

Technologie voor een Nieuwe Generatie Schepen

Onderzoek naar toepasbaarheid van nieuwe technologieën
in de energieketens aan boord van "All Electric Ships"

Opgesteld voor:
All Electric Ship platform

Opgesteld door:
AES werkgroep C

REV	REDEN VOOR UITGAVE	Van	Gecontroleerd	Datum
A	Beoordeling door AES werkgroepen	NJV		28 februari 2005

N.J. VERSTEEG

REVISIE STATUS

<u>REV</u>	<u>DATUM</u>	<u>BESCHRIJVING</u>	<u>GEC.</u>	<u>GOEDKEURD</u>
A	280205	Beoordeling AES werkgroepen	JvdB	

INHOUDSOPGAVE

1.	INTRODUCTIE.....	1
2.	DOELSTELLINGEN.....	2
2.1.	Operationele doelstelling.....	2
2.2.	Technologische doelstelling.....	2
2.3.	Kennisoverdracht doelstelling.....	2
3.	PLAN VAN AANPAK.....	3
4.	UITVOERING VAN DE STUDIE.....	4
4.1.	Fase 1.....	4
4.1.1	Demarcatie en interfaces van de ketenonderdelen.....	5
4.1.2	De relevante grootheden.....	5
4.1.3	Generiek bestek voor de energieketen.....	5
4.1.4	Beoordelen van het simulatieprogramma GES op bruikbaarheid Voor beoordeling van Nieuwe Technologie.....	6
4.2.	Fase 2.....	6
4.2.1	Technologie beschrijving.....	7
4.2.2	Criteria bij technologiekeuzes voor componenten en ketens.....	7
4.2.3	Technologie variaties.....	8
4.2.4	Technologische "roadblocks".....	8
5.	CONCLUSIES.....	10
6.	AANBEVELINGEN.....	11

BIJLAGEN

A	
A1	Projectplan WG C
A2	Plan van aanpak
A3	Planning WG C
B	Energieketenanalyse met GES
C	Generiek bestek
D	
D1	Prime Movers
D2	Opwekking en aandrijving
D3	Distributie
D4	E-opslag
D5	Voortstuwcrs in samenhang met elektrische aandrijving

1. INTRODUCTIE

Het All Electric Ship platform houdt zich bezig met de vraag of en hoe andere energiebronnen dan de conventionele diesel directe voortstuwing aan boord van schepen zouden kunnen worden toegepast. In dit kader is een aantal werkgroepen samengesteld die ieder op hun eigen terrein innovaties op dit gebied bestuderen. Een van die werkgroepen is werkgroep C, "Technologie voor een Nieuwe Generatie Schepen".

Werkgroep C bestond uit een zeer gemêleerd gezelschap van technische bedrijven en wetenschappelijke onderzoeksinstituten. In de werkgroep zaten vertegenwoordigers van Damen Shipyards, Bakker-Sliedrecht, ECN, Hogeschool Amsterdam, Imtech Marine & Offshore, Koninklijke Marine, Koninklijke Schelde Groep, Marin, TNO en TU-Delft. De studie is uitgevoerd door vertegenwoordigers van Damen Shipyards, Bakker-Sliedrecht, ECN, Imtech Marine & Offshore, Koninklijke Marine, Marin, TNO en TU-Delft.

De studiegroep heeft onderzoek gedaan naar nieuwe technologieën (emerging technologies) voor de energieketen aan boord van schepen. In de studie is eerst onderzocht aan welke generieke eisen de verschillende componenten van de energieketen aan boord van schepen moeten voldoen en vervolgens is onderzocht welke technologieën reeds voorhanden zijn, welke nieuwe technologieën in een zeer beperkte oplage geproduceerd zijn en welke technologieën in ontwikkeling zijn. Daarna is bekeken op welke wijze energieketens gesimuleerd kunnen worden en hoe de toepasbaarheid van nieuwe technologie beoordeeld kan worden.

In dit rapport staat omschreven wat de doelstellingen zijn geweest, hoe de studie is aangepakt en uitgevoerd en wat de resultaten van de studie zijn.

2. DOELSTELLINGEN

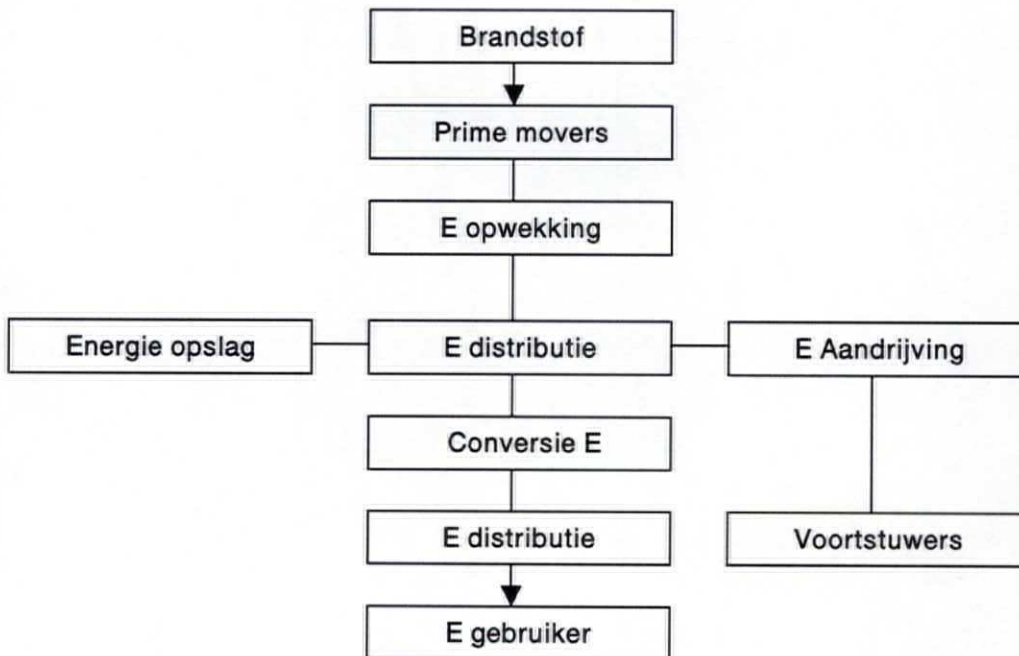
De studie van AES werkgroep C maakt deel uit van het totale onderzoek naar de toepasbaarheid van alternatieve energiesystemen van het AES platform. Dit platform is in het leven geroepen met haar eigen doelstellingen gericht op innovatie en kennisoverdracht. Het onderzoek van werkgroep C is ondersteunend aan het AES platform. Daartoe heeft de werkgroep zichzelf drie doelen gesteld:

2.1. Operationele doelstelling

Het opstellen van functionele eisen voor AES-configuraties die enerzijds voldoende generiek (algemeen toepasbaar op alle categorieën schepen) en anderzijds voldoende praktisch zijn om toetsbare criteria te kunnen formuleren voor vergelijking van de verschillende systeem oplossingen.

2.2. Technologische doelstelling

Het ordenen van de pertinente informatie van ieder van de blokken van het hieronder aangegeven generieke blokschema van energieketens aan boord van schepen. Bij deze ordening moesten alleen de relevante grootheden worden geïnventariseerd, waarmee het mogelijk wordt om verschillende systeemoplossingen met elkaar te vergelijken. De gewenste informatie heeft betrekking op technologie die een volledige energieketen voor schepen mogelijk maakt.



2.3. Kennisoverdracht doelstelling

Het delen van de eigen specifieke kennis van ieder individueel werkgroeplid binnen de werkgroep middels samenwerking en opstelling van het eindrapport, het verspreiden van het eindrapport binnen het All Electric Ship Platform en het houden van een workshop over de studie.

3. PLAN VAN AANPAK

Voor de uitvoering van de studie zijn een projectplan en een plan van aanpak geschreven die ter goedkeuring zijn voorgelegd aan het AES platform in de persoon van Dr. Ir. C.A. Prins en aan de werkgroep. Uit de werkgroep heeft een grote vertegenwoordiging van de bedrijven en instellingen deel genomen in de uitvoering van de studie zoals vermeld in de inleiding van dit rapport. Door de brede samenstelling van de studiegroep was het mogelijk om over alle componenten van de energieketen inbreng te leveren.

Voor de uitvoering is een initiële planning gemaakt met als einddatum 31 december 2004. Deze planning is niet gehaald, omdat het schrijven van het generieke bestek meer tijd in beslag nam dan was voorzien. Ook de technologiebeschrijvingen hebben meer tijd gevergd. De planning is laatstelijk bijgewerkt op 8 februari 2005.

Voor het projectplan, het plan van aanpak en de laatste planning wordt korthedshalve verwezen naar Bijlage A.

4. UITVOERING VAN DE STUDIE

Zoals in de inleiding is vermeld, is de studie uitgevoerd door een studiegroep die bestond uit een groot deel van de werkgroepleden. Hierdoor zijn slechts een beperkt aantal werkgroepvergaderingen gehouden, maar een groot aantal studiebijeenkomsten. De leden van studiegroep waren verantwoordelijk voor het doorgeven van de status van de werkzaamheden aan hun achterban. De heer Prins heeft enkele voortgangsvergaderingen bijgewoond.

Een zeer groot deel van de studie is dus uitgevoerd in diverse studiebijeenkomsten, waarbij de deelnemers zich vooraf hadden voorbereid. Hierdoor en door de betrokkenheid van de deelnemers bij dit project, kon efficiënt met de tijd worden omgegaan en is er veel werk verzet. Tijdens de bijeenkomsten is veel en enthousiast deelgenomen aan discussies over de materie en dat heeft geleid tot een grote mate van kennisoverdracht tussen de deelnemers, tot een groter begrip van de werkerreinen van de andere deelnemers en tot nieuwe ideeën voor het eigen werk.

De bijeenkomsten vonden afwisselend plaats bij een deel van de bedrijven die in de studiegroep waren vertegenwoordigd. Hierbij werd de gelegenheid geboden de bedrijven te bezichtigen, hetgeen verder heeft bijgedragen tot verbreding van kennis en inzicht. Door deze aanpak is de derde doelstelling over kennisoverdracht binnen de werkgroep gerealiseerd.

De studie is opgedeeld in twee fasen. De eerste fase is gericht op het scheppen van de randvoorwaarden waarbinnen de technologieverkenning kan plaatsvinden. De tweede fase is gericht op de daadwerkelijke technologieverkenning, het vastleggen daarvan en het uitvoeren van enkele technologievarianties in een energieketen.

Alle deelleveringen van deze studie zijn ingedeeld conform de in hoofdstuk 1 aangegeven energieketen. Hierdoor kan de relevante informatie van een bepaalde ketencomponent direct bij elkaar worden gezocht.

4.1. Fase 1

Om de operationele en technologische doelstelling te realiseren, zijn de volgende activiteiten uitgevoerd:

- a. De demarcatie en interfaces van de ketenonderdelen zijn gedefinieerd.
- b. De relevante grootheden per onderdeel van de energieketen zijn gedefinieerd om
 - de keten te kunnen bouwen
 - verschillende technologische systeemoplossingen met elkaar te kunnen vergelijken en om
 - onderlinge vergelijking van verschillende ketens mogelijk te maken
- c. Een generiek bestek is opgesteld voor de energieketens, waarin algemene eisen worden vastgelegd die toepasbaar zijn op diverse scheepstypen.
- d. Het door TNO reeds ontwikkelde simulatieprogramma GES (Geïntegreerd Energie Systeem) is beoordeeld op bruikbaarheid voor de doelstellingen van de werkgroep.

4.1.1. Demarcatie en interfaces van de ketenonderdelen

Alle componenten van de energieketen zijn in algemene bewoordingen beschreven en de begrenzing zijn aangegeven, zodat bij een technologieverkenning direct duidelijk is in welke deel van de energieketen een bepaalde technologie kan worden toegepast. Tevens is van iedere ketencomponent aangegeven op welke wijze de verbinding met de volgende component tot stand gebracht moet worden. De demarcaties en interfacebeschrijvingen zijn opgenomen in het rapport "Energieketenanalyse met GES" (Bijlage B).

4.1.2. De relevante grootheden

Van alle energieketencomponenten zijn de relevante grootheden vastgesteld. De vastgestelde grootheden zijn noodzakelijk voor het vergelijken van verschillende technologieën voor een bepaalde ketencomponent, voor het maken van een ketenontwerp en voor het integreren van de componenten in het scheepsontwerp. Dat betekent dat er meer grootheden worden gevraagd dan alleen voor een ketenontwerp in het programma GES noodzakelijk zijn. Het overzicht van relevante grootheden is opgenomen in het rapport "Energieketenanalyse met GES" (Bijlage B).

4.1.3. Generiek bestek voor de energieketen

Het bestek is opgezet voor energieketens aan boord van schepen met een elektrische voortstuwing als onderdeel van een geïntegreerd elektrisch opwekking- en distributienet en is een combinatie van eisen die voortkomen uit ervaringen bij het ontwerpen van energieketens en uit voorschriften van Klasse Bureaus. Het bestek is in eerste instantie bedoeld als hulpmiddel bij een eerste beoordeling of nieuwe technologie geschikt is of geschikt gemaakt kan worden voor toepassing aan boord van schepen. In tweede instantie is het bestek bedoeld voor gebruik in de conceptuele fase van het ontwerp van een energieketen als onderdeel van een geïntegreerd scheepsontwerp. Het bestek is niet geschikt voor de "detailed design" fase; daarvoor gaat dit bestek niet diep genoeg in details.

Het bestek bevat generieke eisen voor apparatuur aan boord van schepen, voor prime movers als omzetters van brandstof in mechanische of elektrische energie, voor elektrische installaties in het algemeen, voor iedere component in de elektrische energieketen en voor voortstuwings. Bij de opzet van het bestek is bewust gekozen om niet de Klasse Bureau eisen te kopiëren, omdat die nog niet zijn toegesneden op de hier bedoelde toepassingen. Daar waar dat mogelijk en zinvol is, is gebruik gemaakt van de Klasse Bureau eisen.

Bij het opstellen van de generieke eisen is uitgegaan van wat op dit moment voor "conventionele" toepassingen gemeen goed is. De meeste van deze eisen blijken ook voor nieuwe technologieën te gelden, juist omdat het om generieke zaken gaat. Bij het opstellen van het bestek is niet alleen gekeken naar eisen voor de componenten zelf, maar ook naar eisen die van buitenaf opgelegd worden door het systeem waarin de component is toegepast. Tevens zijn eisen opgenomen die gesteld moeten worden aan het volledige systeem en eisen die gesteld worden omdat het toepassingen op schepen betreft.

Het generiek bestek is opgenomen in Bijlage C.

4.1.4. Beoordelen van het simulatieprogramma GES op bruikbaarheid voor beoordeling van Nieuwe Technologie

GES is in eerste instantie in opdracht van de Koninklijke marine door TNO ontwikkeld als onderdeel van een concept variatie programma voor scheepsontwerpen. Het GES is opgezet als hulpmiddel voor het vergelijken van verschillende opties voor energieketens aan boord van marineschepen in de conceptuele fase van een scheepsontwerp. Later is het GES door TNO verder doorontwikkeld en mede dankzij het AES-Platform verder uitgebreid met informatie uit de civiele scheepsbouwwereld.

Door toedoen van de AES werkgroep C zijn de volgende aanvullingen en verbeteringen doorgevoerd:

- De parametrisering van bestaande informatie is tegen het licht gehouden en op enkele plaatsen verbeterd.
- Nieuwe informatie over met name nieuwe technologie is aangeleverd.
- Nieuwe ontwerpregels zijn aangeleverd en ingevoerd, o.a. voor berekeningen van H₂-opslag en voor het dimensioneren van verschillende typen voortstuwars.
- Er is gekeken naar de structuur van de opbouw van de energieketens, waardoor dit in GES is verbeterd.
- De nieuwe functionaliteit is ingevoerd, waarmee het GES bij een gegeven vermogen verschillende technologische opties aanbiedt voor invulling van een ketencomponent.

Het GES blijkt een bruikbaar simulatiegereedschap te zijn voor het bestuderen van de effecten van toepassing van Nieuwe Technologie in een energieketen. Opgemerkt moet echter worden dat het GES nog niet volledig gebruiksvriendelijk is. Het programma moet gebruikt worden door iemand die er goed bekend mee is.

Voor een uitgebreidere beschrijving van de wijze waarop het GES voor de doelstellingen van deze AES werkgroep C is aangepast en gebruikt, wordt verwezen naar het rapport "Energieketenanalyse met GES" (Bijlage B).

4.2. Fase 2

In fase 2 zijn praktische beschrijvingen opgesteld van technologieën die geschikt zijn of die geschikt gemaakt kunnen worden voor toepassing in de energie ketens aan boord van schepen. Vervolgens zouden criteria worden opgesteld voor het maken van keuzes voor ketencomponenten en voor hele energieketens als voorbereiding op het uitvoeren van enkele technologievarianties in een in GES ingevoerde energieketen.

4.2.1. Technologie beschrijving.

De technologie is onderscheiden naar drie ontwikkelingsstadia:

- Bewezen technologie, verkrijgbaar bij verschillende leveranciers, veelvuldig toegepast.
- Nieuwe technologie, klein aantal leveranciers, klein aantal (commerciële) toepassingen.
- Toekomstige technologie, één of enkele leveranciers, prototypen, eerste toepassingen over 5 tot 10 jaar.

De studiegroep heeft voor iedere component van de energieketen geïnventariseerd welke technologieën beschikbaar zijn en welke ontwikkelingen er plaatsvinden. De technologiebeschrijvingen zijn opgenomen in Bijlage D. Van iedere technologie is aangegeven welke vermogens bereikt zijn en/of waar naar gestreefd wordt bij de verdere ontwikkeling; deze opgave is opgenomen in het rapport "Energieketenanalyse met GES" (Bijlage B). Daarnaast zijn voor zover bekend en mogelijk, de overige gewenste grootheden ingevuld. Deze informatie is ingevoerd in GES.

Uiteraard was niet alle informatie nieuw voor GES. De aangeleverde informatie is wél vergeleken met de database van GES. Daar waar nodig zijn parameters in GES aangepast.

Omdat het GES reeds een goed gevulde bibliotheek had bij aanvang van onze studie, zijn niet alle voor de werkgroep relevante grootheden (zie para 3.1.2) in GES opgenomen. Het was ondoenlijk om de GES-database daarop te controleren.

Nieuwe informatie die is aangeleverd aan GES besloeg met name die voor nieuwe technologieën alsmede nieuwe ontwerpregels o.a. voor berekeningen van H₂-opslag en voor het dimensioneren van verschillende typen voortstuwars. In het rapport "Energieketenanalyse met GES" (Bijlage B) is een overzicht opgenomen van de aanvullingen.

De beschrijvingen zijn gegeven voor zover zij bekend waren bij de werkgroepleden of uit de literatuur te halen waren. Dat betekent dat er wellicht meer ontwikkelen zullen zijn of gaande zullen zijn, maar dat dat niet bekend is bij de werkgroepleden. Er wordt derhalve geen volledigheid gepretendeerd en de technologiebeschrijving moet dan ook beschouwd worden als een levend document waar vanuit verschillende kanten aanvullingen op kunnen worden gedaan. Het verwerken van nieuwe informatie in het document in de periode na afronding van deze studie en het aanvullen van de GES-bibliotheek is echter nog niet georganiseerd.

4.2.2. Criteria bij technologiekeuzes voor componenten en ketens

In fase 2 is gezocht naar criteria die bepalend zijn bij specifieke technologiekeuzes voor een component van een energieketen, naar criteria om van de ene technologische oplossing over te gaan naar een andere technologie en naar criteria voor het ontwerp van gehele energieketens. Deze criteria blijken niet in algemene zin te kunnen worden geformuleerd, aangezien er vele verschillende redenen kunnen zijn voor een bepaalde keuze.

Wél zijn de grenzen vastgelegd waarbinnen het gebruik van de technologieën mogelijk is en zijn criteria vastgesteld voor vergelijking van ontwerpresultaten.

Omdat nieuwe technologieën dus potentiële voordelen maar ook nadelen in zich herbergen, is het noodzakelijk te onderzoeken welke parameters moeten wijzigen om toepassing aan boord van schepen interessant te maken (identificeren van nog bestaande technologische "roadblocks" in dit rapport, dat een technologische "road map" bedoeld te zijn). Dit onderzoek kan worden uitgevoerd met GES en dient systematisch opgezet te worden. In GES kunnen in verschillende energieketens technologieën met elkaar worden vergeleken, kunnen grootheden worden gewijzigd en kan worden onderzocht wanneer een nieuwe ontwikkeling competitief wordt met bestaande of eveneens in ontwikkeling zijnde technologieën. Behalve dat de ontwerper een beter inzicht krijgt in de toepassingsmogelijkheden, kan dit onderzoek tevens leiden tot het vaststellen van speerpunten in bepaalde ontwikkelingen.

De werkgroep heeft geen gelegenheid gehad om dit onderzoek op te zetten. Het is zeer de moeite waard om hier een nieuw project van te maken.

5. CONCLUSIES

1. De operationele doelstelling is gerealiseerd met het samenstellen van het generieke bestek voor energieketens aan boord van schepen met een elektrische voortstuwing.
2. De technologische doelstelling is gerealiseerd met de beschrijvingen van de technologieën per component van de energieketen, het inventariseren van de nieuwe technologieën, het aanleveren van data aan het GES en het verbeteren van het GES.
3. De technologiebeschrijvingen pretenderen niet volledig te zijn, waardoor aanvullingen op de technologie beschrijvingen mogelijk moeten blijven en de beschrijvingen als levend document moeten worden beschouwd.
4. Technologische "roadblocks" zijn niet geïdentificeerd, zodat onduidelijk is welke nieuwe of toekomstige technologieën potentieel toepasbaar zijn in een AES energieketen of bij welke aanpassing(en) ze dat kunnen worden.
5. Het GES is een bruikbaar simulatiegereedschap voor het bestuderen van energieketens, maar is nog niet volledig gebruiksvriendelijk.
6. Er is slechts één casestudie uitgevoerd om de mogelijkheden van technologievariëaties in GES te testen.
7. De kennisoverdracht doelstelling is binnen de studiegroep gerealiseerd met de manier waarop de studie is uitgevoerd. Kennisoverdracht buiten de studiegroep heeft nog niet plaats gevonden.
8. De studie heeft enthousiasme gewekt bij de studiegroepleden over het onderwerp en over de onderlinge samenwerking.

6. AANBEVELINGEN

1. Het organiseren van verwerking van nieuwe informatie ten behoeve van de technologiebeschrijvingen na afronding van de studie.
2. GES meer gebruiksvriendelijk maken.
3. Een nieuw project opstarten, waarin technologische "roadblocks" worden geïdentificeerd en waarin onderzocht wordt welke aanpassingen nodig zijn om de "roadblocks" op te heffen.
4. Meerdere technologievarianties uitvoeren om de mogelijkheden, beperkingen en daaruit volgende aanpassingen van het GES beter in kaart te brengen.

PROJECT PLAN

BIJLAGE A1

AES-werkgroep C

INHOUDSOPGAVE

1.	SAMENVATTING.....	1
1.1.	Kennis en onderwijs doelstelling.....	1
1.2.	Project-deel 3.....	1
1.3.	De projectbegroting en financiering.....	2
1.3.1.	Begroting.....	2
1.3.2.	Financiering.....	2
1.3.3.	Planning.....	2
1.3.4.	Uitvoerende deskundigen.....	2
2.	ACHTERGROND.....	3
2.1.	Het AES Platform.....	3
3.	PROBLEEMSTELLING.....	5
3.1.	Operationeel.....	5
3.2.	Technologisch.....	5
4.	DOELSTELLING.....	6
4.1.	Operationele doelstelling.....	6
4.2.	Technologische doelstelling.....	6
4.3.	Kennisdoelstelling.....	6
5.	UITVOERING VAN HET PROJECT.....	7
5.1.	Het projectmanagement.....	7
5.2.	Fasering.....	7
5.2.1.	Fase I Voorbereiding.....	9
5.2.2.	Fase II Onderzoek.....	9
5.2.3.	De energieketen.....	10
5.2.4.	Nadere detaillering.....	10
5.2.5.	Aanpak.....	13
6.	WERKPAKKETTEN.....	14
6.1.	Fase I Voorbereiding.....	14
6.2.	Fase II Onderzoek.....	15
6.3.	Tijdsplanning.....	16
6.4.	Begroting.....	17
6.5.	Op te leveren stukken.....	17
7.	OVERIGE ASPECTEN.....	18
7.1.	Technologische samenwerking.....	18
7.2.	Technologische innovatie.....	18
7.3.	Economisch perspectief.....	18
7.3.1.	Product-markt positie.....	18
7.3.2.	AES platform en kennisuitwisseling.....	18

1. SAMENVATTING

1.1. Kennis en onderwijs doelstelling

Kennisverspreiding via onderwijs, onderzoek en een wisselwerking tussen onderwijs, kennisinstituten en de industrie is het hoofddoel van het AES Platform. Onderwijs heeft een taak basiskennis en fundamentele kennis over te dragen, maar praktische toepassingen zijn de brug van het onderwijs naar de praktijk. Daarom initieert het AES Platform studie projecten die praktische relevantie hebben. Het is daarbij de bedoeling dat deze projecten innovatieve waarde hebben.

In voorgaande jaren is veel door studenten in het kader van afstudeeropdrachten aan de projecten deelgenomen. Dit project is opgezet om op korte termijn voldoende diepgang in het onderwerp te krijgen. De resultaten zijn bestemd voor kennis verspreiding en vervolgwerk door bij voorbeeld studenten in het kader van hun studie. Het onderwerp is gerelateerd aan de maritieme techniek: voor Nederland een belangrijke doelgroep met een behoefte aan innovatieve ideeën.

Het project is door een werkgroep gedefinieerd en zal door deskundigen, al dan niet deelnemers aan het platform uitgevoerd worden. Het belang dat het MKC aan de initiatieven van het AES Platform hecht resulteert in een bijdrage "in natura" bij de uitvoering.

De financiering van het project bestaat uit drie componenten:

- Eigen bijdrage van het Platform uit contributies.
- Bijdrage door MARIN en TNO "in natura."
- Bijdrage van deelnemende bedrijven "in natura".
- Subsidie.

1.2. Project-deel 3

Het project beoogt een routekaart te maken voor het invoeren van nieuwe geavanceerde technologie aan boord van All Electric schepen. Er is al veel gepubliceerd maar een voor maritieme toepassing geschikt praktische gids is er niet. Inhoudelijk zijn er de volgende fasen:

- Technology Road Map naar het toepassen van nieuwe technologie, gerangschikt naar de ontwikkelingsstand van de technologie en in de tijd.
- Het leggen van een relatie tussen de technologie in praktische maritieme toepassing.
- Uitwerken van de nieuwe energie systemen met aanbevelingen

De technische beperkingen van de bestaande AES configuraties zijn te vinden in de extra energie omzetting die nu nodig is om van de mechanische energie van de opwekker (dieselmotor, gasturbine) eerst elektrische energie te maken. Na distributie wordt deze elektrische energie weer in mechanische omgezet. Dit vermindert het rendement en kost dus meer brandstof.

Directe omzetting van de latente energie van brandstoffen in elektriciteit - brandstofcellen - hebben derhalve een gunstig effect op het brandstofverbruik. Wanneer de procesrendementen van de nieuwe technologie ook nog hoger zijn dan die van de conventionele systemen, is het effect dubbel.

Een belangrijk aspect van de wijze van energieomzetting aan boord van schepen zijn de daarmee gepaard gaande emissies. Zolang er geen opgelegde eisen van overheidszijde bestaan zal dit aspect de operationele balans niet rechtstreeks en negatief beïnvloeden. Dat zal echter niet zo blijven. Nieuwe technologie die de emissies kan voorkomen zijn derhalve van groot belang.

Het lijkt dat sommige componenten de genoemde verbeteringen kunnen brengen, maar dat aan input of outputzijde nieuwe problemen opduiken. Deze kunnen logistieke moeilijkheden veroorzaken waardoor de toepasbaarheid uitblijft. Verder kan het ook zijn dat in de hele energie keten nog schakels ontbreken waardoor nog geen gesloten systeem mogelijk is. Er is nog geen, voor de ontwerper, praktisch overzicht van de nu of op termijn beschikbare nieuwe technologie. Vooral met het nadrukkelijke doel deze technologie in een voorontwerp te 'testen'. Het onderwerp voldoet aan de eis van innovatieve nieuwe kennis die nodig is voor het onderwijs in maritieme techniek en biedt de mogelijkheid voor vervolg studies voor en door studenten.

1.3. De projectbegroting en financiering

1.3.1. Begroting

De onderdelen van de projectfasen zijn als volgt begroot.

Taken projectfase 1 door deskundigen uit te voeren	€ 11.500,00
Taken projectfase 1 door MKC	0
Taken projectfase 2 door deskundigen uit te voeren	€ 41.500,00
Taken projectfase 2 door MKC	138 uren
Bijkomende kosten voor hulpmaterialen.	€ 5.200,00
Totaal	€ 58.250,00

1.3.2. Financiering

Bijdrage door AES Platform	€ 15.000,00
Bijdrage gevraagde subsidie	€ 43.250,00

1.3.3. Planning.

Fase 1: 6 weken
Fase 2: 20 weken

1.3.4. Uitvoerende deskundigen

Bakker Sliedrecht
ECN
Hogeschool Haarlem
Imtech Marine & Offshore
KM
KSG
Marin
TNO-PML
TU Delft

2. ACHTERGROND

2.1. Het AES Platform

Het AES Platform is een samenwerkingsverband van ca. 30 Nederlandse bedrijven en instellingen uit de industrie, het onderwijs en de kennisinstututen. Het Platform is geen rechtspersoon, en wordt gesteund door de Stichting Nederland Maritiem Land die de administratieve ondersteuning via de branche vereniging Holland Marine Equipment. Ook het samenwerkingsverband Maritiem Kennis Centrum (TNO, TU Delft, MARIN, KIM) verleent het Platform inhoudelijke personele deeltijd hulp. De deelnemers betalen een beperkte contributie om ook projecten te helpen financieren.

Het AES Platform is een kennis netwerk gericht op de integrale elektrische energie opwekking, distributie en aandrijving van voortstuwing en werktuigen aan boord van schepen. Daarmee wil het Platform innovaties ten behoeve van de maritieme sector aanmoedigen.

De doelstellingen van het AES Platform zijn:

- Stimuleren toepassingen van elektrificatie
- Verzamelen van operationele ervaringen
- Opbouwen en uitwisselen van kennis en gereedschappen
- Entameren van technologische (component-) ontwikkeling

Het AES Platform is zich bewust van de beperkingen die aan haar aspiraties kleven. Het bijeen brengen van contribuanten uit zeer diverse hoeken van de maritieme sector waarbij zowel de industrie, de kennis instituten en onderwijsinstellingen betrokken zijn verschaft het Platform echter zowel een "power base" als een basis voor integrale aanpak van ontwerp en evaluatie van de te bestuderen AES configuraties.

Een belangrijke activiteit van het AES platform is de formatie van werkgroepen ter bevordering van de kennisontwikkeling en uitwisseling.

De werkgroepen zijn:

Wergroep A

Studie onderwerpen: speciale Schepen

Karakter: studies van een kennelijke kandidaten voor AES configuraties. Hoewel het scheepsbouwkundig aspect van belang is ligt het accent op de optimalisatie aan de energiekant. Hier worden economisch optimale ontwerpen gezocht.

Werkgroep B

Studie onderwerpen: Alternatieve Schepen

Karakter: studies van marginale schepen waarbij alles "uit de kast moet komen", en met name met de scheepsbouwkundige optimalisatie een win situatie wordt gevonden. Het is de bedoeling grensverleggend te zijn.

Werkgroep C

Studie onderwerpen: Nieuwe Generatie Schepen.

Karakter: studies van nieuwe energie technologie ('emerging technologies') voor de energieketen aan boord van schepen. Daartoe kan een gasturbine generator, brandstof cellen, vermogens-elektronica, etc. gerekend worden.

Werkgroep D

Studie onderwerpen: Kosten-Baten

Karakter: selecteren, genereren en toepassen van (economische) evaluatie methodieken en software. (consistente evaluatie criteria, goede evaluatie systematiek en gereedschap)

Werkgroep C heeft haar taken als volgt ingericht. De staat van ontwikkeling waarin nieuwe generatie technologie zich bevind met het speciale doel de prestaties van de energieketen van Elektrische Schepen te verbeteren is niet zondermeer ter beschikking. Er is veel over gepubliceerd, maar slechts op component niveau of meestal niet specifiek gericht op maritieme toepassing.

Op grond van de gepubliceerde informatie wordt een verwachting opgeroepen van aanzienlijke verbeteringen van de rendementen in de energie opwekkings- en omzettingssystemen. Daarenboven worden grote verbeteringen van de emissies voorspeld tot en met het niveau van "zero emissie".

Er is dus reden om - specifiek in relatie tot de eisen die van toepassing zijn voor de installatie aan boord van een schip - een beter inzicht in de prestaties van de nieuwe technologie te krijgen. De gewenste informatie heeft betrekking op prestaties (input en output), 'compliance' met de bedrijfscondities (temperatuur, druk, externe dynamische belastingen als trillingen, schok scheepsbewegingen, gewicht, afmetingen, etc.) en prijs. Dit gepositioneerd in de tijdschaal van de ontwikkelingstatus: research, testmodel, prototype, eerste generatie, 'off the shelf'.

3. PROBLEEMSTELLING

3.1. Operationeel

Overzicht van de operationele problemen van de huidige AES configuraties.

Kosten aspecten zijn de belangrijkste maat voor de operationele effectiviteit van een scheepsontwerp en de energieketen in het bijzonder.

Hieronder vallen:

- Rente en afschrijving op de investering
- Brandstofkosten, die te maken hebben met de prijs van brandstof en de rendementen van energie omzetting.
- Onderhoud. (materiaal en personeelskosten)
- Personeelskosten bijv. in relatie tot automatisering.
- Toegenomen ladingscapaciteit.

Sommige AES configuraties die bijv. een grotere manoeuvreerbaarheid bieden kunnen door de te hoge operationele kosten afvallen. De vraag is welke nieuwe technologie in staat is de AES voordelen meer economisch aantrekkelijk te maken

3.2. Technologisch

Technische beperkingen van de bestaande AES configuraties zijn te vinden in de extra energie omzetting die nu nodig is om van de mechanische energie van de opwekker (dieselmotor, gasturbine) eerst elektrische energie te maken. Na distributie wordt deze elektrische energie weer in mechanische omgezet. Dit vermindert het rendement en kost dus meer brandstof. In bepaalde gevallen kan het optimale bedrijfspunt van de diesel generator het verlies aan rendement meer dan compenseren zodat de brandstof verbruik toch lager is. Voor schepen met veel werk- en hulpsystemen of sterk variërende energiebehoefte bieden AES configuraties de gezochte besparingen en operationele voordelen. Maar dat gaat niet in alle gevallen op. Directe omzetting van de latente energie van brandstoffen in elektriciteit - brandstofcellen - hebben derhalve een gunstig effect op het brandstofverbruik. Wanneer de procesrendementen van de nieuwe technologie ook nog hoger zijn dan die van de conventionele systemen, is het effect dubbel.

Een belangrijk aspect van de wijze van energieomzetting aan boord van schepen zijn de daarmee gepaard gaande emissies. Zolang er geen opgelegde eisen van overheidszijde bestaan zal dit aspect de operationele balans niet rechtstreeks en negatief beïnvloeden. Dat zal echter niet zo blijven. Nieuwe technologie die de emissies kan voorkomen zijn derhalve van groot belang.

Het lijkt dat sommige componenten de genoemde verbeteringen kunnen brengen, maar dat aan input of outputzijde nieuwe problemen opduiken. Deze kunnen logistieke moeilijkheden veroorzaken waardoor de toepasbaarheid uitblijft. Verder kan het ook zijn dat in de hele energie keten nog schakels ontbreken waardoor nog geen gesloten systeem mogelijk is.

Er is nog geen, voor de ontwerper, praktisch overzicht van de nu of op termijn beschikbare nieuwe technologie. Vooral met het nadrukkelijke doel deze technologie in een voorontwerp te 'testen'.

4. DOELSTELLING

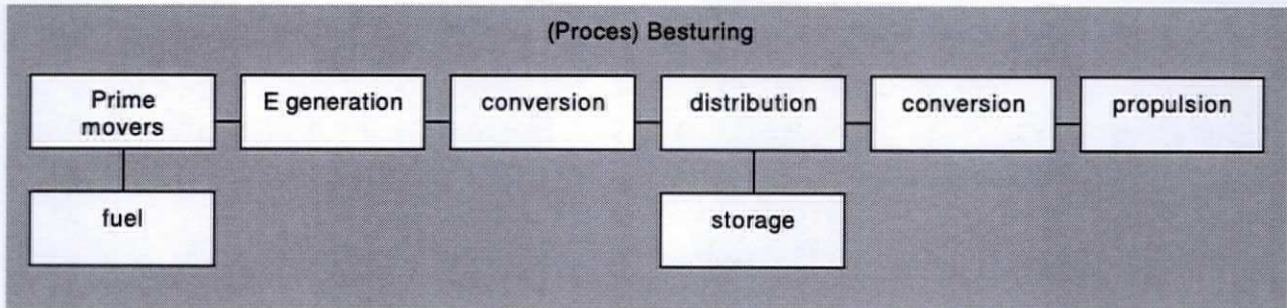
4.1. Operationele doelstelling

Het opstellen van functionele eisen voor AES configuraties die voldoende generiek (algemeen toepasbaar op alle categorieën schepen) en anderzijds voldoende praktisch om een toetsbaar criterium zijn.

Bijvoorbeeld de logistieke eisen voor de brandstof, trillingsniveau aan de fundaties van componenten, veiligheidseisen, etc.

4.2. Technologische doelstelling

De gewenste informatie heeft betrekking op technologie die een volledige energieketen voor schepen mogelijk maakt. De 'kapstok' waar de invulling van de doelstelling wordt opgehangen.



Het is de bedoeling voor ieder van de getoonde blokken de pertinente informatie te ordenen. Daarnaast moet ook op de 'interfaces' tussen de blokken te letten. Dat betekent het vaststellen van kwaliteit en kwantiteit van de output-input van een gelijksoortige interface (elektrisch-elektrisch). Wanneer de interface niet over gelijksoortige output-input gaat moet bezien worden of een extra blok gedefinieerd moet worden (waterstofhoudend gas uit en zuiver waterstof in)

4.3. Kennisdoelstelling

Door het uitvoeren van de studie opbouwen van kennis op het gebied van AES concepten in het algemeen en nieuwe generatie technologie voor AES configuraties in het bijzonder. Het uitwisselen van deze kennis onder de deelnemers aan het AES Platform.

Het stimuleren van het realiseren van een nieuwe generatie demo schip. (Het AES Platform treedt terug wanneer een project commercieel wordt opgepakt door een bedrijf of consortium).

5. UITVOERING VAN HET PROJECT

5.1. Het projectmanagement.

In overeenstemming met de werkmethode van het AES Platform acteert de werkgroep als opdrachtgever en commissie van toezicht. Met de rapporteur en contractor die de werkgroep terzijde staan, worden het eisen pakket opgesteld en de uitbesteding begeleid. De financiële aspecten van het project worden door HME voor het Platform afgehandeld.

Na het aanvaarden van de opdracht wordt de voortgang van het werk door de werkgroep bewaakt en ook de afname van het eindproduct gedaan.

Voor dit project wordt een uitvoerder die kennis van voldoende diepgang heeft en de breedte van het onderzoeksveld kan overzien. Verder is praktische ervaring met het ontwerp en de installatie van de hele energieketen gewenst.

5.2. Fasering

5.2.1. Fase I Voorbereiding

Het project begint met het formuleren van een 'algemeen functioneel scheepsbestek' passend op het format van de 'energieketen' van de technologische doelstelling. Dit bestek heeft betrekking op de algemene eisen die te stellen zijn aan diverse scheepstypen. Hier kan ook verwezen worden naar algemene normen en regelgeving (bijv. Lloyd's, SI, SOLAS, etc). Hierbij wordt met de werkgroep overleg gevoerd. Dit functioneel scheepsbestek levert de eisen op waaraan te ontwerpen systemen moeten voldoen en geeft de criteria voor de beoordeling van de nieuwe technologie.

Omdat het project zich richt op de energieketen aan boord van een schip zal dit deel van het scheepsbestek beperkt zijn de volgende onderwerpen.

- Voortstuwing
- Opwekking en distributie van elektrische energie
- Stuurinstallatie
- Hulpsystemen

Een tweede aspect in de voorbereidende fase is het samenstellen van een overzicht van kennisbronnen, benodigd voor fase 2 Onderzoek. Dit overzicht zal tenminste de volgende aspecten omvatten:

- De projecten die op dit gebied zijn gepubliceerd en lopend zijn
- De leveranciers van systemen en componenten
- De lopende R&D programma's

De onderwerpen waarover kennis nodig is zijn:

<u>Prime movers</u>	Interne verbrandingsmotoren Gasturbines enkelvoudige cyclus Gasturbines gecombineerde cyclus Stirling motor Brandstofcellen Hybride systemen Zonnecellen Opslag van brandstoffen Fuel reforming
<u>E opwekking</u>	Asynchrone generatoren Synchrone generatoren High speed generatoren Gelijkstroomgeneratoren PM generatoren
<u>E distributie</u>	Middenspanning AC – DC distributie Schakelmateriaal / beveiligingen Kabels en railsystemen
<u>Opslag van energie</u>	Secundaire batterijen Condensatoren Vliegwielen Magnetische opslag
<u>Conversie</u>	Transformatoren Roterende omzeters Statische omzeters
<u>Aandrijvingen</u>	Omzeters Synchrone motoren Asynchrone motoren Gelijkstroommotoren PM motoren
<u>Voortstuwars</u>	Conventionele schroeven Contra Rotating Propellor Pumpjet Azimuth thrusters Pod's Waterjets Whaletail / paddlewheel Voith Schneider

Het derde aspect dat in de voorbereidende fase wordt vastgelegd is formaten zijn de verschillende technische aspecten van de delen in de energieketen die in de onderzoek fase moeten worden beschreven. Hierdoor wordt een uniforme manier van beschrijven over de verschillende taken zeker gesteld.

5.2.2. Fase II Onderzoek

Het onderzoek heeft tot doel een praktische beschrijving te geven van mogelijke energie ketens voor toepassing aan boord van schepen, in het bijzonder AES concepten. Het gaat daarbij niet om de beschrijving van de afzonderlijke componenten in de keten, maar om de componenten in samengestelde keten. De verschillende (hoofd)componenten maken daar deel van uit.

Onder de energie keten wordt verstaan de gehele keten van brandstof, de chemische energie drager, de conversie van chemische naar mechanische en/of elektrische energie, energie distributie en uiteindelijk de omzetting naar benodigde vorm (stuwkracht, warmte, koude, hulpenergie).

Het onderzoek heeft nadrukkelijk niet als doelstelling de haalbaarheid van het AES concept voor een schip te onderzoeken. Uitgangspunt is een All Electric Ship. De invulling en onderlinge afstemming van de componenten van de energie keten vormt de doelstelling van het onderzoek.

De belangrijkste parameters die het onderzoeksveld bepalen zijn het vermogen voor voortstuwing, het vermogen benodigd voor de hoofdfunctie(s) van het schip en het gezamenlijke overige verbruik. Hierdoor ontstaat een groot speelveld. Reëel vermogen voor voortstuwing bedraagt enkele honderden kilowatt tot tientallen megawatt. Overige verbruikers vragen tientallen kilowatt tot enkele megawatt vermogen.

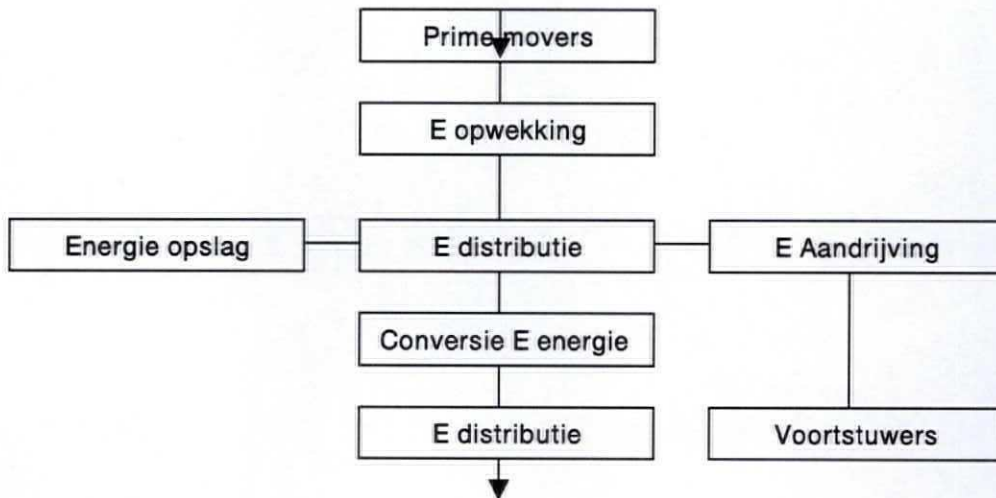
De technologische mogelijkheden en verwachtingen zijn sterk bepalend voor de invulling en beschrijving van de mogelijke energie ketens. In het onderzoek wordt onderscheid gemaakt in drie technologie ontwikkelingsstadia.

- **Bewezen technologie**, verkrijgbaar bij verschillende leveranciers, veelvuldig toegepast.
- **Nieuwe technologie**, klein aantal leveranciers, klein aantal (commerciële) toepassingen.
- **Toekomstige technologie**, één of enkele leveranciers, prototypen, eerste toepassingen over 5 tot 10 jaar.

5.2.3. De energieketen

Het onderzoek is gericht op de gehele energie keten van een schip. Strikt gezien begint deze energie keten bij de brandstof. In het onderzoek worden brandstoffen op zich niet nader beschouwd, maar worden gezien als logisch gevolg van een configuratie met een bepaalde prime mover. De implicaties van het toepassen van een bepaalde brandstof worden in het onderzoek wel meegenomen omdat zij direct van invloed zijn op het scheepsontwerp.

De energie keten van een schip is voor dit project als volgt gedefinieerd.



De bovenstaande schematische voorstelling geeft de hoofdonderwerpen aan van het onderzoek. Deze hoofdonderwerpen zijn geen op zich staande studies.

5.2.4. Nadere detaillering

Prime movers

De prime movers verzorgen de omzetting van chemische energie in mechanische energie. De energie wordt geleverd in de vorm van koppel op een draaiende as. Dit impliceert dat deze prime movers in samenhang met het hoofdonderwerp E opwekking moeten worden bekeken. De te beschrijven prime movers zijn

- Interne verbrandingsmotoren
- Gasturbines met enkelvoudige cyclus
- Gasturbines met gecombineerde cyclus
- Stirling motor

De verschillende brandstofcel technologieën zetten chemische energie direct om in elektrische energie. In de structuur van dit project zijn de brandstofcellen ondergebracht in de groep van de prime movers. De te beschrijven brandstofcellen zijn;

Brandstofcellen	Proton Exchange Membrane brandstofcel, PEMFC
	Alkaline brandstofcel, A FC

Phosphoric Acid brandstofcel, PAFC
Molton Carbonate brandstofcel, MCFC
Solid Oxide brandstofcel, SOFC
Direct Methanol brandstofcel, DMFC

Er zijn ook hybride systemen die een gasturbine combineren met een brandstofcel en mogelijk ook andere combinaties van prime movers. Ook deze hybride oplossingen maken deel uit van het onderzoek.

Voor een aantal toepassingen kunnen zonnecellen dienen als directe opwekkers van elektrische energie.

Bijna alle prime movers maken gebruik van een (logistieke) brandstof waarin de energie is opgeslagen. De actieradius en in richting van het schip, alsmede hulpsystemen en veiligheidsvoorzieningen zijn bepalend voor het scheepsonwerp. Deze aspecten zullen daarom ook beschreven moeten worden.

Niet alle brandstofcellen zijn kunnen werken met de algemeen beschikbare (logistieke) brandstoffen. Fuel reforming is een proces waarbij een logistieke brandstof wordt omgezet in een voor een bepaald type brandstofcel geschikte brandstof. Fuel reforming is daarmee in combinatie met brandstofcellen een belangrijk onderwerp in de gehele keten.

Opwekking van elektrische energie (generatoren)

Voor het omzetten van mechanische energie in elektrische energie kunnen verschillende generatoren worden toegepast. Aandrijving vindt plaats door één van de eerder genoemde prime movers. De generator bepaalt aan de aangedreven kant mede het karakter van de prime mover, en aan de uitgang de karakteristieken van het elektrisch distributienet en de daarmee samenhangende beveiligingen. De volgende generatoren worden beschreven:

- Asynchrone generatoren
- Synchrone generatoren
- High speed generatoren
- Gelijkstroomgeneratoren
- PM generatoren

E distributie

De distributie van elektrische energie hangt nauw samen met de primaire energie opwekking. Brandstofcellen en gelijkstroom generatoren leveren per definitie een gelijkstroom, de overige opwekkers een wisselstroom. De gevraagde vermogens en de schakelcapaciteit van beveiligingen en schakelaars zijn bepalend voor de keuze van het spanningsniveau. De onderwerpen die beschreven worden zijn:

- Middenspanning
- AC – DC distributie
- Schakelmateriaal / beveiligingen
- Kabels en railsystemen

Het toepassen van midden- en hoogspanning verdient bijzondere aandacht, omdat veel toekomstige gebruikers er nog huiverig voor zijn, en de regelgeving nog niet alle gevallen voldoende op in heeft gespeeld.

Opslag van energie

Het gebruik van energie opslag als onderdeel van de energieketen biedt in het AES concept mogelijkheden voor peak shaving, het bedienen van prime movers in een optimaal werkpunt, en ononderbroken energievoorziening bij uitval van één of meerdere prime movers. In het onderzoek zullen de volgende methoden van energie opslag aan bod komen:

- Secundaire batterijen
- Condensatoren
- Vliegwielen
- Magnetische opslag

Conversie

Lang niet alle apparatuur aan boord van schip maakt gebruik van dezelfde voedingsspanning (dat wil zeggen zelfde spanning en zelfde frequentie). Het is dus noodzakelijk om elektrische voeding omzetten, te converteren, naar een andere voedingsspanning / frequentie.

Ook omzetting van wisselspanning naar gelijkspanning en van gelijkspanning naar wisselspanning kan noodzakelijk zijn.

De volgende technologieën zullen beschreven worden:

- Transformatoren (AC – AC)
- Roterende omzetters (AC – AC, AC – DC, DC – AC, DC – DC)
- Statische omzetters (AC – AC, AC – DC, DC – AC, DC – DC)

Elektrische aandrijvingen

Elektrische aandrijvingen zetten elektrische energie om in mechanische energie, in de meeste gevallen in vorm van een draaiende as. De omzetting verloopt via een vaste koppel-toeren kromme, of geheel regelbaar. In veel gevallen wordt bij regelbare aandrijvingen gebruik gemaakt van statische omzetters, gekoppeld aan een specifiek voor dit doel ontworpen elektromotor. Het onderzoek zal elektrische aandrijvingen beschrijven die zijn samengesteld uit de volgende componenten:

- Omzetters
- Synchronische motoren
- Asynchrone motoren
- Gelijkstroommotoren
- PM motoren

Voortstuwings

De laatste schakel in de energieketen en de grootste verbruiker in het schip is de voortstuwing. De meeste voortstuwings zetten het via een roterende as geleverde vermogen om in stuwkracht. De aard en plaats in het schip van de voortstuwings en de aandrijving zijn van groot belang voor het uiteindelijke scheepsontwerp. De volgende voortstuwings zullen in het onderzoek worden beschreven:

- Conventionele schroeven
- Contra Rotating Propellor
- Pumpjet
- Azimuth thrusters
- Pod's
- Waterjets
- Whaletail / paddlewheel
- Voith Schneider

5.2.5. Aanpak

De eerste stap in de uitvoeringsfase is het opstellen van een plan de eerder aangegeven bronnen te onderzoeken. Dit houdt in:

- Documentonderzoek.
- Benaderen van leveranciers.
- Organiseren workshops met specialisten en onderzoekers.
- Overleg met reders over specifieke wensen, eisen en acceptatievoorwaarden voor nieuwe technologie. Met name het invoeren van nieuwe logistieke maatregelen zal een drempel opwerpen

Vervolgens wordt in fase II een overzicht van de concreet te verschaffen informatie opgesteld (prestatie gegevens, operationele omgevingsgegevens of beperkingen, dimensies en gewichten, prijsindicaties). Het is van even groot belang de interfaces tussen de delen van de energieketen te identificeren en te benoemen. Deze fase zal deels 'individuele' componenten beschrijven, deels de een aantal configuraties van de energie keten beschouwen.

Het is uitdrukkelijk de bedoeling deze gegevens naast de overeenkomstige systeem of component gegevens van de huidige beschikbare componenten te stellen. Een tijdsas of tijdspad voor het bewezen zijn (worden) van de prestaties is gewenst.

6. WERKPAKKETTEN

6.1 Fase I Voorbereiding

Opstellen van de uitgangspunten eisen en criteria zoals in Hoofdstuk 5 weergegeven.
Onderzoek naar recente literatuur en openbare (Europese) bronnen op het gebied van nieuwe technologie voor de hele energie keten. (open bronnen, leveranciers, R&D programma's)

Hoofdgroep	Taak	Uitvoerder	Budget
Functioneel bestek	Voortstuwing		55
	Opwekking en distributie energie		55
	Hulpsystemen		14
	Overzicht kennis bronnen		55
Voorbereiding beschrijvingen		7	

Het totale budget voor Fase 1 is vastgesteld op 186 uren.

6.2. Fase II Onderzoek

Overzicht voor de hele energie keten gegeven in Hoofdstuk 5. een goede definitie van de componenten, de demarcatie en de interfaces

Een beschrijving van systeem configuraties in relatie met de toepassing op de te onderscheiden scheepstypen en hun vaarprofiel.

Hoofdgroep	Uitvoerder	Budget
Prime movers	diversen	214
E opwekking	Bakker	76
E distributie	Imtech M&O	62
Opslag van energie	TNO / ECN	90
Conversie	Hogeschool Haarlem	48
Aandrijvingen	Bakker	76
Voortstuwars	Marin / KSG	90
Berekeningen	KM / TNO	28
Rapportage		110

Hoofdgroep	Taak	Uitvoerder	Budget
Prime movers	Interne verbrandingsmotoren	TU Delft / KIM	7
	Gasturbines enkelvoudige cyclus	TU Delft / KIM	14
	Gasturbines gecombineerde cyclus	TU Delft / KIM	28
	Stirling motor	TU Delft / KIM	14
	Brandstofcellen	ECN / TNO	28
	Hybride systemen	ECN / TNO / KSG	55
	Zonnecellen	ECN / TNO	14
	Opslag van brandstoffen	ECN / TNO / KIM	28
	Fuel reforming	ECN	28
E opwekking	Asynchrone generatoren	Bakker	7
	Synchrone generatoren	Bakker	7
	High speed generatoren	Bakker	28
	Gelijkstroomgeneratoren	Bakker	7
	PM generatoren	Bakker	28
E distributie	Middenspanning	Imtech	14
	AC - DC	Imtech	14
	Schakelmateriaal / beveiligingen	Imtech	28
	Kabels en railsystemen	Imtech	7
Opslag van energie	Secundaire batterijen	TNO / ECN	7
	Condensatoren	TNO	28
	Vliegwielen	TNO	28
	Magnetische opslag	TNO	28
Conversie	Transformatoren	Hogeschool Haarlem	7
	Roterende omzeters	Hogeschool Haarlem	14
	Statische omzeters	Hogeschool Haarlem	28

Aandrijvingen	Omzetters	Bakker	28
	Synchrone motoren	Bakker	7
	Asynchrone motoren	Bakker	7
	Gelijkstroommotoren	Bakker	7
	PM motoren	Bakker	28
Voortstuwens	Conventionele schroeven	Marin / KSG	7
	Contra Rotating Propellor	Marin / KSG	14
	Pumpjet	Marin / KSG	14
	Azimuth thrusters	Marin / KSG	7
	Pod's	Marin / KSG	14
	Waterjets	Marin / KSG	14
	Whaletail / paddlewheel	Marin / KSG	14
	Voith Schneider	Marin / KSG	7
Beschrijven configuraties	Ondersteunende berekeningen	KM / TNO	28
Eindrapport			110

Alle budgetten in uren. Het totale budget voor Fase 2 is vastgesteld op 793 uren

6.3. Tijdsplanning

Fase 1
6 weken

Fase 2
20 weken

6.4. Begroting

De begroting voor dit project is gebaseerd op een gemiddeld uurtarief van € 50,00. De bijdragen "in natura" van het MKC zijn de kolom MKC opgenomen. Op basis van bovenstaande budgetten is de begroting als volgt:

<u>Hoofdgroep</u>		<u>Budget</u>	<u>MKC</u>
Functioneel bestek	Voortstuwing	2.750	
	Opwekking en distributie energie	2.750	
	Hulpsystemen	700	
	Overzicht kennis bronnen	2.750	
Vorbereiding beschrijvingen	350		
Flexibel budget		2.200	
Totaal voor Fase1		11.500	
Onderzoek	Prime movers	7.600	62 uren
	E opwekking	3.800	
	E distributie	3.100	
	Opslag van energie	4.300	3 uren
	Conversie	2.400	
	Aandrijvingen	3.800	
	Voortstuwvers	2.250	45 uren
	Berekeningen	0	28 uren
	Rapportage	5.500	
Flexibel budget		8.800	
Totaal voor Fase 2		41.550	138 uren
Materiaal kosten		5.200	
TOTAAL BEGROTING		58.050	138 uren

6.5. Op te leveren stukken

Een rapport met een technologische route beschrijving.

Overzicht van energieketens per scheepstype en aanbevelingen

Een eind rapport en voordracht van de resultaten met diverse berekeningen en voorbeelden

7. OVERIGE ASPECTEN

7.1. Technologische samenwerking

AES platform: project begeleiding en aansturing van de studie door de werkgroep bestaande uit vertegenwoordigers van: TNO-PML, ECN, TU Delft, KSG, Hogeschool Haarlem, Imtech Marine & Offshore, Bakker Sliedrecht, KM, Hogeschool van Amsterdam, Damen Shipyards.

Het is uitdrukkelijk gewenst tijdens de studie aansluiting bij, of samenwerking met, andere onderzoeken, die op dit terrein lopen te zoeken.

7.2 Technologische innovatie

De compositie van een praktische, hanteerbare wegwijzer voor het ontwerpen van een (duurzame) energieketen voor de opwekking elektrische energie.

Ecologische (emissieloze) aspecten van AES configuraties met nieuwe generatie technologie.

7.3. Economisch perspectief

7.3.1. Product-markt positie

Geavanceerde componenten en technologieën op zich zelf krijgen pas de mogelijkheid op de markt door te breken wanneer die tot een compleet systeem geïntegreerd worden. (Kennis van integratie is even belangrijk als kennis van de technologie.

Wie het eerst met een operationeel schip met een geïntegreerd energiesysteem op basis van nieuwe technologie komt, heeft een belangrijk voordeel.

7.3.2. AES platform en kennisuitwisseling

Strategische doelstelling van het AES Platform en de mogelijkheid met het project een zinvolle bijdrage (subsidie) te verkrijgen waarmee de kennisuitwisseling gesteund wordt.

Spin-off naar de deelnemers (= industrie, onderwijs en kennis instituten) en daarbuiten bij het realiseren van het project in een commercieel traject.

PLAN VAN AANPAK

BIJLAGE A2

AES-werkgroep C

Opdrachtgever:
AES Platform

Opgesteld door:
N.J. Versteeg

Revisie status
B

Gecontroleerd door
R. Dingemanse

Datum
14 juni 2004

REVISIE STATUS

<u>REV</u>	<u>DATUM</u>	<u>BESCHRIJVING</u>	<u>GEC.</u>	<u>GOEDKEURD</u>
A	21-11-03	Project aanvraag	Dingemanse	
B	14-06-04	Opstart vergadering	Dingemanse	

INHOUDSOPGAVE

1.	INTRODUCTIE.....	1
2.	PROJECT STRUCTUUR.....	2
2.1.	Project organisatie.....	2
2.2.	Project werkzaamheden.....	2
3.	COMMUNICATIE.....	3
4.	PROJECT AANPAK EN UITVOERING.....	4
4.1.	Operationele doelstelling.....	4
4.2.	Technologische doelstelling.....	4
4.3.	Fase 1.....	4
4.4.	Fase 2.....	5

BIJLAGEN

I	Werkpakketten
---	---------------

1. INTRODUCTIE

Het platform All Electric Ship (AES) houdt zich bezig met het initiëren van projecten waarbij de toepassing van alternatieve energiesystemen aan boord van schepen nader wordt onderzocht. In dat kader wordt er gezocht naar innoverende ontwerpen welke non-conventionele energievoorziening vereisen. Het platform is ingedeeld in een aantal werkgroepen die ieder een eigen aspect van de AES toepassing bestuderen.

Werkgroep C, Technologie voor Nieuwe Generatie Schepen, zal een studie doen naar nieuwe technologieën (emerging technologies) voor de energieketen aan boord van schepen. Daartoe kunnen een gasturbine generator, brandstofcellen, vermogenselektronica, etc. gerekend worden.

2 PROJECT STRUCTUUR

2.1 Project organisatie

Het project van werkgroep C zal worden uitgevoerd door het projectteam waarin vertegenwoordigers van de volgende bedrijven zitting hebben:

Bakker Sliedrecht
ECN
Hogeschool Haarlem
Imtech Marine & Offshore
KM
Damen
Marin
TNO-PML

Omdat de heer R.P. Dingemanse (Imtech M&O) vanwege zijn reguliere werkzaamheden minder tijd kan besteden aan het voorzitterschap van het projectteam, is deze taak overgenomen door N.J. Versteeg.

