



Sjøkrigsskolen

Bacheloroppgave

AIP-systemer for undervannsbåter

Hydrogen i brenselceller – opplagret eller ved reformering?

av

Leif Even Herland

Lvert som en del av kravet til graden:

BACHELOR I MILITÆRE STUDIER MED FORDYPNING I MASKINFAG

Innlevert: Mai 2017

Godkjent for offentlig publisering

Publiseringsavtale

En avtale om elektronisk publisering av bachelor/prosjektoppgave

Kadetten har opphavsrett til oppgaven, inkludert rettighetene til å publisere den.

Alle oppgaver som oppfyller kravene til publisering vil bli registrert og publisert i Bibsys Brage når kadetten har godkjent publisering.

Oppgaver som er graderte eller begrenset av en inngått avtale vil ikke bli publisert.

Jeg gir herved Sjøkrigsskolen rett til å gjøre denne oppgaven tilgjengelig elektronisk, gratis og uten kostnader	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nei
Finnes det en avtale om forsinket eller kun intern publisering? (Utfyllende opplysninger må fylles ut)	<input type="checkbox"/> Ja	<input checked="" type="checkbox"/> Nei
Hvis ja: kan oppgaven publiseres elektronisk når embargoperioden utløper?	<input type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nei

Plagiaterklæring

Jeg erklærer herved at oppgaven er mitt eget arbeid og med bruk av riktig kildehenvisning. Jeg har ikke nyttet annen hjelp enn det som er beskrevet i oppgaven.

Jeg er klar over at brudd på dette vil føre til avvisning av oppgaven.

Dato: 24 – 05- 2017

Leif Even Herland
Kadett navn

Kadett, signatur

Forord

Denne oppgaven omhandler luftuavhengige fremdriftssystemer på undervannsbåter. Oppgaven er en del av kravet til graden bachelor i militære studier med fordypning i maskinfag. Arbeidet er utført i tiden fra 01. januar 2017 til 24. mai 2017.

Jeg begynte arbeidet uten noe særlig kjennskap til emnet, så det var definitivt en prioritering å finne relevant og god litteratur. I den anledning er det på sin plass å takke Sjøkrigsskolens flinke og hjelpsomme bibliotekarer for å ha fremskaffet den ene artikkelen etter den andre – Tusen takk til Kari Jensen og Birgitte Berge.

Jeg vil også rette en stor takk til Forsvars Materiell (FMA) og spesielt Orlogskaptein J. Patrick Olsen for sin tid og hjelp. Jeg har ved ulike anledninger okkupert et kontor på «lekteren» på Haakonsværn hvor jeg har jobbet med oppgaven. Jeg vil også få takke Arild Vik og Tjalve Magnusson ved CMR Prototech for at de tok seg tid til å møte en spire fra Sjøkrigsskolen og diskutere oppgaven min med meg. Det var Arild og Tjalve som fikk meg til å se nærmere på SOFC som et alternativ. Det var også nyttig for meg å få det jeg hadde lest om satt i perspektiv.

Til slutt vil jeg også takke min veileder, Gisle Strand, for god veiledning gjennom perioden. Selv om jeg til tider føler at jeg har hatt mye å gjøre med oppgaven er jeg ganske sikker på at Gisle har hatt mer å gjøre, men til tross for dette er døren hans alltid åpen.

Bergen, Sjøkrigsskolen, 24-05-2017

Oppgaveformulering med problemstilling

Nye konvensjonelle undervannsbåter vil ha et luftuavhengig fremdriftssystem. Områder av interesse er reformeringsteknikken som anvendes for å spalte hydrogen av flytende hydrokarboner og lagring av det produserte hydrogenet. Valg av løsninger vil påvirke infrastruktur og hvordan det hele skal driftes og vedlikeholdes.

Som en del av oppgaveformuleringen vil det være ønskelig å finne svar på operativ utholdenhet for ubåter som anvender reformerforsynte brenselceller som en del av et luftuavhengig fremdriftssystem. Diesel skal være det hydrokarbonet som skal undersøkes nærmere som en alternativ hydrogenbærer. Oppgaven skal blant annet søke å gi svar på volum og masse forhold for metodene, tekniske, drifts- og vedlikeholdsmessige forhold vedrørende diesel, LOX og lagring/levering av hydrogen til brenselcellene. På bakgrunn av oppgaveformuleringen vil oppgaven forsøke å svare på følgende problemstilling:

Er reformerforsynte brenselceller ubåtens fremtid?

Sammendrag med konklusjon

Denne oppgaven er en litteraturstudie som ser på mulige alternativer til luftuavhengig fremdrift (AIP) på ubåt. For å gjøre leseren kjent med hva som ligger til grunn for et fungerende AIP-system vil teksten bruke systemet som er installert på dagens tyske ubåter som et sammenligningskriterium. Systemene blir vurdert i forhold til operativ utholdenhet og da i hovedsak tid neddykket uten å gå til overflaten for å lade batteriene, signatur, drift- og vedlikeholdsmessige hensyn og hvordan volum og masse spiller inn.

I oppgaven gjøres beregninger på ulike kapasiteter som kan være avgrensende faktorer med tanke på kriteriene nevnt innledningsvis. Felles for alle systemene som vurderes i oppgaven er at de inneholder brenselceller som en del av et AIP-system. En brenselcelle generer elektrisk energi som en følge av kjemiske reaksjoner i cellen, og det er denne energien som utnyttes i et AIP-system. En jevn strøm av hydrogen og oksygen må tilføres cellen for at reaksjonene skal oppstå. Hydrogenet kan lagres i egnede lagringsenheter som rent hydrogen, eller den kan lagres indirekte i en hydrogenbærer som for eksempel diesel. Oksygenet blir lagret i flytende form i tilpassede kryptanker. Dette er felles for alle systemer og blir ansett som den mest effektive måten å lagre større mengder oksygen på. Blant de systemene som vektlegges er det forskjellen på et system som bruker rent hydrogen og et som bruker hydrogen fra en hydrogenbærer som er interessante i forhold til anbefaling av valg.

Konklusjon med anbefaling viser til at et system som baserer seg på reformering av diesel kombinert med middeltemperatur brenselceller (IT-SOFC) er det beste alternativet i forhold til operativ utholdenhet og pris og tilgjengelighet av brensel. Dessuten har slike brenselceller unike egenskaper som fører til at de gir best elektrisk virkningsgrad i tillegg til at de har den høyest forventede levetiden (> 40000 driftstimer). Sammenlignet med andre systemer som blir vektlagt fokus i oppgaven er IT-SOFC overlegne på dette området.

Innholdsfortegnelse

Figurer	7
Tabeller/Diagrammer	8
Nomenklatur / Forkortelser (Engelsk / Norsk)	9
1 Innledning	10
1.1 Bakgrunn for valg av oppgave	11
1.2 Begrensninger	12
1.3 Metode	12
1.4 Struktur	13
2 Beskrivelse av aktuelle system	14
2.1 Rent hydrogen fra metallhydrider	16
2.2 Hydrogen fra syntesegass via reformering	17
2.2.1 Reformering av diesel	17
2.3 Brenselcelleteknologi på ubåt	21
2.3.1 PEMFC – Proton Exchange Membrane Fuel Cell	22
2.3.2 SOFC – Solide Oxide Fuel Cell	23
2.3.3 Status ATR og PEMFC/SOFC på ubåt	25
3 Vurdering av system	30
3.1 Hydrogen fra metallhydrider eller fra reformert diesel?	30
3.1.1 Kapasiteter	30
3.1.2 Drift og vedlikehold	40
3.2 Drøfting	41
4 Konklusjon med anbefaling	44
Bibliografi	45
5 Vedlegg	50
5.1 Konstanter og viktige verdier.....	50
5.2 Nernst-ligningen	51
5.3 Teknisk info NATO F-76 diesel	51

Figurer

Figur 2-1 – Oversikt over energitetthet og volumetrisk tetthet	15
Figur 2-2 - Brenselcellesystem som får tilført hydrogen fra metallhydridtanker	16
Figur 2-3 - Prinsippskisse av PEMFC virkemåte	22
Figur 2-4 - Prinsippskisse av SOFC virkemåte.	23
Figur 2-5 – Prinsippskisse over hvordan et anlegg med ATR og PEMFC kan se ut.....	26
Figur 2-6 - Prinsippskisse av hvordan et AIP-system med ATR og SOFC kan se ut.....	27
Figur 2-7 - Plan og sirkulær design av en SOFC.....	29

