

De marine varende houden

Zoeken naar alternatieve militaire voortstuwingsconcepten

De afnemende voorraden ruwe olie en de zorgen om klimaat en milieu dwingen tot ingrijpen in de omgang met energie. Voor de krijgsmacht is het bezit van voldoende brandstof voor strategische en tactische verplaatsingen essentieel. Kunnen landmacht, luchtmacht en marine de ontwikkelingen afwachten en dan inhaken bij wat de markt aanbiedt, of zijn eigen initiatieven nodig? Dit artikel onderzoekt hoe marines te maken krijgen met dit probleem, waar er mogelijkheden zijn om aan te sluiten bij nieuwe commercieel beschikbare technologie en waar eigen initiatief nodig is om in samenwerking met kenniscentra en industrie zelf nieuwe voortstuwingsconcepten te ontwikkelen.

*M.G.M. Hendriks Vettehen – Kapitein-ter-zee van de technische dienst**

Al honderd jaar vinden brandstoffen uit ruwe olie hun toepassing voor het vervoer over land, over water of door de lucht. De voorraden ruwe olie zijn echter eindig en het *International Energy Agency* (IEA) verwacht rond 2050 een serieus tekort. De toename van het gebruik is momenteel echter zo groot dat al in 2015 problemen dreigen. Niet omdat de olie dan op is, maar omdat de industrie niet in staat zal zijn die toename bij te benen.¹ Onlosmakelijk verbonden met de zorg over de afnemende voorraden ruwe olie zijn de zorgen over klimaat en milieu. Wereldwijd zijn er inspanningen om de emissie van het broeikasgas CO₂ te verlagen. De Internationale Maritieme Organisatie (IMO) legt de maritieme sector daarnaast normen op voor de uitstoot van NO_x (stikstofoxiden) en SO_x (zwaveloxiden); aan de emissie van die schadelijke stoffen draagt de sector bovenmatig bij.²

Een tekort aan ruwe olie kan de wereldwijde inzet van marineschepen in gevaar brengen. Dat is een ernstig probleem omdat toekomstige conflicten wel eens over energie zouden kunnen gaan en de meeste reserves nu eenmaal liggen in landen die geen natuurlijke bondgenoten van het Westen zijn. Ook op de commerciële scheepvaart komt dit probleem af, maar veel aandacht heeft het daar nog niet. Dat is niet zo vreemd, want de commerciële planningshorizon is slechts vijftien tot twintig jaar. De sector beschikt bovendien over de efficiënte tweetakt-dieselmotor en gebruikt relatief goedkope residuale brandstoffen. Marineschepen blijven echter dertig tot veertig jaar operationeel, zijn te klein voor de grote en zware tweetakt-dieselmotor en lopen op een dure destillaat-brandstof naar NAVO-standaard.³

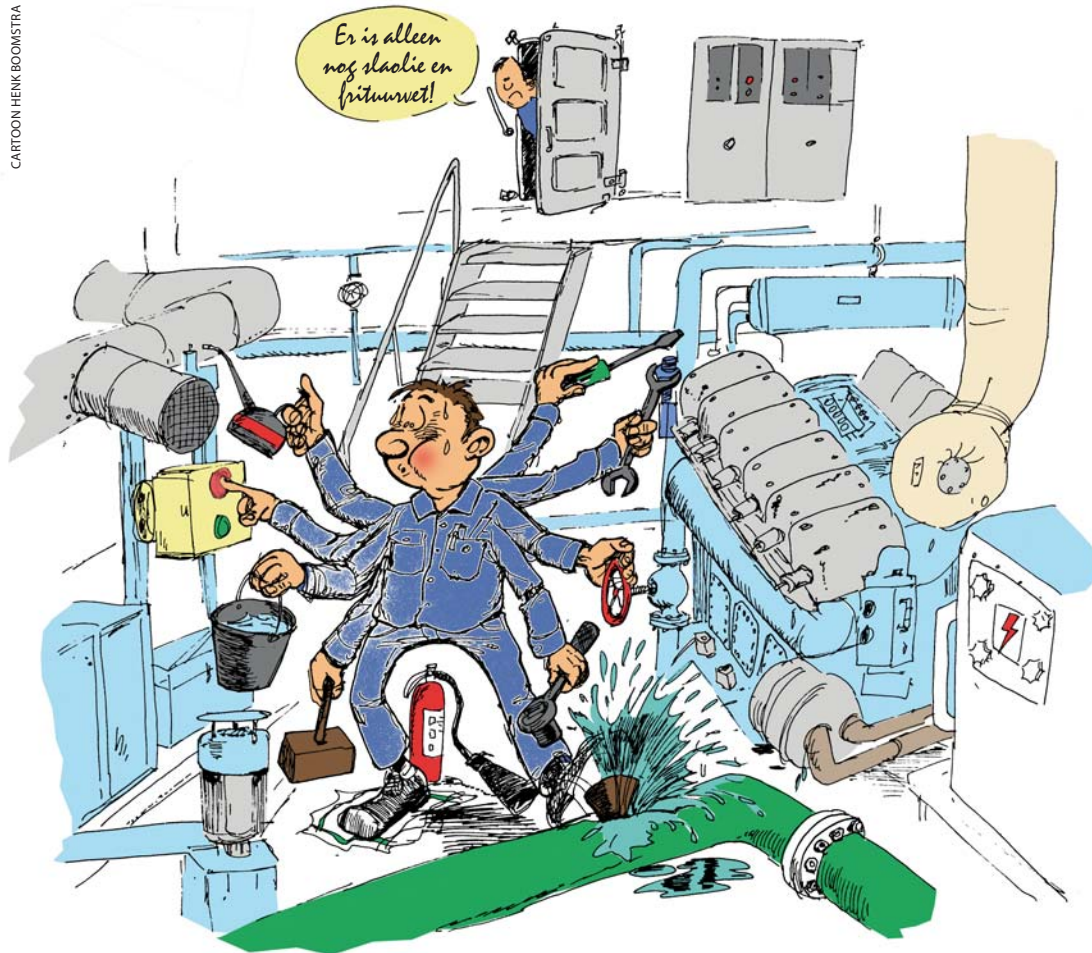
Welke mogelijkheden zijn er om er voor te zorgen dat marineschepen ook op de lange termijn inzetbaar blijven? Welke alternatieve voortstuwingsconcepten zijn er die inspelen op de verminderde beschikbaarheid van ruwe olie, maar tegelijkertijd de CO₂-emissie reduceren en de uitstoot van NO_x en SO_x verminderen? Om die vraag te beantwoorden wordt eerst naar de beschikbaarheid en het maritieme gebruik

