperature gas-cooled reactor (HTGR) in een gesloten gasturbine (Brayton) cyclus. Dit is een nucleair systeem, inpasbaar voor de totale vermogensopwekking van een onderzeeboot. Het is dus geen keuze voor een extra AIP-sectie. Door het innovatieve ontwerp is het systeem veel compacter dan bestaande nucleaire ontwerpen, waardoor het inpasbaar is in een kleinere boot. Deze variant is echter nog in ontwikkeling en kan een attractieve optie worden in de volgende eeuw. De werking van het systeem zal na de AMPS worden beschreven.

2.1.1 Autonomous Marine Power Source (AMPS).

Dit systeem bestaat uit een laag vermogen, lage temperatuur, watergekoelde nucleaire reactor als warmte bron, in te passen als hybride systeem in een onderzeeboot. Het geavanceerde ontwerp omvat veiligheidssystemen en een warmte-naar-elektriciteit energieconversie door een organische Rankine motor gekoppeld aan een generator. Het systeem is ontwikkeld door de Canadese ECS-groep [Foxwell, 1994; Hewish, 1988].

Een organische cyclus wil zeggen dat er vloeistoffen zoals freon en toluen worden gebruikt vanwege hun betere cyclus rendementen dan stoom voor gegeven temperaturen. Dit voordeel wordt echter weer tenietgedaan door de lage warmteoverdrachts-eigenschappen

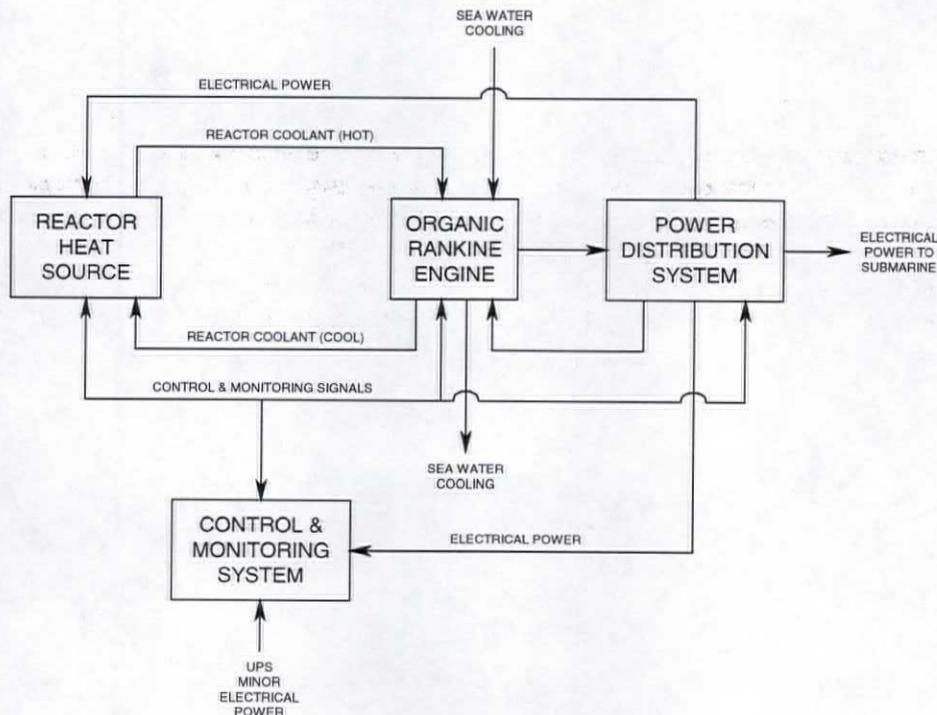
van deze stoffen [Donaldson, 1996]. Voor dit systeem is freon als werkend medium in de turbinecyclus gekozen, omdat de relatief lage temperatuur van het primaire koelmiddel (water) het gebruik van stoom voor de Rankine cyclus uitsluit.

Een Rankine cyclus wil zeggen dat het gaat om een turbinesysteem waarin een vloeistof wordt verdampt, door de turbine wordt geleid en na de turbine, na eventuele tussenstappen, wordt gecondenseerd. De Rankine cyclus is een stoom- of een organische vloeistofcyclus. Dit is het verschil met de Brayton cyclus, waar het medium een gas is en gedurende de gehele cyclus gasvormig blijft. De Brayton cyclus is een gasturbinecyclus.

De uitgangspunten voor het ontwerp van een AMPS-systeem kunnen als volgt worden opgesomd [Sligh, 1987]:

- ⇒ een netto elektrische vermogenslevering tussen de 100 en 400 kW, naast de conventionele energie-opwekker;
- ⇒ een warmtebron bestaande uit een door water gekoelde reactor welke niet of weinig op druk is gebracht;
- ⇒ laag verrijkt uranium als brandstof;
- ⇒ grootte van de installatie evenredig met de grootte van de boot.

Deze uitgangspunten betreffende het ontwerp hebben geleid tot twee vermogensbronnen, te weten de AMPS 100 en de AMPS 400. De AMPS 100 produceert ongeveer 1,5 MW aan warmte, terwijl de AMPS 400 ongeveer 3,5 MW warmte opwekt. De AMPS 100 voldoet aan de patrouille-eisen voor het vermogen van een 1000-tons onderzeeboot. De AMPS 400 is inpasbaar in een 2000-tons onderzeeboot.



Figuur 2.1: AMPS-subsysteem [Gosling, 1988], zie pagina 7.



De werking van de AMPS is als volgt (zie figuur 2.2): met de warmte afgegeven door de reactor aan het door de kern circulerende koelwater wordt in de warmtewisselaars freon verdampt. De freondamp gaat door een turbine welke een generator aandrijft. Het uitlaatgas van de turbine wordt via een recuperator en vervolgens een condensor (gekoeld door zeewater) teruggevoerd naar de verdampers. Het systeem zoals aangegeven in de figuur is in twee parallelle loops uitgevoerd om maximale beschikbaarheid van het systeem door middel van redundantie te verkrijgen.

Vermogensregeling is mogelijk gemaakt door de positie van de neutronen-absorbers in de reactor aan te passen aan de hand van het controle en monitoring systeem.

De voordelen van een AMPS ten opzichte van de niet-nucleaire opties voor air independent propulsion (AIP) zijn [Gosling, 1988; Zimmerman, 1991]:

- ⇒ het ontbreken van brandstofopslag aan boord;
- ⇒ hervulling van brandstof (uranium 235) eens in de 5-7 jaar;
- ⇒ een oneindig grote onderwatertijd mogelijk, de begrenzing zal de meegenomen hoeveelheid voedsel voor de bemanning zijn.

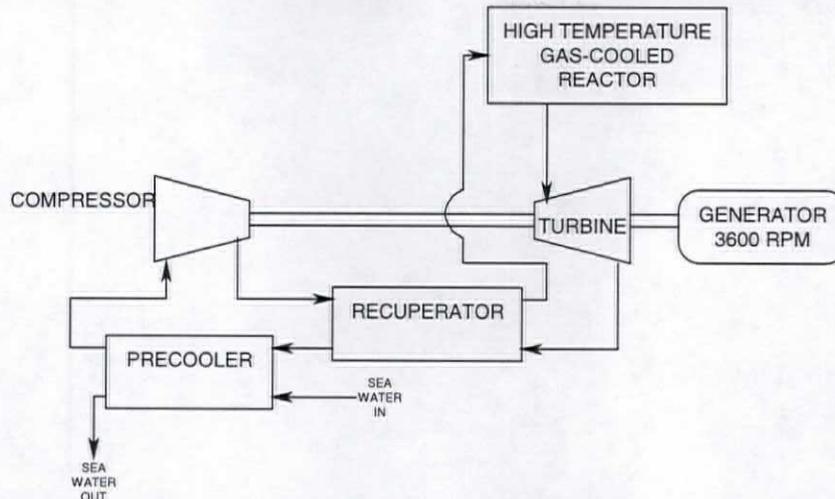
Nadelen van deze nucleaire optie zijn:

- ⇒ hogere initiële, infrastructurele en exploitatiekosten dan een conventionele onderzeeboot;
- ⇒ de publieke opinie tegen het gebruik van kernenergie;
- ⇒ grote massa van een AMPS (o.a. door massa van afscherming van reactor) en groter benodigd volume voor inbouw van het systeem,
- ⇒ het gebruik van freon is ongewenst in een onderzeeboot, vanwege mogelijke vergiftiging van de atmosfeer in de boot bij een lekkage.

Voor veel landen is een nucleaire reactor onbespreekbaar, hetzij vanwege de hoge kosten die eraan verbonden zijn, hetzij vanwege de publieke opinie tegen kernenergie. Voor landen waar een nucleaire vermogensoptie wel bespreekbaar is, kan door toepassing van de AMPS een onderzeeboot worden ontworpen die langdurig onder water kan opereren. Een conventionele diesel-generatorset kan voor het boven-water-bedrijf zorgen en de AMPS dient dan voor het bedrijf onder water.

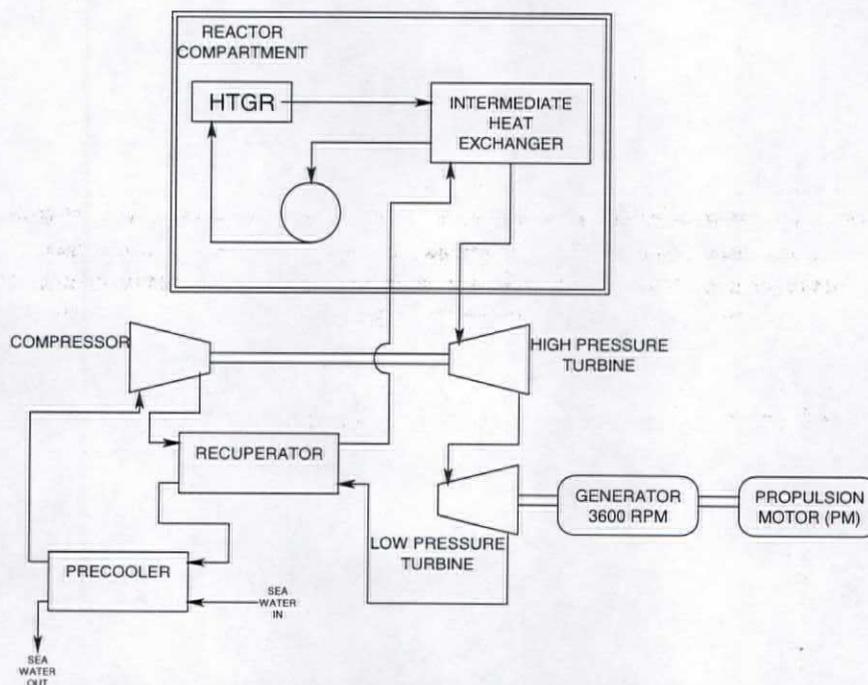
2.1.2 High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR) als warmtebron in een gesloten gasturbine (Brayton) cyclus.

Zoals hierboven al gezegd is deze cyclus nog in ontwikkeling. Het is een ontwerp voor de totale vermogensvoorziening van een onderzeeboot, dus niet als hybride AIP-systeem voor het onder-water bedrijf. Een simpel blokschema van de cyclus is weergegeven in figuur 2.3. Deze figuur betreft de directe gesloten Brayton cyclus.



Figuur 2.3: Schematisch diagram van een Closed Brayton Direct Cycle, gekoppeld aan een high temperature gas-cooled reactor [Gouge, 1995].

Voor maritieme toepassingen is het in verband met onderhoud van de hoofdcomponenten van de turbinecyclus handiger deze componenten buiten het reactorcompartiment te houden. Dit leidt tot de indirecte Brayton cyclus (zie figuur 2.4), waarin de reactor wordt gekoeld door water en stroomt heliumgas door de turbinecyclus.



Figuur 2.4: Schematisch diagram van een Closed Brayton Indirect Cycle, gekoppeld aan een high temperature gas-cooled reactor [Gouge, 1995].

De werking van de directe cyclus is in het kort als volgt: heet heliumgas verlaat de gasgekoelde reactor waarna het de gasturbine binnengaat. Deze turbine drijft zowel een hoog rendements AC elektrische generator als een compressor aan. In de indirecte cyclus is de turbine opgesplitst in een hoge en een lage druk turbine. Het uitlaatgas, dat met een lagere druk de turbine verlaat, gaat een compacte hoge temperatuur recuperator binnen. In de recuperator verwarmt het helium uit de turbine het koelere helium, dat aan de andere kant van het warmteoverdrachtsoppervlak stroomt. Na de recuperator wordt het gas verder



gekoeld met zeewater in de precooler, voordat het de compressor binnengaat. De compressor verhoogt de heliumdruk tot zijn hoogste waarde in de cyclus en verwarmt het gas bijna adiabatisch. Na de compressor gaat het gas langs de andere kant van de recuperator, waar het wordt voorverwarmd voordat het de reactor binnengaat. In de indirecte cyclus bevindt zich tussen de recuperator en de reactor nog een warmtewisselaar. Deze warmtewisselaar houdt de helium-loop gescheiden van een op druk gebrachte water-loop.