Tabeller/Diagrammer

Tabell 2-1 - Sammenligning mellom SOFC og PEMFC.	25
Tabell 3-1 - Oversikt over teknisk data for Siemens SiNavy PEMFC.....	31
Tabell 3-2 - Tall som viser hvordan et LOX RS kan øke tid neddykket og redusere lade-tid (snorkling)	37
Tabell 3-3 – Sammenfatning av de ulike systems kapasiteter	42
Tabell 5-1 – Teknisk info NATO F-76	51

Nomenklatur / Forkortelser (Engelsk / Norsk)

AIP	Air Independent Propulsion / Luftuavhengig fremdrift
ATR	Auto-Thermal Reforming / Autotermisk reformering
CPOX	Catalytic Partial Oxidation / Katalytisk partiell oksidasjon
CHP	Combined Heat and Power System / Kombinert kraft- og varmesystem
DCNS	Direction des Constructione Navales /
HHV	High Heating Value / Øvre brennverdi
HT-SOFC	High Temperature Solide Oxide Fuel Cell / Høytemperatur fast oksid brenselcelle
IT-SOFC	Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cell / Middelttemperatur fast oksid brenselcelle
LHV	Low Heating Value / Nedre brennverdi
LOX	Liquid Oxygen / Flytende oksygen
LOX RS	Liquid Oxygen Recharge System / System for regenerering av flytende oksygen
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell / Fosforsyre brenselcelle
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell / Proton-utveksling brenselcelle
POX	Partial Oxidation / Partiell/delvis oksidasjon
TKMS	ThyssenKrupp Marine Systems
SOFC	Solide Oxide Fuel Cell / Fast oksid brenselcelle
SR	Steam Reforming / Dampreforming
WGS	Water-Gas-Shift / Vannskift
YSZ	Yttria-Stabilized Zirconia / Yttria-stabilisert zirconia

1 Innledning

Konvensjonelle ubåter har lenge satt sin lit til et diesel-elektrisk fremdriftssystem, mens atomkraft har vært den foretrukne energibæreren på de aller største ubåtene. Fremtidens ubåter derimot består nok utvilsomt av en eller annen form for luftuavhengig fremdrift (AIP). Flere av dagens operative ubåter benytter seg allerede av AIP-teknologien i forskjellige varianter. Hvilke systemer som benyttes varierer fra de ulike lands mariner, men et av de mest relevante ligger innenfor brenselcelleteknologi.

Brenselceller er et spennende alternativ til den konvensjonelle forbrenningsmotoren og har en rekke fordeler som gjør det verdt å se nærmere på. Brenselceller som bruker rent hydrogen som brensel vil ha vann som eneste avfallsprodukt, men det finnes flere varianter hvorav noen bruker det som kalles for syntesegass for å generere elektrisk energi. Det største potensialet til et brenselcellesystem er energitettheten til hydrogen. Om man sammenligner med diesel og bensin er det mye som tyder på at hydrogen som energibærer vil få en større rolle i fremtiden – også på ubåter. Eksempelvis frigir 1 kg diesel og bensin mellom 11,5 og 12,5 kWh når den reagerer med oksygen, mens den samme mengden hydrogen frigir nesten tre ganger så mye energi når man refererer til nedre brennverdi – ca. 33,3 kWh (US Department of Energy 2017). Dette er noe av grunnen til at det brukes mye penger og ressurser til å forske på og utvikle ny teknologi som kan utnytte dette potensialet. For en ubåt er en utvikling på dette området ensbetydende med en økt operativ utholdenhet.

Innenfor brenselcelleteknologien finnes det igjen flere alternativer, hvorav Tyskland og Frankrike er blant de ledende nasjonene. Det var nettopp disse to landene som tilslutt kjempet om kontrakten for utvikling og bygging av nye norske ubåter, med henholdsvis Direction des Constructione Navales (DCNS)¹ som det franske alternativet og Thyssen Krupp Marine Systems (TKMS)² som det tyske. Den 3. feb. 2017 kunne Norges forsvarsdepartement i en pressemelding meddele at Tyskland ble valgt som fremtidig strategisk samarbeidspartner (Norges Forsvarsdepartement 2017).

¹ DCNS er et fransk statseid skipsverft som leverer maritime kapasiteter, deriblant ubåter - <http://en.pre-prod.dcnsgroupv2.prosodie.com/>

² TKMS er et tysk skipsverft som leverer maritime kapasiteter, deriblant ubåter - <https://www.thyssenkrupp-marinesystems.com/en/submarines.html>

Tyskland har i dag AIP-teknologi på både 212-klassen og 214-klassen. Begge klassene har metallhydridtanker³ utenfor trykkfast skrog som brukes til lagring av hydrogenet, som igjen benyttes som brensel i lavtemperatur proton-utvekslende brenselceller (PEMFC)⁴.

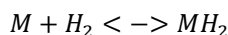
1.1 Bakgrunn for valg av oppgave

Bakgrunnen for valg av oppgave kommer av at Norges nye ubåter vil inneha AIP-teknologi. Det er ennå ikke bestemt hvordan dette systemet skal konfigureres selv om det er høy sannsynlighet for at det vil bestå av elementer man finner på dagens tyske ubåter. Disse ubåtene benytter seg av metallhydridbeholdere montert omkring trykkfast skrog for å få tilgang til rent hydrogen til brenselcellene.

Det finnes flere utfordringer rundt bruk av metallhydrider til lagring av rent hydrogen, hvorav noen av de mest fremtredende går på tilgjengelighet, logistiske utfordringer og sikkerhetsrisikoen ved lagring og etterfylling av hydrogen. I tillegg til dette er metallhydridtankene relativt tunge og medfører at mengde lagret hydrogen direkte begrenses av ubåtens størrelse. Det finnes andre måter å fremstille hydrogen til brenselcellene som ikke avhenger av metallhydrider, en av dem er ved reformering av hydrokarboner, nærmere bestemt diesel. Som nevnt innledningsvis har hydrogen et høyt energipotensiale, men dessverre har det relativt dårlig energitetthet ved atmosfæretrykk (2,5 kWh/l). Dette medfører at dersom rent hydrogen skal lagres om bord må det lagres i metallhydrider, komprimeres, eller kjøles ned. En vei rundt dette kan derfor være å utnytte diesel som en indirekte kilde til hydrogen og samtidig dra fordel av dens gode energitetthet (10,1 kWh/l) (*Fig 1-1*)).

PEMFC har vært det foretrukne valget i ubåter, men da hovedsakelig uten bruk av en reformer for å fremstille hydrogenet. Det vil derfor være ønskelig å utforske hvorvidt det finnes andre alternativer innen brenselcelleteknologien som kan håndtere et anlegg som

³ Metallhydridtanker/sylindere fungerer som en «hydrogensvamp». Legeringer av titan, jern, mangan, nikkel, krom m.fl kan reagere med hydrogen og danne en metallhydrid med tilhørende reversible reaksjonsligning (Larminie, Dicks. 2003, 286):



⁴ Proton Exchange Membrane Fuel Cell er en type brenselcelle som har relativt lave reaksjonstemperaturer og derfor egner seg bra til bruk i ubåter.

baserer seg på reformering av hydrokarboner. Derfor vil denne oppgaven også drøfte mulighetene for et anlegg bestående av høy-temperatur brenselceller (SOFC⁵).

1.2 Begrensninger

Oppgaven begrenser seg til å sammenligne AIP-anlegget som finnes om bord i dagens tyske ubåter med to anlegg som bruker reformert diesel til bruk i henholdsvis PEMFC og SOFC. Deler av oppgaven baserer seg på relevante studier, og en av disse omhandler den franske konseptubåten SMX® Ocean (Bakst 2014), hvorav brenselceller fra Siemens også benyttes.

Når det refereres til PEMFC i utregninger vil alle beregninger være gjort med tall hentet fra Siemens SiNavy PEMFC som er installert i alle tyske ubåter med brenselceller, dog i ulike konfigurasjoner. Beregningene vil hovedsakelig bruke tall fra modell BZM 34⁶.

Det vil være naturlig å sammenligne systemer fra ubåter i samme størrelsesorden som de tyske 212- og 214-klassene da dette er ubåter som vil være godt egnet til å patruljere langs kysten av Norge og samtidig være i stand til å ta seg inn i trange fjorder når situasjonen krever det. Dette krever igjen en viss begrensning i forhold til skrogets størrelse. Oppgaven tar derfor utgangspunkt i et skrog med et neddykket deplasement ≤ 2000 tonn som er i nærheten av det en 212A-klasse har (1830 t).