* De auteur is werkzaam bij DMO als Hoofd Sectie Maritieme Platformsystemen, Procesautomatisering en Duikzaken.

1 Zie de *World Energy Outlook 2007* van het International Energy Agency.

2 Tweede Kamer der Staten-Generaal, vergaderjaar 2007-2008, Antwoord van de minister van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer op vragen van de leden Poppe en Jansen.

3 Een tweetakt Wärtsilä 9 cyl. RT84T met een vermogen van 37 MW weegt 1260 ton. Twee gasturbines Spey SM1C met samen ongeveer hetzelfde vermogen wegen 50 ton.



Nieuwe technieken zijn nodig om bij de tijd te blijven

van diverse soorten brandstof gekeken. Daarna volgt een inventarisatie van sectoren waarin schone technologie zich het snelst ontwikkelt. Vervolgens komt aan de orde hoe marineschepen in de toekomst kunnen worden voortgestuwd.

Brandstoffen en hun maritieme toepassingen

Vloeibare brandstoffen

Naarmate de voorraad vloeibare fossiele brandstoffen afneemt, zullen biobrandstoffen en synthetische brandstoffen steeds meer een aanvulling gaan vormen. Shell verwacht dat de brandstof voor transportdoeleinden in 2025 voor meer dan 7 procent uit biobrandstoffen bestaat en voor 4 procent uit synthetische brandstoffen.⁴ Biobrandstof is een verzamelnaam voor ethanol uit cellulose van suikerriet of maïs, methanol uit biomassa of biodiesel uit plantaardige oliën en dierlijke vetten. Biobrand-

stoffen zijn theoretisch CO₂-neutraal, maar de productie- en transportkosten kunnen aanzienlijk zijn. De productie van biobrandstoffen neemt snel toe, maar het beschikbare landbouwareaal is – met het oog op de voedselvoorziening – beperkt. Momenteel wordt veel onderzoek gedaan naar de verwerking van allerlei plantaardig afval (zogenoeten biobrandstoffen van de tweede generatie) en de teelt van speciale oliehoudende gewassen zoals jathropa of algen.

Met het *Fischer-Tropsch* proces is uit gas, teerzanden, kolen en biomassa synthetische diesel te maken. Hoewel de Duitsers Fischer-Tropsch al in de Tweede Wereldoorlog gebruikten, staat deze techniek pas sinds kort weer volop in de belangstelling. Synthetische diesel is een relatief schone brandstof, maar de productie vergt

⁴ David W. Savin, 'Naval Fuels in the 21st Century' in: *Journal of Naval Engineering* Volume 43, 2007, blz. 446-464.

veel energie en leidt, wanneer niet afgevangen, tot extra CO₂-uitstoot.

Naarmate er meer bio- of synthetische componenten worden toegevoegd veranderen de eigenschappen van de brandstof. Zo hebben biobrandstoffen een lagere thermische stabiliteit, een lager waterafscheidend vermogen, een laag vlampunt (methanol) en neemt de houdbaarheid bij opslag af. Ook synthetische diesel laat zich niet mengen met fossiele brandstoffen zonder dat de eigenschappen veranderen.

