

# De Niet-nucleaire onderzeeboot met nucleaire allures

De ontwikkeling in de onderzeebootoorlogvoering brengt in toenemende mate de noodzaak mee onze aandacht te richten op de tijdsduur die onderzeeboten ononderbroken onder water kunnen opereren. Deze tijdsduur wordt vergaand bepaald door de mogelijkheden van de voortstuwing om zonder lucht van buiten de boot te kunnen functioneren. In dit artikel komt dat aspect aan de orde en zullen diverse buitenlucht onafhankelijke energiesystemen voor toepassing aan boord van onderzeeboten worden behandeld.

Een voorbeeld wordt gegeven van de integratie van zo'n – veelbelovend – systeem met de voortstuwingsinstallatie van de huidige conventionele onderzeeboten waardoor het snuiverpercentage en daarmee de kans op detectie aanzienlijk wordt verlaagd.

## 1 Inleiding

Sinds 1907 opereert de Nederlandse onderzeedienst met conventioneel voortgestuwde onderzeeboten. Dat wil zeggen onderzeeboten met dieselgeneratoren voor voortstuwing boven en vlak onder het wateroppervlak en met lood/zuurbatterijen voor onderwatervoortstuwing. Op het gebied van de conventionele voortstuwing hebben zich de nodige ontwikkelingen voorgedaan:

- Dieselmotoren zijn steeds betrouwbaarder geworden.
- De „vermogen-gewicht (en volume)” verhouding van de dieselmotor is aanzienlijk toegenomen.
- Het snuiversysteem deed zijn intrede en is geperfectioneerd.
- De lood/zuurbatterij is vooral de laatste jaren zeer sterk in capaciteit gestegen.
- De voortstuwingsinstallatie is nu volledig afstand bediend en een aantal processen binnen deze installatie is geautomatiseerd waardoor een betere bedrijfsvoering te verwachten is.

Het snuiverpercentage, zijnde de tijd welke een

onderzeeboot dicht bij het wateroppervlak op periscoopdiepte moet doorbrengen om door snuiveren de batterij op te laden, ten opzichte van de totaaltijd onderwater, is aanzienlijk gereduceerd door de hierboven genoemde ontwikkelingen.

De daling van het snuiverpercentage is nu tot staan gekomen. Dat komt doordat de toename van het „huishoudenergieverbruik” (dat wil zeggen de energie ten behoeve van klimaatbeheersing, sensoren, hulpwerktuigen, kombuis, automatisering e.d.) de toename van het vermogen om in een bepaalde tijd de batterijen weer op te laden heeft overvleugeld.

Deze ontwikkeling kan misschien in de nabije toekomst teniet gedaan worden door verdere ontwikkelingen in diesel- en batterijtechniek, maar een spectaculaire verlaging van het snuiverpercentage, om operationele redenen broodnodig, is niet verwachtbaar.

Ondanks dat de conventionele onderzeeboot elektrisch varend onderwater zeer moeilijk te detecteren is, ondanks ontwikkelingen zoals reductie van het uitgestraalde geruis en het bijna ondetecteerbaar maken van afvoergassen tijdens snuiveren zal de onderzeeboot kwetsbaar blijven zolang deze regelmatig naar periscoopdiepte moet terugkeren om te snuiveren. Hierdoor is het van groot belang het snuiverpercentage aanzienlijk te laten dalen.

Dit is uitgaande van het conventionele (niet nucleaire) voortstuwingsconcept voorlopig alleen mogelijk door de introductie van een buitenlucht onafhankelijk energiesysteem dat samen met het huidige conventionele voortstuwingsconcept een zogenaamd hybride voortstuwings-systeem moet gaan vormen.

## 2 Randvoorwaarden te stellen aan een buitenlucht onafhankelijk energiesysteem ten behoeve van in Nederland te bouwen niet nucleaire onderzeeboten

In het algemeen kan gesteld worden dat het sys-

Luitenant-ter-zee (T) der eerste klasse Ir. F. A. H. Matthee is hoofd nautisch militair toezicht en hoofd werktuigbouwtoezicht bij de aanbouw Walrusklasse onderzeeboten bij de ROM.

Luitenant-ter-zee (T) der eerste klasse Ir. F. Bander is docent scheepswerktuigkunde aan het Koninklijk instituut voor de marine.

Luitenant-ter-zee (T) der derde klasse KMR Ir. M. C. van Duuren is werkzaam als wetenschappelijk medewerker bij de afdeling staf en wetenschappelijke zaken van de afdeling werktuigbouw DMKM.

teem de voordelen van het conventionele voortstuwingsconcept (met name het lage uitgestraalde geluidsniveau) dient te behouden.

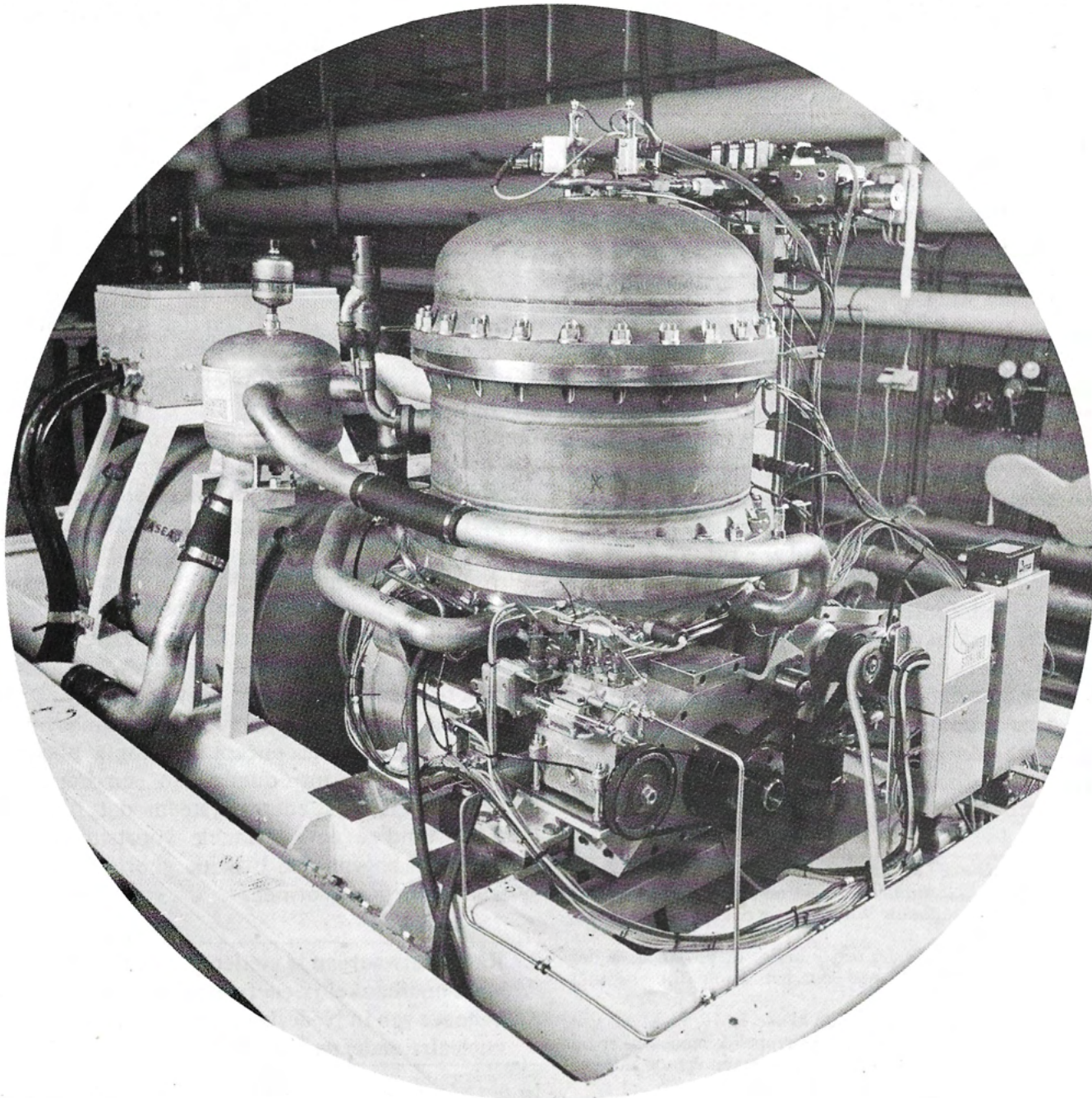
Daarnaast dient vooral bij lage vaarten de operationele „endurance” aanzienlijk te worden uitgebreid. Hierdoor kan de batterij bij lage vaart niet- of laag belast c.q. opgeladen worden waardoor zoveel mogelijk sprintcapaciteit (het vermogen om hoge vaart te lopen) behouden blijft. Hieronder volgen enkele specifieke randvoorwaarden in willekeurige volgorde:

- a Het systeem moet zoveel mogelijk inpasbaar zijn in de huidige conventionele voortstuwingsinstallatie zonder afbreuk te doen aan de positieve karakteristieke eigenschappen van die installatie.
- b Het systeem moet in staat zijn de onderzee-

boot gedurende een acceptabele periode (10 tot 20 dagen) met lage vaart onderwater voort te stuwten.