Oppgaven beskriver blant annet hvordan diesel kan reformeres til en hydrogenrik syntesegass. Selv om det finnes andre sammensetninger av hydrokarboner som kan benyttes, vil oppgaven i tilfeller det er snakk om reformering bare ta for seg diesel som alternativ.

1.3 Metode

Det ble tidlig klart at oppgaven vil være en litteraturstudie som beskriver og setter systemer opp mot hverandre i forhold til kriterier beskrevet i oppgaveformuleringen.

I startfasen var det viktig å legge en plan for hvordan fremdriften i arbeidet skulle være. En fremdriftsplan med tilhørende faser og tidsfrister ble utarbeidet og arbeidet med å

⁵ Solide Oxide Fuel Cell er en høy-temperatur brenselcelle som er robuste i forhold til brensel og vil også kunne oppnå den høyeste virkningsgraden av de kjente brenselcelleteknologiene dersom de kombineres med et varme/energisystem (CHP) (US Department of Energy 2017).

⁶ Se tab. 3-1

innhente litteratur ble iverksatt tidlig i januar. Som en del av fremdriftsplanen ble følgende mål og faser fastsatt:

Fase 1 – Kartlegging og innhenting av relevant litteratur

Fase 2 – Samtaler med fagpersonell/ressurspersoner

Fase 3 – Bearbeiding av litteratur

Fase 4 – Avsluttende fase med konklusjon og renskriving av oppgave

Fremgangsmåten for å finne relevant litteratur ble i all hovedsak søk i databaser på Sjøkrigsskolens bibliotek samt bruk av oppgaver skrevet av tidligere kadetter. Oppgaven ble spisset etter hvert som litteratur ble bearbeidet.

1.4 Struktur

Oppgaven inneholder en del som introduserer tre forskjellige fremdriftssystemer innenfor brenselcelleteknologi på undervannsbåter – et kjent system og to systemer som fortsatt er lavt på modenhetsskalaen. For at leseren skal få kjennskap til hva som ligger til grunn for de ulike systemene vil det bli lagt vekt på en del som beskriver de mest brukte reformeringsteknikkene som anvendes i fremstilling av hydrogen.

Etter at leseren er introdusert for de ulike systemene i oppgaven vil det være en analysedel som vurderer systemenes fordeler og ulemper sett i forhold til at ubåten skal kunne operere i kystnære farvann.

Vurderingene i oppgaven sammenfattes og drøftes i et eget avsnitt som til slutt leder ut i en konklusjon med anbefaling av systemvalg.

2 Beskrivelse av aktuelle system

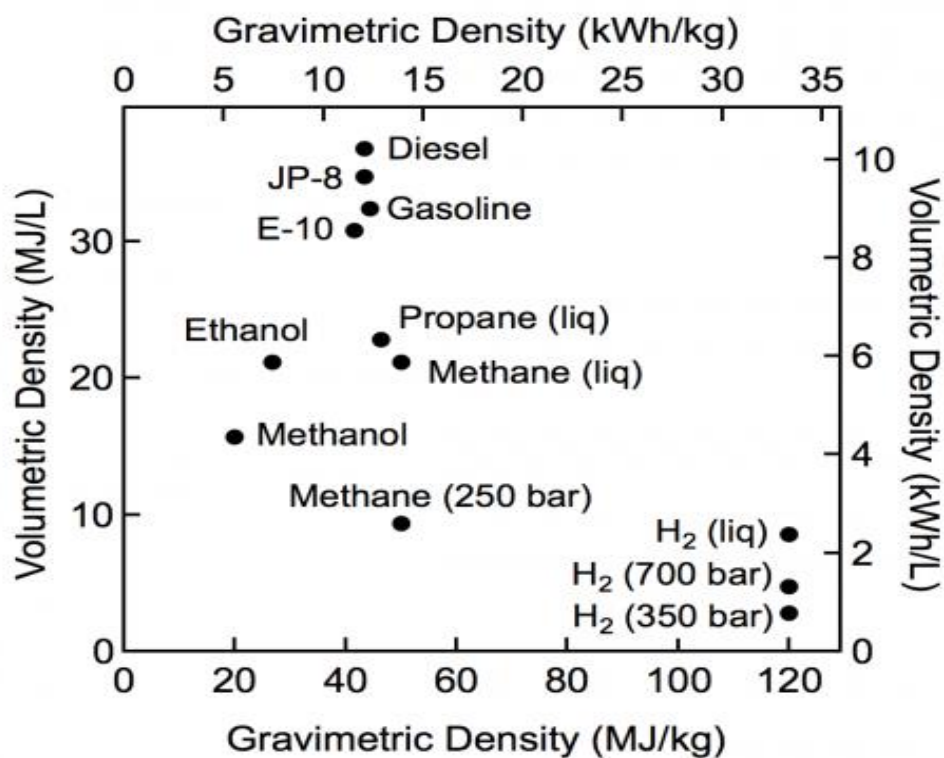
Det finnes hovedsakelig to forskjellige brenselcellesystemer til bruk om bord i ubåter i dag - med og uten reformering. Det ene systemet bruker rent hydrogen som er hentet fra lagringsenheter, mens det andre systemet bruker en syntesegass fra reformering av hydrokarboner. Det vil ikke være mulig å produsere 100% rent hydrogen fra flytende hydrokarboner, men en kommer ganske nærme. Dette vil bli diskutert i nærmere detalj under [pkt. 2.2](#).

Denne oppgaven tar bare for seg diesel når det er snakk om reformering, men det er verdt å nevne at det finnes lignende systemer i dag som benytter seg av metanol-reformering, Howaldtswerke-Deutsche Werft GmbH (HDW) har blant annet utviklet et system som er klar til å installeres om bord (Krummrich 2010). I tillegg holder Spania, med det spanske skipsverftet Navantia, på med utviklingen av et brenselcellesystem som går på reformert etanol, og har etter sigende gjort klar S-80 klassen for implementering av dette systemet (Ing 2017).

Det spesifikke energiinnholdet (kWh/kg) for flytende hydrogen er ca. 3 ganger det av diesel og bensin, men den volumetriske energitettheten (2,5 kWh/l) er under 1/4 av den for diesel (10,1 kWh/l) (US Department of Energy 2017). Dersom man velger å lagre hydrogenet i flytende form må det holdes i kryogene tanker på -253 grader C for at det ikke skal fordampe, eller komprimeres til rundt 700 bar i egnede trykktanker – med andre ord er det svært krevende å holde hydrogen i væskeform. Dette er en av grunnene til at metallhydrider ofte foretrekkes til lagring av rent hydrogen på ubåter, til tross for en lav vektprosent av hydrogen⁷ (mellom 0,65-2 % wt H₂ (Cha, Colella, O'Hayre, Prinz 2006, 260)).

⁷ For å finne vektprosenten til hydrogen i en metallhydridsyndler deles hydrogenvekten på sylindrens masse. Eks: en tom metallhydridsyndler har en masse lik 0.26kg og den fylles med 0,0017kg hydrogen. Vektprosent hydrogen i beholderen er da $0,0017 / 0,26 = 0,0065 * 100 = 0,65\%$ wt H (Laraminie et al. 2003, 288).