De marine zal onder druk komen om het brandstofverbruik te verlagen

Met name maritieme sectoren waar de efficiënte maar zware tweetakt-motor niet in bedrijf is, zoals de binnenvaart, kleine veerboten en marineschepen, zullen toenemend onder druk komen om hun brandstofverbruik te verlagen. Naast toepassing van restwarmte kan dat alleen door het rendement van de *prime mover* (een werktuig voor het omzetten van chemische energie in mechanische energie zoals een dieselmotor, gasturbine of stoominstallatie) te verbeteren. Het Europese onderzoeksprogramma *Hercules* verwacht dat de efficiency van de dieselmotor hooguit nog met 3 tot 5 procent is te verbeteren.⁵ Voor de viertakt-dieselmotor (tot 40 procent) is dat (te) weinig. Moderne gasturbines hebben ongeveer hetzelfde rendement, maar presteren bij deellast aanzienlijk lager.

Gasvormige brandstoffen

Omdat het transport en de distributie van aardgas duur en ingewikkeld is, is toepassing als energiebron achtergebleven bij ruwe olie. Dankzij nieuwe pijpleidingen en verbeterde *liquid natural gas* (LNG) technieken zal het gebruik van aardgas aanmerkelijk toenemen. Ook de lagere CO₂-uitstoot in vergelijking met andere fossiele brandstoffen zal een stimulans

voor aardgas betekenen.⁶ Het zoeken naar gas is relatief laat op gang gekomen, waardoor veel gebieden nog onvoldoende zijn onderzocht. Er zijn aanwijzingen dat de aardgasreserves nog aanmerkelijk zullen toenemen. Ook gas uit koollagen en teerzanden, hoewel anders van samenstelling dan aardgas, zijn tot deze reserves te rekenen. Het IEA denkt dat er bij het huidige verbruik nog voor 130 jaar aan aantoonbare en verwachte reserves zijn (vooral in Rusland, landen rond de Kaspische Zee, het Midden-Oosten en Noord-Afrika).

Met het transport van gas per tanker heeft LNG ook als maritieme brandstof zijn intrede gedaan. Het op de productielocatie tot vloeistof gekoelde gas (-160 graden Celsius) wordt aan boord in grote geïsoleerde houders vervoerd. Het gas dat ontstaat doordat de lading toch warmte opneemt – *boil-off gas* – fungeert als brandstof voor de dieselmotoren (dan gasmotoren genoemd). Dieselmotoren zijn daar vrij eenvoudig op aan te passen.⁷

Omdat LNG het milieu minder belast, is het tegenwoordig ook in *environmental sensitive areas* op offshore-schepen en veerboten in gebruik. Noorwegen heeft plannen voor de bouw van vijf LNG-kustwachtschepen. Groot nadeel is dat de schepen voor hun brandstof gebonden zijn aan een LNG-infrastructuur, wat hun actieradius beperkt.

Nucleaire brandstof

Na de ramp in Tsjernobyl is het gebruik van kernenergie voor de productie van elektriciteit nauwelijks toegenomen. Ook de exploratie en winning van uranium is daarmee enigszins achteropgeraakt. Door de noodzaak de CO₂-uitstoot te reduceren staat nucleaire energie echter weer volop in de belangstelling. Landen die hun capaciteit hebben bevroren of afgebouwd overwegen nieuwe installaties te bouwen. In landen waar nucleaire energie minder ter discussie heeft gestaan, verrijzen al nieuwe installaties. Tegenstanders van kernenergie wijzen op de beperkte beschikbaarheid van reserves uranium. De nu bekende voorraden gemakkelijk te winnen uranium lijken inderdaad maar voor enkele tientallen jaren toereikend te zijn. De aarde heeft echter zeer grote voorraden moeilijk win-

5 'Hercules: Going from Strength to Strength' in: *Marine Engineers Review*, October 2007, blz. 26-27.

6 Volgens opgave van de industrie (RICARDO P.l.c., 2007) is de uitstoot van LNG vergeleken met fossiele brandstoffen: 25 procent minder CO₂, 90 procent minder NOx, 100 procent minder SO₂ en 99 procent minder *particulate matter*.