- c Het constructiegeluid van het systeem moet zo laag mogelijk zijn en mag de geluidskarakteristiek van de boot nauwelijks beïnvloeden.
- d De thermische uitstraling van het systeem naar buitenboord, bv. via koelwater, dient minimaal te zijn.
- e Het systeem moet geschikt zijn voor gebruik tot maximum duikdiepte.
- f Het systeem dient aan de schokkeisen, gesteld aan de modernste onderzeeboten, te voldoen.
- g Het systeem dient veilig, bedrijfszeker en vóór installatie aan boord van een onderzeeboot volledig beproefd te zijn.
- h De energiedichtheid van het systeem inclusief brandstoffen dient hoog te zijn.
- i Het systeem dient, inclusief ontwikkelings-

*Stirlingmotor in onderzeebootsectie.*



kosten, betaalbaar te zijn (afweging kosten versus grotere operationele inzetbaarheid).

- j Het systeem dient binnen 5 jaar operationeel te zijn (gereed voor inbouw).
- k Het systeem dient bij voorkeur in Nederland dan wel in samenwerking met een bevriende natie te worden ontwikkeld. Dat geldt zeker voor de produktie ervan (eventueel onder licentie).

### 3 Buitenlucht onafhankelijke energie-systemen (1)

In dit hoofdstuk wordt een opsomming gegeven van diverse buitenlucht onafhankelijke energie-systemen waarvan de ontwikkeling, in de laatste jaren vooral dank zij de off shore diepzee industrie, met forse schreden is vooruitgegaan. Globaal worden deze systemen aan de in hoofdstuk 2 gestelde randvoorwaarden getoetst.

#### 3.1 Ontwikkelingen op het gebied van batterijen

Onderscheid kan worden gemaakt tussen primaire (niet oplaadbare) en secundaire (oplaadbare) batterijen.

##### 3.1.1 Primaire batterijen

Een primaire batterij is een niet oplaadbare krachtbron welke vervangen zal moeten worden na gebruik. Voordelen:

- Zeer hoge capaciteit tot 6 maal die van de lood/zuur batterijen.
- Veel ruimte en gewichtbesparing doordat een batterijlaadsysteem aan boord niet meer nodig is.

Er zijn twee types batterijen welke serieuze aandacht hebben gehad voor toepassing in kleine onderzeeboten nl.

- De lithium-thionyl-chloride cel
- De lithium-peroxyde cel

De voornaamste nadelen zijn:

- De zeer hoge kosten aangezien de brandstof-elementen steeds vervangen moeten worden.
- Technische problemen door de hoge proces-temperatuur en complexe vermogensregeling.

Gesteld kan worden dat toepassing van dit soort batterijen in plaats van de huidige voortstuwingsinstallatie in verband met de daarmee te behalen geringe actieradius en hoge kosten, voor de huidige types onderzeeboten van de KM niet interessant is.

Wel is toepassing van dit soort batterijen als nood sprintvermogen naast de conventionele installatie in de toekomst mogelijk als de capaciteit van deze batterij nog verder wordt verhoogd. Aan lithiumperoxyde batterijen wordt gewerkt in de USA door Lockheed en in West-Duitsland

door Varta. De Zweedse marine test lithium-thionyl batterijen voor mogelijk gebruik als nood sprintvermogen.

##### 3.1.2 Secundaire batterijen

Een secundaire batterij is een oplaadbare krachtbron. Er zijn twee niet-conventionele types in ontwikkeling die er veelbelovend uitzien:

- Zilver-zink batterijen.
- Natrium-zwavel batterijen.

De zilver-zink batterij wordt in de USA ontwikkeld voor twee Deep Submergence Rescue Vehicles (DSRV). De capaciteit is driemaal die van conventionele lood/zuur batterijen. Nadelen zijn:

- Hoge kosten (viermaal die van de conventionele batterij).
- Beperkte levensduur (2,5 t.o.v. 6 jaar voor een conventionele batterij).

De natrium-zwavel batterij kan, zo hebben studies bij Ingenieurs Kantor Lubeck (IKL) in West-Duitsland aangetoond, een bij hoge ontladestroom 4,5 en bij lagere ontladestroom 2,5 maal hogere capaciteit hebben dan de conventionele batterij.

Een nadeel is vooral de hoge procestemperatuur (ongeveer 300° C) die leidt tot isolatie- en regelingsproblemen. Toepassing van dit soort batterijen aan boord van onderzeeboten wordt voorts nog belemmerd door hoge kosten en de technische problemen.

#### 3.2 Turbinevoortstuwning (1, 2)

Het meest bekende turbinesysteem voor conventionele onderzeeboten is dat van prof. H. Walter, ontwikkeld in Duitsland in de jaren 1933-1945. Waterstofperoxyde ( $H_2O_2$ ) wordt ontleed m.b.v. een katalysator (bv.  $Na MnO_4$  of  $Ca (MnO_4)_2$ ) volgens:  $2H_2O_2 \leftarrow 2H_2O + O_2$ , waarbij een temperatuur van ongeveer 650° C ontstaat. Men kan met dit mengsel direct een turbine aandrijven.

Voor militaire onderzeeboten is dit ondoelmatig omdat de zuurstof niet alleen onbenut de boot verlaat maar ook nog een verraderlijk bellen spoor achterlaat. Wanneer men het mengsel echter aan een verbrandingskamer toevoert waarin stikstofvrije brandstof (b.v.  $C_{10}H_{18}$  met de zuurstof wordt verbrand, ontstaat er  $H_2O - CO_2$  mengsel met een temperatuur van ongeveer 2500° C. De bestanddelen van dit mengsel zijn oplosbaar in water zodat het mengsel na energieafgifte veilig kan worden geloosd. De energieafgifte kan direct aan een turbine geschieden of indirect via een warmtewisselaar aan een secundaire kringloop, waarin een stoomturbine is opgenomen. (Fig. 3.1)

Aan het einde van de tweede wereldoorlog was er in Duitsland reeds praktische ervaring opge-

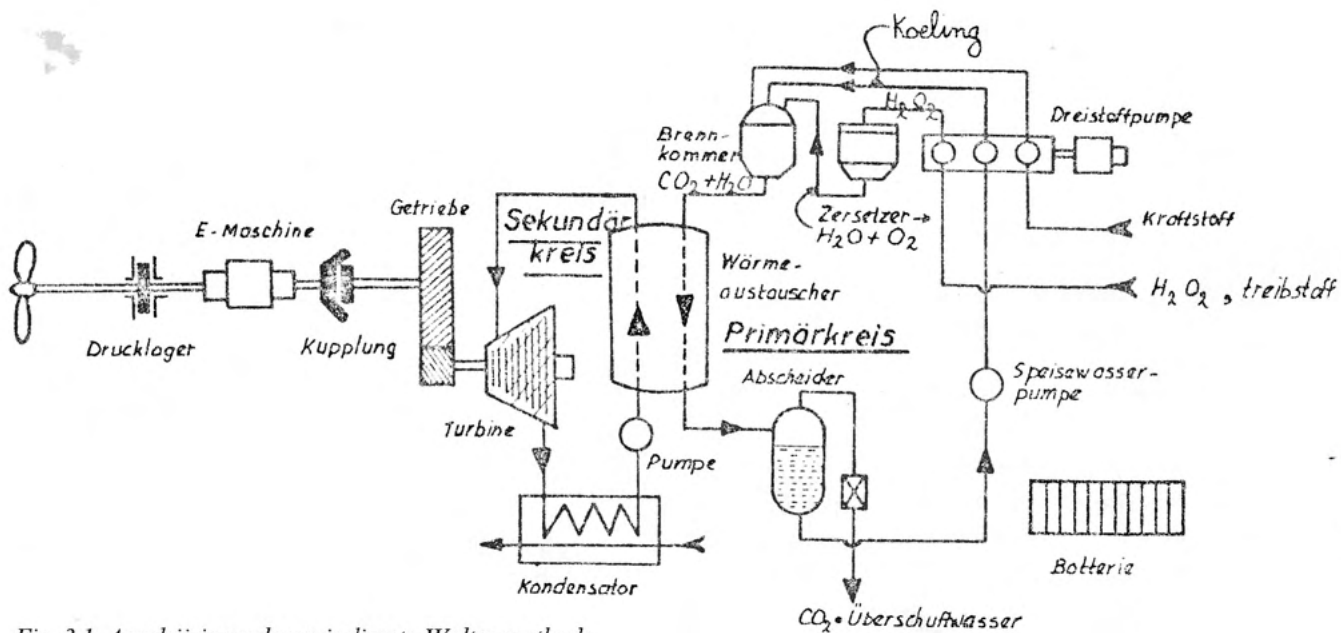


Fig. 3.1. Aandrijving volgens indirecte Walter methode.