Het project team dekt alle benodigde expertisevelden af, maar als er behoefte aan bestaat zullen andere partijen benaderd kunnen worden om specifieke kennis aan te leveren. Binnen het platform zal contact worden gehouden met de ander werkgroepen over relevante ontwikkelingen.

2.2 Project werkzaamheden

De werkzaamheden met de organisaties die ze uitvoeren zijn weergegeven in bijlage A. Voor de werkzaamheden van fase 1 zal in eerste vergadering worden vastgesteld wie die gaan uitvoeren. Voor het bepalen van de te beschrijven grootheden per keten-onderdeel zal de voorzitter samen met twee leden van de werkgroep een voorstel maken en dit binnen 4 weken na de eerste vergadering aan de leden mailen; deze grootheden vormen de basis voor de werkzaamheden in fase 2.

3 COMMUNICATIE

Vergaderingen

In de eerste vergadering van dinsdag 15 juni 2004 zullen de benodigde projectafspraken worden gemaakt en de taken onderling worden afgestemd. Vanwege de vakantieperiode zal in de eerste vergadering het vergaderschema worden besproken, maar de eerste gedachten gaan uit naar een maandelijkse vergadercyclus.

Communicatie gedurende het project

De onderlinge communicatie en gegevensuitwisseling zal telefonisch dan wel via e-mail plaatsvinden.

Communicatie met de opdrachtgever of andere externe partijen verloopt in principe centraal via de voorzitter van de werkgroep

Rapportage

Ieder lid van de werkgroep verzorgt zijn eigen deel van de tussentijdse en eindrapportage. Een nog te vormen kernteam zal de samenstelling van het eindrapport verzorgen. De rapporten zullen in het Nederlands geschreven worden (bijlagen mogen ook in het Engels).

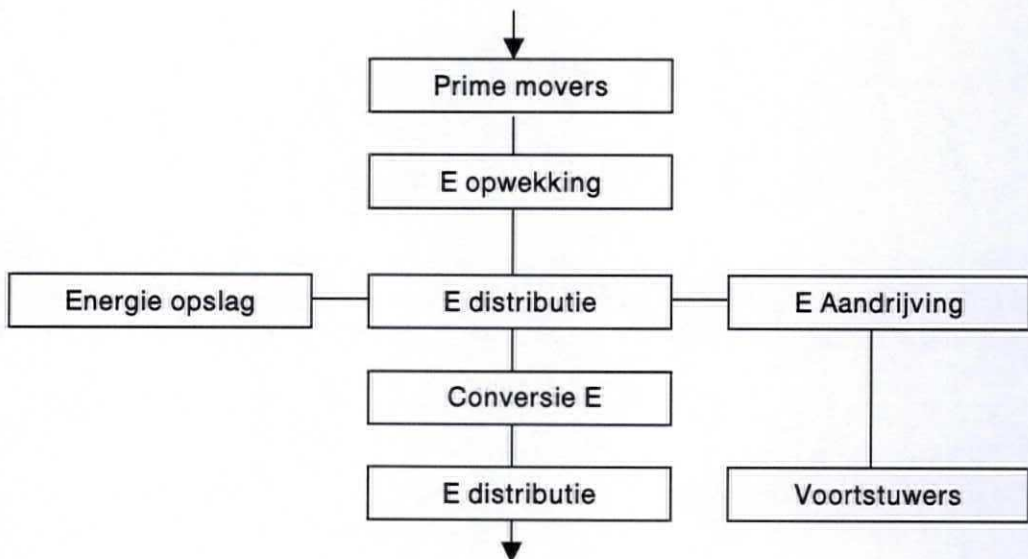
4 PROJECT AANPAK EN UITVOERING

4.1. Operationele doelstelling

Het opstellen van functionele eisen voor AES-configuraties die enerzijds voldoende generiek (algemeen toepasbaar op alle categorieën schepen) en anderzijds voldoende praktisch zijn om toetsbare criteria te kunnen formuleren voor vergelijking van de verschillende systeem oplossingen.

4.2. Technologische doelstelling

Het ordenen van de pertinente informatie van ieder van de blokken van het hieronder aangegeven generieke blokschema van energieketens aan boord van schepen.



Bij deze ordening moeten alleen de relevante grootheden worden geïnventariseerd, waarmee het mogelijk wordt om verschillende systeemoplossingen met elkaar te vergelijken.

De gewenste informatie heeft betrekking op technologie die een volledige energieketen voor schepen mogelijk maakt (= de kapstok waar de invulling van de doelstelling aan wordt opgehangen).

4.3. Fase 1

Om de operationele doelstelling te realiseren, dienen de volgende activiteiten te worden uitgevoerd:

- Een algemeen functioneel scheepsbestek moet worden opgesteld voor de energieketen, waarin algemene eisen worden vastgelegd die toepasbaar zijn op diverse scheepstypen
- Een overzicht van kennisbronnen dient te worden opgesteld
- De demarcatie en interfaces van de ketenonderdelen dienen te gedefinieerd worden
- De relevante grootheden per onderdeel van de energieketen dienen te worden beschreven om

- De keten te kunnen bouwen
- Verschillende technologische systeemoplossingen met elkaar te vergelijken (b.v. om te bepalen wanneer voor energieopwekking een brandstofcelsysteem en betere oplossing wordt dan een dieselgenerator).
- Onderlinge vergelijking van verschillende ketens mogelijk te maken

Ad c. Eerst zal in een beperkt gezelschap gebrainstormd worden over de grootheden die per systeem vastgelegd moeten worden.

Bij het maken van het programma GES is al het nodige werk in deze richting gedaan, zodat dit programma als informatiebron kan worden bekeken. De nadelen van het programma dienen in deze studie te worden ondervangen.

Het resultaat van deze sessie zal in de werkgroep worden besproken, teneinde het vervolgtraject uit te kunnen zetten.

4.4. Fase 2

In fase 2 zullen praktische beschrijvingen gegeven worden van mogelijke AES energie ketens aan boord van schepen aan de hand van de onderwerpen die in fase 1 zijn geïnterpreteerd. Het gaat daarbij niet om de beschrijving van de afzonderlijke componenten in de keten, maar om de componenten in de samengestelde keten. De technologische mogelijkheden zullen worden onderscheiden naar drie ontwikkelingsstadia:

- **Bewezen technologie**, verkrijgbaar bij verschillende leveranciers, veelvuldig toegepast.
- **Nieuwe technologie**, klein aantal leveranciers, klein aantal (commerciële) toepassingen.
- **Toekomstige technologie**, één of enkele leveranciers, prototypen, eerste toepassingen over 5 tot 10 jaar.

In deze fase zal gezocht worden naar criteria die bepalend zijn om van de ene oplossingsrichting voor een bepaald energieketen-onderdeel, over te gaan naar een andere oplossing. Voor de verschillende ketenonderdelen dient daartoe van iedere mogelijke invulling het volgende vastgelegd te worden:

- a. De grenzen waarbinnen die invulling mogelijk is
- b. Wanneer een andere invulling meer geschikt wordt (b.v. vanwege efficiëntie)

Bijlage I

1 WERKPAKKETTEN

1.1. Fase 1 Voorbereiding

Opstellen van de uitgangspunten eisen en criteria zoals in Hoofdstuk 5 weergegeven. Onderzoek naar recente literatuur en openbare (Europese) bronnen op het gebied van nieuwe technologie voor de hele energie keten. (open bronnen, leveranciers, R&D programma's)

Hoofdgroep	Taak	Uitvoerder	Budget
Functioneel bestek	Voortstuwning		55
	Opwekking en distributie energie		55
	Hulpsystemen		14
	Overzicht kennis bronnen		55
Voorbereiding beschrijvingen			7

Het totale budget voor Fase 1 is vastgesteld op 186 uren.

1.2. Fase 2 Onderzoek

Overzicht voor de hele energie keten gegeven in Hoofdstuk 5. een goede definitie van de componenten, de demarcatie en de interfaces

Een beschrijving van systeem configuraties in relatie met de toepassing op de te onderscheiden scheepstypen en hun vaarprofiel.

Hoofdgroep	Uitvoerder	Budget
Prime movers	diversen	214
E opwekking	Bakker	76
E distributie	Imtech M&O	62
Opslag van energie	TNO / ECN	90
Conversie	Hogeschool Haarlem	48
Aandrijvingen	Bakker	76
Voortstuwings	Marin / KSG	90
Berekeningen	KM / TNO	28
Rapportage		110

Hoofdgroep	Taak	Uitvoerder	Budget
Prime movers	Interne verbrandingsmotoren	TU Delft / KIM	7
	Gasturbines enkelvoudige cyclus	TU Delft / KIM	14
	Gasturbines gecombineerde cyclus	TU Delft / KIM	28
	Stirling motor	TU Delft / KIM	14
	Brandstofcellen	ECN / TNO	28
	Hybride systemen	ECN / TNO / KSG	55
	Zonnecellen	ECN / TNO	14
	Opslag van brandstoffen	ECN / TNO / KIM	28
	Fuel reforming	ECN	28

E opwekking	Asynchrone generatoren	Bakker	7
	Synchrone generatoren	Bakker	7
	High speed generatoren	Bakker	28
	Gelijkstroomgeneratoren	Bakker	7
	PM generatoren	Bakker	28
E distributie	Middenspanning	Imtech	14
	AC - DC	Imtech	14
	Schakelmateriaal / beveiligingen	Imtech	28
	Kabels en railsystemen	Imtech	7
Opslag van energie	Secundaire batterijen	TNO / ECN	7
	Condensatoren	TNO	28
	Vliegwielen	TNO	28
	Magnetische opslag	TNO	28
Conversie	Transformatoren	Hogeschool Haarlem	7
	Roterende omzeters	Hogeschool Haarlem	14
	Statische omzeters	Hogeschool Haarlem	28
Aandrijvingen	Omzeters	Bakker	28
	Synchrone motoren	Bakker	7
	Asynchrone motoren	Bakker	7
	Gelijkstroommotoren	Bakker	7
	PM motoren	Bakker	28
Voortstuwars	Conventionele schroeven	Marin / Damen	7
	Contra Rotating Propellor	Marin / Damen	14
	Pumpjet	Marin / Damen	14
	Azimuth thrusters	Marin / Damen	7
	Pod's	Marin / Damen	14
	Waterjets	Marin / Damen	14
	Whaletail / paddlewheel	Marin / Damen	14
Voith Schneider	Marin / Damen	7	
Beschrijven configuraties	Ondersteunende berekeningen	KM / TNO	28
Eindrapport			110

Alle budgetten in uren. Het totale budget voor Fase 2 is vastgesteld op 793 uren

1.3. Tijdsplanning

Fase 1

6 weken

Fase 2

20 weken

Activiteit	juli	aug	sept	okt	nov	dec	jan	febr
Opstellen projectplan								
Fase 1								
Generiek bestek								
Overz. kennisbronnen								
Demarcaties, interfaces								
Relevante grootheden								
Fase 2								
Overzicht bewezen technologie								
Overzicht nieuwe technologie								
Overzicht toekomstige technologie								
Opstellen criteria componentkeuze								
Opstellen criteria ketenkeuze								
Samenstellen mogelijke energieketens								
Opstellen eindrapport								
Workshop								

ENERGIEKETENANALYSE MET GES

BIJLAGE B

AES-Nieuwe Technologie

INHOUDSOPGAVE

1.	INLEIDING GES.....	1
1.1	GES	1
1.2	Gebruik van GES bij het beoordelen van alternatieven in de energieketens voor schepen	1
2.	ENERGIEKETENS EN COMPONENTEN DAARIN	3
3.	INTERFACES EN DEMARCATIES TUSSEN COMPONENTEN.....	5
4.	MODELLEN IN GES EN PARAMETERS VAN GES EN AES-WG-C.....	7
4.1	Relevante grootheden van ketencomponenten.....	7
5.	VERMOGENSPROFIEL.....	13
6.	VERGELIJKINGSCRITERIA EN WEEGFACTOREN	14
7.	SAMENSTELLEN EN ANALYSE VAN ENERGIEKETENS IN GES.....	15
7.1	De keten	15
7.2	Alternatieven voor bepaalde componenten.....	15
7.3	Het vermogensprofiel.....	15
7.4	Vergelijkingscriteria en weegfactoren.....	16
7.5	Gewenste extra functionaliteiten van GES	17
8.	CASE STUDY: SWATH FAST FERRY	18
8.1	Model van de SWATH fast ferry	18
8.2	Het vermogensprofiel.....	21
8.3	Simulatieresultaten uit GES.....	21
8.4	Conclusie.....	26
9.	BIJDRAGE VAN WERKGROEP C AAN GES	27
9.1	Samenvatting	27
9.2	Inleiding	27
9.3	Overzicht bruikbare data voor GES	28
9.4	Conclusie.....	32
10.	NOTEN.....	33
	BIJLAGE A TOEPASSING VAN SELECTIECRITERIA EN WEEGFACTOREN	34
	BIJLAGE B DICHTHEDEN VAN BRANDSTOFOPSLAGTECHNIEKEN	36
	BIJLAGE C AANZET VOOR EEN RELATIONELE-DATABASESTRUCTUUR	37

1. INLEIDING GES

1.1 GES

Het simulatieprogramma GES van TNO is opgezet om energieketens te simuleren en onderling te vergelijken. Omdat het is ontwikkeld in opdracht van en in samenwerking met de Koninklijke Marine, ligt de nadruk op energieketens van schepen (prime movers, elektriciteitsopwekking en -distributie, scheepsnet, scheepsvorstuwing, etc.).

GES gaat uit van de vermogensstromen tussen de componenten in de energieketen. Het vermogen is steeds het product van een *effort*-variabele en een *flow*-variabele (b.v. koppel en toerental). De ene variabele wordt uitgerekend in een component, de andere volgt uit de interface met de andere componenten en de vermenigvuldiging van die twee levert het overgedragen vermogen (dit principe, dat de basis van GES vormt, is de *bond graph*-methode). GES berekent voor een bepaalde belastingssituatie het stationaire vermogensevenwicht in de energieketen, rekening houdend met de rendementen van de verschillende componenten. Uitgaande van het gevraagde vermogen (door de voortstuwing en andere verbruikers) is het te leveren vermogen van de opwekkers te bepalen en tevens het nominale vermogen van de tussenliggende componenten. Hieruit worden de afmetingen van de componenten bepaald. Door verschillende belastingssituaties in een zogenaamd vermogensprofiel te combineren en door te rekenen, is het totale energieverbruik van de keten over een jaar te berekenen. Hieruit kunnen dan weer belastingsafhankelijke parameters berekend worden, zoals brandstofverbruik, emissies, onderhoudskosten, e.d.

1.2 Gebruik van GES bij het beoordelen van alternatieven in de energieketens voor schepen

De hoofddoelstelling van een reder zal zijn om de verschillende alternatieven voor energieketens naast elkaar te kunnen zetten en te sorteren naar

- Aanschafkosten,
- Life Cycle Kosten en terugverdientijd van de eventuele hogere aanschafkosten,
- Minimaal vloeroppervlak,
- Volume,
- Emissies, etc.

GES kan alle informatie sorteren mits aangeleverd en naar aanleiding van criteria kan het een en ander in vergelijkingsstaten zichtbaar gemaakt worden. Om meerdere alternatieven voor energieketens met elkaar te kunnen vergelijken, zullen weegfactoren toegekend moeten worden; deze wijze van vergelijken is nog niet in GES ingebouwd.

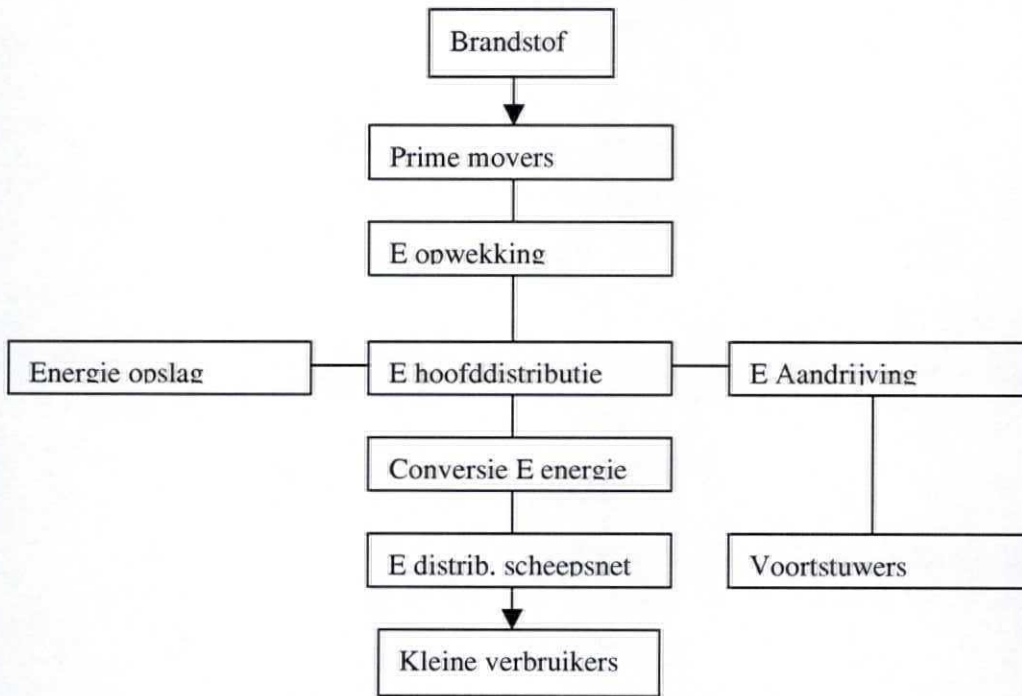
Keuzecriteria voor de individuele ketencomponenten zijn naast de eerder vermelde:

- Aantal machines
- Weinig grote of meerder kleine
- Mate van redundantie
- "Stapelbaarheid" of minimaal noodzakelijke ruimte/vloeroppervlak

Per ketencomponent dienen de gegevens voor de drie verschillende ontwikkelingsfases opgenomen te worden in verschillende excel-sheets. Bij een bepaalde keten kan dan per ketencomponent gespeeld worden met de (verwachte) ontwikkelingsresultaten. Hierdoor kan zichtbaar gemaakt worden of nieuwe ontwikkelingen verbetering geven of welke grootheden (nog) uit de pas lopen, zodat aandachtsgebieden gedefinieerd kunnen worden voor verdere ontwikkeling.

2. ENERGIEKETENS EN COMPONENTEN DAARIN

De energieketen van een schip is voor dit project als volgt gedefinieerd.



De componenten van deze keten kunnen de hieronder genoemde apparaten zijn. In Tabel 4.2 worden deze in meer detail uitgesplitst en worden de bereikte vermogens van de verschillende technologieën gegeven.

Brandstof

- Dieselolie
- Benzine
- LPG
- Waterstof (met verschillende methoden van opslag)

Prime movers

- Interne verbrandingsmotoren (dieselmotoren)
- Gasturbines enkelvoudige cyclus
- Gasturbines gecombineerde cyclus
- Stirling motor

E opwekking

- Asynchrone generatoren
- Synchrone generatoren
- High speed generatoren
- Gelijkstroomgeneratoren
- PM generatoren
- Brandstofcellen incl. evt. fuel reforming
- Hybride systemen (BC + roterende prime mover)
- Zonnecellen

E hoofddistributie

- Middenspanning

AC – DC distributie
Schakelmateriaal / beveiligingen
Kabels

Opslag van energie

Secundaire batterijen
Condensatoren
Vliegwielen
Magnetische opslag (SMES)
Redoxflow batterijen

Conversie

Transformatoren
Roterende omzeters
Statische omzeters

Aandrijvingen

Omzeters
Synchrone motoren
Asynchrone motoren
Gelijkstroommotoren
PM motoren

Voortstuwars

Conventionele schroef
Contra Rotating Propeller
Pompjet
Azimuth thruster
Pod
Waterjet
Whaletail / paddlewheel
Voith Schneider

In het volgende hoofdstuk worden de demarcaties tussen de verschillende ketencomponenten gedefinieerd.

Om een energieketen te kunnen maken zijn de volgende startgegevens noodzakelijk:

- Maximaal voortstuwingsvermogen van de voortstuwer(s)
- Maximaal hulpbedrijf vermogen
- Vermogensprofiel (gelijktijdigheid van bijstaande energieverbruikers uitgezet in de tijd, zie hoofdstuk 5)

Uit deze gegevens volgt een eerste schatting van het benodigde opgewekte vermogen en enkele randvoorwaarden voor het distributiesysteem. De exacte berekening van het minimaal benodigde totaal opgewekte vermogen volgt uit een eerste simulatie van de gekozen energieketen, omdat de keuze voor de componenten (elke met zijn eigen vermogensrendement) in de energieketen gevolgen heeft voor het totale systeemrendement.

De componenten van de energieketen zijn door de AES-Werkgroep C in meer detail onderverdeeld, zoals beschreven in Tabel 4.2.

3. INTERFACES EN DEMARCATIES TUSSEN COMPONENTEN

In dit hoofdstuk staat een beschrijving van de verschillende componenten van de energieketen in algemene bewoordingen. Tevens is de demarcatie met de andere ketencomponenten aangegeven.

De interfacegrootheden staan in hoofdstuk 4.

Brandstof

De drager van de primaire, chemische energie. Daar waar de brandstof niet past in een normale tank, wordt ook de benodigde bijzondere verpakking meegenomen, b.v. H₂-opslag in een drukvat of in metaalhydride.

Prime movers

Component die de chemische energie van de brandstof via verbranding omzet in mechanische (meestal roterende) energie. De component is inclusief randapparatuur, te rekenen vanaf de flens van het aanbiedende scheepssysteem. B.v. voor het brandstofsysteem wordt schone brandstof aangeboden vanaf de dagtank.

Input: brandstof
Output: mechanische as

E-opwekking

Component die mechanische energie omzet in elektrische energie die geschikt is voor het distributienet; dit is inclusief apparatuur die nodig is voor het geschikt maken van de elektrische energie (b.v. gelijkrichter) en de beveiligingsapparatuur (b.v. generator automaat).

Input: mechanische as
Output: Elektrische energie compatibel met distributie net

Opmerking: De functies van de prime mover en E-opwekking kunnen gecombineerd worden in de vorm van brandstofcel of PV-systemen (zonnecellen), waarbij de input kan variëren en de output gelijk is aan die van de E-opwekking. Indien voor de brandstofcel een brandstofreformer wordt gebruikt die aan boord waterstof haalt uit een brandstof, dan wordt de reformer beschouwd als onderdeel van het brandstofcelsysteem.

E-hoofddistributie

Het geheel van kabels, beveiligingsautomatiek en schakelaars voor het doorgeven van de opgewekte elektrische energie naar de afnemers inclusief de bedrijfsschakelaars van die afnemers. Tot de E-hoofddistributie behoren ook de schakelaars van afnemers die aangestuurd worden door de beveiligingsautomatiek van het net.

Input: Elektrische energie van de E-opwekking
Output: Elektrische energie van afnemers (zelfde netspanning als opwekking)

Energie opslag

Opslagmedium inclusief eigen beveiligingsautomatiek en eventuele omzetting van E-hoofddistributie naar energie die geschikt is voor het opslagmedium en vise versa.

Input: Elektrische energie van de E-hoofddistributie
Output: Elektrische energie voor de E-hoofddistributie

Conversie E-energie

Omzetting van elektrische energie van de E-hoofddistributie naar het scheepsnet inclusief eigen beveiligingsautomatiek. De schakelaars voor en na de conversie behoren niet tot het conversiesysteem.

Input	Elektrische energie van de E-hoofddistributie
Output	Elektrische energie voor E-distributie (scheepsnet)

E-distributie (scheepsnet)

Het geheel van kabels, beveiligingsautomatiek en schakelaars voor het doorgeven van de elektrische energie naar de scheepsnetgebruikers inclusief de bedrijfsschakelaars van die afnemers.

Input	Elektrische energie van conversie E-energie
Output	Elektrische energie voor E-aandrijving

E-verbruikers (klein)

De elektrische gebruikers inclusief de eventueel benodigde convertor en eigen beveiliging.

Input	Elektrische energie van het scheepsnet
-------	--

E-aandrijving (grootverbruikers)

De grote elektrische gebruikers inclusief de eventueel benodigde convertor en eigen beveiliging, exclusief schakelaars behorend tot E-hoofddistributie. De mechanische grens ligt bij de uitgaande flens van de E-motor.

Input	Elektrische energie van de E-hoofddistributie
Output	Mechanische as

Schroefas en tandwielkast

Schroefas met lagers en eventuele mechanische toerenreductie tussen aandrijvende elektromotor en gebruiker. De mechanische grenzen liggen bij de uitgaande flens van de aandrijvende E-motor en de voortstuwer.

Input	Mechanische as
Output	Mechanische as

Voortstuwer

Omzetter van mechanisch roterende energie in stuwkracht

Input	Mechanische as
Output	Stuwkracht

De hier gegeven definities komen in het algemeen overeen met de in GES gehanteerde definities, dit is echter niet per component getoetst.

4. MODELLEN IN GES EN PARAMETERS VAN GES EN AES-WG-C

De beschrijving van de modellen in GES staat in het document "Aes_taak_045.doc", samengevat in het document "Toelichting Database AES-NT.doc". De modelparameters die reeds in GES aanwezig waren en degene die door AES Werkgroep C zijn aangevuld, staan in het Excel-bestand "Database AES_NT (WG-C).xls".

4.1 Relevante grootheden van ketencomponenten

In onderstaande Tabel 4.1 staan de door Werkgroep C gedefinieerde relevante interface-grootheden en componentgrootheden van de ketencomponenten. Al deze grootheden worden ook in GES gebruikt, behalve degene die in de tabel schuingedrukt zijn. Deze worden onder de tabel toegelicht.

De componenten van de energieketen zijn door de AES-Werkgroep C in meer detail onderverdeeld, zoals beschreven in Tabel 4.2. Hierin is tevens het bereikte c.q. verwachte vermogensbereik van de verschillende technologieën aangegeven, zoals door de Werkgroep geïnventariseerd c.q. ingeschat. Een verdere karakterisering en kwantificering van de verschillende technologieën staat in de bijlagen D1 t/m D5 van het hoofdrapport.

Tabel 4.1 Relevante grootheden van de ketencomponenten volgens Werkgroep C.

Ketencomponent	Interfacegrootheden	Componentgrootheden
Brandstof	Energie inhoud kJ/kg c.q. kJ/m ³	Soortelijk gewicht kg/m ³ Prijs <i>Benodigde behandeling</i> <i>Spontane ontvlamtemperatuur</i> °C
Prime movers	Vermogen kW Toerental RPM Rendement % Intakevolume bij max. vermogen m ³ /hr Uitlaatvolume bij max. vermogen m ³ /hr Brandstofverbruik kg/kWh of kg/kW/s	Massa kg Volume m ³ Footprint: l*b m ²
E-opwekking	Vermogen kVA c.q. kW Toerental RPM Rendement % <i>Spanningsrange</i> opwekking V Frequentie Hz Opgewekte kortsluitstroom A AC of DC	Gewicht kg Volume m ³ Footprint: l*b m ²
E-opwekking, <u>Brandstofcel-systeem</u> incl. reformer en uitgangskonverter	E-Vermogen kW Rendement (BC + reformer) % <i>Spanningsrange</i> opwekking V Frequentie Hz Opgewekte kortsluitstroom A AC of DC Brandstofverbruik kg/kWh of kg/kW/s	Gewicht kg Volume m ³ Footprint: l*b m ² Vermogensdichtheid reformer kW/m ³

Ketencomponent	Interfacegrootheden	Componentgrootheden
E-hoofddistributie <u>Schakelborden</u> <i>Kabels: niet meegenomen</i> Railsysteem: niet aan boord van schepen	Vermogen kVA c.q. kW <i>Rendement</i> Spanningsrange van het net V Netfrequentie Hz Te schakelen stroom A <i>Toelaatbare kortsluitstroom A</i> <i>AC of DC</i>	Gewicht kg Volume m ³ Footprint: l*b m ²
Energie opslag (incl. converter)	Spanningsrange van het net V <i>Spanningsrange opslag V</i> Vermogen kW <i>Afgegeven kortsluitstroom A</i> Laadrendement % Ontlaadrendement % Zelfontlading kW Netfrequentie Hz	Gewicht kg Volume m ³ Footprint: l*b m ² Opslag capaciteit kWh Vermogensdichtheid kW/kg c.q. kW/m ³ Energiedichtheid kWh/kg c.q. kWh/m ³
Conversie E-energie; Converters	Spanningsrange van het net Vin Uitgangsspanning Vuit Vermogen kVA c.q. kW Conversie rendement % Netfrequentie Hz Uitgangsfrequentiebereik Hz THD %	Gewicht kg Volume m ³ Footprint: l*b m ²
E-distributie (scheepsnet)	Netspanning V Netfrequentie Hz	
E-verbruikers (klein)	Opgenomen vermogen uit het net kW	
E-aandrijving (grootverbruikers) (converter + motor)	Netspanning V Vermogen kVA c.q. kW Koppel Nm Toerenbereik RPM Rendement % Converter: THD %	Gewicht kg Volume m ³ Footprint: l*b m ²
Schroefas en Tandwielkast	Toerenreductie Rendement % Koppel Nm	Gewicht kg Volume m ³ Footprint: l*b m ²
Voortstuwars (1)	(benodigd) Koppel Nm Toeren RPM Stuwkracht kN Rendement %	Gewicht kg Volume m ³ Diameter m

Toelichting op de niet-gebruikte grootheden in GES

Brandstof: Spontane ontvlamtemperatuur °C. Dit is niet van belang voor de simulatie (b.v. in GES) van de energieketen, maar wel voor de beoordeling van de energieketen (veiligheid).

Brandstof: Benodigde behandeling. Hieronder valt o.a. tankverwarming (indien nodig), separatie, e.d. Dit heeft consequenties voor het energieverbruik en voor het geïntegreerde ontwerp v.w.b. volume en gewicht van de benodigde hulpapparatuur. Dit is nog niet gemodelleerd in GES. Zolang deze hulpsystemen voor alle ketenvarianten (ongeveer) gelijk zijn, behoeven ze voor de vergelijking niet meegenomen te worden. Reforming als eventuele tussenstap bij brandstofcellen wordt wel meegenomen en beschouwd als onderdeel van het brandstofcelsysteem.

E-opwekking: Spanningsrange. Bedoeld wordt een variabele spanning die door het net gevraagd wordt (b.v. bij het laden van batterijen). De opwekkers hebben over het algemeen een vaste spanning. Als dit niet aan elkaar past, moet de ketenontwerper zelf hiervoor een oplossing zoeken, b.v. een converter toevoegen (GES doet dit niet automatisch).

Schakelborden: Rendement. Aangenomen wordt dat het vermogensverlies van de schakelborden verwaarloosbaar is (rendement = 100%).

Schakelborden: Toelaatbare kortsluitstroom A. Ontbreekt nog in GES, wordt toegevoegd.

Schakelborden: AC of DC. In GES zit nog geen DC-schakelmaterieel.

Kabels: niet meegenomen. Het nauwkeurig berekenen van totale kabellengte, -volume, -gewicht en -kosten is een moeilijke zaak. De kosten van het aanleggen van de bekabeling zijn nog moeilijker in te schatten, echter wel een groot deel van de installatiekosten. Daarom zijn kabels vooralsnog weggelaten uit de berekeningen. Aangenomen is dat de bekabeling voor de verschillende AES-varianten vergelijkbaar is. Dit neemt niet weg dat de bekabeling een belangrijk aandachtspunt is bij de daadwerkelijke realisatie van AES-concepten.

Kabels: Rendement. Kabelverliezen worden verwaarloosbaar verondersteld t.o.v. de andere verliezen (converters, motoren, enz.).

Energie opslag (incl. converter): Spanningsrange Opslag V. In GES zit er altijd een converter voor de energieopslag. Daarom is de spanning van het opslagsysteem minder relevant dan de spanning aan de netzijde van de converter. Hierdoor ontbreekt in GES de mogelijkheid om een opslagsysteem zonder converter rechtstreeks aan het net te hangen. Dit kan wel eens belangrijk zijn bij optimalisatie van de energieketen (denk aan onderzeeboten).

Energie opslag: Afgegeven kortsluitstroom A. Dit zit nog niet in GES en zal worden toegevoegd.

E-distributie (scheepsnet) en E-verbruikers (klein): Hierbij worden alleen de gekozen spanning van het net en het gevraagde vermogen van de verbruikers opgegeven. Afmetingen e.d. van het scheepsnet en de verbruikers worden niet meegenomen. De ketenontwerper kan ervoor kiezen om alle verbruikers als één vermogensvrager te modelleren (black box) of als meerder aparte vermogensvragers.

Tabel 4.2 Onderverdeling van de ketencomponenten en overzicht van de bereikte c.q. verwachte vermogens van de verschillende technologieën.

Ketencomponent	Technologieën	Bereikt vermogen en energie		
		Bewezen	Nieuw	Toekomst
Brandstof	Opslag van brandstoffen, incl. tank [kWh/kg (kWh/dm ³)]			
	Waterstof 350 bar	1.6 (0.6)	2.0 (1.5)	3.0 (2.7)
	Waterstof 700 bar		1.9 (1.3)	3.0 (2.7)
	Waterstof vloeibaar	1.65 (1.2)		
	Metaalhydride fysisch	0.8 (0.4)	2.0 (1.5)	3.0 (2.7)
	Metaalhydride chemisch	1.5 (0.7)	2.0 (1.5)	3.0 (2.7)
	Marine Residual Fuels	10.42 (10.08)		
	Marine Distillate Fuels	10.80 (9.91)		
	Benzine	9.95 (8.6)		
LPG	12.8 (?) (6.5)			
Prime movers	Interne verbrandingsmotoren (kW)			
	DIESELMOTOREN			
	High speed (1000-2000 rpm)	9000		
	Medium speed, Line (300-1000 rpm)	18000		
	Medium speed, Vee (300-1000 rpm)	35000		
	GASTURBINE enkelvoudige cyclus (kW)	21000 (navy) 18000 (civ)		
GASTURBINE gecombineerde cyclus (kW)	26000	36000	50000 +?	
Stirling motor (kW)	500		??	
E opwekking	Asynchrone generatoren	Nvt		
	Synchrone generatoren	Geen beperk.		
	High speed generatoren	-	2 MW	> 2 MW
	Gelijkstroomgeneratoren	Nvt		
	PM generatoren	-	1.7 MW	10 MW
	High Temp Superconducting gen.'n	-	4 MW	40 MVA
	Brandstofcellen [kWe, DC]			
	DIESEL_PEMFC_LTM			250
	DIESEL_PEMFC_HTM			250
	DIESEL_MCFC			250
	DIESEL_SOFC			250
	BENZINE_PEMFC_LTM			100
	BENZINE_PEMFC_HTM			100
	BENZINE_MCFC			250
	BENZINE_SOFC			250
	LPG_PEMFC_LTM			100
	LPG_PEMFC_HTM			100
LPG_MCFC			250	
LPG_SOFC			250	
H2_PEMFC_LTM		50	50	

Ketencomponent	Technologieën	Bereikt vermogen en energie		
		Bewezen	Nieuw	Toekomst
	H2_PEMFC_HTM H2_SOFC Hybride systemen DIESEL_MCFC_GT DIESEL_SOFC_GT BENZINE_MCFC_GT BENZINE_SOFC_GT LPG_MCFC_GT LPG_SOFC_GT H2_SOFC_GT Zonnecellen [W/m ² , piek] Kristallijn silicium			50 50 250 250 250 250 250 250 250 100 - 120
<u>E distributie</u>	Laagspanning: - sckakelaars en schakelborden (k.s.s. = kortsluitstroom) Middenspanning: - sckakelaars en schakelborden	7500 kVA 690 V k.s.s. = 70 kA 75.000 kVA 12 kV k.s.s. = 32 kA	k.s.s. = 100 kA k.s.s. = 63 kA	- -
<u>E Opslag</u>	[kW/kg / kWh/kg] <i>Secundaire batterijen</i> (systeem) Lood-zwavelzuur (Pb-A) NiCd NiMH Li-ion Li-polymeer NaNiCl <i>Condensatoren (systeem)</i> Symmetrisch Hybride <i>Vliegwielen</i>	0.3 / 0.04 0.2 / 0.05 0.8 / 0.07 1 / 0.15 0.5 / 0.15 0.2 / 0.1 4 / 0.003 2 / 0.01 0.5 / 0.01	 5 / 0.005 4 / 0.018 2 / 0.02	1 / 0.05 0.5 / 0.06 1.5 / 0.1 1.5 / 0.25 1 / 0.25 0.3 / 0.15 5 / 0.005 6 / 0.025 5 / 0.04
	<i>Magnetische opslag (SMES)</i> <i>Redoxflow-batterij</i>	100 / 0.0006 0.1 / 0.03	1500 / 0.004	10000 / 0.03 0.2 / 0.06
<u>Conversie</u>	Transformatoren Roterende omzetters Statische omzetters: - AC/DC - DC/DC	3000 kVA - V c.f. gener.'n 1500 kVA 690 V 100 kVA 600 V	- 30.000 kVA - V onbekend	- full range onbekend

Ketencomponent	Technologieën	Bereikt vermogen en energie		
		Bewezen	Nieuw	Toekomst
	<ul style="list-style-type: none"> - DC/AC - Spanningsomzetters LV - Spanningsomzetters HV - Bron converters - Stroombron converters - Matrix converters 	2300 kVA 690 V 4 MW 25 MW > 20 MW 20 MW -	30.000 kVA - V Multi fasig - - Schaal niveau	full range Nieuwe halfgeleiders? - - ?
<u>Aandrijvingen</u>	Omzetters Synchrone motoren Asynchrone motoren Gelijkstroommotoren PM motoren: <ul style="list-style-type: none"> - Radiaal flux - Transerse flux - High Temp. Super conducting 	c.f. motoren > 10 MW 10 MW Nvt 2,5 MW	 25 MW 4 MW 5 MW	 20 MW 36,5 MW
<u>Voortstuwars</u>	Conventionele schroeven: <ul style="list-style-type: none"> - vaste spoed - vaste spoed met straalbuis - verstelbare schroef - verstelbare schroef met straalbuis Contra Rotating Propellor Pumpjet Azimuth thrusters Pod's Waterjets Whaletail / paddlewheel Voith Schneider AEV	68 MW 8 MW 20 MW 8 MW 20 MW 1 MW 6 MW 25 MW 30 MW 3 MW 2 MW	 40 MW	80 MW 25 MW 10 MW

5. VERMOGENSPROFIEL

Onder het vermogensprofiel van een nieuw te ontwerpen platform wordt verstaan: Het overzicht van de elektrische apparaten (voortstuwings-, huishoud- en "payload"-apparatuur) die gelijktijdig bij zullen staan of bij kunnen staan in de verschillende bedrijfstoestanden (= operationele toestanden) van het platform, uitgezet in het aantal dagen of uren per jaar dat de bedrijfstoestanden voorkomen.

In het vermogensprofiel dienen per bedrijfstoestand de volgende elementen opgenomen te worden:

- Apparaten die gelijktijdig bij móeten staan.
- Het vermogen dat de verschillende apparaten (inclusief voortstuwings*) zullen vragen
- Het maximale vermogen dat gevraagd kan worden (som van het vorige)
- Verhouding tussen voortstuwings- en huishoudvermogen #
- Percentage van de vermogenswisseling t.o.v. basisvermogenslast #
- Tijdconstante van de vermogenswisselingen %
- Regeneratie van remenergie (van grote aandrijvingen) (moet meegenomen worden als negatief gevraagd vermogen)

Doel van het vermogensprofiel is om de opwekking van de energie zo efficiënt mogelijk in te richten. Dit bepaalt met name de keuze voor het aantal en de grootte van de opwekkers en de grootte van de eventuele energieopslagcomponenten.

Opmerkingen:

* In GES wordt het voortstuwingsvermogen uit de gewenste vaarsnelheid berekend m.b.v. schroef- en scheepsweerstandsmoedellen.

Deze kentallen hebben consequenties voor het aantal en de grootte van de opwekkers

% Indien het om korte tijden van extra vraag gaat, kan gekozen worden voor tijdelijke overbelasting van sommige opwekkers of voor voeding uit energieopslagsystemen in plaats van het opstellen van extra opwekkingscapaciteit.

6. VERGELIJKINGSCRITERIA EN WEEGFACTOREN

Hoofddoelstelling van een reder zal zijn om de verschillende alternatieven voor energieketens naast elkaar te kunnen zetten en te sorteren naar

- Aanschafkosten,
- Life Cycle Kosten en terugverdientijd van de eventuele hogere aanschafkosten,
- Minimaal vloeroppervlak,
- Volume,
- Gewicht,
- Brandstofverbruik,
- Emissies.

Keuzecriteria voor de individuele ketencomponenten zijn naast de eerder vermeldde:

- Aantal machines
- Weinig grote of meerder kleine
- Mate van redundantie
- "Stapelbaarheid" of minimaal noodzakelijke ruimte/vloeroppervlak

7. SAMENSTELLEN EN ANALYSE VAN ENERGIEKETENS IN GES

Hieronder wordt de werkwijze van de energieketenanalyse in GES beschreven.

7.1 De keten

De gehele keten dient door de gebruiker samengesteld te worden in GES. GES heeft in zijn user interface een beperkte mogelijkheid om de gebruiker te ondersteunen bij het samenstellen van de keten: bij het toevoegen van een component aan een deel van de keten kan GES een subset van zijn modellenbibliotheek weergeven met daarin alleen die modellen die op de gekozen plek kunnen worden toegevoegd. Dit is gebaseerd op de interfacegrootheden van hoofdstuk 3 (*effort* en *flow* in GES). Zo kan b.v. aan een brandstoftank (brandstof uit) alleen een prime mover of brandstofcel (brandstof in) worden gehangen en aan een opwekker (elektriciteit uit) alleen een elektrische component (elektriciteit in).

Let wel dat de gebruiker zelf de keuze moet maken voor redundantie in de energieketen, zoals bijvoorbeeld het aantal prime movers, schakelborden en voortstuwers, conform de wensen van de opdrachtgever of de eisen uit het generieke bestek c.q. de klassevoorschriften. Wel zal GES een waarschuwing geven wanneer bijvoorbeeld blijkt dat een enkele opwekker het gevraagde vermogen niet kan leveren of een schakelbord een te hoge stroom moet verwerken.

7.2 Alternatieven voor bepaalde componenten

De keuze van alternatieven voor bepaalde componenten in de keten is aan de ketenontwerper. Hij is de bron van de kennisregels en hij zal een slimme keuze moeten maken. Achteraf geeft GES door de simulatieresultaten van de door de gebruiker gekozen alternatieven aan of de keuze van de gebruiker verstandig c.q. goed c.q. terecht was. Dit betekent dat de gebruiker meerdere alternatieve energieketenmodellen moet opzetten en deze door GES laten simuleren. Het simuleren in GES is geheel geautomatiseerd: als de modellen klaar zijn en de vermogensprofielen gedefinieerd, kunnen alle ketenmodellen achter elkaar door GES gesimuleerd worden en de resultaten in een overzicht gepresenteerd worden. Hieruit zijn dan door de gebruiker de verschillen te distilleren en conclusies te trekken.

Als slechts voor één of enkele componenten enkele parameters gewijzigd moeten worden, b.v. de ontwikkelingsfase van de technologie (bestaand, nieuw, toekomstig), kan natuurlijk hetzelfde model gebruikt worden en dit meerdere malen achtereenvolgens gesimuleerd worden.

7.3 Het vermogensprofiel

Het vermogensprofiel (in GES operationeel profiel genoemd) moet in GES d.m.v. een Excel-formulier ingevoerd worden. In dit formulier staan alle componenten van de keten met hun vermogensvraag voor verschillende bedrijfstoestanden (transit, manoeuvreren, laden/lossen, topsnelheid, werken op zee, etc.). Voor de voortstuwing wordt in GES over het algemeen uitgegaan van de gewenste scheepssnelheid. Het model van de voortstuwder incl. scheepsweerstand e.d. rekent dan het benodigde voortstuwingsvermogen aan de as uit. Indien gewenst is dit te vereenvoudigen door direct het asvermogen als inputvariabele te gebruiken.

7.4 Vergelijkingscriteria en weegfactoren

Bij de opbouw van de energieketen in GES wordt een keuze gemaakt voor het nominale vermogen van alle componenten (en ook nominaal toerental, spanning, e.d.; de spanning wordt bepaald m.b.v. de Voltage Design Guideline (VDG), een aparte module in GES). Hieruit volgen afgeleide aspectparameters zoals kosten, maten en gewichten per component. Deze volgen uit generieke modellen (b.v.: een motor van x kW weegt gemiddeld 1000 kg) of uit specifieke modellen (b.v.: een motor van x kW, type XYZ van fabrikant Y weegt exact 1124,5 kg). De generieke modellen worden aangeduid als rubberen modellen en zijn schaalbaar binnen door de modellenbouwer aangegeven grenzen. Over het algemeen is er een vertaling nodig van de rubberen modellen naar specifieke modellen, b.v. als uit een rubberen model een optimale netfrequentie van 56 Hz komt, zal toch een keuze voor 50 of 60 Hz gemaakt moeten worden.

Als de energieketen eenmaal is samengesteld en de modellen van alle componenten compleet zijn, kan de waarde van een aantal aspectparameters berekend worden voor de totale keten.

De parametrische waarden per component zijn in GES:

- aanschafkosten (*IPC*: initial purchase cost) [€]
- massa (mass) [kg]
- lengte (length) [m]
- breedte (width) [m]
- hoogte (height) [m]
- vloeroppervlak (floor_area) [m²]
- volume (volume) [m³]

Door optelling van deze waarden voor alle componenten verkrijgt GES de waarden voor de totale keten:

- aanschafkosten [€]
- massa [kg]
- vloeroppervlak [m²]
- volume [m³]

Deze waarden kunnen gebruikt worden als criteria om verschillende ketens met elkaar te vergelijken.

GES simuleert de energieketen op basis van de vermogensstromen tussen de verschillende componenten, uitgaande van het gevraagde vermogen van alle eindverbruikers (waaronder de voortstuw-ers). Door vermogensverliezen in de componenten neemt het te leveren vermogen vanaf de voortstuw-ers naar de prime movers toe. Deze verliezen zijn afhankelijk van de belastingstoestand van de componenten (laagbelaste machines hebben over het algemeen een slechter rendement dan volbelaste).

Het vermogensprofiel beschrijft het totaal gevraagde vermogen in verschillende bedrijfstoestanden. Hiermee is dus de belastingsgraad van alle componenten uit te rekenen. Afhankelijk van de belastingsgraad heeft elke component een zeker rendement², een zeker vereist onderhoud en een zekere hoeveelheid emissies. Deze aspectparameterwaarden worden door GES voor alle componenten voor het gehele vermogensprofiel opgeteld, zodat deze ook als vergelijkingscriteria kunnen worden gebruikt. Voorwaarde is natuurlijk dat voor elke component deze aspecten ingevuld zijn en/of uitgerekend worden.

GES biedt de mogelijkheid om de waarden van de volgende belastingsafhankelijke (en dus vermogensprofielafhankelijke) parameters voor de hele energieketen te berekenen:

- ketenrendement (dit is de totaal door de eindverbruikers geleverde energie gedeeld door de totaal door de brandstoffen geleverde energie)
- brandstofverbruik en brandstofkosten
- onderhouds- en bedrijfskosten (MOC = maintenance and operating costs)
- Life Cycle Kosten (LCC) (In GES: brandstofkosten + MOC)
- emissies (NOx, HC, CO, SO2, CO2)
- beschikbaarheid = availability (berekend uit de MTBF³ en MTTR⁴ per component) ⁽⁵⁾

Uit de LCC is de terugverdientijd van de eventuele hogere aanschafkosten (t.o.v. een referentieketen) te berekenen.

De berekening van de waarde van de ketenparameter 'beschikbaarheid' kent beperkingen bij ketens die niet een eenvoudige serieschakeling van componenten zijn. Voor een nauwkeurige berekening van de beschikbaarheid van energieketens is een aparte faal-module in GES aanwezig, die rekening houdt met parallelschakelingen en met het al of niet ingeschakeld zijn van redundante componenten en systemen.

De merites van keuzes als het aantal machines (en: weinig grote of meerder kleine) en de mate van redundantie moeten blijken uit de parameters aanschafkosten, ketenrendement, brandstofverbruik, onderhoudskosten, emissies en beschikbaarheid.

Alle bovenstaande parameters kunnen dienen als vergelijkingscriteria. GES rekent de totaalwaarde voor de hele energieketen voor al deze parameters uit. Deze worden in een tabel in Excel verzameld. De eenvoudigste analyse om ketens te vergelijken is om één criterium eruit te nemen en hiermee een rangorde te maken van beste naar slechtste ketenvariant. Maar in het algemeen wil men natuurlijk een combinatie van criteria als beoordelingsmaat nemen. Hierbij zullen weegfactoren aan de criteria toegekend moeten worden. Dit is eenvoudig in Excel op de genoemde tabel toe te passen. Een voorbeeld van het toepassen van weegfactoren is een door TNO met behulp van GES uitgevoerde studie naar alternatieven voor toekomstige marineschepen. Het hierbij toegepaste gebruik van weegfactoren is geïllustreerd in bijlage A.

7.5 Gewenste extra functionaliteiten van GES

Het is wenselijk dat GES oplossingen aandraagt voor verschillende technologieën voor ketencomponenten, wanneer een bepaald vermogen gevraagd wordt. Daarbij moet tevens een onderscheid naar ontwikkelingsfase worden aangegeven (dus of de oplossing bestaande, nieuwe of toekomstige technologie betreft). Dit was in GES reeds mogelijk bij de keuze van een dieselmotor, een gasturbine, een brandstofcel of een elektrische machine, echter alleen wanneer al een keuze gemaakt was voor een bepaalde technologie. Dit wil zeggen: GES kon een reeks *dieselmotoren* van 100 kW selecteren uit een database, maar GES kon geen reeks *prime movers* van 100 kW selecteren (ongeacht het een dieselmotor of gasturbine etc. betreft). Ook de elektrische machines staan nog in aparte lijsten. Men moet dus eerst zelf een keuze maken voor een synchrone of asynchrone of PM-motor en pas dan kan GES m.b.v. het gewenste vermogen, toerental en spanning een selectie presenteren uit de database. Inmiddels is door TNO i.s.m. Werkgroep C deze functionaliteit voor de selectie van prime movers in GES geïmplementeerd.

8. CASE STUDY: SWATH FAST FERRY

8.1 Model van de SWATH fast ferry

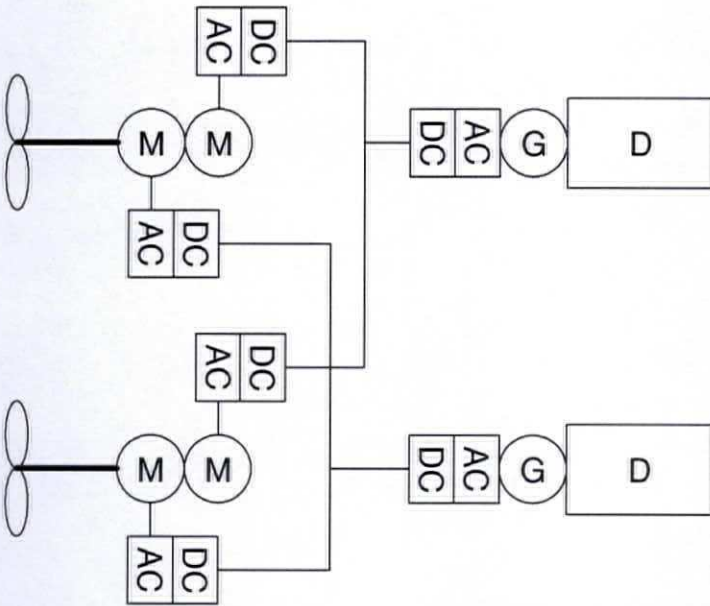
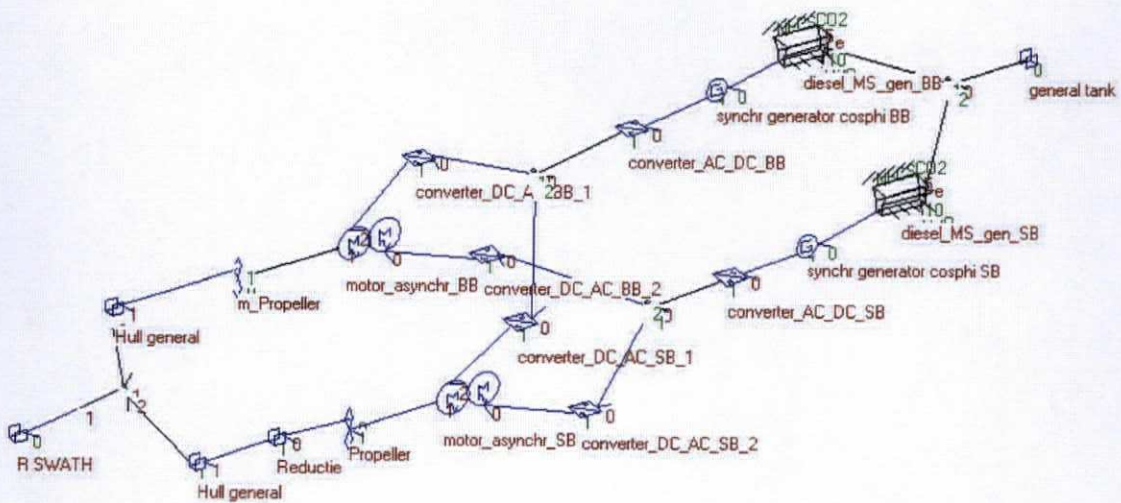


Figure 8.1 Vereenvoudigd schema van de SWATH.



Figuur 8.2 Basismodel van de SWATH in GES.

Referentiemodel

In deze vergelijking wordt alleen gekeken naar de voortstuwingsinstallatie. Deze SWATH heeft een aparte opwekinstallatie voor het boordnet, die hier niet beschouwd wordt. Daar waar keuzes gemaakt zijn in de alternatieven, is niet afgeweken van de klanteisen.

Brandstof: We gaan uit van de hoeveelheid dieselolie die de basisferry meeneemt. Dat is een tankvolume van 22 m³. Met een soortelijk gewicht van 870 kg/m³ is dit 19 ton.

(Uitgaande van MDO: 42700 kJ/kg, 145 euro/ton, 870 kg/m³).

Opwekking: twee dieselgeneratorsets met gelijkrichter.

Dieselmotor: 1560 kW, 1800 rpm.

Generator: 1600 kW, 1800 rpm, 60 Hz, 690 V

De gelijkrichter (AC-DC-converter) is een geïntegreerd onderdeel van de generator.

Het schip heeft twee schroefassen met op elke as twee asynchrone motoren in tandem.

Asynchrone motor (per as): 660 kW, 350 rpm, 20 Hz, 690 V.

Elke asynchrone motor wordt gevoed door een inverter (DC-AC-converter).

De maten en gewichten en kosten van deze componenten staan in tabel 8.1 hieronder.

Deze waarden komen uit de zgn. rubberen (d.w.z. schaalbare) modellen van GES.

Variant met 6 MCFC+reformer-eenheden

Deze variant maakt gebruik van de MCFC-brandstofcel met waterstof als brandstof. De waterstof wordt aan boord aangemaakt uit (zwavelarme) dieselolie door een reformer. De reformer is een integraal onderdeel van de MCFC-module.

(toekomstige technologie, DIESEL_MCFC, zwavelarme diesel, autotherme reforming, MCFC, 250 kW per module, minimale/nominale last = 0.2, nominaal rendement = 0.42, , investering 3000 (huidig) c.q. 450 (toekomst) euro/kW⁶)

In deze variant hebben we voor de E-opwekking 6 MCFC-eenheden aangenomen. De grootte van de eenheden (in een aantal modules van 250 kW) is aangepast aan het vaarprofiel en is als volgt gekozen:

500 kW (2 modules), 750 kW (3 mod.), 500 kW (2), 500 kW (2), 750 kW (3), 500 kW (2).

Het totaal van de 6 eenheden is 3500 kW. De maten en gewichten en kosten van deze componenten staan in tabel 8.1.

Variant met 2 PEM-eenheden

Deze variant maakt gebruik van de PEM-brandstofcel met waterstof als brandstof. De waterstof wordt aan boord opgeslagen.

(nieuwe technologie, H₂_PEMFC_LTM, waterstof, (geen reforming), PEMFC met lage-temperatuur membraan, 50 kW per module, minimale/nominale last = 0.15, nominaal rendement = 0.50, investering 2000 (huidig) c.q. 300 (toekomst) euro/kW⁷)

In deze variant hebben we voor de E-opwekking 2 gelijke PEM-eenheden van 1600 kW (dit is 32 modules van 50 kW) aangenomen. Achter de brandstofcellen zitten DC/DC-converters voor de regeling van het vermogen en de uitgangsspanning. Deze converters worden beschouwd als onderdeel van de PEM-modules.

De maten en gewichten en kosten van deze componenten staan in tabel 8.1.

Variante met 5 PEM-eenheden

Ook deze variant maakt gebruik van de PEM-brandstofcel met waterstofopslag aan boord. (nieuwe technologie, H₂_PEMFC_LTM, waterstof, (geen reforming), PEMFC met lage-temperatuur membraan, 50 kW per module, minimale/nominale last = 0.15, nominaal rendement = 0.50, investering 2000 (huidig) c.q. 300 (toekomst) euro/kW)

In deze variant hebben we voor de E-opwekking 5 PEM-eenheden aangenomen. De grootte van de eenheden (in een aantal modules van 50 kW) is aangepast aan het vaarprofiel en is als volgt gekozen:

350 kW (7 modules), 650 kW (13 mod.), 650 kW (13), 950 kW (19), 600 kW (12).

De totaalafmetingen van deze eenheden zijn gelijk aan die van de twee eenheden van de vorige variant.

De maten en gewichten en kosten van deze componenten staan in tabel 8.1.

De waarden van tabel 8.1 komen uit de zgn. rubberen (d.w.z. schaalbare) modellen van GES, waarin schaalwetten voor o.a. volume en gewicht en kosten als functie van het vermogen zijn opgenomen.

Tabel 8.1 Maten en gewichten van de componenten uit de GES-berekening.

	Length [m]	Width [m]	Height [m]	Volume [m ³]	Mass [kg]	Floor area [m ²]	Investment cost [x1000 euro]
Dieselmotor	2.5	1.9	1.3	6	4333	4.8	300
Generator	1.8	0.91	0.91	1.5	3576	1.6	48
Asynchrone motor (per as)	2.0	1.3	1.3	3.5	11749	2.6	62
MCFC 6 eenheden (3500 kW)				194	43750	61	nu: 10500 toekomst: 1575
2 PEM eenheden (3200 kW)				6.4	6400	4.3	nu: 6400 toekomst: 960
5 PEM eenheden (3200 kW)				6.4	6400	4.3	nu: 6400 toekomst: 960

In de varianten zijn alleen de dieselmotoren (inclusief gelijkrichters) vervangen door brandstofcellen (inclusief converters). De rest van de installatie is identiek gehouden.

8.2 Het vermogensprofiel

Een oversteek duurt 30 minuten, inclusief uit- en instappen. Voor het traject Vlissingen-Breskens is het vaarprofiel als volgt:

Tabel 8.2 Vermogensprofiel van SWATH (enkele oversteek)

Operationele conditie	Afstand in km	Tijd in minuten	Totaal vermogen (%MCR)
Loading/unloading		10	10
Unmooring		1	30
Acceleration	1.2	4	100
Crossing (mean)	4.5	10	80
Deceleration	1.1	4	30
Mooring		1	30
Totaal	6.8	30	

Bij het jaarverbruik van de SWATH is uitgegaan van de volgende vaartijd: de ene dag vaart het schip continu van 7 tot 23 uur; de andere dag continu van 7 tot 10 en van 17 tot 20 uur.

8.3 Simulatieresultaten uit GES

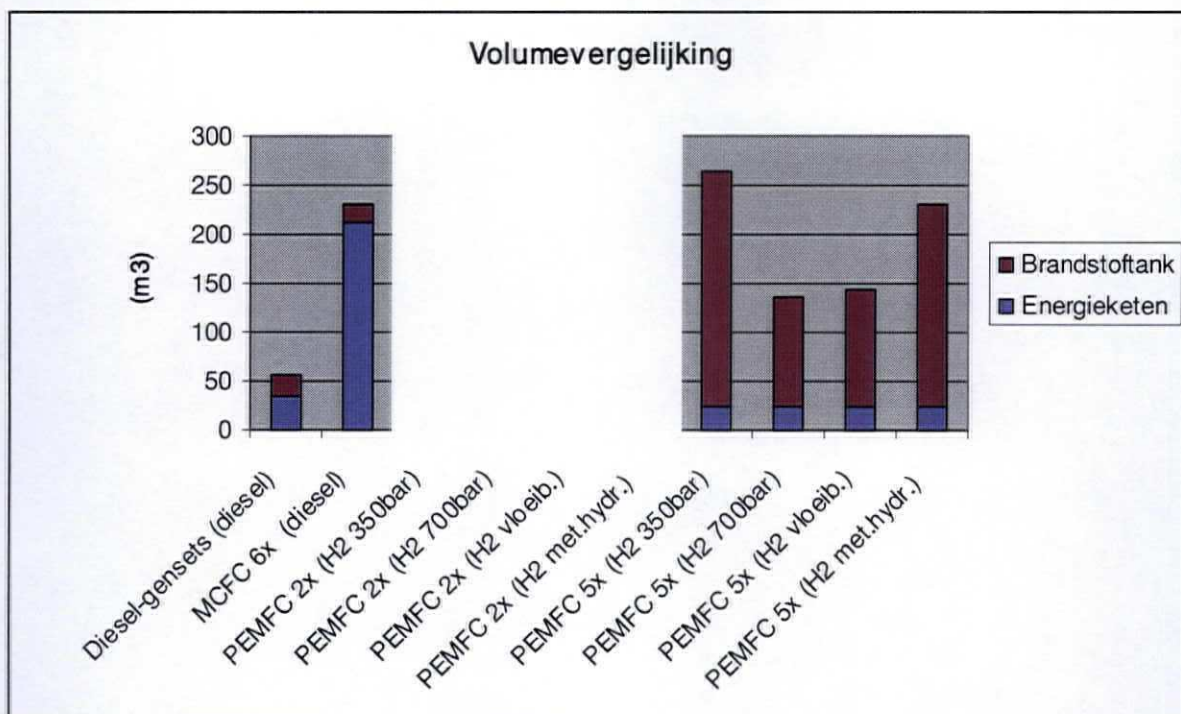
Tabel 8.3 geeft een overzicht van de simulatieresultaten. Bij de simulaties is uitgegaan van het asvermogen van het diesel-elektrische referentieschip. Bij de varianten wordt evenveel vermogen aan de assen afgegeven. Uit de simulaties blijkt dat het systeemrendement van de varianten beter is dan dat van de referentie. Daardoor is dus het jaarverbruik lager en er is minder energie in de brandstoftank nodig om dezelfde afstand te varen. Voor volume en gewicht van de brandstoftank is uitgegaan van de tankinhoud van het referentieschip, die is 22 m³ met daarin 19 ton dieselolie. Deze tankinhoud levert een theoretisch bereik bij 14 knopen van 1360 km (in een tijd van 54 uren) en is gelijk voor alle varianten (want de tankinhoud is aangepast aan het systeemrendement).