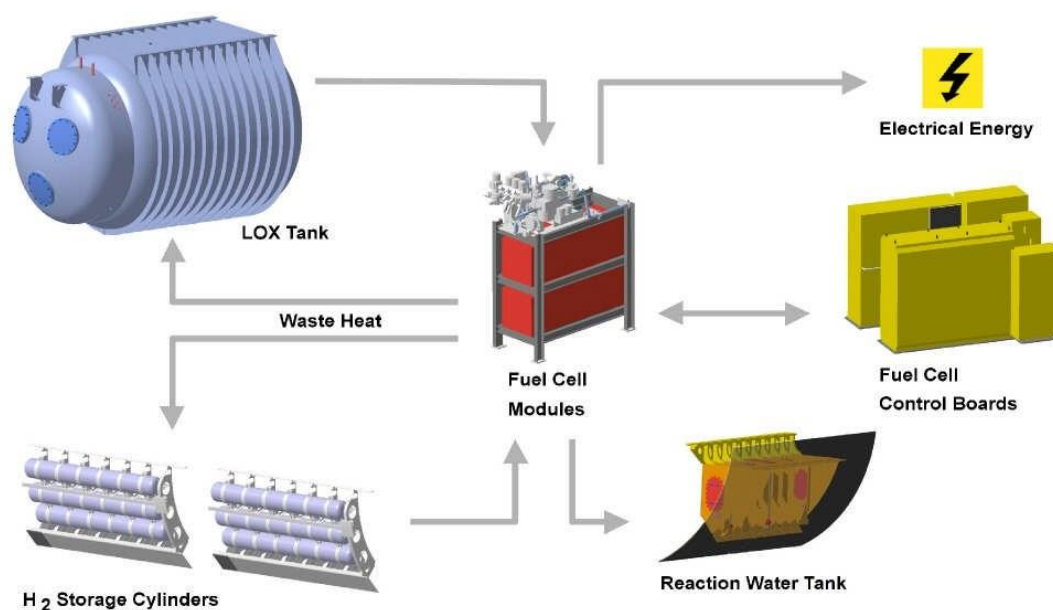
Fig. 2-1 viser hvorfor diesel kan være et mulig valg som en alternativ energibærer, dog ikke som brensel i en forbrenningsmotor, men som kilde til hydrogen via reformering.



Figur 2-1 – Oversikt over energitetthet og volumetrisk tetthet (US Department of Energy 2017).

2.1 Rent hydrogen fra metallhydrider

Tyskland opererer i dag med brenselcelleteknologi på sine ubåter. Dette systemet benytter seg ikke av reformering for å få tilgang til hydrogen, men mater brenselcellene med rent hydrogen fra metallhydridtanker som er plassert utenfor trykkfast skrog.



Figur 2-2 - Brenselcellesystem som får tilført hydrogen fra metallhydridtanker (Krummrich 2010).

Systemet som er illustrert i *fig. 2-2* blir i dag brukt i 212- og 214-klassen i to forskjellige konfigurasjoner. På 212-klassen er det installert 9stk PEMFC med en effekt på 34 kW pr. modul, mens systemet på den eksportorienterte 214-klassen består av 2stk PEMFC med tilhørende effekt på 120kW pr. modul. Tyskland bruker det i sine ubåter og i tillegg har land som Italia (212-klasse bygget på lisens fra HDW i Italia), Portugal (214-klasse), Sør Korea (214-klasse) og Hellas (214-klasse) alle gått til innkjøp av tyske ubåter med tilhørende AIP-teknologi. Hellas har i tillegg bygget en hydrogenstasjon for påfylling av rent hydrogen til metallhydridtankene i Skaramanga, like ved Aten, i samarbeid med Howaldtswerke Deutsche Werft GmbH (HDW) som eier designet av ubåtene (EV World 15. juli 2007).

På 212-klassen får brenselcellene rent hydrogen fra omkringliggende metallhydridtanker utenfor trykkfast skrog og oksygen fra en lagringstank som inneholder flytende oksygen (LOX), også denne plassert på utsiden av trykkfast skrog. Dehydrogenering, altså prosessen som skal til for å utnytte hydrogenet i metallhydridtankene, er en endotermisk prosess.

Dette betyr at prosessen av avhengig av at energi tilføres for at dehydrogenering skal forekomme. Dette har HDW løst ved å utnytte restvarmen fra kjølesystemet til brenselcellemodulene til å varme opp metallhydridtankene, som igjen øker den totale virkningsgraden til anlegget (Browning, Lakeman 2003). Avfallsproduktet fra en brenselcelle som går på rent hydrogen og oksygen er vann. Reaksjonsvannet er rent og kan brukes til drikkevann om nødvendig.

2.2 Hydrogen fra syntesegass via reformering

2.2.1 Reformering av diesel

For å kunne beskrive et system som tar utgangspunkt i reformering av diesel er det hensiktsmessig å gjøre leseren kjent med de vanligste reformeringsteknikkene som brukes i dag og hvilke som vil være aktuelle i en ubåtkonfigurasjon.

Prosessen som skal til for å skille ut hydrogenet i flytende hydrokarboner er utfordrende og kompleks, og da i særskilt grad for tyngre hydrokarboner som diesel. Det kommer selvsagt an på hvilke krav som stilles til sluttproduktet fra en reformeringsprosess, men man kan regne med at flere trinn etter reaktoren er nødvendig.

Det er pr. i dag ikke mulig å produsere 100% rent hydrogen ved reformering av diesel, men man får heller noe som kalles syntesegass. Syntesegassen som er en sammensetning av H_2 , CO , CO_2 , H_2O og CH_4 er dårlig nytt for en PEMFC som er spesielt sårbar for CO-forgiftning, dette blir nærmere beskrevet under pkt. [2.3.1](#). På grunn av dette trengs ofte flere trinn for å rense utløpsgassen fra reformeren for urenheter. Det finnes i hovedsak tre metoder innen reformering av hydrokarboner:

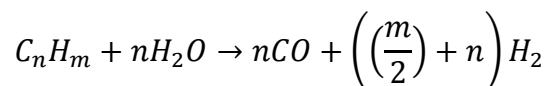
- Dampreforming/Stemreforming (SR)
- Delvis oksidasjon/Partial Oxidation (POX)
- Autotermisk reformering/Autothermal Reforming (ATR)

2.2.1.1 Dampreforming

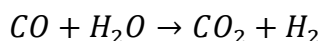
SR med påfølgende en vannskiftreaksjon (WGS) er en mye brukt og velutprøvd reformeringsteknikk som brukes i storskala anlegg i prosessindustrien. WGS trinnet reduserer CO-innholdet i syntesegassen, hvor mye kommer an på utløpstemperaturen fra reaktoren – dess høyere temperatur dess høyere CO-innhold. Reaksjonen i SR er energikrevende og medfører at noe av føden må forbrennes for å varme opp reaktoren, typisk foregår SR på

temperaturer $> 700^{\circ}\text{C}$ og siden reaksjonen er meget endotermisk betyr det at en ekstern varmekilde må til for å drive reaksjonen fremover. I SR er det vanlig å bruke deler av føden (20-25%) til reaktoren som fyrgass i en varmeveksler/kjele for å oppnå de høye temperaturene, som igjen vil senke den totale virkningsgraden til systemet (Norges Forskningsråd 2006). De generelle SR-reaksjonene og den påfølgende WGS-reaksjonen for hydrokarboner kan beskrives på følgende måte:

(2.1) SR:

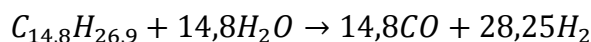


(2.2) WGS:

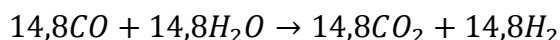


For NATO F-76 diesel⁸ blir reaksjonen:

(2.3)



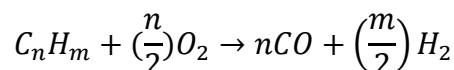
(2.4)



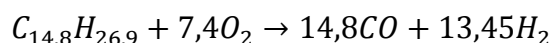
2.2.1.2 Partiell oksidasjon

Som et alternativ til SR kan man benytte POX til å konvertere hydrokarboner til hydrogen. Teknikken brukes ofte ved reformering av tyngre hydrokarboner og involverer en tilførsel av oksygen i tillegg til vanndamp. Mengde oksygen kontrolleres nøye for å påse riktig oksidasjonsgrad av hydrokarbonet (Fuel Cell Norway ANS 2006). POX-reaksjonene kan beskrives generelt og for F-76 diesel gjennom følgende reaksjonsligninger:

(2.5)



(2.6)



⁸ Diesel har en kjemisk sammensetning som varierer fra $C_{10}H_{20}$ til $C_{15}H_{28}$ (Date 2017, 189). $C_{14,8}H_{26,9}$ er sammensetningen til NATO F-76 diesel og brukes derfor som eksempel i reaksjonsligningene (2.3), (2.6), (2.8) og (2.9).

Reaksjonene er eksoterme og en trenger følgelig ikke eksterne varmekilder for å drive reaksjonene fremover som i en SR-reaktor. POX foregår typisk på svært høye temperaturer (1200-1500°C) og kan derfor anvendes uten bruk av katalysator for å drive reaksjonen fremover. I en ubåt vil slike temperaturer by på utfordringer med tanke på sikkerheten til besetningen, dessuten er slike anlegg best egnet til storskala produksjon. Tyngre hydrokarboner som diesel vil være enklere å konvertere ved disse temperaturene og det har dessverre vist seg vanskelig å kontrollere reaksjonene i reaktoren når man skalerer ned anlegget (Larminie, Dicks 2003, 249).