daan met dit type aandrijving. Direct na de tweede wereldoorlog tot de zestiger jaren deden Amerika, Zweden, Engeland en vermoedelijk ook Rusland allerlei ontwikkelingswerk op dit gebied. Een hybridesysteem (conventioneel – Walterturbine) is ontwikkeld in Engeland (Explorer en Excaliber). Het systeem was erop gericht de sprintcapaciteit van de onderzeeboot te vergroten. Door nadelen zoals geluidsproductie, opslag en verwerking van waterstofperoxide (zeer corrosief, explosiegevaar) en de opkomst van de nucleaire voortstuwing zijn deze ontwikkelingen gestopt.

Gasturbinesystemen met uiteenlopende warmtebronnen zijn bestudeerd door o.a. Garret in de USA en MTU in West-Duitsland. Gasturbines als batterijlaadsystemen kunnen een redelijk rendement halen en nemen minder volume in dan dieselmotoren; een ander voordeel is het gunstige brandstofverbruik wanneer brandstof verbrand wordt met zuivere zuurstof. Om gasturbines, nu gebruikt in vliegtuigen en tanks, geschikt te maken voor batterijlaadsystemen aan boord van onderzeeboten moeten ze aangepast worden aan het zoute milieu hetgeen zeer veel kosten en ontwikkelingstijd met zich mee zal brengen. Ook het geluidsprobleem, de tegendruk, en het probleem van grote hoeveelheden in water onoplosbare afvoergassen zullen toepassing van gasturbines voorlopig in de weg staan.

Resumerend, met verwijzing naar de randvoorwaarden van hoofdstuk 2 kan gesteld worden dat de Walterturbine niet geschikt is voor toepassing aan boord van Nederlandse onderzeeboten vanwege de brandstof (zeer corrosief, explosiegevaar), de geluidsproductie en het feit dat het systeem minder geschikt is voor langdurige lage

vaart (het is juist bedoeld voor hoge vaart).

Gasturbines zijn voornamelijk voor onderzeeboten niet interessant.

### 3.3 Closed cycle diesel (1, 3, 4)

Vooraf in de offshore diepzee-industrie is de closed cycle diesel ten behoeve van directe voortstuwing van kleine onderzeeboten in ontwikkeling. Op dit moment lopen er op dit gebied projecten in Japan (Hitachi), Italië (Sub Sea Oil Services (SSOS)) en Engeland (Vickers Engineering, Newcastle University).

Er zijn twee stromingen op dit gebied. De ene (SSOS) gebruikt  $\text{CO}_2$  als arbeidsmedium, de ander (Newcastle University) gebruikt  $\text{N}_2$ .

Een diesel verpompt een bepaald volume gas, normaal gesproken is slechts 10 tot 15% van dat gas chemisch actief. Bij de closed cycle diesels is het chemisch niet-actieve gedeelte  $\text{CO}_2$  of  $\text{N}_2$ . Zuurstof zal natuurlijk in beide gevallen aan dit arbeidsmedium in het gesloten systeem moeten worden toegevoegd.

#### $\text{CO}_2$ -systemen

$\text{CO}_2$  komt voor als natuurlijk afvoergassenproduct. In de „closed cycle” mode wordt water uit de afvoergassen in de uitlaat door koeling gecondenseerd en afgetapt en de overmaat aan  $\text{CO}_2$  en overige ongewenste restproducten gecompriëerd en buitenboord geperst. De overige  $\text{CO}_2$  wordt voorverwarmd naar 100–200° C door toevoeging van hete afvoergassen. Daarbij wordt tevens de voor verbranding benodigde zuurstof toegevoegd.

Nadelen van dit systeem zijn:

- $\text{CO}_2$  heeft een lagere specifieke warmte dan  $\text{N}_2$  (het chemisch niet-actieve deel in de normale open cycle mode). Hierdoor is het mo-

torrendement in de closed cycle 15 tot 20% lager dan in de open cycle.

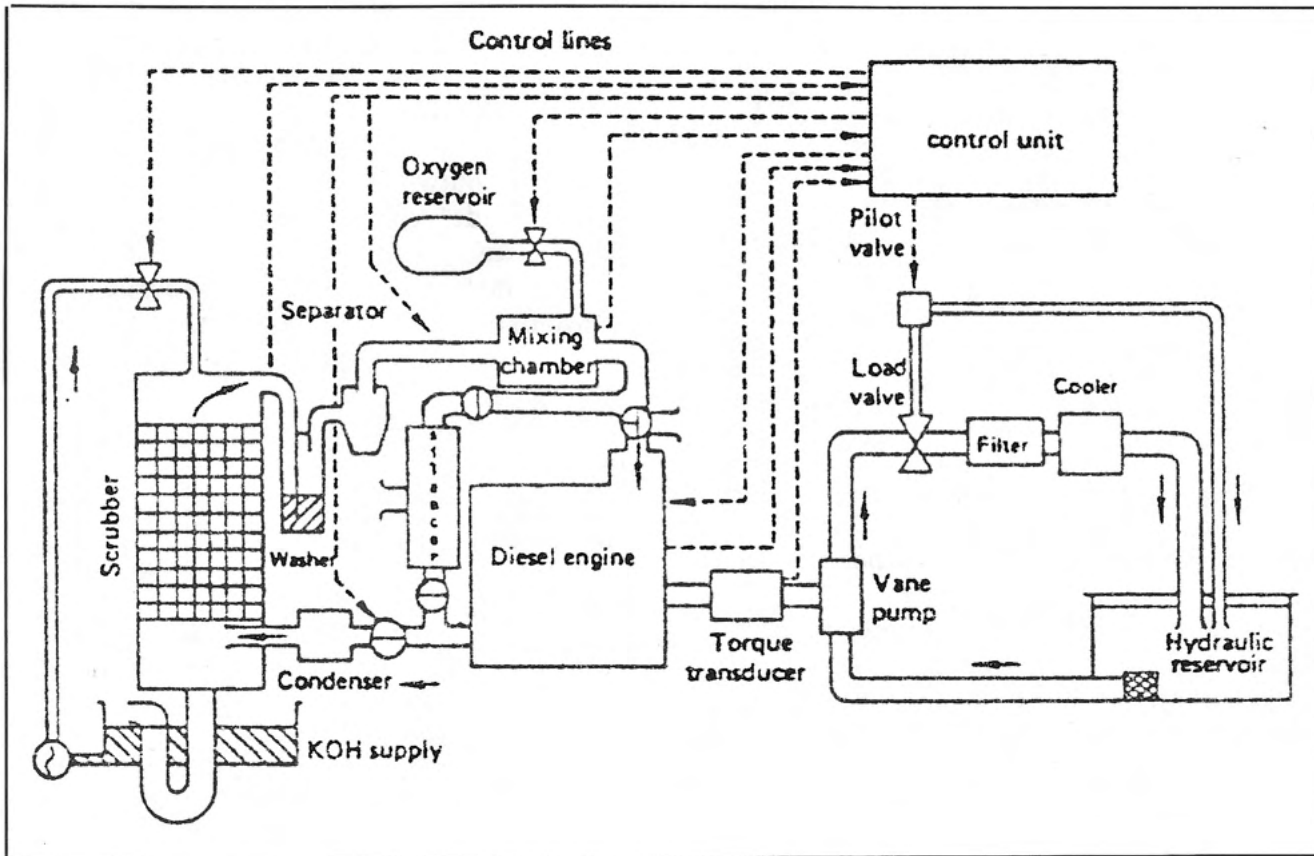
- Door de hoge voorverwarmingstemperatuur wordt de ladingdichtheid van de motor gereduceerd.