Bij het volume en gewicht van de opslagtank(s) voor waterstofopslag is uitgegaan van figuur 5 uit het document "Hoofdstuk_Prime_movers_31.doc". Deze figuur is overgenomen in dit document in bijlage B.

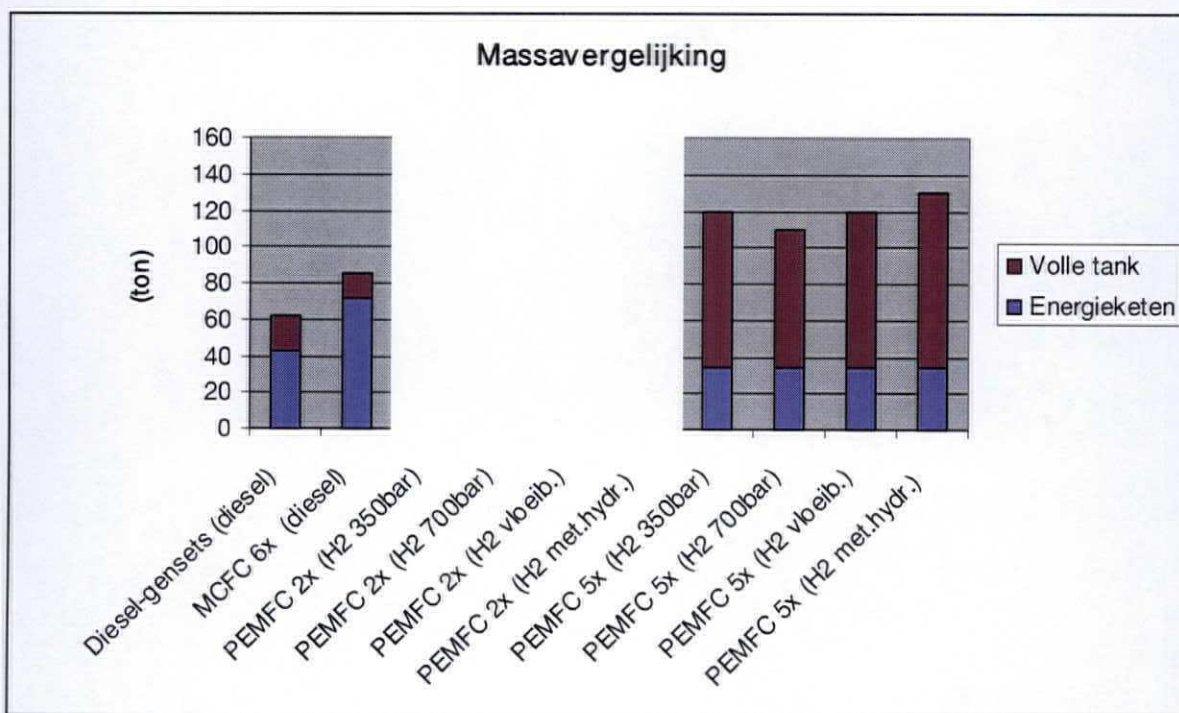
Tabel 8.3 Overzicht van de resultaten uit GES.

	Diesel- elektrisch (referentie)	MCFC + reformer 6 modules	PEM FC 2 modules	PEM FC 5 modules
Brandstof	Dieselolie	Zwavelarme Dieselolie	Waterstof	Waterstof
volume van de energieketen (m ³)	34	213	25	25
massa van de energieketen (ton)	43	71	34	34
energieverbruik (kJ/jaar)	50.9 E+9	35.3 E+9	31.4 E+9	29.6 E+9
(kWh/jaar)	14.1 E+6	9.8 E+6	8.7 E+6	8.2 E+6
overall systeemrendement ⁸ (%)	30 %	43 %	48 %	51 %
brandstofverbruik (m ³ /jaar)	1371	1036		
(ton/jaar)	1193	827	262	247
emissies CO ₂ (ton/jaar)	ca. 8000	ca. 5500	0	0
energieinhoud brandstoftank (kJ)	817 E+6	617 E+6	556 E+6	518 E+6
(kWh)	227 E+3	172 E+3	154 E+3	144 E+3
brandstoftankvolume (m ³)				
Dieselolie	22	17		
H ₂ hoge druk 350 bar			258	240
H ₂ hoge druk 700 bar			119	111
H ₂ vloeibaar			129	120
H ₂ metaalhydride			221	205
volletankgewicht (ton)				
Dieselolie	19	14		
H ₂ hoge druk 350 bar			91	85
H ₂ hoge druk 700 bar			81	76
H ₂ vloeibaar			91	85
H ₂ metaalhydride			103	96
Totaalvolume installatie + tanks				
Dieselolie (m ³)	56	230		
H ₂ hoge druk 350 bar			283	265
H ₂ hoge druk 700 bar			144	136
H ₂ vloeibaar			154	145
H ₂ metaalhydride			246	230
Totaalgewicht installatie + tanks				
Dieselolie (ton)	62	85		
H ₂ hoge druk 350 bar			125	119
H ₂ hoge druk 700 bar			115	110
H ₂ vloeibaar			125	119
H ₂ metaalhydride			137	130
investeringskosten (kE) nu	1800	11600	7500	7500
toekomst	1800	2700	2100	2100
brandstofkosten (kE/jaar) nu	170	120	940	890
toekomst ⁹	170	120	470	445
onderhoudskosten (kE/jaar)	130	10	10	10
Totale kosten over 5 jaar (kE) nu	3300	12250	12250	12000
toekomst	3300	3350	4500	4375
Totale kosten over 10 jaar (kE) nu	4800	12900	17000	16500
toekomst	4800	4000	6900	6650

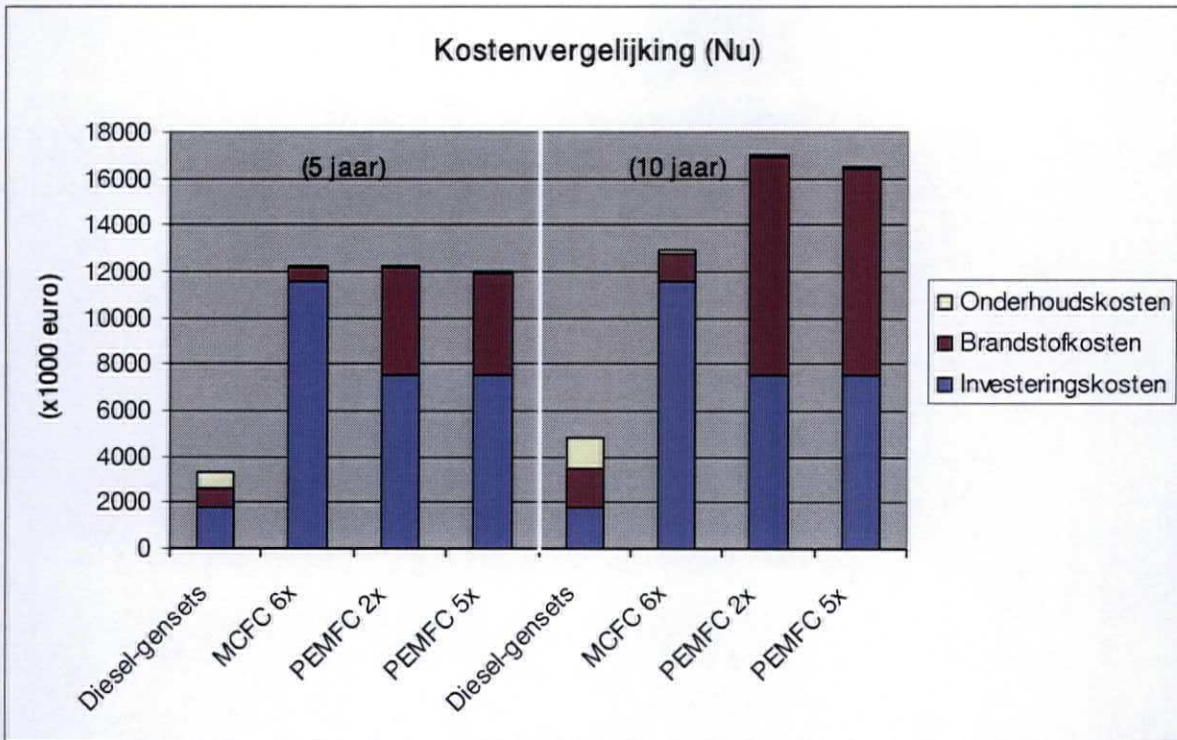
De simulatieresultaten uit de tabel zijn in de volgende figuren grafisch weergegeven.



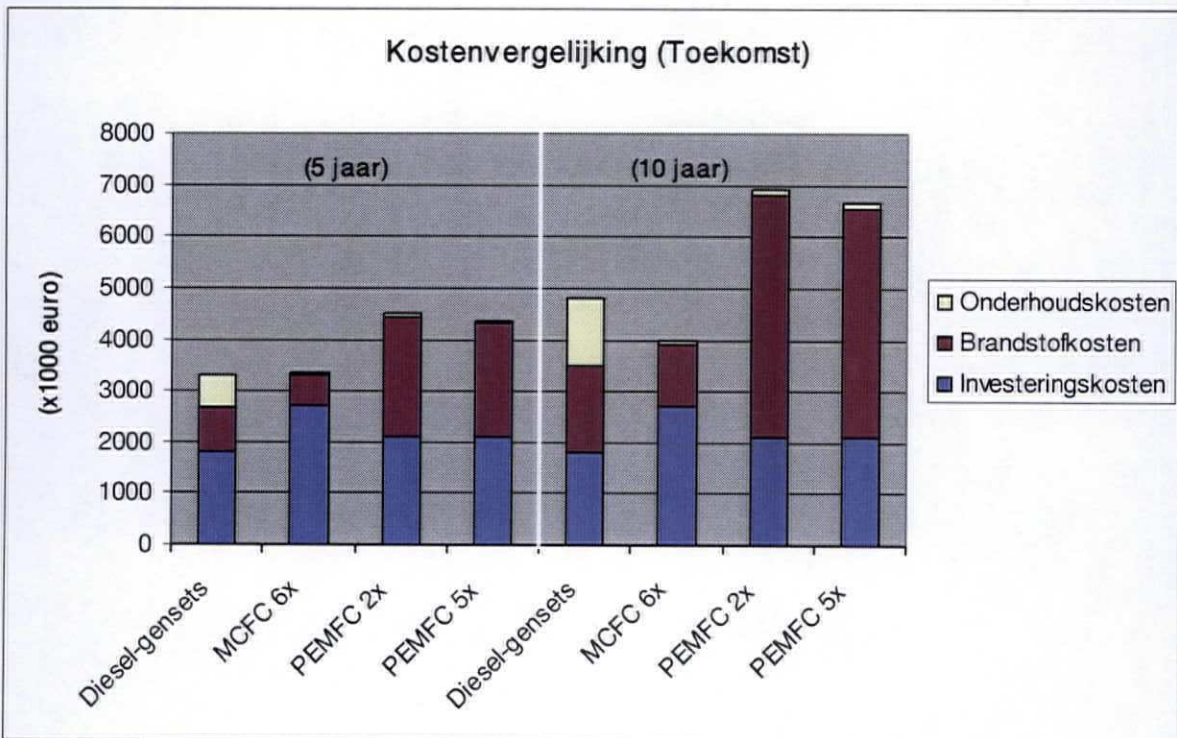
Figuur 8.3 Vergelijking van het volume van de energieketen inclusief brandstofopslag.



Figuur 8.4 Vergelijking van de massa van de energieketen inclusief brandstofopslag.



Figuur 8.5 Vergelijking van de investerings- plus exploitatiekosten van de energieketen over 5 en 10 jaren voor het huidige prijspeil.



Figuur 8.6 Vergelijking van de investerings- plus exploitatiekosten van de energieketen over 5 en 10 jaren voor een toekomstig verwacht prijspeil (over ca. 5 jaar).

Volume en gewicht

Het verschil in volume en gewicht van de energieketen wordt veroorzaakt doordat zowel in volume als gewicht de MCFC veel groter is dan de dieselgeneratoren, die weer groter zijn dan de PEM.

Uit de simulaties blijkt dat het overall systeemrendement van de energieomzetting van de varianten beter is dan dat van de referentie. Daardoor kan de dieseltank van de MCFC-variant ca. een kwart kleiner zijn dan die van de referentie. Hoewel de twee PEM-varianten minder energie hoeven mee te nemen aan boord, is het vereiste tankvolume (factor 5-13) en -gewicht (factor 4-5) beduidend groter door de ongunstige dichtheid van het waterstof.

De SWATH kan in het huidige ontwerp geen gewichtstoename verdragen, want dan zinken de drijvers. De toegestane volumetoename is ook beperkt, omdat er weinig of geen extra ruimte in de drijvers is. Hierdoor vallen de PEM-oplossingen voor de nabije toekomst af. De MCFC is echter wel een maakbaar alternatief voor de nabije toekomst, omdat het extra gewicht niet extreem is (ca. 40%). Omdat de brandstofcellen modulair zijn kunnen allerlei loze ruimtes benut worden om de systemen te plaatsen, dit biedt mogelijkheden om het extra volume kwijt te raken op de SWATH. Merk op dat er flink wat lege ruimte rond de dieselgeneratoren aanwezig is, die nodig is om eromheen te lopen. Indien dit uit onderhoudsoverwegingen niet nodig is bij brandstofcellen, kan heel de 'dieselgenerator-kamer' gevuld worden met brandstofcellen, waardoor er dus beperkte extra ruimte aan boord van het schip gezocht moet worden. Het extra gewicht zal geacomodeerd moeten worden door de drijvers enkele centimeters in diameter te vergroten (dit geeft meteen ook een beetje extra volume). Dit betekent dat de weerstand toeneemt en er dus extra voortstuwingsvermogen nodig is, wat de energieketen weer groter maakt. Hierin zal echter waarschijnlijk een nieuw optimum gevonden kunnen worden.

Kosten

Als de investeringskosten van alle component gegeven zijn, rekent GES de kosten van de totale installatie uit. Met de aannames uit tabel 8.1 worden zodoende de kosten uit Tabel 8.3 verkregen. De kosten van de brandstofcellen zijn onzeker, maar toch tamelijk realistisch.

De installatie met brandstofcellen vraagt nu nog een veel hogere investering dan de diesel-elektrische referentie. De onderhoudskosten voor de brandstofcellensystemen zijn echter aanzienlijk minder dan die voor de referentie. Het verschil zit in het zeer lage onderhoud van de brandstofcellen t.o.v. de dieselmotoren. De brandstofkosten zijn veel hoger voor de brandstofcellensystemen met waterstofinname: ca. 900k euro versus ca. 170k voor de diesel-elektrische variant en de ca. 120 voor de MCFC-brandstofcel met reformer (de laatste neemt ook dieselolie mee i.p.v. waterstof). (Hierbij is een prijs aangenomen van 145 euro/ton voor dieselolie en 3600 euro/ton voor waterstof nu en 1800 euro/ton over ca. 5 jaar.) De lagere onderhouds- en brandstofkosten maken de MCFC-variant in de nabije toekomst interessant als alternatief voor dieselgeneratoren, omdat in dit voorbeeld de terugverdientijd van de (50%) duurdere installatie ca. 5 jaar is, zie figuur 8.6. Het lijkt dus uit economisch oogpunt mogelijk om in de nabije toekomst (over ca. 5 jaar) een SWATH ferry met MCFC-systeem te laten varen.

Voor de PEM-varianten brengt het opslaan van waterstof ook nog aanzienlijke kosten met zich mee. De kosten voor de waterstoftanks komen voor hogedrukopslag op ca. 1 M euro (ca. de helft van de kosten van de energieketen), voor vloeibare opslag op 10 M euro en voor opslag in metaalhydride op 100 M euro (op basis van prijzen van de huidige kleinschalige systemen).

8.4 Conclusie

Het MCFC-systeem met reformer biedt perspectieven voor de nabije toekomst. De kosten lijken over 5 jaar overkomelijk te zijn, aangezien het lagere brandstofverbruik en de lagere onderhoudskosten een redelijke terugverdientijd van de duurdere installatie opleveren. Het benodigde extra gewicht (ca. 40%) kan in een aangepast scheepsontwerp eenvoudig verwerkt worden, het benodigde extra volume kost wat meer ontwerpinspanning.

Uit de simulaties blijkt dat een brandstofcelsysteem met waterstofopslag nog een oplossing voor de verre toekomst is: de opslag van waterstof vraagt nog een te groot volume en gewicht en waterstof is nog erg duur. Zowel in het volume en het gewicht van waterstofopslag en in de waterstofkosten moet ongeveer een factor 5 gewonnen worden om gelijk aan een dieselvariant te zijn. Ook de kosten van de opslaginstallatie moeten sterk gereduceerd worden.

De emissies geven natuurlijk wel een enorme voorsprong voor waterstofvarianten: de dieselgeneratoren van het referentieschip stoten ca. 8000 ton CO₂ per jaar uit, de PEM-systemen stoten geen emissies uit en de MCFC met reformer stoot slechts ca. 5500 ton uit door het betere ketenrendement t.o.v. de dieselgeneratoren.

9. BIJDRAGE VAN WERKGROEP C AAN GES

9.1 Samenvatting

Het werk van Werkgroep C was gericht op de analyse van energieketens. Omdat het TNO-programma GES hiervoor bij uitstek geschikt is, is GES gebruikt om de informatie van de Werkgroep te verwerken en om de case study uit te voeren.

De Werkgroep heeft de volgende zaken bijgedragen aan GES:

- De modellen van schakelborden, brandstofcellen en reformers zijn verbeterd;
- De gegevens voor de vergelijking van brandstofopslagsystemen (m.n. H₂) zijn aangeleverd;
- De GES-database is uitgebreid met nieuwe typen van bepaalde componenten (b.v. moderne typen brandstofcellen en geavanceerde elektromotoren) en parametergegevens (afmetingen, prijzen, rendement e.d.) zijn geupdate;
- De betrouwbaarheid van de gegevens is verbeterd;
- Er is een keuzemodule voor prime movers toegevoegd;
- Er is een module voor de dimensionering van de voortstuwers toegevoegd;
- De Werkgroep heeft een hernieuwde structuur voor de energieketen, demarcaties en interfaces opgesteld, die ook bruikbaar is in GES;
- Als case study is een modern schip gekozen. Dit kan opgenomen worden in de bibliotheek van voorbeelden in GES.

9.2 Inleiding

In deze paragraaf wordt ingegaan op de aangeleverde gegevens van de werkgroep C van het AES platform. Deze gegevens worden vergeleken met de gegevens die in GES aanwezig zijn.

Basis voor de GES bibliotheek is het rapport "Voorstudie All Electric Ship Taak 045 - Modelleren van energiesysteemcomponenten", 7 oktober 1990. Dit rapport is aan de werkgroepleden uitgereikt.

Vanaf 1990 tot nu is de GES bibliotheek een aantal malen gewijzigd en is ook de structuur veranderd. De gegevens van de componenten zijn gesplitst in zogenaamde rubberen modellen en bestaande modellen. De rubberen modellen gaan uit van componenten in een bepaalde range. Zij berekenen een verwachte efficiency, vermogen, toerental, spanning etc. uit volgens een huidige, nabije en toekomstige verwachte technologie. Deze gegevens zijn verkregen uit een verzameling gelijksoortige apparaten. Voor zowel technische als economische aspecten zijn curven, tabellen etc. bepaald. Dit was afhankelijk van de gegevens die voorhanden waren. In GES zijn de gegevens op dezelfde manier opgeslagen zoals zij geleverd waren. Dit is voor iedere component verschillend.

Voor de berekening van de energiestromen is een technisch model noodzakelijk. Het eenvoudigste model is gebaseerd op efficiency. Om ook een uitspraak te kunnen doen over deellast zijn ook efficiency curven bepaald. Ook deze gegevens zijn in verschillende vorm geleverd. Tevens zijn er in GES een groot aantal zogenaamde 'first principle' modellen gebruikt om nauwkeurig het noodzakelijke te weten energieverlies te kunnen uitrekenen. In GES is het mogelijk deze modellen door elkaar heen te gebruiken om een goede voorspelling te kunnen doen van het energiegebruik van een totaal netwerk.

Voor een eindontwerp was het noodzakelijk bestaande apparatuur te gebruiken. Een grote hoeveelheid maritieme apparatuur is in een echte database (ACCESS) 'plat' ingevoerd. Dit

wil zeggen dat er geen relatie is tussen de gebruikte grootheden. In de praktijk bleek dat het moeilijk is om van ieder apparaat alle gegevens precies te krijgen. Onbrekende gegevens worden dan ook weer aangevuld met gegevens uit de rubberen modellen.

Al met al is een component in GES een aaneenschakeling van verschillende data en systeembeschrijvingen die netjes door GES gepresenteerd wordt als een herkenbaar apparaat.

De apparaten zijn in GES opgeslagen in een bibliotheek, waarin een scheiding gemaakt is op energiesoort (elektrische, mechanische, hydraulische,..).

In werkgroep C is eens nagegaan welke apparaten belangrijk zijn voor de energieketen van een schip. Daarvoor zijn een groot aantal kengetallen voor apparaten verzameld. In het volgende wordt per keten aangegeven welke gegevens voor GES bruikbaar zijn en hoe zij eventueel verbeterd kunnen worden.

9.3 Overzicht bruikbare data voor GES

9.3.1 Brandstof

Dieselolie

Dichtheid [kg/l] is een aanvulling.

viscositeit [cSt] is een aanvulling, maar wordt geleverd in een range waardoor de keuze moeilijk is.

Verbrandingswaarde [kJ/kg] is in GES beter gedefinieerd

Zwavergehalte [%] is opgegeven in ranges, dus de keuze is moeilijk bij welke samenstelling een bepaalde waarde hoort.

Vochtgehalte [%] is een aanvulling maar niet volledig.

Dichtheid is in GES opgenomen als parameter density

Opslag moet nog in GES geïmplementeerd worden met als uitkomst massa en volume van de tank.

Waterstof (met verschillende methoden van opslag)

Zijn nog niet opgenomen in GES. De tabellen zijn echter wel bruikbaar voor GES.

9.3.2 Prime movers

Interne verbrandingsmotoren (dieselmotoren)

Goed overzicht van de kengetallen.

Gegevens zijn geleverd als ranges die geen samenhang hebben. Voorbeeld:

toerental van 80-300 [rpm] en vermogen van 6000 – 95000 [kW], hoort nu 80 rpm bij het lage vermogen? Nee, waarschijnlijk bij het hoge vermogen.

Om te kunnen rekenen is dus een bepaalde functie of gebied noodzakelijk, dat ontbreekt.

Aangeven type brandstof is bruikbaar voor GES. Is nog niet verwerkt.

Gegevens Langzaam tweetakt ontbreekt in GES. Echter gegevens zijn opgegeven in ranges. Huidige GES-modellen zijn reeds zeer uitgebreid.

Gasturbines enkelvoudige cyclus

Zie opmerkingen verbrandingsmotoren.

Aangeven type brandstof is bruikbaar voor GES. Is nog niet verwerkt.

Huidige GES-modellen zijn reeds zeer uitgebreid.

Gasturbines gecombineerde cyclus

Zie opmerkingen verbrandingsmotoren.

Aangeven type brandstof is bruikbaar voor GES. Is nog niet verwerkt.

Huidige GES-modellen zijn reeds zeer uitgebreid.

Stirling motor

Zie opmerkingen verbrandingsmotoren.

Nog geen Stirlingmotor in GES geïmplementeerd

9.3.3 E opwekking*Asynchrone generatoren*

Efficiency curven ontbreken. Belangrijk zijn de nullast verliezen.

Synchrone generatoren

Er zijn een aantal bruikbare bestaande generatoren geleverd.

Wat ontbreekt is: MTBF, MTTR, MOC, IPC (standaard GES-parameters), ook Efficiency curven ontbreken. Belangrijk zijn de nullast verliezen.

High speed generatoren

Alleen gegevens in de vorm van ranges.

Geen rubberen gegevens, ook niet in GES.

Gelijkstroomgeneratoren

Alleen gegevens in de vorm van ranges.

Nog geen gegevens voorhanden. Bevinden zich ook nog niet in GES.

PM generatoren

Alleen gegevens in de vorm van ranges.

Brandstofcellen incl. evt. fuel reforming

Een voorbeeld hoe de gegevens voor GES aangeleverd moet worden.

Niet alle gegevens zijn voor handen zoals MTBF, MTTR, MOC, IPC, lifetime (standaard GES-parameters).

Tabellen zijn opgenomen in de GES database en er is een component voor ontwikkeld.

Hybride systemen (BC + roterende prime mover)

Geen gegevens voorhanden. In GES is alleen een diesलगenerator en gasturbinegenerator als combinatie aanwezig.

Zonnecellen

Overzicht van de opbrengst per oppervlak. Echter opgegeven in ranges. Dus alleen bruikbaar voor markeringen.

In GES zijn modellen. Gegevens zijn nog niet vergeleken.

9.3.4 E hoofddistributie*Schakelmateriaal / beveiligingen Laagspanning / Middenspanning*

De afmetingen zijn beter gedefinieerd, echter deze gegevens zijn nog niet in GES geïmplementeerd.

Er zijn een groot aantal verschillende schakelborden in GES aanwezig, echter uitgevoerd als component.

AC – DC distributie

DC gegevens niet voor handen ook niet in GES.

Kabels

Geen gegevens aangeleverd. Wel gegevens in GES. Belangrijk is onderscheid te maken in de installatie voor 3-fase en 1-fase netwerken en DC netwerken.

Opm. invloed kabels niet onderschatten vooral als het een elektrisch concept betreft.

9.3.5 Opslag van energie

Secundaire batterijen

Batterijen: goed overzicht. Is nog niet vergeleken met de GES-modellen, maar lijkt goed bruikbaar. Daarvoor moet dan een aparte GES-component voor ontwikkeld worden.

Kortsluitstroom-gegevens ontbreken.

Condensatoren

Bruikbare gegevens. Echter nog niet in GES. Moet een component voor ontwikkeld worden.

Geen kosten en onderhoudskosten

Vliegwielen

Bruikbare gegevens. Echter nog niet opgenomen in GES. Component moet in GES aangepast worden.

Geen kosten en onderhoudskosten.

Magnetische opslag (SMES)

Bruikbare gegevens. Echter nog niet in GES. Moet een component voor ontwikkeld worden.

Geen kosten en onderhoudskosten.

Redoxflow batterijen

Bruikbare gegevens. Echter nog niet in GES. Moet een component voor ontwikkeld worden.

Geen onderhoudskosten

9.3.6 Conversie

Transformatoren

Gegevens waren niet noodzakelijk. In GES zitten goede modellen. Misschien dat er wat bestaande bruikbare transformatoren ontbreken voor verificatie.

Roterende omzetter

Gegevens ontbreken, ook in GES

Dit is een combinatie van apparatuur (elektrische motor en generator) en moet nu samengesteld worden uit enkele componenten.

Statische omzetter

Alleen overzicht van de omzetter.

Voor de AC-AC types zijn efficiency modellen in GES aanwezig. Niet voor de DC types.

9.3.7 Aandrijvingen

Omzetter

Alleen overzicht van de types.

In GES zijn rubberen modellen aanwezig.

Synchrone motoren

Alleen overzicht van de types.

In GES is een rubberen model en een 'first priciple' model.

Asynchrone motoren

Alleen overzicht van de types.

In GES is een rubberen model een 'first priciple' model en een dynamisch model.

Gelijkstroommotoren

Alleen overzicht van de types.

In GES alleen 'first priciple' modellen, zonder verdere gegevens.

PM motoren

Alleen overzicht van de types.

In GES is een rubberen model.

9.3.8 Voortstuwars*Conventionele schroef*

Goede ontwerpregels geleverd.

Nog niet in GES, omdat concept aangepast dient te worden.

Bruikbaar ontwerpprogramma geleverd. Is geïmplementeerd in GES als een standaard component. Moet echter nog gekoppeld worden aan het GES-concept.

In GES zelf zijn een groot aantal 'first principle' schroeven aanwezig.

Contra Rotating Propeller

Goede ontwerpregels geleverd.

Nog niet in GES, omdat concept aangepast dient te worden.

In GES is een 'first principle' CPP model., echter zonder verdere gegevens.

Pumpjet

Goede ontwerpregels geleverd.

Nog niet in GES, omdat concept aangepast dient te worden.

Azimuth thruster

Goede ontwerpregels geleverd.

Nog niet in GES, omdat concept aangepast dient te worden.

Pod

Goede ontwerpregels geleverd.

Nog niet in GES, omdat concept aangepast dient te worden.

In GES is een 'first principle' model, dient met deze gegevens aangepast te worden.

Er is tevens een pod-bibliotheek van bestaande pods.

Waterjet

Zeer bruikbare gegevens in 'rubberen vorm'.

De efficiency en massa gegevens moeten in een aparte component van GES geïmplementeerd worden.

De gegevens van enkele bestaande waterjets moeten nog in de GES bibliotheek opgenomen worden.

Whaletail / paddlewheel

Informatie voor geleverd, echter nog niet in bruikbare vorm voor GES.

In GES is een 'first principle' whaleltail model, echter zonder verdere gegevens.

Voith Schneider

Informatie voor geleverd, echter nog niet in bruikbare vorm voor GES.

9.4 Conclusie

Uit de werkgroep is een goede bruikbare definitie gekomen van de energieketen van een schip. Deze definitie kan gebruikt worden als basis voor de structuur van de GES bibliotheek.

Per ketencomponent is nog eens nagegaan wat de kengetallen per component moeten zijn en hoe die gedefinieerd moeten worden. Voor GES zijn een aantal kengetallen per component uitgebreid. Ranges van kengetallen zijn voor GES nog niet goed bruikbaar voor de ontwikkeling van een component, omdat de samenhang tussen de verschillende kengetallen ontbreekt. Voor componenten waar een vaste waarde voor is opgegeven is er geen probleem. Dit treedt vooral op bij componenten die maar één energie-uitwisselingspoort hebben met zijn omgeving, zoals bijvoorbeeld brandstof.

De ranges zijn wel bruikbaar om te controleren of het gekozen apparaat wel de juiste is. Niet voor alle GES componenten wordt daar een waarschuwing voor gegeven.

Gegevens van bestaande apparatuur die door de werkgroep geleverd zijn, zijn wel in de algemene componenten bibliotheek van GES opgenomen. Echter niet alle geleverde gegevens zijn volledig om te kunnen voldoen aan een complete analyse, maar dit is een algemeen probleem. Omdat nu GES zelf de ontbrekende gegevens aanvult aan de hand van bestaande rubberen modellen, kan deze apparatuur wel degelijk worden gebruikt.

Een belangrijke aanvulling voor GES zou zijn dat er basiscomponenten voor de brandstof, prime movers, E opwekking, E hoofddistributie, Conversie E energie, ...etc. worden ontwikkeld. Een installatie kan dan (gedeeltelijk) opgebouwd worden met deze basiscomponenten. Ieder basiscomponent zou dan een aanbeveling kunnen geven van mogelijke apparatuur en/of combinaties.

Noodzakelijk voor deze werkwijze is dat de bibliotheek *relationeel* wordt opgezet. Voor GES wordt het dan eenduidig hoe de gegevens er uitgehaald kunnen worden, maar ook voor de ontwerper ligt dan een heldere structuur vast om zijn aanvullende gegevens in de database op te nemen. Een aanzet voor de structuur van een relationele database wordt gegeven in bijlage C.

10. NOTEN

-
- ¹ In GES zitten ook modellen van de voortstuwers die het benodigde asvermogen (c.q. koppel) berekenen uit het voortstuwingsvermogen (c.q. de stuwkracht) dat aan het water moet worden afgegeven, dus incl. schroefrendement, hull efficiency, e.d.
- ² Het rendement is een *vermogens*rendement in de modellen. Dit is afhankelijk van de belastingsgraad van de component. Over het hele operationele profiel komt hier uiteindelijk een overall *energie*rendement uit.
- ³ MTBF = mean time between failures.
- ⁴ MTTR = mean time to repair.
- ⁵ De availability per component wordt door GES berekend volgens: $availability = MTBF / (MTTR + MTBF)$.
- ⁶ Aangenomen wordt dat de MCFC incl. reformer 1.5 keer zo duur is als de PEMFC.
- ⁷ Volgens een DoE (USA) voorspelling uit de jaren '90: DoE targets: 300 \$/kW (2001), 125 \$/kW (2005), 45 \$/kW (2010).
- ⁸ De totale energie afgegeven aan de assen is $15.0E+12$ J/jaar.
- ⁹ Aanname voor toekomstige brandstofkosten (over ca. 5 jaar): dieselprijs: gelijk; waterstofprijs: gehalveerd.

BIJLAGE A TOEPASSING VAN SELECTIECITERIA EN WEEGFACTOREN

Onderstaande beschrijving is afgeleid van een TNO-onderzoek voor de Koninklijke Marine naar alternatieven voor toekomstige marineschepen.

Gewogen vergelijking van energieconcepten

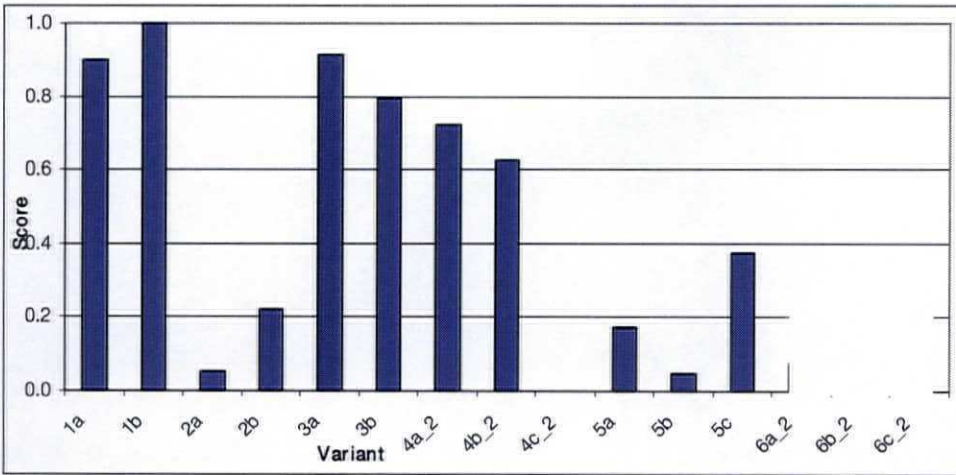
In de TNO-studie voor de KM zijn de numerieke resultaten van de GES-analyses voor de verschillende aspecten gegeven. In deze paragraaf worden die resultaten met weegfactoren bij elkaar opgeteld om zo de verschillende energieconcepten numeriek met elkaar te vergelijken. Het uiteindelijke resultaat van deze vergelijking hangt natuurlijk sterk af van de gekozen weegfactoren. De hier gebruikte weegfactoren zijn een TNO-keuze en vormen slechts een voorbeeld.

De beschouwde aspecten zijn: investeringskosten, volume, vloeroppervlak, massa, onderhoudskosten, brandstofkosten, emissies. De gebruikte weegfactoren staan in tabel 1. De weegfactoren zijn als startpunt zodanig gekozen, dat de weegfactor vermenigvuldigd met het verschil tussen de maximale en minimale waarde per aspect (" $W \times (\max-\min)$ " in de tabel) ongeveer 10 is (hierbij zijn extreme uitschieters, bv. de investeringskosten van variant 4c, weggelaten). De weegfactoren bij de onderhoudskosten en de brandstofkosten zijn 30 keer de weegfactor bij de investeringskosten, dit representeert een levensduur van 30 jaar. Het volume en het vloeroppervlak zijn samengenomen, zodat " $W \times (\max-\min)$ " voor deze twee aspecten samen ongeveer 10 is. Het verloop van de CO₂- en SO_x-emissies is exact gelijk aan dat van de brandstofkosten, dus deze behoeven niet afzonderlijk meegenomen te worden. De overige emissies (NO_x, HC, CO) worden wel afzonderlijk meegenomen (omdat deze bij dieselmotoren beduidend groter zijn dan bij gasturbines), met dien verstande dat de bijdrage in " $W \times (\max-\min)$ " van deze drie samen ongeveer 10 is.

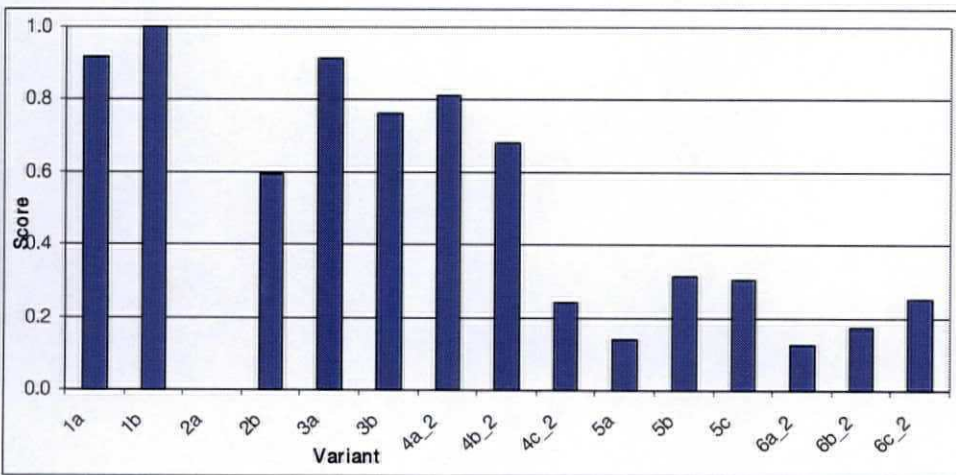
Tabel 1: Weegfactoren bij de numerieke vergelijking van de concepten.

Aspect	Weegfactor W	$W \times (\max-\min)$
Investeringskosten [€]	0.001	10
Onderhoudskosten [€/j]	0.03	13
Brandstofkosten [€/j]	0.03	10
Massa [ton]	0.03	9
Volume [m ³]	0.01	6
Vloeroppervlak [m ²]	0.03	5
Emissies NO _x [ton/j]	0.01	3
HC [ton/j]	0.7	3
CO [ton/j]	0.2	4

Met de weegfactoren uit tabel 1 worden bepaalde tussenscores uitgerekend. Deze tussenscores worden daarna genormeerd, zodat een score tussen 0 en 1 ontstaat, waarbij 1 de beste score is. Uit deze normering volgt dat de beste variant exact de score 1 krijgt en de slechtste exact 0. De genormeerde scores voor de 6 concepten en hun varianten zijn te zien in de figuren 1 (voor systeem A) en 2 (systeem B). Hoe hoger de score, des te beter de variant is. Voor de systemen A en B zijn dezelfde weegfactoren gebruikt.



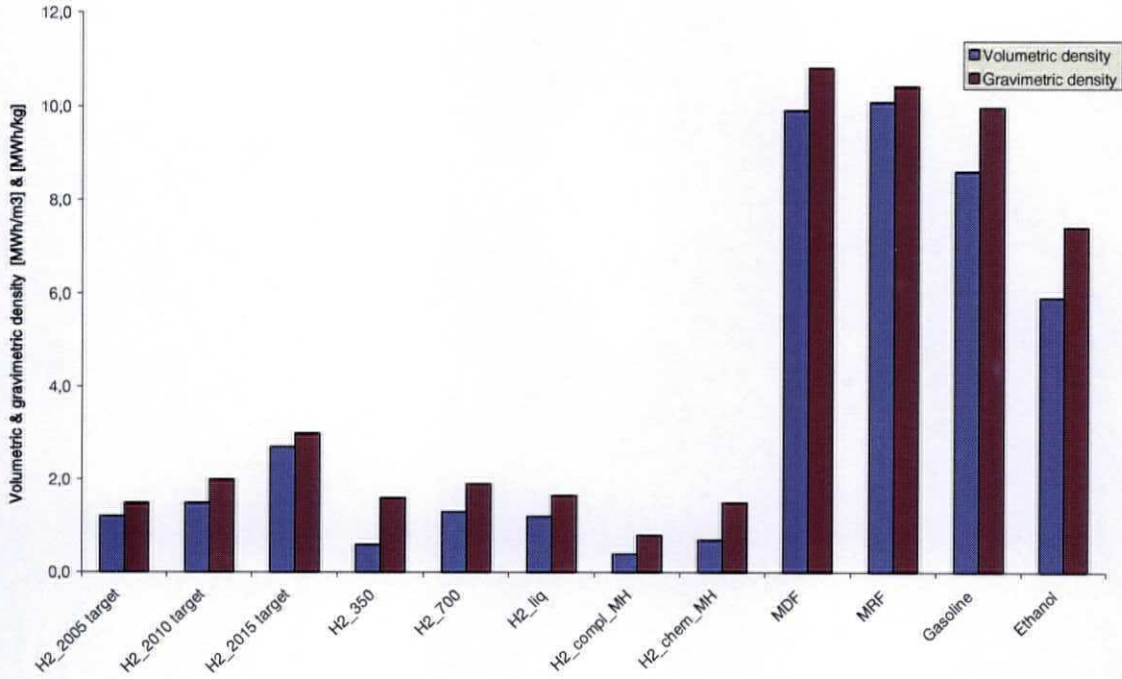
Figuur 1: Gewogen totaalscore van de GES-analyse per variant voor systeem A.



Figuur 2: Gewogen totaalscore van de GES-analyse per variant voor systeem B.

BIJLAGE B DICHTHEDEN VAN BRANDSTOFOPSLAGTECHNIEKEN

Onderstaande figuur is figuur 5 uit het document "Hoofdstuk_Prime_movers_31.doc".



Figuur 3 Volumetrische en gravimetrische dichtheden van de verschillende brandstofopslagtechnieken.

BIJLAGE C AANZET VOOR EEN RELATIONELE-DATABASESTRUCTUUR

Inleiding

Voor verschillende projecten met GES is in de loop der tijd een bibliotheek van apparatuur ontstaan. Daarnaast zijn er in GES een aantal componenten ontwikkeld, waarmee men met GES een bepaald concept kan uitvoeren. Met deze bibliotheekcomponenten is het mogelijk om uitgaande van een operationeel profiel van een schip een energieberekening te doen. Daarvoor dient men een voortstuwingsstelsel in GES met bibliotheekcomponenten op te bouwen. GES berekent dan het energie-evenwicht van de installatie en tevens de economische aspecten.

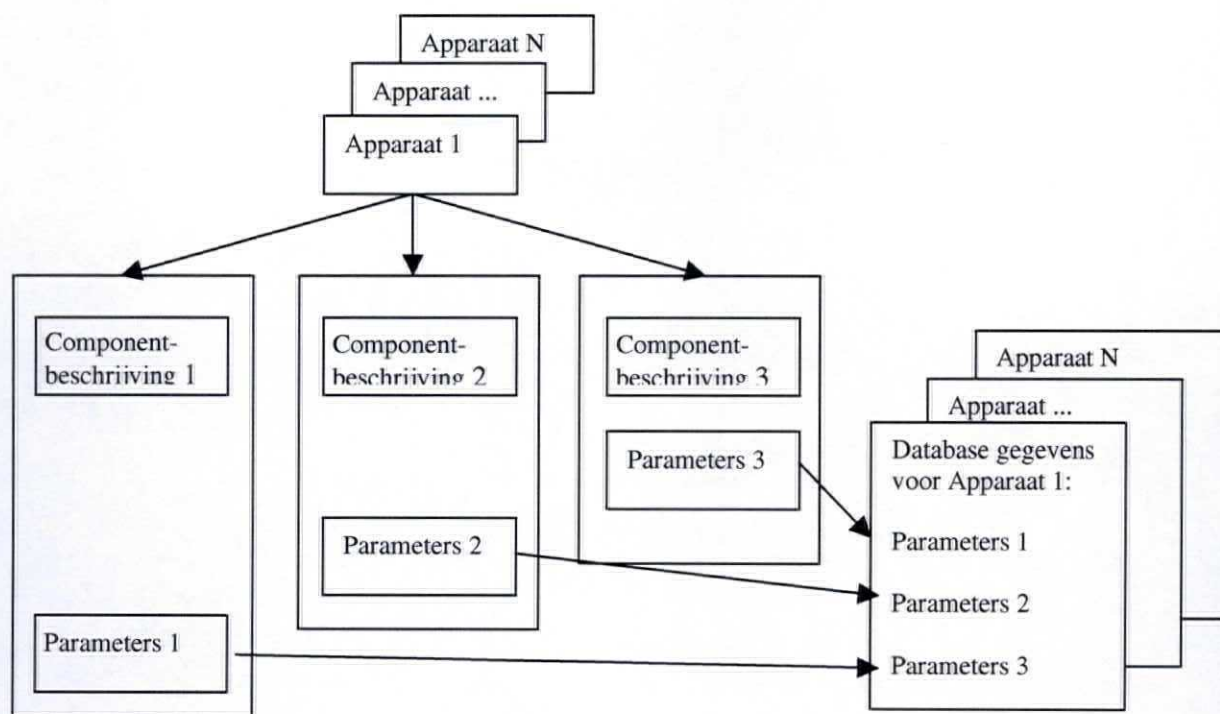
Huidige bibliotheekstructuur in GES

In eerste instantie vanwege het onderhoud van de componentenbibliotheek is er een scheiding gemaakt van structuur en data in GES. Dit heeft verschillende voordelen. Het systeemgedrag van de componenten is buiten GES om beschreven in files met vergelijkingen die aansluiten bij wetenschappelijke rapporten. Daarnaast zijn de economische gegevens van de componenten in dezelfde files opgenomen. De files hebben de naam van de componenten en zijn in de praktijk dan ook gemakkelijk aan te passen en te onderhouden. Al deze files staan onder een hoofddirectory. Door eenvoudig deze directory te kopiëren en de files van nieuwe informatie te voorzien is het mogelijk met een zelfde voortstuwingsstructuur een andere berekening te maken. Alles heeft te maken met een filosofie van zoveel mogelijk componenten in het model die ook daadwerkelijk in het schip voorkomen, zonder dat men steeds de gehele installatie moet invoeren om een ander type berekening te doen.

Tevens is een database aanwezig bij GES die gegevens bevat van bestaande apparatuur. Al deze gegevens zijn 'plat' opgeslagen, waardoor de overzichtelijkheid tekort gaat komen als de database uitgebreid wordt. Omdat niet alle gegevens voor iedere bestaande component in GES voor handen zijn, worden deze automatisch door GES ingevuld met ingeschatte waarden. De gegevens uit de database kunnen met GES via een pop-upvenster getoond en opgehaald worden.

Hoe kan de structuur in GES er uitzien

Ten eerste: afhankelijk van het te simuleren probleem komen er voor één apparaat een aantal verschillende energiebeschrijvingen. Dit is wiskundig en moet aansluiten voor de doelgroep waar de bibliotheek voor gebruikt gaat worden, bijvoorbeeld: deellastrendement, trillingsgedrag, optimaal toerental of spanning, etc. Daarnaast moet er een database zijn met allerlei gegevens voor aanwijsbare apparatuur en voor "ontbrekende apparatuur". Dit laatste zou kunnen zijn een schatting van parameters voor tussenliggende ontbrekende apparatuur of verwachte toekomstige apparatuur. De mensen met de meeste kennis hierover moet zich hierover buigen. In de volgende figuur is een overzicht gemaakt van de componentstructuur in GES.



Voorbeeld:

Apparaat 1 is b.v. een prime mover. Deze component zou beschreven kunnen worden op verschillende manieren en afhankelijk van de probleemstelling wordt een model uit de bibliotheek gehaald. Ieder model heeft ook verschillende parameters, die zijn gedrag vastleggen. Uit de naast liggende algemene database zouden deze gegevens betrokken kunnen worden.

De relationele database moet goed opgezet worden voor verschillende apparaten. Op dit moment is de database van GES niet gestructureerd en men kan geen doorsnijdingen maken om gemakkelijk naar mogelijke configuraties te zoeken. Omdat ook de verschillende gegevens in verschillende bronnen bijgehouden worden, moet alles door GES en de gebruiker zelf gecoördineerd en georganiseerd worden.

Relationele database

In eerste instantie moet nu een "scheiding" gemaakt worden tussen beschrijving van systeemgedrag en apparatuur gegevens. Systeemgedrag wordt nu puur wiskunde en componentgegevens zuiver economisch. Door deze splitsing krijg je nu ook weer dat de juiste man zich met zijn gebied gaat bezig houden, zonder dat we de integratie van alle systemen uit het oog verliezen. GES is hier al voor geschikt, het huidige 'platte' bibliotheek-concept behoeft alleen maar herzien te worden.

In een goede database worden gegevens slechts één keer opgeslagen. De gegevens zijn onderling gerelateerd: aan een dieselmotor zijn bijvoorbeeld meerdere typen generatoren te koppelen. Aan elke component zijn mogelijkheden opgenomen die weer specifieke gegevens bevatten zoals massa, volume, prijs etc. Aan de componenten zijn gegevens gekoppeld die betrekking hebben op de technologie, tijd, omgeving, waarvoor toepasbaar, wie de gegevens heeft ingevoerd etc. etc. Deze structuur moet eerst opgezet worden. Daarvoor moeten afspraken gemaakt worden hoe de relatie gaat worden tussen de

componenten en welke gegevens van de componenten opgeslagen dienen te worden. Tevens moet duidelijk worden hoe ontbrekende gegevens ingevuld gaan worden.

Vullen van de relationele database

Als de bibliotheek relationeel opgezet is, is er ook eenduidigheid met het vullen van de database.

De gegevens behoeven maar één keer ingevuld te worden en kunnen dan op meerdere plaatsen bereikbaar zijn. Als de gegevens gewijzigd worden, worden zij ook automatisch op alle plaatsen aangepast, waardoor geen verschillen kunnen ontstaan. Een eerste aanzet kan gemaakt worden door de huidige AES-data uit de GES bibliotheek hiervoor te gebruiken.

Wat moet er op korte termijn gebeuren.

Een ieder moet een basisbibliotheek hebben.

Er moeten voorbeelden van basiscomponenten komen om snel informatie in de bibliotheek te zetten.

Er moet een overzicht zijn van gebruikers. (Grote beheerders kunnen natuurlijk hun eigen gebruikerskring managen.)

Er moet een soort van helpdesk komen en de gebruikers moeten geïnformeerd worden.

Uiteindelijk een gebruikersgroep.

GENERIEK BESTEK
voor
ENERGIEKETENS
aan boord van
“ALL ELECTRIC SHIPS”

BIJLAGE C

AES-Nieuwe Technologie

Opgesteld voor:
All Electric Ship platform

Opgesteld door:
AES werkgroep C

INHOUDSOPGAVE

1.	INTRODUCTIE	1
2.	ALGEMENE GENERIEKE EISEN	2
2.1	Veiligheid voor de omgeving	2
2.2	Emissie-eisen	2
3.	GENERIEKE EISEN VOOR SCHEPEN.....	3
3.1	Ontwerpeisen.....	3
3.2	Omgevingscondities	3
3.2.1	Hellingen	3
3.2.2	Varen in golven	3
3.2.3	Omgevingstemperaturen	3
3.2.4	Koelwater	4
3.2.5	Vocht	4
3.2.6	Zout aanslag.....	4
3.2.7	Olie vervuiling	4
3.2.8	EMC	4
3.3	Geluidseisen	4
3.4	Brandstoffen aan boord van schepen	5
3.4.1	Brandstoffen voor dieselmotoren	5
3.4.2	Brandstoffen voor brandstofcellen.....	5
4.	PRIME MOVERS	6
4.1	Functie eis.....	6
4.2	Geschiktheid.....	6
4.3	Belastbaarheid.....	6
4.4	Betrouwbaarheid	6
4.5	Brandstofverbruik en -uitstoot	7
4.6	Directe omzetting van brandstof in elektrische energie	7
5.	ELEKTRISCHE INSTALLATIES EN APPARATUUR.....	8
5.1	Vermogensprofiel.....	8
5.2	Positionering in het platform	8
5.3	Typetests.....	8
5.3.1	Voedingsspanning AC	8
5.3.2	Voedingsspanning DC	9
5.3.3	Werktemperaturen	9
5.3.4	Trillingen	9
5.3.5	Vocht	9
5.3.6	Zout nevel test.....	9
5.3.7	Olie vervuiling	9
5.3.8	EMC	9
6.	OPWEKKING	10
6.1	Geschiktheid.....	10
6.2	Beveiliging tegen interne fouten	10
6.3	Selectiviteit	10
6.4	Reserve capaciteit in opwekking.....	10
7.	ELEKTRICITEITSDISTRIBUTIE.....	12
7.1	Keuze laag- of hoogspanning	12
7.2	Veiligheid	12
7.2.1	Isolatiespanningen	12

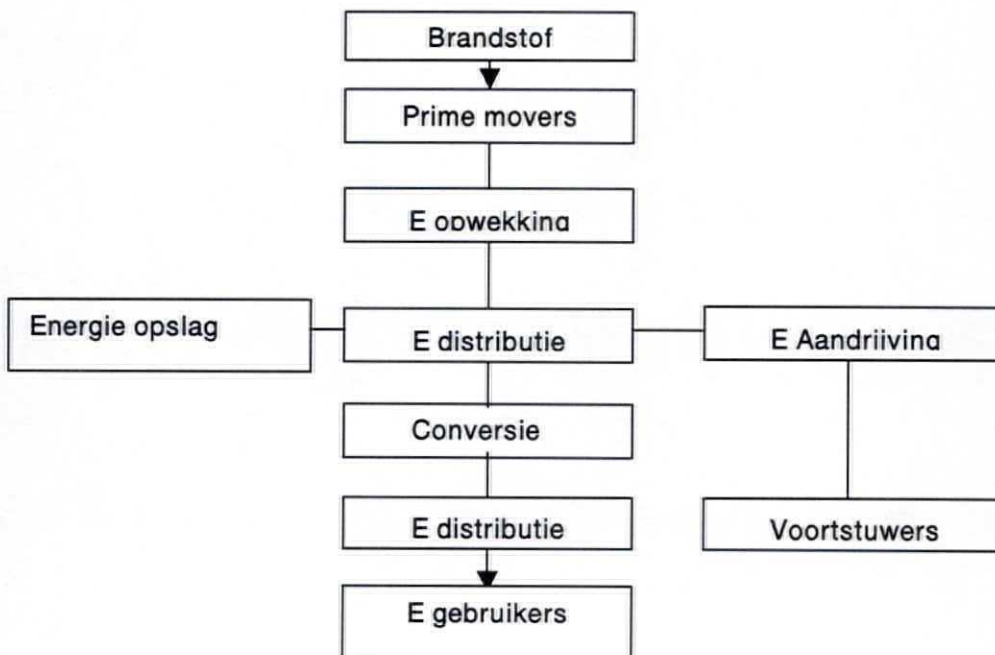
7.2.2	Kortsluiting.....	12
7.2.3	Aarding	13
7.2.4	Veilig werken aan boord	14
7.2.5	Aanvullende eisen voor HV-Distributie net.....	14
7.2.6	Explosieveiligheid (Ex-eisen) ref Lloyds:.....	14
7.2.7	Veiligheid i.v.m. isolatie en afscherming (IP-eisen)	14
7.2.8	Standards	14
7.3	Spanningsniveau einddistributie.....	15
7.3.1	Spanningsniveau scheepsdistributienet.....	15
7.3.2	Spanningstolerantie	15
7.4	Schakelborden.....	15
8.	ENERGIEOPSLAG.....	17
8.1	Veiligheid	17
8.1.1	Batterij / supercondensator	17
8.1.2	Vliegwiel.....	18
8.1.3	EMI.....	18
8.2	Spanningsniveau.....	18
9.	CONVERSIE.....	19
9.1	Transformator	19
9.2	Statische omvormer	20
9.3	Roterende omvormer	20
10.	AANDRIJVING	21
10.1	Beveiliging tegen interne fouten	21
10.2	Crashstoppen	22
10.2.1	Rem energie	22
10.3	Blackout preventie	22
10.3.1	Vermogens limitering	22
10.3.2	Quick power reduction	23
10.4	Netvervuiling.....	23
11.	VOORTSTUWERS	24
11.1	Algemeen	24
11.2	Sterkte	24
11.3	Omgeving.....	25
11.4	Rendement.....	25
	LIJST VAN AFKORTINGEN:.....	26

1. INTRODUCTIE

Dit document bevat het generieke bestek voor energie ketens aan boord van schepen met een elektrische voortstuwing als onderdeel van een geïntegreerd elektrisch opwekking- en distributienet. Het bestek is een combinatie van eisen die voortkomen uit ervaringen bij het ontwerpen van energieketens, en Klasse Bureau eisen. Bij de opzet van het bestek is bewust gekozen om niet de Klasse Bureau eisen te kopiëren, omdat die nog niet zijn toegesneden op de hier bedoelde toepassingen. Daar waar dat mogelijk en zinvol is, wordt gebruik gemaakt van de Klasse Bureau eisen; hier wordt dan tevens in de tekst of toelichting naar verwezen.

Het bestek is bedoeld voor gebruik in de conceptuele fase van een ketenontwerp. Tevens is het bestek een hulpmiddel bij een eerste beoordeling of nieuwe technologie geschikt is of geschikt gemaakt kan worden voor toepassing aan boord van schepen. Daar waar voor identieke toepassingen verschillende eisen worden gesteld door dit bestek, Klasse Bureaus en/of IEC/EN prevaleert dit bestek boven de eisen van Klasse Bureaus en Klasse Bureaus prevaleren boven IEC/EN normen.

Het bestek bevat generieke eisen voor apparatuur aan boord van schepen, voor prime movers als omzetters van brandstof in mechanische of elektrische energie, voor elektrische installaties in het algemeen, voor iedere component in de elektrische energieketen en voor voortstuwings. De energieketen is weergegeven in de onderstaand figuur:



Bij het opstellen van de generieke eisen is uitgegaan van wat op dit moment voor "conventionele" toepassingen gemeen goed is. De meeste van deze eisen blijken ook voor nieuwe technologieën te gelden, juist omdat het om generieke zaken gaat.

De generieke eisen hebben enerzijds met de component zelf te maken, maar kunnen ook van buitenaf opgelegd worden door het systeem waarin de component is toegepast.

Anderzijds kan niet voorbij gegaan worden aan generieke eisen die aan het volledige systeem en het feit dat het om schepen gaat, gesteld moeten worden.

In het bestek zijn de eisen genoteerd in de linker kolom; in de rechter kolom bevindt zich de toelichting op de eis of een nadere uitwerking ervan.

2. ALGEMENE GENERIEKE EISEN

2.1 Veiligheid voor de omgeving

De apparatuur mag geen schadelijke effecten uitoefenen op zijn omgeving, op andere apparatuur noch op de mens. Zowel bij productie, montage, inbedrijfstelling, gebruik, defecten van welke orde dan ook, verwijdering en sloop mogen geen schadelijke hoeveelheden van stoffen en/of gassen vrijkomen. Bovenstaande punten zijn over het algemeen wettelijk geregeld.

Er dienen maatregelen genomen te zijn tegen zelfontbranding

Het trillings- en geluidsniveau dient zodanig beperkt te zijn dat ook bij langdurige blootstelling geen schadelijke invloed optreedt voor de mens, het apparaat of de omgeving.

EMC-emissies conform de geldende voorschriften op schepen.

2.2 Emissie-eisen

Schepen moeten voldoen aan de emissie-eisen zoals opgelegd door de EU.

b.v. halogeenvrije materialen bij isolatiematerialen (géén klasse-eis)

b.v. indien brandstoflekkage op hete delen mogelijk is.

IMO eist dat dit volgens de specificaties van de opdrachtgever gebeurt. Naast de algemene IMO-eisen stellen diverse landen strengere eisen aan schepen die in hun territoriale wateren komen.

3. GENERIEKE EISEN VOOR SCHEPEN

De apparatuur dient bestand te zijn tegen de invloeden van de omgeving waarin deze wordt toegepast. Voor schepen zijn dat: omgevingstemperatuur, luchtvochtigheid, (zoute nevel), scheefstand, bewegingen, trillingen en schokken.

3.1 Ontwerpeisen

De gehele energieketen dient ontworpen te worden voor een levensduur die ten minste gelijk is aan de geëiste levensduur van het gehele platform.

Achteruitgang van apparatuur als gevolg van omgevingscondities die binnen de hier gestelde waarden blijven, mag niet plaatsvinden binnen de ontwerplevensduur van de gehele energieketen.

De opdrachtgever eist een bepaalde mate van beschikbaarheid in aantal dagen per jaar varen c.q. operationeel zijn. Dit is geen generieke bestekseis, maar een overeenkomst met de opdrachtgever.

3.2 Omgevingscondities

Alle apparatuur dient te kunnen functioneren onder de volgende omgevingscondities:

3.2.1 Hellingen

Slagzij permanent: 15 graden
Trim: 5 graden

3.2.2 Varen in golven

Slingeren: ± 22.5 graden
Stampen: ± 10 graden
Piek versnellingen:
- schepen langer dan 90m: 0.6 g
- kleinere schepen: 1 g gedurende 5-10 s

3.2.3 Omgevingstemperaturen

Machinekamers etc. 0-45 °C

Dit kan door middel van type keuringen of project keuringen plaats vinden.