Dersom man reduserer temperaturen og i tillegg benytter en katalysator får man noe som betegnes som katalytisk partiell oksidasjon (CPOX). Ved å bruke en katalysator øker man hydrogenutbyttet pr. mol diesel og dermed systemets virkningsgrad, men en reduksjon i temperaturen vil føre til at reaksjonen går tregere, så man kan si at katalysatoren utligner dette tapet (Larminie et al. 2003, 249). I tillegg er en POX-reaktor eksotermisk noe som betyr at selve reaktoren er mer kompakt enn en SR-reaktor som er avhengig av indirekte varmeveksling. En kan anta at en slik enhet vil koste mindre enn en SR nettopp på grunn av at den ikke trenger indirekte varmeveksling og er mer kompakt, men da har man ikke regnet med at nedstrøms⁹ WGS- og rensetrinn ofte er dyrere og har et dårligere H₂ utbytte (Norsk Forskningsråd 2006). Et system som baserer seg på PEMFC vil være avhengig av disse trinnene for fjerning av CO. I SOFC er derimot CO sammen med H₂ en del av brenselet inn på cellen og gjør seg derfor ikke avhengig av like mange rensetrinn etter det første reformeringstrinnet. I anlegg som brukes i prosessindustrien blir ofte luft fra omgivelsene brukt for å supplere reaksjonene med O₂, men man får et mye større innhold av nitrogen i syntesegassen. Nitrogenets tilstedeværelse senker hydrogenets partialtrykk¹⁰ og fører til at Nernst-potensialet¹¹ til brenselcellen reduseres som igjen senker systemets totale virkningsgrad (Larminie, Dicks 2003, 249). Vedlegg 5.2 beskriver hvordan Nernst-potensialet til en elektrokjemisk celle defineres.

⁹ Nedstrøms i dette tilfellet betyr senere i reformerings/konvertingsprosessen, altså etter selve reformeren/POX-enheten. Se *fig. 2-5* for eksempel på hvordan et rensetrinn kan være plassert.

¹⁰ Partialtrykk er det trykket en enkelt gass i en gassblanding ville hatt dersom den alene fyller det tilgjengelige rommet. Et volum som er oppfylt av forskjellige gasser vil ha et totaltrykk som er lik summen av alle partialtrykkene til de ulike gassene. Betegnelsen for partialtrykk er p (eks. p_{H_2}) (Store Norske Leksikon 2016).

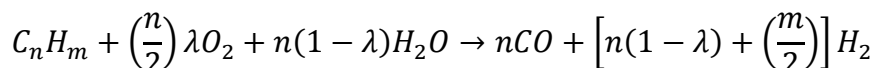
¹¹ Nernst-potensialet til en celle blir definert etter formelen: $E_{\text{cell}} = E^{\circ}_{\text{cell}} - (RT/nF) \ln Q$. Se vedlegg 5.2 for utfyllende detaljer.

I en ubåtkonfigurasjon vil man bruke rent oksygen fra lagringstanker (LOX) da det ikke vil være hensiktsmessig å bruke luft fra fartøysatmosfæren. Dette vil i så fall ikke beløpe seg som en ekstra kostnad da man bruker oksygen i flere andre prosesser om bord, og man slipper samtidig unna problematikken rundt nitrogenets tilstedeværelse.

2.2.1.3 Autotermisk reformering

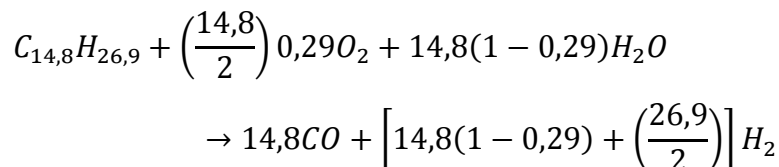
ATR er en kombinasjon av de to metodene beskrevet i 2.2.1.1 og 2.2.1.2 Tanken er å utnytte energien som genereres i de eksoterme reaksjonene (se formel 2.5/2.6) i POX og bruke denne til å drive de endoterme reaksjonene (se formel 2.1/2.3) i SR. En kan på denne måten slippe unna behovet for eksterne varmekilder og/eller indirekte varmeveksling. Dette fører til at en ATR er enklere og mer kompakt enn en SR, som vanligvis betyr at investeringskostnadene er lavere. I ATR vil forholdet mellom oksygen og fødegass (λ) være av vesentlig betydning for reformerproduktet. Det er gitt at støkiometrisk forbrenning forekommer når forholdet mellom faktisk luftmengde og støkiometrisk luftbehov for brenselet er 1. Når dette forholdet er under 1 har man forbrenning ved luftmangel, eller ufullstendig forbrenning (Almås 2003, kap. 7). Ved ufullstendig forbrenning dannes CO som et biprodukt. Denne blir senere omgjort til vann og CO₂ via vannskiftreaksjonen (2.2), eller brukt som brensel i en SOFC.

(2.7) ATR:

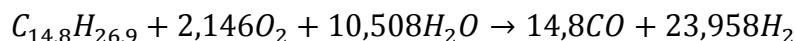


Dersom en tar utgangspunkt i en ufullstendig forbrenning med λ lik 0,29¹² blir reaksjonen i en ATR for F-76 diesel som følger:

(2.8)



(2.9)



I 2008 utførte det svenske selskapet PowerCell en rekke forsøk på å lage en stabil diesel reformer til bruk i brenselceller. De testet forskjellige metoder innenfor ATR inkludert

¹² Tall hentet fra PowerCell sin studie fra 2008 (Dawody et al. 2009)

noe som kalles «cool flame design»¹³, før de til slutt kom frem til en konfigurasjon som ga tilfredsstillende resultater i forhold til diesel slip¹⁴, driftstemperatur, hydrogeninnhold og virkningsgrad på reformer. I dette reformer designet som de i sine publikasjoner referer til som M5-designet oppgis en λ lik 0,29, derav er det dette som er brukt som utgangspunkt i ligning (2.8) og (2.9) (Dawody, J, B. Lindström, J.A.J. Karlsson, P. Ekdunge, L. De Verdier, B. Häggen-dal, M. Nilsson, L.J. Pettersson 2009, 3380)

2.2.1.4 Oppsummering

Det er fordeler og ulemper med de tre metodene. SR er den metoden som gir det beste hydrogenutbytte, men er best egnet til storskala produksjon i tillegg til at slike anlegg ofte vil være mer kompleks da de krever eksterne varmekilder for å drive reaksjonene fremover. Prinsippet bak ATR er å utnytte de beste egenskapene til både SR og POX samt minimere ulempene. ATR tilbyr et forenklet design da denne metoden kombinerer SR og POX som fører til at reformeringsreaksjonene balanserer hverandre ut og med det unngår man eksterne varmevekslere. Dessuten har et slikt anlegg relativt god responstid fordi reaksjonene driver seg selv (Cha et al. 2006, 295). Driftstrykket i en ATR kan nå trykk opp mot 100 bar, noe som kan utnyttes til å dumpe avfallsprodukter som CO₂ ved større dybder (International Energy Agency 2006, 8). Dette er noen av grunnene til at ATR kan være et fornuftig valg til bruk om bord i en ubåt, og derfor brukes som eksempel i videre betraktninger i oppgaven.

2.3 Brenselcelleteknologi på ubåt

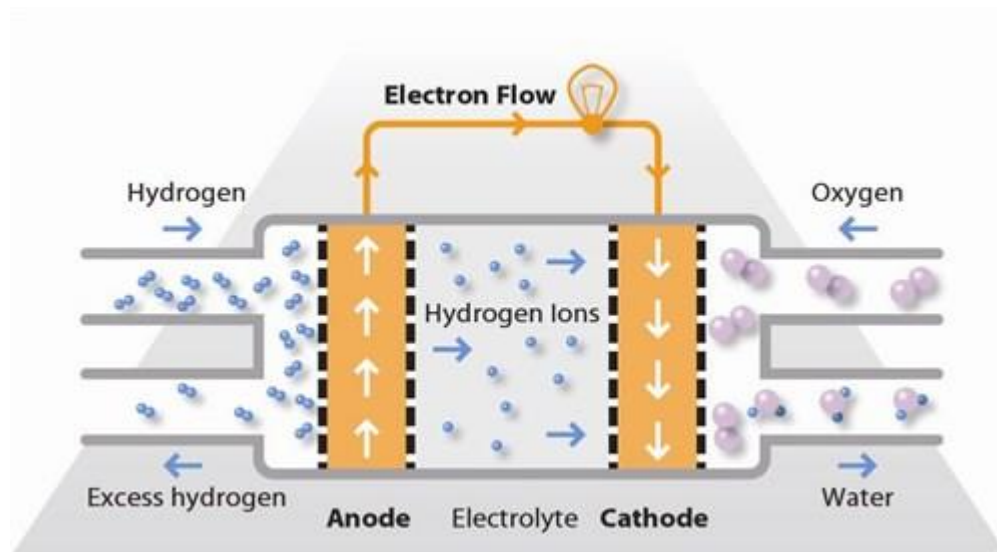
PEMFC og SOFC fremstår som de mest lovende alternativene i en ubåtkonfigurasjon (Bakst 2014), men det er viktig å få frem hva som må tas hensyn til vedrørende de to systemene.