In vergelijking tot de AMPS met de organische Rankine cyclus is de HTGR met een gesloten Brayton cyclus een stuk compacter. Dit is voornamelijk aan twee factoren te danken. Ten eerste wordt de helium op hoge druk gehouden (zelfs de laagste waarde ligt boven de 35 bar). Ten tweede zijn de turbines in de cyclus compacte, sneldraaiende (hoge toerentallen) machines met een hoog rendement en een hoge vermogensdichtheid.

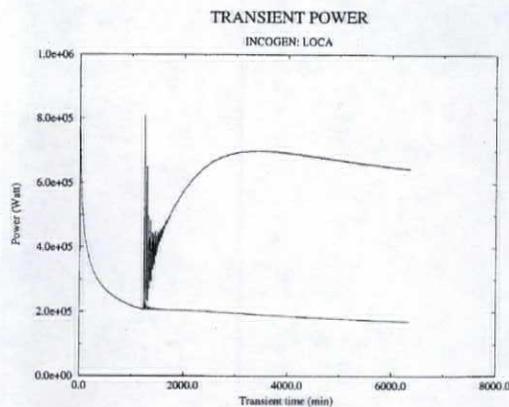
Het vermogen is op twee manieren te regelen: ten eerste is er een regeling mogelijk door middel van bypass-control. Hierbij wordt slechts een gedeelte van de heliumstroom door de turbine geleid. Het voordeel is de snelheid waarmee het vermogen geregeld kan worden. Nadelig zijn de lage rendementen van de verschillende onderdelen bij deze vorm van deellast. Deze manier van vermogensregeling is nodig voor het manoeuvreren.

De andere manier van regelen is het aanpassen van de heliumdruk om tot een bepaald vermogensniveau te komen. Het voordeel van deze regeling is dat de rendementen hoog blijven. Het nadeel ervan is dat de regeling niet snel is en daardoor eigenlijk alleen toepasbaar is bij het aanpassen van de kruisvaart.

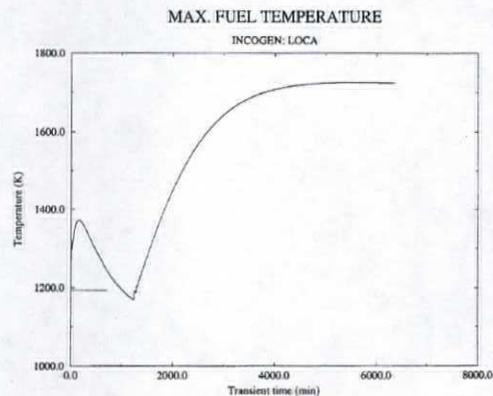
Op 16 januari 1997 is bij URENCO Nederland BV in Almelo een symposium gehouden over de Hoge Temperatuur Reactor (HTR) met Warmte Kracht Koppeling (WKK), het HTR-INCOGEN (INherently save COGENeration) symposium. Tijdens dit symposium is het ontwerp van de HTGR alleen beschouwd als landinstallatie voor de opwekking van elektrische energie. Voor maritieme toepassingen is slechts naar de economische haalbaarheid gekeken. Momenteel zijn een aantal landen bezig met dit innovatieve ontwerp, te weten Japan, China, Zuid-Afrika en de Verenigde Staten samen met Rusland. In Japan en China zijn testreactoren in aanbouw. De splijtstof bestaat uit korreltjes uraniumoxide die gepakt zijn in grafietbollen ter grootte van een tennisbal. De reactor kern bestaat uit een groot aantal van deze bollen in een willekeurige stapeling. Tijdens bedrijf wordt de versplijting van uranium gecompenseerd door toevoeging van nieuwe splijtstofbollen, waardoor de kernhoogte steeds toeneemt. Pas als na vele jaren bedrijf de maximale kernhoogte bereikt is, wordt de gehele kern ontladen.

Uit figuur 2.5 en 2.6 volgt het inherent veilige principe van de reactor. Te zien is wat er met het vermogen en de temperatuur van de reactor tegen de tijd gebeurt als de koeling van de reactor wegvalt. In alle onderzochte gevallen blijft de temperatuur van de grafietbollen beneden de temperatuur waarbij splijtingsproducten zouden kunnen vrijkomen. Deze reactorfysische analyse is uitgevoerd door het Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) uit Petten en het Interfacultair Reactor Instituut (IRI) uit Delft. De besproken reactor is in staat om 40 MW thermisch vermogen te leveren, waarvan 17 MW kan worden omgezet in elektrisch vermogen en 19 MW beschikbaar is voor warmte kracht koppeling. Er gaat dan ongeveer 4 MW verloren.

De vermogensopwekking van een HTGR met een gesloten gasturbine cyclus voor een onderzeeboot, zal aanzienlijk lager komen te liggen.



Figuur 2.5: Reactorvermogen tegen de tijd, na uitval van de koeling [de Kler, 1997].



Figuur 2.6: Reactortemperatuur tegen de tijd, na uitval van de koeling [de Kler, 1997].

De voor- en nadelen van de HTGR met gesloten Brayton cyclus komen grotendeels overeen met die van de AMPS. De verschillen zijn voornamelijk in het voordeel van de HTGR.

Het systeem is relatief lichter en compacter dan een AMPS. Tevens is het systeem in staat voldoende vermogen te leveren voor de totale vermogens-voorziening van een onderzeeboot, waardoor de missie-eisen zoals kruissnelheid en actie radius niet verlaagd hoeven te worden. Een ander voordeel is het inherent veilige karakter van de HTGR. Als de koeling wegvalt ontstaat er geen gevaar voor oververhitting en een eventuele meltdown, omdat het aantal kettingreacties in de reactor boven een bepaalde temperatuur afneemt. Hierdoor gaat de reactortemperatuur naar een stabiele eindwaarde. Deze eindtemperatuur is dankzij de grafietlaag om de bollen te laag om een grafietbrand te kunnen veroorzaken.

Een extra nadeel van dit systeem is de hoeveelheid warmte die na omzetting van thermische naar elektrische energie overblijft.

Het is echter wel duidelijk dat het hier om een systeem in de ontwerpfase gaat, er is nog geen gesloten nucleaire Brayton cyclus voor grote vermogens gebouwd. Een aantal deelsystemen zijn in ontwikkeling of hebben enige aanpassingen nodig voor inpassing in een onderzeeboot. Zo zullen de reactor, de turbines, en de warmtewisselaars verder moeten worden ontwikkeld om tot een hogere levensduur en tot een hoger rendement te komen. Tevens zal er een goede lay-out van het totale systeem moeten worden ontwikkeld om het zodoende efficiënt in te kunnen passen in een onderzeeboot. Om voldoende redundantie te krijgen zal ook aan een eventuele dubbele uitvoering, zoals bij de AMPS, moeten worden gedacht.

De high temperature gas-cooled reactor met een gesloten Brayton cyclus zal pas een reële optie worden in de volgende eeuw.



2.2 Buitenlucht-onafhankelijke vermogensopwekking met verbrandingsmotoren.

Aangezien voor de meeste marines een nucleaire vermogensoptie uitgesloten is, wordt er veel onderzoek gedaan naar conventionele buitenlucht-onafhankelijke systemen. Het doel van deze systemen is de mogelijkheid te creëren om met een conventionele onderzeeboot langdurig onder water te kunnen opereren.

De motoren van deze systemen werken allemaal volgens een principe van uitlaatgasrecirculatie. Voordat deze producten opnieuw in de verbrandingskamer worden ingelaten, wordt het zuurstofpercentage op niveau gebracht. Om de totale massa in het systeem in balans te houden wordt een gedeelte van het uitlaatgas geloosd. Dit zorgt voor een klein verlies van bruikbare zuurstof [Seymour, 1992].

De categorie van buitenlucht-onafhankelijke vermogensopwekking met verbrandingsmotoren bestaat uit vier varianten:

- ⇒ Closed Cycle Diesel (CCD) motor;
- ⇒ Closed Cycle Stirling (CCS) motor;
- ⇒ Closed Cycle Gasturbine (CCG) motor (Brayton cyclus);
- ⇒ MESMA: Module d'Energie Sous-Marine Autonome. Chemische verbranding in combinatie met een stoomturbine (Rankine cyclus).

De bovenstaande systemen zullen in deze volgorde in vier sub-paragrafen worden besproken.

2.2.1 Closed Cycle Diesel (CCD) motor.

Al in 1907 is in Duitsland een 30 pk dieselmotor omgebouwd tot een buitenlucht-onafhankelijke motor. Hierbij werd een deel van de uitlaatgassen rechtstreeks overboord gepompt en de rest na aanvulling met zuurstof hergebruikt. Door moeilijkheden met de zuurstofregeling werd dit onderzoek stopgezet.

Later is in Duitsland, vooral gedurende de tweede wereldoorlog, veel gedaan om tot buitenlucht-onafhankelijke voortstuwing te komen. Een nog steeds toegepast systeem is het 'Walter' H_2O_2 systeem, dat gebruikt wordt in torpedo's. Onder leiding van professor dr. Kamm werd er tevens onderzoek gedaan naar de zuurstofregeling voor een gesloten dieselmotor. Het resultaat hiervan was de MB 501 C die op de proefstand goede resultaten gaf, zodat deze werd ingebouwd in een onderzeeboot. De onderzeeboot is echter door bombardementen op de werf verwoest [Vos, 1992].

Nadat er in Zweden in 1960 een 1500 pk CCDE was ontwikkeld, maar niet meer verder gebruikt werd, is het idee om een CCDE te gebruiken voor de voortstuwing van onderzeeboten weer nieuw leven ingeblazen in 1982. De universiteit van Newcastle heeft toen een 25 kW test-diesel in combinatie met een nieuw ontwerp voor uitlaatgas-filtering met behulp van zeewater ontworpen. Momenteel zijn er tevens onderzoeken gaande in Engeland, de Sovjet Unie en Nederland. Het onderzoek in Duitsland is stopgezet, na de overstap naar brandstofcellen. Er zijn op dit moment twee operationele CCD-systemen in Nederland (RDM) en in Engeland (Newcastle).

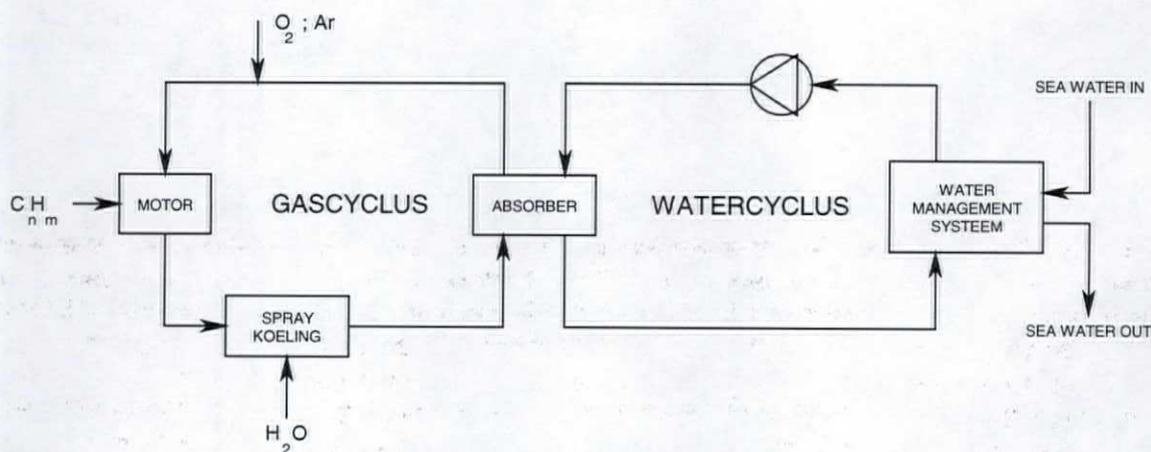
Om het systeem diepte-onafhankelijk te maken, introduceerde Cosworth Engineering het zogenaamde Water Management System (WMS). Later is het bedrijf Cosworth Engineering overgegaan in Carlton Deep Sea Systems (CDSS) om het systeem verder te ontwikkelen en op de markt te brengen.

In 1985 zijn Thyssen Nordseewerke (TNSW) uit Emden en de Rotterdamsche Droogdok Maatschappij (RDM) uit Rotterdam gaan meedoen met de ontwikkeling van het systeem, om met hun speciale kennis van onderzeeboten de systeemintegratie in toekomstige onderzeeboten te verbeteren.

Van 1986 tot 1989 hebben beide werven een eerste generatie test-faciliteit gebouwd (120 en 150 kW respectievelijk). Na het testen, meten (geluid-, rendementsmetingen) en optimaliseren van het systeem en zijn componenten, leidde dit tot twee tweede generatie test-installaties bij CDSS (580 kW) en RDM (450 kW).