Als de omgevingscondities zwaarder zijn dan voor standaard apparatuur gebruikelijk is, kan 'derating' van de apparatuur toegepast worden, d.w.z. een overdimensionering die de zwaardere omstandigheden compenseert.

Dit heeft consequenties voor de betrouwbaarheid van het systeem en de componenten daarin.

Ter informatie: hierin zijn verschillende keuzes mogelijk, die meestal in combinatie toegepast worden, b.v. Extreem betrouwbare componenten gebruiken of redundantie van componenten, subsystemen en verbindingen

De opdrachtgever kan een hogere eis stellen, b.v. 55 °C

3.2.4 Koelwater

Zeekoelwatersystemen moeten uitgelegd worden voor een zeewatertemperatuur van max. 32 °C voor schepen die ook in tropische wateren varen en voor min. -2 °C voor schepen die varen in wateren met ijs. Uitzonderingen naar boven, opgelegd door opdrachtgevers komt voor. Voor andere schepen wordt 25 °C gehanteerd.

3.2.5 Vocht

Relatieve vochtigheid tot 96% en niet condenserend.

3.2.6 Zout aanslag

Zoutgehalte in lucht tot 1 mg/m³.

3.2.7 Olie vervuiling

Vervuiling door olie mist of druppels van brandstof en smeerolie en vette vingers.

3.2.8 EMC

Zie IMO Resolution A.813(19) - General Requirements for Electromagnetic Compatibility (EMC) for all Electrical and Electronic Ships Equipment - (adopted on 23 November 1995).

Juiste toepassing van EMC eisen vraagt EMC coördinatie.

3.3 Geluidseisen

Maximaal toelaatbare geluidsniveaus in dB(A) volgens IMO

- machinekamer onbemand	110
- werkplaatsen	85
- MK controle kamer / keuken	75
- dagverblijven/kantoren/ recreatieruimten/brug	65
- hutten/hospitalen	60

Als apparatuur het maximaal toelaatbare niveau overschrijdt, zullen afschermende maatregelen genomen moeten worden. Meestal wordt overigens geëist dat een individueel apparaat een aantal dBs onder deze niveaus moet blijven.

3.4 Brandstoffen aan boord van schepen

3.4.1 Brandstoffen voor dieselmotoren

De spontane ontvlam temperatuur mag niet lager zijn dan in de regels van het klasse bureau beschreven.

Volgens IMO-regelgeving moet het flash point (ontvlam temperatuur, vlammpunt) voor brandstoffen aan boord van schepen minstens 60 °C zijn . Brandstoffen voor gebruik in noodsituaties, buiten de machinekamer (bv in reddingsboten), dienen een minimum vlammpunt van tenminste 43 °C te hebben.

Zie <http://www.bunkerworld.com>

<iso-8217marinedistillate.htm>
<iso-8217marineresidual.htm>

ISO stelt eisen aan eigenschappen als viscositeit, flash point, etc. en verontreinigingen als as, water, zwavel etc.

<cimac1990distillatefuel.htm>

<cimac1990residualfuel.htm>

In een aantal delen van de wereld (Californie, Scandinavie) worden strengere eisen gesteld aan verontreinigingen en uitstoot.

Eisen voor brandstoffen die gebruikt worden in dieselmotoren aan boord van schepen liggen vast in:

1. "ISO 8217:1996 E - fuel standard" geeft normen voor "Marine Destillate Fuels" en "Marine Residual Fuels".
2. CIMAC geeft in "Requirements 1990" eisen voor "Destillate Fuels for Diesel Engines" en voor "Residual Fuels for Diesel Engines"
3. British Standard BS MA 100 verwijst naar de ISO norm 8217

Eisen voor zwavelconcentratie in diesels zijn te vinden in de richtlijn 2004/26/EC van 21 april 2004 van het Europese parlement.

3.4.2 Brandstoffen voor brandstofcellen

Regels voor waterstof aan boord van schepen liggen vast in:

"Germanischer Lloyd "Rules for classification and construction part VI - part 3. Guidelines for the use of fuel cell systems on board of ships and boats" edition 2003"

4. PRIME MOVERS

4.1 Functie eis

De Prime Movers (PMs) moeten in staat zijn om voldoende energie te leveren zodat gelijktijdig het schip op de gewenste snelheid kan varen en het scheepsnet van voldoende elektrische energie kan worden voorzien. Hierbij dienen zowel het vaarprofiel als het gebruikersprofiel van het elektriciteitsnet (loadbalance) door de opdrachtgever te zijn gespecificeerd (para 5.1).

4.2 Geschiktheid

De PMs dienen geschikt te zijn voor het systeem waarin ze worden toegepast. Het nominale toerental van de uitgaande as moet derhalve gelijk zijn of via een tandwielkast gelijk gemaakt worden aan het nominale toerental van de generatoren.

4.3 Belastbaarheid

De PMs moeten het toerental binnen 10% van het nominale toerental houden. Permanente variaties moeten binnen 5% van het nominale toerental liggen.

De PMs moeten voldoen aan alle gestelde overbelastingseisen die voor de op de PM aangesloten generator gelden.

De PMs in bijstaande toestand moeten conform BV een plotselinge belastingssprong van 50% van het maximale vermogen aankunnen en binnen 5 secondes weer de steady state toestand bereikt hebben.

4.4 Betrouwbaarheid

De PMs moeten een zodanige beschikbaarheid hebben dat de beschikbaarheid van het gehele PM-systeem voldoet aan de door de opdrachtgever gestelde beschikbaarheidseis (in dagen per jaar of in procenten).

Na een totale black-out dient een PM in staat te zijn autonoom op te starten.

Conform frequentie-eisen van opwekkers, sectie 6.4.

Bij toepassing van converters tussen de opwekker en het net vervallen deze eisen.

Zie 6.2 en 6.3 van generieke eisen voor de opwekking.

. Indien de PM niet in staat is belastingstappen van 50% te maken, is het toegestaan het vermogen in drie stappen te nemen. De grootte van de stappen is afhankelijk van de MEP (mean effective pressure van de PM)

De geschiktheid van de dieselmotor dient dan wel getoetst te worden aan de generieke systeemeisen bij boordnetvoeding of aan specifieke eisen voor overbelasting, massastraagheid en reactietijd van het powermanagement.

4.5 Brandstofverbruik en -uitstoot

Het brandstofverbruik van de PMs dient zowel vanuit het oogpunt van Total Cost of Ownership als vanuit het oogpunt van milieu zo laag mogelijk te zijn.

De brandstofcapaciteit (energiedichtheid brandstof en grootte van de tank) moet voldoende groot zijn om de gespecificeerde autonome periode (endurance) van het schip te realiseren.

De uitstoot van schadelijke gassen en roet dient minimaal aan alle wettelijk gestelde eisen te voldoen binnen het operatiegebied. IMO eist voor dieselmotoren:

omw < 130	NOx	max 17	g/kWh
130 < omw < 2000	NOx	$45 \cdot \text{omw}^{-0.2}$	g/kWh

4.6 Directe omzetting van brandstof in elektrische energie

Wanneer brandstof direct in elektrische energie wordt omgezet (bijvoorbeeld een brandstofcel) dan is eis 4.2 niet van toepassing. De overige eisen (4.1 en 4.3 t/m 4.5) zijn wel van toepassing evenals alle generieke eisen voor de opwekking.

De ruimte dient voldoende geventileerd te worden om gevaarlijke situaties te voorkomen.

LITERATUUR VERWIJZINGEN:

Classificatie regels van:
Lloyds' Register of Shipping,
Bureau Veritas,
Det Norske Veritas, etc.

Er bestaat een trade-off tussen kosten en milieu

Voor de binnenvaart wordt verwezen naar Rhine Shipping Supervision Regulations of 1995. Deze regels bevatten limieten voor NOx, HC's en CO en worden mogelijk overgenomen door de EU.

- Een pakket van eisen voor brandstofcelvoertuigen (inland transport) is in de maak door de economische sociale raad van de VN. Zie TRANS/WP.29/GRPE/2004/3
- Veiligheidsinformatie voor brandstofcel-systemen: "safetyissues with hydrogen as a vehicle fuel" zie INEEL/EXT-99-005; sept. 99; Lockheed Martin.

5. ELEKTRISCHE INSTALLATIES EN APPARATUUR

Daar waar geen klasse-eisen zijn geformuleerd voor bepaalde systeemdelen dient de opdrachtgever in overleg met de onderleverancier en classificatie bureaus een eisen pakket overeen te komen.

5.1 Vermogensprofiel

De elektrische installatie dient zodanig ontworpen te worden, dat onder de meest voorkomende belastingssituaties een zo efficiënt mogelijke bedrijfsvoering kan worden gerealiseerd (zie ook para 4.1.). Vereist is een verbruikerslijst of "load balance" met relevante kolommen als manoeuvring, transit etc. met service factoren.

5.2 Positionering in het platform

De klasse eist m.b.t de uitvoering van het ontwerp en aanleg van de installatie

- Tenminste één hoofdschakelbord bestaande uit 2 secties (te splitsen middels een scheider).
- De generatoren moeten over de 2 secties verdeeld worden.
- Essentiële installaties zoals sturen en voortstuwing zijn redundant met elk een eigen voeding.

5.3 Typetests

DNV specificeert uit te voeren typetests waarbij elektrische apparatuur moet blijven functioneren onder de volgende omstandigheden:

5.3.1 Voedingsspanning AC

Frequentie variatie	statisch	$\pm 5\%$
	Dynamisch	$\pm 10\%$
Spanningsvariatie	statisch	$+ 6\% / -10\%$
	Dynamisch	$\pm 20\%$

Bij toepassing van nieuwe technieken zijn deze voorschriften niet up to date. Zo zijn de voorschriften voor een podded drive bij Lloyds nog in het draft stadium.

Vermogensprofiel is van belang, o.a. i.v.m. het feit dat alle verbruikers niet tegelijkertijd ingeschakeld zijn en/of maximaal vermogen vragen (gelijktijdigheidfactor als indicator). Op basis van deze lijst kunnen de minimum grootte van de hoofdcomponenten als generatoren, transformatoren etc bepaald worden.

Voor meer gedetailleerde info zie: DNV certification notes no. 2.4

Bureau Veritas noemt vergelijkbare eisen m.b.t. "qualification of equipment" en verwijst o.a. naar IEC Publication 68 aangevuld met "eigen" eisen

Cold:	<u>IEC 68-2-1</u>
Dry heat:	<u>IEC 68-2-2</u>
Vibration:	<u>IEC 68-2-6</u>
Damp heat:	<u>IEC 68-2-30</u>
Salt mist:	<u>IEC 68-2-52</u>

Hierbij zij opgemerkt dat combinaties van minimale spanning en maximale frequentie gelimiteerd zijn. Dit is te vinden in NEC 18/IEC 60092.

5.3.2 Voedingsspanning DC

Power supplies

statisch	±10%
rimpel	10%
voedingen door accu's	+30%/-20%

De overige eisen worden tevens genoemd in hoofdstuk 3. Voor elektrische apparatuur zijn die eisen tevens afhankelijk van de locatie b.v. in de machine kamer, op een dieselmotor of op de brug in een lessenaar of in een mast.

DNV maakt hiervoor onderscheid in klasse A, B en C; dit bestek beperkt zich tot klasse A.

5.3.3 Werktemperaturen

Los opgesteld binnen:	5-55 °C
Ingebouwd in kasten:	5-70 °C

5.3.4 Trillingen

Frequenties

3-13.2 Hz:	1 mm	amplitude verplaatsing
13.2-100 Hz:	0.7 g	amplitude versnelling

5.3.5 Vocht

Relatieve vochtigheid tot 96% niet condenserend

5.3.6 Zout nevel test

Zoutgehalte in lucht tot 1 mg/m³

5.3.7 Olie vervuiling

Vervuiling door olie mist of druppels van brandstof en smeerolie en vette vingers.

5.3.8 EMC

Zie IMO Resolution A.813(19) - General Requirements for Electromagnetic Compatibility (EMC) for all Electrical and Electronic Ships Equipment - (adopted on 23 November 1995).

Juiste toepassing van EMC eisen vraagt EMC coördinatie.

6. OPWEKKING

6.1 Geschiktheid

De opwekkingscomponent dient geschikt te zijn voor het systeem waarin deze wordt toegepast.

6.2 Beveiliging tegen interne fouten

De opwekkingscomponent dient zich zelf te beschermen tegen uitval van interne of externe koeling, smering, overige essentiële randapparatuur. Bij dreigende overschrijding van de specificaties dient het apparaat een alarm te produceren dat kenbaar gemaakt wordt op de brug en het apparaat dient zichzelf uit te schakelen voordat er gevolgschade aan het apparaat zelf ontstaat. Indien er inwendige storingen of schade ontstaan waardoor het apparaat zijn functie verliest, dient dit opgemerkt en gemeld te worden

6.3 Selectiviteit

Bij een kortsluiting in de verdeel inrichting achter de opwekker dient enerzijds de opwekker over voldoende capaciteit te beschikken om de kortsluiting selectief af te laten schakelen. Anderzijds moet de verdeel inrichting rekening houden met de kortsluitimpedantie van die opwekker.

6.4 Reserve capaciteit in opwekking

De opwekking dient zodanig ontworpen te zijn dat bij uitval van een deel van de opwekking de continuïteit van de opwekking gegarandeerd blijft.

Klassebureaus eisen (primair i.v.m. veiligheid) minimaal 2 opwekkers, die afzonderlijk van elkaar elk een eigen deelnet moeten kunnen voeden.

De noodopwekker moet zich boven de waterlijn bevinden in de eindsituatie van een calamiteit en bereikbaar zijn vanaf het open dek.

Opwekkers mogen natuurlijk parallel geschakeld worden, maar dienen gescheiden te kunnen worden in noodsituaties.

De noodopwekker mag **niet** een van de twee verplichte opwekkers zijn.

7. ELEKTRICITEITSDISTRIBUTIE

7.1 Keuze laag- of hoogspanning

Lloyd's Rules definieert hoogspanning als volgt: "A 'high voltage' is a voltage exceeding 1000 V a.c. or 1500 V d.c. between conductors".

Volgens Lloyd's is 15 kV vooralsnog de bovengrens: "Voltages exceeding these will be the subject of special consideration".

Voor AC betekent dit de gekoppelde spanning, de fasespanning is dan hoger dan 577 V.

"System voltages for both alternating current and direct current in general are not to exceed:

15,000 V for propulsion purposes;

500 V for power, cooking and heating equipment permanently connected to fixed wiring;

250 V for lighting, heaters in cabins and public rooms, and other applications

not mentioned above."

De gangbare HS- distributiespanningen zijn :

3 - 3,3 kV

6 - 6,6 kV

10 - 11 kV

Ook hogere spanningen zoals 13,6 kV of 15 kV kunnen worden toegepast. Op basis van investeringsoptimalisatie is 6,6 kV veel toegepast

De klasse eist een vereenvoudigd één-lijn-schema elektrisch distributie en voortstuwing.

In dit schema dienen details opgenomen te zijn als:

elektrische grootheden hoofdcomponenten
- overzicht beveiligingen en signaleringen en bedieningsfuncties

7.2 Veiligheid

7.2.1 Isolatiespanningen

Voor ruimtelijke scheiding in lucht zijn bij b.v. 6,6 kV de volgende normen voor schakelapparatuur voorgeschreven:

IEC	65 mm
Lloyds	100 mm
Rina	95 mm (55 mm bij 3,3 kV)

Voor vermogenselektronica gelden deze afstanden niet.

7.2.2 Kortsluiting

Alle stroomvoerende componenten in de distributieketen dienen de maximaal mogelijke optredende kortsluitstroom te kunnen voeren.

IEC 60298 stelt dat de stroombelasting bij kortsluiting minder moet zijn dan 200 A/mm^2 met een minimale draaddoorsnede van 30 mm^2 .

Klasse eist een kortsluitberekening en selectiviteitsstudie incl. instellingen van de automaten (afschakelen zo dicht mogelijk bij de fout)

Kabels moeten de optredende transient-kortsluitstroom voor langere tijd weerstaan zonder oververhitting.

7.2.3 Aarding

Voedingssystemen dienen zodanig ontworpen te zijn dat er gedurende een bepaalde tijd met één enkele aardfout doorgedraaid kan worden.

Een aardfout moet worden gesignaleerd en worden geïsoleerd ofwel selectief afgeschakeld.

Bij niet star (hoogohmig) geaard net moet de sterpuntimpedantie zodanig zijn dat de totale kortsluitstroom begrensd wordt tot een waarde die kleiner is dan de ontwerpwaarde van de generatoren. De componenten moeten de verhoogde fasespanning die tijdens een aardfout optreedt kunnen weerstaan.

De netontwerper moet voor zijn ontwerpkeuzes aantonen dat hij voldoet aan de veiligheid- en beschikbaarheidseisen. Bij een scheepshoogspanningsinstallatie zal de optredende kortsluitstroom beperkt zijn. Scheepsinstallatie reikt niet tot aan de grenzen van HS-componenten.

Bij beveiliging met stroom-tijd karakteristieke selectiviteit (I^2-t diagrammen) kan de kortsluitstroom langere tijd vloeien (orde van grote 1-2 seconde). De werkelijke tijd wordt bepaald door de foutstroom, kabeltype (isolatie materiaal) en doorsnede van de geleider.

Veel toegepaste type systemen zijn:
zwevend
hoog ohmig

Laagspanningsnetten zijn vaak zwevend en kunnen over het algemeen langere tijd doordraaien met een aardfout. Dit leidt wel tot een hogere belasting van de isolatie, zeker in combinatie met vermogens-elektronica en het is daarom noodzakelijk deze termijn zo kort mogelijk te houden. (<8 uur)

Aardfouten in HV systemen leiden tot aanzienlijke capacatieve stromen die veel gevolgschade aan elektrische machines en trafo's kunnen veroorzaken. Het is daarom aan te bevelen deze netten via het sterpunt van de generatoren hoogohmig te aarden en een aardfout direct te detecteren om het zieke deel selectief af te schakelen.

N.B. Ook laagspanningsnetten zijn vaak zo uitgebreid dat de capacatieve stromen bij aanraking groter zijn dan 30 mA. Persoonlijke veiligheid is om die reden geen argument meer om netten zwevend te maken.

Bedrijfsvoering met een aardfout is meestal niet toegestaan.

7.2.4 Veilig werken aan boord

De Europese veiligheidsnorm EN50110 is van toepassing op zowel LS als HS.

7.2.5 Aanvullende eisen voor HV-Distributie net

De klasse (BV) staat o.a toe:
Gelijkstroom distributie: (DC)
DC met beide polen geïsoleerd
DC met één pool geaard

Wisselstroom distributie (AC)
Voor AES komen slechts in aanmerking
Drie fasen met sterpunt zwevend
Drie fasen met hoog ohmig geaard sterpunt

7.2.6 Explosieveiligheid (Ex-eisen) ref Lloyds:

Een schema met de gevaarlijke gebieden (hazardous areas) is vereist.

7.2.7 Veiligheid i.v.m. isolatie en afscherming (IP-eisen)

IEC Publication 60092-201.

RINA: "The degree of protection of enclosures of HV-transformers is to be at least IP23. If accessible to unqualified personnel a degree of protection of at least IP4X is required."

7.2.8 Standards

RINA: "Cables are to be constructed in accordance with IEC Publication 60092-353 and 60092-354 or other equivalent. Switch gear MV is to be constructed in accordance with IEC Publication 60298 or IEC Publication 60466."

Redenen voor deze regel zijn:

- de hoofdcomponenten zijn niet ontworpen voor het verhoogde spanningsniveau.
- het grote vermogen betrokken bij de aardfout

De schade t.g.v een aardfout aan apparatuur kan onherstelbaar groot worden.

Deze norm beschrijft procedures en opleiding voor werken aan LS en HS installaties. Een opdrachtgever kan deze norm of delen van deze norm van toepassing verklaren voor de installatie en haar operators.

Distributie systeem met direct geaard sterpunt is niet gewenst. Want:
Bij aardfout is de kans op onherstelbare schade aan de hoofdcomponenten groot. De componenten hebben een lange levertijd en zijn i.v.m het grote volume moeilijk te vervangen.

7.3 Spanningsniveau einddistributie

7.3.1 Spanningsniveau scheepsdistributienet

De laagspanning voor de eindverbruikers (scheepsnet) dient te voldoen aan één of meerdere van de genormeerde waarden.

7.3.2 Spanningstolerantie

De klasse stelt minimum eisen aan de netkwaliteit van het distributienet.

7.4 Schakelborden

Eisen voor schakelborden staan omschreven in the Lloyd's Register rules and regulations for the classification of ships Part 6, Chapter 2, Section 7 Switchgear and control gear assemblies. In deze sectie staan ook verwijzingen naar IEC normen

b.v. 115/230/400-440-480/690 V – 50/60 Hz.
De keuze is aan de opdrachtgever.

Zie overzichtstabel 1

Tabel 1. Eisen aan netspanningskwaliteit

1		STANAG 1008	Lloyds	BV
	Spanning			
	Nominale spanning	440V or 115V	115 230 400 440 690	115 230 400 440 690
	spanningstolerantie statisch symmetrische verdeling	±5 %	+6 % -10%	
	Niet symmetrisch	±7%		
	Spanningstolerantie transiënt	±16% /20/22%	+20% -16%	
	Spanningshersteltijd .na transiënt	2 seconde	1.5 sec	
	Piek spanning	2.5kV (440V)		
	Wave form			
	THD Total harmonic distortion	5% (up to 32th harm.??)	8 (up to 50th)	10%
	Individuele harmonische	3%	1.5% (vanaf 25 ^e)	5% tot 15 ^e
	Nominale Frequentie	60Hz	50 or 60 Hz	50 or 60 Hz
	Frequentie tolerantie statisch	±3%	5%	
	Frequentie tolerantie transiënt	±4% - 5.5%	10%	
	Frequentiehersteltijd.na transiënt	2 seconde	5 seconde	

8. ENERGIEOPSLAG

8.1 Veiligheid

8.1.1 Batterij / supercondensator

Bij installatie, gebruik, onderhoud, vervanging en afvoer van batterijen en supercondensatoren dienen de voorschriften betreffende het werken met chemicaliën nageleefd te worden,

Bij het werken met opslagmedia kunnen chemicaliën zoals cadmium, loog (bv. bij NiMH) en zwavelzuur, vrijkomen. In het algemeen zullen oude batterijen afgevoerd worden via de leverancier ter verdere verwerking. Nadere informatie over verwerking van batterijen is te vinden op de web site van de Stichting Batterijen (www.stibat.nl).

Er dient voldoende ventilatie aanwezig te zijn in ruimten waar een energieopslag medium is gesitueerd.

Bij het laden van een batterij of supercondensator kan waterstof en/of zuurstof ontstaan. Bij open batterijen dient hiermee rekening te worden gehouden, vooral bij grote batterijpakketten in een beperkte ruimte.

Gesloten batterijen en supercondensatoren dienen een overdrukventiel te hebben.

Hierdoor kan zich dus ook gas in de batterijruimte ophopen, ook hier is dus ventilatie noodzakelijk (zij het in mindere mate).

Lithium batterijen dienen daarnaast ook voorzien te zijn van een (elektronische) bewaking van spanning en stroom.

Te diep ontladen of overladen van lithiumbatterijen kan leiden tot problemen vanwege het sterk reactieve karakter van lithium (brand- en explosiegevaar). Bij andere batterijtypen wordt het risico m.b.t. brand en explosie in het algemeen lager ingeschat, omdat de materialen minder reactief zijn. Het is echter zeker niet uitgesloten. Ook bij systemen op basis van andere batterijtypen is het daarom wenselijk en gebruikelijk om de batterij te beveiligen d.m.v. bewaking van spanningen (op cel- of moduleniveau), temperatuur, kortsluitbeveiligingen e.d.

Bij condensatoren is de waarschuwing 'spanning aanwezig' verplicht, ook nadat de voedende spanning is afgeschakeld. Alleen als beide aansluitingen zichtbaar geaard zijn, mag de waarschuwing achterwege blijven.

8.1.2 Vliegwiel

De fabrikanten moeten zelf de veiligheid aantonen, o.a. door middel van een destructieve overtoerentest (hierbij wordt bepaald bij welk toerental de rotor uit elkaar barst).

De behuizing van het vliegwiel moet in staat zijn de energie te absorberen die vrijkomt als er een fout optreedt in het rotormateriaal en de rotor uiteenspat.

Bij mobiele toepassingen moet het gyroscopisch effect van het vliegwiel gecompenseerd worden.

8.1.3 EMI

De systeemleverancier dient het magnetische strooiveld buiten een SMES-systeem binnen veilige grenzen te houden.

8.2 Spanningsniveau

Bij energieopslag systemen is meestal sprake van spanningsvariaties die buiten de limieten van het distributienet vallen. In die gevallen dient een converter een onlosmakelijk deel van het energieopslagsysteem te zijn, zodat de uitgangsspanning en -frequentie van het opslagsysteem gelijk zijn aan die van het distributienet.

Er zijn nog geen algemene technische veiligheidsnormen voor vliegwielen.

Bij een metalen vliegwiel (zeer weinig gebruikt) ontstaan dan scherpe brokken metaal die zich met een grote kinetische energie door de behuizing boren. Een composietrotor breekt niet in stukken maar verpulvert tegen de behuizing. Hierbij ontstaat wrijvingswarmte en drukopbouw.

In het algemeen gebeurt dit door de behuizing in een cardanische ophanging te plaatsen, waarin het vliegwiel voldoende vrij kan bewegen en er geen gyroscopische krachten op het platform worden overgebracht. Soms worden twee contraroterende vliegwielen die elkaars effect opheffen, in één behuizing geplaatst.

In een SMES-systeem wordt de energiedrager gevormd door het magnetische veld.

De magnetische eigenschappen van batterijen en supercaps worden bepaald door hun behuizing en zijn waarschijnlijk verwaarloosbaar.

De converter kan naast de spanningsaanpassing ook het op- en ontladen en de verdere bewaking van het energieopslagsysteem verzorgen.

9. CONVERSIE

Onder conversie wordt het veranderen van de spanning of frequentie van een bepaald netgedeelte verstaan. Er bestaan drie manieren om spanning of frequentie te converteren:

- Transformator
- Statische omvormer
- Roterende omvormer (bijvoorbeeld koppeling asynchrone motor en synchrone generator)

9.1 Transformator

Een Transformator moet voldoen aan IEC 60092-303. Zie verder DNV Pt4, Ch8, Sec6 en Lloyds Part 6, Chapter 2, Section 9.1. Hieronder volgen enkele van de daar opgesomde regels.

In DNV staat een verwijzing naar IEC 60092-303. Daarbinnen wordt verder verwezen naar 60726 voor droge en naar 60076 voor droge en vloeistof gekoelde transformatoren. In Lloyds wordt voor alle trafo's alleen naar 60076 verwezen. (Versie: RULES AND REGULATIONS FOR THE CLASSIFICATION OF SHIPS, July 2003) De extra eisen in IEC 60076 gaan over het voorkomen van het overstromen van de transformator bij het bewegen van het schip en mogelijk explosie gevaar.

Behalve voor het starten van motoren dienen transformatoren dubbel gewonden te worden.

Transformatoren kunnen zowel van het *dry-type* als *liquid immersed* zijn. Voor *liquid immersed transformers* gelden extra eisen.

Transformatoren mogen in een bepaalde isolatieklasse niet een door het klasse bureau gespecificeerde temperatuurstijging boven de omgevingstemperatuur overschrijden.

Transformatoren moeten minimaal een kortsluitstroom zonder schade kunnen weerstaan zowel aan de primaire als aan de secundaire kant bij nominale frequentie en primaire spanning.

Indien transformatoren gebruikt worden in netten met een grote harmonische vervorming, bijvoorbeeld in combinatie met 12 puls gelijkrichter, dienen die transformatoren hiervoor geschikt te zijn.

Voor omgevingstemperatuur: zie 3.2.3

DNV geeft hier 1 seconde, Lloyds 2 secondes

9.2 Statische omvormer

Een statische omvormer (semi-conductor converter) moet voldoen aan IEC 60092-304. Zie verder DNV Pt4,Ch8,Sec7 en Lloyds Part 6, Chapter 2, Section 9.2. Hieronder volgen enkele van de daar opgesomde regels.

zie opmerking bij transformatoren

De omvormer moet een nominaal vermogen hebben dat overeenkomt met het gevraagde vermogen, rekeninghoudend met een overbelastingscapaciteit voor verwachte piek belastingen, overspanningen en andere transiënte verschijnselen.

De geproduceerde hogere harmonischen mogen in geen geval met andere apparatuur interfereren.

De omvormer kan lucht of vloeistof gekoeld worden. De omvormer moet zichzelf afschakelen of het vermogen omlaag brengen wanneer de koeling niet gehandhaafd kan worden.

Omvormers die (een bepaald gedeelte van) het elektrisch net voeden, dienen een zodanige kortsluitstroom te kunnen voeren, dat de beveiliging van apparatuur na de omvormer selectief kan afschakelen.

9.3 Roterende omvormer

Een roterende omvormer moet voldoen aan de regelgeving voor generatoren en motoren (zie aldaar)

10. AANDRIJVING

Bij de aandrijving wordt uitgegaan van omzetting van elektrische vermogen naar mechanische vermogen via roterende delen.

Dit kunnen zijn:

- Conventionele schroefassen
- Azimuthing thrusters
- POD's
- Waterjets

Afhankelijk van bovenstaande keuze en het gebruik kan er bij het stoppen van het schip energie via de schroef terugkeren naar het aandrijfsysteem.

Met het aandrijfsysteem wordt bedoeld: het geheel van motor, de eventuele vermogens elektronica om het toerental te regelen en voedingstrafo's.

Voor E-voortstuwung:

Klasse schrijft voor dat een E-voortstuwung redundant is uitgevoerd (para 5.2).

Draft specification LRS POD ref 2.1.1: "Sole POD propulsion can be accepted after evaluation of a detailed engineering and safety justification , FMEA (Failure Mode and Effect Analysis)."

Meestal daarom bij E voortst. minimaal 2 dieselgeneratoren en 2 schroeven. Er zijn inmiddels elektrische schepen met één schroef, maar dan wel 2 E-motoren op die schroef (dus nog steeds de voorgeschreven redundantie in E).

10.1 Beveiliging tegen interne fouten

Het aandrijfsysteem dient zich zelf te beschermen. Bij uitval van interne of externe koeling, smering, overige essentiële randapparatuur en/of dreigende overschrijding van de specificaties dient het apparaat een alarm te produceren dat kenbaar gemaakt wordt op de brug en zichzelf uit te schakelen voordat er gevolgschade aan het apparaat zelf ontstaat. Indien er geen sprake is van redundantie in kritische aandrijvingen zoals voortstuwung, dient trippen zoveel mogelijk vermeden te worden en kan een alarm naar de brug voorzien worden van een aanbeveling (b.v. Vermogen reduceren).

Indien er structurele schade ontstaat waardoor het apparaat zijn functie verliest dient dit opgemerkt en gemeld te worden.

Bijvoorbeeld bij Pod's: permanente bewaking van smeerolie i.v.m. lagerschade, afdichtingen e.d.

10.2 Crashstoppen

Voor vaste spoed schroeven geldt:
Het aandrijfsysteem dient (indien van toepassing) voldoende remkoppel te kunnen ontwikkelen tot nul toeren om de schroef van draairichting om te keren.

10.2.1 Rem energie

Indien er bij het crashstoppen remenergie terugkomt dient deze afhankelijk van de mogelijkheden van de vermogens elektronica gedissipeerd te worden in remweerstand of teruggevoerd te worden in het voedende systeem.

In het laatste geval dient het voedende systeem in staat te zijn deze energie te absorberen met behoud van de vereiste netkwaliteit.

10.3 Blackout preventie

10.3.1 Vermogens limitering

De voortstuwingsaandrijving dient voorzien te zijn van een mechanisme waarmee voorkomen wordt dat de voortstuwing meer vermogen opneemt dan dat het power management voor dit doel beschikbaar heeft gesteld.

De voortstuwingsaandrijving mag niet meer vermogen leveren dan de voortstuwder aan kan.

Indien de voortstuwing minder vermogen levert dan de brug vraagt dan dient dit op de brug kenbaar gemaakt te worden door middel van een alarm.

Er is dan sprake van een 4 kwadranten aandrijving.

Indien azimuthing thrusters en POD's bij volle scheepssnelheid 180 graden gedraaid kunnen worden, zou 1 kwadrant aandrijving kunnen volstaan.

Voor Pod's geldt:

Voor stoppen / manoeuvreren in vollast bedrijf mogen geen grote stuurhoeken van de Pod worden toegelaten, omdat rekening moet worden gehouden met het risico op lagerschade.

In deellast worden stuurhoekbegrenzings opgeheven i.v.m. manoeuvreren. Er zijn ook toerentalbegrenzings naar beneden i.v.m. lagerschade.

Zie para 11.2

10.3.2 Quick power reduction

Indien de voortstuwing op een bepaald vermogen staat en het opgewekte vermogen neemt plotseling en stapsgewijs af, waardoor er een ernstig te kort in de vermogensbalans ontstaat, dient de voortstuwingsaandrijving in staat te zijn, aan de hand van een triggersignaal in zeer korte tijd (ca 100 ms) het opgenomen vermogen te reduceren naar een vooraf bepaalde waarde.

10.4 Netvervuiling

Er dient in de ontwerpfase aangetoond te worden dat de netvervuiling van de combinatie van aandrijfsysteem en voedend systeem binnen de eisen van het voedend systeem valt.

Vaak gaat dit buiten het powermanagement om vanwege de vereiste snelheid. Zodra het powermanagement de nieuwe situatie verwerkt heeft wordt een nieuwe vermogens limitering naar de voortstuwing gezonden.

De vermogenselektronica van de aandrijving injecteert bovenharmonische stromen in het voedende systeem.

LITERATUUR VERWIJZINGEN:

Classificatie rules

Lloyds Register of Shipping: Electrical
Engineering Part 6, Chapter 2, Section 1
Bureau Veritas: Part III Ch 18-01 Ch 19-02
Det Norske Veritas: Pt. 4 Ch.5 Sec. 5
IEC 60092

11. VOORTSTUWERS

11.1 Algemeen

Een voortstuwer moet stuwkracht genereren, minimaal vooruit en achteruit in de langsscheepse richting. De stuwkracht zorgt ervoor dat een schip versnelt of vertraagt, tot de stuwkracht in evenwicht is met de weerstand van het schip.

Bij een afgesproken vermogen, onder afgesproken omstandigheden moet de voortstuwer voldoende stuwkracht leveren die nodig is om het schip een afgesproken snelheid te laten halen. Ook dient voor stoppen en achteruitvaren een overeengekomen minimale stuwkracht in achterwaartse richting geleverd te kunnen worden.

Een voortstuwer moet zeer betrouwbaar en altijd beschikbaar zijn.

11.2 Sterkte

Een voortstuwer moet sterk genoeg zijn om onder normale en "off-design" bedrijfscondities heel te blijven. Klasse geeft regels voor de sterkte van de meest voorkomende materialen van voortstuwers.

Een voortstuwer moet de krachten optredend bij een crash-stop, kunnen weerstaan.

In het geval van elektrische aandrijving dient een begrenzing van het achteruitkoppel gespecificeerd te worden ter bescherming van de schroef. Ook kan het nodig zijn een begrenzing in koppel bij lage toerentallen in vooruit richting te specificeren.

Een voortstuwer krijgt in het algemeen energie aangeleverd in de vorm van een koppel en een toerental en moet dit omzetten in een hydrodynamische stuwkracht. In exotische gevallen wordt elektriciteit direct of via warmte omgezet in stuwkracht.

De meest voorkomende voortstuwers zijn schroeven en waterjets.

In sommige gevallen zijn de E-aandrijving, de tandwielkast, de schroefas en de voortstuwer geïntegreerd tot één eenheid. Voorbeelden hiervan zijn roerpropellers en pods.

Voor schroeven is bijvoorbeeld de minimale dikte van een blad voorgeschreven als functie van afmeting, vermogen, toerental, spoed en ontwerpdetails.

Dit is de meest voorkomende extreme bedrijfsconditie die een voortstuwer moet kunnen weerstaan.

Zie para 10.3.1

11.3 Omgeving

De voortstuwer dient in het integrale ontwerp van een schip meegenomen wordt.

In het algemeen mag een voorstuwer niet beneden de kiellijn van een schip uitsteken om schade in ondiep water te voorkomen en om eenvoudig dokken van een schip mogelijk te maken. Dit is echter geen harde eis en wordt door de opdrachtgever bepaald.

De opgewekte geluid- en trillingsniveaus moeten meegenomen worden in het integrale ontwerp van een schip.

11.4 Rendement

Nieuwe voortstuwer-concepten zullen in het algemeen een rendement van minimaal 50% moeten hebben voor ze voor commerciële toepassing interessant zullen zijn.

De voortstuwer en de romp van een schip hebben een grote onderlinge invloed. De romp bepaalt mede het rendement van de voortstuwer.

De voortstuwer en de aandrijftrein (aandrijf motor, schroefas, tandwielkast) beïnvloeden elkaar onderling. Met name de dynamica van het systeem moet goed beoordeeld worden om ongewenste resonanties te voorkomen.

Een voorstuwer is een bron van geluid en trillingen. De opgewekte geluid- en trillingsniveaus hangen onder meer af van het vermogen per eenheid oppervlak van de voortstuwer. Daarom zal een voortstuwer voor een groot vermogen grotere afmetingen hebben dan een voorstuwer voor een klein vermogen. Bij een voortstuwer die buiten een schip geplaatst is, hangen de opgewekte geluid- en trillingniveaus sterk af van de vrijslag tussen de romp en de voortstuwer, het geabsorbeerde vermogensniveau, de uniformiteit van de toestroom en de tipsnelheid.

Het maximum rendement in de ontwerpconditie van een conventionele schroef ligt in de orde van 50 tot 75%, afhankelijk van de specifieke belasting. In gevallen waar niet de optimale afmeting, draaisnelheid, schroefopstelling of rompvorm gekozen kan worden, kan dit terug lopen tot 50%. Ook in condities die afwijken van de ontwerpconditie kan het rendement aanzienlijk lager zijn.

LIJST VAN AFKORTINGEN:

AC, a.c.	Alternating Current (wisselstroom)
AES	All Electric Ship
BC	Brandstof Cel
BV	Bureau Veritas
DC, d.c.	Direct Current (gelijkstroom)
DNV	Det Norske Veritas
EMC	Elektro Magnetische Compatibiliteit
EMI	Electro Magnetische Interferentie
EU	Europese Unie
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis
HS	Hoogspanning
IEC/EN	International Electrotechnical Commission / European Normalisation
IMO	International Maritime Organization
IP-eisen	"Isolation and Protection" eisen
LRS	Lloyds Register of Shipping
LS	Laagspanning
NEC	Nederlands Elektrotechnisch Comité
PM	Prime Mover
RINA	Registro Italiano Navale
SOLAS	Safety Of Life At Sea

PRIME MOVERS

BIJLAGE D1

AES-Nieuwe Technologie

Teamleden: Hotze Boonstra (TU-Delft), Peter C. van der Laag, Frans W.A. Tillemans, Arthur W. Weeber (ECN).

INHOUDSOPGAVE

1.	KENGETALLEN DIESELMOTOREN	1
2.	GASTURBINE, STIRLING MOTOR	2
3.	KENGETALLEN BRANDSTOFFEN.....	3
4.	BRANDSTOFCELLEN	4
4.1	Inleiding.....	4
4.2	Type-indeling en ontwikkelingsstatus	5
4.3	Brandstofcelsystemen.....	7
4.4	Kosten van brandstofcelsystemen.....	7
5.	WATERSTOFPRODUCTIE	12
5.1	Inleiding.....	12
5.2	Algemene beschrijving	13
5.3	Reforming opties	13
5.3.1	Stoom reforming	13
5.3.2	Partiële oxidatie	14
5.3.3	Autothermische reforming.....	14
5.4	CO-clean up sectie en partiële CO oxidatie.....	14
5.5	Samenvattend overzicht	15
5.6	Marine diesel fuels en zwavel	15
5.6.1	Bewezen.....	16
5.6.2	Nieuw.....	17
5.6.3	Toekomst	17
5.7	Literatuur	18
6.	WATERSTOFOPSLAG	19
6.1	Inleiding.....	19
6.2	Hoge druk opslag	21
6.2.1	Beschrijving technologie	21
6.2.2	Bewezen.....	23
6.2.3	Nieuw.....	23
6.2.4	Toekomst	23
6.3	Vloeibare opslag.....	24
6.3.1	Beschrijving technologie	24
6.3.2	Bewezen.....	24
6.3.3	Nieuw.....	24
6.3.4	Toekomst	24
6.4	Metaalhydride-opslag	25
6.4.1	Beschrijving technologie	25
6.4.2	Bewezen.....	26
6.4.3	Nieuw.....	26
6.4.4	Toekomst	26
6.5	Toekomstige technieken	27
6.6	Vergelijking specifiek vermogen en -volume	28
6.7	Literatuur	28
7.	FOTOVOLTAÏSCHE (PV) OMZETTING	30
7.1	Inleiding zonnecellen	30
7.2	Toepassingen	30

7.3	Huidige status.....	31
7.4	Nieuwe technologieën	32
7.5	Kentallen zonnecel(systemen).....	33
7.6	Een vertaalslag naar sloopstoepassingen	33
8.	VERGELIJKING PRIME MOVERS.....	35
9.	INFORMATIEBRONNEN	38

1. KENGETALLEN DIESELMOTOREN

Tabel 1 *Overzicht van kengetallen voor dieselmotoren.*

		Langzaam, tweetakt	Middelsnel, viertakt	Snel, Viertakt
toerental	[rpm]	80 - 300	300 - 1000	1000 - 2000
vermogen (globale range)	[kW]	6000 - 95000	800 - 25000	250 - 9000
specifiek vermogen laag gemiddeld hoog	[kW/kg]	0.040	0.08 0.10 0.18	0.19 0.30 0.38
specifiek vermogen laag gemiddeld hoog	[kW/liter]	0.050	0.05 0.08 0.15	0.12 0.25 0.34
rendement	[% , LHV]	47 - 50	44 - 49	36 - 43
luchtopname	[kg/kW/hr]	8	6	5
luchtvermaat	[%]			
rookgas	[m ³ /hr]			
brandstofverbruik (sfc)	[kg/kW/hr]	0.180 - 0.172	0.195 - 0.176	0.200 - 0.240
footprint Lijnmotor V-motor	[kW/m ²]	400 - 600	180 - 300 250 - 350	200 - 300 350 - 750
Bedrijfsdruk, (mean eff.pressure) laag gemiddeld hoog	[bar]	17 18 19	20 24 27	20 25 28
bedrijfstemperatuur	[C]			
Type brandstof		HFO	HFO / MDF	MDF
<u>investeringskosten</u>	Euro / kW	410	220 - 330	180 - 240
<u>ontwikkelstadium</u>		'mature'	'mature'	'mature'

- Langzaam lopende dieselmotoren worden vooralsnog niet uitgewerkt aangezien dit type niet in AES configuraties wordt toegepast
- Specifiek vermogen, rendement (overall efficiency in nominal point) gebaseerd op Stapersma (wb4408)

2. GASTURBINE, STIRLING MOTOR

Tabel 2 *Overzicht van kengetallen voor gasturbines en Stirlingmotoren.*

		Gasturbine, simple cycle	Gasturbine complex cycles	Stirling motor
toerental	[rpm]	3600	3600	
vermogen	[kW]	6000-26 000	24 000	1-500
specifiek vermogen	[kW/kg]	0.7 – 1.0	0.55	?
specifiek vermogen	[kW/liter]	0.2 – 0.4	0.24	
rendement	[% , LHV]	20 - 35	42	45 – 50?
luchtopname	[m ³ /hr]			
luchtovermaat	[%]			
rookgas	[m ³ /hr]			
brandstofverbruik	[kg/kWhr]	0.240 – 0.280	0.200	
footprint	[kW/m ²]			
bedrijfsdruk	[bar]			
bedrijfstemperatuur	[C]			
type brandstof		MDF	MDF	Extern, alle energiedragers
investeringskosten	[Euro /kW]	180 - 280	470	?
ontwikkelstadium		mature	In ontwikkeling	

3. KENGETALLEN BRANDSTOFFEN

Tabel 3 *Overzicht van kengetallen voor brandstofeigenschappen.*

		heavy fuel oil (HFO)	marine diesel oil (MDO)	marine gas oil (MGO)	light diesel fuel oil (LDF, LDO)	Blended marine Diesel fuel oil (BMDF)	inter- mediate fuel oil (IFO)
Dichtheid (gemiddeld)	[Kg/l]	0.95	0.87	0.90	0.85		0.9
viscositeit, @ 50 C @40 C	[cSt]	380- 700	1.5-11		4.0-6.0		
verbrandingswaarde (LHV)	[kJ/kg]	41 000	42 700				
ontbrandingseigensch appen,							
zwavelgehalte,	%	4.0-5.0	1.0-2.0		1.5		
Vochtgehalte	%	1	0		0		

4. BRANDSTOFCELLEN

4.1 Inleiding

Brandstofcellen zijn nog géén bestaande technologie, in die zin dat zij nog niet breed (commercieel) worden toegepast, in het bijzonder nog niet aan boord van schepen. De voornaamste reden hiervoor is dat de kosten momenteel nog te hoog zijn, doordat er nog nauwelijks sprake is van serie- of massafabricage. De technologie bevindt zich nog in het ontwikkelings- en demonstratiestadium. Derhalve vallen brandstofcelsystemen onder de categorieën nieuwe (beperkt toegepast of gedemonstreerd) en toekomstige technologie (verwachtingen).

Alhoewel de werking van brandstofcelsystemen aangetoond is voor waterstoftoepassingen (PEMFC, AFC) en aardgastoeepassingen (PAFC, MCFC, SOFC), staat de toepassing van logistieke vloeibare brandstoffen (zwavelhoudende diesel- en marineoliën), nog in de kinderschoenen. Veel onderzoek vindt er plaats naar efficiënte, betrouwbare en kosteneffectieve omzetting naar waterstof (o.a. DESIRE project). Zie ook het stuk over waterstofproductietechnieken.

Brandstofcellen vormen het hart van een brandstofcelsysteem. Het zijn modulaire apparaten die in staat zijn om langs elektrochemische weg gasvormige brandstoffen (reformaat, waterstof), in aanwezigheid van lucht of zuivere zuurstof, direct om te zetten in elektriciteit (gelijkstroom). Dit gebeurt met een hoog omzettingsrendement en zonder bewegende delen. De daarbij geproduceerde warmte, qua hoeveelheid ongeveer gelijk aan het opgewekte elektrische vermogen, dient te worden afgevoerd om de bedrijfstemperatuur constant te houden. Het brandstofcelsysteem bestaat naast de brandstofcel uit een fuel processor die de brandstof omzet in een reformaat en overige Balance-Of-Plant componenten (warmte-wisselaars, compressoren, pompen, regelkleppen, sensoren, e.d.). De in de brandstofcel opgewekte warmte kan vaak hergebruikt worden in de fuel processor, hetgeen de elektrische efficiency ten goede komt.

De brandstofcel stelt vrij hoge eisen aan de zuiverheid van de gasvormige brandstof. De actieve component is doorgaans waterstof. Daarbij wordt een fuel processor (bestaande uit een of meerdere chemische reactoren) toegepast om de primaire brandstof (brandstofolie of aardgas) te zuiveren (met name zwavelverwijdering) en om te zetten in een geschikt waterstofrijk gasmengsel (reformaat) waarmee de brandstofcel wordt gevoed.

Om meerdere redenen worden brandstofcellen gerekend tot de categorie van 'schone elektriciteitsopwekkers':

- De opwekking van elektriciteit vindt plaats met relatief hoge omzettingsrendementen; ook op kleinere schaal, dankzij de modulaire opbouw. Het deellastrendement is vaak nog hoger dan het vollastrendement, omdat de inwendige verliezen in de brandstofcel zelf afnemen bij verlaging van de stroomsterkte. Daarbij stijgt de opgewekte gelijkspanning.
- De gasvormige emissies van zwavel- en stikstofoxiden zijn extreem laag. Zwavelcomponenten worden upstream binnen de fuel processor sectie verwijderd. De gecontroleerde elektrochemische 'verbranding' vindt plaats bij relatief lage temperaturen, waardoor er nagenoeg geen stikstofoxiden gevormd worden.
- De productie van geluid en trillingen is eveneens extreem laag. De enige roterende componenten zijn een luchtcompressor (of -blower), eventuele recycleblowers en koel- en voedingswaterpompen.

4.2 Type-indeling en ontwikkelingsstatus

Brandstofcellen worden getypeerd op basis van het toegepaste type elektrolyt en de daaraan verbonden bedrijfstemperatuur. Het globale onderscheid is tussen de typen hoge- en lage temperatuur brandstofcel.

Tot de hoge temperatuur brandstofcellen behoren:

- De **Solid Oxide Fuel Cell**, of SOFC. Deze maakt gebruik van een keramisch elektrolyt en kent een bedrijfstemperatuur die, afhankelijk van de elektrolyt- en elektrode-samenstelling varieert van 700-1000 °C. De stack wordt gekoeld door middel van de procesgassen (brandstof en oxidant). Voor de koeling wordt een relatief hoge overmaat aan lucht gebruikt. De uitvoeringsvorm is zowel buisvormig als met vlakke gestapelde platen.

De meest bekende ontwikkelaars van dit type brandstofcel zijn:

Siemens-Westinghouse, Acumentrix, HT-Ceramics, InDEC, Haldor Topsøe, Sulzer, ECN.

Van het buizentype is onlangs door Siemens-Westinghouse een 230 kW versie getest met aardgas als brandstof. Dit systeem werkt onder verhoogde druk, waarbij 200 kW SOFC stacks zijn gecombineerd met een 50 kW microturbine. Het voordeel van deze systeemopzet is het hoge perspectiefrendement, dat kan oplopen tot meer dan 70%! Eerder is door SW een 100 kW systeem gebouwd voor aardgasgebruik. Dit systeem heeft onder meer in Nederland (Westervoort) gestaan.

Momenteel wordt planaire SOFC technologie opgeschaald van 1 tot 10 kW stacks. Op basis hiervan ontwikkelt Wärtsilä in Finland systemen in de range van 50 – 200 kW, die in eerste instantie op aardgas bedreven worden. In een later stadium zijn ook scheeps-toepassingen voorzien.

- De **Molten Carbonate Fuel Cell**, of MCFC. Deze maakt gebruik van een gesmolten zout elektrolyt en kent een bedrijfstemperatuur die gemiddeld 650 °C bedraagt. Deze stack wordt eveneens door de procesgassen (brandstof en oxidant) gekoeld. Voor de koeling wordt een hoge luchtvermaat gebruikt (kathoderecirculatie). De uitvoeringsvorm is steeds met vlakke, gestapelde platen.

De meest bekende ontwikkelaars van dit type brandstofcel zijn:

Fuel Cell Energy (USA), MTU (D), Ansaldo (It), IHI (Jpn).

Het grootste, door FCE (voorheen: Energy Research Corp.) gedemonstreerde systeem is 1,6 MWe, en bestaat uit 16 stacks van 100 kW op basis van interne reforming van aardgas. Door MTU is een aantal 250 kW systemen gebouwd, eveneens op basis van interne reforming van aardgas. Voor dit systeem wordt eveneens biogas (methaan met CO₂) gebruikt als brandstof. In Japan is een 1 MWe systeem gebouwd met vier stacks van 250 kW (twee van IHI en twee van Hitachi), op basis van externe reforming van aardgas (city gas). IHI werkt aan de ontwikkeling van MCFC systemen die geïntegreerd worden met een gasturbine. Door Mitsubishi is een 100 kW interne-reforming systeem gebouwd. De MCFC ontwikkelingen bij Mitsubishi en bij Hitachi, evenals die bij MC-Power en bij Brandstofcel Nederland zijn inmiddels gestopt.

- De **Phosphoric Acid Fuel Cell**, of PAFC. Deze maakt gebruik van een vloeibare fosforzuuroplossing en kent een bedrijfstemperatuur van gemiddeld 200 °C. De stack wordt via een apart, hoge-druk koelwatercircuit gekoeld. De uitvoeringsvorm is met vlakke, gestapelde platen.

De meest-bekende ontwikkelaars van dit type brandstofcel zijn:

IFC, Fuji.

Door IFC zijn reeds meer dan 200 systemen van 200 kW geleverd. Deze systemen gebruiken aardgas als brandstof en bezitten een aparte fuel processor, die waterstof maakt met geringe concentratie CO (< 1 vol-%). Deze systemen worden ingezet als

vervanging voor gasmotoren bij warmte/kracht toepassingen. De systemen zijn uiterst betrouwbaar, maar nog wel kostbaar (ca 3000 €/kWe). Daarnaast levert Fuji systemen van 50 kWe.

Tot de lage-temperatuur brandstofcellen behoren:

- De **Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell**, of PEMFC; voorheen ook wel Solid Polymer Fuel Cell, of SPFC genoemd. Deze maakt gebruik van een proton-geleidend, met water verzadigd, polymeer membraanfolie als elektrolyt. De bedrijfstemperatuur bedraagt gemiddeld 70 °C. De koeling vindt plaats met behulp van een apart koelwatercircuit. De uitvoeringsvorm is met vlakke gestapelde platen. Momenteel is een nieuwe, zogenaamde droge hoge temperatuurvariant in ontwikkeling met een bedrijfstemperatuur tussen 100 en 200 °C. Hierbij wordt niet langer vereist dat de brandstof- en oxidant-voedingsstromen verzadigd zijn met waterdamp, ter voorkoming van uitdroging van het membraan. Dit leidt tevens tot een vereenvoudiging van het systeemontwerp.

De meest bekende ontwikkelaars van dit type zijn:

Ballard, Nuvera, Siemens, Honda, Toyota, PlugPower, NedStack, ECN.

Ballard heeft eenmalig een 250 kWe, aardgas gevoed PEMFC systeem gebouwd als demonstratie van de mogelijkheid voor stationaire warmte/krachttoepassing. De combinatie van PEMFC technologie met aardgas als brandstof, wordt momenteel ontwikkeld voor micro-WK toepassing in individuele woningen. Hierbij varieert de capaciteit van 1 – 5 kWe.

PEMFC systemen op waterstof worden door vrijwel alle automobielfabrikanten getest als toekomstige vervanging van de interne-verbrandingsmotor (BMW past waterstof toe in hun interne verbrandingsmotoren). Met name in een hybride uitvoering met elektriciteitsopslag (terugwinning remenergie in stadsverkeer) worden spectaculaire brandstofbesparingen en emissiereducties bereikt.

Een U-212 onderzeeër van HDW in Duitsland is uitgerust met 300 kW PEMFC stacks van Siemens, waarbij waterstof in metaalhydriden en vloeibare zuurstof worden toegepast.

- De **Alkaline Fuel Cell**, of AFC. Dit is het type dat reeds lange tijd in ruimtevaartmissies wordt toegepast voor elektriciteits- en waterproductie. De bedrijfstemperatuur bedraagt gemiddeld 80 °C. De uitvoeringsvorm is met vlakke gestapelde platen. De AFC stelt zeer hoge eisen aan de zuiverheid van zowel de waterstof als ook de zuurstof; zelfs atmosferische CO₂ leidt tot afname van de prestatie, waardoor zuivere zuurstof als oxidant wordt toegepast.
- De **Direct Methanol Fuel Cell**, of DMFC. Deze is in staat om rechtstreeks met methanol te worden gevoed en wordt hoofdzakelijk ontwikkeld voor toepassing in draagbare elektronische apparatuur, zoals: GSM telefoons en laptops. Het omzettingsrendement is niet erg hoog, maar de hoge energiedichtheid van een tankje met methanol maakt toch een lange gebruiksduur mogelijk.

Er wordt niet verwacht dat de beide laatste typen brandstofcel (AFC en DMFC) toegepast zullen worden voor de energievoorziening aan boord van schepen.

4.3 Brandstofcellsystemen

Zoals vermeld is het geïntegreerde brandstofcellstelsel (FCS) opgebouwd uit drie processecties: brandstofcellstacks (FC), fuel processor (FP) en balance-of-plant (BOP). De power conditioner valt binnen het aangrenzende interfacesegment en dus buiten het brandstofcellstelsel.

Regelmatig verschijnen er overzichtsartikelen over brandstofcelltechnologie ontwikkelings- en demonstratieprogramma's in het elektronische nieuwsblad Fuel Cell Today:

www.fuelcelltoday.com

4.4 Kosten van brandstofcellsystemen

De vaak geciteerde 1000-1500 US\$ per kilowatt is een ontwikkeldoel voor stationaire brandstofcellsystemen, die aardgas als brandstof gebruiken. Het getal is vooral relevant voor onze (interne-)reforming variant van de hoge-temperatuur MCFC en SOFC. De huidige prijzen bedragen circa 2-4 maal dit niveau. Ik verwacht niet dat de kosten significant lager zullen worden dan het ontwikkeldoel; hooguit zou 1000 US\$ per kilowatt gehaald kunnen worden bij massafabrikage. Het ontwikkeldoel is afgeleid van de huidige technologie voor deze toepassing, te weten gasturbinetechnologie. Die is evenals de dieselmotor veel goedkoper, maar ook minder efficiënt en milieuvriendelijk. De brandstofcellen zijn stiller en geluidsarmer, hebben hogere omzettingsrendementen, een beter deellastgedrag en bovendien flink lagere emissies van NO_x en SO₂. Hierdoor mogen ze iets duurder blijven dan de GT en dieselmotor. Bovendien wordt het systeem complexer wanneer er geen aardgas maar diesel of stookolieën als brandstof gebruikt worden; hiervoor zijn complexere ontzwavelings- en extra pre-reformerunits noodzakelijk.

De target applicatie voor PEMFC technologie is de automotive sector. De concurrerende technologie daarin is de interne-verbrandingsmotor, die momenteel circa 50 US\$/kW kost. Vanwege de aanscherpende emissie-eisen en extra te nemen emissiereductiemaatregelen binnen het systeemontwerp, zullen de kosten voor deze referentietechnologie binnenkort gaan stijgen. Het ontwikkeldoel voor PEMFC op waterstof ligt op circa 100 US\$/kW. Daar zijn we nog lang niet; reken voor het huidige kostenniveau op circa 10.000 US\$/kW. De eerste te nemen kostenbarrière van 1.000 US\$/kW verwacht ik over een jaar of vijf. De kosten kunnen lager zijn voor PEMFC dan voor hoge-temperatuur brandstofcellen, omdat er sprake is van een grotere markt; het geïnstalleerde vermogen aan boord van het voertuigwagenvoerpark is een veelvoud van dat van de elektriciteitscentrales. Interessante gedachte, dat in de toekomst de brandstofcell aan boord van je auto, ook gebruikt kan gaan worden voor huishoudelijk elektriciteitsgebruik, zolang niet iedereen tegelijk onderweg is.. Daarnaast wordt er gebruik gemaakt van goedkopere materialen (o.a. kunststoffen en plaatstaal) dan bij hoge-temperatuur brandstofcellen.

Duidelijk is evenwel dat vanwege het relatief geringe aantal brandstofcellen dat op dit moment in (demonstratie-)bedrijf is, de kosten momenteel nog erg hoog zijn. Ik hoop en verwacht dat met geautomatiseerde serie- en vervolgens gerobotiseerde massafabrikage de kosten over niet al te lange tijd tot een concurrerend niveau zullen gaan dalen. Daarbij wordt het tijdspad bepaald door het tempo waarin er uitgebreide veldtesten en demonstraties met brandstofcelltechnologie worden uitgevoerd en bevorderd door de sterke politieke aandacht in de VS, Europa en Japan voor de ontwikkeling en implementatie van deze schone en efficiënte technologie.

In Tabel 6 staan kosten weergegeven voor brandstofcellsystemen. N.b.: de kostendoelen voor PEMFC systemen gelden voor het totale systeem: inclusief de fuel processor voor

waterstofproductie respectievelijk inclusief de kosten voor waterstofopslag aan boord van het voer(vaar)tuig.

MTU als ontwikkelaar van 250 kW MCFC systemen, met interne-reforming van aardgas, verwacht dat de investeringskosten vanaf 2006 een niveau bereiken van 4.000 \$/kWe, waarbij de kosten op termijn zullen dalen tot 1000 – 1500 \$/kWe.

Tabel 4 Overzichtstabel van brandstofcellen met hun verwachte omzettingsefficiënties (onzekerheidsmarge: 5 %-punten).