¹³ Cool flame-prinsippet ble med en tilfeldighet oppdaget i 1817 av Sir Humphry Davy da han merket at visse typer flammer ikke brant fingrene hans eller antente fyrstikker (Chapek & Pearlman 1999, 149). En slik flamme har en maksimal temperatur på under 400°C, den vil ikke avgi noen form for sot og bare en brøkdel av brenselet brukes. PowerCell utforsket denne metoden i 2008 i en ATR-konfigurasjon, men resultatene bar ikke frukt (Dawody et al. 2009).

¹⁴ I dette tilfellet er diesel-slip er en betegnelse for diesel som ikke forbrenner/konverteres og dermed ikke blir utnyttet.

2.3.1 PEMFC – Proton Exchange Membrane Fuel Cell

Felles for brenselceller er at de har to elektroder – en anode og en katode – en elektrolytt



Figur 2-3 - Prinsippskisse av PEMFC virkemåte (Matthey 2017).

og som regel en katalysator for å øke hastigheten på de kjemiske reaksjonene. En platinabasert katalysator på anodesiden prosesserer hydrogenet og separer elektroner og protoner. Protonene går gjennom membranen til katoden, mens elektronene blir tvunget rundt i en ekstern krets (Matthey 2017). Når elektrodene vandrer fra anoden til katoden genereres elektrisk energi.

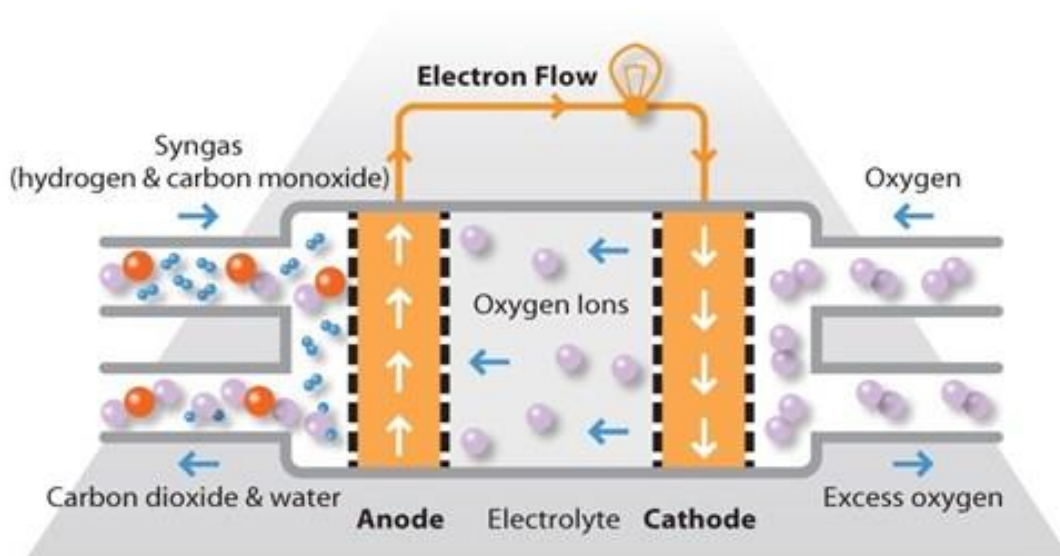
Blant brenselcellene vi kjenner til gir PEMFC det beste effektutbytte (mW/cm^2), og har den laveste systemkompleksiteten¹⁵ (Cha et al. 2006, 247). Typisk driftstemperaturer i slike brenselceller er 80-100°C, noe som kan sies å være fordelaktig med tanke på signaturkarakteristikk, men samtidig gjør den lave temperaturen cellen mer sårbar for urenheter i brenselet. PEMFC er som nevnt lite fleksible med tanke på brensel, og rent hydrogen er det eneste alternativet. Svovel blir nevnt i all litteratur som omhandler brenselceller som et forurensende medium og vil forårsake permanente skader på katalysatoren. Dette fører igjen til at cellens effekt reduseres. PEMFC har i tillegg til dette en særlig svakhet for karbonmonoksid, da denne har en lignende effekt på katalysatormembranen. Omfattende studier, og erfaringer fra drift har bevist at verdier så lavt som 10 ppm CO i brenselet har

¹⁵ PEMFC har den laveste systemkompleksiteten forutsatt at den får rent hydrogen fra lagringsenheter som f.eks. metallhydrid, kryotanker, eller trykktanker. Ved reformering vil den derimot ha en høyere systemkompleksitet enn de fleste andre brenselceller (Bakst 2014).

en uakseptabel effekt på cellens ytelse (Larminie et al. 2003, 110), men her spriker litteraturen noe. Eksempelvis blir det oppgitt i *Fuel Cell Fundamentals* fra 2006 en CO-toleranse opptil 50 ppm (Cha et al. 2006, 247). Dette forklares ved at CO har en særlig affinitet¹⁶ for platina og dermed danner et lag over katalysatormembranen som igjen hindrer hydrogenet i nå den (Larminie et al. 2003, 110). Videre er PEMFC sammenlignet med SOFC i *tab. 2-1*.

Det er grunner som taler for og imot bruk av PEMFC på ubåt som er tett knyttet til kvaliteten på hydrogenet. Dette omtales i pkt. [2.1](#) og [2.3.3](#).

2.3.2 SOFC – Solide Oxide Fuel Cell



Figur 2-4 - Prinsippkisse av SOFC virkemåte (Matthey 2017).

SOFC har de høyeste driftstemperaturene av brenselcellene vi kjenner til (500-1000°C) og anvender et fast metalloksid som elektrolytt, vanligvis en yttria-stabilisert zirconia (YSZ) (Cha et al. 2006, 244). YSZ leder negativt ladde oksygenioner fra katoden til anoden, hvor det reagerer med innløpsføden på anoden (*Fig. 5-2*). Siden oksygen er det mobile ionet i en SOFC, i motsetning til hydrogen i en PEMFC, kan CO faktisk anvendes som brensel med CO₂ som avfallsprodukt. Ved reformering av diesel vil innløpsføden på

¹⁶ Med affinitet menes den kjemiske tiltrekningskraften mellom atomer som fører til at molekyler dannes. Altså hvor spontane prosesser forekommer, det vil si prosesser som går av seg selv uten tilført energi (Pedersen 2012).

anoden derimot være en syntesegass som inneholder både hydrogen og CO og avfallsproduktene vil være vann og CO₂ (fig. 5-2). De høye temperaturene tilbyr en intern reformering i brenselcellen som deriblant omdanner CO til CO₂ (Stambouli, Traversa 2002).

Selv om SOFC ikke kan skimte med like et like bra effektutbytte (250-350 mW/cm²) som en PEMFC er det flere fordeler forbundet med en slik brenselcelle. SOFC oppnår blant annet den høyeste elektriske virkningsgraden (50-60%) på grunn av de høye temperaturene, og kan økes ytterligere (opp mot 90%) dersom den kombineres med et varme/energi-system (CHP) (Cha et al. 2006, 245) som utnytter overskuddsvarmen i cellen. I tillegg har SOFC den beste forventede levetiden blant brenselceller (40000-60000 timer (Bakst 2014)).