Na een gezamenlijk onderzoek van RDM en TNSW om een geschikte onderzeeboot te vinden voor het inbouwen van een CCDE, werd aan TNSW onverwacht de mogelijkheid geboden om de buiten dienst gestelde Duitse 205-klasse onderzeeboot U1 te gebruiken. Deze boot was erg geschikt voor de zeebeproevingen, aangezien er in 1990 een extra sectie in het druklichaam was gebouwd voor beproevingen met brandstofcellen. Het project werd door RDM en TNSW financieel ondersteund en in een korte tijd werd er een CCD-installatie in een kleine ruimte van de U1, nu tot 'Ex-U1' is gedoopt, ingebouwd [Brenner, 1993].

De opbouw van het CCD-systeem is schematisch weergegeven in figuur 2.7 [Schasfoort, aug. 1992]. In de figuur zijn de belangrijkste componenten van het systeem te zien, alsmede de twee belangrijkste massastromen: het gasrecyclingsysteem en het zeewatersysteem.

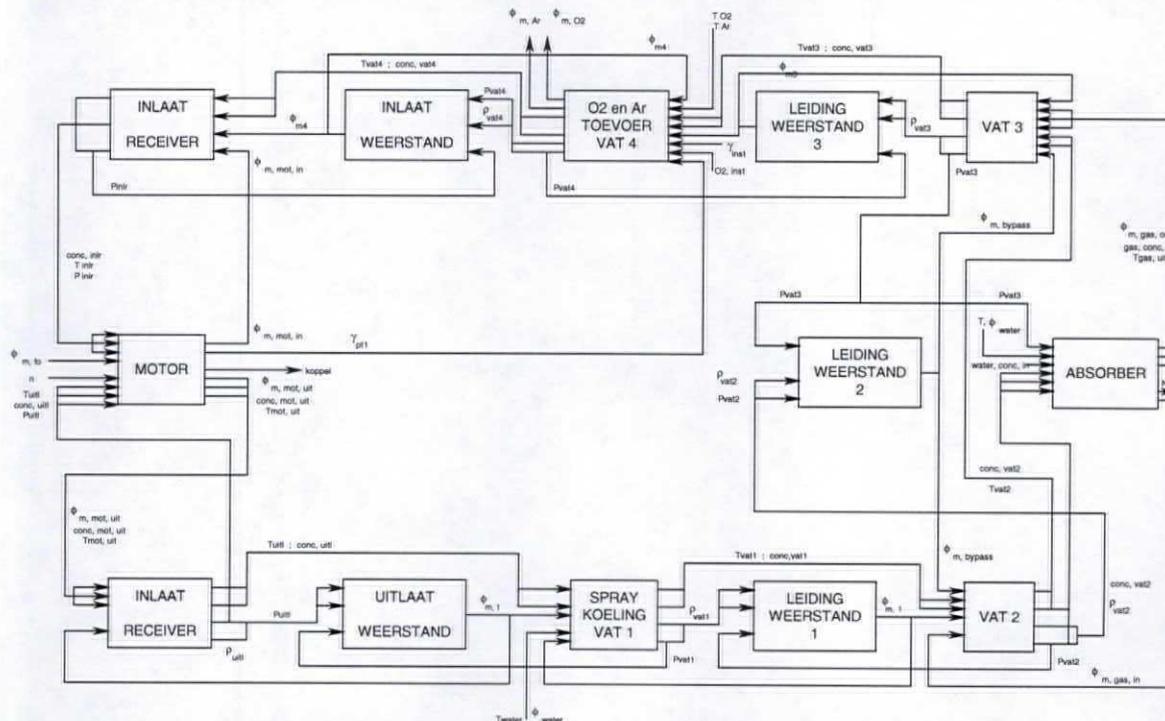


Figuur 2.7: Schema CCD-systeem [Schasfoort, aug. 1992].

De werking van de gascyclus is als volgt, zie figuur 2.8. Na de motor worden de gassen gekoeld door een waterspray te injecteren in de uitlaatgassenstroom. Daarna worden de gassen in de absorber in tegenstroom door het zeewater geleid. De componenten van het afvoergas zullen in het zeewater oplossen, omdat het ingelaten zeewater niet verzadigd is met deze componenten. In de absorber treedt verdere koeling van de gassen op tot ongeveer zeewatertemperatuur en condenseert het bij de spraykoeling geïnjecteerde water, waardoor het met het zeewater wordt afgevoerd.

Uit [Wijma, 1991] volgt dat de oplosbaarheid van zuurstof en stikstof in water respectievelijk ongeveer 25 en 50 maal zo klein zijn als de oplosbaarheid van koolstofdioxide in water. De temperatuur en de saliniteit van het zeewater hebben invloed op de oplosbaarheid van de gascomponenten in het zeewater. Dit zijn twee van buiten het systeem opgelegde variabelen. De saliniteit vermindert de oplosbaarheid van de verschillende gascomponenten evenredig. Een stijgende zeewatertemperatuur zorgt voor een toenemende oplosbaarheid van CO_2 en een afnemende oplosbaarheid van zuurstof en argon.

Tijdens de absorptie van CO_2 in zeewater zal er dus maar een heel klein gedeelte van de in het afvoergas aanwezige zuurstof in het zeewater oplossen, waardoor dit weer voor de verbranding kan worden gebruikt.



Figuur 2.8: Blokschema CCD-model [Schasfoort, aug. 1992].

Nadat de meegestroomde waterdruppeltjes zoveel mogelijk zijn afgevangen, wordt er zuurstof (in vloeibare vorm meegenomen: Liquid OXYgen storage (LOX)) en argon (dat gasvormig wordt meegenomen) toegevoegd aan de gereinigde gassen. De zuurstof is nodig voor het verbrandingsproces in de motor en met de argon wordt de verhouding van de soortelijke warmten van het gas verhoogd. Een hoog CO_2 -percentage zorgt namelijk voor een lagere soortelijke warmte van het inlaatgas. Hierdoor blijven de druk en de temperatuur bij compressie lager en dit zorgt voor een ontstekingsuitstel. De ontbranding zal hierdoor plaatsvinden met een grotere drukgradiënt. Door de snelle drukstijging boven de zuiger kan het hele motordrijfwerk in trilling worden gebracht. Deze verhoging van de geluidsproductie wordt dieselklop genoemd. Door toevoeging van argon, dat een hoge soortelijke warmte heeft, wordt de soortelijke warmte van het inlaatgas verhoogd. Dit zorgt voor een betere en stillere verbranding.

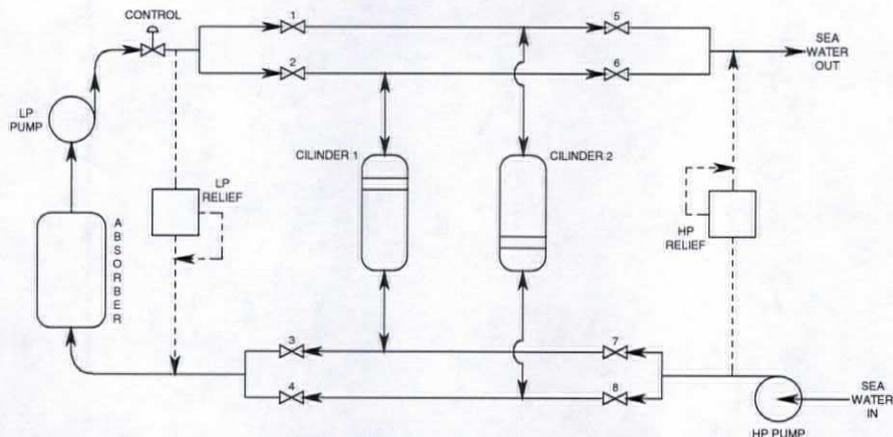
Het argon moet steeds worden toegevoegd, omdat er ook een gedeelte van de argon in de absorber in het zeewater oplost. Het argonverlies is ongeveer 4% van het totale zuurstofverbruik.

Na deze zuurstof- en argoninjectie bevindt het gas zich weer op inlaatconditie, zodat het voor de verbranding van de dieselolie kan worden gebruikt.

Naast de CCD-versie met argoninjectie kan ook de keuze worden gemaakt om CO_2 of N_2 als circulerend medium te gebruiken, maar heeft een hogere geluidsproductie tot gevolg (zie hierboven).

In de watercyclus wordt het zeewater binnenboord gelaten, door de absorber geleid en daarna buitenboord gepompt. In de absorber wordt het water gecentrifugeerd en door

gaaspakketten, oftewel meshes, uit elkaar geslagen, wat het contactoppervlak vergroot. Om de cyclus diepte-onafhankelijk te maken heeft Cosworth engineering het water management systeem ontwikkeld. Het systeem maakt op een slimme wijze gebruik van het drukverschil tussen binnen- en buitenboord, zodat alleen het drukverlies ten gevolge van de stromingsweerstand overwonnen dient te worden. Het bestaat uit een drietal dubbele vaten en een aantal kleppen, waardoor de waterverversing een batchgewijs proces is, zie figuur 2.9.



Figuur 2.9: Schematisch diagram van het water management systeem [Fowler, 1992].

De absorber en al het pijpwerk links van de kleppen 1, 2, 3 en 4 zijn permanent onderdeel van de lage druk kant van het systeem (absorberdruk). De zeewater pomp en alle componenten rechts van de kleppen 5, 6, 7 en 8 zijn permanent onderdeel van de hoge druk kant (buitenboord druk).

Als de kleppen 2 en 3 open staan, terwijl de kleppen 1 en 4 zijn gesloten, dan verpompt de lagedrukpomp water (met CO₂ erin opgelost) van de absorber via de lagedruk controle-klep en klep 2 naar de bovenkant van cilinder 1. De vrij bewegende zuiger beweegt zich naar beneden, waardoor het verse zeewater onder de zuiger via klep 3 naar de absorber wordt gepompt. Tegelijkertijd pompt de hogedrukpomp vers zeewater via klep 8 naar het onderste gedeelte van cilinder 2. Het CO₂-houdende water boven de zuiger van cilinder 2 wordt hierdoor via klep 5 overboord gepompt. Als de kleppen 2, 3, 8 en 5 sluiten, gaan de kleppen 1, 4, 6 en 7 open. De kleppen zijn hydraulisch aan elkaar gekoppeld. Cilinder 1 wordt nu een hogedruk- en cilinder 2 een lagedrukeenheid.

Door de driedubbele uitvoering van deze vaten, wordt er geprobeerd een zo continu mogelijke stroom naar de absorber te krijgen.

**Voordelen van de CCD zijn:**

- ⇒ relatief lage kosten vanwege commercial off the shelf (COTS) onderdelen;
- ⇒ rendement (30-31 % na generatorverlies);
- ⇒ goede vermogensdichtheid;
- ⇒ systeem bestaat uit bestaande en dus makkelijk te verkrijgen onderdelen;
- ⇒ wellicht is het mogelijk om reeds in de onderzeeboot aanwezige dieselsystemen bij een midlife-update om te bouwen tot closed cycle dieselmotoren;
- ⇒ er zijn al een aantal CCD-systemen getest (bewezen techniek) en ingebouwd in onderzeeboten (Duitsland en Sovjet Unie);
- ⇒ mogelijkheid om te werken met open of gesloten loop, waardoor er een krachtige conventionele onderzeeboot overblijft als de LOX voorraad opraakt.

Een nadeel van de CCD is dat er naast brandstof ook vloeibare zuurstof en argon meegenomen dient te worden.

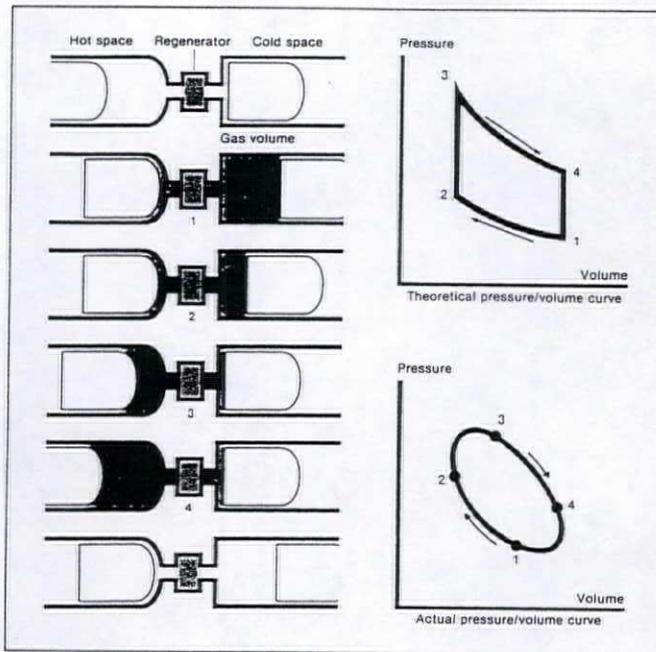
Als voor een closed cycle diesel systeem wordt gekozen als vermogenvoorziener, dan kan er van een relatief korte en dus goedkope ontwikkeling worden uitgegaan. Dit komt doordat er bij de RDM al veel onderzoek aan het systeem is gedaan en er al veel verbeteringen zijn doorgevoerd. De mogelijke tijdsduur onder water is afhankelijk van de beschikbare ruimte voor de zuurstofopslag.