Typen brandstofcellen en hun karakteristieken voor scheepvaarttoepassingen					AES - Nieuwe Technologie		
Zichtperiode	Typeaanduiding	Brandstof	Fuel processor	Brandstofcel	Modulegrootte [kW _e , DC, netto, nominaal] [-]	Nominale / nominale last [-, LHV]	Nominale rendement [-, LHV]
toekomstige technologie	DIESEL_PEMFC_LTM	zwavelarme diesel	autotherme reforming	PEMFC met lage-temperatuur membraan	250	0.20	0.30
toekomstige technologie	DIESEL_PEMFC_HTM	zwavelarme diesel	autotherme reforming	PEMFC met hoge-temperatuur membraan	250	0.20	0.33
toekomstige technologie	DIESEL_MCFC	zwavelarme diesel	autotherme reforming	MCFC	250	0.20	0.42
toekomstige technologie	DIESEL_MCFC_GT	zwavelarme diesel	autotherme reforming	MCFC met gasturbine	250	0.25	0.48
toekomstige technologie	DIESEL_SOFC	zwavelarme diesel	autotherme reforming	SOFC	250	0.20	0.40
toekomstige technologie	DIESEL_SOFC_GT	zwavelarme diesel	autotherme reforming	SOFC met gasturbine	250	0.25	0.55
toekomstige technologie	BENZINE_PEMFC_LTM	zwavelarme benzine	autotherme reforming	PEMFC met lage-temperatuur membraan	100	0.20	0.35
toekomstige technologie	BENZINE_PEMFC_HTM	zwavelarme benzine	autotherme reforming	PEMFC met hoge-temperatuur membraan	100	0.20	0.38
toekomstige technologie	BENZINE_MCFC	zwavelarme benzine	autotherme reforming	MCFC	250	0.20	0.48
toekomstige technologie	BENZINE_MCFC_GT	zwavelarme benzine	autotherme reforming	MCFC met gasturbine	250	0.25	0.52
toekomstige technologie	BENZINE_SOFC	zwavelarme benzine	autotherme reforming	SOFC	250	0.20	0.43
toekomstige technologie	BENZINE_SOFC_GT	zwavelarme benzine	autotherme reforming	SOFC met gasturbine	250	0.25	0.60
toekomstige technologie	LPG_PEMFC_LTM	LPG	stoomreforming	PEMFC met lage-temperatuur membraan	100	0.20	0.40
toekomstige technologie	LPG_PEMFC_HTM	LPG	stoomreforming	PEMFC met hoge-temperatuur membraan	100	0.20	0.44
toekomstige technologie	LPG_MCFC	LPG	stoomreforming	MCFC	250	0.20	0.50
toekomstige technologie	LPG_MCFC_GT	LPG	stoomreforming	MCFC met gasturbine	250	0.25	0.55
toekomstige technologie	LPG_SOFC	LPG	stoomreforming	SOFC	250	0.20	0.58
toekomstige technologie	LPG_SOFC_GT	LPG	stoomreforming	SOFC met gasturbine	250	0.25	0.65
nieuwe technologie	H2_PEMFC_LTM	waterstof	niet van toepassing	PEMFC met lage-temperatuur membraan	50	0.15	0.50
toekomstige technologie	H2_PEMFC_HTM	waterstof	niet van toepassing	PEMFC met lage-temperatuur membraan	50	0.15	0.55
toekomstige technologie	H2_SOFC	waterstof	niet van toepassing	SOFC met hoge-temperatuur membraan	50	0.15	0.58
toekomstige technologie	H2_SOFC_GT	waterstof	niet van toepassing	SOFC met hoge-temperatuur membraan	50	0.15	0.65

Deelastrendementen:
 $x = \text{actueel vermogen} / \text{nominaal vermogen}$
 $y = \text{actueel rendement} / \text{nominaal rendement}$
 $y = -1.6 x^2 + 2.4 x + 0.2$
 $y (x = 0.75) = y_{\text{max}} = 1.1$

Tabel 5 Overzichtstabel van brandstofcelsystemen met hun emissies.

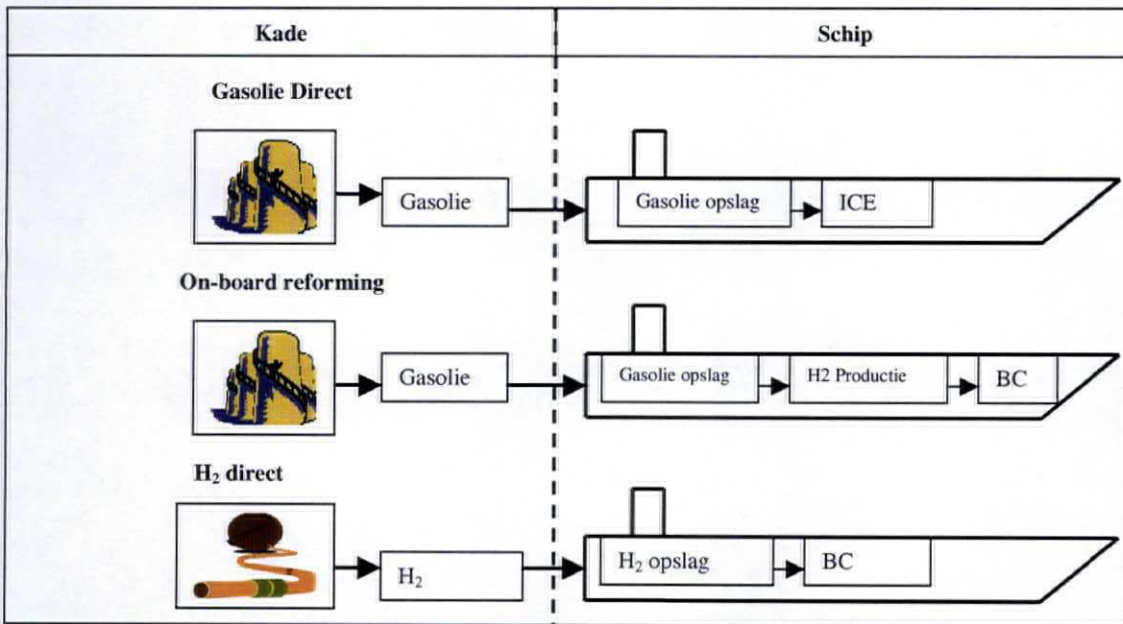
Typen brandstofcelsystemen en hun karakteristieken voor scheepvaarttoepassingen				AES - Nieuwe Technologie								
Zichtperiode	Typeaanduiding	Brandstof	Fuel processor	Brandstofcel	Emissies CO2 [g/kWh]	CH4 [g/kWh]	CO [g/kWh]	NOx [g/kWh]	SO2 [g/kWh]	NM/OC PM [g/kWh]	Versie: 03 Datum: 12 nov. 2004	
toekomstige technologie	DIESEL_PEMFC_LTM	zwavelarme diesel	autotherme reforming	PEMFC met lage-temperatuur membraan	650 - 725	-	-	0	0.01	0	0	Rolls Royce
toekomstige technologie	DIESEL_PEMFC_HTM	zwavelarme diesel	autotherme reforming	PEMFC met hoge-temperatuur membraan	-	-	-	-	-	0	-	0
toekomstige technologie	DIESEL_MCFC	zwavelarme diesel	autotherme reforming	MCFC	555	0.030	0.014	0.01	0.058	0.003	0	FCSHIP/MTU/LBST
toekomstige technologie	DIESEL_MCFC_GT	zwavelarme diesel	autotherme reforming	MCFC met gasturbine	-	-	-	0.01	0	0	0	0
toekomstige technologie	DIESEL_SOFC	zwavelarme diesel	autotherme reforming	SOFC	-	-	-	0.01	0	0	0	Rolls Royce
toekomstige technologie	DIESEL_SOFC_GT	zwavelarme diesel	autotherme reforming	SOFC met gasturbine	450	0	0	0.01	0	0	0	Rolls Royce
toekomstige technologie	BENZINE_PEMFC_LTM	zwavelarme benzine	autotherme reforming	PEMFC met lage-temperatuur membraan	-	-	-	0	-	-	-	0
toekomstige technologie	BENZINE_PEMFC_HTM	zwavelarme benzine	autotherme reforming	PEMFC met hoge-temperatuur membraan	-	-	-	-	-	-	-	0
toekomstige technologie	BENZINE_MCFC	zwavelarme benzine	autotherme reforming	MCFC	-	-	-	-	-	-	-	0
toekomstige technologie	BENZINE_MCFC_GT	zwavelarme benzine	autotherme reforming	MCFC met gasturbine	-	-	-	-	-	-	-	0
toekomstige technologie	BENZINE_SOFC	zwavelarme benzine	autotherme reforming	SOFC	-	-	-	-	-	-	-	0
toekomstige technologie	BENZINE_SOFC_GT	zwavelarme benzine	autotherme reforming	SOFC met gasturbine	-	-	-	0	-	-	-	0
toekomstige technologie	LPG_PEMFC_LTM	LPG	stoomreforming	SOFC met gasturbine	-	-	-	-	-	-	-	0
toekomstige technologie	LPG_PEMFC_HTM	LPG	stoomreforming	PEMFC met lage-temperatuur membraan	-	-	-	-	-	-	-	0
toekomstige technologie	LPG_MCFC	LPG	stoomreforming	PEMFC met hoge-temperatuur membraan	-	-	-	-	-	-	-	0
toekomstige technologie	LPG_MCFC_GT	LPG	stoomreforming	MCFC met gasturbine	-	-	-	-	-	-	-	0
toekomstige technologie	LPG_SOFC	LPG	stoomreforming	SOFC	-	-	-	-	-	-	-	0
toekomstige technologie	LPG_SOFC_GT	LPG	stoomreforming	SOFC met gasturbine	-	-	-	-	-	-	-	0
nieuwe technologie	H2_PEMFC_LTM	waterstof	niet van toepassing	SOFC met gasturbine	-	-	-	-	-	-	-	0
toekomstige technologie	H2_PEMFC_HTM	waterstof	niet van toepassing	PEMFC met lage-temperatuur membraan	0	0	0	0	0	0	0	0
toekomstige technologie	H2_PEMFC_LTM	waterstof	niet van toepassing	PEMFC met lage-temperatuur membraan	0	0	0	0	0	0	0	0
toekomstige technologie	H2_PEMFC_HTM	waterstof	niet van toepassing	PEMFC met hoge-temperatuur membraan	0	0	0	0	0	0	0	0
toekomstige technologie	H2_SOFC	waterstof	niet van toepassing	SOFC	0	0	0	0	0	0	0	0
toekomstige technologie	H2_SOFC_GT	waterstof	niet van toepassing	SOFC met gasturbine	0	0	0	0	0	0	0	0

5. WATERSTOFPRODUCTIE

5.1 Inleiding

Indien brandstofcellen aan boord van schepen worden toegepast is het ook nodig om waterstof beschikbaar te hebben. Dit gas kan op verschillende manieren en plaatsen worden geproduceerd uit verschillende bronnen (water en koolwaterstoffen).

De huidige infrastructuur voor de brandstofvoorziening is gebaseerd op gasolie (figuur 1), waarbij gasolie op grote schaal wordt geproduceerd op een raffinaderij. Na dit proces wordt de gasolie vervolgens gedistribueerd naar de bunkerstations. In het schip wordt de gasolie via een interne dieselverbrandingsmotor omgezet in mechanische en/of elektrische energie. De huidige infrastructuur is echter (nog) niet toegespitst op het direct leveren van waterstof via een pijpleiding (zoals dat nu met aardgas gebeurt). Naar verwachting zal de aanleg van een grootschalige waterstofinfrastructuur pas rond 2050 enige vorm krijgen. Om het toch mogelijk te maken om schepen uit te rusten met brandstofcellen is het dan ook nodig om tot die tijd op andere manieren waterstof te verkrijgen. In principe zijn hiervoor twee opties, namelijk de productie van waterstof uit een andere fossiele energiedrager aan boord van het schip of op de kade/bunkerstation. Een tekening met deze (en de conventionele) opties is weergegeven in figuur 1.



Figuur 1 Brandstofroutes (BC=brandstofcel; ICE= internal combustion engine)

Een belangrijke opmerking is wel dat niet elke brandstofcel per definitie een externe reformer nodig heeft. De *molten carbonate fuel cell* (MCFC), de *direct methanol fuel cell* (DMFC) en de *solid oxide fuel cell* (SOFC) kunnen in principe de brandstof ook intern reformen (omzetten in waterstof). Hoewel met interne reforming een synergetisch voordeel wordt behaald door het integreren van de reformer met de brandstofcel (verhoogde omzettingsgraad en koelfunctie), is het reactieproces wel complexer. Dit geldt met name voor de grotere koolwaterstoffen (zoals benzine en diesel). Bovendien kunnen bij het interne reformingproces sterke thermische gradiënten ontstaan over het membraan die de werking en levensduur ervan niet bevorderen. Om deze twee redenen is het dan ook waarschijnlijk dat de brandstof toch eerst wordt voorbehandeld middels een reforming of pre-reformingproces (omzetting van hogere koolwaterstoffen in methaan).

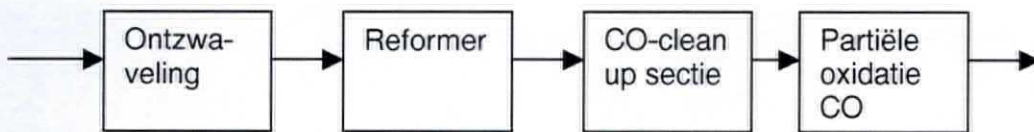
De productie van waterstof kan op verschillende manieren plaatsvinden. Bij voorkeur zou deze omzetting moeten gebeuren op basis van de aan boord beschikbare brandstoffen,

zeker ook met het oog op de huidige infrastructuur. Toch zullen ook andere brandstoffen tot de mogelijkheden moeten behoren zoals benzine of LPG.

In het kader van het *All Electric Ship* project, wordt in dit stuk de aandacht gelegd op de productie van waterstof aan boord middels een aparte reformer. Er wordt een overzicht gegeven van de drie belangrijkste waterstofproductietechnieken. Daarnaast wordt een overzicht gegeven van een aantal karakteristieke kengetallen.

5.2 Algemene beschrijving

Het apparaat dat aan boord vanuit de (meestal) fossiele brandstof waterstof produceert, wordt een *fuel processor* genoemd. Vanwege randvoorwaarden die opgelegd worden door onder andere de brandstofcel, bestaat een fuel processor normaliter uit een aantal karakteristieke stappen. Deze zijn weergegeven in Figuur 2.



Figuur 2 Schematische weergave fuel processing stappen, ten behoeve van lage-temperatuur PEMFC; de laatste twee secties zijn niet noodzakelijk voor hoge-temperatuur brandstofcellen (incl. hoge-temperatuur PEMFC).

Voor het proces wordt de voeding (bijvoorbeeld diesel) eerst ontzwaveld (*ontzwaveling*). Het ontzwavelen van de voedingstroom is nodig omdat de gebruikte katalysatoren in zowel de reformer als in de brandstofcel door deze stof vergiftigd worden (blokkering van de actieve plaatsen) door de absorptie op aanwezige edelmetalen. Ontzwaveling kan voor sommige reformingprocessen ook na de reformer plaatsvinden.

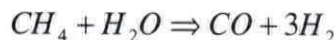
De ontzwavelde brandstof wordt vervolgens in een reformer omgezet naar een waterstofrijk synthesegas. Met dit synthesegas kunnen hoge-temperatuur brandstofcellen direct gevoed worden. Met name vanwege de hoge gevoeligheid van de lage-temperatuur PEMFC brandstofcel voor koolstofmonoxide (CO), wordt deze laatste component in een twee tot drietal zuiveringsstappen verwijderd (*CO-clean-up sectie* en *partiële oxidatie CO*). Het productgas van de fuel processor (reformaat) is dan de voeding voor de brandstofcel.

5.3 Reforming opties

Hoewel er legio methoden zijn om brandstoffen om te zetten, zijn er eigenlijk drie hoofdwegen: Stoom reforming (SR), (katalytische) Partiele oxidatie (CPO) en Autothermische reforming (ATR).

5.3.1 Stoom reforming

Stoom reforming is de hoofdroute voor de industriële waterstofproductie waarbij de brandstof wordt omgezet met stoom. De stoom- en de gasstroom zijn (meestal) in tegenstroom en gaan samen over een vast katalysatorbed. Omdat dit proces endotherm is zal er extra energie nodig zijn om de reactie te laten verlopen; daarom wordt ongeveer 25% van de totale inkomende aardgasstroom verbrand. Over het algemeen zorgt dit voor een toename aan volume en complexiteit. De primaire reactieproducten zijn H_2 , CO en CO_2 . Een voorbeeld stoom reforming reactie is weergegeven voor methaan in vergelijking 1.



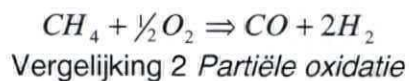
Vergelijking 1 *Stoomreforming*

Het productierendement voor grootschalige productie ligt tussen de 62 en 80% (LHV) [1],[2],[3],[4]. Deze methode is relatief goedkoop om waterstof te produceren, de variatie in het rendement is afhankelijk van de mate waarin de geproduceerde warmte (in de vorm van stoom) wordt of kan worden gebruikt. Bij een hoog waterstof rendement zal weinig warmte geproduceerd worden.

Door de proceseigenschappen is deze productiemethode geschikt voor on-board reforming [5].

5.3.2 Partiële oxidatie

Het produceren van waterstof uit vloeibare en gasvormige koolwaterstoffen is ook mogelijk via partiële oxidatie. De koolwaterstoffen worden hierbij geoxideerd met zuurstof (in ondermaat aanwezig) en stoom (zie vergelijking 2) [6].



Het exotherme proces vindt plaats bij hoge temperatuur zonder katalysator (er vindt een gecontroleerde verbranding plaats). De reactieproducten zijn H₂, CO en CO₂. Naast deze componenten is er ook stikstof in het reformaatgas aanwezig, als gevolg van het gebruik van lucht als oxiderend medium. Omdat de reactie exotherm is, is er geen externe warmtebron nodig om het proces op gang te houden. Echter, door de aanwezigheid van lucht en de afwezigheid van stoom in het proces zal de molfractie waterstof in het reformaatgas lager zijn dan bij stoom reforming (± 35%).

De exotherme proces eigenschappen maken het samen met het eenvoudige reactor ontwerp [7] een geschikte methode voor onboard reforming. De methode is vooral geschikt voor de zwaardere koolwaterstoffen.

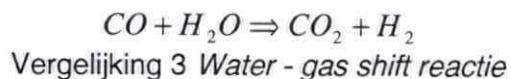
5.3.3 Autothermische reforming

Autothermische reforming combineert stoom reforming (endotherm) en partiële oxidatie (exotherm) op zo'n manier dat er netto geen warmte aan het systeem hoeft te worden toegevoegd of afgevoerd. Zowel de oxidatie als de reformingreacties vinden plaats in een katalytisch bed. Het grote voordeel van ATR is de flexibiliteit van het proces (goed dynamisch gedrag), de snelle opstarttijd en de grote tolerantie aan mogelijke brandstoffen. De waterstofconcentratie in het reformaatgas bedraagt ongeveer 55%.

5.4 CO-clean up sectie en partiële CO oxidatie

Na het reformingproces moet, voor de lage-temperatuur PEM brandstofcellen, de CO concentratie in het reformaatgas worden gereduceerd. Dit is nodig omdat CO een gif is voor de katalysator (platina) van een PEMFC.

Typisch wordt dit gedaan in een twee stappen proces middels de onderstaande water-gas shift reactie.



Zoals blijkt uit de reactievergelijking wordt met deze reactie niet alleen het CO gereduceerd, maar ook de waterstofopbrengst vergroot.

Na deze shiftsectie is de CO concentratie gedaald tot ongeveer 1% en is een additionele stap nodig om de CO te verlagen tot minder dan 10 ppm. Dit wordt gedaan met een zogenaamde *Preferential Oxidation (PrOx)* reactor die met behulp van lucht en een speciale katalysator de CO in een waterstofatmosfeer, preferentieel naar CO₂ oxideert.

5.5 Samenvattend overzicht

Tabel 7 Overzicht van fuel processing methoden.

Methode	Principe	Overwegingen
Steam reforming	Omzetting koolwaterstof met stoom. $CH_4 + H_2O \Rightarrow CO + 3H_2$	Voordeel: Hoge productzuiverheid tot $\pm 75\%$ H_2 (geen verdunning van N_2), hoog rendement Nadeel: stoom nodig bij de opstart maakt systeem complexer. Systeem schaalt met volume i.p.v. oppervlak, daardoor volumineuzer dan POX en ATR.
Partiële oxidatie	Omzetting koolwaterstof met ondermaat zuurstof/lucht. $CH_4 + \frac{1}{2}O_2 \Rightarrow CO + 2H_2$	Voordeel: Snelle opstart, geen stoom nodig voor reactie. Geschikt voor zwaardere koolwaterstoffen. Nadeel: Lage productzuiverheid (tot $\pm 35\%$) maakt zuivering van H_2 daarom moeilijk. Laag rendement
Autothermal reforming	Combinatie van partiële oxidatie en stoom reforming. $CH_4 + \frac{1}{2}O_2 \Rightarrow CO + 2H_2$ $CH_4 + H_2O \Rightarrow CO + 3H_2$	Voordeel: Snellere opstart dan SR. Exotherme warmte van oxidatie wordt gebruikt voor voeding endotherme reforming reactie. Waterstofconcentratie bedraagt tot $\pm 55\%$ en is op shift evenwicht bij reformer uitgang. Geen externe brander nodig.

5.6 Marine diesel fuels en zwavel

Voor de toepassing van brandstofcellen met fuel processor is het wenselijk om een zo licht mogelijke oliefractie of component te gebruiken. De reden hiervoor is dat deze over het algemeen eenvoudiger om te zetten zijn naar een waterstofrijk productgas. Dit zal echter niet altijd de meest aantrekkelijke optie zijn, zeker niet wanneer het brandstofcelsysteem gebruikt wordt voor de dekking van een gedeelte van het totale gevraagde vermogen. In dat geval zal er op het schip reeds een andere brandstof beschikbaar zijn, hetgeen in de meeste gevallen neerkomt op een dieselvariant (een marine distillaat of marine "refinery fuel"). Diesel is echter een mengsel van vrij lange en zware moleculen, dat relatief moeilijk te raffineren is. Daarnaast bevatten de scheepsdiesels vaak een vrij hoge concentratie zwavel (tot 3 gew%), hetgeen het reformingproces, het rendement en het volume & gewicht van het systeem niet ten gunste komen. Dit komt omdat de katalysatoren van de diverse reactoren gevoelig zijn

voor zwavel. Het verwijderen van de component uit de diesel is daarom vereist. Voor de processen ATR en CPO zijn de katalysatoren over het algemeen redelijk tolerant voor zwavel (tot 2000 ppm) en het ontzwavelingsproces (verwijdering van H₂S) kan dan plaatsvinden na de reformer in de gasfase bij gunstige procesomstandigheden (lage druk). In het geval van stoom reforming ligt dat anders. Zwavel bezet gemakkelijk de actieve plaatsen van de gebruikte nikkelkatalysatoren en dat gebeurt al vanaf relatief lage concentraties. Ontzwaveling van de brandstof moet dus plaatsvinden in de vloeistoffase tot een niveau kleiner dan 1 ppm. Omdat de zwavel in dat geval sterk gebonden is aan de lange koolwaterstofketens, kan deze concentratie niet worden bereikt met de conventionele lage druk technieken (ZnO bed). Met de huidige technologische stand van de techniek zal het ontzwavelingsproces daarom bij hoge druk moeten gebeuren, hetgeen het systeemrendement nog verder zal doen afnemen.

Er zijn projecten gaande in met name de Verenigde Staten om fuel processoren te ontwikkelen die geschikt zijn voor de conversie van (navy)-diesel naar synthegas. Een recent bericht [9] beweert dat er een 5kW brandstofcelsysteem is ontwikkeld dat werkt op diesel. Ook in Nederland wordt een proces ontwikkeld waarbij zwavelhoudende marine diesel (F76) wordt omgezet in een reformatstroom waarmee lage-temperatuur brandstofcellen kunnen worden gevoed: het DESIRE project, waarbij de fuel processor momenteel getest wordt bij ECN in Petten.

Overigens hebben de Europese ministers van milieu recent (juni 2004) besloten dat de binnenvaart in 2007 alleen nog brandstof mag gebruiken met een zwavelgehalte van 0,2%. In 2010 mag de brandstof nog maar 0,1% zwavel bevatten. De motivatie hiervoor is dat een hoog zwavelgehalte slecht is voor de gezondheid en tevens leidt tot verzuring van bodem en gewassen.

Op dit moment gebruikt de Nederlandse binnenvaart overwegend brandstof met minder dan 2% zwavel. In Frankrijk en Oostenrijk wordt al geen brandstof verkocht met een hogere waarde als 0,15% zwavel. De vermindering van zwavel in scheepsbrandstof (ook zeeschepen) is onderdeel van de door de EU en de Europese Binnenvaart Unie (EBU) gevolgde strategie voor behoud van het milieuvriendelijke karakter van de binnenvaart [10].

Kengetallen die de beschreven systemen weergeven, staan vermeldt in onderstaande tabel.

Tabel 8 Kengetallen voor fuel processoren afkomstig van het "American Department of Energy" (DoE).

		DoE doelstelling [8]
Volume	W/liter	500 (2001)
		700 (2005)
		800 (2010)
Gewicht	W/kg	450 (2001)
		700 (2005)
		800 (2010)
Rendemen t (LHV)	%	78 (2001)
		78 (2005)
		80 (2010)

5.6.1 Bewezen

Op grote schaal hebben de verschillende technieken zich reeds bewezen. Reeds jaren worden ze gebruikt in met name de petrochemische industrie. Op kleine schaal bevindt zich de technologie nog in een "onderzoeksstadium". Hoewel het principe bekend is, moet

gekeken worden in hoeverre volumereductie geoptimaliseerd kan worden door bijvoorbeeld integratie van componenten. Op beperkte schaal worden er nu prototypes gedemonstreerd.

5.6.2 Nieuw

In de nabije toekomst zal het onderzoek zich vooral richten op kleinschalige efficiënte productie van waterstof. Ook andere alternatieve technieken voor de eerder genoemde worden daarbij bekeken. Volume- en gewichtreductie spelen daarbij een belangrijke rol voor mobiele toepassingen.

5.6.3 Toekomst

In de toekomst zal men toch proberen een waterstofinfrastructuur aan te leggen bij de bunkerstations als brandstofcellen breeduit toegepast gaan worden. Dit onder voorbehoud dat er nog een geschikte opslagtechnologie is gevonden voor waterstof. Onderzoek zal zich dan richten op waterstofproductie op de bunkerstations en zich ook in de toekomst nog verder gaan richten op kleinschalige efficiënte productie van waterstof.

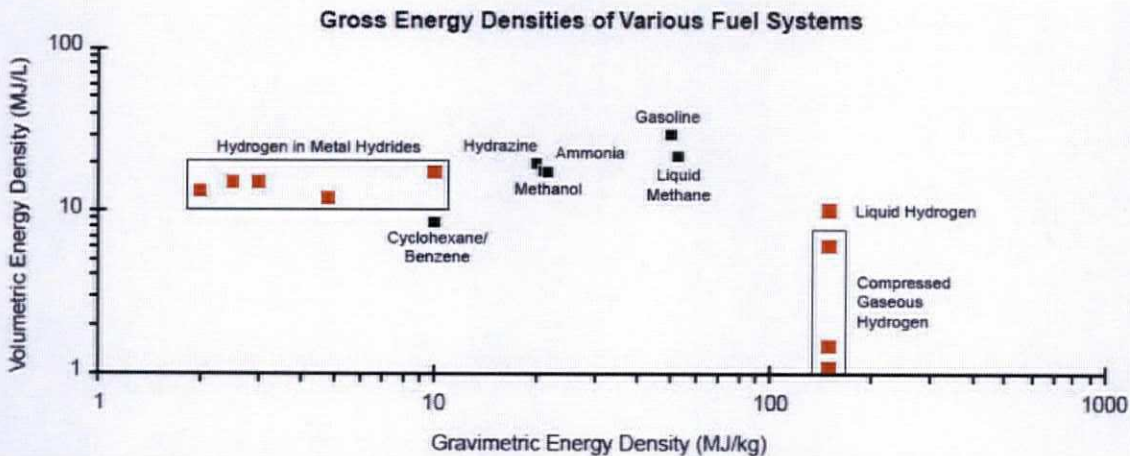
5.7 Literatuur

1. Bracha M.; "*Hydrogen Production and Infrastructure*", Proc. Hyforum 2000, vol 2, 2000
2. Stoll R.E., Linde von F., "*Hydrogen –What are the costs?*", Hydrocarbon Processing, 12, 2000
3. Kwon S.H., Shin J.W., Oh J.K., Heaven D.L., Condorelli P., "*Hydrogen production alternatives in an IGCC plant*", Hydrocarbon Processing, 4, 1999
4. Ogden J., Kreutz T., Kartha S., Iwan L.; "*Hydrogen Energy Systems Studies*", NREL, 1996, DE-FG04-94AL85803
5. C.E.G. Padró, V.Putsche, *Survey of the Economics of technologies*, 1999, NREL/TP-570-27079
6. H.Th.J. Reijers, A. de Groot, P. Lako, *Evaluatie van waterstof-gebaseerde concepten en systemen*, 2001, ECN-C-01-019
7. M.Steinberg and H.C. Cheng, "*Modern prospective technologies for hydrogen production from fossil fuels*", 1989, International Journal of Hydrogen energy, vol. 17, no 11.
8. United States Department of Energy "*technical targets for fuel processors and fuel cells for stationary and automotive applications*", 2002
9. www.technalia.nl "*Amerikanen ontwikkelen brandstofcel op scheepsdiesel*", november 2004
10. persbericht EBU 2 juli 2004

6. WATERSTOFOPSLAG

6.1 Inleiding

In dit stuk worden de opslagmogelijkheden van waterstof besproken. Het doel van de opslag is om zoveel mogelijk waterstof op te slaan in een zo klein mogelijk volume. Dit is nodig, zeker als gerealiseerd wordt dat ondanks de zeer hoge gravimetrische energiedichtheid van waterstof, het volume van 1 kilogram waterstof bij kamertemperatuur en atmosferische druk ongeveer 11 m³ meter bedraagt. Daarnaast is het belangrijk dat de snelheid en het gemak waarmee het gas kan worden opgeslagen en opgenomen hoog zijn. Er zijn veel verschillende technieken die de revue gepasseerd in de laatste decennia. Een overzicht van een aantal hiervan is weergegeven in Figuur 3. In deze figuur staat de gravimetrische energiedichtheid uitgezet tegen de volumetrische energiedichtheid.



Figuur 3 *Volumetrische en gravimetrische energiedichtheden van verschillende opslagtechnieken [1]*

Voor de toepassing in vervoer en stationair wordt op dit moment eigenlijk het meeste verwacht van een drietal technieken, te weten:

- Hoge druk opslag;
- vloeibare opslag;
- metaalhydriden

Uit figuur 1 is duidelijk te zien dat voor het opslaan van waterstof onder hoge druk een relatief groot volume en een laag gewicht nodig is. In het geval van metaalhydriden ligt deze verhouding andersom. Een relatief grote hoeveelheid waterstof kan worden opgeslagen in een klein volume, alleen gaat dit gepaard met een relatief groot gewicht.

In het vervolg van dit stuk, zal de aandacht voornamelijk worden gericht op de drie eerder genoemde opslagtechnieken. Daarnaast zal een kort overzicht worden gegeven van enkele nieuwe technieken die een mogelijk aantrekkelijk alternatief kunnen vormen.

Algemene kengetallen

De technische doelstellingen die worden afgegeven door het Amerikaanse Department of Energy (US-DoE) vormen een belangrijke indicatie voor de ontwikkeling van opslagsystemen voor waterstof. Deze doelstellingen hebben met name betrekking op mobiele toepassingen, omdat hier een grotere uitdaging ligt (onder andere voor kosten en ruimte) dan voor stationaire systemen. De doelstellingen zijn weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 9 Technische doelstellingen van de DoE voor on-board waterstofopslag [9]

	Eenheid	2005 "huidig"	2010 "nieuw"	2015 "toekomstig"
Bruikbare specifieke energie uit H ₂	kWh/kg ¹ (kg H ₂ /kg)	1.5 (0.045)	2 (0.06)	3 (0.09)
Bruikbare energiedichtheid van H ₂	kWh/dm ³ (kgH ₂ /dm ³)	1.2 (0.036)	1.5 (0.045)	2.7 (0.081)
Systeemkosten	\$/kWeh net ² (\$/kg H ₂)	6 (200)	4 (133)	2 (67)
Werktemperatuur	°C	-20/50	-30/50	-40/60
Minimaal debiet	g/sec/kW	0.02	0.02 (FC) 0.027 (ICE)	0.02 (FC) 0.033 (ICE)
Minimale afleverdruk	Atm(abs)	2.5	2.5	2
Vulsnelheid	kg H ₂ /min	0.5	1.5	2
Max. H ₂ verlies	(g/hr)/kg H ₂ opgeslagen	1	0.1	0.05

¹ Over het algemeen wordt hier de totale massa (incl. H₂) gebruikt

² 2003 US\$; totale kosten zijn inclusief vervanging van componenten gedurende 15 jaar of 150.000 mile

6.2 Hoge druk opslag

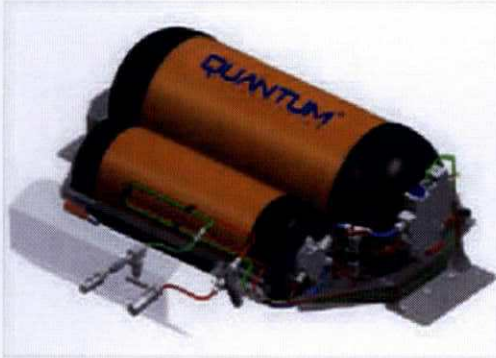
6.2.1 Beschrijving technologie

Het opslaan van waterstof onder druk is de meest eenvoudige vorm van opslag. De hoeveelheid waterstof die kan worden opgeslagen wordt met name bepaald door de opslagdruk van het vat. De optimale druk van het vat wordt dan ook bepaald door een afweging te maken tussen factoren als kosten, ruimte, veiligheid en volume. Met de huidige materialen (vezel versterkt aluminium en/of koolstoffiber op een polymeer) is het mogelijk om waterstof op te slaan bij een druk tussen de 200 en 600 bar. Het opslaan onder deze (zeer) hoge druk heeft als nadeel dat er veel veiligheidsaspecten meespelen. Voordelen van dit systeem zijn dat het een relatief eenvoudig systeem is, lichtgewicht, een bekende technologie en dat het relatief goedkoop is.

Om het gas op te slaan op de werkdruk moet de vuldruk die door de compressor wordt geleverd hoger zijn. Het Duitse bedrijf M-tec [2] geeft aan dat de overdruk ongeveer 25-70% hoger moet zijn. Hoekloos [3] werkt met een overdruk van 100 bar, te weten: 40% van de vuldruk (bij 250 bara). Waar ook rekening mee moet worden gehouden is dat er een minimale druk is voor de vaten (ongeveer 20 bara), waarmee wordt voorkomen dat er andere gassen de tank in kunnen stromen. De resterende hoeveelheid waterstof wordt ook wel het kussengas genoemd. In een Amerikaanse studie van S. Schoenung [4] wordt geschat dat het resterende gasvolume (bij grote vaten) ongeveer 40% bedraagt van de totale hoeveelheid.

Een inschatting van een tank voor de opslag van een grote hoeveelheid waterstof (niet voor transport) wordt gegeven door Amos [5]. De maximale hoeveelheid waterstof die opgeslagen kan worden in een bolvormige tank is 1240 kg. Dit komt overeen met ongeveer 14000 Nm^3 bij standaard temperatuur en druk. Afmetingen voor deze tank worden niet gegeven.

Voor de kleinere hoeveelheden worden normaliter cilinders gebruikt. De twee meest vooraanstaande bedrijven op dit gebied zijn Duitse Dynetek [6] en het Amerikaanse Quantum Technologies [7] (zie onderstaande figuur).



Voor de 'lagere drukken' (tot 250 bara) worden voor de opslag van waterstof op dit moment aardgascilinders gebruikt. Beide bedrijven zijn echter druk bezig om vaten te ontwikkelen die geschikt zijn voor (veel) hogere drukken. Momenteel zijn de 350 bara tanks gecertificeerd verkrijgbaar en zijn die van 700 - 800 bara in een verre staat van ontwikkeling.

Deze methode van opslaan is vooral geschikt in de binnenvaart, wanneer alleen het hulpvermogen voorzien moet worden van waterstof. Bij een grotere vermogensvraag wordt het opslagvolume te groot en

komt de actieradius in het geding [8].

Ontwikkelaars

Dynetek, Quantum, SCI-composites, Air Products

Kengetallen hoge druk opslag

Kengetallen voor de hoge druk opslag van waterstof zijn weergegeven in onderstaande tabellen.

Tabel 10 Kengetallen voor hoge druk opslag van waterstof [10]

	Eenheid	2005	2010	Status 2003 (Quantum)
Bruikbare specifieke energie uit H ₂	kWh/kg ⁽³⁾	1.5	2	1.9
Bruikbare energiedichtheid van H ₂	kWh/dm ³	1.2	1.5	1.3
Systeemkosten	\$/kWh net	6	4	114
Minimale afleverdruk	Atm(abs)	2.5	2.5	2
Vulsnelheid	kg H ₂ /min	0.5	1.5	1
Vuldruk	bara	700	?	350 (certified) 700 (R&D)
Max. H ₂ verlies	(g/hr)/kg H ₂ opgeslagen	1	0.1	0.0005

Tabel 11 Rendementen voor hoge druk opslag van waterstof [7]

Opslagdruk k [bara]	Gewichtfractie H ₂ versus V _{totaal} [kg H ₂ /m ³]	Gewichtfractie H ₂ versus M _{totaal} [kg H ₂ /kg _{tot}]	Status
350	22.6	8.5 (gecertificeerd) 13.36 (niet gecertificeerd)	nieuw
700	37.04	7.6	toekomstig

³ Over het algemeen wordt hier de totale massa (incl. H₂) gebruikt

6.2.2 Bewezen

Er is wat betreft de opslag van waterstof onder druk veel kennis aanwezig. De techniek is redelijk uitontwikkeld tot een druk van ongeveer 200-250 bara. Voor kleine hoeveelheden worden gascilinders geleverd tot een druk van 250 bar. Grotere hoeveelheden (tot ongeveer 1250 kg waterstof) worden opgeslagen in bolvormige vaten.

6.2.3 Nieuw

De nieuwe ontwikkelingen rondom de hoge druk opslag zullen zich met name richten op het vergroten van de hoeveelheid waterstof in een kleiner volume. Dit kan alleen gerealiseerd worden door te streven naar hogere drukken en sterkere materialen om deze drukken vast te houden. Gecertificeerde vaten die geschikt zijn voor de opslag van waterstof tot 350 bara zijn momenteel op beperkte schaal verkrijgbaar.

6.2.4 Toekomst

Voortbordurend op de nieuwe ontwikkelingen zullen de toekomstige ontwikkelingen zich met name richten op het nog verder vergroten van de hoeveelheid waterstof in een kleiner volume. Drukken van 700 bar zijn in ontwikkeling. De opslagdichtheid en brandstofdichtheid zijn dan vergelijkbaar met die van vloeibare waterstof.

6.3 Vloeibare opslag

6.3.1 Beschrijving technologie

Waterstof opslaan in de vloeibare vorm heeft het voordeel dat er een grote volumereductie wordt behaald in vergelijking met hoge druk opslag. Bij deze manier van opslag gaan de grootste verliezen echter gepaard bij het liquefactieproces van waterstof (circa 30% van de energie-inhoud van waterstof). Daarnaast zijn er nog de veel kleinere verdampingsverliezen. Om de verliezen zo veel mogelijk te beperken worden geïsoleerde cilindrische of bolvormige tanks gebruikt vanwege hun grote volume tot oppervlakte verhouding. Hoewel de vaten op lage druk werken, zijn de kapitaalkosten vanwege de isolatie hoger dan van de hoge druk vaten.

Met betrekking tot de toepassing in schepen, zou deze opslagmethode een optie kunnen zijn. Vanwege de relatief hoge energiedichtheid zou plaatsing in het schip minder ruimte in beslag nemen.

Ontwikkelaars

Daimler Chrysler A.G., Linde A.G.

Kentallen vloeibare opslag

In Tabel 12 staan een aantal kengetallen voor vloeibare waterstofopslag. Zoals blijkt uit de tabel zijn de investeringskosten en verdampingsverliezen sterk afhankelijk van de grootte van de opslag.

Tabel 12 *Kentallen voor vloeibare waterstofopslag [4, 11]*

	Eenheid	2004
Verdampingsverliezen		
[4]	%/dag	2 - 3
draagbare vaten	%/dag	0.4
$V_{\text{vat}} = 50 \text{ m}^3$	%/dag	0.2
$V_{\text{vat}} = 100 \text{ m}^3$	%/dag	0.06
$V_{\text{vat}} = 20.000 \text{ m}^3$		
Investeringskosten [4]		
Tank	\$/kg	37 - 850
Liquefactie-eenheid	\$(kg/hr)	31000 - 141000
Vermogensvraag		
Liquefactie-eenheid	kWh/kg	8 - 15
Volumetrische dichtheid	kg H ₂ /m ³	70.8
Opslagtemperatuur	°C	-252
Opslagdruk	bara	1

6.3.2 Bewezen

De technologie wordt vooral op industriële schaal groot toegepast en er is veel expertise aanwezig. Voor toepassing op schepen is deze technologie dan ook nu al interessant. Met name vanwege de relatief hoge energiedichtheid in vergelijking tot de andere opties.

6.3.3 Nieuw

De nieuwe ontwikkelingen rondom de vloeibare opslag zullen zich met name richten op het verbeteren van de isolatie rondom de opslagtank.

6.3.4 Toekomst

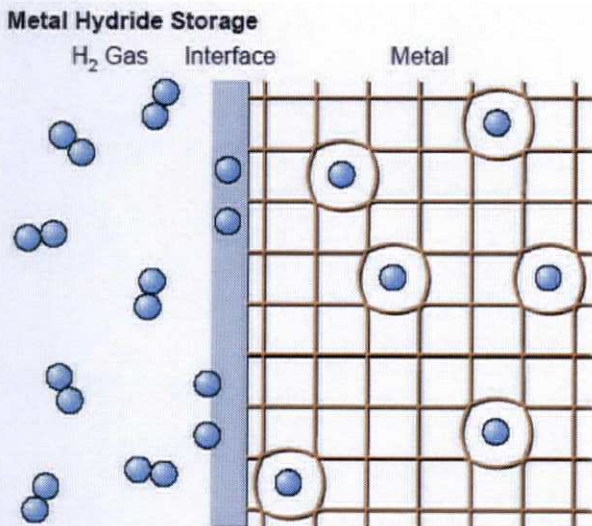
De toekomstige ontwikkelingen rondom de vloeibare opslag zullen zich met name richten op het verbeteren van de isolatie rondom de opslagtank.

6.4 Metaalhydride-opslag

6.4.1 Beschrijving technologie

Metaalhydriden zijn metalen of legeringen waarin waterstof chemisch gebonden is aan een metaalatoom. Wanneer waterstofmoleculen in contact komen met het oppervlak van de legering van de metaalhydride, dan wordt deze gesplitst in atomair waterstof en gebonden aan de legering. De concentratie van de atomaire waterstof zal toenemen, wanneer de druk in het systeem toeneemt totdat de zogenaamde plateaudruk wordt bereikt. Op dit punt wordt de atomaire waterstof omgezet in een hydride, met als gevolg dat de druk niet langer toeneemt. Pas wanneer de hydrides het volledige opslagvolume bezetten zal de druk verder stijgen. De ligging van de plateaudruk is temperatuursafhankelijk.

Naast de verandering van druk wordt bij het absorptieproces warmte afgegeven. Voor de desorptie van waterstof is dan ook de toevoeging van warmte nodig om weer waterstof te krijgen. Een schematische weergave staat in Figuur 4.



Figuur 4 Opslag van waterstof in een metaal [1]

De kinetiek voor waterstofopname en -afgifte is over het algemeen goed. Ter bevordering van waterstofopname en -afgifte is het metaal of de legering in poedervorm aanwezig. De beperkende factor vormt de warmteoverdracht.

Hydridevormende legeringen zijn gewoonlijk combinaties van een waterstofopnemend metaal (La, Ti, Zr, Mg en Ca) en een niet waterstofopnemend metaal (Fe, Ni, Mn en Co). Voorbeelden zijn Fe-Ti, La-Ni, Mg-Ni en Ti-Zr-V hydriden. Hydriden wordt gewoonlijk verdeeld in lage temperatuur- en hoge temperatuur hydriden, afhankelijk van de desorptietemperatuur. Voor lage temperatuur hydriden ligt deze tussen 20 en 90 °C, voor hoge temperatuur hydriden tussen 150 en 300 °C. In lage-temperatuur hydriden is waterstof doorgaans covalent gebonden aan het metaal, in hoge-temperatuur hydriden is waterstof ionair gebonden.

Hoewel hoge volumetrische H₂ dichtheden kunnen worden bereikt, zelfs hoger dan in vloeibaar waterstof, is de gravimetrische H₂ dichtheid laag. Beide worden met ongeveer 15 tot 20% gereduceerd in een voor een auto gemaakt systeem vanwege de omhullende tank. De totale hoeveelheid waterstof die kan worden geabsorbeerd ligt in de orde van 1 a 2 gew% van het totale tankgewicht.

De constructie van een op een metaalhydride gebaseerd opslagsysteem stelt hoge eisen. Het vat moet op druk kunnen worden gebracht, de warmte-uitwisseling tussen vat en metaalhydride moet goed zijn en de metaalhydride moet veel beladings- en ontladingscycli kunnen weerstaan. Een belangrijke parameter voor de levensduur van metaalhydriden is de

zuiverheid van de waterstof. Metaalhydriden absorberen niet alleen waterstof maar ook de onzuiverheden die het gas met zich mee brengt. Deze onzuiverheden blijven bij de waterstofdesorptie vaak aan de metaalhydride zitten en beperken zo de levensduur.

Ontwikkelaars

Energy Conversion Devices Inc. (ECD, .Troy, IL, USA), Los Alamos National Laboratory (NM, USA), Ovonic/Texaco, Mazda, Toyota, General Motor's Technical Center (Warren, MI, USA), Universiteit van Freiburg (Zwitserland), Universiteit van Kogakuin (Japan), HDW (Duitsland)

Tabel 13 *Kentallen voor opslag in metaalhydriden*

	Eenheid	2004	2010
	d		0
Gravimetrische dichtheid	gew%	< 18	
Volumetrische dichtheid	kg H ₂ /m ³	150	225
Temperatuur	°C	> 100	
Druk	bara	1	
Investeringskosten	\$/kg	980 - 72000	
Koel/warmtevraag	kJ/kg H ₂	9300 - 18600	

6.4.2 Bewezen

De technologie verkeert nog in onderzoeksfase. Voor laboratoriumschaal zijn er echter wel kleine tanks beschikbaar. Echter het gewichtspercentage waterstof is nog te beperkt voor grootschalige toepassing.

6.4.3 Nieuw

De nieuwe ontwikkelingen rondom de opslag in metaalhydriden richten zich met name op het verbeteren van de materialen en materiaalkeuze om zo een groter gewichtspercentage waterstof op te kunnen slaan.

6.4.4 Toekomst

De nieuwe ontwikkelingen rondom de opslag in metaalhydriden richten zich met name op het verbeteren van de materialen en materiaalkeuze om zo een groter gewichtspercentage waterstof op te kunnen slaan.

6.5 Toekomstige technieken

Naast de besproken opslagtechnieken wordt er veel onderzoek gedaan om opslagmethoden te vinden die zoveel mogelijk de voordelen van de verschillende technologieën combineren. Zonder hier verder op in te gaan zal hieronder een kort overzicht worden gegeven van de meest belangrijke alternatieve technologieën. Dit zijn allemaal toekomstige technologieën:

Nanobuizen

Carbon nanotubes zijn microscopische koolstofbuizen die gebruikt kunnen worden voor de absorptie van waterstof. Ondanks verschillende claims in de literatuur zijn de onderzoeksresultaten tot op heden nog twijfelachtig en is het ook nog niet zeker of ze praktische voordelen zullen bieden [13]. Van de nanobuizen wordt verwacht dat ze waterstof kunnen opnemen in de orde grootte van 4.2 - 65% van hun eigen gewicht.

Glazen microbollen zijn kleine holle glazen bolletjes (0.03 to 0.05 mm diameter) die waterstof toestaan om 'binnen te komen' bij een temperatuur tussen de 200°C to 400°C. De waterstof wordt vastgehouden als de bolletjes worden gekoeld en wordt vervolgens bij verhitting weer vrijgelaten. Deze technologie is nog steeds in het ontwikkelingsstadium en de perspectieven zijn op dit moment nog niet duidelijk [13]. Kentallen voor deze opslagtechniek zijn nog niet echt generiek. Opslagdichtheid = 45 kg waterstof/m³ bolvolume.

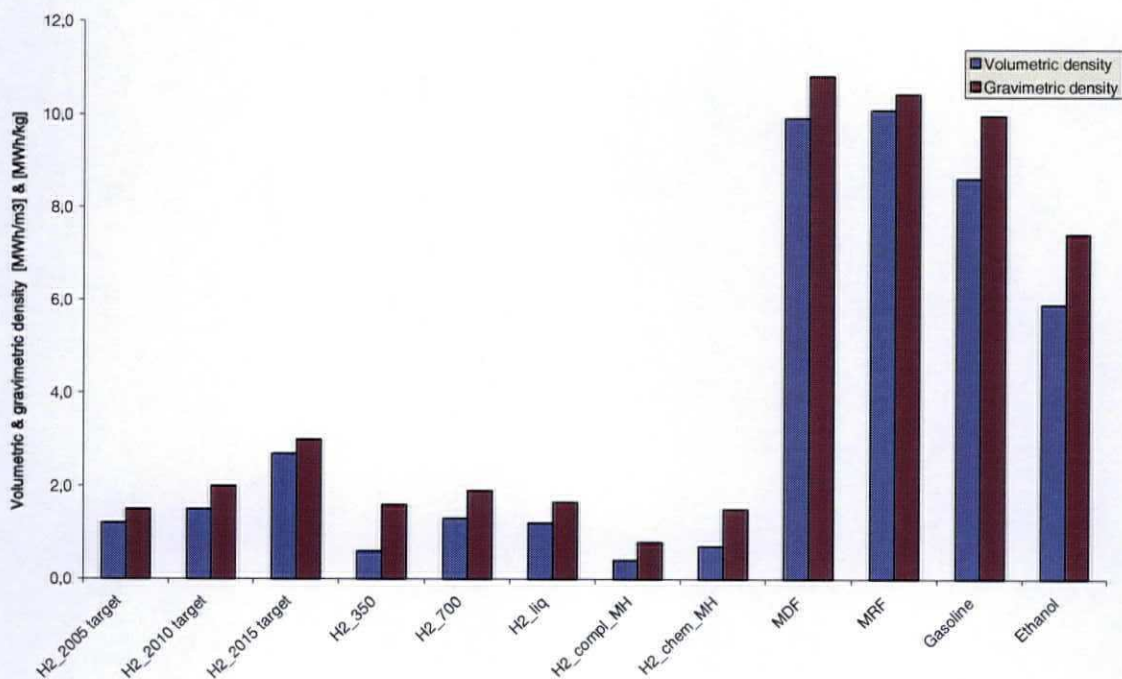
Daarnaast zijn er nog:

- + Ammoniak Waterstof kan worden opgeslagen in de vorm van ammoniak. Dissociatie kan door de ammoniak over een katalysator te leiden bij 700°C. (NH₃) kan op relatief lage druk (±17bara) opgeslagen worden, maar heeft als nadeel dat het een gevaarlijke stof is. Opslagdichtheid = 18 gew% waterstof.
- + Sponge iron ijzeroxide reageert met waterstof bij 1230°C waarbij water en ijzer wordt gevormd. Waterstof kan worden teruggewonnen door het ijzer met stoom te laten reageren bij 430°C - 630°C. De reactie is niet gevoelig voor koolstofmonoxide vergiftiging

Voor toepassing op schepen wordt deze technologie pas na een jaar of 10-15 interessant. Voor die tijd zijn deze opslagmethoden nog te veel in onderzoeksstadium.

6.6 Vergelijking specifiek vermogen en -volume

In Figuur 5 staat een overzicht van enkele van de opslagtechnieken die in dit stuk zijn besproken. Duidelijk is dat door de hoge energiedichtheid van de conventionele brandstoffen er per volume- en gewichtseenheid veel meer energie kan worden opgeslagen. Het voordeel zal voor de waterstofsysteemen dan ook vooral moeten zitten in het lagere energieverbruik dat van brandstofcelsystemen op puur waterstof wordt verwacht.



Figuur 5 Volumetrische en gravimetrische dichtheden van de verschillende opslagtechnieken (MDF: marine distillate fuel, MRF: marine residual fuel).

6.7 Literatuur

1. Pyle W., "Hydrogen Storage", Home Power edition 59, June/July 1997
2. M-tec, verkoopprospekt 2001, http://www.gastankstellen.de/9_prospe/prospek.htm
3. Hoekloos, filling station calculation, 2001
4. Schoenung S.; "IEA Hydrogen Annex 13, Transportation Applications Analysis: Interim Report", Longitude 122 West, March 2001
5. Amos W.; "Cost of Storing and Transporting Hydrogen", NREL, 1998, NREL/TP-570-25106
6. Dynetek Industries <http://www.dynetek.de>
7. Quantum Technologies worldwide <http://www.qttw.com>
8. Peeters B.J.G.M. "Toepassing van brandstofcellen in de binnenvaart, een schoon idee?", afstudeerrapport, ECN-7.2924-03-GR-01, april 2003
9. U.S. Department of Energy "Proceedings Workshop on compressed and liquefied hydrogen storage", 16 oktober 2002
10. Sirosh N. "Hydrogen composite tank project", DOE FY-2003 progress report, Quantum Fuel System Technologies Worldwide inc., 2003

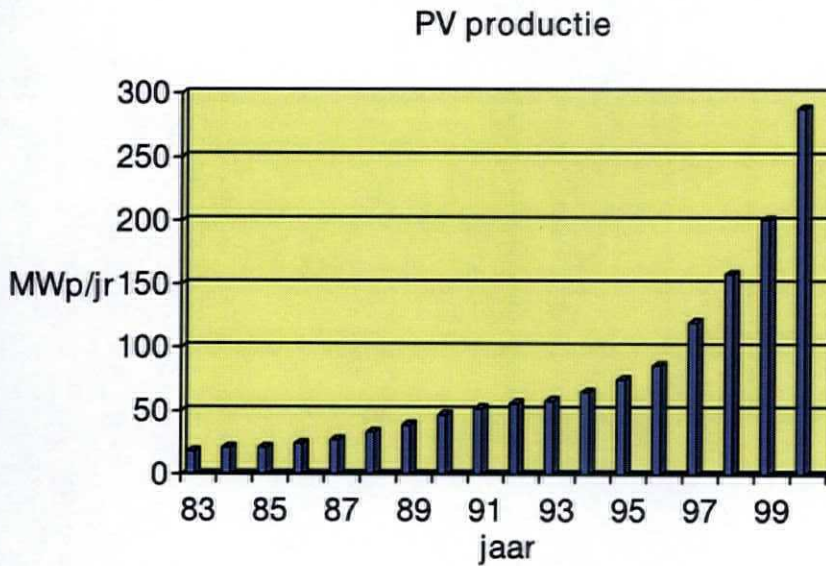
11. Züttel A. "*Materials for hydrogen storage*", *Materials today*, ISSN: 1369 7021, September 2003
12. website Texaco/ovonic: <http://www.ovonic.com>
13. California Energy commission, "*Projected automotive fuel cell use in California*", consultancy report, october 2001

7. FOTOVOLTAÏSCHE (PV) OMZETTING

Opm: dit stuk is eerder verschenen in het PBNA-Energiezakboek

7.1 Inleiding zonnecellen

Voor de directe omzetting van zonlicht in elektriciteit worden verschillende typen zonnecellen toegepast. De productie is sinds het begin van de jaren '80 sterk toegenomen (zie Figuur 6). De wereldproductie van PV modules in 2000 komt overeen met een elektrisch vermogen van bijna 300 150 Mega-watt-piek (MWp, piekvermogen).



Figuur 6 Wereldproductie van PV modules in de periode 1983-2000.

7.2 Toepassingen

PV systemen kunnen in twee categorieën onderverdeeld worden:

- autonome systemen met bijvoorbeeld een accu als opslag;
- netgekoppelde systemen waarbij het elektriciteitsnet als virtuele opslag dient.

Autonomen systemen worden toegepast in gebieden waar geen elektriciteitsnet aanwezig is (bijv. Solar Home Systems en zonnelantaarns in ontwikkelingslanden), telecommunicatie, verlichting, wegsignalering, consumentenelektronica (rekenmachines, horloges). Autonome systemen met accu-opslag hebben een typische grootte van 10 Wp tot 1 kWp.

Netgekoppelde systemen worden toegepast in de gebouwde omgeving (dakintegratie, gevels) en als PV centrales op de grond of bijvoorbeeld op geluidsschermen langs snelwegen. De grootte van deze systemen varieert van 100 Wp (daken) tot enige MWp (centrales).

Wereldwijd zijn er overheidsprogramma's voor een grootschalige introductie van PV. De Verenigde Staten heeft een 'Miljoen Zonnedaken in 2010' programma, Duitsland 100.000 daken in 2005 en Nederland wil in 2010 250 MWp geïnstalleerd vermogen hebben. Deze programma's worden uitgevoerd door o.a. de overheid (landelijk en lokaal), PV-producenten, bouwondernemingen en kennisinstituten.

Op dit moment is elektriciteit uit PV nog duurder dan elektriciteit uit het net, maar PV kan al wel concurreren in autonome toepassingen. De benodigde investering (turn-key) voor netgekoppelde systemen is ruwweg 5–10€/Wp en voor autonome systemen 7–20€/Wp (inclusief randapparatuur als verlichting en opslag). Het bedrag is sterk afhankelijk van de grootte en van de toepassing. Voor een levensduur van ongeveer 20 jaar komen deze kosten overeen met 0.55–1.35€ per kW h. Er zijn volop mogelijkheden om de kosten van PV aanzienlijk te reduceren. Dit kan bereikt worden door:

- implementatie van goedkopere en snellere productietechnieken;
- gebruik van goedkopere en/of minder uitgangsmaterialen;
- verhoging van het omzettingsrendement met als doel kostenreductie;
- schaalvergroting (economy-of-scale, economy-of-volume).

Op de lange termijn (>2020) zouden bij grootschalige productie de commerciële prijzen voor modules gedaald kunnen zijn tot 0.5€/Wp. Voor een totaal PV systeem zou dit minder dan 1 €/Wp zijn.

7.3 Huidige status

In Tabel 14 staat een overzicht van de op dit moment meest belangrijke PV technologieën. In 2000 was het aandeel sc-Si in de wereldproductie 37%, van mc-Si 48% en van a-Si 10%. De eerste twee technieken maken gebruik van wafers (plakken met een dikte van 250-500 µm) terwijl a-Si(/Ge) een dunne film (µm schaal) technologie is.

Tabel 14 *Overzicht van de belangrijkste PV technologieën*

Technologie	Symbool	Record rendement in laboratorium (%)	Typisch rendement in productie (%)
Monokristallijn silicium	sc-Si	24	13-16
multikristallijn silicium	mc-Si	20	12-14
amorf silicium (inclusief silicium-germanium tandemcellen)	a-Si(/Ge)	13	6-9 (gestabiliseerd)

De opbouw en de werking van een kristallijn-silicium zonnecel zijn schematisch weergegeven in Figuur 7. De zonnecel bestaat uit twee soorten silicium, zogenaamd p gedoteerd (de basis) en een dunne laag n gedoteerd (de emitter). De zonnecel is daarmee in feite een diode. Bovenop is een anti-reflectielaag aangebracht om de reflectie van licht te reduceren. Door aan beide zijden metallisatie aan te brengen kan de door licht gegenereerde stroom afgevoerd worden.

Indien licht (een foton) geabsorbeerd wordt, ontstaat een zogenaamd elektron-gat paar. Het elektron beweegt zich vervolgens willekeurig door de basis. Indien het bij de overgang tussen de basis en de emitter (pn-overgang) komt, wordt het naar de emitter 'gezogen'. Hierdoor wordt het elektron-gat paar ruimtelijk gescheiden. Door deze ladingscheiding ontstaat een spanning over de cel en kan deze elektrische energie leveren.

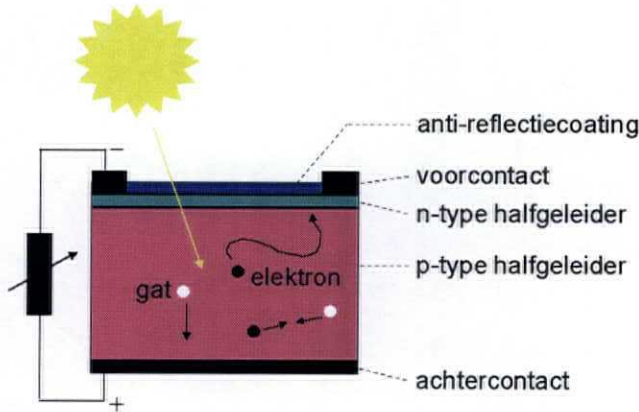
Voor zonnecellen zijn de volgende verliesposten.

1. Het gegenereerde elektron bereikt de emitter niet maar 'smelt' weer samen met een gat (recombinatie). Er ontstaat warmte en er treedt geen ladingscheiding op. Recombinatie treedt in het volume van het materiaal en aan de oppervlakken op.
2. Licht wordt aan het oppervlak van de cel gereflecteerd. Dit reduceert de gegenereerde stroom.
3. Er zijn weerstandsverliezen over de cel. Hierbij moet gedacht worden aan weerstandsverliezen in het metaal en over de contacten tussen silicium en metaal. Verder zijn er lekstromen (paden van kortsluiting) rond de pn-overgang. Deze weerstandsverliezen reduceren de output van de cel.
4. Een deel van het licht (foton) heeft meer energie (bijvoorbeeld blauw, ultraviolet) dan strikt nodig is voor de vorming van een elektron-gat paar. Deze extra energie wordt omgezet in warmte. Ook kan het foton te weinig energie hebben om een elektron-gat paar te creëren

(infrarood). Het wordt dan niet geabsorbeerd. Deze verliezen heten kleurmismatch-verliezen en zijn voor ieder materiaal anders.

5. De zonnecel gedraagt zich als een niet-ideale diode. Ook dit resulteert in verliezen.

Door de bovengenoemde verliezen te beperken of zelfs te voorkomen kan het rendement van de zonnecel verhoogd worden.



Figuur 7 Schematische weergave van een kristallijn-silicium zonnecel.