7 M. Küver, C. Clucas en N. Fuhrmann, 'Evaluation of propulsion options for LNG carriers', Paper *Gastech Qatar*, 2002.

baar uranium die – zij het tegen hogere kosten – ook beschikbaar zijn.⁸ Ook door de recycling van splijtstofproducten zal in de toekomst meer uranium worden geproduceerd dan voorheen. In het rapport over 2007 stelt de *World Energy Council* dat de voorraden uranium groot zijn en dat de beschikbaarheid van uranium op zich geen beperking is voor verdere ontwikkeling van kernenergie.⁹

FOTO: BUNDESWEHR/P12/MARINE



De U34, een onderzeeër van de 212A-klasse van de Duitse marine

Nucleaire energie aan boord is met zo'n 700 gebouwde installaties *proven technology*. De toepassing is echter wel beperkt tot militair gebruik bij 'grootmachten' en dan vooral in onderzeeboten en ijsbrekers die deze landen exploiteren. Commerciële toepassing van nucleaire energie is in het verleden niet haalbaar gebleken. Nieuwe concepten zijn echter in onderzoek.¹⁰

Waterstof

In brandstofcellen worden waterstof (H₂) en zuurstof (O₂) bij elkaar gebracht. De beide gasstromen blijven echter door een elektrolyt (een stof die elektrisch geleidt) van elkaar gescheiden. Er zijn verschillende typen brandstofcellen die elk hun naam ontleen aan het gebruikte elektrolyt. Ze zijn te verdelen in brandstofcellen van lage en hoge temperatuur. Wanneer een geladen deeltje het elektrolyt passeert ontstaat een chemische reactie die elektrische energie, warmte en water produceert. De brandstofcel heeft in potentie een hoog

rendement (60-75 procent) en produceert geen schadelijke stoffen. Ogenschoonlijk is het een ideale energieconversie. In de natuur komt waterstof echter niet of nauwelijks voor: het moet dus worden gemaakt. Afhankelijk van de productie- en transportwijze van waterstof zullen brandstofcellen in de *well-to-wheel* keten (winning, bewerking, transport, opslag en verbruik) meer of minder CO₂ uitstoten dan gebruikelijke prime movers.

In combinatie met kernenergie of duurzame energie draagt de brandstofcel bij aan verminderde CO₂-uitstoot.

De opslag van waterstof is erg volumineus; bij een druk van 160 bar is de energievolumedichtheid nog steeds maar 1/25ste van die van diesel.¹¹

Opslag in de vorm van metaalhydride, zoals aan boord van Duitse onderzeeboten van de U212/U214-klasse (+/- 500kW met lage temperatuur brandstofcellen), is zwaar en energie-intensief. Het aan boord produceren van waterstof uit fossiele brandstoffen (*diesel reforming*) is mogelijk, maar erg ingewikkeld. Voor grote vermogens ligt daarom toepassing van de hoge temperatuur brandstofcel meer voor de hand. Deze brandstofcellen gebruiken LNG, met een veel grotere energievolumedichtheid dan waterstof, dat bij de hoge procestemperatuur door *steam reforming* ontleedt in waterstof en CO. Het Europese Fellow SHIP consortium ontwikkelt daarom een hoge temperatuur *Molten Carbonate Fuel Cell* van 330 kWe voor hulpvermogen aan boord van schepen.¹²

- 8 In fosfaatlagen en in zeewater zit uranium dat – zij het met hoge kosten – winbaar is. Noorwegen ontwikkelt een reactor die gebruik maakt van thorium. Thorium komt in dezelfde hoeveelheden voor als uranium. Zie ook: *2007 Survey of Energy Resources* van de World Energy Council.
- 9 *2007 Survey of Energy Resources*, World Energy Council 2007.
- 10 Gulian A. Crommelin en ir. Walter F. Crommelin, 'A Nuclear Gasturbine as Propulsion Unit for a Merchantman' (2004).
Zie: www.romawa.nl/downloads/ASME_IGTI_2004-53395-merchantman.pdf.
- 11 LCDR M.T.M. Bolton en S.L. Jones, 'Hydrogen Storage in Future Warships' in: *Journal of Naval Engineering* Volume 42 (2) 2005, blz. 231-241.
- 12 Thomas Tronstad, 'Developing Fuel Cell Systems for Ship Use', zie: www.shipgaz.com/magazine/issues/2006, DNV Research & Innovation.

Vaste brandstoffen

Tijdens de Industriële Revolutie kwam de winning van kolen grootschalig op gang. Kolen beheersten tot het midden van de vorige eeuw de energiemarkt. Ook nu nog wordt een deel van de elektrische energie opgewekt in kolen-centrales. De afgelopen jaren is door de stijgende vraag naar energie de kolenwinning zelfs weer toegenomen. Dat is ook mogelijk omdat de wereld nog beschikt over grote voorraden kolen, vooral in Amerika, Rusland, Oekraïne, Zuid-Afrika en China. Bij het huidige verbruik volstaat die voorraad nog voor circa 150 jaar.

Aan kolen zitten echter aanzienlijke nadelen: bij de verbranding komen veel CO₂ en schadelijke stoffen vrij. Naast de nog bescheiden productie van diesel uit kolen (*coal-to-liquid*), worden kolen daarom uitsluitend gebruikt voor grootschalige stationaire opwekking van elektriciteit. Alleen hierbij is het mogelijk te werken met wervelbedtechniek, poederkool of kolenvergassing gecombineerd met afvoergas-reiniging, waardoor de toepassing van kolen verantwoord is voor het milieu. Tot het midden van de vorige eeuw werden aan boord van schepen bijna alleen kolen gestookt, maar nu is dat helemaal verdwenen.