2.2.2 Closed Cycle Stirling (CCS) motor.

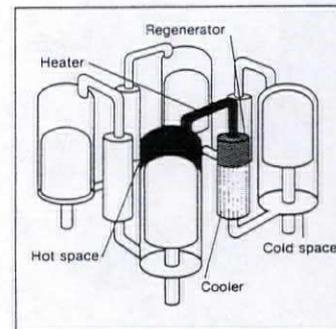
Veel van de technologie van de Stirlingmotor is in de late zestiger jaren verkregen doordat Philips NV aanzienlijk ontwikkelingswerk heeft uitgevoerd.

Deze variant van de buitenlucht-onafhankelijke voortstuwing wordt momenteel met succes toegepast in de Zweedse Gotland-klasse onderzeeboten. Deze boten zijn uitgerust met twee Kockums V4-275R Stirling motoren, welke elk een maximale output van 75 kW hebben. Dit stelt de boten in staat om onder water te opereren zonder het geïnstalleerde dieselvermogen of de batterijen te hoeven gebruiken. De Stirling motoren, met flexibele koppelingen gekoppeld aan generatoren, kunnen samen gedurende langere perioden een elektrisch vermogen van 130 kW opwekken. Aangezien de hotelbelasting (accommodatie faciliteiten) al een vermogen nodig heeft van tussen de 75 en 85 kW, dan heeft de onderzeeboot ongeveer 45 - 55 kW beschikbaar voor de voortstuwing. Toch claimt Kockums dat de boot een snelheid van vijf knopen kan halen, maar waarschijnlijk niet voor een lange periode. Wel kunnen de batterijen dan worden bijgezet [Janssen Lok, 1995].

De Stirlingmotor is een extern verwarmde motor met een gesloten werkingscyclus. In termen van compressie en expansie werkt de motor hetzelfde als een conventionele interne verbrandingsmotor. Echter zijn er twee fundamentele verschillen: de vermogenszuigers werken met helium (of waterstof) in een gesloten gassysteem en warmte wordt continu in de cyclus getransformeerd via een warmtewisselaar.



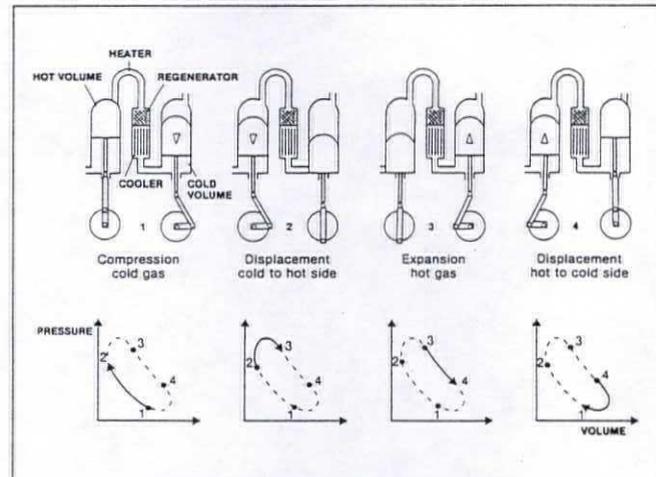
Figuur 2.10: Enkelwerkend Stirling proces [Nilsson, 1987].



Figuur 2.11: Dubbelwerkend Stirling proces [Nilsson, 1987].

Er bestaan twee verschillende werkingsprincipes van de Stirlingmotor, te weten de enkele en de dubbele werking (zie figuur 2.10 en 2.11). De werking van de enkelwerkende motor zal eerst in het kort worden uitgelegd. De motor bestaat uit twee zuigers, waarvan er een in een koude en een in een warme omgeving werkt. Het gas, dat tussen de cilinders is ingesloten, beweegt continu op en neer tussen de koude en de warme cilinder en wordt telkens verwarmd en gekoeld. Het gas gaat door een regenerator, welke de warmte opslaat als het gas van de warme naar de koude kant gaat en de warmte afgeeft als het gas de andere kant op beweegt. De twee zuigers zijn aan elkaar gekoppeld, zodat er een goede volumevariatie wordt verkregen. Compressie vindt plaats als het grootste gedeelte van het gas zich in de koude ruimte bevindt, waar de druk laag is. Expansie vindt plaats als het grootste gedeelte van het gas zich in de warme ruimte bevindt, waar de druk hoog is. Het verschil tussen de theoretische en de werkelijke druk-volume curven komt door de continue zuigerbewegingen, koeling en verwarming in de werkelijke cyclus (zie pagina 18 voor de werking). Het uitgaand vermogen van de Stirling motor wordt bepaald door de brandstofstroom, welke handmatig wordt ingesteld. De zuurstoftoevoer wordt automatisch bijgesteld om een optimale verbranding met een lage zuurstofovermaat te garanderen [Hellqvist, INEC 1992].

Tegenwoordig werken de meeste Stirlingmotoren volgens het principe met de dubbele werking (zie figuur 2.11 en 2.12). De zuigers hebben twee functies: ze bewegen het gas op en neer tussen de warme en de koude cilinder en ze geven de mechanische arbeid door aan de drijfstaaf.



Figuur 2.12: Werkingsprincipe van de dubbelwerkende Stirlingmotor [Nilsson, 1987].

In een dubbel-werkende Stirlingmotor worden de zuigers thermodynamisch gecoördineerd. Elke zuiger werkt tegelijk in twee cyclussen. De hete bovenkant van een zuiger staat in verbinding met de koude onderkant van een aangrenzende zuiger [Nilsson, 1992].

Om een hoog rendement van de thermodynamische Stirling cyclus te verkrijgen, moet het gas onder een hoge druk en temperatuur werken. Hierdoor zijn geavanceerde materialen nodig voor de hoge rendementen motoren.

Aangezien de Stirlingmotor een van buitenaf verwarmde motor is, zijn in theorie vele warmte leverende processen denkbaar om in de benodigde warmte te voorzien. Hier zal worden gekeken naar de luchtafhankelijke verbranding van dieselolie met zuivere zuurstof, aangezien deze methode tot nu toe is toegepast voor de closed cycle Stirling motor in conventionele onderzeeboten. Voor de verbranding gebruikt dit systeem zwavelvrije dieselolie, om corrosie van de verbrandingskamer tegen te gaan en zuivere zuurstof uit de LOX -tanks. De vlamtemperatuur van deze verbranding kan oplopen tot ongeveer 4000 °C, zodat aanpassingen aan de verbrandingskamer (o.a. uitlaatgas-recirculatie) noodzakelijk zijn om de temperatuur beneden de 2000 °C te houden. Bij dergelijke temperaturen kunnen conventionele materialen toegepast worden. De verbrandingsdruk is constant en ingesteld tussen de 20 en 30 bar. Er is (nog) geen hogere druk haalbaar, vanwege materiaal- en afdichtingsproblemen bij deze temperaturen en drukken. Dit laat toe dat de uitlaatgassen tot 200-300 meter buitenboord kunnen worden afgevoerd, zonder een compressor toe te hoeven passen. Deze uitlaatgassen worden door de top van het sail naar buiten gelaten, maar pas nadat het gas met koelwater is gemixt. Dit wordt gedaan om te voorkomen dat de uitlaatgassen bellen creëren en zo de kans op geluids- en infrarooddetectie te verkleinen. Doordat de druk in de verbrandingskamer groter is dan de buitenboorddruk is er geen water management systeem nodig. Een systeem van terugslagkleppen in de uitlaatgassenleiding voorkomt dat de buitenboord waterdruk invloed kan hebben op de druk in de verbrandingskamer.

Om geluidsuitstraling van de Stirling generatorset te minimaliseren, is om de complete unit een geluids- en trillingsreductie module gebouwd. Met deze module wordt het lage trillingsniveau verder verlaagd door dubbele elastische mountings [Hellqvist, INEC 1992].

Voordelen van de Closed Cycle Stirling motor [Koninklijke Marine PFS/R&D, 1996]:

- ⇒ de Stirlingmotor voor AIP-toepassingen is een bewezen techniek;
- ⇒ het Stirling systeem is een toegevoegd systeem: als de LOX voorraad op is blijft de onderzeeboot een krachtige conventionele onderzeeboot;
- ⇒ door het ontbreken van een water management systeem wordt ruimte bespaard;
- ⇒ een lager geluids- en trillingsniveau dan een interne verbrandingsmotor, omdat het verbrandingsproces continu verloopt;
- ⇒ rendement vergelijkbaar met de CCDE.

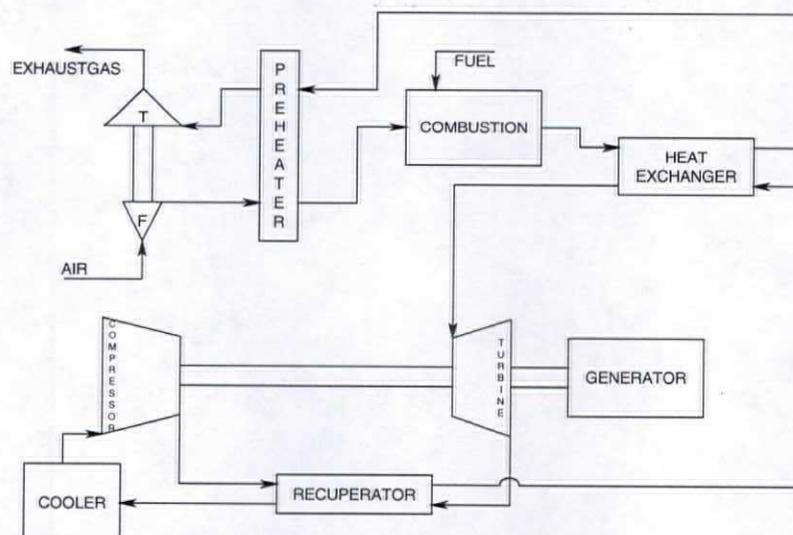
Nadelen van de Closed Cycle Stirling motor:

- ⇒ het gebruik van zwavelvrije brandstof, hetgeen extra logistieke voorzieningen met zich meebrengt;
- ⇒ vermogen van een Stirlingmotor is klein;
- ⇒ doordat er meerdere modules nodig zijn, zal er meer ruimte in beslag worden genomen dan een compactere vermogensbron;
- ⇒ het zuurstof in de uitlaatgassen wordt overboord gepompt;
- ⇒ om met de motor zoals hierboven beschreven tot grotere diepten te komen moet een compressor worden toegepast om de uitlaatgassen buitenboord te pompen, hetgeen leidt tot toename van geluid en brandstofverbruik.

De toekomstvereisten zoals grotere duikdiepten en grotere vermogensniveaus zullen leiden tot de verdere ontwikkeling van dit AIP-systeem. Voor de Stirling-optie is het essentieel dat tevens de logistieke ondersteuning zich gaat ontwikkelen, om zo beperkingen van het AIP-gebruik ten gevolge van slechte logistieke ondersteuning te vermijden. De ontwikkelingen voor een volgende generatie Stirling vermogensopwekking zal zich richten op nieuwe mogelijkheden en vereisten voor in de toekomst te ontwikkelen onderzeeboten.

2.2.3 Closed Cycle Gasturbine (CCG) motor.

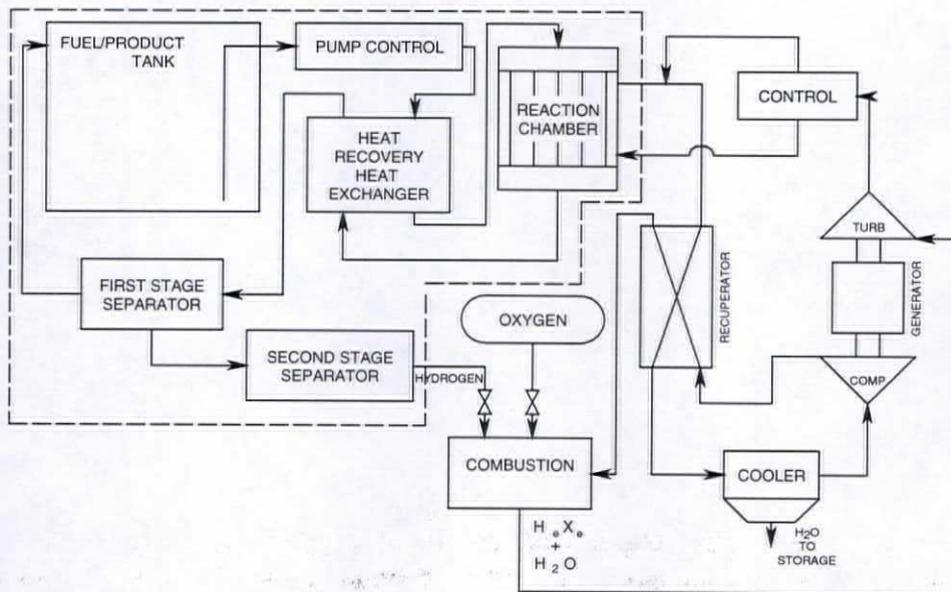
Motoren met een gesloten gasturbine cyclus zijn voor de tweede wereldoorlog uitgevonden in Zwitserland, in de vorm van de closed Brayton cycle (CBC, figuur 2.13). Deze cyclus is in paragraaf 2.1.2 behandeld met de high temperature gas-cooled reactor (HTGR) als warmtebron.