Dit maakt het noodzakelijk dat de nominale druk van het gerecirculeerde gas buiten de cilinders tussen 1.5 en 3 bar moet liggen.

### N<sub>2</sub>-systemen

Het door Newcastle University ontwikkelde nitro-diesel concept elimineert of verkleint enige van de problemen van het CO<sub>2</sub> concept. De atmosferische stikstof die in de motor achterblijft nadat de motor van de „open cycle” naar de „closed cycle” is overgeschakeld vormt het arbeidsmedium. Dit medium wordt continu gerecirculeerd door een koeler/condensor, een chemische reinigingseenheid voor CO<sub>2</sub> absorptie en een zuurstoftoevoerregelaar. (Fig. 3.2)

Fig. 3.2. Schema van de Nitro-diesel.



Bij een goed ontwerp van de hulp- en regelsystemen kan de motor theoretisch zijn normale „open cycle” rendement benaderen.

Newcastle University claimt de volgende voordelen van dit systeem:

- De chemische reinigingseenheid maakt het buitenboord pompen van CO<sub>2</sub> overbodig.
- De reductie van het nominale vermogen is gering.
- Normale dieseltechniek wordt toegepast.

- Toevoeging van hete gassen naar de inlaat en compressordrukregeling zijn niet nodig. De temperatuurregeling is mede daardoor relatief eenvoudig.

Nadelen zijn het gewicht, volume en de kosten van de chemische reinigingseenheid en de chemicaliën die hiervoor benodigd zijn en dus meegenomen moeten worden.

De closed cycle diesel wordt door SSOS toegepast in een mini-onderzeeboot, de IMI-35. Interessant is het SSOS IMI-250 project, waarbij een 256 tons onderzeeboot wordt gebouwd met een bijzondere drukhuidconstructie. Bij deze zogenaamde „toroidale” constructie bestaat de drukhuid uit een sandwich met in de dubbele wand een spiraalvormige pijp die voor de sterkte zorgt. In deze pijp wordt vloeibare zuurstof opgeslagen benodigd voor de closed cycle diesel. De drukhuid heeft een Albacorevorm (USA-onderzeeboot). Maximum onderwatersnelheid is 18 kn die wordt verkregen door de 430 pk closed/open cycle diesel direct te koppelen aan de schroefas.

De boot is verder uitgerust met een kleine conventionele voortstuwingsinstallatie bestaande uit een 18 pk hulpvoortstuwings elektromotor gevoed door een hulpdieselgenerator en/of een 2900 Ah batterij.

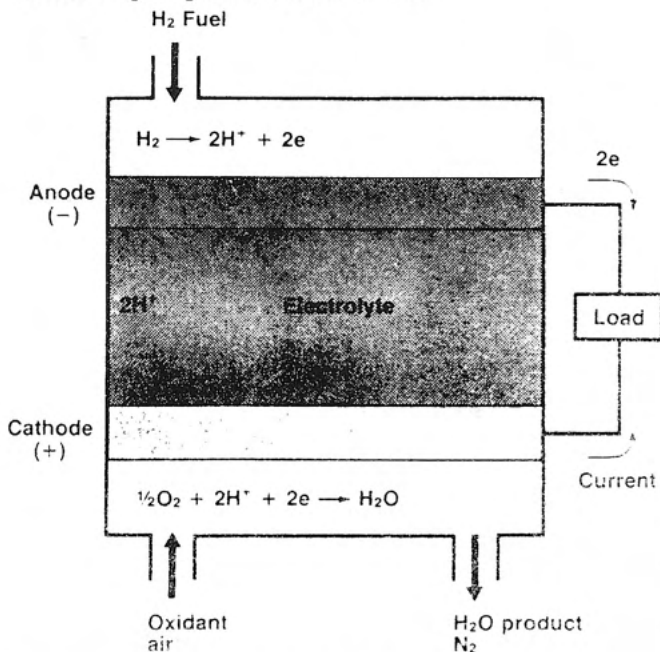
Wanneer de hierboven genoemde systemen getoetst worden aan de randvoorwaarden uit hoofdstuk 2 dan kan men stellen dat closed cycle diesels, hoewel zeer interessant, op militaire onderzeeboten vooralsnog niet verwachtbaar zijn

vooral door de geluidsproductie inherent aan het dieselbedrijf.

### 3.4 Brandstofcel (1, 5)

De brandstofcel zet chemische reactie-energie direct om in elektrische energie. De reactanten, in gasvorm, worden naar afzonderlijke elektrodes gevoerd waar elektrochemische reacties plaatsvinden. Fysieke scheiding van de elektrodeprocessen is noodzakelijk aangezien gelijktijdig optreden van deze processen een potentiaal verschil veroorzaakt waardoor een stroom gaat lopen in een extern circuit. (Fig. 3.3)

Fig. 3.3. Brandstofcel. Waterstof oxideert aan de anode. Gelijktijdige reductie van zuurstof aan de kathode heeft een stroom tot gevolg in het externe circuit.



Wanneer elektrochemische reacties plaatsvinden op de elektrode zelf dan gaat er een stroom door het elektrolyet lopen i.p.v. door het externe circuit.

Dit is de basis van corrosieve processen die de elektroden aantasten, waardoor de levensduur bekort wordt.

Het enige restproduct van een H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> brandstofcel is water. In theorie kunnen brandstofcellen een rendement van bijna 100% halen. Door het hoge thermodynamische rendement is de geproduceerde energie per gewichtseenheid relatief hoog.

Andere voordelen:

- Er zijn geen bewegende delen.
- De brandstofcellen werken geruisloos zonder wrijvingsverliezen.

Nadelen zijn tot nu toe:

- Lage betrouwbaarheid.
- Praktisch haalbaar rendement veel lager dan het theoretische.
- Hoge kosten.

Door ohmse verliezen en trage reactiesnelheden komt het rendement van prototypes brandstofcellen ruim beneden de 50% uit. De levensduur is gelimiteerd tot enkele duizenden uren.

Een belangrijke parameter bij het brandstofcelontwerp is de procestemperatuur. Bovengenoemde nadelen gelden voor cellen met een relatief lage werkt temperatuur van beneden de 200° C. Bij hogere temperaturen met gesmolten zout elektrolyet worden de elektrode reacties versneld en zijn er dus minder reactieversnellers nodig. Ook neemt bij stijgende temperatuur de geleidbaarheid van het elektrolyet toe hetgeen de ohmse verliezen reduceert.

Nadelen zijn echter verdamping van het elektrolyet en korte levensduur van tot nu toe toegepaste materialen.

In West-Duitsland zijn twee typen brandstofcellen in ontwikkeling:

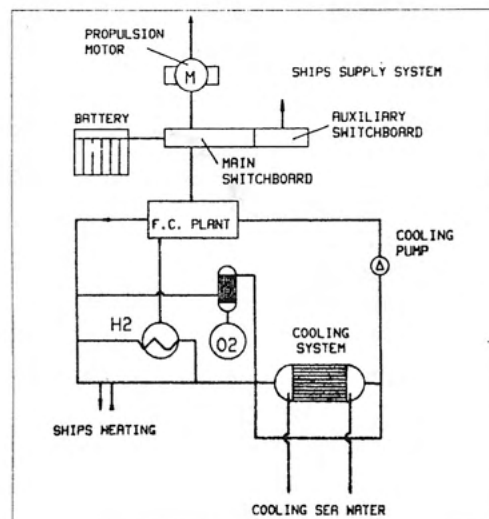
- General Electric Technik (GE-Technik) ontwikkelt de brandstofcel met solide elektrolyte/SPE (Solid Polymere Electrolyte). Deze ontwikkeling is gericht op een voortstuwingsysteem volledig onafhankelijk van de buitenlucht. Door vooral financiële restricties zal dit systeem niet voor het jaar 2000 operationeel zijn.
- Siemens ontwikkelt samen met een groep bedrijven de alkalische brandstofcel. Deze brandstofcel zal gebruikt worden in onderzeeboten met een conventionele voortstuwingsinstallatie, het hybride concept.