7.4 Nieuwe technologieën

In Tabel 15 zijn nieuwe ontwikkelingen samengevat. Dit zijn dunne-film technologieën en zij bevinden zich in de R&D fase of zijn in proefproductie genomen. Een voordeel van dunne-film cellen is dat het materiaalgebruik ten opzichte van de wafer-type zonnecellen veel minder is. Een onderzoeksonderwerp bij CdTe en CIGS modules is het gebruik van het zware metaal Cd. Ondanks dat de hoeveelheid die gebruikt wordt binnen de toegestane grenzen ligt, wordt veel onderzoek verricht om Cd te elimineren of volledig te hergebruiken aan het einde van de levensduur van de module.

Tabel 15 Overzicht van de belangrijkste nieuwe PV technologieën

Technologie	Symbol	Record rendement in laboratorium (%)	Typisch rendement in proefproductie (%)
film-silicium	f-Si	17	8-11
koper-indium/gallium-diselenide	CIGS	18	8-10
cadmium telluride	CdTe	16	7-9
Organische zonnecellen (zie 9.4)	---	11	---

Welke technologie in de verre toekomst uiteindelijk de winnaar zal zijn, is niet te zeggen. Algemeen wordt verondersteld dat dunne-film zonnecellen de beste vooruitzichten hebben. Kristallijn-Si wafer-technologie heeft echter nog grote mogelijkheden met betrekking tot kostenreductie door massa-productie en rendementsverbetering. Het is daarom waarschijnlijk dat voorlopig verschillende soorten modules naast elkaar zullen worden gebruikt, in het brede spectrum aan toepassingen dat ontstaat.

7.5 Kentallen zonnecel(systemen)

Tabel 16 *Overzicht van de belangrijkste kentallen voor zonnecellen en -systemen*

Periode	Jaar	0	5	10
Specifiek oppervlak	Wpiek/m ²	100 - 120		150 - 210
Specifiek vermogen	Wpiek/g	63 - 70		94 - 131
Jaarlijkse opbrengst				
Nederland (gem.)	kWh/m ²	80 - 100		135 - 189
	kWh/kWpiek	0.8		0.9
Sahara (gem.)	kWh/m ²	200		350
	kWh/kWpiek	2		2.3
Rendement	%	11 - 14		17 - 19
Footprint	m ² /W	0.008 - 0.01		0.007 - 0.005
Investeringskosten	€/kWpiek	6	4	3
Levensduur	jaar	20		30
Ontwikkelingsstadium		nieuw		

7.6 Een vertaalslag naar sloopstoeppassingen

Voor de haalbaarheid en toepasbaarheid van een nieuwe technologie is het handig om een beeld te krijgen van de ruimte en volume dat het inneemt op een schip. In dit hoofdstuk wordt een dergelijke vertaalslag besproken voor de eerder zonneceltechnologie.

Zonnecellen voor schepen

In het stuk van de fotovoltaïsche omzetting werd in tabel 3 een aantal kentallen gegeven voor het maximaal op te wekken vermogen bij zonnecellen per vierkante meter oppervlak. Voor de huidige stand van de technologie ligt deze waarde ongeveer op 110 Wpiek/m². De verwachting is dat deze waarde de komende tien jaar zal stijgen naar ongeveer 180 Wpiek/m². Voor de verdere vertaalslag wordt aangenomen dat het gemiddeld opgewekt vermogen ongeveer op 80% van het piekvermogen ligt.

Wat is de bijdrage van zonnecellen aan het totale geïnstalleerde vermogen van een grote tanker als het volledige dek uitgerust mag worden met zonnecellen?

Aannames:

- Afmetingen (lengte x breedte) : 350 meter bij 60 meter
 Oppervlak : Aschip = f x lengte x breedte (waarin f een correctiefactor is voor de afwijking van het dekoppervlak van de rechthoek)
 Correctiefactor f : 0,8

Berekening:

Huidige technologie

$$\text{Opgewekt vermogen } P_{\text{opgewekt}} = 0,8 \times 110 \text{ Wpiek/m}^2 \times 0,8 \times 350 \text{ meter} \times 60 \text{ meter} \\ = 1,4 \text{ MWe}$$

Toekomstige technologie (over 10 jaar)

$$\text{Opgewekt vermogen } P_{\text{opgewekt}} = 0,8 \times 180 \text{ Wpiek/m}^2 \times 0,8 \times 350 \text{ meter} \times 60 \text{ meter} \\ = 2,4 \text{ MWe}$$

Het geïnstalleerd vermogen van een tanker ligt ongeveer op 16 tot 17 MWe. Met bovenstaande resultaten betekent dit dat slechts 9% (nu) en 15% (10 jaar) van dit vermogen gedekt zou kunnen worden met zonnecellen.

De toepassing van zonnecellen op schepen voor het dekken van de gehele energievraag aan boord is dan ook niet echt een optie.

8. VERGELIJKING PRIME MOVERS

Om een indicatie te krijgen van de prime movers, is het interessant om een vergelijking te maken tussen de besproken opties. Een goede manier daarvoor is het bepalen van de benodigde hoeveelheid opslagvolume, -massa en brandstof die nodig is om 1 kWh aan elektriciteit te produceren. Uitgangspunten daarbij vormen de kentallen die in dit hoofdstuk "Prime movers" zijn besproken. In de volgende vergelijking worden zonnecellen niet meegenomen op basis van de argumentatie in de voorgaande paragraaf.

De volgende systemen worden vergeleken:

Nr.	Brandstof	Conversiestap 1	Conversiestap 2	Output
1.	Diesel/HFO	→ ICE langzaam 2 takt	→ Generator	→ Elektriciteit
2.	Diesel/MDF	→ ICE middel 4 takt	→ Generator	→ Elektriciteit
3.	Diesel/MDF	→ ICE snel 4 takt	→ Generator	→ Elektriciteit
4.	Diesel/MDF	→ gasturbine simple cycle	→	→ Elektriciteit
5.	Diesel/MDF	→ gasturbine combined cycle	→	→ Elektriciteit
6.	Low sulphur diesel	→ Reformer	→ PEMFC-LTM	→ Elektriciteit
7.	Low sulphur diesel	→ Reformer	→ PEMFC-HTM	→ Elektriciteit
8.	Low sulphur diesel	→ Reformer	→ MCFC	→ Elektriciteit
9.	Low sulphur diesel	→ Reformer	→ MCFC-GT	→ Elektriciteit
10.	Low sulphur diesel	→ Reformer	→ SOFC	→ Elektriciteit
11.	Low sulphur diesel	→ Reformer	→ SOFC-GT	→ Elektriciteit

Samen met de kentallen die gegeven zijn in Figuur 5 kunnen dan de volgende parameters worden bepaald:

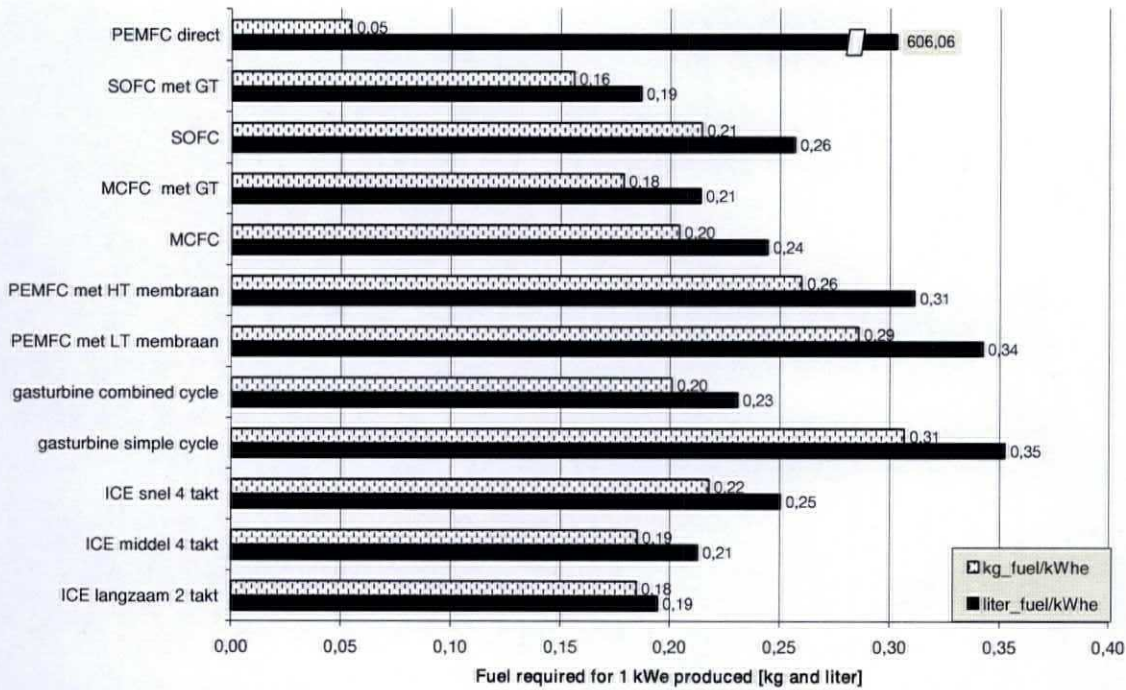
- Energie-input nodig om 1 kWh aan elektriciteit te produceren
- Benodigde brandstofhoeveelheid (volume, gewicht)
- Benadering van het totale rendement

In Tabel 17 staan de gebruikte gemiddelde kentallen voor de vergelijking. De getallen zijn hier zuiver indicatief en van toepassing op de zogenaamde *Tank To Screw* keten. Met dit laatste wordt bedoeld dat de energieverliezen die met de productie van de brandstof gepaard gaan niet zijn meegenomen (*Well to Tank*), maar alleen de verliezen in het schip (van brandstof naar elektriciteit). Latere simulaties met het simulatieprogramma GES van TNO laten een duidelijker beeld zien van de energieketen onder invloed van een gegeven vaar-en/of energieprofiel.

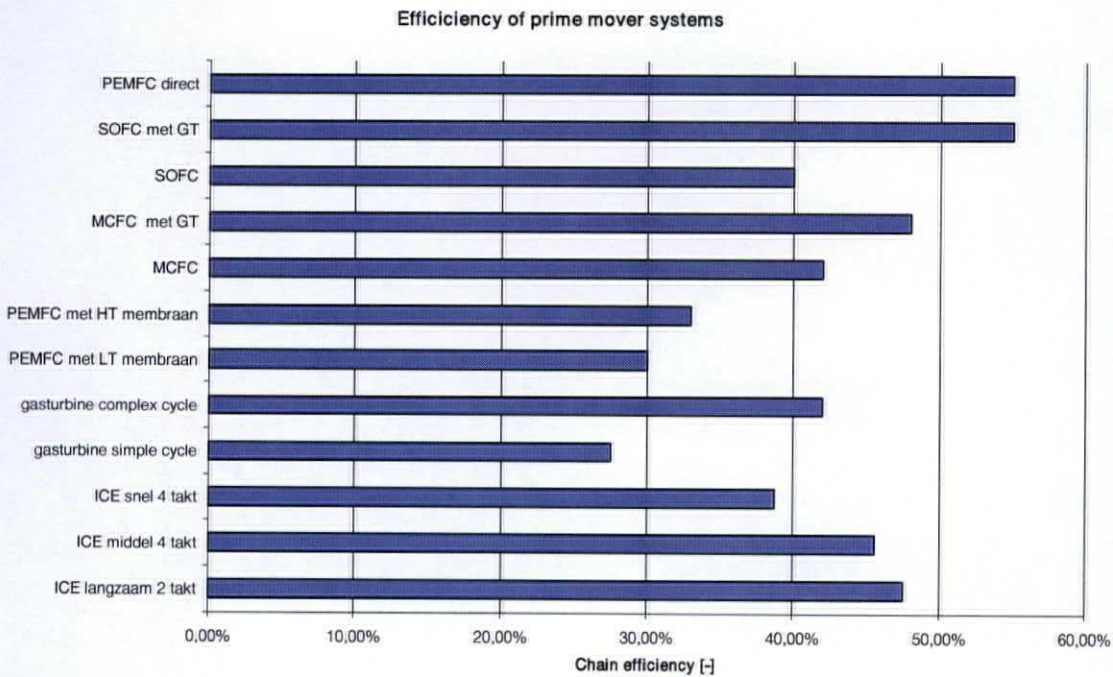
Tabel 17 *Gemiddelde rendementskentallen voor vergelijking ketens*

Prime mover	Rendement	Prime mover	Rendement
ICE langzaam 2 takt	48.5%	Reformer + LT-PEMFC	30%
ICE middel 4 takt	46.5%	Reformer + HT-PEMFC	33%
ICE snel 4 takt	39.5%	Reformer + MCFC	42%
Generator	98.0%	Reformer + MCFC-GT	48%
gasturbine simple cycle	27.5%	Reformer + SOFC	40%
gasturbine complex cycle	42.0%	Reformer + SOFC-GT	55%
		LT-PEMFC op waterstof	55%

Op basis van deze kentallen kunnen de volgende grafieken worden gegenereerd:



Figuur 8 *Overzicht vereiste brandstofcapaciteit (volume en massa) om 1 kWh aan elektrisch vermogen te produceren*



Figuur 9 *Overzicht rendementen van diverse prime mover ketens*
 Met in het achterhoofd de gemaakte aannames voor de getallen die in Figuur 8 en Figuur 9 staan weergegeven kunnen wel een aantal grove conclusies worden getrokken.

- Brandstofcel-gasturbine combinaties gunstig

Duidelijk is dat op basis van het totale *Tank to Screw* rendement, de brandstofcellen (MCFC-GT; SOFC-GT) de concurrentie aan kunnen gaan met de reeds bestaande dieselmotoren (middelsnelle 4 takt en langzame 2 takt). Ook wat betreft de hoeveelheid brandstof die nodig is om 1 kWh_e te produceren steken de genoemde systemen gunstig af ten opzichte van de dieselmotoren. Opgemerkt moet worden dat de gasturbine-brandstofcelcombinaties alleen interessant zijn bij grotere vermogens in verband met beschikbaarheid van de turbines. Vanuit die optiek kunnen ze dus geschikt zijn voor toepassing op schepen.

- Toepassing brandstofcellen op direct waterstof

Het direct meenemen van waterstof aan boord heeft een gunstige invloed op het systeemrendement van een lage temperatuur PEMFC. Daarnaast is dit systeem vanwege de hoge energiedichtheid per eenheid gewicht ook een interessante optie. Een nadeel is echter de lage dichtheid van het gas, waardoor het volume automatisch erg groot gaat worden. Opslagtechnieken kunnen hier wel iets aan veranderen, maar de volumetrische energiedichtheid van diesel blijft een stuk hoger. Dit wil overigens niet betekenen dat deze basis geen goede is voor scheepstoepassingen! Met name nichemarkten als ponten en rondvaartboten zullen zeer geschikt zijn voor dit soort systemen. De emissies zijn namelijk afwezig en het zijn schepen die regelmatig (dagelijks) in de haven terugkeren, waar de mogelijkheid bestaat om te tanken.

- Toepassing brandstofcellen op schepen

Uit de figuren kan worden geoordeeld dat brandstofcellen moeilijk tegen de huidige dieselmotoren kunnen concurreren. Toch moeten hier enige nuances in worden aangebracht. Een schip vaart in het algemeen lange afstanden op een vrijwel constant vermogen. De dieselmotor zal dan ook zo worden afgesteld dat in dat punt zijn maximale rendement wordt bereikt. Buiten dit werkpunt zal het rendement snel afnemen. Bij brandstofcellen is in principe het rendement een stuk constanter dan bij de dieselmotor en zal derhalve in veel mindere mate last hebben van rendementsverlies. Omdat de maximale rendementen van de dieselmotor en brandstofcel(systeem) niet veel van elkaar verschillen, zal op basis van een relatief constant vaarpatroon een brandstofcel daarom ook niet veel winst behalen. Dit geldt alleen voor het rendement en CO₂ emissie. Er zijn echter wel een aantal zeer belangrijke redenen waarom een brandstofcel wel voordeel biedt ten opzichte van een dieselmotor:

1. Sterke reductie schadelijke emissies (met name NO_x, SO₂ en fijn stof) en broeikasgasemissies (als methaan).
2. Sterke reductie van de geluidsproductie. Dit heeft een sterk positief effect op het leef- en werkcomfort op schepen. Daarnaast zijn bijvoorbeeld binnenvaartschepen niet meer afhankelijk van de aanwezigheid van walstroom (eigen productie met draaiende dieselmotoren mag niet in bevolkte omgevingen vanwege o.a. geluidsoverlast).
3. Emissiereductie door invulling hotellastfunctie. Rendementsvoordelen worden met brandstofcellen met name gehaald bij systemen die een sterk dynamisch gedrag vertonen (snelle wisseling van energievraag en -aanbod). Dit onder andere vanwege het hogere deellastrendement van een brandstofcel.
4. Ruimtewinning. Door het sterk modulaire karakter van brandstofcellen is plaatsing op vrijwel elke gewenste plaats in het schip mogelijk.

9. INFORMATIEBRONNEN

- Design of Propulsion and electric power generation systems, H. Klein Woud, D. Stapersma, IMarEST, ISBN 1-902536-47-9
- Diesel Engines, lecture notes by Prof. D. Stapersma (wb4408)
 - Vol 1: Performance analysis
 - Vol 2:
 - Vol 3: Combustion
 - Vol 4: Emission and Heat transfer
- Machine-installaties voor snelle geavanceerde vaartuigen, collegediktaat D. Stapersma (MT 113)
- FC-Ship EU project
- Diesel & Gas Turbine worldwide catalog
- Fuel Cell Systems Explained, James Larminie, Andrew Dicks
- Fuel Cell Systems, Leo Blomen, Mugerwa
- Fuel Cell Handbook, 2002
- Fuel Cell Today, www.fuelcelltoday.com
- Fuel Processing; DESIRE
- Promotieonderzoek Isaac Barendregt: dieselreforming
- Emissie-eisen: IMO
- Veiligheid klassebureaus: Germanischer Lloyd
- Greet database voor well-to-wheel analyses, Argonne National Laboratories. www.argonne.com(?)
- Application of Fuel Cells in Surface Ships. Rolls-Royce Strategic Systems Engineering. ETSU F/03/00207/REP.
- Siemens website: www.siemens.com
- Fuel Cell energy website: www.fce.com

OPWEKKING EN AANDRIJVING

BIJLAGE D2

AES-Nieuwe Technologie

Teamleden: Paul Bracké (Bakker Sliedrecht) en Daniël Vree (Koninklijke Marine)

INHOUDSOPGAVE

1.	GENERATOREN	1
1.1	Synchrone generatoren	1
1.1.1	Conventionele synchrone generatoren	1
1.1.2	Nieuwe types synchrone generatoren	1
1.2	Asynchrone generatoren	3
1.3	Gelijkstroom generatoren	3
2.	AANDRIJVING	4
2.1	Asynchrone motoren	4
2.2	Synchrone motoren	4
2.3	Gelijkstroommotoren	5
2.3.1	Conventioneel	5
2.3.2	Switched Reluctance Motor	6
3.	CONVERSIE TEN BEHOEVE VAN AANDRIJVING VOORSTUWERS	7
3.1	Spanningsbron converters:	7
3.2	Cycloconverters:	8
3.3	Stroombron inverters:	8
3.4	Thyristor anker regelaars:	8
3.5	Matrix converters:	8

1. GENERATOREN

Voor het opwekken van elektrische energie uit mechanische energie, geleverd door een diesel motor, gasturbine of andere prime mover moet gebruikt gemaakt worden van een roterende generator (eng: alternator) waarbij eventueel via een tandwielkast het toerental aan de generator aangepast moet worden.

De op dit moment meest toegepaste generator is de synchrone generator. Andere types generatoren die eventueel toegepast zouden kunnen worden zijn asynchrone generatoren, gelijkstroom generatoren en homopolaire generatoren. In tabel 1. en 2. zijn kengetallen van enige nieuwe types generatoren opgenomen. In tabel 7 is een overzicht gegeven van de ontwikkelingsstatus van verschillende technologieën.

1.1 Synchrone generatoren

1.1.1 Conventionele synchrone generatoren

Er is een aantal soorten conventionele synchrone generatoren beschikbaar. Ten eerste zijn er langzaam draaiende synchrone generatoren die door diesel motoren direct kunnen worden aangedreven. Dit zijn vier of hoger polige synchrone generatoren. Daarnaast zijn er twee polige generatoren die derhalve op 3000 rpm (50 Hz) of 3600 rpm (60 Hz) draaien en direct aangedreven worden door gasturbines. In bepaalde gevallen zijn er door gasturbines aangedreven generatoren met een toerental \gg 3600 rpm ontworpen. Dit zijn tot op heden echter speciaal voor één oplossing ontworpen generatoren.

In principe is bij elke diesel een passende generator te vinden, maar bij grotere vermogens kunnen dieselmotoren t.o.v. het schip te groot en te zwaar worden en worden door de lage toerentallen ook de generatoren groter en zwaarder. Daarom kan in bepaalde gevallen gekozen worden voor een gasturbine als prime mover.

Een gasturbine generator combinatie heeft een veel grotere energie dichtheid (minder volume en gewicht bij het zelfde vermogen), maar het rendement is veel slechter.

Bij elke gasturbine is een passende generator beschikbaar.

Praktijkvoorbeelden van gasturbine generator sets zijn te vinden in grote cruise schepen (Queen Mary 2) en nieuwe marine schepen (type 45 destroyer van Britse marine). Siemens biedt bijvoorbeeld een combined cycle power plant aan als alternatief voor een dieselgenerator. Als voordelen worden genoemd: meer ruimte, minder uitstoot en meer flexibiliteit in de bedrijfsvoering.

Bewezen techniek:	geen beperkingen; vermogens beschikbaar voor elke prime mover
Nieuwe techniek	geen
Toekomst:	ongewijzigd

1.1.2 Nieuwe types synchrone generatoren

Er is op dit moment een ontwikkeling gaande op het gebied van nieuwe types synchrone generatoren. De nieuwe technologieën die daaraan ten grondslag liggen zijn permanente magneten en supergeleiding. Deze machines zullen niet alleen een hoger rendement hebben, maar zullen in afmetingen en gewicht veel kleiner zijn dan conventionele synchrone generatoren. Hierdoor kunnen machines vaak in combinatie met een gasturbine makkelijker in een schip te plaatsen zijn (figuur Siemens). Hieronder volgt een aantal voorbeelden.

High Speed PM Alternator (PM generator)

Door gebruik van permanente magneten in de rotor wordt het mogelijk om high speed generators te ontwikkelen. Deze snel draaiende generatoren kunnen direct worden gekoppeld aan snel draaiende gasturbines. Door gebruik te maken van advanced cycle gasturbines zou een rendement verkregen moeten kunnen worden dat ten minste gelijk is aan een diesel elektrisch systeem. Voor een PM high speed generator zijn twee prototypes bekend: Eindhoven (1600 kW 18000rpm High Speed Alternator), Britse Marine (HSA van 2,08 MW op 19000-22500 rpm, *Development of the Advanced Cycle Low-Power Gas Turbine Alternator*). Het project in Eindhoven is inmiddels gestaakt. Bij het project van de

Britse marine is het de vraag of inderdaad een beter rendement gehaald wordt dan met een diesel elektrisch systeem.

Bewezen techniek: niet
Nieuwe techniek prototypes van ca 2 MW
Toekomst: grotere vermogens

PM generatoren

Naast de bovenstaande high speed PM machine worden er ook PM generatoren ontwikkeld met toerentallen in het normale bereik (1800 of 3600 rpm, zie tabel 1. en tabel 2.).

Bewezen techniek: niet
Nieuwe techniek 2 MW
Toekomst: grotere vermogens: 10MW

Superconducting Generator

De superconducting generator is een synchrone generator waarbij de rotor is uitgevoerd met High Temperature Superconducting windingen (HTS windingen). Hoewel deze generator zich nog in de prototype fase bevindt, zijn er op dit moment vier fabrikanten bezig met het ontwikkelen van een full-scale demonstrator. Vanwege het lagere gewicht en volume (ongeveer 50% van het volume en gewicht) is dit een goed alternatief. Ook het rendement ligt hoger (99% in plaats van 98%).

Specifieke voordelen voor de scheepvaart zijn verder nog: hoge efficiency bij deel last en minder geluid.

Er wordt op dit moment een prototype van 4 MW getest en er is ook een 26 MVA generator in ontwikkeling. Beide generatoren worden speciaal voor de scheepvaart ontwikkeld. De voornaamste reden om voor een HTS generator te kiezen boven een conventionele synchrone generator is lagere gewicht en volume. Zie figuur 1. Het is nu echter nog de vraag of het verbeterde rendement (99% i.p.v. 98%) opweegt tegen de in het begin waarschijnlijk veel hogere investeringskosten vanwege de nu nog zeer dure HTS draad. Op langere termijn zullen de investeringskosten echter vergelijkbaar worden met een conventionele synchrone generator en de LC kosten zullen lager uitvallen.

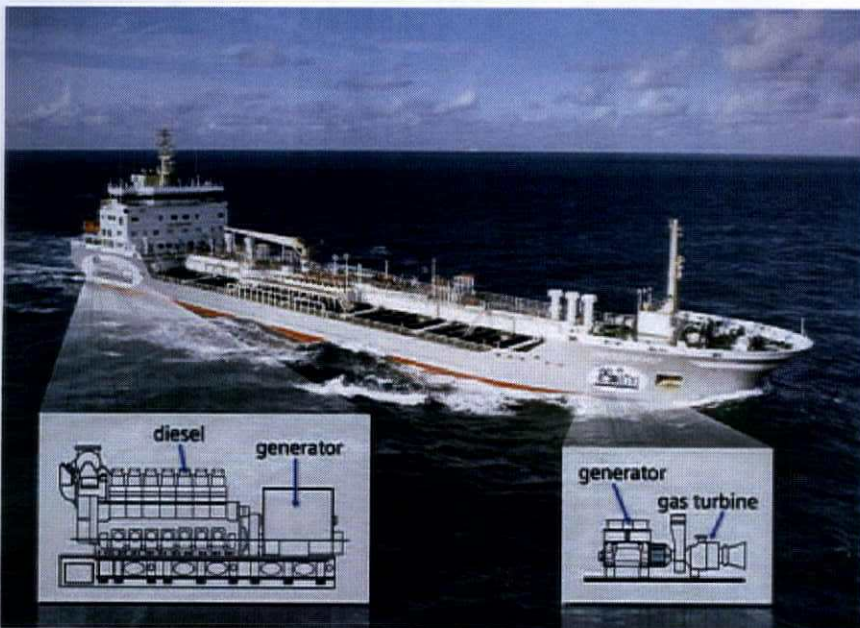


Fig. 1. Het volume verschil tussen een dieselgenerator set en een door een gasturbine aangedreven HTS generator (Bron: www.siemens.com).

Bewezen techniek: niet
Nieuwe techniek prototype van ca 4 MW (Siemens, tests zijn in 2005 gepland)
Toekomst: grotere vermogens tot 30-40 MVA (26 MVA design door ACS)

1.2 Asynchrone generatoren

Technisch is het mogelijk om asynchrone machines als generator te laten werken. In windmolens wordt deze techniek al dan niet met vermogens-elektronische omzeters toegepast. Eiland bedrijf is niet mogelijk zonder hulpspanning.

Dit is de reden dat er op dit moment geen voordelen voor deze techniek op schepen aan te wijzen zijn. Ook voor de toekomst wordt niet verwacht dat dit type generatoren realiteit wordt.

1.3 Gelijkstroom generatoren

Conventionele gelijkstroomgeneratoren worden op dit moment in nieuwbouw projecten niet meer toegepast.

Tabel 1. Typische waarden voor component grootheden van generatoren

Type	P(MW)	m(ton)	Diameter (m)	Lengte (m)	Status technologie
synchr. conventioneel	10-12		1,8	4**	conventioneel
Axial Field generator (PM)	10-12	8	1,2*	1,2*	Axial Field Disc Machines for Electrical Propulsion, P. Letelier and R. Michaux, 1997
Calnetix HSA (highspeed PM)	2,08		0,46	1,3	Development of the Advanced Cycle Low-Power Gas Turbine Alternator (UK Navy)
Magnet-Motor (PM)	1,7	2,9	1,15	0,70	New Types of PM Motors and Generators for Naval Applications (WSEAS)
DSG 74 L2-4w	1,8-2,25	4	0,85	2,2	conventioneel

Tabel 2. Typische waarden voor de interface grootheden van generatoren

Type	P(MW)	S(MVA)	$\eta@100\%$	$\eta@60\%$	$\eta@20\%$	V(V)	w(rpm)	f(Hz)
synchr. conventioneel		12						
Axial Field generator		12	98,3				3600	
Calnetix HSA	2,08					800-1800	19000-22500	633-750
Magnet-Motor	1,7						1800	
DSG 74 L2-4w		2,25					1800	60

* Deze waarden zijn gebaseerd op de elektromagnetische kern (dus exclusief behuizing etc.)

** Inclusief excitation system

P(MW): reëel vermogen - van belang voor het hele systeem

S(MVA): schijnbare vermogen - wordt bepaald door het benodigde blindvermogen van het systeem

$\eta@xxx\%$: rendement van de generator bij xxx% van het maximale vermogen - heeft invloed op het totale rendement en dus op de bedrijfskosten.

V(V): een spanningsbereik waarvoor desbetreffende generator gebouwd kan worden.

w(rpm): toerental van de rotor - direct afhankelijk van het poolpaar aantal en de gewenste uitgangsfrequentie van de spanning.

f(Hz): de frequentie van de uitgangsspanning - de waarde 0 betekent een DC output.

I_k (A): de bijdrage van de generator aan de kortsluitstroom.

2. AANDRIJVING

Bij een elektrische voortstuwingsinstallatie vormt een elektromotor de aandrijving van de voortstuwer. Voor aandrijving van een thruster of schroef wordt de aandrijving binnen boord geplaatst. De precieze plek hangt daarbij af van het type voortstuwer.

De elektromotor en een schroef kunnen ook geïntegreerd worden en in een behuizing onder het schip worden geplaatst. Men spreekt in dit geval van een POD. Voor PODs zijn speciale eisen gesteld aan de elektromotor. Ten eerste moet deze langzaam draaien aangezien er geen ruimte voor een tandwielkast is en er dus een directe koppeling tussen motor en schroef bestaat. Ten tweede moet de motor een zo klein mogelijke diameter hebben bij een zo hoog mogelijk op te wekken koppel.

In tabel 3. en 4. zijn kengetallen van enige nieuwe types motoren opgenomen. In tabel 7 is een overzicht gegeven van de ontwikkelingsstatus van verschillende technologieën.

2.1 Asynchrone motoren

Voor de aandrijving van de voortstuwer zijn asynchrone machines tot 10MW de huidige meest effectieve oplossing met betrekking tot kosten (investering en onderhoud) en rendement. Asynchrone machines zijn goedkoop te fabriceren vanwege de eenvoudige opzet van de rotor en de onderhoudskosten zijn eveneens laag. Daarnaast is de asynchrone machine met de tegenwoordig beschikbare converter technologie zeer goed te besturen.

Om toch met vermogens van meer dan 10MW te kunnen werken heeft Alstom de Advanced Induction Machine ontworpen en gebouwd. Deze is echter speciaal voor de Britse marine ontworpen en voor zover bekend commercieel nog niet verkrijgbaar.

<bron: Marine Propulsion Direct Drive Multi Phase Induction Motors, Chris Hodge)

Bewezen techniek: tot ca 10 MW medium speed en laagtoerig
Nieuwe techniek prototype van 25 MW 15 fasige motor
Toekomst:

2.2 Synchrone motoren

Bij vermogens van meer dan 10MW kan naast het gebruik van meer aandrijvingen parallel ook gekozen worden voor synchrone motoren. Tevens kunnen nieuwe motor concepten zoals hieronder beschreven, in de toekomst vermogens van meer de 10MW leveren.

Bewezen techniek: 10 MW en hoger, geen echte bovengrens
Nieuwe techniek geen nieuwe ontwikkelingen
Toekomst: ongewijzigd

Permanent Magneet Technologie:

Er zijn verschillende initiatieven bij de industrie om synchrone machines te bouwen met een rotor met permanente magneten. Hierbij worden drie verschillende motor ontwerpen gebruikt: radial flux, axial flux en transverse flux. Dit soort ontwerpen worden gebruikt om een zo hoog mogelijke flux dichtheid in de luchtspleet te verkrijgen, zodat een zo groot mogelijk koppel bij een bepaalde rotordiameter wordt verkregen. De genoemde ontwikkelingen lopen bij de volgende fabrikanten:

- o ABB (radial flux)
- o Siemens (radial flux)
- o Rolls Royce (transverse flux, in samenwerking met Britse marine)
- o Jeumont (axial flux)

Op dit moment heeft alleen ABB een productielijn van PM motoren die ook geschikt zijn voor de scheepvaart.

<bron: Electric Warship paper serie van Hodge en Mattick, MOD UK. Hierin staat een goed overzicht van de ontwikkelingen op het gebied van PM machines>

Bewezen techniek: radial flux tot 2.5 MW al dan niet in POD's
 Nieuwe techniek: transverse flux prototype, 4 MW
 Toekomst: grotere vermogens, 20 MW

High Temperature Super Conducting technologie:

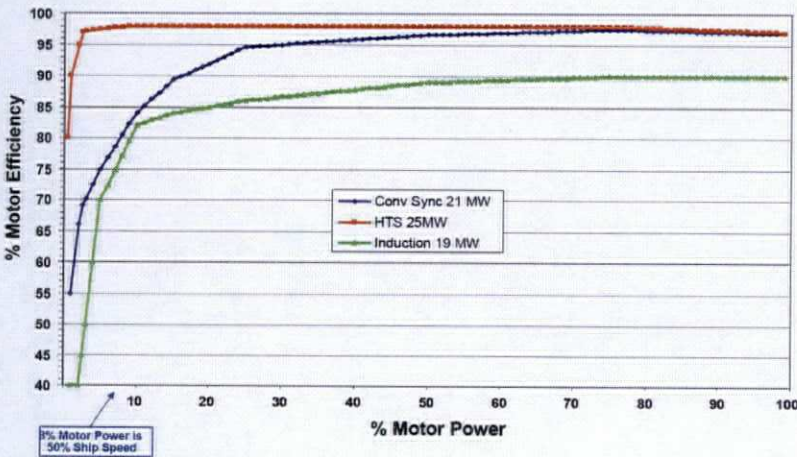
De werking en voordelen van een High Temperature Super Conducting motor zijn vergelijkbaar met de HTS generator. Vanwege het veel lagere gewicht en volume t.o.v. een conventionele elektromotor (synchroon of asynchroon) is de HTS motor uitermate geschikt voor PODs. Een schatting is gemaakt dat de eerste generatie HTS motors ten minste de helft van het volume en een derde van het gewicht van een conventionele motor zullen hebben. Bij latere generaties zal dit zelfs kunnen oplopen tot 1/5. Verdere voordelen (wanneer de HTS motor uitontwikkeld is): verbeterde efficiëntie (van 98 naar 99%), minder geluid, minder onderhoud, geen veroudering vanwege constante rotor temperatuur, lagere investeringskosten (minder materiaal-, arbeids- en vervoerskosten). Huidige nadelen zijn de nu nog zeer hoge kosten van het HTS draad en de betrouwbaarheid van het gehele systeem (en dan met name het koelsysteem).

De ontwikkeling van de HTSC technologie loopt bij ASC (American Superconductor Cooperation) en Siemens.

<bron: www.amsuper.com>

<bron: Siemens: Power Components & Superconductivity>

Bewezen techniek: niet
 Nieuwe techniek gerealiseerd: prototype 5 MW (ASC), 400kW (Siemens)
 Nieuwe techniek binnenkort (2006): 25MW (zie tabel), 36,5 MW (ACS) en 4MW (Siemens)
 Toekomst: Full Scale, nog beter rendement, betrouwbaarheid en verdere vermindering van volume en gewicht



Figuur 2. Rendement van een HTS motor is bij een laag vermogen veel beter. Dit zou een enorme kostenbesparing kunnen opleveren voor schepen die lang op minder dan 30% van het vermogen varen.

2.3 Gelijksstroommotoren

2.3.1 Conventioneel

Conventionele gelijkstroommotoren worden alleen nog toegepast bij schepen indien zeer strenge eisen gesteld worden aan het onderwater geluid (onderzeeboten en sommige visserij onderzoeksvaartuigen)

2.3.2 Switched Reluctance Motor

De Switched Reluctance Motor (SRM) of Geschakelde Reluctantie Motor is één van de eenvoudigste motor principes en is volledigheidshalve in dit stuk opgenomen. Door steeds een andere winding in de stator te bekrachtigen (schakelen) wordt de (onbekrachtigde) rotor steeds naar een andere positie getrokken. Aan de hand van de positie van de rotor worden windingen in de stator aan- of uitgeschakeld. De SRM zelf is zeer robuust en goedkoop te fabriceren. Als nadeel heeft deze machine een rotor positie sensor nodig en produceert een SRM veel geluid vanwege de grote rimpel op het koppel. Om dit te verminderen is weer complexe regeltechniek benodigd.

Sinds eind jaren 90 is weer enige ontwikkeling te zien in SRM. Producenten van SRMs zijn o.a. Baldor Electric Co (USA) en Emotron AB (Sweden).

<bron: www.manufacturing.net>

<bron: Principles of Electric Machines and Power Electronics, P.C. Sen>

Tabel 3. Typische waarden voor component grootheden van motoren

Type	P(MW)	m(ton)	Vol.(m ³)	diameter (m)	lengte (m)	Status technologie
HTS machine	25	60	11,5	2,65*	2,08*	Development Status of Superconducting Rotating Machines, Swarn S. Kalsi, IEEE PES Meeting, January 2002
Axial Flux PMPM** (Jeumont)	20	65	17,2	2,7*	3,0*	The Electric Warship VI, CG Hodge and DJ Mattick, 2001
Alstom AIM	20	70	18,5	2,8*	3,0*	The Electric Warship VI, CG Hodge and DJ Mattick, 2001
Transverse Flux Machine**	20	39	17,6	2,6	2,6	The Transverse Flux Motor : A New Approach to Naval Propulsion, A.J. Mitcham, 1997
Synchrone Convent.	20	120	88,7	5,6	3,6	
ABB PM Motor	2,6	12,5	2,9	1,15*	2,8*	
Magnet-Motor	1,040	7,9	2,0	1,35*	1,40*	New Types of PM Motors and Generators for Naval Applications (WSEAS)

*Deze waarden zijn gebaseerd op de elektromagnetische kern (dus exclusief behuizing etc.)

**Deze motor is nog niet gerealiseerd. Waardes zijn schattingen

Tabel 4. Typische waarden voor de interface grootheden van motoren

Type	P(MW)	T (Nm)	η @100%	η @60%	η @20%	w(rpm)	f(Hz)
HTS machine	25		97			120	
Axial Flux PMPM	20		97				
Alstom AIM	20		97	95,5	80		
FM	20		97	96	90	180	195
synchr. conv	20						
ABB PM	2,6		98,2			600	
Magnet-Motor	1,040	66k	93,5	93,5	91	151	

P(MW): reëel vermogen - van belang voor het hele systeem

S(MVA): schijnbare vermogen - wordt bepaald door het benodigde blindvermogen van het systeem

η @xxx%: rendement van de generator bij xxx% van het maximale vermogen - heeft invloed op het totale rendement en dus op de bedrijfskosten.

V(V): een spanningsbereik waarvoor desbetreffende generator gebouwd kan worden.

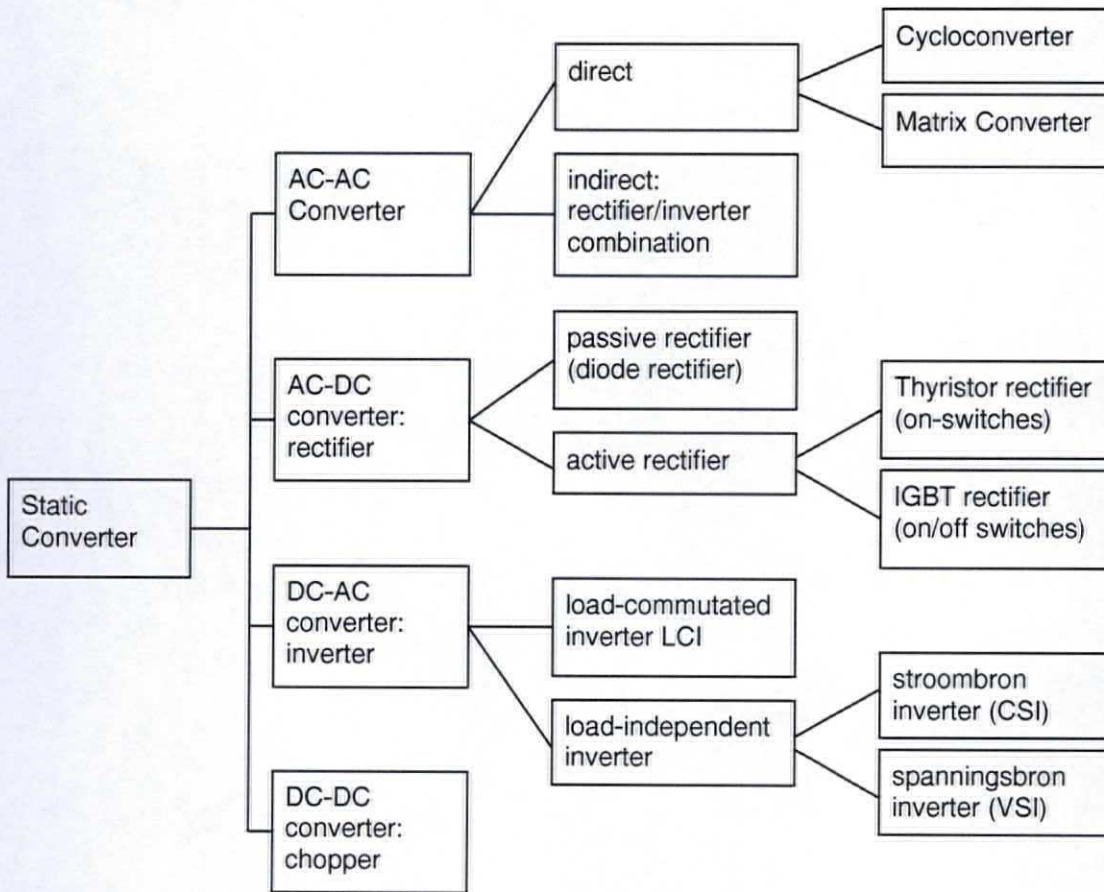
w(rpm): toerental van de rotor - direct afhankelijk van het poolpaar aantal en de gewenste uitgangsfrequentie van de spanning.

f(Hz): de frequentie van de uitgangsspanning - de waarde 0 betekent een DC output.

3. CONVERSIE TEN BEHOEVE VAN AANDRIJVING VOORSTUWERS

Om elektromotoren aan te drijven zijn er verschillende soorten converters in omloop. In deze paragraaf worden enige converters beschreven.

In tabel 5. en 6. zijn kengetallen van enige converter types opgenomen. In tabel 8 is een overzicht gegeven van de ontwikkelingsstatus van verschillende technologieën. In onderstaande figuur drie is verder een boomstructuur weergegeven waarin de verschillende converters terug te vinden zijn.



Figuur 3. schematisch overzicht van beschikbare converters

3.1 Spanningsbron converters:

State of the art technologie voor vermogenselektronische omzetters voor aandrijvingen zeker in Europa is de spanningsbron converter. Deze technologie wordt toegepast van zeer kleine vermogens in laagspanning tot zeer grote vermogens waarbij hoogspannings halfgeleider componenten worden toegepast.

Aangezien de tussenkring van deze converters gelijkspanning is, leent deze techniek zich ook bij uitstek voor DC voeding.

In de laagspanningstoepassingen worden vrijwel unaniem IGBT's (Insulated Gate Bipolar Transistors) toegepast als halfgeleider schakelement en loopt de vermogensreeks tot 4-5 MW bij 690 V en tot ca 3 MW bij 440V. Deze vermogens per converter worden gerealiseerd door parallelschakeling van inverter modules.

Bij grotere vermogens worden hoogspannings IGBT's en IGCT's (Insulated Gate *Bipolar* Thyristors) toegepast. Vermogens met hoogspannings IGBT's lopen tot ca 4 MW per converter en met IGCT's als 3 level inverter tot ca 9 MVA (9MW synchrone motor en 7.7-8MW asynchroon) per converter. Door parallel schakeling zijn met deze techniek motorvermogens haalbaar tot ca 27 MW.

De meest voorkomende motorspanning bij hoogspanning is 3 kV.

De ontwikkeling van de besturingssoftware van de motorinverters laat keuze toe om deze converters zowel met asynchrone, conventioneel synchrone als permanent magneet motoren te bedienen.

Door de modulus op een andere wijze te rangschikken, bijv per fase bij een veelfasige motor, worden onrealistisch grote vermogens/stromen in beter te beveiligen eenheden ondergebracht (zie 20MW advanced induction motor).

De spanningsbron inverters kunnen gevoed worden met een 6,12,18 of 24 puls (diode) gelijkrichter of met een schakelende ingangsbrug (AFE Active Front End).

Bewezen techniek: tot ca 4 MW LV en 25 MW HV
Nieuwe techniek multi fasig voor nieuwe motor typen
Toekomst: mogelijk nieuwe halfgeleiders met minder verliezen dus compacter

3.2 Cycloconverters:

Voor vermogens groter dan 10MW tot tientallen MW's in combinatie met lage uitgangsfrequenties (maximaal 30-40% van de voedingsfrequentie) zijn er cycloconverters beschikbaar. Deze zetten de AC ingangsspanning zonder tussenstap direct om in uitgangsspanning. Uitvoeringen met 6-24 puls ingangsbruggen zijn beschikbaar; de COSphi en de netvervuiling zijn echter slecht. De cycloconverter wordt alleen gebruikt in combinatie met synchroon motoren. Ook deze techniek verliest aan de onderzijde van de reeks terrein aan de spanningsbron converters.

Bewezen techniek: tot tientallen MW
Nieuwe techniek geen
Toekomst: alleen voor zeer grote vermogens

3.3 Stroombron inverters:

Vanuit Amerikaanse bronnen worden ook wel stroombroninverters gepropageerd. Hiermee zijn ook zeer grote vermogens te realiseren. De stroombroninverter kan gebruikt worden voor het voeden van (a)synchroon motoren. In Europa werden deze vooral toegepast om hoogtoerige (7000 rpm) MW aandrijvingen voor compressoren en hoge druk voedingspompen te realiseren.

Deze techniek verliest terrein aan de spanningsbron converters met asynchroon motoren.

Bewezen techniek: tot ca 20 MW
Nieuwe techniek geen
Toekomst: niet voor AES

3.4 Thyristor anker regelaars:

Hierbij wordt de AC voedingsspanning direct omgezet in een regelbare gelijkspanning die via een smoorspoel aan een gelijkstroom motor geleverd wordt. De beperkingen qua vermogens liggen bij de motoren.

Bewezen techniek: tot tientallen MW
Nieuwe techniek geen
Toekomst: alleen voor zeer stille aandrijvingen

3.5 Matrix converters:

Enige jaren geleden is veel gepubliceerd over matrix converters. In wezen zijn cycloconverters en thyristorankerregelaars matrix converters met een schakelfrequentie gekoppeld aan de netfrequentie.

De nieuwe matrix converters werken met een hoge schakel frequentie en kunnen direct een willekeurige ingangsspanning omzetten in een willekeurige uitgangsspanning.

Veel verder dan plannen en een schaalmodel is deze techniek nog niet gevorderd.

Bewezen techniek: niet
Nieuwe techniek prototype op schaal niveau
Toekomst: onbekend

Tabel 5. Kengetallen converters

Type	P(MVA)	m(ton)	Vol.(m ³)	breedte (m)	lengte (m)	Status technologie
AC-AC (rect. + inverter) Laagspanning + IGBT	0,5	0,5	1			Bron: afstudeerverslag Bakker Sliedrecht
	1,5	1,5	3			
	3	3	6			
alleen inverter*	2,5	1,4	2,8			
alleen rectifier*	2,5	1	1,3			
Transformator bij AC-AC converter	2,5	7	11			
	1	3	5			
ABB cycloconv.	6	2,9	10	0,86	5,2	Air cooled (Bron: Brochure ABB)
	27	5,9	22	1,06	9,44	Water cooled
ABB PWM conv.	9	0,8/m	11	1	4,9	Water cooled (Bron: Drive ACS 6000 Marine Data Sheet)
	28	0,8/m	33	1	15	
IGCT AC-AC converter	6 of 9		18+18	1,2	6+6	ASI Robicon Silcovert GN series
	11		19+18	1,0	7,6+6	
	22		36+18	1,0	14,2+6	

* excl. besturing

Tabel 6. Kengetallen converters

Type	P(MW)	S(MVA)	$\eta@100\%$	V(V)	Pf input	f(Hz)
ABB cycloconv		6	>99%	3x 1kV max	0,76 ind.	0-24/28 Hz (output)
		27	>99%	3x 1kV max	0,76 ind.	0-24/28 Hz (output)
ABB PWM conv.		9	98,5 of 97,7*	1,6 – 3,3 kV	0.95 of 1*	max. 75 (250)
		28	98,5 of 97,7*	1,6 – 3,3 kV	0.95 of 1*	max. 75 (250)
IGCT AC-AC		6	>98,5	3300		0-120
		11	>98,5	3300		0-120
		22	>98,5	3300		0-120

* bij respectievelijk een diode rectifier en een actieve rectifier.

Tabel 7. Technologie versus beschikbaarheid matrix voor generatoren en motoren

Technologie	Plan	Prototype	Demo, full scale	One supplier	More Suppliers	Special Design	Technologie
Generatoren AC synchroon > 4p 2p 50-60 Hz 2p >> 3600 rpm PM 18000-22000 rpm PM Axial Flux SC 3600 rpm					Full Scale Full Scale	5-15 MW	Conventioneel Conventioneel Conventioneel Toekomstig Toekomstig Nieuw, Toekomstig
	12MVA Full Scale	2 MW 4MW	Full scale				
	X						Toekomstig
Motoren DC Low speed ($P_{xn} < x \cdot 10^6$)					0-5 MW		Conventioneel
			20 MW	20 MW	0-10 MW		Conventioneel Nieuw
AC asynchroon conventioneel AIM					Full Scale		Conventioneel Nieuw
			36,5MW	0,5-2,5 MW	X		Nieuw Toekomstig Toekomstig
AC synchroon conventioneel SC 100-250 rpm PM normaal axial flux transverse flux		5 MW					Conventioneel Nieuw
	20MW 20MW	2,45 MW			onbekend		Nieuw/ Toekomstig
Switched Reluctance Motor	5MW						
Beschikbaar voor PODs asynchroon PM synchr. conventioneel vet: gerealiseerd					5 - 30 MW		Conventioneel Nieuw Conventioneel
				0 - 5 MW 0,5-2,5 MW			

standaard: binnenkort te realiseren

Tabel 8. Technologie versus beschikbaarheid matrix voor statische omzeters

Technologie	Plan	Prototype	Demo, full scale	One supplier	More Suppliers	Special Design	Technologie
Statische omzeters AC-AC converters Cycloconverter Matrix converter					6-30 MVA		Conventioneel
AC-DC converter : rectifier Diode rectifier (6,12, 24 pulse) Thyristor rectifier (on-switches) IGBT rectifier (< 690V) IGBT/IGCT (< 3,3 kV)					Full scale Full scale < 4,5 MW* < 15 MW**		Conventioneel Conventioneel
DC-AC converter: inverter Load commutated inverter Current source inverter Voltage source inverter IGBT IGCT (3,3kV) SiC							Conventioneel Rockwell State of the art State of the art Toekomstig
DC-DC converter : chopper chopper (up: factor 2)	In combinatie met brandstof cel						Conventioneel

* met parallel geschakelde vermogenselektronica (bijvoorbeeld 4 inverters van 7 MVA)

** één unit, parallel schakeling is mogelijk

DISTRIBUTIE

BIJLAGE D3

AES-Nieuwe Technologie

Teamleden: Peter Rampen (Imtech), Radj Bibat (Imtech), Daniël Vree (Koninklijke Marine),
Jos van der Burgt (TNO)

INHOUDSOPGAVE

1.	INLEIDING.....	1
1.1	Algemene trends	1
2.	MATERIALEN	2
2.1	Schakelborden.....	2
2.1.1	GIS	2
2.1.2	Gesloten kunststof/lucht geïsoleerd schakelsysteem	2
2.2	Schakelaars en beveiligingen.....	2
2.2.1	Circuit breakers	2
2.2.2	Contactors.....	4
2.2.3	Smeltveiligheden	4
2.2.4	Hoogtemperatuur supergeleider stroombegrenzer (SCFCL).....	4
2.3	Kabels en rails	5
2.3.1	Kabels.....	5
2.3.2	Busway/Busbar	5
3.	CONVERSIE TEN BEHOEVE VAN DISTRIBUTIE.....	7
3.1	Transformator	7
3.2	Roterende omvormer	8
3.3	Statische omvormer	8

1. INLEIDING

Een elektrisch distributiesysteem bestaat globaal uit een hoofddistributiesysteem met hierop aangesloten (eventueel via een omzetter) subdistributiesystemen. Ieder distributiesysteem bestaat uit een of meer voedende systemen en een (meestal groter) aantal consumerende systemen. De aangesloten systemen kunnen apart in- of uitgeschakeld worden en zijn beveiligd tegen kortsluiting. De verschillende subdistributiesystemen worden aangesloten via bekabeling.

Dit hoofdstuk beschrijft per onderdeel van het distributiesysteem de huidige en toekomstige technologieën voor de verschillende spanningen; kengetallen zijn opgenomen in de tabellen aan het einde van dit hoofdstuk.

1.1 Algemene trends

Momenteel worden de meeste schepen uitgevoerd met AC distributiesystemen, zowel laagspanning (LS) als hoogspanning (HS). DC distributie is vanuit gewicht en volume (ongeveer factor 1,5 lichter en kleiner) oogpunt interessant, daartegen zijn de investeringskosten veel hoger, door de noodzaak van extra conversie. DC distributie wordt momenteel vooral toegepast in onderzeeboten en als subdistributiesysteem ten behoeven van aandrijvingen (bijvoorbeeld: 1 á 2 gelijkrichters voeden een DC-bus vanuit generatoren, op deze DC-bus worden meerdere inverters aangesloten).

De ontwikkeling in de elektrische distributie aan boord van schepen is over het algemeen volgend t.o.v. landinstallaties, door het conservatieve karakter van de scheepsbouw. Een techniek wordt pas toegepast op het moment dat deze bewezen is op land en bij voorkeur al toegepast aan boord van andere schepen. Dit betekent dat nieuwe ontwikkelingen meestal uit "bewezen" landinstallaties komen.

Door het toenemende elektrische vermogen aan boord van schepen is er een trend te zien in een toenemende distributiespanning om de stromen te beperken. De omschakeling van laagspanning (690V) naar hoogspanning (momenteel 3,3kV of 6,6kV) is momenteel aan de orde. Daarnaast wordt er een poging gedaan om het laagspanningsniveau te verhogen naar 1200V ($690 \times \sqrt{3}$). Werken met laagspanning impliceert namelijk minder veiligheidsregels en dus lagere kosten.

Een andere trend is het verhogen van de vermogensdichtheid, ofwel het steeds compacter maken van onderdelen en systeembouw, om meer ruimte te creëren voor het werkelijke doel van een schip.

2. MATERIALEN

2.1 Schakelborden

Schakelborden worden meestal opgebouwd in modulaire kasten, met hierin een railsysteem. Een voorbeeld van modulaire systemen zijn cubicle systemen die door verschillende fabrikanten geleverd worden. Naast de stroomverdeling zijn de schakelaars, beveiligingen en besturing ook in deze kasten ondergebracht. Het isolerende medium tussen de rails is meestal lucht. Voor laagspanning is de isolatie afstand tussen de geleiders relatief klein en is er dus nauwelijks ruimte om tot grotere vermogensdichtheid te komen. Bij hoogspanning, waar de isolatieafstand in lucht tussen de geleiders en tussen de geleiders en aarde aanzienlijk is, zijn er nog volop mogelijkheden tot verbetering.

Bewezen techniek: volledige vermogens range is realiseerbaar

Nieuwe techniek geen

Toekomst: ongewijzigd

Twee technieken die gebruik maken van geïsoleerde geleiders kunnen op korte termijn hun toepassing vinden in de elektrische distributie, deze zijn: Gas Insulated Switchgear (GIS) en gesloten kunststof/lucht geïsoleerde schakelsysteem. Er volgt een korte beschrijving van deze twee technieken.

2.1.1 GIS

In een GIS systeem is het totale schakelbord ondergebracht in een afgesloten systeem gevuld met een isolerend gas (SF6). Hierin zijn vacuüm of SF6 circuit breakers en contactors ondergebracht en eventueel zelfs de distributietransformatoren. De goede isolerende eigenschap van SF6 maakt een GIS systeem zeer compact (bijvoorbeeld factor 1.4 voor een invoer) en elektrisch betrouwbaar. De grootste nadelen worden echter ook door dit gas veroorzaakt, dit zijn:

- Veiligheid, SF6 is een gas dat zwaarder is dan lucht, bij lekkage verdringt SF6 de lucht en ontstaat er verstikkingsgevaar. Bij brand en tijdens schakelen (door vlamboog) worden het gas ontbonden in giftige stof
- Onderhoud en flexibiliteit, door het gesloten karakter van een GIS installatie is onderhoud en aanpassing zeer moeilijk tot onmogelijk.
- Hogere investerings- en onderhoudskosten ten opzichte van confessionele lucht geïsoleerde schakelborden

Bewezen techniek: niet toegepast

Nieuwe techniek volledige vermogensrange voor hoogspanning toepasbaar

Toekomst: ongewijzigd

2.1.2 Gesloten kunststof/lucht geïsoleerd schakelsysteem

De compactheid van dit schakelbord wordt gecreëerd door gebruik te maken van ronde geleiders ondergebracht in kunststof buizen (bijvoorbeeld een factor 1.6 compacter voor een invoer). De ronde geleiders zorgen voor een lager elektrisch veld, er zijn geen hoeken waar geconcentreerd veld ontstaat, en de kunststofbuizen zorgen voor een extra isolatie. Het grote voordeel van dit type distributiesysteem is dat lucht wordt gebruikt in plaats van een gevaarlijk gas als isolatie medium. Nadelen zijn de beperkte flexibiliteit en de investeringskosten ten opzichte van de nu bewezen techniek.

Bewezen techniek: niet toegepast

Nieuwe techniek volledige vermogensrange voor hoogspanning toepasbaar

Toekomst: ongewijzigd

2.2 Schakelaars en beveiligingen

2.2.1 Circuit breakers

Een breaker heeft als taak het afschakelen bij kortsluiting. Sommige circuit breakers kunnen ook gebruikt worden als scheider. Verscheidende type breakers zijn verkrijgbaar met

toepassingen die afhankelijk zijn van spanning, stroom en levensduur (aantal keer schakelen: typisch 10.000). Het isolerende medium en de snelheid van schakelen bepalen in grote mate de eigenschappen van een circuit breaker. Het afschakelen van AC stromen is ten opzichte van DC stromen vrij makkelijk, omdat op het moment dat de stroom door nul gaat (twee keer per periode) een eventuele vlamboog vanzelf gedoofd wordt. Een DC stroom heeft geen nuldoorgangen, wat dus hogere eisen aan de schakelaar stelt.

Air circuit breakers

Het isolerende medium van deze schakelaars is lucht, door de matige isolerende eigenschappen van dit medium wordt dit type schakelaar hoofdzakelijk gebruikt voor laagspanningstoepassingen. Voor hoogspanningstoepassingen kunnen air-blast circuit breakers worden toegepast, deze gebruiken een luchtstroom om een "vlamboog uit te blazen".

Bewezen techniek: voor laagspanningsinstallaties volledige vermogens range beschikbaar.
Nieuwe techniek geen
Toekomst: ongewijzigd

Vacuüm circuit breakers

Twee axiale contacten in een vacuüm gezogen fles vormen dit type schakelaar. De opbouw is simpel en compact. Vacuüm circuit breakers worden zeer veel gebruikt voor hoogspanningstoepassingen. Een nadeel is dat een vacuüm circuit breaker de stroom hard afkapt en er grote overspanningpieken kunnen ontstaan (door grote di/dt). In moderne vacuüm CB's worden de schakelflanken, door gebruik te maken van speciale technieken, beperkt.

Bewezen techniek: voor hoogspanningsinstallaties volledige range beschikbaar
Nieuwe techniek geen
Toekomst: ongewijzigd

Gas (SF6) geïsoleerde circuit breakers

Dit type schakelaar is alleen verkrijgbaar voor hoogspanningsinstallaties en wordt vooral in hoogspanningsdistributienetten zeer veel toegepast. De goede isolerende eigenschappen van het SF6 gas zorgen voor een betrouwbaar en compacte schakelaar. Dit type schakelaar is niet geschikt voor het schakelen van DC stromen.

Bewezen techniek: voor hoogspanningsinstallaties volledige range beschikbaar
Nieuwe techniek geen
Toekomst: ongewijzigd

Halfgeleider circuit breakers

De verwachting is dat halfgeleiderschakelaars een grote toekomst tegemoet kunnen zien. Halfgeleiderschakelaars hebben een aantal grote voordelen:

- Korte schakeltijden van halfgeleiders (enkele microseconden) maken dit type schakelaar geschikt om kortsluitingen al tijdens de stroomopbouw af te schakelen. Ook kunnen AC stromen rond de nuldoorgang afgeschakeld worden, zodat de di/dt klein is.
- Geen mechanische contacten, dus vrijwel geluidloos.
- Kleine afmetingen.

Momenteel zijn halfgeleider circuit breakers nog niet commercieel verkrijgbaar, de verwachting is dat binnen 5-8 jaar deze op de markt zullen komen. Het grote nadeel van dit type schakelaar zijn de hoge geleidingsverliezen (0,1-0,2%) en de prijs is momenteel nog erg hoog.