Figuur 2.13: Gesloten gasturbine cyclus [Harper, 1992].

In de hier behandelde CBC cyclus wordt echter een nieuwe methode gebruikt voor de verbranding van waterstof met zuurstof. Het in de cyclus werkende medium wordt verwarmd doordat het wordt gemixt met stoom dat uit de verbrandingskamer komt. De verbrandingskamer wordt gevoed met cryogeen opgeslagen zuurstof en met waterstof uit een nieuw opslagsysteem.

Uit figuur 2.14 wordt duidelijk dat het werkende medium direct wordt verwarmd door het te mixen met de stoom die zich in de verbrandingsgassen bevindt. De stoom, ongeveer 10-20% van de totale stroom, mengt zich met het gas en verwarmt het naar de turbine-inlaattemperatuur (TET). Op deze manier kan de warmtewisselaar na de warmtebron, een duur en ingewikkeld onderdeel van de meeste CBC cyclussen, worden weggelaten [Harper, 1992].



Figuur 2.14: Gesloten gasturbine cyclus met geïntegreerd waterstof opvoersysteem (aangegeven binnen de stippellijnen) [Harper, 1992].

Voordelen van de CBC cyclus zijn

- ⇒ bijna elke warmtebron kan op de cyclus worden aangesloten;
- ⇒ gebaseerd op de open-cyclus gasturbines, zodat er veel gegevens beschikbaar zijn.

Nadelen van het systeem zijn:

- ⇒ ondanks nieuwe technieken voor de opslag van waterstof brengt dit toch nog problemen en grote verliezen met zich mee;
- ⇒ het systeem is nog in de ontwikkelingsfase.

2.2.4 Module d'Énergie Sous-Marine Autonome (MESMA).

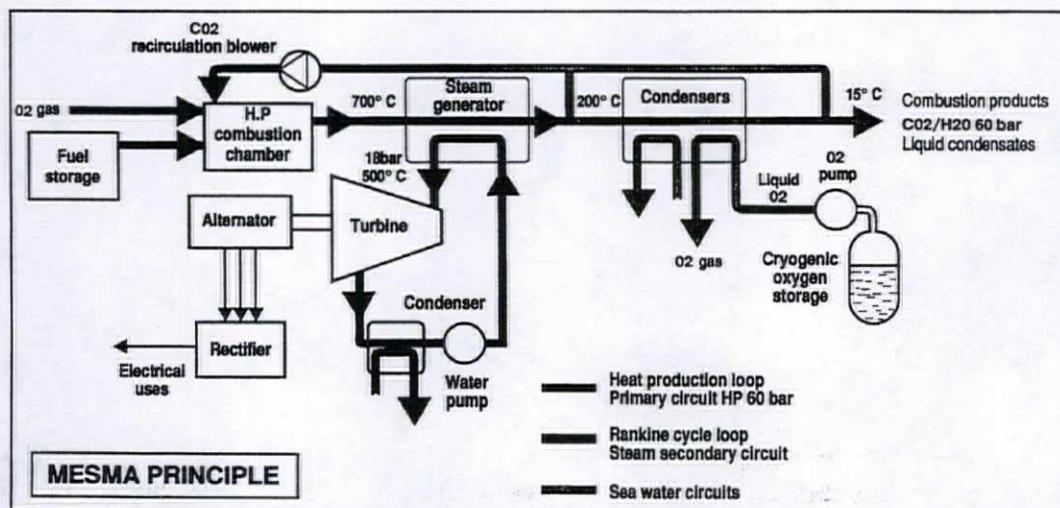
In Frankrijk wordt door een consortium van bedrijven gewerkt aan een AIP systeem voor de conventionele Agosta onderzeeboten, ten behoeve van de exportmarkt. Het gaat hier tevens om een gesloten stoomturbine cyclus. In 1982 werd met financiële steun van de Europese Commissie met de ontwikkeling van het systeem begonnen voor offshore toepassingen. In 1988 werd verbrandingsstabiliteit voor de verbranding van ethanol bij 60 bar bereikt voor een testbank met 400 kW warmte. Later, in 1991, werd de hoge druk verbrandingskamer geïntegreerd in een afgesloten primair circuit, welke het secundaire circuit van stoom

voorzag. De ontwikkeling is gereed en naar verwachting loopt de testfase binnenkort ten einde.

Het eerste MESMA systeem dat wordt ingebouwd zal een elektrisch vermogen van 200 kW hebben. Dit zal voor een Agosta onderzeeboot voor de Pakistaanse marine worden gedaan. Er schijnt te worden gewerkt aan een 600 kWe systeem, terwijl een groeipotential tot 1,3 MWe wordt geclaimd.

De cyclus bestaat uit drie hoofdonderdelen, zie ook figuur 2.15 [Bertin & Cie, 1995]:

- ⇒ het primaire circuit, een hoge druk verbrandingsloop die de warmte opwekt;
- ⇒ het secundaire circuit, een Rankine cyclus welke of een stoomturbine, of een organische vloeistof turbine aandrijft. De turbine is uitgerust met een hoogtoerental, direct aangedreven generator, die de geluidsniveaus laag genoeg houdt voor de geruisloze vaart;
- ⇒ brandstof en LOX opslag tanks, welke zijn uitgerust met voedingspompen.

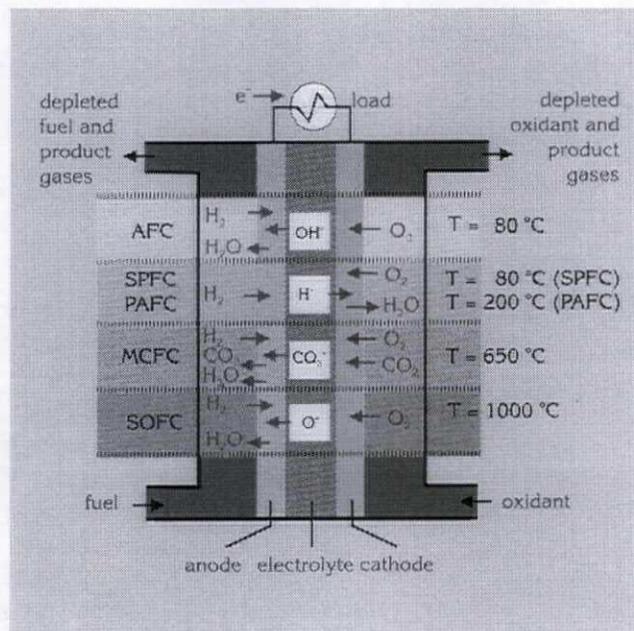


Figuur 2.15: Werkingsprincipe MESMA [Bertin & Cie, 1995].

De Franse marine heeft veel ervaring met Rankine cycli (stoom), omdat elke nucleaire onderzeeboot ermee is uitgerust. Daarom is ook voor het MESMA-systeem stoom als uitgangspunt genomen. De benodigde warmte wordt verkregen door ethanol te verbranden met zuivere zuurstof uit een LOX vat. Voor de verbranding wordt de zuurstof verdampt met behulp van restwarmte van de stoomcyclus. De verbranding vindt plaats bij een druk van ongeveer 60 bar, zodat verbrandingsproducten tot 600 meter zonder water management systeem buitenboord gebracht kunnen worden. Hiervoor wordt een 'silent control valve' gebruikt, hetgeen betekent dat de gassen niet binnenboord in zeewater worden opgelost, maar rechtstreeks overboord worden gezet. Een deel van de verbrandingsgassen wordt naar de verbrandingskamer gerecirculeerd om de temperatuur daar voldoende laag te houden, net als bij de verbrandingskamer van de Stirlingmotor [Koninklijke Marine PFS/R&D, 1996].

De voor- en nadelen van de MESMA komen bijna overeen met die van de CCG-cyclus. Een extra voordeel is dat het systeem is ontworpen voor modulaire inpassing. Extra nadelen zijn de emissies en daardoor een geluids- en infraroodsignatuur. Volgens de producenten van de MESMA verlaten de verbrandingsproducten de boot met een temperatuur van ongeveer 15 °C (zie figuur 2.15), maar dit valt waarschijnlijk hoger uit.

type brandstofcel	elektrolyt	temperatuur [°C]
AFC: Alkine Fuel Cell	KOH/water (alkalisch)	50-120
SPFC: Solid Polymer Fuel Cell	Polymeer elektrolyt membraan (PEM)	80-100
PAFC: Phosphoric Acid Fuel Cell	Fosforzuur (PA)	180-210
MCFC: Molten Carbonate Fuel Cell	Gesmolten carbonaat (MC)	650
SOFC: Solid Oxide Fuel Cell	Vast oxide (SO)	800-1000
DMFC: Direct Methanol Fuel Cell	Koolstofmembraan met zwavelzuur	45-100
ALFC: Aluminium Air Semi Fuel Cell	Bestaande uit loog	60-80



Figuur 2.16: Werkingsprincipe van verschillende typen brandstofcellen [Fuel Cells ECN, 1996]

De elektrolyt bepaalt naast de werktemperatuur ook de andere eigenschappen, zoals de materiaalkeuzen voor de elektroden en de wijze van ionentransport, van de cel.

In de alkaline fuel cell (AFC) werkt een geconcentreerde solutie van kaliumhydroxide zowel als elektrolyt en koelmiddel. Het geleid hydroxyl-ionen van de anode naar de kathode, werkt bij een bedrijfstemperatuur van ongeveer 80 °C en is gevoelig voor CO₂-vergiftiging. Deze CO₂-vergiftiging komt voort uit het reformingproces. Door de reactie met de in de elektrolyt aanwezige hydroxyl-ionen worden carbonaten gevormd die de elektrolyt verontreinigen. Deze verontreiniging verstoort de werking van de brandstofcel. De AFC kan om deze reden slechts met een reformer worden uitgevoerd als na het reformingproces de waterstof van de koolstofmonoxide en koolstofdioxide wordt gescheiden.

De polymer electrolyte fuel cell (PEFC, PEMFC, SPFC) werkt ook bij een lage temperatuur (80 - 100 °C). De elektrolyt is een vaste polymeer, welke na hydratatie protonen geleidt van anode naar kathode.

Beide typen brandstofcellen werken bij een temperatuurniveau dat het gebruik van platina noodzakelijk maakt. In het algemeen wordt dit platina verstrooid over grafiet en werkt het als katalysator in de elektrode. Platina is bij deze temperaturen zeer gevoelig voor vergiftiging met koolmonoxide. Hetzelfde geldt voor de fosforzuur-brandstofcel (PAFC) welke bij een temperatuur van 200°C werkt. De vergiftiging van het platina in de elektroden van deze



cellen is minder erg dan de vergiftiging van de elektrolyt in de AFC. Door het tijdelijk omkeren van de reactie in de brandstofcellen, worden de elektroden namelijk weer vrij gemaakt van de koolstofmonoxidevergiftiging.

De molten carbonated fuel cell (MCFC) gebruikt een gesmolten mix van alkali carbonaten als elektrolyt welke via de carbonaat-ionen voor massa- en ladingtransport van kathode naar anode zorgt. Deze mix wordt op zijn plaats gehouden door een inert poreuze structuur. Het CO_3^{2-} transport maakt het noodzakelijk CO_2 toe te voegen aan het voedingsgas voor de kathode. Dit CO_2 komt daarna weer vrij aan de anode. De operationele temperatuur is rond de $650\text{ }^\circ\text{C}$ wat het gebruik van katalysatoren als nikkel in de elektroden toestaat.

De elektrolyt in de solid oxide fuel cells (SOFC) is yttrium-gestabiliseerd zirkoonoxide, een vaste stof welke zuurstof ionen van anode naar kathode geleidt bij hoge temperaturen (rond de $1000\text{ }^\circ\text{C}$). Zowel de elektrolyt als de elektroden zijn keramische materialen [Joon, 1996].