Sinds augustus 1984 wordt een alkalisch brandstofcellensysteem op een waltest opstelling bij HDW in Kiel getest.

Het probleem van de opslag van de voor deze cel benodigde chemicaliën O<sub>2</sub> en H<sub>2</sub> is door IKL als volgt opgelost. (Fig. 3.4)

Waterstof wordt gebonden in metaalhydriden

Fig. 3.4. Door IKL ontwikkeld systeem voor integratie brandstofcel in onderzeeboot-voortstuwingsinstallatie.



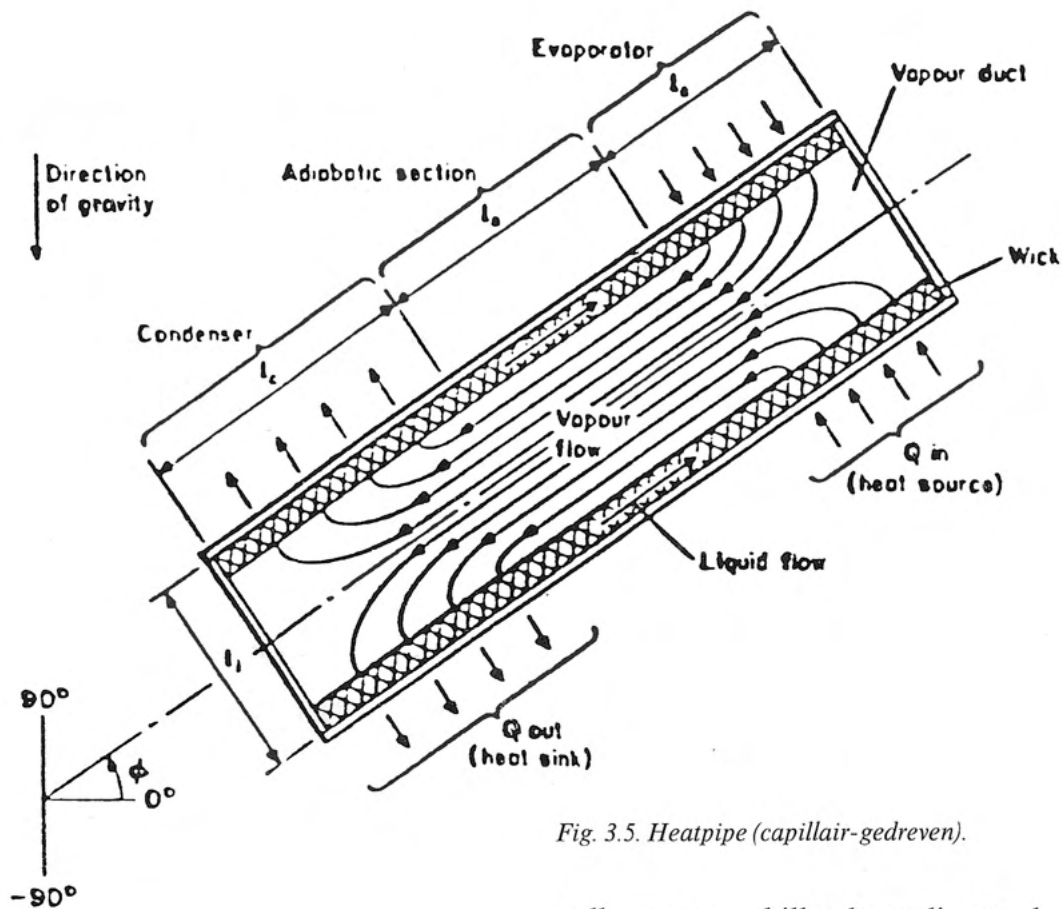


Fig. 3.5. Heatpipe (capillair-gedreven).

(stoffen die waterstof als het ware opzuigen en bij verwarming weer loslaten) en buiten de drukhuid opgeslagen.

Zuurstof wordt in vloeibare vorm bij  $-180^{\circ}\text{C}$  opgeslagen in tanks die binnen de drukhuid worden geplaatst.

In Nederland ontwikkelt Holec een alkalische brandstofcel met een procestemperatuur van  $60^{\circ}\text{C}$ . Deze cel die  $\text{H}_2$  en  $\text{O}_2$  gebruikt zou aan boord van onderzeeboten kunnen worden toegepast. Onderzoek in deze richting is gaande. Men gaat uit van een bestaande onderzeeboot waarbij de brandstofcellen op de plaats van een gedeelte van de huidige batterij komen. De zuurstof moet in vloeibare vorm ( $-180^{\circ}\text{C}$ ) binnenboord in tanks worden opgeslagen en de waterstof wordt buiten de drukhuid vermoedelijk in vloeibare vorm gebonden in methylcyclohexaan (MCH), opgeslagen.

### 3.5 De Stirlingmotor (6, 7)

Een Stirlingmotor is een warmtemotor met continue uitwendige verbranding, die is gebaseerd op hetzelfde thermodynamische principe als de verbrandingsmotor met inwendige verbranding. Wanneer een gas bij lage temperatuur wordt samengeperst en daarna verwarmd, wordt vervolgens bij expansie meer arbeid geleverd dan voor de compressie was benodigd. In de Stirlingmotor is de methode waarop het gas verwarmd wordt

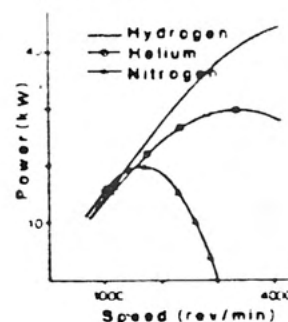
volkomen verschillend van die van de inwendige verbrandingsmotor: bij de Stirlingmotor is de warmte afkomstig van een uitwendige warmtebron en de warmte bereikt het afgesloten gas via een warmtewisselaar. Doordat verbranding en energie-omzetting gescheiden zijn, kan in principe elke warmtebron gebruikt worden.

Door het gebruik van speciale hulpmiddelen waarmee de warmte getransporteerd wordt, zoals de heatpipe (fig. 3.5) waarbij natrium als transportmiddel wordt gebruikt, is het zelfs mogelijk om de verbrandingskamer los te koppelen van de Stirlingmotor.

Als arbeidsgas kan stikstof, helium of waterstof worden gebruikt. Fig. 3.6 geeft een indruk van de invloed van het soort arbeidsgas op het ontwikkelde vermogen.

Waterstof geeft de beste resultaten, maar doordat het in staal diffundeert en daardoor brosheid veroorzaakt, wordt het niet vaak toegepast.

Fig. 3.6. Invloed van het soort arbeidsgas op het ontwikkelde vermogen van de Stirling-motor.

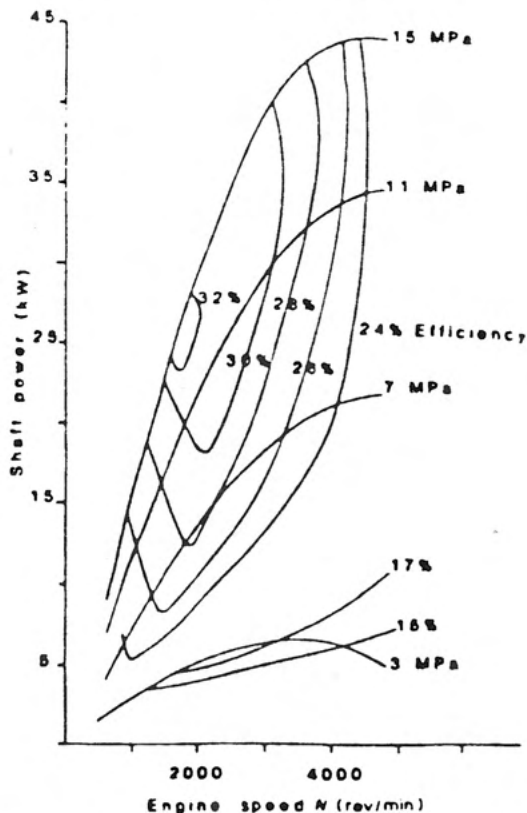


*Twee belangrijke voordelen van de Stirling-motor:*

1 Het geleverde vermogen is vrijwel evenredig met de gemiddelde inwendige druk (van het arbeidsgas), tevens neemt het rendement toe bij hogere drukken. Fig. 3.7 geeft hiervan een beeld.