Bewezen techniek: geen
Nieuwe techniek geen
Toekomst: op termijn volledige range verkrijgbaar

Hybride schakelaar

Hybride schakelaars combineren de snelle schakeleigenschap van halfgeleiders en de goede geleidingseigenschap van mechanische schakelaars. Momenteel wordt er o.a. bij TNO onderzoek naar dit type schakelaar gedaan.

Bewezen techniek: geen
Nieuwe techniek geen
Toekomst: vooral toepassing in DC laagspanningsinstallaties

2.2.2 Contactors

Een contactor is een schakelaar die in tegenstelling tot de circuit breaker een kortsluitstroom niet kan schakelen. Daarnaast is een contactor ontworpen om veel vaker te kunnen schakelen (typisch 200.000 keer). Contactors worden vooral gebruikt voor het inschakelen van apparaten, zoals motoren en drives. Een smeltveiligheid in serie met de contactor verzorgt de kortsluitbeveiliging.

Voor laagspanning wordt momenteel vooral gebruik gemaakt magneetschakelaars.

Bewezen techniek: volledige vermogensrange leverbaar
Nieuwe techniek geen
Toekomst: ongewijzigd

Verwacht wordt dat magneetschakelaars op den duur vervangen zullen worden door halfgeleiderschakelaars.

Bewezen techniek: voor kleine vermogens
Nieuwe techniek laagspanning tot 600A
Toekomst: volledige range

In hoogspanningsdistributie zijn daarnaast vacuüm contactors verkrijgbaar. Voor de beschrijving van de verschillende basis technieken wordt korthedshalve verwezen naar de paragraaf over circuit breakers.

2.2.3 Smeltveiligheden

Een smeltveiligheid is kortsluit- en overstroombeveiliging die eenmalig te gebruiken is. De techniek van de smeltveiligheid is nagenoeg uitontwikkeld.

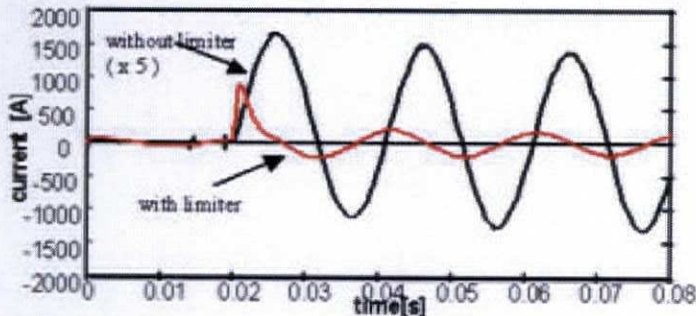
Bewezen techniek: volledige vermogensrange
Nieuwe techniek geen
Toekomst: geen

2.2.4 Hoogtemperatuur supergeleider stroombegrenzer (SCFCL)

SCFCL = superconducting fault-current limiter.

Deze nieuwe techniek maakt gebruik van de begrensde stroom capaciteit van een hoogtemperatuur supergeleider. De SCFCL wordt in het stroomcircuit geplaatst. In normaal bedrijf is de weerstand nul en bij een te grote stroom neemt de weerstand zeer snel toe.

Figuur 1 toont de stroom als functie van de tijd bij een kortsluiting begrensd met een praktisch gerealiseerde SCFCL.



Figuur 1. Begrenzing van stroom met SCFCL (bron. www.abb.com)

Bewezen techniek: geen
Nieuwe techniek geen
Toekomst: in laboratorium getest tot 1.2MVA-3 fase

2.3 Kabels en rails

Voor het transport van de elektrische energie zijn de volgende technieken beschikbaar:

1. Koperkabels
2. Aluminiumkabels
3. Railsystemen (Busbars)

2.3.1 Kabels

Zowel voor laagspanning, als hoogspanning voor DC en AC zijn er vele fabrikanten die energie kabels leveren. Voor scheepstoepassingen wordt gebruik gemaakt van kunststofgeïsoleerde kabels. Kabels zijn in vele soorten en maten verkrijgbaar, ieder met zijn specifieke eigenschap. Afhankelijk van de omgeving (mechanisch, thermisch en chemisch) en de elektrische grootheden wordt de keuze van een kabel gemaakt.

De techniek kan bekend worden verondersteld, in grote lijnen zijn kabels uitontwikkeld. Onderdelen die nog enigszins verbeterd kunnen worden zijn het isolatiemateriaal (nieuwe materialen of zuiverder materiaal) en de mantel om de EMC en mechanische eigenschappen te verbeteren.

Hoogtetemperatuur supergeleidende kabels zijn kabels die geen weerstand hebben. Ondanks de benaming hoogtetemperatuur dienen deze kabels gekoeld te worden tot zgn. 'cryogene' temperaturen (30..77 K ~ -243..-196°C), bijvoorbeeld met vloeibare stikstof. Mede door de benodigde koeling en de zeer hoge investeringskosten is het op middellange termijn niet aannemelijk dat dit type kabel aan boord van schepen gebruikt zal gaan worden.

Bewezen techniek: volledige range verkrijgbaar
 Nieuwe techniek: geen
 Toekomst: ongewijzigd

2.3.2 Busway/Busbar

In type distributie systeem zijn de bekabeling en schakelborden geïntegreerd. In plaats van kabels worden koper of aluminium strips gebruikt die door een metalen- of kunststofkoker omsloten zijn. Schakelmateriaal wordt nabij het aan te sluiten apparaat aangesloten op de busway.

Busways worden veelvuldig toegepast in offshore platformen, maar in schepen nauwelijks.

Bewezen techniek: volledige range realiseerbaar
 Nieuwe techniek: geen
 Toekomst: ongewijzigd

Tabel 1. Kengetallen schakelborden/kasten (een invoer)

Omschrijving		LV cubicle	MV air-insulated	MV SF6-insulated	MV air/plastic-insulated
Techn. GES		1	1	2	2
Schijnbaar vermogen	[kVA]	7530	69000	43000	13100
Spanning	[V]	690	10000	10000	10000
Rendement	[%]	100	100	100	100
Frequentie	[Hz]	AC/DC	AC	AC	AC
nominale stroom	[A]	6300	4000	2500	630
Toelaatbare kortsluitstroom	[kA]	100	50	80	50
Gewicht	[kg]	-	1500	-	160
Volume	[m ³]	0.8	6.0	2.5	0.55
Footprint lxb	[m ²]	0.75x0.45	1.0x2.4	0.8x1.5	0.42x1.11
vermogens-dichtheid	[MVA/m ³]	9.7	11.5	17.0	23.6
Prijs	[€]				

Tabel 2. Kengetallen schakelaars.

Omschrijving		Air CB	Vacuüm CB/HV	SF6 CB	Lucht contactors	Smeltvei- ligheden	Half- geleider switches	Half- geleider switches	Hybride switches
Techn. GES		1	1	1	1	1	2	3	3
Schijnbaar vermogen	[kVA]	7530	65500	75000	1900	1130/1ph	54/ph1	3600/1ph	3600
Spanning	[V]	690~ 1250=	12000	12000	690	3600	600	4500	600
Rendement	[%]	100	100	100	100	100	99.8	99.8	~100
Frequentie	[Hz]	DC/AC	AC	AC	AC	AC/DC	AC	AC	DC
Te schakelen stroom	[A]	6300	4000	3600	1600	315	90	800	6000
Toelaatbare kortsluitstroom	[kA]	100	63	50	4.0~ 9.6=	50	1.15		-
Gewicht	[kg]	270	150	165	40	-	-	-	-
Volume	[m³]	0.2	0.2	0.29	0.02	-	-	0.1	-
Footprint lxb	[mxm]	0.9x0.5	0.43x0.75	0.73x0.6	0.28x1.9	-	-	-	-
vermogens- dichtheid	[MVA/m³]	37.5	327.5	258	95	-	10	36	-
Prijs	€]								

3. CONVERSIE TEN BEHOEVE VAN DISTRIBUTIE

Het doel van conversie aan boord van schepen ten behoeve van energie distributie is de behoefte aan een ander spannings- en/of frequentieniveau dan het spannings- en/of frequentieniveau van het net voor de voortstuwingsketen.

De conversie kan daarbij bemoeilijkt worden doordat het net van de voortstuwingsketen één of meer van de volgende afwijkingen heeft:

- spanningsvariaties
- frequentie variaties
- niet sinusvormige spanning (harmonische vervorming)
- spikes
- korte onderbrekingen

De conversie kan op een aantal manieren gerealiseerd worden. Niet iedere manier geeft een oplossing voor bovengenoemde zaken. De randvoorwaarden zijn o.a :

- De toleranties van de classificatie bureaus voor wat betreft frequentie en spanning voor het distributienet
- De investering, de prijs/prestatie verhouding, terugverdientijd, etc.

Daarnaast kunnen de volgende beperkingen gelden:

- De conditie van het hoofdnet is onvoldoende
- Het schone net stelt hoge eisen aan de net kwaliteit (harmonische inhoud, spanning en frequentie)

Conversie kan gerealiseerd worden op basis van de volgende technologieën:

- Een transformator;
- Een roterende omvormer bestaande uit:
 1. Een VSD drive met asynchrone motor met een synchrone generator
 2. Een asynchrone motor met een synchrone generator.
 3. Een synchrone motor met een synchrone generator.
- Een statische omvormer;
- Een statische omvormer; met meedraaiende generator voor verbetering spanningskwaliteit
- Een specifieke voor deze toepassing geïnstalleerde diesel generator set.

Per technologie volgt hieronder een korte beschrijving met voor- en nadelen van de techniek.

3.1 Transformator

In distributie systemen worden transformatoren veelvuldig gebruikt voor het converteren van AC spanningsniveaus. De techniek is zeer bekend en heeft een aantal grote voordelen:

- Eenvoudige techniek,
- Galvanische scheiding ontkoppelt elektrisch twee netdelen,
- Hoog rendement
- Parasitaire elementen zorgen voor filtering van harmonische frequenties.

Naast de voordelen heeft de transformator ook een aantal nadelen en beperkingen:

- Niet geschikt voor gelijkspanningsconversie,
- Is alleen geschikt voor het converteren van amplitude (dus niet frequentie),
- Voor lage frequenties (50-60Hz) is een transformator relatief groot.

Bewezen techniek:	volledige range verkrijgbaar
Nieuwe techniek	geen
Toekomst:	ongewijzigd

3.2 Roterende omvormer

De technieken van dit type omvormers zijn besproken in opwekkers voor de generatoren en in aandrijvingen voor de motoren en drives. De mechanische koppeling zorgt voor een elektromagnetische ontkoppeling tussen de twee netdelen. De traagheden in het systeem creëren een zeer goed filter voor harmonische vervormingen.

Nadeel van dit type omvormer is het vrij lage rendement, welke het product is van de rendementen van de generator en de motor.

Een roterende omvormer met asynchrone motor en synchrone generator is toegepast voor een onderzoeksschip in Duitsland in 2004

Referentie HANSA magazine 141. Jahrgang-2004 nr. 9 –0 Sh 119

Gevoelige meetapparatuur vraagt een zeer schone distributiespanning.

Bewezen techniek: zelfde range als generatoren en motoren

Nieuwe techniek afhankelijk van ontwikkeling generatoren en motoren

Toekomst: afhankelijk van ontwikkeling generatoren en motoren

3.3 Statische omvormer

Statische omvormers worden hoofdzakelijk gebruikt voor het veranderen van de frequentie. Als het spanningsniveau veranderd moet worden of twee netdelen galvanische gescheiden moeten zijn, wordt een transformator toegevoegd.

Vier basisconversies zijn te onderscheiden:

1. AC/AC conversie,
2. AC/DC conversie,
3. DC/AC conversie,
4. DC/DC conversie.

Deze conversies kunnen opgebouwd worden uit de volgende componenten: gelijkrichter, inverter, (DC) chopper. De techniek van deze componenten is besproken in het hoofdstuk over conversie t.b.v. voorstuwing.

Trends in de ontwikkeling van vermogenselektronische omzetter is een toenemende spanning, hogere schakelfrequentie en verbeteren van het rendement, en dus de vermogensdichtheid. Verbeteringen worden bereikt door het "stacken" van componenten (zowel parallel als serieel) en de afnemende verliezen in componenten.

Bewezen techniek: afhankelijk van type omzetter zie tabel 3

Nieuwe techniek hoogspanningsconverters

Toekomst: toename vermogensdichtheid

Een roterende omvormer met asynchrone motor en synchrone generator is toegepast voor een onderzoeksschip in Duitsland 2004

Referentie HANSA magazine 141. Jahrgang-2004 nr. 9 –0 Sh 119

Gevoelige meetapparatuur vraagt een exclusief schoon distributie spanning

Een roterende omvormer met synchrone motor en generator is toegepast op de veerboten PSD 1995

Het vaarprofiel is 50% varen en 50 % laden lossen

De frequentie van het voortstuwingsnet wordt tijdens laden/lossen verlaagd naar 60%

E.er.a leidt tot een brandstof besparing van circa 500 ton per jaar.

(1 MW besparing x 3000 uur x 180gr/kWh = 540 ton/jaar)

De verschillende manieren van conversie worden geïllustreerd in de volgende figuur.

Tabel 3. Kengetallen van omzetterts.

Omschrijving		Distributie transformator	AC-DC converter (gelijkrichter)	DC-DC converter	DC-AC converter
Technologie GES		1	2	2	2
Vermogen	[kW]		22000	100	2300
Schijnbaar vermogen	[kVA]	3150			
Rendement	[%]	99	99	96	98
Spanning	[V]	12000	4000~	600	690~
nominale stroom	[A]	150	-	167	2340~
Toelaatbare kortsluitstroom	[kA]		-	-	3.2
Gewicht	[kg]	6900	-	-	1350
Volume	[m ³]	7.5	13.5		2.2
Footprint lxb	[m ²]	2.25x1.25	4.4x1.2		1.8x0.6
Kabeloppervlak	[mm ²]	200	-		300
vermogensdichtheid	[MVA/m ³]	0.4	1.6		1.1
Prijs	€				

ENERGIE OPSLAG

BIJLAGE D4

AES-Nieuwe Technologie

Teamleden: Jos van der Burgt (TNO),

INHOUDSOPGAVE

1.	INLEIDING	1
1.1	Beschikbaarheid/betrouwbaarheid	1
1.2	Vermogensprofiel.....	1
1.3	Energieopslagsystemen	1
2.	ALGEMENE EIGENSCHAPPEN VAN ENERGIEOPSLAGSYSTEMEN.....	2
2.1	Opladbare batterijen	2
2.1.1	Lood-zwavelzuur (Pb-A).....	2
2.1.2	NiCd.....	3
2.1.3	Nikkelmetaalhydride (NiMH)	3
2.1.4	Li-ion	3
2.1.5	Li-polymeer	4
2.1.6	NaNiCl	4
2.1.7	Vermogens- en energiebereik van verschillende batterijtypen.....	4
2.2	Supercondensatoren	5
2.2.1	Symmetrisch.....	5
2.2.2	Hybride.....	5
2.3	Vliegwielen	6
2.4	SMES.....	7
2.4.1	Bestaande technologie	7
2.4.2	Nieuwe technologie.....	8
2.4.3	Toekomstige technologie	8
2.5	Redoxflow-batterij.....	8
2.6	Literatuur	9
3.	PARAMETERS VAN ENERGIEOPSLAGSYSTEMEN (INDICATIEF).....	10
3.1	Opmerkingen bij de tabellen	10
3.2	Bestaande technologie (nu)	11
3.3	Nieuwe technologie (0-5 jaar).....	13
3.4	Toekomstige technologie (5-10 jaar)	15
4.	BIJLAGE.....	17

1. INLEIDING

1.1 Beschikbaarheid/betrouwbaarheid

Een energieopslagsysteem kan gebruikt worden om tijdelijk de functie van de opwekkers over te nemen als die storing hebben. Hiermee wordt de betrouwbaarheid van de energievoorziening verhoogd (1^e voordeel van energieopslag). Ook kan de energieopslag gebruikt worden om wisselingen van de vermogensvraag op te vangen, waardoor de opwekkers in een gunstig werkgebied blijven draaien (2^e voordeel van energieopslag). Dit laatste wordt aangeduid met *peak shaving*. Hiervoor is in het algemeen een kleiner systeem nodig dan voor de back-up-functie.

1.2 Vermogensprofiel

Vooraf voor de dimensionering i.v.m. *peak shaving* is het vermogensprofiel (en met name de vermogensschommelingen) van het schip van belang. Het opslagsysteem kan opgeladen worden door de opwekkers, maar ook door bepaalde verbruikers die vermogen kunnen regenereren (= recupereren), m.n. elektrisch remmende motoren (b.v. vierende kranen: tijdelijk tot wel 1 MW op een offshoreschip). Dit terugwinnen van energie is het 3^e voordeel van energieopslag.

N.B. Terugleveren van remenergie van de hoofdvoortstuwning is bij schepen niet praktisch. In een algemene beschouwing kan het vermogensprofiel gekarakteriseerd worden met parameters als:

- Verhouding tussen voortstuwings- en huishoudvermogen;
- Percentage van de vermogenswisseling t.o.v. basisvermogenslast;
- Tijdconstante van de vermogenswisseling;
- Regeneratie van remenergie (niet van de hoofdvoortstuwning, maar van andere grote aandrijvingen).

1.3 Energieopslagsystemen

De vijf energieopslagsystemen die in dit hoofdstuk aan bod komen zijn:

- Oplaadbare batterijen;
- Supercondensatoren;
- Vliegwielen;
- SMES;
- Redoxflow-batterij;

2. ALGEMENE EIGENSCHAPPEN VAN ENERGIEOPSLAGSYSTEMEN

2.1 Oplaadbare batterijen

In een secundaire (oplaadbare) batterij wordt bij het ontladen chemische energie direct omgezet in elektrische energie en omgekeerd bij het opladen.

De elektrische-energieerendementen (ten gevolge van verliezen bij laden en ontladen) van batterijen hangen sterk af van een juiste dimensionering en een goede afstemming op de rest van het systeem. Indien dit juist gebeurt, zijn rendementen van 80 % of meer goed haalbaar, onafhankelijk van batterijtype.

In het algemeen kan onderscheid worden gemaakt tussen open en gesloten batterijen. Bij open batterijen (voornamelijk lood-zwavelzuur en nikkel-cadmium) is van tijd tot tijd bijvullen met water nodig. De gesloten batterijen (worden steeds meer toegepast) vereisen geen onderhoud. In alle gevallen zijn zij voorzien van een overdrukventiel.

Supercaps en batterijen bestaan op celniveau uit compacte constructies die nauwelijks gevoelig zijn voor invloeden van trillingen of vocht. Vaak geldt hetzelfde voor modules, maar afhankelijk van de gekozen opbouw kunnen verbindingkabels enige gevoeligheid hebben. De belangrijkste omgevings-factor blijft de temperatuur. Een lage omgevingstemperatuur vermindert doorgaans de prestatie. Een hoge temperatuur stelt strengere eisen aan de koeling of begrenst ook de prestatie. Er worden door deze technologieën geen trillingen of geluid geproduceerd.

De spanning van een batterij is tot op zekere hoogte tamelijk constant, onafhankelijk van de stroom of de ladingstoestand. Daarom is in de meeste conventionele toepassingen van batterijen de netspanning (soms slechts één of enkele verbruikers) gelijk aan de batterijspanning (b.v. onderzeeboot, autoaccu). Voor een betere controle van batterijen (regeling van de spanning, de op- en ontladestroom en de ladingstoestand) wordt in moderne toepassingen een converter tussen de batterij en het net opgenomen.

In het onderstaande worden 5 typen batterijen besproken, omdat deze het meest kansrijk zijn voor toepassing op schepen op korte en/of lange termijn.

In de navolgende tabellen (aan het einde van dit hoofdstuk) worden de belangrijkste parameters gegeven van de verschillende typen batterijen. Bedacht moet worden dat dit slechts een indicatie geeft; zelfs voor één type batterij kunnen alle parameterwaarden nog sterk uiteenlopen. Dit hangt af van de samenstelling en opbouw van de batterij die per toepassing vaak sterk verschilt.

Batterijen voor hybride aandrijving bijvoorbeeld zijn zo ontworpen dat ze een hoog specifiek vermogen kunnen leveren en, daarmee samenhangend, dan onvermijdelijk een relatief lage specifieke energie hebben. Voor batterij-elektrische aandrijving en ook voor draagbare apparatuur wordt juist een zeer hoge specifieke energie nagestreefd (grote actieradius resp. lange gebruiksduur). Het specifieke vermogen is dan, voor dezelfde batterijchemie, veel lager dan in het geval van hybride aandrijving.

In de praktijk betekent dit dat bij selectie van een batterijtype voor een bepaalde toepassing als uitgangspunt de eisen in die toepassing genomen moeten worden en daarbij de potentieel geschikte batterijtypen gekozen moeten worden.

2.1.1 Lood-zwavelzuur (Pb-A)

Bestaande technologie.

De lood-zwavelzuurbatterij is relatief goedkoop en is reeds zeer lang commercieel beschikbaar. Nadelen zijn de lage energiedichtheid, lage specifieke energie en de relatief korte levensduur. De batterij kan niet goed tegen volledig ontladen. Omdat de lood-

zwavelzuurbatterij niet helemaal mag worden ontladen, zal een grotere capaciteit nodig zijn dan de hoeveelheid energie die de batterij moet kunnen leveren. Inmiddels komen er wel steeds meer gesloten batterijen op de markt zoals VRLA (Valve Regulated Lead Acid). Deze hebben veelal een langere levensduur en hebben geen onderhoud nodig. Ze zijn echter nog niet voor alle toepassingen beschikbaar.

Lood-zwavelzuur batterijen worden vrijwel volledig gerecycled (> 98 %) en vormen daarom geen grote belasting voor het milieu. Bij lekkage kan zwavelzuur vrij komen, met name bij open batterijen. Bij laden van een reeds volgeladen batterij ontstaat waterstof en/of zuurstof. Bij open batterijen dient hiermee rekening te worden gehouden, vooral bij grote batterijpakketten in een beperkte ruimte (b.v. op een onderzeeboot).

2.1.2 NiCd

Bestaande technologie.

Nikkel-cadmium heeft een hogere energiedichtheid dan lood-zwavelzuur. Ook deze batterijen zijn commercieel beschikbaar. Belangrijke nadelen zijn het geheugeneffect van NiCd (niet alle types) en de toxiciteit van cadmium. Als deze batterijen slechts deels worden ontladen, hebben ze de neiging zich te gaan gedragen als een batterij met een kleinere capaciteit (het 'geheugeneffect'). Daarom is het belangrijk deze batterijen regelmatig helemaal te ontladen en weer te laden. Daarnaast staat het gebruik van cadmium in batterijen en daarmee de batterij zelf om milieutechnische redenen ter discussie, wat de argumentatie voor de keuze voor deze batterijen niet zal versterken. Langzamerhand worden ze in diverse toepassingen vervangen door nikkel-metaalhydride. Voordeel van NiCd-batterijen is met name de relatief goede werking bij lage temperaturen.

De grotere nikkel-cadmium batterijen worden in het algemeen gerecycled. Voor de kleinere (consumententoepassing) is dit lang niet altijd het geval (inzameling is vrijwillig en bovendien niet separaat per type). Bij lekkage kan loog vrij komen, met name bij open batterijen. Evenals bij lood-zwavelzuur moet bij open batterijen rekening worden gehouden met de vorming van waterstof/zuurstof.

Voor defensietoepassingen is het van belang om aandacht te besteden aan de elektromagnetische eigenschappen van nikkel (geldt ook voor andere nikkelbevattende batterijtypen). De magnetische eigenschappen van batterijen en supercaps worden bepaald door hun behuizing en zijn waarschijnlijk verwaarloosbaar (zeker voor niet-militaire toepassingen). Wel kunnen merkbare velden ontstaan t.g.v. het trekken van hoge tot zeer hoge (supercaps) stromen. De verwachte magnetische velden zijn echter veel kleiner dan b.v. in het geval van SMES (Bij 1000 A is het B-veld op 10 m afstand in de orde van 20 micro Tesla).

2.1.3 Nikkelmetaalhydride (NiMH)

Nieuwe technologie.

In de nikkelmetaalhydride batterij is het cadmium vervangen door een metaalhydride. Het elektrolyt is vergelijkbaar (loog).

De NiMH-batterij heeft een relatief hoog rendement (lage inwendige weerstand) en is milieuvriendelijk. De energiedichtheid van deze batterij is hoger dan die van Pb-A en NiCd. Ze kan relatief snel worden geladen en de levensduur is langer dan die van lood-zwavelzuuraccu's. NiMH is over het algemeen wel duurder dan Pb-A en NiCd. Desalniettemin worden ze steeds vaker toegepast. Recycling technologie is bekend, doch aangezien de meeste Ni-MH batterijen momenteel nog in consumententoepassingen worden gebruikt, worden lang niet alle batterijen daadwerkelijk gerecycled.

Ni-MH wordt steeds meer in automobieltoepassingen gebruikt. Voor scheepstoepassingen zal de prijs ten opzichte van de loodaccu moeten afnemen.

2.1.4 Li-ion

Nieuwe technologie.

Lithium is de ideale grondstof voor batterijen: het is licht en heeft een hoge elektrische potentiaal. Helaas is lithiummetaal instabiel, waardoor vrijwel altijd gebruik wordt gemaakt van lithium-koolstof verbindingen (lithium-ion batterij) met een vloeibaar elektrolyt. Hiervan is

de spanning en de energiedichtheid minder hoog dan mogelijk bij lithiummetaal, doch wel aanzienlijk hoger dan die van NiMH.

Bij alle lithiumbatterijen (dus ook Li-ion) is veiligheid een belangrijk item. Te diep ontladen en ook overladen kunnen tot problemen leiden, vanwege het sterk reactieve karakter van lithium. Daarom zijn in de lithiumbatterijen, afkomstig van gerenommeerde bedrijven, altijd standaard beveiligingen geïmplementeerd (overdrukventiel, elektronische bewaking). Tot nu toe worden lithiumbatterijen vooral gebruikt in kleine afmetingen (mobiele telefonie etc).

Voor automotieve toepassingen komen er langzamerhand commerciële uitvoeringen beschikbaar, waardoor ook de toepassing op schepen in zicht komt. De prijs vormt hierbij de grootste belemmering, maar ook opschaling gaat niet zonder problemen.

Recycling is mogelijk doch vindt nog lang niet altijd plaats (omdat veel lithium-ion batterijen in consumententoepassingen worden gebruikt). Lithium als zodanig is niet toxisch. Echter de kathode bevat meestal kobalt of nikkel, dat wel toxisch is. Mede om die reden, maar ook uit het oogpunt van veiligheid, wordt veel aandacht besteed aan kathodes op basis van mangaan en ijzerfosfaten. Ook in het elektrolyt (organisch oplosmiddel met lithiumzout en andere additieven) zijn vaak kleine hoeveelheden toxische stoffen aanwezig, bijvoorbeeld arseen.

2.1.5 Li-polymeer

Nieuwe technologie.

Lithium-polymeerbatterijen worden steeds meer geproduceerd voor kleinschalige toepassingen (mobiele telefonie) en lijken zeer succesvol te worden. Lithium-polymeerbatterijen zijn vergelijkbaar met Li-ion batterijen, ook qua energiedichtheid, doch hebben een polymeer elektrolyt en bevatten dus geen vloeistof (geen lekkage mogelijk en daardoor veiliger). Het is nog onduidelijk of bij grotere capaciteiten de temperatuur altijd goed in de hand kan worden gehouden tijdens laden en ontladen. Deze batterijen zijn daarom pas op wat langere termijn een reële optie in grootschaliger toepassingen.

2.1.6 NaNiCl

Nieuwe technologie.

De natrium-nikkelchloride batterij is een batterij die bij 300° C werkt. De batterijmodules zijn opgebouwd uit een groot aantal cellen in serie en parallel, die ondergebracht zijn in een vacuum geïsoleerde container om warmteverlies te minimaliseren. De batterij heeft een hoge energiedichtheid (nog wat hoger dan NiMH) en bestaat uit relatief goedkope, weinig toxische materialen. Nadeel van de hoge temperatuur is het, ondanks isolatie, relatief grote warmteverlies, met name als de batterij buiten gebruik is (in normaal gebruik wordt het warmteverlies gecompenseerd door ohmse verliezen). Daardoor is de batterij vooral geschikt voor toepassingen waarin de batterij min of meer continu in gebruik is. De batterij is in eerste instantie voor wat grootschaliger toepassingen ontwikkeld en is min of meer commercieel verkrijgbaar.

Een mogelijk probleem is dat er wereldwijd slechts één bedrijf actief met de ontwikkeling bezig is (in tegenstelling tot alle andere batterijtypen die door een groot aantal bedrijven worden ontwikkeld).

2.1.7 Vermogens- en energiebereik van verschillende batterijtypen

Bestaande en nieuwe technologie:

Alleen lood-zwavelzuur wordt toegepast voor relatief grote vermogens en energie-inhoud (maximaal orde tot 10 MW, 10 MWh). Meest verbreide toepassing: onderzeebootaandrijving met speciale cellen. Daarnaast enkele (verouderde) peak-shaving installaties op het land (meestal eilandbedrijf).

Alle andere types komen niet verder dan orde 10-100 kWh, 100 kW (batterijen in elektrische voertuigen en vaartuigen, hybride aandrijving bussen).

Toekomstige technologie:

Er zijn geen principiële belemmeringen voor grote vermogens en energie-inhoud voor alle besproken typen batterijen. Grootste punt zijn kosten (bij een factor 10 schaalvergroting neemt de prijs circa een factor 10 toe). Omdat de kosten van alternatieven van loodzwavelzuur in het algemeen veel hoger zijn (een factor 5 of meer op dit moment) is de verwachting dat behoeften aan grootschalige systemen voorlopig ingevuld zullen worden met loodzwavelzuur.

Voor onderzeeboottoepassing worden 3 typen alternatieve batterijen bestudeerd en systeemconcepten ontwikkeld: lithium-ion, nikkel-metaalhydride en natrium-nikkelchloride. De ontwikkeling van modules van bijv. enkele tientallen Ah capaciteit tot systemen is echter een weg die jaren duurt (orde 5 jaar of meer). Als een of meer van deze ontwikkelingen succesvol zijn (eerder door wensen van de auto-industrie dan de maritieme) en de kosten van alternatieve systemen omlaag gaan, dan is er op langere termijn zicht op grote systemen met andere batterijen dan lood-zwavelzuur.

2.2 Supercondensatoren

Nieuwe technologie.

Bij elektrochemische- of supercondensatoren onderscheidt men elektrische dubbellaag condensatoren ('symmetrische') en condensatoren die gebruik maken van zgn. pseudo capaciteit ('hybride' of 'asymmetrische').

2.2.1 Symmetrisch

De meeste beschikbare technologieën behoren tot de symmetrische condensatoren. Hierbij worden in principe twee (vrijwel) gelijke elektroden gebruikt welke zijn gemaakt van hoogoppervlak koolstof, en worden waterige of organische elektrolyten toegepast. Een waterig elektrolyt is goedkoop, milieu vriendelijk, laat een lage inwendige weerstand per cel toe, maar beperkt het operationele spanningsvenster tot ca. 1,8 V. Organische elektrolyten hebben over het algemeen een slechtere elektrische geleiding, meer milieubezwaren, maar een groter spanningsvenster van ca. 2,5 V. Symmetrische dubbellaag condensatoren hebben een gedrag dat lijkt op dat van conventionele condensatoren, zijn dus goed in specifiek vermogen. Ze hebben een specifieke energie veel hoger dan conventionele condensatoren, maar veel lager dan b.v. batterijen. De ladingopslag in de elektrische dubbellaag neemt geen materiaalveranderingen met zich mee, zodat de cycleerbaarheid zeer goed is (in theorie zelfs onbegrensd).

2.2.2 Hybride

Om een hogere specifieke energie te bereiken wordt een van de koolstofelektroden in het hierboven beschreven concept wel vervangen door een elektrode welke zijn capaciteit vooral bezit t.g.v. een Faraday reactie, b.v. een reversibele redox reactie. De met deze reactie gepaard gaande capaciteit wordt dan pseudo capaciteit genoemd. Het gedrag lijkt meer op dat van een batterij elektrode. De gehele cel wordt een asymmetrische of hybride elektrochemische condensator genoemd en bestaat dus uit een dubbellaag capaciteit elektrode en een "batterij-achtige" elektrode. Vergeleken met de symmetrische dubbellaag condensatoren, hebben deze hybride devices een vrijwel even hoog specifiek vermogen, maar een veel hogere specifieke energie. De enkele nu verkrijgbare technologieën combineren een hoogoppervlak koolstof elektrode met een NiOOH elektrode en een KOH elektrolyt. Er zijn ook andere varianten in ontwikkeling. Afhankelijk van het type, kan de pseudo capaciteit elektrode in principe een begrenzing van de cycleerbaarheid met zich meebrengen.

Overdrukventiel bij supercaps: risico van gevaarlijke ontsnappende gassen

Sommige typen supercondensatoren hebben geen waterig elektrolyt maar gebruiken dezelfde organische verbindingen die ook in lithiumbatterijen worden toegepast. Hierbij is

met name het gebruik van acetonitril aanleiding voor mogelijke milieu- en gezondheidsrisico's bij misbruik of disposal van het device.

De spanning van een supercondensator is lineair evenredig met de ladingstoestand. De lading mag tot 50% gereduceerd worden voor een goede werking van de supercondensator, waarbij de spanning dan ook tot 50% terugloopt. De energieinhoud is dan nog 25% (kwadratisch afhankelijk van de ladingstoestand). Als de netspanning constant moet zijn, zal er een converter nodig zijn om de supercondensator te koppelen aan het distributienet. Echter, soms wordt een variabele busspanning toegepast, in welk geval er geen aparte converter bij de supercondensator geplaatst hoeft te worden. De converter verzorgt naast de spanningsaanpassing ook het op- en ontladen en de verdere bewaking van het energieopslagsysteem.

Supercondensatoren zullen aan boord van schepen vrijwel uitsluitend in combinatie met batterijen gebruikt gaan worden, en dan nog alleen wanneer de batterijen niet voldoende piekvermogen kunnen leveren (voor energie zijn batterijen beter dan supercondensatoren). Het gebruik van supercondensatoren hangt dus af van een zeer specifieke, terugkerend kortstondige vermogensvraag in combinatie met energieopslag.

2.3 Vliegwielen

Een vliegwiel voor energieopslag zet de elektrische energie om in kinetische energie van een sneldraaiende vliegwielmassa en vice versa. Dit gebeurt door een elektrische machine die in het vliegwiel is geïntegreerd. Bij het opladen van het vliegwiel werkt deze als motor, bij het ontladen als generator. Een vliegwielstelsel wordt ook wel aangeduid als magnetodynamische energieopslag (magneto-dynamic storage = MDS). Vliegwielen zijn mechanische en elektrisch robuust.

Bestaande technologie

De eenvoudige vliegwielen zijn stalen vliegwielen, die een grote massa hadden, maar een beperkt toerental. Deze worden nog gebruikt voor stationaire toepassingen (no-break-functie).

Nieuwe technologie

De moderne vliegwielen zijn van vezelversterkt kunststof en de kinetische energie wordt vooral gehaald uit het hoge toerental (tot 40000 toeren), aangezien de opgeslagen energie evenredig is met de massa en het kwadraat van het toerental. Om de luchtwrijvingsverliezen van het sneldraaiende vliegwiel te minimaliseren bevindt het zich in een vacuümbehuizing, waarvoor een vacuümpomp met toebehoren nodig is.

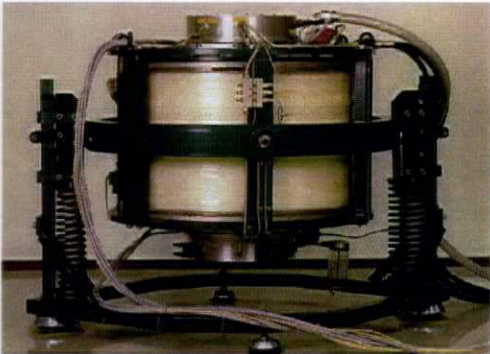
Algemeen

Het vliegwiel heeft een gyroscopisch effect, dus voor mobiele toepassingen moet het opgehangen worden in een cardanisch systeem, zodat dit gyroscopisch effect niet op het voer- of vaartuig wordt overgedragen. Voor stationaire toepassingen is geen cardanische ophanging nodig. Vliegwielstelsels vergen zeer weinig onderhoud, behoudens een periodieke controle van de lagering en het vacuüm. Het vliegwiel zelf en de elektrische machine zijn onderhoudsvrij. De levensduur (het aantal laad-ontlaadcycli) van vliegwielen is dan ook zeer hoog en ze kennen geen degradatie van de functionaliteit. De energiedichtheid is lager dan die van batterijen maar de vermogensdichtheid is hoger.

Uit veiligheidsoverwegingen worden met vliegwielen overtoerentesten gedaan. De vezelversterkte rotor breekt daarbij niet in stukken, maar de vezels worden a.h.w. uit het bindmiddel losgetrokken en er ontstaat een soort vezelknot die zeer snel afremt tegen de binnenwand van de vacuümbehuizing. De veiligheid naar buiten toe is daarmee gegarandeerd. Bij het machineontwerp wordt de nodige aandacht besteed aan het beperken van geluid en trillingen.

De AC-frequentie en de amplitude van de uitgangsspanning van het vliegwiel zijn evenredig met het toerental en zullen dus teruglopen tijdens de ontlading. Er zal dan ook altijd een

converter nodig zijn om de vliegwielspanning te matchen aan de spanning van het distributienet. Voor de meeste voertuigtoepassingen is de netspanning een gelijkspanning, voor andere toepassingen zal vaak een wisselspanning (50 of 60 Hz) de voorkeur hebben. De nullastverliezen (vooral lagering) zijn vrij hoog. Bij mechanische lagering liggen deze in de orde van 10% per uur (!), bij magnetische lagering kan dit verbeterd worden tot ca. 2%/h. Dit geeft aan dat vliegwielen niet geschikt zijn om energie langdurig op te slaan, maar meer voor snelle laad-ontlaadcycli. Om deze reden heeft het vliegwiel zich vooral bewezen in bussen en trams om de remenergie op te slaan en als acceleratie-energie weer af te geven. Een vliegwiel in schepen is uitsluitend interessant als een bepaalde groep verbruikers een soortgelijk vermogensprofiel heeft, mogelijk een hijskraan of een samenstel van een aantal kranen.



Vliegwiel van CCM (Nuenen, NL), toegepast in bussen en trams.



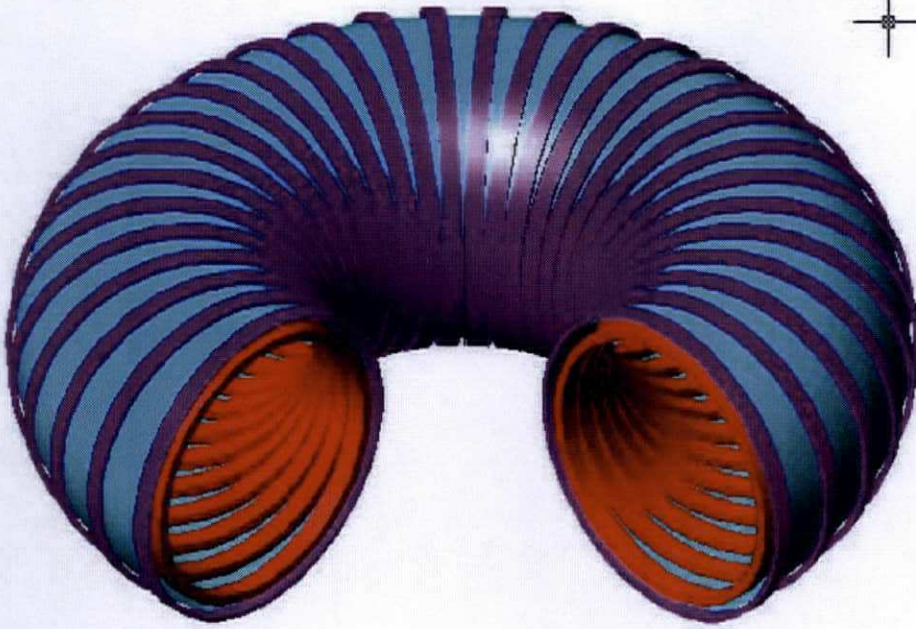
Vliegwiel van MagnetMotor (Dui)
 Vlnr: Testmodel 80 MJ / 5 MW, prototype 80 MJ / 2,5 MW, MDS K3 (7.2 MJ / 150 kW) voor bussen.

2.4 SMES

Elektrische energie kan worden opgeslagen als magnetische energie in een elektrische spoel (waardoorheen een bepaalde stroom loopt). Om de weerstandsverliezen in zo'n spoel te minimaliseren moet een spoel van supergeleidend materiaal gebruikt worden (weerstand praktisch nul). Deze vorm van energieopslag heet supergeleidende magnetische-energieopslag (superconducting magnetic energy storage = SMES).

2.4.1 Bestaande technologie

De eerste toepassing van supergeleidende magneetspoelen was het maken van magneten met een zeer hoog magneetveld (tot 25 Tesla, typisch 5 T) voor fysische experimenten (deeltjesversnellers en kernfusie) vanaf eind jaren '70. Het supergeleidende materiaal van de spoel moet op een voldoende lage temperatuur worden gehouden om zijn eigenschappen te behouden, zelfs bij gebruik van zogenaamd hoge-temperatuur supergeleidend materiaal (ca. -200° C). Hiervoor is een koelsysteem nodig dat een behoorlijk volume inneemt. Het SMES systeem kan een zeer groot uitgangsvermogen hebben. SMES heeft een zeer hoge vermogensdichtheid, ca. een factor 1000 hoger dan andere opslagmethoden, maar de energiedichtheid is lager dan die van batterijen of vliegwielen.



Voorbeeld van een toroïdale (= donut-vormige) spoel voor SMES

2.4.2 Nieuwe technologie

In de USA en Japan zijn enkele toepassingen van SMES in openbare elektriciteitsnetten in gebruik (vanaf juli 2000) om pieken in de vraag (van enkele seconden) op te vangen. Het vermogen ligt in de orde van 1 MW, het totale systeem inclusief koeling en vermogensomzetter past in een vrachtwagen.



IGC's 6 MJ, 750 kW, Micro-SMES "IPQ-750"

Bij SMES is de spanning sterk afhankelijk van de stroom en de ladingstoestand (geen lineair verband). Er is dan ook een converter nodig om het SMES-systeem te koppelen aan het distributienet met zijn verbruikers. De converter verzorgt naast de spanningsaanpassing ook het op- en ontladen en de verdere bewaking van het energieopslagsysteem.

2.4.3 Toekomstige technologie

SMES zou toegepast kunnen worden op schepen om schommelingen in het gevraagde vermogen op te vangen. Voorlopig is SMES echter veel te duur (met name het supergeleidende materiaal) voor deze toepassing.

2.5 Redoxflow-batterij

Nieuwe technologie

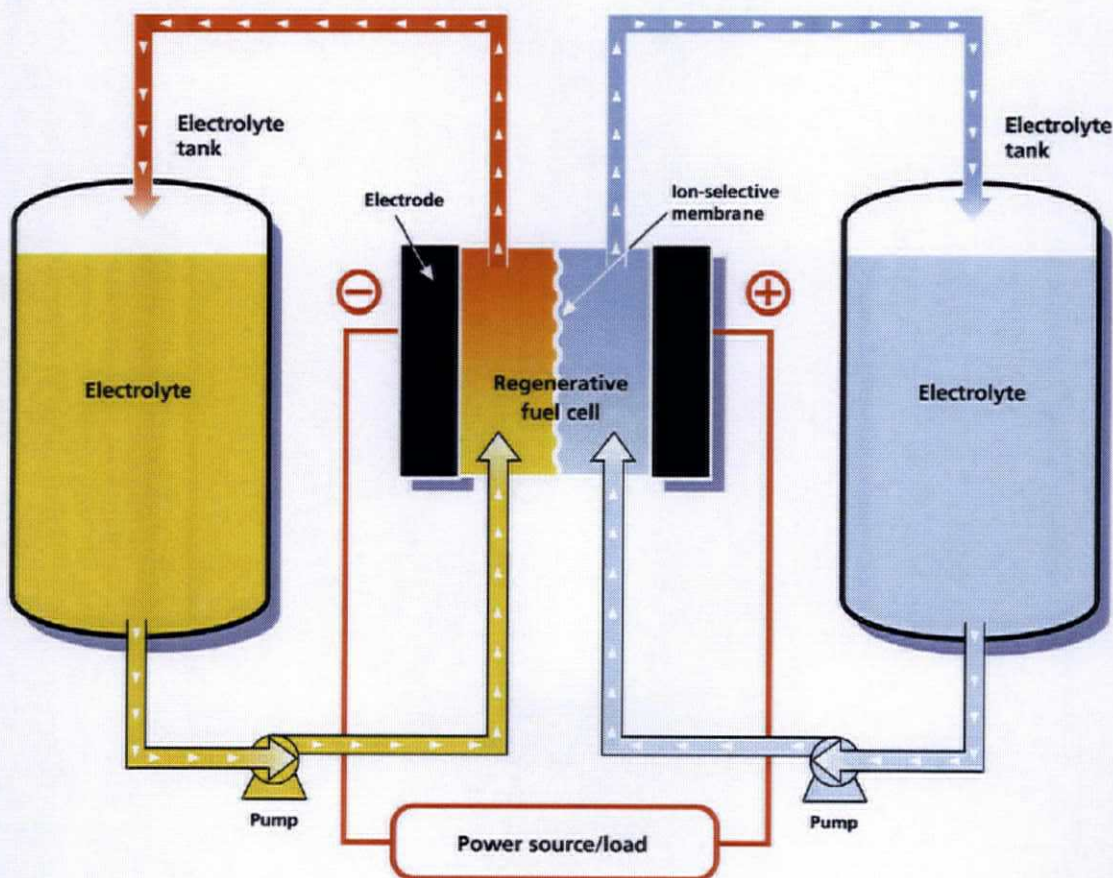
De redoxflow batterij is ook een oplaadbare batterij. Bij de redoxflow batterij zijn echter de reactanten en omzettingsproducten vloeibaar, terwijl bij de eerder genoemde batterijen deze meestal vast zijn. Dit betekent dat bij de redox flow batterij de reactanten en producten van

en naar voorraadvaten gepompt kunnen worden. Daardoor kan de energieopwekfunctie (vermogen leveren) gescheiden worden van de opslagfunctie (energie-inhoud). Een redox flow systeem bestaat dan uit twee delen:

- Twee opslagvaten voor de benodigde elektrolyten
- Een elektrochemische reactor met pompen, leidingen e.d. waarin de elektrolyten worden geladen en ontladen.

De redoxflow batterij is vooral bedoeld voor grootschalige stationaire toepassing. Voor mobiele toepassing lijkt deze batterij vooralsnog niet geschikt omdat energiedichtheid en vermogensdichtheid relatief laag zijn. Dat ze toch ontwikkeld worden is omdat bij grote schaal de kosten erg laag kunnen zijn. De ontwikkeling gaat echter zeer traag (slechts een of twee partijen zijn ermee bezig en het opschalen is een probleem).

De meest bekende typen zijn vanadium, ijzer-chroom en polysulfide-bromide.



Principe van de Redoxflow-batterij.

2.6 Literatuur

- [1] Electricity Storage Association (ESA)
<http://www.electricitystorage.org>

3. PARAMETERS VAN ENERGIEOPSLAGSYSTEMEN (INDICATIEF)

In de volgende tabellen zijn de parameters voor de verschillende energieopslagsystemen opgenomen. Per technologiefase (achtereenvolgens bestaand, nieuw en toekomstig) is er één tabel voor batterijen en één voor de overige systemen.

3.1 Opmerkingen bij de tabellen

(Terug te vinden in de tabellen voor Bestaande technologie, maar ook geldig voor nieuwe en toekomstige technologie.)

Batterijen:

- * Het rendement hangt vooral af van bedrijfswijze en dimensionering, niet van batterijtype;
- ** Alle batterijsystemen zijn modulair van opbouw;
- *** Indien de batterij warm gehouden moet worden uit de eigen capaciteit, is de "zelfontlading" erg groot (kan oplopen tot enkele tientallen procenten per etmaal);
- (+) De celspanning van Li-batterijen is afhankelijk van samenstelling;
- (#) Een batterij levert vooral energie, de kosten per vermogenseenheid zijn niet relevant.

Overige energieopslagsystemen:

- (1) Kosten van vliegwiel: gebruik voor ontlaadtijden > 20 s de "Kosten per energie-eenheid".
Een vliegwiel is i.h.a. meer een vermogensleverancier dan een energieleverancier.
- (2) Bij een Redoxflow-batterij zitten de kosten voornamelijk in de reactor, die gedimensioneerd wordt naar het te leveren vermogen. Kosten per energie-eenheid (d.w.z. hoeveelheid vloeistof en grootte van de tanks) zijn minder relevant.
- (3) De uitgangsspanning (DC) van supercondensatoren is evenredig met de hoeveelheid elektrische lading. Meestal zorgt een converter voor een constante spanning aan de netzijde.
- (4) Uitgangsspanning en -frequentie van het vliegwiel nemen lineair af met de rotatiesnelheid van het vliegwiel. Een converter zorgt voor een constante spanning aan de netzijde.
- (5) Een SMES is een constante-stroombron. De uitgangsspanning (DC) hangt af van de belasting van het systeem. Om dit te matchen moet er een converter tussen de SMES en de balasting zitten.

3.2 Bestaande technologie (nu)

	Batterijen	Lood-zwavelzuur	NiMH	NiCd	Li-ion	Li-polymeer	NaNiCl
Specifiek vermogen (kortstondig)	[kW/kg]	0.3	0.8	0.2	1	0.5	0.2
Specifieke energie	[kWh/kg]	0.04	0.07	0.05	0.15	0.15	0.1
Vermogensdichtheid (kortstondig)	[kW/l]	0.9	1	0.3	2	1	0.3
Energiedichtheid	[kWh/l]	0.1	0.1	0.1	0.25	0.25	0.15
Specifiek vermogen ÷ specifieke energie	kW/kg ÷ kWh/kg = h ⁻¹	8	10	4	7	3	2
Kosten per energie-eenheid (#)	€/kWh	100-300	1000	300	> 1000	>> 1000	> 1000
Kosten per vermogenseenheid (#)	€/kW						
Verhouding tussen bruikbare energie en opgeslagen energie	(< 1)	0.8	1	1	1	1	1
Rendement bij laden en bij ontladen*	-	>0.8	>0.8	>0.8	>0.8	>0.8	>0.8
Zelfontlading	%Energie/maand	2-4	10	5-10	2	<2	***
Temperatuurbereik	°C	-40 -> +50	-20 -> +60	-40 -> +60	-20 -> +60	-20 -> +50	-40 -> +70
Modulariteit**		-	-	-	-	-	-
Celspanning	[V]	2.1	1.3	1.3	3-4 (+)	3-4 (+)	2.6
Levensduur	[aantal cyclij]	500	1000-2000	1000-2000	2000	> 1000	> 1000
Onderhoud	(beschrijving, geen kentallen)	Water bijvullen open batterijen					

Bestaande technologie (nu)

		Supercondensator Symmetrisch	Supercondensator Hybride	Vliegwiel	SMES (LTC)	Redoxflow-batterij
Specifiek vermogen	[kW/kg]	4	2	0.5	100	< 0.1
Specifieke energie	[kWh/kg]	0.003	0.01	0.01	0.0006	0.03
Vermogensdichtheid	[kW/l]	5	4	0.2	43	< 0.1
Energiedichtheid	[kWh/l]	0.004	0.012	0.01	0.0005	0.03
Specifiek vermogen ÷ specifieke energie	kWh/kWh = h ⁻¹	≥ 500	≥ 200	500	100000	< 3
Kosten per energie-eenheid (1)	€/kWh			20000		
Kosten per vermogensseenheid (1)	€/kW			500		300-1000 (2)
Kosten per capaciteit	[USD/F]	0.10	0.03			
Verhouding tussen bruikbare energie en opgeslagen energie	(< 1)	0.75	0.75	0.75	~ 0.8	> 0.9
Rendement bij laden en bij ontladen		0.80	0.80	0.95 0.95	> 0.9	> 0.7
Zelfontlading	(vermogensverlies of rendement?)	10 mA (12 h, 25 °C)	10 mA (12 h, 25 °C)	P-loss=1% E-loss=10%/h		0
Temperatuurbereik	[°C]	-35, ..., +60	-50, ..., +50	0°..40° (operating) -20°..70° (non-operating)	Onafhankelijk van externe temperatuur	5-50
Modulariteit				Eenvoudig parallel-schakelen		Reactoren modulair, opslag apart van reactoren in tanks
Voltage/cell surge	[V]	2.7	1.6			Vrijwel constante spanning
Voltage/cell rated	[V]	2.4	1.5	(4)	(5)	
Spanningsprofiel (als functie van de diepte van ontlading)		(3)	(3)			
Levensduur	[aantal cycli]	≤ 500 000	≤ 300 000	> 100 000 cycli		> 1000
Onderhoud	(beschrijving, geen kentallen)	--	--	Lagers, vacuüm		elektrolytvervuiling is nog een probleem

3.3 Nieuwe technologie (0-5 jaar)

	Batterijen	Lood-zwavelzuur	NIMH	NiCd	Li-ion	Li-polymeer	NaNiCl
Specifiek vermogen	[kW/kg]						
Specifieke energie	[kWh/kg]						
Vermogensdichtheid	[kW/l]						
Energiedichtheid	[kWh/l]						
Specifiek vermogen ÷ specifieke energie	KW/kWh = h ⁻¹						
Kosten per energie-eenheid	€/kWh]						
Kosten per vermogenseenheid	€/kW]						
Verhouding tussen bruikbare energie en opgeslagen energie	(< 1)						
Rendement bij laden en bij ontladen							
Zelfontlading	(vermogensverlies of rendement?)						
Temperatuurbereik							
Modulariteit							
Celspanning	[V]	2.1	1.3	1.3	3-4	3-4	2.6
Levensduur	[aantal cycli]						
Onderhoud	(beschrijving, geen kentallen)						

Nieuwe technologie (0-5 jaar)

		Supercondensa tor Symmetrisch	Supercondensa tor Hybride	Vliegwiel	SMES (HTG)	Redoxflow- batterij
Specifiek vermogen	[kW/kg]	5	4	2	1500	
Specifieke energie	[kWh/kg]	0.005	0.018	0.02	0.004	
Vermogensdichtheid	[kW/l]	6	5	2	1000	
Energiedichtheid	[kWh/l]	0.010	0.025	0.04	0.005	
Specifiek vermogen ÷ specifieke energie	KW/kWh = h ⁻¹	≥ 500	≥ 100	100	200 000	
Kosten per energie- eenheid	€/kWh]					
Kosten per vermogenseenheid	€/kW]			-		
Kosten per capaciteit	[USD/F]	0.05	0.01			
Verhouding tussen bruikbare energie en opgeslagen energie	(< 1)	0.80	0.80	0.75	~ 0.8	
Rendement bij laden en bij ontladen		0.90	0.90	0.95 0.95	> 0.9	
Zelfontlading	(vermogensverli es of rendement?)	7 mA (12 h, 25 °C)	7 mA (12 h, 25 °C)	P-loss = 1%		
Temperatuurbereik	[°C]	-35, ..., +60	-50, ..., +60			
Modulariteit						
Voltage/cell surge	[V]	2.8	1.8			
Voltage/cell rated	[V]	2.5	1.6			
Levensduur	[aantal cycli]	500 000	300 000			
Onderhoud	(beschrijving, geen kentallen)	--	--			

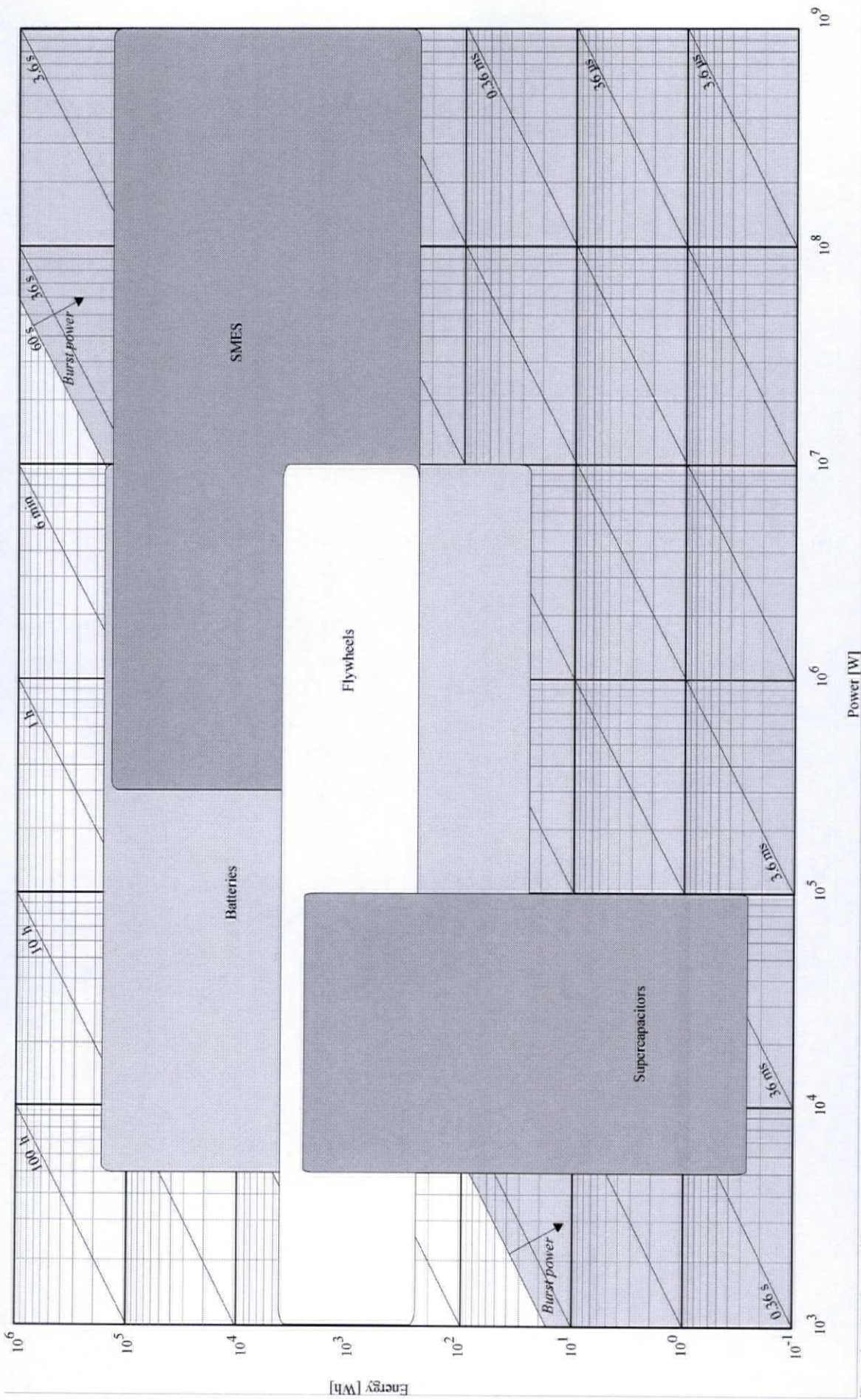
3.4 Toekomstige technologie (5-10 jaar)

	Batterijen	Lood-zwavelzuur	NiMH	NiCd	Li-ion	Li-polymeer	NaNiCl
Specifiek vermogen (kortstondig)	[kW/kg]	1	1.5	0.5	1.5	1	0.3
Specifieke energie	[kWh/kg]	0.05	0.1	0.06	0.25	0.25	0.15
Vermogensdichtheid (kortstondig)	[kW/l]	3	1.2	0.8	2	2	0.5
Energiedichtheid	[kWh/l]	0.15	0.12	0.08	0.5	0.5	0.2
Specifiek vermogen ÷ specifieke energie	kWh/kWh = h ⁻¹	20	10	10	6	4	2
Kosten per energie-eenheid	€/kWh]	100-300	500	500	500	1000	100-200
Kosten per vermogenseenheid	€/kW]						
Verhouding tussen bruikbare energie en opgeslagen energie	(< 1)	0.8	1	1	1	1	1
Rendement bij laden en bij ontladen		>0.8	>0.8	>0.8	>0.8	>0.8	>0.8
Zelfontlading	% energieverlies/maand	2-4	<10	5-10	2	<2	
Temperatuurbereik	C	-40 -> +60	-30 -> +60	-20 > +60	-40 -> +60	-20 -> +60	-40 -> +70
Modulariteit							
Celspanning	[V]	2.1	1.3	1.3	3-4	3-4	2.6
Levensduur	[aantal cycli]	1000	2000	2000	3000	2000	2000
Onderhoud	(beschrijving, geen kentallen)	-	-	-	-	-	-

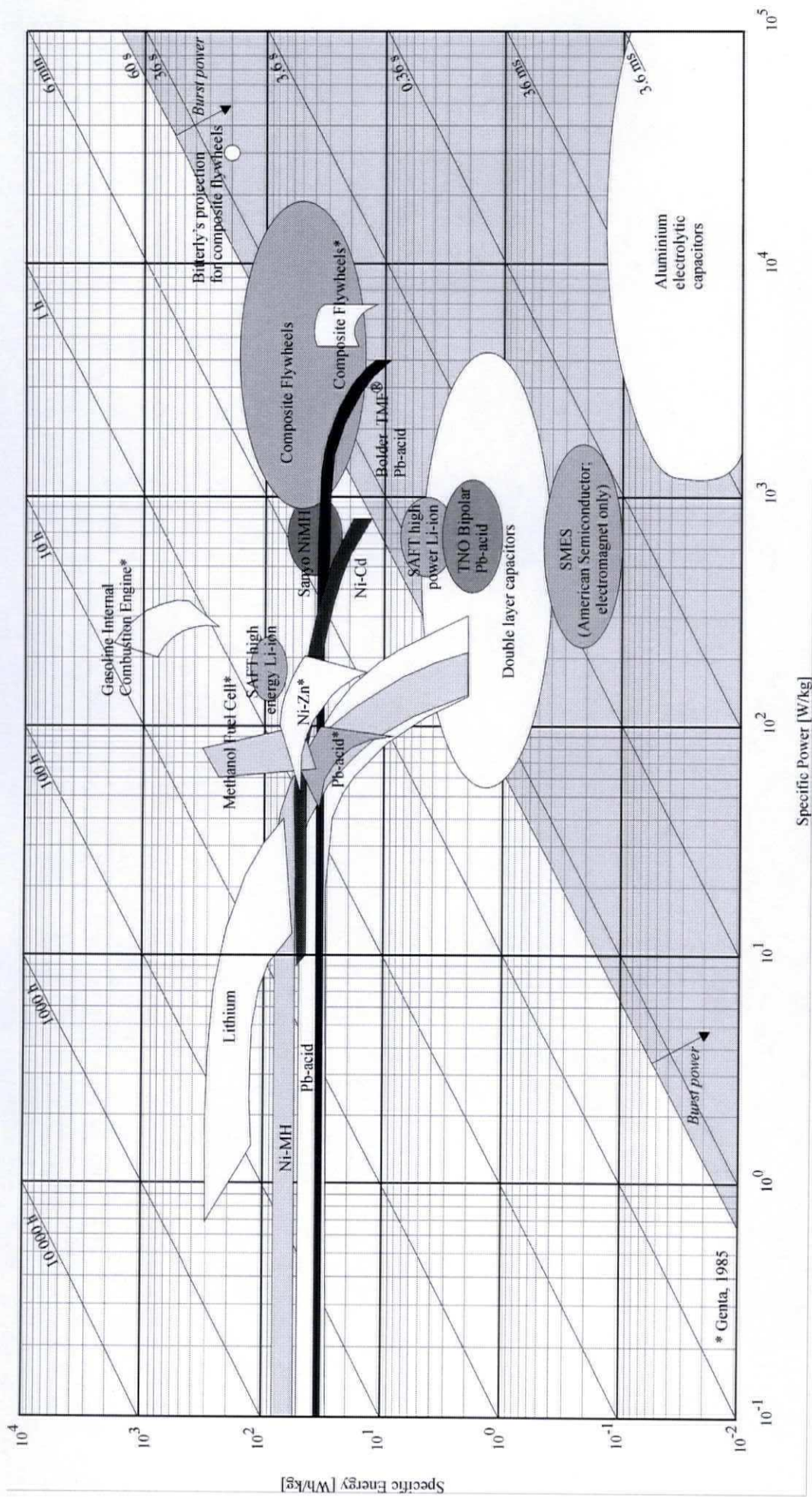
Toekomstige technologie (5-10 jaar)

		Supercondensa tor Symmetrisch	Supercondensa tor Hybride	Vliegwiel	SMES (HTc)	Redoxflow- batterij
Specifiek vermogen	[kW/kg]	5	6	5	10000	0.2
Specifieke energie	[kWh/kg]	0.005	0.025	0.04	0.03	0.06
Vermogensdichtheid	[kW/l]	6	8	4	10000	0.2
Energiedichtheid	[kWh/l]	0.010	0.035	0.07	0.05	0.06
Specifiek vermogen ÷ specifieke energie	kWh/kWh = h ⁻¹	≥ 500	≥ 100	125	200000	3
Kosten per energie- eenheid	€/kWh]					
Kosten per vermogenseenheid	€/kW]			-		<100
Kosten per capaciteit	[USD/F]	0.01	<< 0.01			
Verhouding tussen bruikbare energie en opgeslagen energie	(< 1)	0.80	0.80	0.75	~ 0.8	>0.9
Rendement bij laden en bij ontladen		0.92	0.92	0.96 0.96	> 0.9	> 0.8
Zelfontlading	(vermogensverli es of rendement?)	5 mA (12 h, 25 °C)	5 mA (12 h, 25 °C)	P-loss = 0.5%		0
Temperatuurbereik	[°C]	-35, ..., +60	-50, ..., +60			0-50
Modulariteit						Alleen reactoren modulair, opslag in tanks
Voltage/cell surge	[V]	2.8	2, ..., 3			
Voltage/cell rated	[V]	2.5	2, ..., 3			
Levensduur	[aantal cycli]	≤ 1 000 000	≤ 400 000			>> 1000
Onderhoud	(beschrijving, geen kentallen)	--	--			-

4. BIJLAGE



De vier belangrijkste opslagmethoden met een mogelijk vermogens- en energiebereik.