De Aluminium/Air Semi Fuel Cell (ALFC) is een celtype met een iets andere werking dan de voorgaande typen. In dit geval bestaat de anode uit aluminium, dat tegelijk als brandstof fungeert. De aluminium elektrode bevindt zich in een elektrolyt bestaande uit een loog. Het oxidant is zuurstof of lucht en is door middel van een membraam gescheiden van de elektrolyt. Dit membraam werkt tegelijk als kathode. Tijdens bedrijf gaat de aluminium anode in oplossing, onder vorming van aluminiumhydroxide. Dit betekent dat de elektrolyt ververscht dient te worden, zodat er een elektrolytvoorraad in plaats van een waterstof-voorraad benodigd is. Door dat de celspanning ongeveer 2.8 volt bedraagt is de per kWh opgewekte elektriciteit benodigde hoeveelheid zuurstof de helft van de andere celtypen. De bedrijfstemperatuur is laag, tussen de 60 en $80\text{ }^\circ\text{C}$. Tijdens de werking van dit type brandstofcel ontstaat altijd een hoeveelheid waterstof, hetgeen ongewenst is in een onderzeeboot. Er wordt onderzoek gedaan naar anodes gemaakt van aluminiumlegeringen waardoor de corrosiereactie wordt teruggedrongen [Koninklijke Marine PFS/R&D, 1996]. Door het ontbreken van voldoende gegevens is niet bekend welke reactie voor de opwekking van elektrische energie zorgt.

Door stapeling van het aantal cellen kan er tot het gewenste vermogen van het systeem worden gekomen. Meestal worden er pakketten met een vast aantal cellen parallel of serie geschakeld om zo tevens tot een redundant systeem te komen.

De brandstof die in een brandstofcel de energie moet leveren voor de overall-reactie is waterstof. Men kan direct waterstofgas als brandstof toevoeren, maar ook andere brandstoffen, zoals methanol, aardgas en metaalhydriden, zijn bruikbaar. Het gebruik van zuivere waterstof stuit op een aantal problemen. Dit zijn grote op- en overslagverliezen (circa 25%) en het feit dat waterstof vanwege de veiligheid niet zuiver mee kan worden genomen. Als er fossiele brandstoffen worden meegenomen, dan moeten deze worden omgezet in waterstof voordat ze kunnen deelnemen aan de reactie. Deze omzetting vindt plaats in een reformer bij temperaturen van $220\text{-}240\text{ }^\circ\text{C}$ voor methanol en $700\text{ }^\circ\text{C}$ voor aardgas. Er kan met een reformer ook waterstof uit kerosine ($\sim 800\text{ }^\circ\text{C}$) en gewone diesel ($\sim 900\text{ }^\circ\text{C}$) worden gehaald, maar dit zorgt nog voor een aantal problemen. Ten eerste ontstaan er veel afvalstoffen (CO en CO_2) die moeten worden afgevoerd. En ten tweede zal voor het reformingproces een katalysator nodig zijn. Een bijkomend probleem hiervan is de aanwezigheid van zwavel in de zwaardere brandstoffen. Deze zwavel deactiveert namelijk de katalysator. Als laatste optie kan er voor worden gekozen om uit metaalhydride waterstof te onttrekken. Een voordeel is de veilige manier van opslag. De opslag van waterstof in metaalhydride-tanks is echter volumineus en zwaar. Dit heeft invloed op de ballastverdeling en dus de trim van de boot. De waterstof komt vrij door de het metaalhydride te verwarmen.



De brandstoffen worden verhit met stoom. Zolang er geen zuurstof bij de verhitte brandstoffen komt, zullen deze niet ontbranden. Bij lage temperatuur brandstofcellen is een externe reformer noodzakelijk om deze temperaturen te bereiken, terwijl voor hoge temperatuur cellen de reforming in de brandstofcel zelf kan plaatsvinden.

Uit alle literatuurverwijzingen blijken de lage temperatuur brandstofcellen het best geschikt te zijn voor toepassing in onderzeeboten vanwege de lage bedrijfstemperatuur.

De voordelen van het gebruik van brandstofcellen zijn [Sattler, 1995]:

- ⇒ lage geluidsproductie en infrarood signatuur;
- ⇒ modulair ontwerp van het gehele buitenlucht-onafhankelijke systeem;
- ⇒ goed rendement bij deellast;
- ⇒ lage onderhoudsbenodigdheden. Dit geldt alleen voor de lage temperatuur brandstofcellen, omdat die als ze een periode niet worden gebruikt af mogen koelen tot de omgevingstemperatuur. Voor de hoge temperatuur cellen is het namelijk schadelijk om ze te laten afkoelen als ze niet worden gebruikt;
- ⇒ relatief 'schone' reactieproducten.

Nadelen van de brandstofcellen zijn:

- ⇒ naast brandstof voor de dieselgeneratoren, zal er vloeibare zuurstof en een brandstof voor de destillatie van waterstof meegenomen moeten worden. Dit zal een verlaging van het systeemrendement en een grote volume- en gewichtstoeslag met zich meebrengen, hetgeen het drijf- en duikgedrag zal beïnvloeden;
- ⇒ reforming van waterstof aan boord betekent dat de elektriciteitsproductie niet langer emissievrij zal zijn en er een water management systeem nodig zal zijn als het reformingproces niet onder hoge druk wordt uitgevoerd;
- ⇒ toepassing van een reformer zal het systeem aanzienlijk complexer maken.

2.3.2 Batterijen.

Batterijen zijn geen vermogensopwekkers, maar er kan elektrische energie mee worden opge-slagen. Alle onderzeeboten gebruiken batterijen. Nucleaire onderzeeboten moeten ze aan boord hebben als alternatieve vermogensbron om of de reactor te herstarten, of om als nood-voortstuwingsysteem te dienen in het geval de totale reactor uitvalt. Dieselelektrische onderzeeboten vertrouwen geheel op batterijen voor de voortstuwning onder water.

Het primaire systeem dat tegenwoordig wordt gebruikt is de lood/zwavelzuur reactie, welke in de negentiende eeuw is ontwikkeld voor industriële batterijen. Ondanks dat er significante verbeteringen zijn gemaakt blijven de nadelen van het grote gewicht (door het lood), de corrosie (het zuur) en de waterstofproductie. Huidige batterijen in een onderzeeboot zijn chemisch gelijk aan die worden gebruikt in een auto, met een bedrijfstemperatuur die tussen de -40 en 50 °C kan liggen.

Ongeveer een kwart van het totale gewicht van een moderne dieselelektrische onderzeeboot wordt voor rekening van de batterijen genomen.

Een nadelig neveneffect van praktisch alle batterijen is het ongelijke rendement bij verschillende ontladingsnelheden. Hoe groter de ontladingsnelheid, hoe lager de totale energie die eruit wordt gehaald.

Lood/zwavelzuur batterijen moeten intensief worden onderhouden en er moet een gedetailleerd onderhoudsprogramma worden gevolgd. Gedurende normaal gebruik dienen de 'vitale signalen' in de gaten gehouden te worden. Bijvoorbeeld, lood/zwavelzuur batterijen



worden warm tijdens het opladen. Temperaturen hoger dan 50 °C kunnen dan permanente schade aan de celplaten toebrengen. Als de batterijen worden opgeladen komt er bij de reactie ook het explosieve waterstofgas vrij, zodat passende veiligheidsmaatregelen een absolute noodzaak zijn.

De lood/zwavelzuur batterijen van een onderzeeboot gaan niet de levensduur van de boot mee en moeten daarom periodiek worden vervangen. Dit komt door de erosie van de platen in de cellen. Naar mate de corrosie toeneemt, neemt de weerstand tegen schokbelasting af. De verwachte levensduur is ongeveer vijf jaar.

De laatste jaren is er onderzoek gedaan naar een vervanger of opvolger van de lood/zwavelzuur batterijen (~35 Wh/kg) met een hogere energiedichtheid.

Een gezamenlijk Engels/Amerikaans onderzoek heeft geleid tot de LAIS (lithium aluminium/ijzersulfide) batterijen. De voordelen zijn aanzienlijk: een ongeveer drie maal zo grote energiedichtheid (~100 Wh/kg), de mogelijkheid om ze sneller te ont- en herladen, geen gebruik van corrosieve chemicaliën, geen productie van gevaarlijke gassen en totaal afsluitbaar. Het grote nadeel is de bedrijfstemperatuur die tussen de 360 en 600°C ligt. De LAIS cellen zijn compleet afgesloten, gebruiken een vaste elektrolyt en zijn gevuld met argon [Zimmerman, 1992].

Een ander ontwerp is de natrium/zwavel batterij met een energiedichtheid van tussen de 60 en 100 Wh/kg. Natrium/zwavel batterijen lijden niet aan zelfontlading en kunnen een groot aantal cycli doorlopen zonder significante capaciteitsvermindering. Ook bij deze batterijen is de hoge bedrijfstemperatuur (300-350 °C) een nadeel. Vloeibaar natrium en vloeibare zwavel (in poreus grafiet) worden gescheiden door een keramisch elektrolyt (β -alumina). De natrium-ionen zorgen voor het ladingtransport door de elektrolyt. Bij het laden en ontladen ontstaat warmte ten gevolge van overgangs-, polarisatie- en ohmse verliezen. Om de cel zo goed mogelijk op temperatuur te houden is er goede isolatie nodig. Tijdens snelle ontlading dient er echter een aanzienlijke hoeveelheid warmte (25-30% van de geleverde elektrische energie) afgevoerd te worden. Uit proeven is gebleken dat natrium/zwavel batterijen goed tegen schok- en trillingsbelastingen kunnen [Koninklijke Marine PFS/R&D, 1996].

Het is duidelijk dat er aanzienlijke capaciteitsverbeteringen voor batterijen mogelijk zijn. De duur van het onderwaterbedrijf kan met een factor drie worden vergroot. Aan de nieuwe batterij-ontwerpen kleeft echter een nadeel: de hoge bedrijfstemperatuur. Tevens hebben alle batterijsoorten het nadeel dat het rendement fors daalt bij snelle ontlading.



3. Beoordeling van de verschillende systemen voor Air Independent Propulsion

In dit hoofdstuk zullen de verschillende systemen worden vergeleken. Per eigenschap worden de systemen in de volgende paragrafen vergeleken en beoordeeld. Er zal worden uitgegaan van de inpassing van de systemen in een middelgrote tot grote conventionele onderzeeboot. De vergelijking is niet numeriek, omdat daarvoor te weinig gegevens bekend zijn. In de tabel in bijlage 1 zijn de systemen per eigenschap in drie categorieën beoordeeld: goed (+); redelijk (o) en slecht (-). Bij de beoordeling van de brandstofcellen wordt van een configuratie met een reformer en methanol-, LOX- en watertanks uitgegaan. Bij de batterijen wordt uitgegaan van de conventionele lood/zwavelzuur batterijen.

3.1 Beoordeling op massa.

Van alle systemen zijn de totale massa's naar de beste inschatting beoordeeld. De totale massa wil zeggen inclusief alle extra systemen en alle extra opslag van brandstoffen en reactanten (onder reactanten worden de stoffen bedoeld die voor het proces naast de brandstoffen moeten worden meegenomen, zoals bijvoorbeeld LOX en argon).

De massa van de AMPS is groot, vanwege de afscherming van de reactor en de noodkoelsystemen. De AMPS is voor een ontwerp van een extra AIP-sectie in een conventionele onderzeeboot een zwaar systeem.

Het ontwerp van de HTGR is er een voor de totale energievoorziening van een onderzeeboot en dus niet voor een extra AIP-sectie. Hier is ook afscherming van de reactor nodig, maar geen noodkoelsysteem. De massa van de afscherming van de kern is vergeleken met de AMPS per geleverde kW minder groot.

De massa's van de CCD, CCS, CCG, het MESMA systeem en de brandstofcellen liggen allemaal bij elkaar in de buurt. Dit is een grove inschatting aangezien er van weinig systemen exacte gegevens beschikbaar zijn. In het algemeen zullen de brandstofcellen er het beste uitkomen, daarna respectievelijk de CCS, de CCD-motoren en daarna de gesloten turbine cyclussen. Als deze AIP-systemen in een onderzeeboot worden gebouwd, dan kan er met het CCD-systeem voordeel worden behaald. Om een van de hoofd-dieselgeneratorsets kan een gesloten gascyclus voor de filtering van de uitlaatgassen heen worden gebouwd en zodoende kan er een massa- en volumebesparing worden behaald. Deze dieselmotor zal dan tussen beide gebruikstoestanden moeten worden 'omgezet': de turbocharger zal afgeschakeld moeten worden en de motor in- en uitlaat zullen moeten worden omgeschakeld van de ene naar de andere gebruikstoestand. Dit ontwerp is echter geen uitgewerkte optie.

Met de inpassing van extra batterij-capaciteit is een grote massatoename gemoeid, tegen een geringe verlenging van de onder-water vaart. Dit betreft dus conventionele lood/zwavelzuur batterijen, omdat alle andere ontwerpen vanwege hun hoge bedrijfstemperaturen (nog) niet in aanmerking komen voor inpassing in een onderzeeboot.

3.2 Beoordeling op volume.

De inleidende alinea van paragraaf 3.1 geldt ook voor de volume-beoordeling. De systemen worden ook nu in hun totaliteit, inclusief alle componenten, beoordeeld.