Door die hoge drukken kunnen zich problemen voordoen bij de afdichting tussen drijfstang en carter.

Fig. 3.7. United stirling P-40 motorkarakteristiek.



2 Door het ontbreken van een intermitterend verbrandingsproces is de geluidsproductie aanzienlijk lager dan die van een motor met inwendige verbranding. (Fig. 3.8) Dit aspect maakt toepassing van de Stirlingmotor in onderzeeboten interessant omdat een van de belangrijkste eigenschappen, de geruisarme karakteristiek bij onderwatervaart, niet wordt aangetast.

Momenteel zijn er twee typen Stirling-motoren, beide voortgekomen uit Philips licenties:

- a Het oudste en tot nu toe meest beproefde type is door de Zweedse werf Kockums en United Stirling AB gebruikt voor toepassing in de offshore. Het is de United Stirling 4-95 motor, met 4 cilinders en een slagvolume van 95 cm<sup>3</sup>. De cilinders zijn in V-vorm geplaatst. De motor heeft een rendement van 38%. De verbrandingskamer is op de motor geplaatst.
- b Het andere type motor wordt door Stirling Thermal Motors Inc. (STM) in de USA ont-

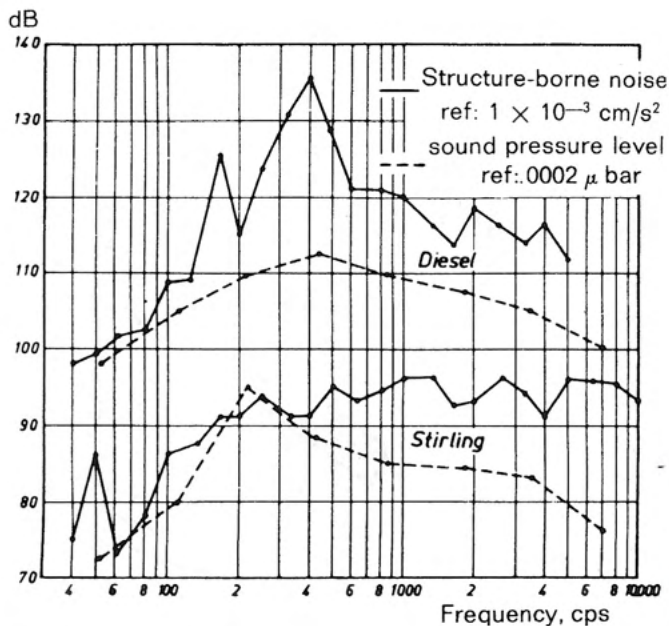


Fig. 3.8. Vergelijking van constructie-niveau diesel/stirling.

wikkeld. Het belangrijkste verschil tussen deze en de United Stirlingmotor is, dat voor de omzetting van de rechtlijnige zuigerbeweging naar een roterende asbeweging geen kruk-drijfstang mechanisme maar een zogenaamde swash-plate wordt gebruikt. De motor is hierdoor technisch eenvoudiger en in vermogen beter regelbaar.

*3.5.1 De Stirlingmotor toegepast op onderzeeboten*

Kockums en United Stirling AB hebben een geheel van de buitenlucht onafhankelijk energiesysteem rond de Stirlingmotor ontwikkeld ten behoeve van de offshore.

Een Stirlingmotor (type 4-95) gekoppeld aan een generator met een vermogen van 20 kW werd ontwikkeld in een systeem met de volgende bijzondere voorzieningen:

- overdrukverbrandingskamer (30 bar)
- afvoergassenrecirculatie
- zuurstofregelsysteem
- afvoergassenafsluiter

Het systeem moest voldoen aan vooraf gestelde energiedichtheidseisen. Dit Stirlingsysteem werd speciaal ontwikkeld voor Comex Industries (Frankrijk) t.b.v. duiker-operaties tot op een diepte van 300 m.

Het systeem in ontwikkeling voor de Zweedse onderzeedienst komt voort uit het hierboven genoemde systeem en bestaat uit een Stirlingmotor (type 4-275) (Fig. 3.9) gekoppeld aan een generator (75 kW). In de externe, op de motor geplaatste, verbrandingskamer wordt dieselolie met zuivere zuurstof verbrand. De afvoergassen worden gedeeltelijk gerecirculeerd naar de verbrandingskamer om de verbrandingstemperatuur naar een



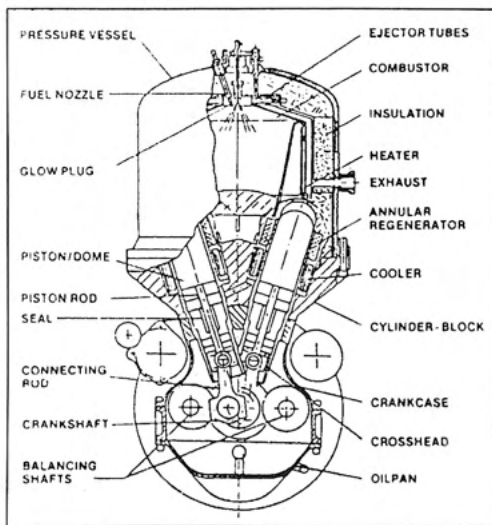


Fig. 3.9. De United Stirling 4-275 motor van onderzeeboten.

acceptabele waarde terug te brengen (ca. 2000 → 750° C).

De verbranding vindt plaats onder een druk die hoger is dan de buitenboordsdruk op maximum duikdiepte (35 bar). Hierdoor is het mogelijk de overtollige afvoergassen naar buitenboord af te voeren zonder dat hiervoor bijvoorbeeld een afvoergassencompressor nodig is (geluid, energie). Zuurstof wordt in vloeibare toestand opgeslagen in een speciaal hiervoor ontworpen tank binnenboord.

Een voortstuwingsunit bestaat uit:

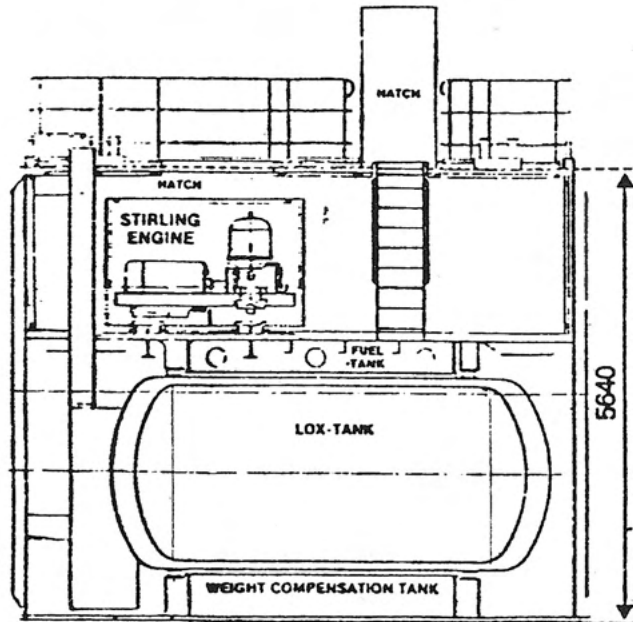
- Stirlingmotor/generator met hogedruk verbrandingskamer
- Afvoergassenregelaar en koeler.
- Opslagtank voor vloeibare zuurstof met regelsysteem (LOX-tank fabr. AGA-Cryo).

Een prototype-unit wordt dit jaar in een drijvende onderzeebootsectie uitvoerig getest.(Fig. 3.10)

Fig. 3.11 Conventionele onderzeeboot met stirlingsysteem.