Verschillende energieopslagsystemen met hun specifieke vermogens- en energiebereik.

VOORTSTUWERS IN SAMENHANG MET ELEKTRISCHE AANDRIJVING

BIJLAGE D5

AES-Nieuwe Technologie

Teamleden: Robert Luth (Damen), Jan Holtrop (Marin)

INHOUDSOPGAVE

1.	SCHEEPSSCHROEVEN.....	1
1.1	Wanneer open, waneer ommantelde schroeven?	2
1.2	Wanneer vaste-spoedschroeven, wanneer verstelbare- spoedschroeven?	2
1.3	Ontwerp van de voortstuwer in samenhang met de (elektrische) aandrijving	3
1.3.1	Vrij te kiezen ontwerptoerental; maximale diameter	3
1.3.2	Gegeven toerental als uitgangspunt	5
1.4	Rendement van de voortstuwer	6
1.5	De invloed van de elektrische aandrijving op de parameters van de voortstuwer.....	8
2.	THRUSTERS.....	10
3.	PODS	11
4.	CONTRA-ROTTERENDE SCHROEVEN.....	13
5.	PUMPJETS/WATERJETS.....	14
6.	ANDERE VOORTSTUWERS	15
7.	LITERATUUR/KENNISBRONNEN.....	17

1. SCHEEPSSCHROEVEN

De bij de voortstuwing van schepen doorgaans toegepaste schroef kan onderverdeeld worden in vier hoofdcategorieën:

- De eerste is de gewone open scheepsschroef met vaste spoed zonder straalbuis.
- De volgende is de door een straalbuis ommantelde schroef met vaste spoed.
- Vervolgens valt de open, verstelbare-spoedschroef te noemen waarvan de bladen om een as kunnen draaien die loodrecht op de schroefas staat.
- Naast de open verstelbare spoedschroeven zijn er ook de door een straalbuis ommantelde schroeven.
-

Van deze vier soorten schroeven worden in dit hoofdstuk enige aspecten beschreven die van belang zijn bij de interactie tussen de aandrijving en de voorstuwer, zaken waarbij rekening te houden is bij het specificeren van eisen en randvoorwaarden. Toepassingsgebieden, onderlinge verschillen, alsook de initiële kosten, de voortstuwingsrendementen, bedrijfszekerheid, enz, worden in het kort genoemd.

Voor het vaststellen van de hoofdparameters van de voortstuwer gebruikt men vaak de experimentele resultaten van systematische schroefseries. Dit zijn doorgaans de karakteristieken van de B-serieschroeven voor open-schroefconfiguraties en de Ka-serieschroeven in ommantelde schroefopstellingen. Ook voor thrusters and pods worden deze resultaten van seriematig schroevenonderzoek gebruikt, zij het soms met enige aanpassingen.

Als vuistregel voor het vaststellen van maximaal toelaatbare specifieke belastingen en tipsnelheden hanteert men vaak de volgende vuistregels: $V_{tip} = \pi D N/60$ (m/sec) $< C_2$ waarbij C_2 de maximaal toelaatbare bovengrens is. Hier is N het toerental in RPM en D is de schroefmiddellijn. Voor koopvaardij schepen stelt men als bovengrens doorgaans: $C_2 = 40$ m/sec. Bij straalbuis schroeven is C_2 ca. 10-20 % lager dan bij open schroeven. Thrusters: $C_2 = 33$ m/sec; (ca. 30 m/sec bij ommantelde thrusterschroeven). Er zijn echter belangrijke uitzonderingen op deze regel waar men tot 45 m/sec gaat, of zelfs tot 50 m/sec. Ook stelt men vaak dat de specifieke vermogensdichtheid van de schroef, dit is het voortstuwingsvermogen per eenheid schroefschijfoppervlak, C_1 , kleiner moet zijn dan 1000 kW per m² oppervlak van de schroefschijf. Ook op deze regel komen belangrijke uitzonderingen voor (binnenvaart, mega-containerschepen). Er is een evidente relatie tussen de maximaal toe te laten specifieke belasting (vermogen per eenheid van oppervlak van de schroefschijf) met de uniformiteit van de toestroming van het water, het volgstroomveld. Deze relatie vormt een belangrijke reden voor (model) onderzoek aan het cavitatiegedrag van de voortstuwer en de door de schroef veroorzaakte trillingsexcitatie.

Er zijn ook ontwerpregels bekend voor het vaststellen van diameters en toerentallen van schroeven die gebaseerd zijn op gemiddelde waarden van de stuwkrachtcoëfficiënt K_T , waarbij K_T gedefinieerd is als $T/(\rho D^4 n^2)$. Hierin is T de stuwkracht, ρ is de dichtheid van het water, D is de schroefmiddellijn en n is het schroef toerental in omwentelingen per seconde. De variatie van K_T is beperkt (0.14-0.20 voor koopvaardij schepen) en voor de meeste typen heeft men doorgaans de beschikking over voldoende gegevens van gebouwde schepen en schroeven. Naast deze relaties waaruit men hoofdparameters van de voortstuwer kan afschatten zijn er additionele regels voor het toerental en diameter. (Zie 1.3.1 en 1.3.2)

1.1 Wanneer open, waneer ommantelde schroeven?

Als de specifieke belasting (vermogen of stuwkracht per eenheid schroefschijf oppervlak en per eenheid van intreesnelheid) voldoende hoog is, worden als regel ommantelde schroeven toegepast uit rendementsoogpunt. Dit zijn dan versnellende straalbuizen. Dit betreft over het algemeen langzaam varende of slepende schepen, b.v. visserij, of schepen waarbij het schroefoppervlak onnatuurlijk klein is in verband met diepgangsbependingen, zoals dit regel is in de binnenvaart.

Voor het aangeven van de zinvolheid van een straalbuis wordt vaak de belastingsparameter Bp_1 als kental gebruikt. Het kenmerkende van de belastingsparameter Bp_1 is dat deze uitgaat van de aandrijving en van de watersnelheid vlak voor de voortstuwder en nog weinig of niets zegt van de schroef.

Bp_1 is gedefinieerd als: $P_D^{0.5} N / V_{ad}^{2.5}$. Hier is het aan de schroef afgegeven vermogen P_D in Britse paardenkrachten gegeven ($1 \text{ HP} = 76.04 / 75 * 0.7355 \text{ kW} = 0.7457 \text{ kW}$), het schroeftoerental is N met N in RPM en de gemiddelde intreesnelheid van het water ter plaatse van de voortstuwder V_{ad} is gegeven in knopen ($1 \text{ knoop} = 0.514447 \text{ m/sec}$). Ook is $Bp_1 = 33.067 (K_v/J^5)^{1/2}$. Waarin K_v de koppelcoëfficiënt is en J de voortgangcoëfficiënt. Ook geldt dat K_v/J^5 gelijk is aan $(P_D n^2)/(2\pi \rho V_{intree}^5)$. Zo blijkt dat voor waarden van Bp_1 groter dan ca. 25 à 30 het rendement van de ommantelde schroef-straalbuiscombinatie hoger is dan dat van de gelijkwaardige open schroef. De volgende regel geeft het te verwachte winstpercentage van toepassing van een straalbuis:

$$\text{Percentage winst} = 13.75 (Bp_1 - 30) / Bp_1$$

Deze regel geldt voor varende schepen. Voor trekkende of duwende schepen in stilliggende toestand ($V_{ad} = 0$; $Bp_1 \rightarrow \infty$) geldt dat een winst van 13.75 % verwacht zou mogen worden t.o.v. een niet-ommantelde schroef. Er zijn naast Bp_1 ook andere belastingsparameters die uitgaan van de afmetingen van de schroef, de snelheid en de stuwkracht. Omdat het hier niet om de detaillering van het ontwerp gaat blijven deze meer verfijnde regels hier buiten beschouwing.

1.2 Wanneer vaste-spoedschroeven, wanneer verstelbare-spoedschroeven?

Toepassing van een verstelbare-spoedschroef is minder evident dan de keuze voor hetzij een open schroef, dan wel een straalbuis-schroef. Traditioneel wordt voor een verstelbare spoedschroef gekozen wanneer schepen veel manoeuvreren, een ruime variatie vertonen in vaartprofielen, of anderszins zogenaamde "off-design"-condities kennen waarmee terdege rekening gehouden moet worden. De toepassing van de verstelbare spoedschroef maakt doorgaans de noodzaak de draairichting om te keren overbodig. Ook in situaties waarbij een minimaal toerental gehandhaafd moet blijven ligt de verstelbare spoedschroef voor de hand. Ook wordt doorgaans een verstelbare spoed schroef gekozen bij toepassing van een aan door de hoofdmotor of schroefas aangedreven dynamo die een constant toerental vereist, ook in "off-design" condities. Omdat er tegenover de voordelen van de extra flexibiliteit van de verstelbare schroef ook nadelen verbonden zijn, is de keuze zeker niet triviaal. Zo zijn er de nadelen van de hogere initiële kosten, het iets lagere voortstuwingsrendement (2 à 2½%) in combinatie met de grotere complexiteit. Vanwege al deze factoren is de keuze voor een verstelbare schroef zeker niet altijd even vanzelfsprekend. De lagere rendementen zijn het gevolg van de dikkere navens en de invloed van een eventuele spoedverstelling waarbij vooral reductie van de spoed tot een lager rendement leidt. Doordat de bedrijfszekerheid van verstelbare-spoedschroeven en

verstelmechanismen de laatste decennia aanzienlijk vergroot is en de afmetingen van naven van verstelbare schroeven geleidelijk kleiner zijn geworden, en daarmee het rendementsverschil met vaste-spoedschroeven, volgt men doorgaans de mode waar de verstelbare scheepsschroef min of meer dé standaard oplossing is geworden voor een grote categorie schepen.

1.3 Ontwerp van de voortstuwer in samenhang met de (elektrische) aandrijving

Gezien vanuit het perspectief van de elektrische aandrijving zijn de verschillen met schroeven die direct door een Dieselmotor aangedreven worden zeer beperkt. De Dieselmotor biedt doorgaans slechts een beperkt bereik van het toerental waarbij het volle koppel geleverd kan worden, terwijl elektrische installaties een veel grotere range van toerentalen bieden waarover het maximale koppel geleverd kan worden. Vanuit het gezichtspunt van het schroefontwerp lijkt het er dus op dat elektrische aandrijving extra flexibiliteit biedt omdat het toeren-koppel bereik groter is, zowel in positieve (=vooruit) als in negatieve (achteruit) richting van het toerental. De extra flexibiliteit heeft gezien vanuit de voortstuwer ook een nadeel want het potentieel grotere koppelaanbod kan leiden tot overbelasting van de schroef. (Zie ook 1.5)

Het ontwerp van de voortstuwer trekt zich als regel niets aan van deze extra flexibiliteit omdat in de praktijk steeds voor het vollast-werkpunt ontworpen wordt. Wel is het vanzelfsprekend dat per geval na gegaan dient te worden in hoeverre de koppelvraag van de schroef in de verschillende bedrijfsomstandigheden varieert en in hoeverre de resulterende maximale variatie van de koppelvraag t.g.v. "off design" condities conflicteert met het aangeboden bereik van de aandrijving.

In de volgende twee hoofdstukken wordt aangegeven hoe de belangrijkste parameters van de scheepsschroef tot stand komen. Allereerst wordt in hoofdstuk 1.3.1 bepaald wat het beste toerental is dat gevraagd kan worden van de aandrijvende installatie gezien vanuit het perspectief van het hoogst mogelijke rendement van de voortstuwer. Wanneer dit hydrodynamisch optimale toerental lager uitvalt dan het minimale toerental van de aandrijvende installatie wordt voor dit aandrijftoerental de hydrodynamisch optimale diameter van de schroef bepaald volgens de beschrijving in hoofdstuk 1.3.2. De in deze twee hoofdstukken gegeven regels gelden voor zowel vaste spoedschroeven als verstelbare spoedschroeven. Voor schroeven in straalbuizen zouden soortgelijke ontwerpregels zijn op te stellen.

1.3.1 Vrij te kiezen ontwerp-toerental; maximale diameter

De elektromotor biedt de vrijheid het ontwerp-toerental van de schroef, binnen zekere grenzen, min of meer naar wens te kiezen, net zoals bij toepassing van een Dieselmotor met een tandwielkast waarvan de overbrengverhouding in het ontwerpstadium in principe vrij te kiezen is. In elektrische installaties kan bij een laag optimaal toerental en dus bij een toenemende koppelvraag, net als bij directe Dieselaandrijving vanaf een bepaalde combinatie van koppel en toerental eventueel gekozen worden voor toepassing van een tandwielkast.

Vanuit rendementsoogpunt zal men bij een vrije keuze van het toerental voor de schroef doorgaans, maar zeker niet altijd, de grootste middellijn kiezen die door de scheepsvorm geboden wordt. Zelfs zal men de scheepsvorm zodanig kiezen dat extra ruimte geboden wordt voor een wat grotere schroef. Door de grootste schroef te kiezen met een vrij te kiezen ontwerp-toerental wordt theoretisch het hoogste schroefrendement verkregen. Niet alleen is deze door toepassing van elektrische aandrijving vergrote range van ontwerp-toerentalen van belang voor een best mogelijke prestatie bij het ontwerp-punt, ook voor de schroef in dienstbedrijf lijkt de elektromotor een grotere flexibiliteit te bieden bij overbelasting (slecht weer, aangroei van de romp en de schroef) en bij bedrijf in deellast van de installatie.

De volgende regel is afgeleid waarmee men voor een grootst mogelijke schroefdiameter, D, een schatting kan maken van het aandrijftoerental dat het hoogste hydrodynamische voortstuwingsrendement oplevert. Hier is D de diameter van de grootste (open) scheepsschroef voor varende schepen:

$$N_{\text{Opt}} = 80 \frac{P^{0.4}}{D^{1.9}}$$

Hier is D de schroefmiddellijn in m, P het vermogen in kW en N_{Opt} is het optimale toerental in RPM. Deze regel geldt voor open 4-bladschroeven van varende schepen. Effecten van de scheepssnelheid, het aantal schroefbladen en dergelijke zijn beperkt en daarom verwaarloosd. Voor 5-bladschroeven dient het gunstigste toerental ca. 5% lager genomen te worden, voor 6-bladschroeven is dat ca. 10%.

Een waarde voor het maximaal toe te laten schroeftoerental N_{Max} kan gevonden worden uit de vuistregels die grenzen aangeven voor het maximaal toe te laten voortstuwingsvermogen per eenheid schroefschijfoppervlak, C_1 , en de maximaal toe te laten omtreksnelheid van de schroeftippen C_2 .

$$N_{\text{Max}} = 30 C_2 \sqrt{\frac{C_1}{\pi P_D}}$$

In deze regel is C_1 in kW/m² en C_2 in m/sec. Voor deze coëfficiënten zijn voor allerlei configuraties bovengrenzen aan te geven. Zo hanteert men voor extreme open schroeven $C_1 < 1000$ kW/m². Voor meer gangbare opstellingen geldt eerder $C_1 < 700$ kW/m² en voor thrusters blijkt men de bovengrens $C_1 < 400$ kW/m² aan te houden. Soortgelijke grenzen worden gesteld aan de maximale tipsnelheid: $C_2 < 40$ m/sec. Straalbuisschroeven: de maximum waarde van C_2 is 10-20 % lager dan bij open schroeven. Thrusters: $C_2 < 33$ m/sec; Nauwkeurige schattingen van het optimale toerental van een open schroef kunnen verkregen worden uit het volgende stel samenhangende formules die zijn afgeleid van de karakteristieken van de B-serieschroeven:

$$J_{N=\text{opt}} = 0.26157 \left(\frac{K_Q}{J^3} \right)^{-0.362144} Z^{0.188593} (A_e/A_o)^{0.17177}$$

$$\eta_{P, N=\text{opt}} = 0.35572 \left(\frac{K_Q}{J^3} \right)^{-0.20975} Z^{0.046824} (A_e/A_o)^{0.06259}$$

$$P/D_{N=\text{opt}} = 0.65739 \left(\frac{K_Q}{J^3} \right)^{-0.14222} Z^{0.1895} (A_e/A_o)^{0.2007}$$

Uit de eerste formule wordt de voortgangscoefficiënt $J_{N=\text{opt}} = V_{\text{intree}} / (n_{\text{opt}} D)$ berekend. Hieruit leidt men het optimale schroeftoerental n_{opt} af. K_Q/J^3 is $P_D / (2\pi \rho D^2 V_{\text{intree}}^3)$. (alles in consistente eenheden!). In deze formules is P_D het aan de schroef afgegeven vermogen, V_{intree} is de watersnelheid ter plaatse van de schroefschijf evenwel zonder de aanzuigingsnelheid die door de schroefbelasting ontstaat, A_e/A_o is de verhouding van het "ontwikkeld gestrekte bladoppervlak" van de schroef, A_e , tot dat van de schroefschijf ($A_o = \pi D^2$) en Z is het aantal schroefbladen. De aldus bepaalde waarden gelden evenwel voor condities in open water, zonder roer achter de schroef. In de praktijk worden toerentalen gekozen die 5-15 % lager zijn dan die welke met de

genoemde formules worden berekend. Deze correctie hangt samen met de statorwerking van het roer achter de schroef, waardoor de optimale toerentallen verschuiven naar lagere niveaus.

Het rendement van de schroef wordt gegeven door de tweede formule, terwijl de spoedverhouding door de derde formule wordt gegeven. Ten gevolge van de genoemde toerentalcorrectie is een bijbehorende spoedaanpassing nodig. Gemakshalve kunnen afwijkingen van het toerental in een spoedcorrectie worden omgezet door gebruik te maken van de vuistregel dat de spoedcorrectie $1\frac{1}{2}$ zo groot is als de correctie van het toerental bij gelijkblijvende diameter.

Het blijkt dat afwijkingen van het optimale toerental naar beneden vrijwel geen rendementsverlies tot gevolg hebben. Hogere ontwerp-toerentallen brengen echter wel op progressieve wijze een verlies van voortstuwingsrendement met zich mee. Wanneer het volgens deze procedure berekende toerental om wat voor reden te laag wordt bevonden, zal men in het ontwerp uitgaan van een hoger toerental. Dit hogere ontwerp-toerental van de installatie zal leiden tot een kleinere schroef met een wat lager rendement. In 1.3.2 wordt de procedure beschreven.

1.3.2 Gegeven toerental als uitgangspunt

Naast de klasse van schroeven, waarvan het ontwerp-toerental vrij te kiezen valt, bestaat er een andere klasse van schroeven waarvan de combinatie van het ontwerp-toerental en het vermogen vanaf het begin vast ligt. Deze andere klasse scheepsschroeven, die nu ter sprake komt, zijn of schroeven die of direct worden aangedreven door een tweetakt Dieselmotor, of door een elektrische installatie waarvan het minimum toerental vast ligt door de beperkingen van de elektromotor. Deze beperkingen zijn gerelateerd aan het te leveren koppel en de daarmee samenhangende rotorafmetingen. Deze beperkingen komen vooral aan het licht bij extern, in pods geplaatste motoren waar het geboden toerental relatief hoog is ten einde het podhuis de gewenste slankheid te geven.

De variatie in ontwerp-toerentallen tussen verschillende Dieselmotoren is doorgaans beperkt. Door geleidelijke evaluatie heeft de ontwikkeling van de twee-takt Dieselmotor (aantal cilinders en de afmetingen van boring en slag) geleid tot geschikte combinaties van toerentallen en vermogens. Zo geeft optimalisatie van de diameter een schroefgrootte die voor gangbare scheepstypen redelijk overeenkomt met de ruimte die onder het schip voor de schroef aanwezig is. Wel geldt hier het fenomeen dat Dieselmotoren met een wat hoger toerental, die relatief lage initiële kosten hebben, kleinere optimale schroeven tot gevolg hebben met een substantieel lager rendement! Dit benadrukt dat voortstuwder en aandrijver niet los van elkaar ontworpen dienen te worden.

De volgende regel is afgeleid uit seriematig onderzoek. Hiermee kan men voor een gegeven combinatie van toerental en vermogen een eerste schatting maken van de diameter van een (open) scheepsschroef voor varende schepen:

$$D_{\text{Opt}} = 10.8 \frac{P^{0.21}}{N^{0.525}}$$

Hier is D_{Opt} de (optimale) schroefmiddellijn in m, P het vermogen in kW en N is het beschikbare toerental in RPM. Deze regel geldt voor open 4-bladschroeven. Effecten van de scheepssnelheid, de bladoppervlakteverhouding, het aantal schroefbladen en dergelijke zijn beperkt. Voor 5-bladschroeven dient de diameter ca. 5% lager genomen te worden. Voor 6-

bladschroeven 10%. Gezien de eenvoud mag van deze regel geen hoge nauwkeurigheid verwacht worden.

Een iets nauwkeuriger schatting van de optimale middellijn van een open schroef kan verkregen worden uit het volgende stel samenhangende formules:

$$J_{D=opt} = 0.4415 \left(\frac{K_Q}{J^5} \right)^{-0.22273} Z^{0.09175} (A_e/A_o)^{0.09907}$$

$$\eta_{P,D=opt} = 0.49539 \left(\frac{K_Q}{J^5} \right)^{-0.11248} (A_e/A_o)^{0.10941}$$

$$P/D_{D=opt} = 0.77905 \left(\frac{K_Q}{J^5} \right)^{-0.11941} Z^{0.1005} (A_e/A_o)^{0.196211}$$

Uit de eerste formule wordt $J_{opt} = V_{intrec} / (n D_{opt})$ berekend. Hieruit leidt men de optimale schroefdiameter, D_{opt} , af. K_Q/J^5 is $(P_D n^2)/(2\pi \rho V_{intrec}^5)$. (alles in consistente eenheden!). In deze formules is P_D het aan de schroef afgegeven vermogen, V_{intrec} is de snelheid waarmee het water de schroefschijf binnentreedt, A_e/A_o is de verhouding van het "ontwikkeld gestrekte bladoppervlak" van de schroef tot dat van de schroefschijf ($A_o = \pi D^2$) en Z is het aantal schroefbladen. Opnieuw gelden deze formules slechts voor zogenaamde "open-water" condities, d.w.z. zonder de invloed van het schip voor de schroef. In de praktijk worden diameters gekozen die 0-5 % kleiner zijn dan de met de genoemde formules berekende waarden. Deze correctie hangt samen met de ruimtelijke verdeling van de intredesnelheid. De grootste correcties (3-5%) gelden voor enkel-schroefschepen met een extreme radiale verdeling van de intredesnelheid. Voor dubbelschroefschepen kan de correctie beperkt blijven tot 0-2 %.

Het rendement van de schroef wordt gegeven door de tweede formule, terwijl de spoedverhouding door de derde formule wordt gegeven. Ten gevolge van de genoemde diametercorrectie is een bijbehorende spoedaanpassing nodig. Gemakshalve kunnen afwijkingen van de diameter in een spoedcorrectie worden verwerkt gebruikmakend van de vuistregel dat voor gelijkblijvend toeren-vermogen-verband geldt dat de som van spoed en diameter constant is:

$$P+D=Constant$$

1.4 Rendement van de voortstuwer

Zeker bij koopvaardij schepen, maar ook bij veel andere klassen van schepen, speelt het rendement, dus het brandstofverbruik, een allesoverheersende rol en ligt toepassing van de schroef met het hoogst mogelijk rendement voor de hand. Beperkingen die gelden in het ontwerp stadium en die er voor zorgen dat bij installaties met een vrij te kiezen ontwerptoerental toch niet altijd de grootst mogelijke schroef wordt toegepast zijn doorgaans niet van hydrodynamische aard. Zo zal men bijv. bij koopvaardij schepen een schroef niet onder het basisvlak (kielvlak) willen laten uitsteken. In verband met dokmogelijkheden kent deze configuratie met onder het schip uitstekende bladtippen ook bij andere schepen sterke beperkingen. Een andere reden niet automatisch de allergrootste schroefdiameter toepast is de ballastconditie waarin te allen tijde de schroef voldoende onder water moet blijven.

Pogingen die men onderneemt de scheepsvorm t.p.v. de schroeven zo veel mogelijk in te snoeren of weg te snijden ten einde een schroef met grotere middellijn toe te passen zijn niet altijd even succesvol. Het schroefrendement mag dan iets toenemen door de grotere diameter, ook de weerstand van het schip neemt mogelijk even snel of zelfs sneller toe, zodat er door het toepassen van extra grote schroeven weinig of geen nuttig effect overblijft.

Een ander aspect van deze categorie schroeven is dat men immer tussen de romp en de schroefblattippen in hun bovenste stand een zekere vrijslag tot de romp wil houden i.v.m. het voorkomen van trillingshinder en binnenboord-geluid. Een kleinere vrijslag leidt door de keuze van een grotere schroef wel tot een hoger voortstuwingsrendement, maar ook tot toenemende trillingsexcitatie. Het vinden van de juiste balans tussen deze conflicterende factoren, die helaas in het ontwerpstadium niet alle even nauwkeurig kunnen worden afgewogen, leidt ertoe dat men soms te kleine schroeven toepast omdat "men" op de proeftocht een minimaal rendementsverlies van de schroef niet, maar de door de schroef opgewekte excitatie en de resulterende trillingen wel kan meten!

De volgende vuistregels zijn zeer globaal en bevatten geen enkele informatie over de verschijnselen die de trillingsexcitatie beïnvloeden, zoals de ongelijkmatigheid van het snelheidsveld, de tipsnelheid en het door de schroef geabsorbeerde vermogen:

$c/D=0.2$ voor $P<10$ MW; $c/D=0.35$ voor $P>50$ MW.

Hier is c de vlijslag tussen de romp en de schroeftip in de bovenste stand. Opgemerkt wordt dat effecten van diametervergroting door keuze van lagere ontwerptoeren vragen om een constante vrijslag en niet om een vrijslag die proportioneel is met de middellijn van de schroef. Er wordt bovendien op gewezen dat de regels die de classificatiemaatschappijen bieden voor de vrijslagen van de schroef als veel te tolerant worden beschouwd.

Pogingen in het ontwerp van de schroef, zij het voor een gegeven toerental met een optimale schroefmiddellijn, zij het voor een gegeven maximale schroefdiameter met een vrij toerental, door middel van speciale vormgeving of andere ontwerpparameters het rendement te verbeteren zijn doorgaans zeer beperkt. Zo blijkt dat beperkte geometriewijzigingen aan welving, bladdikte, skew, verdeling van de koordelengte en de profielvorm (mits de achterkant van de profielen scherp blijft) nauwelijks invloed hebben op het schroefrendement en dat voor een gegeven diameter het schroefrendement nagenoeg onafhankelijk is van het aantal schroefbladen, mits de toerentallen optimaal gekozen kunnen worden.

Over het rendement van de schroef bestaat helaas geen eenduidig criterium. Omdat de schroef niet alleen samen met de aandrijving ontworpen moet worden, maar ook in samenhang met de vorm van het schip, dient duidelijk te worden welke rendementsfactoren aan de aandrijving (toerental), welke aan die van het schip (snelheid, volgroom, ruimte voor plaatsing van de schroef) moeten worden toegeschreven en welke parameters direct iets zeggen over de kwaliteit van de voortstuwder zelf. Immers, zo is het de schroef toch niet kwalijk te nemen dat hij geplaatst is achter een langzaam varend schip en daarmee een laag rendement heeft! Ook is het de schroef niet aan te rekenen dat het rendement laag is omdat het toerental van de aandrijvende installatie hoog is.

Als kental voor het beoordelen van de kwaliteit van de voortstuwder zelf wordt doorgaans het open-water rendement gebruikt zoals dat gemeten wordt in een modelproef van de voortstuwder in uniforme stroming. Bij een bepaalde belasting wordt dan een zeker rendement vereist. Deze procedure is zeer tendentius, want men wil immers niet in een kunstmatige omstandigheid een

zeker rendement behalen, maar met de voortstuwer achter het schip. De schroef dient dan ook niet optimaal te zijn in deze kunstmatige omstandigheden, maar achter het schip. Deze procedure is ook discutabel omdat de plaatselijke stroomsnelheid, die een grote invloed heeft op het rendement, niet bekend is. De te definiëren hydrodynamische belasting, die onder meer bepaald wordt door de niet nauwkeurig bekende intreesnelheid, is dus één van de redenen waarom er geen eensluidend oordeel geveld kan worden over de kwaliteit van een schroef. Een mogelijk meer solide procedure zou kunnen bestaan uit een vergelijking tussen de openwaterkarakteristieken (gemeten in de vrij-varende-schroefproef op modelschaal) met het ideële theoretische rendement over een bereik van hydrodynamische belasting en waarbij bovendien rekening gehouden wordt met de overgangscoefficiënt, zoals die in een modelvoortstuwingsproef wordt bepaald. In dit kader gaat het te ver deze procedure nader uit te werken.

Uit berekeningen blijkt dat hoe groter het aantal schroefbladen is des te lager is het optimale toerental. Bladoppervlakverhoudingen en de radiale verdeling van de belasting over het blad hebben nauwelijks invloed voor gemiddelde schroeven. Toepassing van de kleinst mogelijke bladoppervlakverhouding, $Z/10$, is aan te bevelen uit het oogpunt van het maximaliseren van het rendement. Ook leidt dit tot het minimaliseren van het gewicht en van de initiële kosten van de schroef. Het voorkomen van cavitatieerosie en trillingen verhinderen echter in vrijwel alle gevallen de toepassing van het uit rendementsoogpunt gewenste bladoppervlak. Keuzen voor het toepassen van grotere bladoppervlakken vinden ook hun oorsprong in het gebruik van de schroef in "off-design" condities als manoeuvreren, versnellen en stoppen. Ook het blindelings toepassen van de theoretisch bepaalde optimale radiale belastingsverdeling in het betreffende snelheidsveld (volgstroomveld) leidt soms toch tot cavitatieproblemen, zoals erosie, binnenboord geluid of trillingen. Om deze redenen doet de ontwerper van de schroef doorgaans kleine concessies aan het rendement van de voortstuwer en accepteert een minimaal, doorgaans niet door metingen vast te stellen rendementsverlies, door voldoende marges in te bouwen t.a.v. het risico op erosieschade ten gevolge van cavitatie en hoge trillingsexcitatie.

1.5 De invloed van de elektrische aandrijving op de parameters van de voortstuwer

Bij ommantelde vaste-spoedschroeven is de problematiek gezien vanuit de aandrijving gelijk aan die voor een open scheepsschroef. Het enige verschil is dat men bij straalbuisschroeven niet altijd de grootst mogelijke schroef toepast. Immers niet in alle gevallen waarbij het toerental vrij te kiezen is heeft de grootst mogelijke straalbuisschroef het hoogste voortstuwingsrendement. Per individueel geval dient hier dus een nauwkeurige afweging gemaakt te worden.

Bij een verstelbare-spoedschroef is de interactie met de aandrijving duidelijk anders dan met een vaste-spoedschroef. Immers, door het verstellen van de spoed kan elke gewenste combinatie van vermogen en toeren bereikt worden binnen het motordiagram. Dat geldt ook voor het achteruitbedrijf. Omkeren van de draairichting is doorgaans geen praktische optie. De slag van de spoed wordt meestal zodanig gekozen dat het volle toerental bij vooruit- en achteruitvaart gehaald kan worden en dat de schroefbladen elkaar kunnen passeren bij het verstellen van de spoed van vooruit naar achteruit.

Vanzelfsprekend komt de vraag op wat het extra nut is van een verstelbare-spoedschroef bij toepassing van een elektrische aandrijving. Zowel de verstelbaarheid van de spoed als de elektrische aandrijving biedt een grote flexibiliteit en duplicering zou derhalve alleen zin hebben als de flexibiliteit van het ene aspect complementair zou zijn aan de andere. Het is echter niet

duidelijk in welk opzicht de toepassing van de verstelbare schroef iets extra's biedt ten opzichte van de flexibiliteit die reeds door de elektrische installatie geboden wordt.

Bij elektrische aandrijvingen biedt het motordiagram ook bij achteruit-toerentallen potentieel een groot koppel en dit koppel kan in tegenstelling tot aandrijving d.m.v. een Dieselmotor, geleverd worden bij alle toerentallen.

De verschillen tussen elektrisch aangedreven schroeven en Diesel-aangedreven schroeven werken op een beperkt aantal punten door in het ontwerp van de schroef:

- Het begin van de stopmanoeuvre,
- De sterkte i.v.m. overbelasting bij achteruitslaan en het leveren van het volle koppel in stilliggende toestand.

In de stopmanoeuvre wordt bij de aanvang van het vertragen van het schip de schroef door het water aangedreven. Het afremmen van de schroef dient nu elektrisch te kunnen geschieden. Het leveren van voldoende remkoppel is een eis die door de schroef aan het aandrijvingssysteem gesteld wordt. De koppelvraag van de schroef bij verschillende voorwaartse snelheden worden doorgaans weergegeven door middel van de Robinson kromme's en deze kunnen worden berekend uit de zogenaamde vier-kwadrant diagrammen van een gelijkwaardige schroef uit een systematische schroefserie (B-serie of Ka-serie). Ook is het van belang dat assen van niet aangedreven schroeven vastgezet kunnen worden d.m.v. een asrem omdat zeer langzaam draaiende assen het gevaar van lagerschade met zich mee brengen.

De sterkte van de bladen van een vaste spoedschroef wordt enerzijds bepaald door de vermoeiingsbelasting gedurende de normale vooruitvaart en anderzijds door piekbelastingen die optreden in "off-design" condities. De crash-stop manoeuvre is zo'n "off-design" conditie waar door omkeren van de draairichting van de schroef de bladen sterk belast worden en waarbij de grootste spanningen in het buitengebied van de schroef aan de achterrand van de bladen optreedt. Dit verschijnsel doet zich in versterkte mate voor bij sterk geskeuwde of gebogen schroeven.

De schroef dient tegen overbelasting te worden beschermd. Anders dan bij de Dieselmotor levert de elektrische installatie een groot koppel, bij stilliggend schip en bij achteruitslaan. Vooral het opleggen van beperkingen bij de nood-stopmanoeuvre is zeer gewenst, omdat het ontwerpen van een schroef waarvan de lokale bladafmetingen afgestemd worden op achteruitslaan bij het volle koppel van de installatie zou leiden tot nodeloos dikke achterranden van de bladprofielen. Immers, de verdikking van de achterranden van de schroefbladen zal bij de normale vooruitvaart het rendement van de schroef verlagen. Op het gebied van de piekbelastingen die optreden in de schroefbladen van noodstopmanoeuvre is de laatste jaren wat meer inzicht gekregen. De berekeningsmethoden die ter beschikking staan zijn gestileerd en gaan niet echt uit van de maximale hydrodynamische belasting. Desalniettemin geven zij toch een redelijk betrouwbare bladdikte.

2. THRUSTERS

Een interessante toepassing van de scheepsschroef is de toepassing in een roerpropeller of azimuthing thruster. Er zijn open thrusters en ommantelde thrusters. De laatste zijn uiteraard opnieuw voor zwaarbelaste gevallen. Ook voor "station keeping" (dynamisch positioneren) worden doorgaans ommantelde roerpropellers gebruikt. Als alternatief voor kleinere thruster units zijn op de markt een aantal azimuthing thrusters verschenen met contra-roterende schroeven. In deze opstellingen bevindt zich aan de voorkant een trekschroef en aan de andere zijde van de strut een duwschroef. De rendementswinsten ten gevolge van het contra-roterende effect zijn soms beperkt door de relatief hoge toerentallen en de vormgeving van struts en tandwielkasthuizen. In enkele gevallen zijn echter met een opstelling met twee schroeven aan één zijde en door een betere vormgeving van huizen en struts rendementwinsten van ca. 10 procent bereikt t.o.v. een klassieke enkele thruster.

De berekening van de schroef van een thruster kan op de zelfde wijze plaats vinden als voor een gewone schroef. Er is echter onzekerheid over de invloed van het zeer nabije thrusterhuis en de strut, zowel op de te kiezen spoed als op het te verwachten voortstuwingsrendement. Door de weerstand van het tandwielkast huis en de verticale strut, doorgaans niet van een perfecte stroomlijnvorm, treden rendementverliezen op ten opzichte van een enkele schroef die in de orde grootte zijn van 7-13 procent, waarbij de hoogste cijfers gelden voor ommantelde schroeven en de laagste gelden voor open schroeven waarbij een fraaie stroomlijnvorm van strut en tandwielkast huis wordt toegepast. Trek-thrusters, d.w.z. met de schroef aan de stroomopwaartse kant, ontworpen voor hogere vaarsnelheden hebben een nog iets hoger rendement. Voor thrusters worden doorgaans lagere specifieke belastingen toegelaten en lagere tipsnelheden toegelaten dan bij schroeven die op assen zijn gemonteerd. In het hoofdstuk over schroeven zijn ook waarden voor thrusters genoemd. Trillingsresonantie van de thruster en stijfheidproblemen spelen een belangrijke rol in deze grenzen. Gangbare overbrengverhoudingen $N_{\text{ingand}}/N_{\text{schroef}}$ liggen in het bereik 2.5 tot 6.

Elektrische aandrijving zal op de thusterschroef niet anders reageren dan op een andere scheepsschroef. Ook omgekeerd is er geen reden aan te voeren waarom de schroef anders zou zijn bij elektrische aandrijving dan bij een Diesel-mechanische installatie, mits, vanzelfsprekend, de twee genoemde aspecten van stoppen en sterkte verdisconteerd worden. Trouwens, bij thrusters zal de stopmanoeuvre bij langzame vaart eerder plaats kunnen vinden door het omdraaien van de thrusters en komt een gedeelte van de problemen te vervallen.

Wanneer de vermogensbehoeften van een schip met thrusters vergeleken wordt met een schip met schroeven op open assen met asuithouders en dubbele roeren, dient men in de vergelijking ook de verschillen in aanhangselweerstand mee te nemen. De aanhangselweerstand is bij dubbelschroeven in het algemeen iets groter dan de genoemde percentages van 7-13 % voor het verlies aan rendement t.g.v. de overgang naar een thruster en bij enkelschroeven, waar men slechts met een roer hoeft rekening te houden, meestal kleiner. Verwacht wordt daarom dat het verlies van rendement door bij een dubbelschroever de schroeven te vervangen door een tweetal thrusterunits geheel gecompenseerd zal worden door de winst die verkregen wordt door de assen, asuithouders en de roeren weg te laten. Dit geldt echter alleen als de configuratie met de thrusters niet gepaard gaat met toepassing van grote "headboxen" of met te rigoreuze aanpassingen van de scheepsvorm ten einde een vlak achterschip te verkrijgen nodig voor de plaatsing van de thrusters.

3. PODS

Sinds enkele decennia wordt bij elektrische aandrijving de elektromotor vaak in een gondel buitenboord geplaatst welke om een verticale strut draaibaar is. De schroef bevindt zich doorgaans aan de voorzijde van de pod en op vrij grote afstand van de scheepsromp met een grote vrijslag tussen romp en schroefbladtippen waardoor de schroef een zo uniform mogelijke toestroming ondervindt. Hierdoor ondervinden de bladen tijdens hun omloop vrijwel geen invalshoekvariaties en kan cavitatie zeer beperkt worden, of zelfs achterwege blijven. Dit geldt uiteraard alleen tijdens de vaart rechtuit en alleen wanneer de pod op correcte wijze is georiënteerd ten opzichte van de lokale stromingsrichting. Het gedrag van de schroef is daarom gunstig uit het oogpunt van trillingsexcitatie en binnen-boordgeluid. Om schade aan (rol)lagers, schroefbladen, en dergelijke te vermijden worden in de praktijk de hoeken waaronder de pod gedraaid mag worden beperkt door een regelmechanisme. Bij lagere vermogens bij het manoeuvreren kunnen grote hoeken worden toegepast. Wel zijn er voor de meeste stop- en manoeuvreeracties protocollen ontwikkeld waarmee schade beperkt wordt. Datzelfde betreft "station keeping" waar zeer lage toerentallen gebruikt worden. Recent onderzoek aan pods is onder meer gericht op het effectief laten stoppen van het schip door de pods te draaien en de toerentallen aan te passen, waarbij men zorgvuldig balanceert tussen het voorkomen van schade aan lagers, de pod en de schroeven en waarbij bovendien het naar het systeem teruggevoerde "turbinevermogen" beperkt wordt.

Deze pods worden voornamelijk toegepast op cruise schepen waar de hoogste normen gelden t.a.v. comfort. Het rendement van de podschroef is zeker niet hoger dan dat van equivalente enkele schroef met dezelfde middellijn, draaiend met dezelfde combinatie van toerental en vermogen. Het rendement van de gehele voortstuwingsunit, dus pod, strut en schroef samen is zelfs beduidend lager dan dat van een gewone schroef. Een analyse van verschillende beproefde systemen leert dat het voortstuwingsrendement van de pod, d.w.z. van de gehele podunit, dus podhuis, strut en schroef samen, ca. 7% lager ligt dan dat van de equivalente losse schroef met dezelfde diameter, vermogen en toerental. In dit percentage is dus de hydrodynamische weerstand van het podhuis en de strut begrepen. Dit betreft de ontwerpen van de huidige generatie pods. Er zijn kleine verschillen tussen de rendementen van de pods van verschillende leveranciers die in dit kader verder niet terzake doen.

In het geval van pods blijkt dat de aangeboden toerentallen van de elektromotor in de pod zodanig hoog te zijn dat de optimale schroefdiameter doorgaans beduidend kleiner is dan de ruimte die de configuratie van de scheepsvorm biedt, enkele gevallen van zeer grote vermogens en beperkte diepgang daargelaten.

De aangeboden toerentallen N (in RPM) van de huidige generatie pods wordt globaal gegeven door de volgende regels:

$$N=284/(0.001 P_D)^{0.0941} \quad (P_D < 6000 \text{ kW})$$

$$N=502/(0.001 P_D)^{0.39459} \quad (P_D > 6000 \text{ kW})$$

Podschroeven zijn vaste spoedschroeven. Opgemerkt wordt dat de diameter van het podhuis klein dient te blijven i.v.m. het beperken van de door de schroefstuwstraal sterk verhoogde hydrodynamische weerstand en voor het verkrijgen van een niet al te ongunstige naaf-diameterverhouding van de schroef. Het koppel is relatief laag en het toerental van de podschroef is hoog waardoor de overigens optimale diameter klein is. Tengevolge van deze diameter beperking en de grote naaf-diameterverhouding is het rendement niet buitengewoon

gunstig. Dit "verlies" komt dus nog bovenop de reeds genoemde 7% verlies t.g.v. de aanwezigheid van het podhuis met strut.

Desalniettemin leidt de plaatsing van pods op deze grote schepen toch tot enige besparing van het aan de voortstuwder afgegeven vermogen t.o.v. de meer traditionele opstelling met open assen, asuithouders en dubbele roeren (5-10 procent). De reden hiervoor is primair gelegen in het feit dat men de open assen, de asuithouders en de roeren met hun grote hydrodynamische weerstand heeft vervangen door een stel pods.

Vanzelfsprekend is onderzoek gedaan het hydrodynamisch rendement van de pod-units te vergroten. Uit onderzoek is gebleken dat de vergroting van de middellijn van het podhuis, nodig om het toerental van de elektromotor te verlagen ten einde het schroefrendement te verhogen, blijkt te leiden tot minder gunstige prestaties omdat de invloed van de hydrodynamische huisweerstand sterk toeneemt. De verhoudingen van toerentallen, vermogens, schroefdiameters en podhuisdiameters zijn het resultaat van onderzoek waaruit de nu toegepaste waarden min of meer standaard zijn geworden voor succesvolle toepassingen.

Een soortgelijk delicaat evenwicht doet zich voor bij de toepassing van pods met straalbuizen in trekkende opstelling. De straalbuis genereert een stuwstraal met hoge snelheid en dit leidt tot sterk verhoogde weerstand van het podhuis waardoor afwijkingen van het beproefde concept minder kansrijk zijn. Straalbuispods blijken anderzijds wel geschikt voor duwende configuraties.

4. CONTRA-ROTTERENDE SCHROEVEN

De beschreven enkele sloopsschroef komt ook voor in meer complexere vormen. Zo kan men twee schroeven direct na elkaar plaatsen in tegengesteld draaiende opstelling. Contra-roterende schroeven kunnen een hoog rendement hebben door het beperken van de hydrodynamische verliezen van de gewone sloopsschroef. Deze verliezen bestaan in volgorde van belangrijkheid uit: (1) wrijvingsverliezen doordat de bladen bij hun omloop wrijvingsweerstand ondervinden, (2) rotatieverliezen omdat de bladen een snelheidsveld induceren dat loodrecht op de bladen staat en ten gevolge van de spoed van de schroef componenten in de omtreksrichting bevat, waardoor rotatie-energie verloren gaat en (3) fluctuaties in het naar achteren gerichte opgewekte snelheidsveld ten gevolge van het eindige aantal bladen. Door reductie van het toerental neemt het wrijvingsverlies sterk af, hoewel de rotatieverliezen snel oplopen. Door met de in tegengestelde richting draaiende achterschroef de vergrote rotatieverliezen van de voorste schroef terug te winnen neemt het voortstuwingsrendement van de totale voortstuwertoe. Rendementswinsten t.o.v. enkele schroeven zijn in de orde van 8-15 procent, waarbij de hoogste winsten behaald kunnen worden met de grootste toerentalreductie. Hierbij wordt opgemerkt dat de wens voor lagere toerentalen in contra-rotatie van sloopsschroeven in het algemeen niet samenvalt met de mogelijkheden die elektrische aandrijving biedt. De redenen waarom contra-roterende schroeven (nog) niet algemeen toegepast worden is gelegen in de complicaties van de mechanische belastingsverdeling in tandwielkasten voor grote vermogens en in de lagering en afdichting van de onder belasting vervormende concentrische assen.

Om de complicaties van de tandwielkasten te vermijden is voorgesteld elk van de schroeven aan te drijven door een afzonderlijke elektromotor. De problematiek van de concentrische assen blijft zo bestaan.

Als alternatieve toepassing van het contra-roterende principe is voorgesteld een stuurbare pod of thruster achter een hoofdschroef te plaatsen. Deze configuratie lijkt op het eerste gezicht een aantrekkelijk alternatief omdat men de complicaties van zowel tandwielkasten als die van de concentrische assen vermijdt. Echter, de door de elektromotoren in de pods geboden toerentalen zijn relatief hoog en niet gunstig voor het contra-roterende principe waar juist een reductie van het toerental gunstig werkt. Waarschijnlijk hangt het hoge toerental van de elektromotor in de pod samen met de beperking van de diameter van het podhuis. Hierdoor staat de te behalen winst van de contra-roterende installatie onder druk. De winst loopt verder terug door de gecombineerde werking van beide schroeven. De snelheid van de stroming achter de schroeven is bepalend voor de hydrodynamische weerstand van het podhuis en de draaibare bevestigingsstrut. Door twee schroeven achter elkaar te plaatsen wordt de watersnelheid t.p.v. de pod of de thruster extra verhoogd en daardoor neemt de weerstand van podhuis en strut snel toe.

5. PUMPJETS/WATERJETS

De naam pumpjet wordt gebruikt voor verschillende typen ommantelde voortstuwers. Zo kan men denken aan zwaar belaste straalbuissystemen met impellers met veel bladen en statoren (toepassingsgebied bij onderzeeërs), of aan doosvormige "inwendige" voortstuwers die gebruik maken van een in het schip geplaatste pomp waarvan de uitlaat een stuwstraal in de gewenste richting produceert. Deze laatste categorie betreft schepen met extreme diepgangsbepierking waar te allen tijde schade aan schroeven vermeden moet worden en men de substantieel lagere rendementen van de interne voortstuwers ten opzichte van extern geplaatste schroeven accepteert.

Ook de voor hoge snelheden toegepaste waterjetinstallatie is als een soort pumpjet te beschouwen. De rendementen van waterjets zijn bij hoge snelheden gelijk aan zo niet wat hoger dan die van scheepsschroeven.

De volgende regels zijn afgeleid uit gegevens van een tweetal fabrikanten van waterjetinstallaties. Deze regels geven voor ontwerpsnelheden V in knopen het totale rendement, zijnde de verhouding tussen het sleepvermogen (dit is het product van weerstand en snelheid) en het aan de waterjet installatie afgegeven vermogen:

$$\eta_{\text{tot}} = -0.000244 V^2 + 0.024921 V + 0.119236 \quad (20 < V < 55 \text{ knoop})$$

$$\eta_{\text{tot}} = 0.00000463374V^3 - 0.00071318 V^2 + 0.039136 V \quad (V < 55 \text{ knoop})$$

Het rendementsverschil tussen beide regels in het overlappende geldigheidsgebied bedraagt bedraagt hooguit 2.5 procent.

Uit enige beschikbare gegevens van (standaard) waterjet installaties is de volgende globale bovengrens afgeleid voor het aandrijftoerental:

$$N_{\text{Max}} = 100569 / P_D^{0.5654}$$

Het aan de impeller afgegeven vermogen P_D is in kW en het maximale toerental in RPM.

De vermogenswinst van waterjetinstallaties t.o.v. door open schroeven aangedreven schepen zit hem vooral in het kunnen weglaten van de assen, de asuithouders en de roeren. Het kenmerkende van al deze voortstuwingsunits is dat zij zeer zwaar belast zijn, d.w.z. dat zij een groot vermogen absorberen ten opzichte van hun afmetingen. Als vuistregel stelt men daarom wel dat boven snelheden van 30 knoop (sommigen zeggen 25 knoop) waterjets in het voordeel zijn ten opzichte van aandrijving door open schroeven.

Een ander aspect van deze klasse van voortstuwers is dat zij zich vrijwel onafhankelijk gedragen van het vaartprofiel van het schip. Dat wil zeggen dat het verband tussen het toerental en het vermogen vrijwel onafhankelijk is van de snelheid van het schip. Dit houdt in principe in dat voor de voortstuwing geen grote flexibiliteit van de aandrijving nodig is en dat men standaard ontwerpen kan aanbieden die het in elke situatie goed doen, mits enige aanpassing aan de ontwerpvaarsnelheid plaatsvindt. Een nadelige eigenschap van pumpjets en waterjets die hun werking ontleen aan opbouw van dynamische druk achter de impeller is dat het rendement in deellast snel afneemt. Van vrijwel al deze pumpjets geldt dat de aandrijving niet omkeerbaar is en dat stoppen en manoeuvreren geschiedt door de richting van de stuwstraal te wijzigen. Dit gebeurt met draaibare schoepenroosters, bestuurbare nozzles, vizierkleppen, of soortgelijke oplossingen.

6. ANDERE VOORTSTUWERS

Onder deze titel worden enige speciale voortstuwersontenen aan bewegende oppervlakken anders dan bij de gewone schroef die om een langsas draait. Als voortstuwersonten met een verticale as is de Voiht-Schneider propeller te noemen. Een horizontale as wordt toegepast bij het schoepenrad en bij de Whale Tail voortstuwersonten. Al deze voortstuwersonten zijn in principe kantenbladvoortstuwersonten, wat betekent dat de bladen tijdens hun omloop in oriëntatie versted worden. Bij de Whale Tail propeller ontleent de voortstuwersonten zijn voortstuwende kracht aan lift, terwijl het klassieke schoepenrad zijn stuwkracht ontleent aan het opwekken van weerstand. Deze voortstuwersonten hebben een hoog tot zeer hoog rendement doordat zij een groot oppervlak hebben en daardoor een lage specifieke belasting hebben. Praktische toepassingen van verschillende van deze voortstuwersonten is zeer beperkt. Manoeuvresaspecten spelen bij de toekomstige toepassingen van dit soort voortstuwersonten met een horizontale as zeker een rol omdat de stuwstraal door het grote oppervlak aanzienlijk verzwakt is ten opzichte van de stuwstraal van gangbare ommantelde zwaarbelaste schroefsystemen.

Verschiedende concepten van flapvoortstuwersonten bevinden zich in het researchstadium of, in het geval van schoepvoortstuwersonten, zijn zij door praktische beperkingen overgenomen door de scheepsschroef. De aandrijftoerentallen zijn doorgaans zeer laag en zeker bij de Voiht-Schneider voortstuwersonten maakt een tandwieloverbrenging deel uit van de unit. Dankzij de verticale aandrijfas van de Voiht-Schneider kantenbladvoortstuwersonten is deze excellent bij het manoeuvreren. De rendementen van Voiht-Schneider voortstuwersonten zijn zeker niet hoger dan die gevonden worden met schroefvoortstuwersonten. Bovendien dienen beschermkooien aangebracht te worden onder het schip die de hydrodynamische weerstand vergroten.

Een interessante ontwikkeling is de ontwikkeling van de motorpropeller, of wel "asloze elektrische voortstuwersonten". Dit is een ringschroef waar statische magneten zich in een draaiende ring (rotor) bevinden die de schroeftippen verbindt, terwijl in een kamer in een straalbuis, of in een boegbuisstunnel, zich elektromagneten bevinden. Met deze configuraties, die uitermate goed aansluiten bij het concept van elektrische voortstuwersonten, kan het verlies van voortstuwersontenrendement ten gevolge van de hydrodynamische wrijving van de niet productieve in het water draaiende ring gecompenseerd worden door het voordelige gemis aan schroefassen, asuithouders en roeren. Dit concept dat geschikt lijkt voor toepassingen waar anders een azimuthing thruster met een straalbuis zou worden toegepast, bevindt zich nog in het researchstadium. De extra wrijving van de draaiende ring met doorgvloeiende spleet leidt ertoe dat rendementen veel lager zijn dan van soortgelijke voortstuwersonten zonder deze ring. Het verlies aan rendement kan echter sterk beperkt worden door het ontwerpotoerental aanzienlijk te verlagen en de spoed van de schroef veel hoger te kiezen ten opzichte van de thans gebruikelijke waarden. De motorpropeller is een meer dan 60 jaar oud concept maar tot praktische grootschalige toepassingen is het (nog) niet gekomen. Verwacht wordt echter dat voor een beperkt aantal toepassingen geschikte systemen ontwikkeld zullen worden binnen niet al te lange tijd.

Ontwikkelingen rondom voortstuwersonten waarbij door de voortstuwersonten geen mechanische energie wordt omgezet in stuwkracht zijn het researchstadium nog lang niet ontgroeid. (Elektro-Magnetische Voortstuwersonten).

In de onderstaande tabel worden de voor diverse voortstuwersonten de vermogensbereiken vergeleken. Ook wordt aangegeven hoe geleidelijke technologische vernieuwingen de bovengrenzen zullen verleggen:

Type	Vermogen (MW)			Snelheid (knoop)		Specifieke eigenschappen
	min	Huidig max.	Toek. max.	Min	Max	
Vaste spoedschroef	0	70	80	0	40	Betrouwbaar, goedkoop, hoog rendement
Vastespoedschroef met straalbuis	0.1	15	15	0	15	Lage snelheid, hoge schroefbelasting
Verstelbare spoedschroef	0.1	20	25	0	35	Als off-design conditions belangrijk zijn
Verstelbarespoedschroef met straalbuis	0.1	10	10	0	15	Lage snelheid, hoge belasting en als off-design conditions belangrijk zijn
Azimuthing thruster	0.1	6	6	0	18	Manoeuvreren, station keeping
Pod	0.7	25	40	0	30	Strengere eisen aan comfort, beschikbaarheid grote elektrische installatie, flexibele scheepsindeling
Contra-roterende schroeven	1	20	20	0	18	Brandstofbesparing, onderhoudgevoelig
Waterjet	0.2	30	50	20	60	Hoge snelheid, betrouwbaar
Pumpjet (inwendige unit)	0.1	1	1	0	10	Ondiep water, lage snelheid, manoeuvreren
Voiht-Schneider	0.2	4.1	4.1	0	15	Manoeuvreren
Asloze elektrische voortstuwer	0.1	0.2	10	0	20	Comfort

7. LITERATUUR/KENNISBRONNEN

Voor literatuur op het gebied van voortstuwers wordt verwezen naar de proceedings/rapporten van de meest recente ITTC conferenties. (2002, 1999, 1996). Als handboeken worden genoemd: "Principals of Naval Architecture" en "Marine Propellers and Propulsion" door J. S. Carlton. In ruime mate is in dit stuk teruggevallen op specifieke MARIN ervaring.

Voor de bijzondere voortstuwers (thrusters, roerpropellers, pumpjets, waterjets, Voigt Schneider propellers, pods) is gebruik gemaakt van catalogi van leveranciers van deze units. Informatie over rendementen is uit deze catalogi echter niet af te leiden. Wel zijn uit deze catalogi verbanden tussen vermogens en toerentallen afgeleid voor een aantal gangbare concepten. Ten aanzien van de voortstuwers die zich zich nog in het al dan niet prille researchstadium bevinden wordt bijvoorbeeld verwezen naar: "An Application of the Weis-Fogh Mechanism to Ship Propulsion", door M. Tsutahara en T. Kimura (Journal of Fluids Engineering, juni 1987, Vol. 109) Op dit gebied van flapvoortstuwing bestaat inmiddels een uitgebreide specialistische literatuur. Bijvoorbeeld: "On Optimum sculling Propulsion", door W. Potze. Dit geldt ook voor Ram-Jets, Steam Ramjets en andere "exotische" noviteiten op voortstuwersgebied. Op Internet is uitgebreide informatie te vinden van zeer bescheiden pogingen MHD voortstuwing in kaart te brengen en op scheepsmodellen toe te passen. Voor pods, aan de rand aangedreven motorpropellers (asloze voortstuwers) wordt verwezen naar: "First International Conference on Technological Advances in Podded Propulsion", Newcastle, UK, 14-16 april 2004. Voor deze laatste categorie, de asloze voortstuwers, zijn er een aantal recente papers, bijvoorbeeld: "Design and Performance of an Electric Tip-Driven Thruster", door S.M. Abu Sharkh, S. R. Turnock en A. W. Hughes, Proc. Institution Mech. Engineers. Vol. 217 Part M, 2003.