Het totale volume van de AMPS is groot vanwege de reactorafscherming en het noodkoelsysteem. De HTGR is vanwege zijn innovatieve ontwerp compacter, zeker als het volume wordt gerelateerd aan het totaal geleverde vermogen.

Het volume van de CCD is erg afhankelijk van het aantal gewenste dagen onder water, omdat daarmee de grootte van de LOX-tank wordt bepaald. Dit geldt voor alle systemen die vloeibare zuurstof nodig hebben: CCD, CCS, CCG en de brandstofcellen.

De inpassing van een CCS-systeem in een grote conventionele onderzeeboot zal leiden tot veel (6 à 8 stuks) Stirlingmotoren, waardoor er veel extra volume in beslag zal worden genomen. Dit is nodig voor de bereikbaarheid van de motoren voor onderhoud en reparatie. Een CCS-systeem zal voorlopig alleen voor kleine onderzeeboten interessant zijn.

De volumina van de gesloten turbine systemen (CCG en MESMA) zijn behoorlijk groot vanwege onderdelen in de cyclussen als separatoren, warmtewisselaars en condensatoren.

De brandstofcel-eenheden zijn erg compact te stapelen en door te schakelen. Zelfs met een reformer kan het ontwerp nog compact worden genoemd. Het probleem van de brandstofcellen is dat er naast zuurstof ook een extra brandstof (bijvoorbeeld methanol of metaalhydride) moet worden meegenomen, hetgeen het totale systeemvolume doet toenemen.

Bij vergroting van de capaciteit van de batterijen zal de toename van het volume net als de massatoename groot zijn.

3.3 Beoordeling van het leverbare vermogen.

In deze paragraaf zullen de systemen worden beoordeeld op het vermogen dat ze kunnen leveren.

De AMPS is net als de CCD-motor en de gesloten turbine cyclussen in staat om als extra AIP-sectie veel vermogen te leveren. De HTGR is voor een totale vermogensvoorziening van een onderzeeboot in ontwikkeling en zal ook in staat zijn veel vermogen te leveren.

Het per Stirlingmotor leverbare elektrische vermogen is ongeveer 60 kW, wat weinig is vergeleken met de andere systemen. Er zullen, zoals hierboven al vermeld, voor een voldoende grote vermogenslevering een aantal units moeten worden geïnstalleerd.

De brandstofcellen worden momenteel alleen in proefopstellingen en demonstratie-toepassingen beproefd. Alleen in deze opstellingen zijn brandstofcellen in staat een goed vermogen te leveren, bovendien is de kostprijs per kW (inclusief reformer) nog erg hoog (2500-5000 \$/kWe). De ontwikkeling gaat daarentegen erg snel, zodat over een paar jaar de leverbare vermogens hoger en de prijzen per kW naar verwachting aanzienlijk lager zullen zijn.

Vermogenstoename door inpassing van extra batterijen kan aanzienlijk zijn (maximaal een factor drie), zeker als er vernieuwde batterij-ontwerpen met een hogere vermogensdichtheid dan de lood/zwavelzuur batterijen worden toegepast.

Uit de laatste twee paragrafen kunnen de vermogensdichtheden (vermogen/volume) van alle systemen worden gehaald. De resultaten staan in de tabel en spreken voor zich.



3.4 Mogelijkheid tot modulaire inpasbaarheid.

Een aantal AIP-systemen is speciaal ontworpen om als extra sectie in een onderzeeboot te worden ingebouwd, bijvoorbeeld tijdens een midlife-update. Deze systemen zijn ontworpen om modulair in te worden gepast en kunnen ook in nieuwe ontwerpen van onderzeeboten worden gepast. De modulair inpasbare ontwerpen zijn de AMPS, de CCD-motor, de CCS-motor, de brandstofcellen, de batterijen en de MESMA. Dit zal voor een CCG-systeem iets meer moeite kosten. De HTGR is het enige systeem dat nog niet specifiek voor een onderzeeboot is ontworpen, maar alleen maar als elektriciteitscentrale.

3.5 Beoordeling van de kosten per systeem.

De kosten per systeem zijn in hoofdstuk 2 al ter sprake gekomen. Er kan een onderscheid worden gemaakt in aanschaf- of initiële kosten en exploitatiekosten. Bij de beoordeling van de onderhoudskosten, die onder de exploitatiekosten vallen, dient te worden vermeld dat hierover eigenlijk weinig kan worden gezegd. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat alle systemen nog in de ontwikkelingsfase zitten. Er dient dus enige voorzichtigheid te worden genomen met de interpretatie van deze gegevens.

Beide nucleaire ontwerpen (de AMPS en de HTGR) zijn erg duur, zowel in aanschaf als in exploitatie. Het lijkt een onverstandige keuze om een AMPS in een onderzeeboot te bouwen, omdat het een hele dure optie is voor extra energieopwekking. De HTGR lijkt financieel gezien een betere optie omdat dit geen ontwerp voor een hybride toepassing is, maar voor de totale energievoorziening.

Het voordeel van de CCD en de CCS-motoren is het gebruik van bestaande en dus makkelijk te verkrijgen onderdelen. Dit is gunstig voor de aanschafprijs. De exploitatiekosten zullen niet onevenredig hoog zijn.

De gesloten turbine systemen zijn behoorlijk duur door dure componenten zoals de turbines, recuperatoren en warmtewisselaars.

Brandstofcellen zijn, zoals hierboven al gezegd, per kW nog erg duur. Deze prijs zal in de nabije toekomst echter wel dalen. Een brandstofcelsysteem, uitgerust met een reformer zal per kW nog duurder zijn (2500-5000 \$/kWe). De exploitatiekosten zullen voor hoge temperatuur brandstofcellen veel hoger zijn dan voor lage temperatuur cellen, aangezien deze op temperatuur gehouden moeten worden als ze niet worden gebruikt.

Batterijen hebben niet zozeer hoge initiële kosten, maar dienen wel intensief onderhouden te worden, hetgeen hoge exploitatiekosten tot gevolg zal hebben.

3.6 Rendementsbeoordeling.

De rendementen van alle systemen ontlopen elkaar niet zo veel, allemaal een uiteindelijk elektrisch rendement van tussen de 30 en 35%. Het rendement van de nucleaire systemen ligt naar verwachting lager, maar dat is niet helemaal duidelijk.

De brandstofcellen zouden in staat moeten zijn om een hoog rendement te halen, omdat ze niet afhankelijk zijn van het Carnot-rendement, maar van het elektrochemisch rendement. De toekomstverwachtingen van de brandstofcellen worden hoog ingeschat, maar dit kan komen doordat er een vertekend beeld wordt gegeven. Onderzoekers geven veelal het



theoretisch haalbare rendement van de brandstofcel, omdat het werkelijke rendement (nog) niet bekend is. Het is echter maar de vraag welke rendementen er in de toekomst zullen worden behaald. Ze hebben goede rendementen bij deellast, maar het gebruik van een reformer haalt het totaalrendement omlaag. Tevens wordt na het reactieproces de niet gebruikte waterstof weggespoeld, hetgeen het rendement omlaag haalt.

Het rendement van batterijen is sterk afhankelijk van de snelheid waarmee ze worden ontladen. Er treden laadverliezen op in de orde van 2-10%, afhankelijk van de mate waarin de batterij was opgeladen. Bij langzame ontlading van de batterijen kan er een erg goed rendement worden behaald. Bij snellere ontlading neemt het rendement echter sterk af.

3.7 Beoordeling van de geluidsproductie.

De geluids- en trillingsproductie van de nucleaire onderzeeboten is groter dan die van conventionele onderzeeboten, omdat een nucleaire installatie simpelweg meer draaiende onderdelen (turbines, pompen en compressoren) bevat.

Een closed cycle dieselsysteem zal veel trillingen genereren, omdat het ook een systeem is met veel draaiende onderdelen (motor, generator, absorber en pompen). Deze trillingen zijn te verminderen door toepassingen van dempers en het extra verend opstellen, zodanig dat het geluidsniveau onder de voor de Koninklijke Marine toelaatbare waarden blijft. Het te detecteren geluidsniveau van een Stirlingmotor is lager, aangezien er geen explosies in de cilinders plaatsvinden, maar er een externe verbrandingskamer met continue verbranding in zit. Er zullen echter meerdere motoren voor een AIP-toepassing nodig zijn.

Het geluids- en trillingsniveau van een gesloten gasturbinecyclus zal ongeveer hetzelfde zijn als dat van een CCD-systeem.

Voor de CCD-, de CCS- en de gesloten gasturbine cyclussen kunnen de geluidsniveaus allemaal onder het maximaal toelaatbare niveau (in verband met detectie van buitenaf) worden verlaagd door toepassing van geluidswerende kasten en extra verende opstellingen.

De brandstofcellen en de batterijen zijn natuurlijk uitstekend geschikt voor de geruisloze vaart, door het ontbreken van grote draaiende onderdelen (met uitzondering van pompen). Een brandstofcelsysteem met een reformer zal echter minder stil zijn.

3.8 Emissiebeoordeling.

Een nucleair systeem zal geen directe vervuilende emissies hebben, maar heeft natuurlijk het grote nadeel van nucleair afval na uitputting van de brandstof. Dit aspect is echter niet meegenomen in de emissiebeoordeling. Een onderzeeboot met een nucleaire installatie aan boord lost verder alleen warmte in het zeewater.

Het CCD-systeem lost naast een geringe hoeveelheid warmte ook koolstofdioxide en een kleine fractie andere verbrandingsproducten in het zeewater via de absorber. Het systeem kan ook in open toestand draaien en zal dan zijn uitlaatgassen gewoon buitenboord uitlaten.

Alle uitlaatgassen van een Stirlingmotor en de MESMA worden, eventueel na recirculatie, overboord gelaten of gepompt. Dit zijn dus geen schone systemen. De CCG-cyclus met de nieuwe methode van opslag en verbranding van waterstof (zie figuur 2.16) is daarentegen erg schoon, met water als enig 'afvalproduct'.



Brandstofcellen, uitgevoerd met een reformer, hebben als grote nadeel dat er uitlaatgassen moeten worden geloosd. Dit gebeurt met of zonder water management systeem, al naar gelang het reformproces op lage of op hoge druk plaatsvindt.

De batterijen produceren naast elektriciteit tevens waterstofgas. In een conventionele onderzeeboot wordt dit gas meeeverbrandt in de dieselmotoren als er wordt gesnorkeld. Voor de onder-water vaart hangen er door de boot kleine waterstofgas-verbranders. De batterijen zijn dus erg schoon. Deze beoordeling houdt geen rekening met het lood en zwavelzuur dat overblijft bij het buiten gebruik stellen van de batterijen.

3.9 Beoordeling van de infrarood signatuur.

De infrarood signatuur van de AMPS en de HTGR is behoorlijk duidelijk, omdat er met zeewater grote hoeveelheden warmte worden weggekoeld en overboord worden gepompt. Bij de HTGR zal dit erger zijn dan bij de AMPS, omdat dit systeem meer vermogen levert (totale energievoorziening van de boot).

Het CCD-systeem zal naar verhouding een stuk minder warmte overboord lozen, waardoor de infrarood signatuur minder duidelijk zal zijn.

De Stirlingmotor lost zijn uitlaatgassen direct overboord, waardoor de achtergelaten signatuur duidelijker zal zijn.

De CCG-cyclus heeft alleen water als afvalproduct, en heeft dus geen infrarood signatuur als dit water wordt opgeslagen. Als het overboord wordt gepompt zal de signatuur minimaal zijn.

Het MESMA-systeem laat onder hoge druk, maar met een lage temperatuur (volgens de fabrikant) uitlaatgassen naar buiten en zal hierdoor nauwelijks een infrarood signatuur achter laten. Door bellenvorming ontstaat er echter wel een geluidssignatuur.

Een brandstofcel met reformer lost ook alles overboord en zal hierdoor goed detecteerbaar zijn. Door het haast noodgedwongen moeten toepassen van een reformer verliest een brandstofcel een belangrijk voordeel vergeleken met de andere systemen.

Van de aluminium semi-brandstofcel is te weinig bekend om een oordeel te geven over de infrarood signatuur.

3.10 Beoordeling van de complexiteit van de systemen.

De nucleaire varianten zijn erg complex doordat er recuperatoren, compressoren, turbines, pompen en warmtewisselaars worden toegepast. Dit geldt in mindere mate voor de gesloten gasturbine cyclussen.

Het CCD-systeem is daarentegen opgebouwd uit COTS (= commercial off the shelf) producten, met uitzondering van de absorber en het water management system. Deze onderdelen zijn wel vrij te verkrijgen bij Carlton Deep Sea Systems in Engeland en sinds kort bij MTU uit Duitsland, maar dit zijn de enige leveranciers.

De Stirlingmotoren zijn als units te verkrijgen, waardoor het een vrij eenvoudig systeem is.