In 1987 zal vermoedelijk een Näckens-klasse onderzeeboot, die met een sectie van 6 meter lengte wordt vergroot, worden uitgerust met twee Stirlingunits naast de normale conventionele installatie. Het vermogen dat door deze twee units wordt opgewekt (150 kW) en de meegenomen hoeveelheid vloeibare zuurstof stelt de onderzeeboot in staat gedurende een periode tussen 10 en

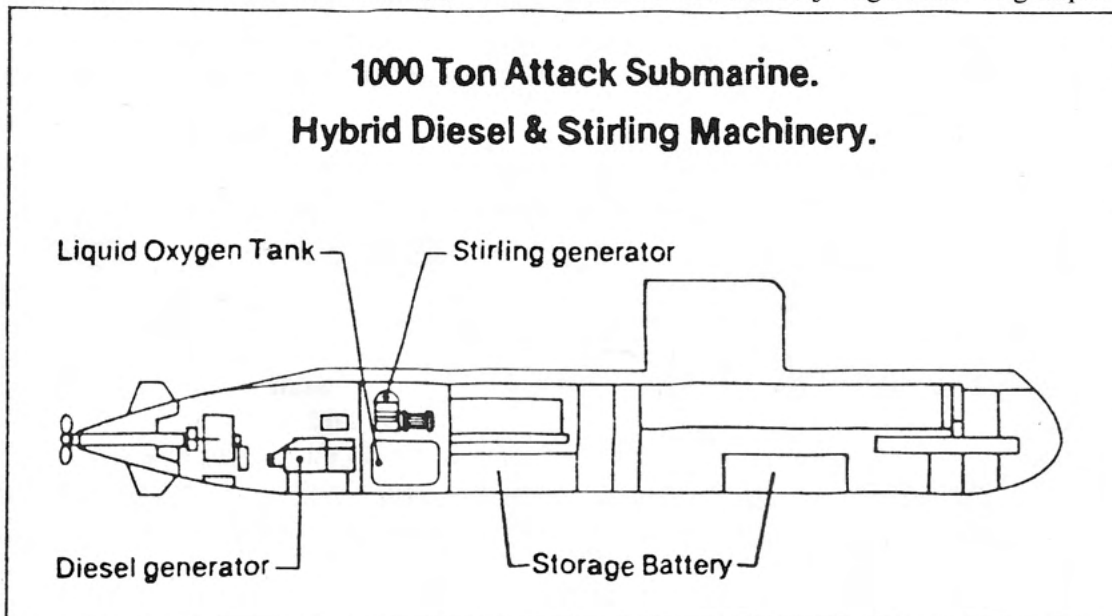
Fig. 3.10. Prototype Stirling testeenheid in onderzeebootsectie.



20 dagen zonder snuiveren met lage vaart te opereren. (Fig. 3.11)

Fig. 3.12 geeft een vergelijk tussen het verloop van de batterijcapaciteit bij een normale conventionele onderzeeboot en een onderzeeboot met Stirlinginstallatie.

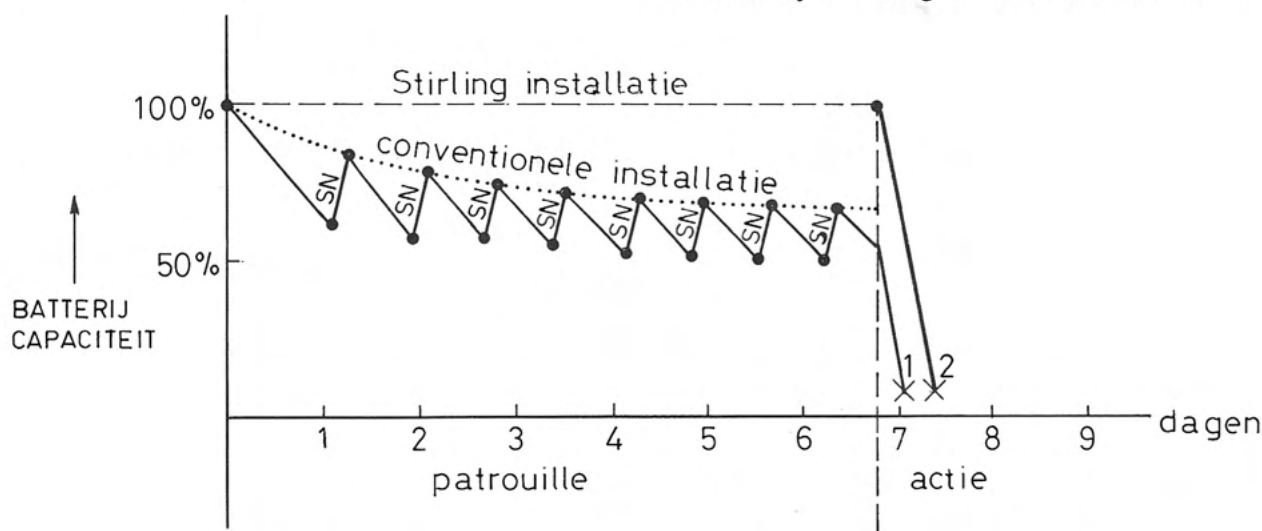
Duidelijk is dat zolang de Stirlinginstallatie werkt de batterijcapaciteit zeer hoog gehouden kan worden. Nadat door een offensieve of defensieve actie waarbij hoge vaart is gelopen de bat-



terijcapaciteit bijna nul is zal de conventionele onderzeeboot gedwongen zijn te gaan snuiveren, terwijl de onderzeeboot met Stirlinginstallatie die nog brandstof heeft, het snuiveren uit kan stellen naar een daarvoor geschikt moment.

Omdat de Stirlinginstallatie de onderzeeboot in staat stelt de batterijcapaciteit gedurende dagen achtereen op ca. 100% te houden zonder te snuiveren en omdat nadat de batterijcapaciteit op een zeer laag peil is gekomen door bovengenoemde omstandigheden, toch nog de mogelijkheid bestaat de boot met lage vaart voort te stuwten zonder snuiveren kan met recht gesproken worden van een spectaculaire ontwikkeling in de reductie van het snuiverpercentage!

Fig. 3.12. Verloop batterijcapaciteit bij onderwater operaties.



SN= Snuiverperiode.

1. Korte actie: batterij moet geladen worden, dus snuiveren.
2. Langere actie mogelijk en snuiveren kan uitgesteld worden door op stirling motor door te varen.

### 3.5.2 Ontwikkelingen in Nederland m.b.t. de Stirlingmotor

In Nederland is door de afdeling Werktuigbouw van DMKM in samenwerking met het Koninklijk Instituut voor de Marine een verkennend onderzoek gedaan naar de toepassing van Stirlingmotoren op onderzeeboten. Hierbij is in eerste instantie naar twee warmtebronnen gekeken nl.

- verbranding van dieselolie (F<sub>76</sub>) met zuurstof.
- metaalverbranding (lithium met zwavelhexafluoride).

Over dit onderzoek verscheen eind vorig jaar een artikel in het mededelingenblad van het KIM onder de titel: „De Stirlingmotor als buitenlucht onafhankelijke vermogensoverdrager ten behoeve van elektrische onderwatervaart van

conventionele onderzeeboten” (door Bander, Matthee en Van Duuren).

De conclusie van dit onderzoek was dat alleen verbranding van zuurstof met F<sub>76</sub> onder hoge druk aan boord van onderzeeboten praktisch toepasbaar is. Het pas opgerichte bedrijf BV Stirling Motors Europe zal de door STM ontwikkelde swash-plate motor in Nederland in serie gaan produceren.

Voor toepassing aan boord van onderzeeboten is het zeer wel mogelijk een motor van dit type van geschikt vermogen te ontwikkelen.

## 4 Een buitenlucht onafhankelijk energiesysteem voor Nederlandse onderzeeboten

Wanneer men de in het vorige hoofdstuk genoemde systemen globaal toetst aan de rand-

voorwaarden geformuleerd in hoofdstuk 2 dan kan een aantal mogelijkheden geschrapt worden nl.

- a Batterijen (3.1) primair en secundair aangezien deze nog onvoldoende ontwikkeld zijn en zeer hoge kosten met zich meebrengen.
- b Turbinevoortstuwning (3.2) en „closed cycle” diesels (3.3) om vooral geluidstechnische redenen.

Brandstofcel- (3.4) en Stirlingmotor (3.5) zijn beide zeer interessante opties. Dit blijkt ook uit het feit dat de Duitse marine serieus bezig is met brandstofcellen en de Zweedse marine met Stirlingmotoren. De overige opties worden vooralsnog nergens serieus voor militaire toepassing overwogen.

Zowel de Brandstofcel- als de Stirlingoptie dient

nauwkeurig onderzocht te worden en aan de in hoofdstuk 2 genoemde randvoorwaarden te worden getoetst.