Sectoren met nieuwe schone technologie

Welke technieken hebben nu de potentie om de beschikbare brandstoffen nog efficiënter in energie om te zetten? Efficiënt betekent in dit geval ook zo weinig mogelijk uitstoot van CO₂ en andere schadelijke stoffen. Twee relevante sectoren waar dergelijke technieken zich snel ontwikkelen zijn de autoindustrie en de stationaire energieopwekking. Zijn er ontwikkelingen die ook voor de scheepvaart en in het bijzonder voor marines van belang zijn?

De autoindustrie

Auto's dragen voor een aanzienlijk deel bij aan de uitstoot van CO₂ en andere schadelijke stoffen. Met de toegenomen welvaart in de opkomende economieën zal ook daar het autoverkeer snel toenemen. De uitstoot concentreert zich vooral in stedelijke en dus dicht-

bevolkte gebieden. Overheden staan onder grote druk om de uitstoot door regelgeving terug te dringen en minder vervuilende technieken te bevorderen. Recente voorbeelden zijn de scherpe eisen die de Europese Commissie wil stellen aan de CO₂-uitstoot van auto's en de miljarden euro's die zijn uitgetrokken voor de ontwikkeling van de waterstofeconomie.

Alternatieve brandstoffen om portemonnee en milieu te sparen zijn niet van recente datum. Al in de jaren zeventig, na de eerste oliecrisis, kwamen in Brazilië biobrandstoffen in zwang. In Nederland heeft autogas – een mengsel van de gassen butaan en pentaan die vrijkomen bij de raffinage van ruwe olie – al lang een klein, maar niet te verwaarlozen marktaandeel. Om in te spelen op de veranderende beschikbaarheid van vloeibare brandstoffen heeft de overheid brandstofleveranciers al gedwongen een percentage biobrandstof aan hun olieproducten toe te voegen. Leveranciers komen inmiddels ook met benzine op de markt waaraan een percentage synthetische brandstof is toegevoegd, zoals Shell V-power. Benzinemotoren zijn met een driewegkatalysator aanmerkelijk schoner dan vroeger. Dieselmotoren zullen steeds meer worden uitgerust met *Selective Catalytic Reduction of Exhaustgas Recirculation* om aan de strenge Europese NOx-normen te kunnen voldoen.

Inmiddels zijn er diverse hybrideauto's op de markt, die een combinatie hebben van een benzine- of dieselmotor met een elektromotor en een batterij. Door terugwinning van remenergie valt hiermee met name in het stadsverkeer aanmerkelijk op de brandstofkosten te besparen. Zolang er nog maar weinig waterstoflaadstations zijn, richt de ontwikkeling van de waterstofeconomie zich op *dual fuel*. Dat kan met een combinatie van een verbrandingsmotor en brandstofcel/batterij of met een benzinemotor die zowel op benzine als op waterstof loopt (BMW). Er zijn ook prototypes die alleen een brandstofcel/batterij hebben. Deze auto's zullen voorlopig gebonden zijn aan een beperkt aantal waterstoflaadstations. Voor bedrijfswagenparken met een eigen laadstation hoeft dat geen probleem te zijn.



FOTO ANP, M. ANTONIUSE

De autoindustrie zet in op de waterstofeconomie

Critici van de waterstofeconomie zijn van mening dat productie, transport en opslag van waterstof zoveel energie en kosten vergt dat er per saldo weinig voor het milieu verbetert.¹³ Zij wijzen op de mogelijkheden van het *Electric Vehicle* (EV), waarbij elektrische energie direct vanuit het net in Lithium-ion batterijen wordt opgeslagen.

Deze Li-ion batterijen hebben een relatief grote energiedichtheid en zijn geschikt voor een groot aantal ontladingen. Nadeel is dat de Li-ion batterij bij verkeerd gebruik of opslag snel haar capaciteit verliest. Er zijn al diverse EV-voertuigen op de markt. De rijeigenschappen zijn alleszins aanvaardbaar en de actieradius is aangepast aan het gebruik. Het opladen van de batterijen kost enige uren, maar de 'brandstofkosten' zijn aanmerkelijk lager dan bij benzine of diesel.

Stationaire energieopwekking

De stationaire opwekking van elektrische energie gebeurt met een grote verscheidenheid aan brandstoffen.

Naast kolen in de vorm van wervelbedverbranding, poederkooltechnologie en kolenvergassing, zijn dat olie, aardgas, biomassa en nucleaire energie. Moderne installaties hebben zelfs *multi-fuel* voorzieningen om – naar gelang de kosten – van brandstofsoort te kunnen wisselen.