De systemen met gewone brandstofcellen worden door het gebruik van een reformer vrij complex. Zonder reformer zou het een systeem een stuk eenvoudiger worden. De aluminium semi-brandstofcel heeft geen reformer nodig, echter over de gehele systeemopbouw is weinig bekend. Uitgaande van de overeenkomsten met een gewone brandstofcel (zonder reformer) wordt de systeemopbouw als eenvoudig ingeschat.

Het ontwerp van de batterijen is relatief eenvoudig, vanwege het ontbreken van draaiende onderdelen. De batterijen dienen echter goed in de gaten te worden gehouden vanwege hun grote onderhoudsbehoefte. Hierdoor zijn de batterijen complexer dan verwacht zou worden. Het gewenste elektrische vermogen wordt verkregen door serie- en parallelschakeling van de batterijen.

3.11 Vergelijking van de verlenging van de onderwatertijden.

Met de nucleaire systemen is in feite een hele lange vaarperiode onder water mogelijk. Deze is afhankelijk van de meegenomen hoeveelheid voedsel aan boord en dus onafhankelijk van het voortstuwingssysteem.

De onderwatertijd van een CCD-motor wordt begrensd door de mee genomen hoeveelheid vloeibare zuurstof. Deze is afhankelijk van de beschikbare ruimte voor de LOX-tank. Een CCD-ontwerp zal zo compact mogelijk moeten zijn, zodat de ruimte om zuurstof mee te nemen zo groot mogelijk wordt. De hoeveelheid mee te nemen (gasvormige) argon zal hooguit 5% van de hoeveelheid zuurstof zijn.

Voor de CCS-motor, de CCG, de MESMA en alle brandstofcel-ontwerpen geldt hetzelfde criterium. Ook hier zal de verlenging onder-water vaart afhankelijk zijn van de meegenomen hoeveelheid LOX. Bij een CCG-systeem kan ook de meegenomen hoeveelheid waterstof de begrenzende factor zijn.

Zoals in paragraaf 2.3.2 al gezegd zal de verlenging van de onderwatertijd door toepassing van extra lood/zwavelzuur batterijen slechts beperkt zijn, hooguit een verdubbeling. De kans op toepassing van een van de nieuwe ontwerpen voor batterijen zal klein zijn vanwege de hoge bedrijfstemperaturen.

3.12 Redundantie van de systemen.

Redundantie kan op twee manieren worden geïnterpreteerd. Namelijk redundantie binnen een systeem en redundantie door inpassing van meerdere systemen. De beoordeling in deze paragraaf gaat uit van redundantie binnen een systeem. Naast redundantie zou er ook naar de betrouwbaarheid (bedrijfszekerheid) van de verschillende onderdelen binnen een systeem kunnen worden gekeken, maar daar zijn te weinig gegevens over bekend. Beoordeling op betrouwbaarheid wordt dus buiten beschouwing gelaten.

De redundantie van de AMPS kan goed worden genoemd vanwege de dubbele uitvoering van de turbine cyclus. Bij deze beoordeling is aangenomen dat de bedrijfszekerheid van de reactor vele malen groter is dan die van de turbine cyclussen, zodat de reactor niet dubbel uitgevoerd hoeft te worden. Dit geldt ook voor de HTGR. Toch is de redundantie van de HTGR lager, omdat er een enkele turbine loop wordt gebruikt.

Vooralsnog is het CCD-systeem enkel uitgevoerd, zodat er totaal geen redundantie is. Men kan natuurlijk overwegen om in een toekomstig ontwerp meer dan één van de hoofd



dieselgeneratorsets om te bouwen tot AIP-systeem. Dit is momenteel niet het geval, waardoor de CCD-motor een min krijgt voor de redundantie.

Door de noodzaak in een grotere onderzeeboot een aantal Stirlingmotoren te moeten toepassen is er een hoge mate van redundantie voor deze optie.

De gasturbine cyclussen zijn in de huidige ontwerpen nog enkel uitgevoerd, waardoor er net als bij de CCD-motor geen redundantie is.

Door bij de brandstofcellen een aantal stacks (celstapelingen) serie- of parallel te schakelen kan er een redundant systeem worden opgebouwd.

3.13 Beoordeling op extra mee te nemen brandstoffen.

De HTGR heeft als enige systeem het voordeel dat er alleen een brandstof, helium en eventueel water voor het proces nodig zijn. Het is een stand-alone ontwerp en er is naast de batterij-capaciteit geen andere vermogensleverancier aanwezig. Er zal voor dit systeem relatief weinig ruimte voor brandstofopslag en distributie nodig zijn.

Als er voor een uitbreiding van de batterij-capaciteit wordt gekozen, zal er ook weinig extra ruimte voor brandstofopslag nodig zijn. Naast de batterijen zal er echter altijd nog een primaire vermogensopwekker (waarschijnlijk dieselgeneratorsets) aan boord zijn, welke voor het opwekken van vermogen en het laden van de batterijen zijn eigen brandstof nodig zal hebben.

Voor alle andere systemen zullen er naast het AIP-systeem een conventionele vermogensopwekker en batterijen aan boord zijn. Naast de brandstof voor deze twee systemen zullen er brandstoffen en eventueel reactanten voor het AIP-systeem mee moeten worden genomen, hetgeen relatief veel ruimte voor brandstofopslag vraagt. Uitzondering hierop is de AMPS die als extra AIP-systeem alleen wat extra freon voor de turbinecyclus mee hoeft te nemen (uranium zit al in de reactor). Over de aluminium air semi fuel cell kan ook wat extra brandstoffen betreft weinig worden gezegd wegens een gebrek aan informatie.

3.14 Conclusie.

Uit de tabel in bijlage 1 kan geconcludeerd worden dat er voor inpassing in een middelgrote tot grote onderzeeboot een aantal systemen goed naar voren komen. In deze beoordeling is aan een aantal systeemeigenschappen een grotere invloed gekoppeld. Dit zijn massa, volume, vermogen, vermogensdichtheid en de verlenging van de onderwatertijd. Aan de beoordeling van de kosten zou ook een grotere invloed moeten worden gekoppeld, ware het niet dat deze beoordeling op grove inschattingen berust.

De systemen die er op deze manier beoordeeld goed uitkomen zijn: de closed cycle diesel (CCD) motor, de closed cycle gasturbine (CCG) motor, de module d'energie sous marine autonome (MESMA) en de high temperature gas-cooled reactor (HTGR) met gesloten Brayton cyclus. De conclusie betreffende het laatste ontwerp is niet relevant, omdat er weinig over bekend is. De brandstofcel en de autonomous marine power source (AMPS) komen er ook niet slecht uit, maar wel minder goed dan de hierboven genoemde systemen. De andere systemen komen er met deze beoordeling slecht uit: de batterijen, de aluminium/air semi fuel cell (ALFC) en de closed cycle Stirling (CCS) motor.



Omdat de CCD-motor, de CCG-motor en de MESMA de meest 'volwassen' ontwerpen van de als goed beoordeelde systemen zijn, zullen deze systemen voor eventuele inpassing in een onderzeeboot op korte termijn (binnen drie jaar) de voorkeur krijgen. Hierbij dient nog gezegd te worden dat de Zweden al onderzeeboten met de CCS-motoren operationeel hebben.



Literatuurlijst

- Barendrecht, E, L J Blomen, 'De toekomst van de brandstofcel'. *Energiespectrum* (september 1992), pg. 206 - 210.
- Brenner, R, 'A closed-cycle diesel system for submarines'. *Maritime Defence* (juni 1993), pg. 162-164.
- *Concept van een studie naar de mogelijkheden van buitenlucht-onafhankelijke voortstuwing voor de onderzeeboten van de Walrusklasse*. Den Haag, juli 1996. Studierapport Koninklijke Marine PFS/R&D.
- Donaldson, A J, 'Submarine Power Sources For the Mission'. *Naval Engineers Journal* (mei 1996), pg. 129-138.
- Foxwell, D, 'The hidden raider - air independent submarine propulsion'. *NATO's sixteen nations* (april 1994), pg. 52 - 59.
- Fowler, A, 'Closed cycle diesel propulsion systems'. *Trans. Institute of Maritime Engineering* (januari 1992), pg. 129 - 135.
- *Fuel Cells*. Petten, 1996. Energy Innovation Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN).
- Gosling, R J, A F Oliva, K B Church, 'The AMPS nuclear reactor based power source'. *Warship Technology* (november 1988), pg. 129 - 131.
- Gouge, M J, 'Closed cycle gasturbine nuclear power plant for submarine propulsion'. *Naval Engineers Journal* (december 1995), pg. 35 - 41.
- Harper, A D, 'A new approach to air independent propulsion with CBC engines'. *INEC 92* (2-4 september 1992), paper 31, pg. 258 - 267.
- Hawley, J G, G T Reader, G Walker, 'The technology of under water power systems'. *Journal of Naval Science* (december 1990), pg. 240 - 260.
- Hellqvist, K, 'Submarines with air independent propulsion in the present and future environment'. *INEC 92* (2-4 september 1992), paper 30, pg. 253 - 257.
- Hewish, M, 'Air independent - trials get under way'. *International Defence Review* (mei 1988), pg. 531 - 532.
- Janssen Lok, J, 'Opening up the A19'. *Jane's NAVY International* (maart/april 1995), pg. 31 - 35.
- Joon, K, D Jansen, L Sjunnesson, *Fuel cells for power generation: European experience and prospects*. Petten, 1996. Energieonderzoek Centrum Nederland.
- Kler, R de, 'Systeemanalyse van de warmtekracht cyclus'. HTR-INCOGEN symposium (16 januari 1997).
- *MESMA Subsea Power System*. Plaisir, Frankrijk, 1995. Bertin & Cie.
- Nilsson, H, S Gummerson, 'Air-independent Stirling engine-powered energy supply system for underwater applications'. *Trans. Institute of Maritime Engineering* (februari 1992), pg. 227 - 239.
- Nilsson, H, *Submarine power systems using the V4-275R Stirling engine*. Malmö, januari 1987. Sub-Power AB.
- Sattler, G, H Pommer, 'Fuel cell systems on submarines'. *Special Issue SUBCON '95* (1995), pg. 30 - 34.
- Sattler, G, 'Air independent propulsion systems for submarines'. *Naval Forces* (mei 1989), pg. 71 - 74.
- Schasfoort, M G J, *Modelvorming van de gascyclus van een closed cycle dieselmotor*. Rotterdam, augustus 1992. Rotterdamsche Droogdok Maatschappij (RDM).
- Schasfoort, M G J, *Voorspelling van de prestaties van een closed cycle dieselmotor. Simulatie van het systeemevenwicht in de gascyclus*. Rotterdam, december 1992. Rotterdamsche Droogdok Maatschappij (RDM).



- Seymour, C M, 'Application of air independent power systems to submarines'. *INEC 92* (2-4 september 1992), paper 29 - 1 t/m 7.
- Sligh, V R, G A Kastner, A G MacDonald, 'An air hybrid nuclear/diesel-electric submarine', *Maritime Defence* (december 1987), pg. 421 - 423.
- *Submarine AIP System Study - Utilizing Solid Polymer Fuel Cells*. Vancouver, Canada, maart 1992. Studie van Ballard Power Systems.
- Vos, W T M, *Simulatie van het thermodynamisch gedrag van een "buitenlucht onafhankelijke" dieselmotor, verslag deel 1*. Den Helder, 1992. Koninklijk Instituut voor de Marine (KIM).
- Wijma, J, *CO₂-Absorptie in zeewater. Een onderzoek in het kader van het AIP-project bij de RDM*. Rotterdam, 1991. Koninklijk Instituut voor de Marine (KIM).
- Zimmerman, S, *Submarine technology for the 21st century*. Arlington: Pascha Publications Inc., 1992.

**Bijlage**

SYSTEEM	MASSA	VOLUME	VERMOGEN	VERMOGENS DICHTHEID	MODULAIRE INPASBAARHEID	KOSTEN	RENDEMENT	GELUIDS PRODUCTIE	EMISSIES	INFRAROOD SIGNATUUR	COMPLEXITEIT	VERLENGING ONDERWATERTIJD	REDUNDANTIE	EXTRA BRANDSTOFFEN
AMPS	-	-	+	0	+	-	0	-	+	-	-	+	+	0
HTGR	0	0	+	+	-	-	0	-	+	-	-	+	0	+
CCD	+	0	+	+	+	+	+	0	0	0	+	0	-	-
CCS	+	-	-	-	+	+	+	0	-	-	+	0	+	-
CCG	+	0	+	+	0	-	+	0	+	+	-	0	-	-
MESMA	+	0	+	+	+	-	+	0	-	+	-	0	-	-
Fuel Cell	+	0	0	0	+	-	+	+	0	0	-	0	+	-
Alu Cell	+	0	-	-	+	-	+	+	?	+	+	0	+	?
Batterijen	-	-	0	-	+	0	+	+	+	+	0	-	+	0

Vergelijking van alle AIP-systemen per eigenschap, voor inpassing in een middelgrote tot grote onderzeeboot.