Een ruwe vergelijking tussen een Brandstofcellensysteem en een Stirlingsysteem is mogelijk. Indien men uitgaat van een bepaald op te wekken elektrisch vermogen gedurende een bepaald aantal dagen dan blijkt het Brandstofcellensysteem ruim 2,5 maal meer volume brandstof nodig te hebben ( $O_2 + MCH$ ) dan het Stirlingsysteem ( $O_2 + F_{76}$ ). Het volume dat het Stirlingsysteem zonder brandstoffen en het Brandstofcellensysteem zonder brandstoffen inneemt verschilt weinig van elkaar. Hieruit valt te concluderen dat het ruimtebeslag van de totale Stirlinginstallatie veel gunstiger is dan dat van de Brandstofcelleninstallatie (met MCH als waterstofdrager). De Stirlinginstallatie lijkt daarom de voor de KM meest interessante optie.

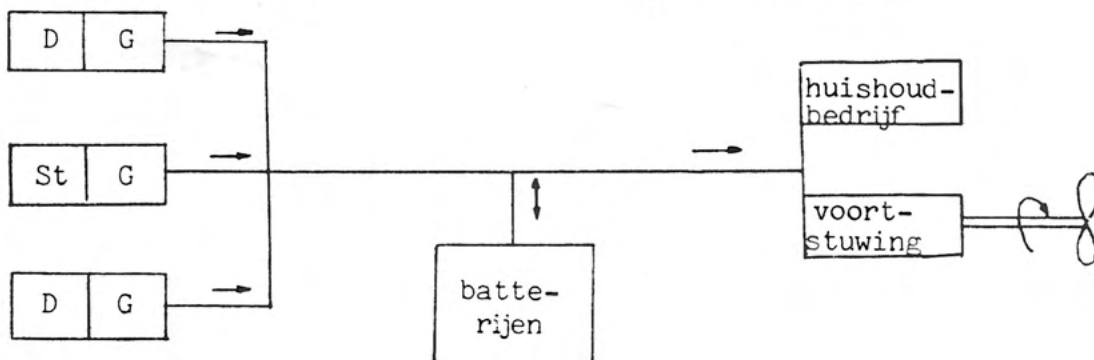
N.B. Het volumebeslag van de Brandstofcelleninstallatie met metaalhydriden als waterstofdragers is bij de schrijvers niet bekend maar zal vermoedelijk toch groter zijn dan dat van de Stirlinginstallatie.

#### 4.1 Uitwerking voortstuwinginstallatie gecombineerd met Stirling-installatie

Uitgaande van een moderne Nederlandse onderzeeboot zou men eraan kunnen denken een van de drie dieselgeneratorsets te vervangen door een Stirlinggenerator met hulpapparatuur zodat er dan een gecombineerd systeem ontstaat als getoond in Fig. 4.1.

Doordat alle componenten direct aan hetzelfde elektrische systeem gekoppeld zijn, is zowel aan de oppervlakte als bij onderwatervaart een zeer flexibele bedrijfsvoering mogelijk. De buitenlucht onafhankelijke component (Stirlinggenerator) kan indien gewenst bijgezet worden wanneer de onderzeeboot in zijn operatiegebied voor lange tijd met lage vaart wil opereren zonder snuiveren. De batterijen worden, indien huishoudbedrijf + voortstuwing hetzelfde vermogen vragen als de Stirlinggenerator levert, niet geladen of ontladen (bufferbedrijf).

Fig. 4.1 Hybride voortstuwingssysteem.



De batterijen zijn dus qua capaciteit op hoog peil te houden mede omdat de batterij geladen kan worden indien het bedrijf minder vraagt dan de Stirlinggenerator levert. Zo is het mogelijk de batterijcapaciteit te reserveren voor offensieve of defensieve acties waarbij hogere snelheden noodzakelijk zijn. Wanneer een bepaald tactisch reserveniveau van de batterijen is bereikt kunnen door snuiveren met de buitenlucht afhankelijke componenten (de dieselmotoren) de batterijen worden opgeladen. Het zal duidelijk zijn dat op deze wijze een aanzienlijke *verlaging* van het snuiverpercentage mogelijk is.

Een Stirlinggenerator op de plaats van een van de drie dieselgeneratoren geeft natuurlijk een vermindering van het beschikbare dieselveermogen hetgeen nadelig is voor het snuiverpercentage. Tevens wordt de redundantie voor wat betreft de dieselmotoren minder. De vermindering van het dieselveermogen zou opgevangen kunnen worden door het opvoeren van het vermogen van de twee resterende dieselmotoren. Dit lijkt zeer wel mogelijk door hybride-oplading (mechanisch gedreven compressor gecombineerd met een turbo gedreven compressor).

Pielstick (Frankrijk) experimenteert met dit concept ten behoeve van de Franse onderzeedienst. (De vermogenswinst per diesel bedraagt hierbij ca. 30%.) De reductie van het totale dieselveermogen zou dan ca. 14% in plaats van 33% zijn.

Een zeer belangrijk probleem blijft natuurlijk de opslag van vloeibare zuurstof. De Zweedse marine slaat de zuurstof binnenboord op in zeer goed geïsoleerde opslag tanks, de Duitse marine doet hetzelfde ten behoeve van het Brandstofcellensysteem.

Gezien de hoge drukken en drukvariaties die buiten de drukhuid optreden zal uit constructieve overwegingen plaatsing van het opslagsysteem binnen de drukhuid de voorkeur verdienen.

Het zuurstofopslagsysteem bestaat uit het reservoir, de isolatie, de ommanteling van de isolatie en het toebehoren:

- verdamper
- afsluiters
- beveiligingsinrichtingen

- meet- en regelapparatuur
- leidingwerk

Door het reservoir dubbelwandig uit te voeren en tussen beide omhullingen vacuüm te trekken ontstaat een zeer goede isolatie. Voor commerciële toepassingen wordt met een druk in het reservoir van 3 bar gewerkt. Hierbij heeft de vloeibare zuurstof een temperatuur van  $-170^{\circ}\text{C}$ . Deze temperatuur wordt gehandhaafd door verdampingswarmte aan de vloeibare zuurstof te onttrekken; de ontstane damp moet wel „afgeblazen” worden („boil off”). De afgeblazen zuurstof kan benut worden voor luchtzuivering aan boord.

Uit contacten met de Nederlandse industrie is gebleken dat opslag aan boord technisch zeker te verwezenlijken is.

Het cruciale punt dat de operationele waarde van het complete Stirlingsysteem zal bepalen is de hoeveelheid ruimte die binnen de drukhuid van de onderzeeboot beschikbaar is voor zuurstofopslag. Op de huidige onderzeeboten is die ruimte nihil. Ruimte zal gecreëerd moeten worden bij een bestaande boot door drukhuidverlenging en/of diametervergroting of men zal deze ruimte moeten vinden in een nieuw te ontwerpen boot.

## 5 Conclusies en aanbevelingen

- Geconcludeerd kan worden dat een buitenlucht onafhankelijk (niet nucleair) energiesysteem voor toepassing aan boord van onderzeeboten niet langer een utopie is.

- Met name het Stirlingsysteem en in mindere mate het Brandstofcellensysteem lijken zeer interessant om toegepast te worden in onderzeeboten voor de Koninklijke marine.
- De ontwikkeling van beide systemen heeft in de ons omringende landen hoge prioriteit gekregen en het lijkt dat de eerste positieve resultaten op afzienbare termijn in de praktijk ter beschikking komen.
- Ontwikkeling van een Stirling- of een Brandstofcellensysteem zal duur zijn en veel inspanning vergen, zodat ook gezamenlijk voortgezette ontwikkeling met een bevriende natie en gehele of gedeeltelijke licentiebouw in Nederland serieus overwogen dienen te worden.
- Als Nederland zich in de toekomst zowel operationeel als op de exportmarkt wil blijven laten gelden dan zullen nieuw te bouwen onderzeeboten uitgerust moeten worden met een buitenlucht onafhankelijk energiesysteem.

### Lijst van referenties

- 1 John Llewellyn - „Developments in conventional submarine propulsion”. Military Technology (8/84).
- 2 E. Röpler - „U-bootantriebe heute und morgen”. Marine Rundschau (4/70).
- 3 Dr. A. Fowler - „A closed cycle diesel engine for underwater work”. MER October 1983.
- 4 „Beyond the contemporary conventional submarine-alternative propulsion systems”. Maritime Defence (7/84).
- 5 Geoffrey Prentice - „Fuel cells: Principles and prospects”. Chemical Technology November 1984.
- 6 Prof. H. Nilsson - Application of the Stirling Engine to the propulsion of Autonomous Rovers, Submersibles and Submarines. Conferentie Subsea Defence juni 1985.
- 7 R. J. Meijer - The new Stirling Engine. Ann Arbor, Michigan, USA.