Bij klassieke centrales (ketel-turbine-generator) zijn door toepassing van hogere stoomdruk en temperaturen steeds betere rendementen mogelijk. Momenteel zijn kritische en ultra-kritische stoominstallaties in aanbouw met een rendement van meer dan 45 procent.¹⁴

Moderne centrales kennen in de regel een *combined cycle* om met behulp van meerdere technieken een zo hoog mogelijk rendement te halen. Zo bestaat er warmtekrachtkoppeling

waar de afvoergassen van de stoominstallatie naar stads- of industriële verwarming gaan. Bij een met gas gestookte STEG-installatie worden de afvoergassen van de gasturbine gebruikt om in een ketel stoom te produceren.¹⁵ Bij KV-STEG¹⁶ ontstaat door kolenvergassing een synthetisch gas waarop de gasturbine draait. De warmte die bij kolenvergassing vrijkomt en de afvoergassen na de gasturbine verwarmen een stoomketel.

Bij fossiele brandstoffen is de uitstoot van schadelijke stoffen (NO_x, SO_x, vliegias) te beperken door de brandstof in de centrale van tevoren te behandelen en de afvoergassen te reinigen. Momenteel vindt grootscheeps onderzoek plaats naar afvang van CO₂ door *Carbon-Capture and Storage* (CCS). Dat kan gebeuren door *reforming* van brandstof (*pre-combustion*) of door het verwijderen van CO₂ uit de afvoergassen (*post-combustion*). Een bijzondere vorm van CCS is de verbranding met zuivere zuurstof (*oxy fuel combustion*) waardoor alleen water en CO₂ vrijkomen. Het CO₂ kan vervolgens in bijna lege gas- en olievelden worden gepompt waardoor

13 Ulf Bossel, 'Does a Hydrogen Economy Make Sense', *European Fuel Cell Forum*, april 2005 (www.efcf.com/reports/E13.pdf).

14 Toepassing van nieuwe kolencentrales zoals de MPP3 op de Maasvlakte (285 bar, 600-620°C) met kritische stoominstallaties vindt met name legitimatie in de noodzaak diversificatie van brandstoffen te realiseren.

15 STEG: Stoom en Gas.

16 KV-STEG: Kolenvergassing- Stoom en Gas.

ook het niet-winnbare restant alsnog is te winnen.¹⁷ CCS-technieken gaan overigens wel weer ten koste van het rendement.

Nucleaire energie vindt grootschalig toepassing voor de productie van elektriciteit. De meeste reactoren zijn van het LWR- type.¹⁸ Een nieuw type reactor is de *Pebble Bed Modular Reactor* (PBMR). In deze reactor is het kernmateriaal verpakt in grafietkogels. Helium dat door de kogels wordt geblazen voert de ontstane warmte af. Het gesloten heliumcircuit verwarmt op zijn beurt de lucht in een *open-cycle* gasturbine. In 2014 moet in Zuid-Afrika de eerste commercieel werkende PBMR-GT 165 MWe leveren. De PBMR behoort tot de generatie III+. De industrie werkt inmiddels aan de ontwikkeling van de zogeheten generatie IV reactoren die een hoger rendement hebben, nog veiliger zijn en bijna geen nucleair afval produceren.¹⁹



FOTO AVDD

Hr.Ms. Johan de Witt, een marineschip met IEP-voortstuwing

Nieuwe reactoren hebben zulke hoge bedrijfstemperaturen dat met thermische splitsing van water waterstof kan worden geproduceerd. Deze wijze van waterstofproductie is efficiënter

dan gewone elektrolyse, een extra pluspunt gelet op de toekomstige behoeften van de waterstofeconomie.

Een veelbelovende nieuwe techniek is de combinatie van een hoge temperatuur *Solid Oxide Fuel Cell* en een gasturbine. De SOFC-GT combinatie verbruikt als brandstof LNG dat onder hoge druk en temperatuur overgaat in waterstof en CO. De gasstroom genereert in de brandstofcel elektrische energie en drijft daarna de gasturbine aan. De ontwikkeling van de SOFC-GT is in volle gang. De SOFC-GT heeft in potentie een rendement van boven de 60 procent en is geschikt voor de opwekking van grote vermogens.²⁰

Alternatieve brandstoffen en marineschepen

Welke brandstoffen?

Vloeibare brandstoffen zijn uitermate geschikt voor mobiele energieopwekking. De reserves ruwe olie laten het onbeperkte gebruik echter niet meer toe. Er wordt momenteel volop gezocht naar alternatieven. Voor voertuigen lijkt de waterstofeconomie van de grond te komen. Ook de toepassing van alleen batterijen is steeds aantrekkelijker. Vliegtuigen lijken hoe dan ook aan vloeibare brandstoffen vast te zitten. De civiele en de militaire luchtvaart experimenteren inmiddels met bio- en synthetische brandstoffen.²¹ De productie van synthetische vliegtuigbrandstof is al op gang gekomen.