De største utfordringene er knyttet til de høye temperaturene. Nærmest alle metaller og legeringer vil oksidere og ruste ved høye temperaturer, hvor utsatt et materiale er kommer an på omgivelsene og temperaturen det blir utsatt for (The Welding Group 2017). Som i alle andre brenselceller vil ytelsen i en SOFC øke med trykket i cellen. Dersom en kombinerer brenselcellen med et CHP-system vil det være gunstig med høye trykkforhold for å heve systemets totale virkningsgrad. I en PEMFC vil dette vise seg å ha en marginal effekt da effekttapet som går med til komprimering av innløpsgassen går på bekostning av gevinsten. I et anlegg som bruker ATR og SOFC kan man derimot utnytte overtrykket fra reformeringsprosessen og således slipper man unødvendige tap ved komprimering av gassen før den mates inn på brenselcellen.

Det skilles mellom tre typer SOFC – Høytemperatur (HT-SOFC) (800-1000°C) og middel- til lavtemperatur (IT-SOFC og LT-SOFC) (500-800°C). Ved å introdusere IT-SOFC som et alternativ forsvinner flere av utfordringene som finnes i HT-SOFC. Blant annet vil forventet levetid øke da den termiske belastningen på materialene minsker. En annen fordel er at det tillates å bruke billigere og mer robuste metaller fremfor dyre keramiske materialer i oppbygningen av cellen (Stambouli et al. 2002; Cha et al. 2006, 245-246). Det er enkelte artikler som påstår at IT-SOFC vil øke systemets totale virkningsgrad, uten at de oppgir nøyaktige grunner til dette (Stambouli et al. 2002), men sannsynlige grunner kan være at det tillates bruk av bedre og mer robuste materialer som øker konduktiviteten og dermed reduserer cellens ohmske tap (Larminie et al. 2003, 56-57; 221).

Tabell 2-1 - Sammenligning mellom SOFC og PEMFC (Cha et al. 2006, 247).

Brenselcelle	Elektrisk virkningsgrad (%)	Energitetthet (mW/cm ²)	Effekt (kW)	Intern reformering	CO-toleranse	Systemkompleksitet
PEMFC	40-50	300-1000	0,001-1000	Nei	Gift < 50 ppm	Lav-moderat
SOFC	50-60	250-350	10-100000	Ja	Brensel	Moderat

2.3.3 Status ATR og PEMFC/SOFC på ubåt

Reformering av diesel til bruk i brenselceller i ubåter er pr. dags dato et umodent system sammenlignet med varianter som bruker rent hydrogen fra metallhydrider. Frankrike med DCNS i spissen har siden 2006/2007 forsket på og utviklet et system som baserer seg på dieselreforming, men har ennå ikke installert det i noen ubåter og det later til å være noe uferdig. Men at det finnes et uutnyttet potensiale for slike anlegg hersker det derimot liten tvil om. Det fremkommer fra studiene deres to forslag til mulige systemer, hvorav forskjellene ligger i hvilke brenselceller som benyttes og de påfølgende konsekvenser valget får for konfigurasjonen av anlegget. Begge anleggene anvender ATR som valgt reformeringsteknikk.

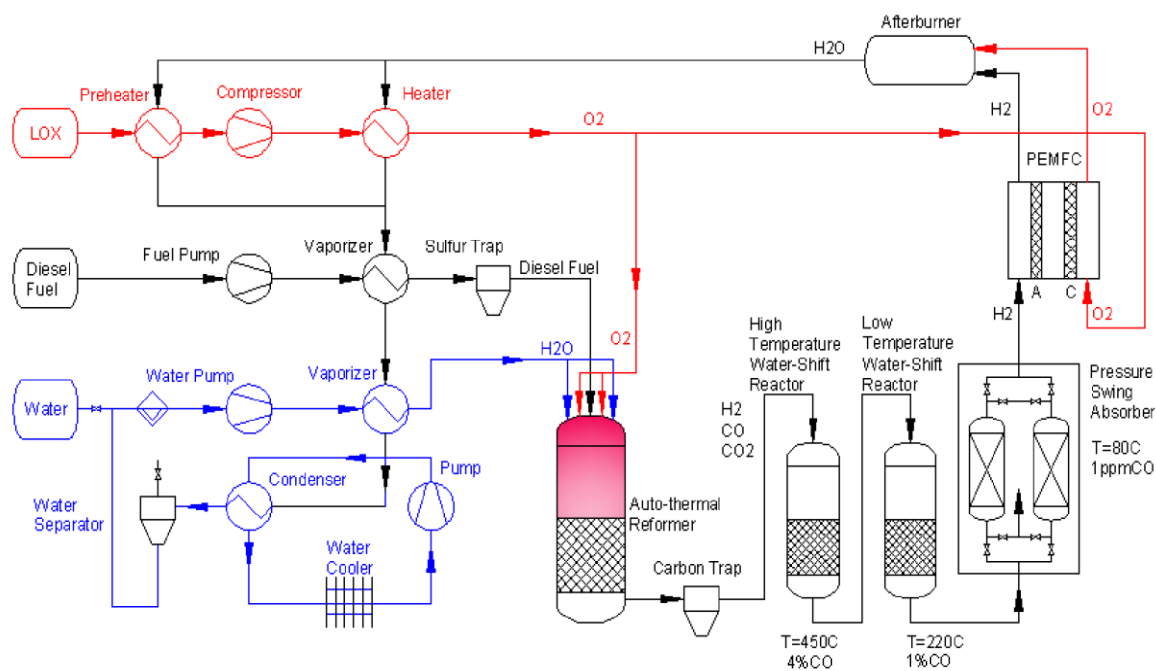
2.3.3.1 System bestående av ATR og PEMFC

Av grunner tidligere nevnt vil et system som bruker PEMFC stille høye krav til innløpsføden på anodesiden. Det er derfor essensielt at svovel og karbonmonoksid fjernes før det når katalysatormembranen i cellen. I tillegg vil katalysatoren i reformeren også ta skade av svovel. Det er en bred enighet i forskningsmiljøet at svovelinnholdet i innløpsføden må reduseres ned til mindre enn 1 ppm for å unngå en irreversibel deaktivering av katalysatoren (Bakst 2014) i både reformer og brenselcelle. Løsningen på dette problemet er å inkorporere et avsvovlingstrinn før reformeren. Avsvovlingstrinnet vil derfor være felles for begge anleggene.

I reformeringsprosessen produseres CO som en del av en ufullstendig forbrenning (se pkt. [2.2.1.3](#)). Av grunner nevnt tidligere er det derfor svært viktig at CO fjernes eller omformes før syntesegassen når brenselcellen. Dette er løst ved å lede gassen gjennom et karbonrensetrinn, etterfulgt av to temperaturkontrollerte WGS-trinn som både reduserer CO-innholdet og senker temperaturen på gassen. Nå skal temperaturen og CO-innholdet forhåpentligvis være rundt 220°C og 1%, men dette er som kjent et altfor høyt nivå i forhold

til hva som er skadelig for en PEMFC. Derfor vil gassen som et siste trinn gå gjennom en trykk-sving absorber (Pressure swing absorber (PSA)) som har til hensikt å påse en jevn strøm av tilnærmet rent hydrogen med riktig temperatur inn på cellen (Bakst 2014). Et slik PSA-trinn er helt nødvendig i en PEMFC konfigurasjon, og bidrar til at anleggets kostnad og kompleksitet øker betraktelig (Larminie et al. 2003, 252). I tillegg vil støy fra kompressorer, ventiler og ekstra rensetrinn være av betydning i vurderingen av et slikt system om bord.

Den 27. oktober 2014 la DCNS frem et forslag til hvordan et AIP-system som baserer seg på dieselreforming i kombinasjon med PEM-brenselceller kunne se ut (Fig. 2-5).



Figur 2-5 – Prinsippskisse over hvordan et anlegg med ATR og PEMFC kan se ut.