De ontwikkeling van de waterstofeconomie komt op gang. Niet alleen personenauto's, maar ook kleine transportauto's krijgen in de toekomst schone techniek. Met het toenemen van 'schoon' vermogen kunnen ook kleine vaartuigen, zoals havensleepboten en duikvaartuigen, aansluiten bij deze ontwikkelingen. Naarmate de noodzakelijke actieradius toeneemt, zal de toepassing van waterstof of batterij echter stuiten op de beperking van de lage energiedichtheid.

Aan boord is LNG als brandstof voor gasmotor of hoge temperatuur brandstofcel mogelijk, maar de well-to-wheel keten is geopolitiek en technisch kwetsbaar. Voor marineschepen vormt het meevoeren van voorraden LNG ook

17 ENECO onderzoekt in Nederland mogelijkheden voor de bouw van een 50 MW Zero Emission Power Plant (ZEPP) centrale.

18 LWR: *Light Water Reactor*; kokendwater- of drukwaterreactoren.

19 Homepage of Jan Leen Kloosterman, Delft University of Technology, www.iri.tudelft.nl.

20 SOFC/GAS Turbine Hybrid, www.powergeneration.siemens.com.

21 De Amerikaanse luchtmacht doet proefnemingen met een B-52 met synthetische brandstof en heeft plannen voor eigen coal-to-liquid productiefaciliteiten.

een veiligheidsrisico. In Nederland, dat zelf – weliswaar slinkende – gasvoorraden heeft is LNG als brandstof voor gasmotor of hoge temperatuur brandstofcel in de toekomst een optie. Toepassing is mogelijk aan boord van marineschepen in het lage geweldsspectrum, zoals mijnenbestrijdingsvaartuigen en hydrografische opnemingsvaartuigen, die voornamelijk opereren in eigen of Europese wateren. Het gebruik van kolen is mogelijk, maar de noodzaak om dat verantwoord voor het milieu te doen, vergt volumineuze proces- en reinigingsvoorzieningen. Het is moeilijk voorstelbaar dat dergelijke installaties zich laten inpassen in marineschepen ter grootte van een fregat. Voor de koopvaardij, waar de schaalvergroting de komende decennia onverminderd zal doorgaan (hoe groter, hoe goedkoper) kan het gebruik van kolen op den duur wel een alternatief zijn.

Toepassing van nucleaire energie aan boord is mogelijk, schoon en veel veiliger dan voorheen. Er is voldoende uranium beschikbaar voor de omschakeling van fossiele brandstoffen naar nucleaire energie. De acceptatie van nucleaire energie is groter dan een aantal jaren geleden maar de kosten, het afvalprobleem, de angst voor nucleaire proliferatie en terrorisme zullen nog lange tijd een rem zetten op de ontwikkeling van een nieuwe kleinschalige toepassing aan boord van marine- en koopvaardij schepen.

Terwijl kleinere marineschepen kunnen aansluiten bij ontwikkelingen op de markt (auto-industrie, toepassing van LNG), lijkt voor grotere marineschepen alleen de toepassing van nucleaire energie of het gebruik van bio- of synthetische brandstoffen mogelijk.²² De kosten van nucleaire energie zullen onveranderd hoog blijven. De kosten van bio- en synthetische brandstoffen zullen stijgen doordat de productie het dalende aanbod van fossiele brandstof waarschijnlijk onvoldoende kan compenseren.

Niet-nucleaire technieken

Hoe sterk de kosten van bio- en synthetische brandstoffen zullen toenemen is moeilijk te voorspellen. Het is dus zaak om daarmee zo

efficiënt mogelijk om te gaan. Welke conventionele technieken – naast de gebruikelijke prime movers – hebben in potentie de mogelijkheid om de efficiency sterk te verbeteren?

De enige recente ontwikkeling in de voortstuwing van marineschepen is de *Integrated Electric Propulsion* (IEP). Door elektrische energie op te wekken voor zowel voortstuwing als hulpvermogen, volstaan minder prime movers en is het scheepsontwerp te optimaliseren.²³

In bijna alle toekomstscenario's speelt elektrische energie een grote rol

Het ontwikkelen van grote elektrische vermogens speelt ook in op de introductie van *Direct Energy Weapons* en *Electric Rail Gun*. Bovendien verwacht de Britse marine met de op IEP gerichte *Marine Development Strategy* ook te kunnen besparen op de investerings- en exploitatiekosten.²⁴

De Britse en Amerikaanse marine hebben inmiddels grote vorderingen gemaakt met IEP. De ontwikkeling richt zich op de distributie van elektrische energie en de omzetting daarvan in asvermogen. Voor de opwekking van elektrische energie heeft IEP echter nog een dieselmotor en gasturbine nodig. Toepassing van IEP heeft veel voordelen, maar leidt daarom op zich nog niet tot een hogere efficiency.

In bijna alle toekomstscenario's speelt elektrische energie een belangrijke rol. Elektrische energie is te produceren uit verschillende soorten brandstof (waaronder bio- en synthetische brandstof), maar is ook onontbeerlijk voor het effectief benutten van duurzame energie (transport en distributie via het net of door

22 De fregatten van de Zeven Provinciën-klasse hebben circa 40 MW geïnstalleerd vermogen. De nieuwe Britse *carriers* hebben 110 MW geïnstalleerd vermogen.

23 Dit in tegenstelling tot de gangbare ontwerpen waar vermogen voor voortstuwing en elektrisch hulpvermogen in verschillende installaties worden opgewekt.

24 Ook de Koninklijke Marine maakt gebruik van IEP-installaties. De amfibische transportschepen Hr.Ms. Rotterdam en Hr.Ms. Johan de Witt hebben installaties met een gezamenlijk elektrisch vermogen van circa 15 MW. Het toekomstige *Joint Support Ship* zal circa 27 MW elektrisch vermogen hebben.

elektrolyse opslag in de vorm van waterstof). De productie van elektriciteit is daarom een *booming business*, waarin voortdurend nieuwe concepten en technieken worden gelanceerd om energieopwekking efficiënter en schoner te maken. Wanneer die nieuwe vormen van elektrische energieopwekking aan boord toepasbaar zijn, sluit dat prima aan bij IEP en is verbetering van de efficiency mogelijk. Voorbeelden van die nieuwe (conventionele) technieken zijn de eerder genoemde toepassing van kritische en ultra-kritische stoominstallaties, toepassing van STEG of KV-STEG en in de toekomst het gebruik van oxy fuel combustion en SOFC-GT installaties.

Voor de marine is de tijdshorizon dwingender dan voor de handelsvaart

Of deze technieken haalbaar zijn hangt af van de mogelijkheden om de installaties op te schalen of te verkleinen tot de grootte van scheepsvermogens (enkele tientallen MW) en het gedrag bij deellast. Het toekomstig toepassen van CCS aan boord is moeilijk voorstelbaar, maar de ontwikkelingen zijn nog in volle gang. De economische haalbaarheid hangt af van het aantal vaardagen dat een schip per jaar maakt. Marineschepen maken ten opzichte van de koopvaardij weinig vaardagen, maar de installatie kan renderen door na binnenkomst elektrische energie aan het net te leveren.

Conclusie

De afnemende voorraden fossiele brandstoffen en de zorgen om klimaat en milieu dwingen tot ingrijpende veranderingen in het omgaan met energie. Vooral de daling van de reserves ruwe olie maakt de toepassing van andere brandstoffen en technieken noodzakelijk. De auto-industrie zet in op de waterstofeconomie en batterijen, terwijl de vliegtuigtechniek zich in de richting van bio- en synthetische brandstoffen ontwikkelt. De maritieme sector vertrouwt vooralsnog op het gebruik van de tweetaktmotor en residuale brandstoffen. Tweetaktmotoren

zijn door hun gewicht en omvang echter niet aan boord van marineschepen te plaatsen.

Kleine (marine)schepen kunnen in de toekomst profiteren van de ontwikkelingen in de auto-industrie. Toepassing van LNG is onder voorwaarden ook mogelijk. Marineschepen die daar te groot voor zijn kunnen overgaan op nucleaire energie of bio- of synthetische brandstoffen. Nucleaire energie is kostbaar en – hoewel minder dan voorheen – politiek en maatschappelijk omstreden.

Bio- of synthetische brandstoffen zullen schaars en duur zijn. Daarom zijn technieken nodig die minder afhankelijk zijn van de kwaliteit en de samenstelling van de brandstof en tegelijkertijd een hoog rendement hebben. Dat is wellicht haalbaar met technieken uit de stationaire (elektrische) energieopwekking. Toepassing daarvan sluit aan bij de door de Britse en Amerikaanse marine ontwikkelde IEP.

Er is veel onderzoek nodig om vast te stellen of alternatieve brandstoffen en nieuwe technieken daadwerkelijk mogelijk zijn aan boord van schepen. De maritieme sector neemt daartoe geen initiatieven omdat de commerciële noodzaak op dit moment nog ontbreekt. Voor marines is de tijdshorizon echter dwingender. Om de operationele inzet van met name grotere marineschepen in de toekomst zeker te stellen, is eigen onderzoek met industrie en bondgenootschappelijke marines nodig. Nieuwe, voor militaire toepassing geschikte voortstuwingsconcepten, dienen ook een maatschappelijk belang als zij later hun weg vinden naar civiele maritieme sectoren. ■