(Bakst 2014)

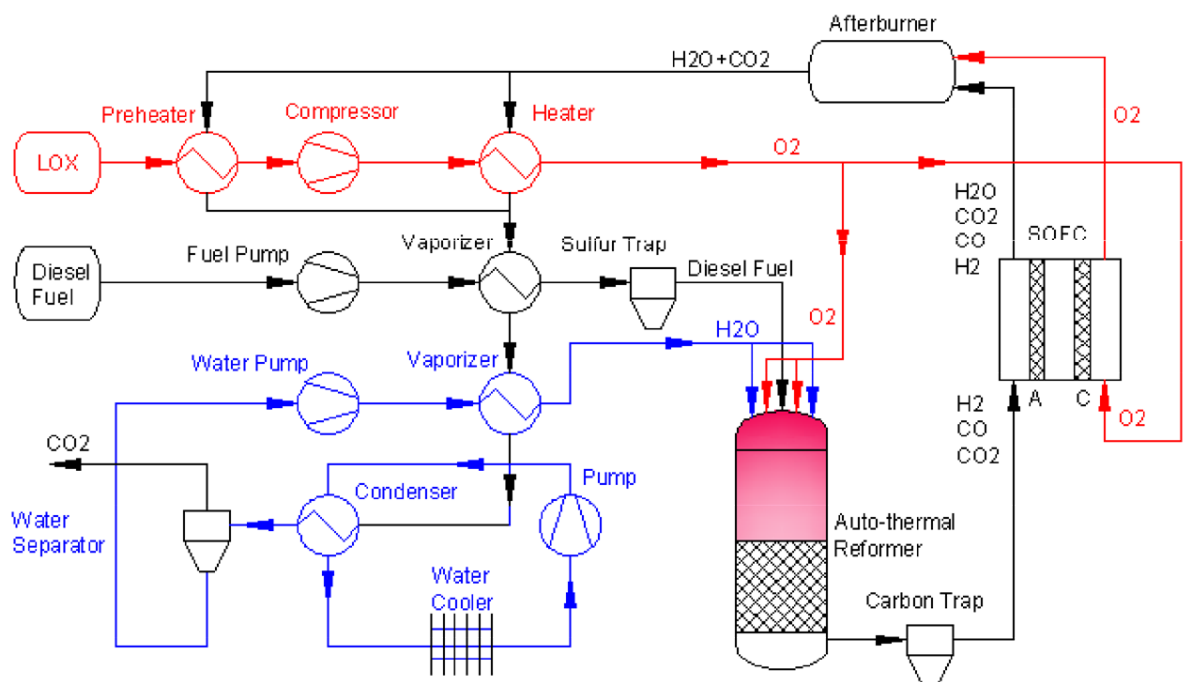
Som figur 2-5 viser vil de høye reformeringstemperturene som følger med når en produserer hydrogen fra diesel by på utfordringer i en ubåt hvor plass ofte er mangelvare. Et annet problem vedrørende reformering av diesel er at det har vist seg vanskelig å oppnå en fullverdig konvertering til en hydrogenrik syntesegass. Som nevnt tidligere kan diesel variere i sin kjemiske oppbygning og med dette vil også dens fysiske egenskaper kunne variere. Dieselolje består av en rekke forskjellige inhomogene hydrokarboner som vil reagere ved ulike temperaturer og det vil være vanskelig å unngå sot-dannelse og uønskede

biprodukter når det fordampes og reagerer med oksidantene¹⁷ i reformeren. Det er derfor svært viktig at man påser at man har en homogen miks av diesel og oksidanter før de kommer i kontakt med katalysatoren i reformeren. Dette vil hjelpe til med å forlenge levetiden til katalysatoren samt bidra til en fullverdig konvertering av dieselen (Dawody et al. 2009, 3373).

2.3.3.2 System bestående av ATR og SOFC

Ved å bruke SOFC fremfor PEMFC

De åpenbare utfordringene med de høye temperaturene i SOFC kan også ansees som den største fordelen sett i forhold til et PEMFC-system. Siden utløpstemperaturen fra ATR-reaktoren ligger i samme området som driftstemperaturen i en SOFC er det ikke behov for like mange varmevekslingstrinn, om noen i det hele tatt. Det at SOFC også kan anvende CO som brensel betyr at dette systemet ikke vil avhenge av WGS-trinn, foruten den som foregår internt i reformeren.



Figur 2-6 - Prinsippsskisse av hvordan et AIP-system med ATR og SOFC kan se ut (Bakst 2014).

¹⁷ En oksidant, eller oksiderende stoffer, vil ta elektroner fra andre stoffer og dermed oksidere det stoffet og samtidig redusere seg selv. Dette skjer i alle redoks-reaksjoner. Disse oksidantene kan også kalles elektronmottakere (på engelsk *oxidants*) (Helmenstine 2017).

Ulempen ved å bruke SOFC er at CO₂ er en del av avfallsproduktene fra brenselcellen og må håndteres fortløpende. Dette kan enten lagres om bord i trykktanker, eller pumpes direkte overbord i en væskeløsning. Dersom CO₂ pumpes ut i gassform vil det dannes små bobler som kan føre til en økning i indiskresjonsraten¹⁸ for ubåten. Om dette blir valgt løsning på CO₂ problemet må det tas hensyn til at sjøtrykket på utsiden av skroget må overvinnes. Tar man utgangspunkt i at ubåten skal kunne dykke til mer enn 400m, noe som fort blir aktuelt for Norges nye ubåter, må altså utløpstrykket fra brenselcellen være over 40 bar for å overvinne sjøtrykket. Alternativt kan avfallsproduktet pumpes ut via høytrykkspumper, men dette vil da generere støy (Margeridis & Mart 1995).

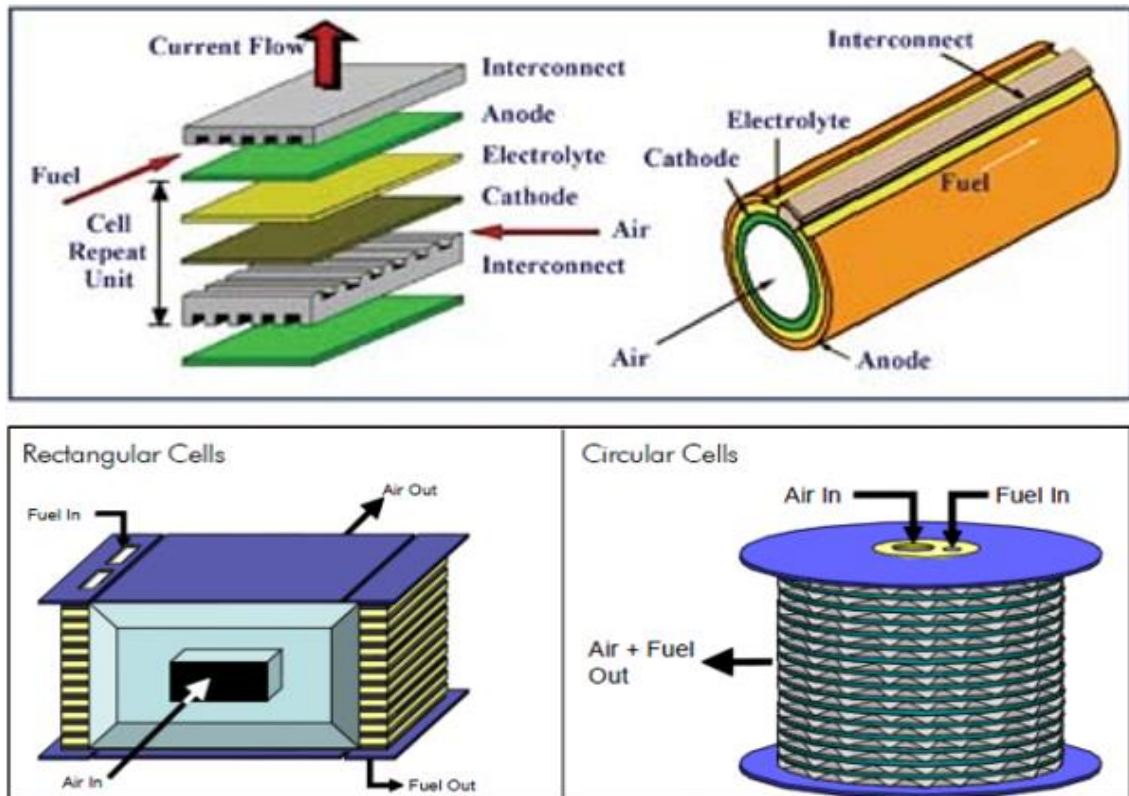
Det kan se ut som om SOFC er et fornuftig valg i anlegg som anvender dieselreformerer, men det viktig å påpeke at det fremdeles foregår forskning og at det finnes et stort utviklingspotensial på denne fronten. Noen av de mest fremtredende knytter seg som kjent til de høye driftstemperaturene slike celler operer under.

Det finnes flere designvarianter for en SOFC, men det forutsettes i denne oppgaven en plant cellestackdesign (fig. 2-7) fordi dette designet gir høy ytelse per areal (W/cm²) (Ortigoza Villalba 2013, 30) i forhold til andre design.

I DCNS sine funn vedrørende konseptubåten SMX® Ocean pekes det på forseglingen mellom platene i en brenselcellestack som et problem. De mange temperaturforskjellene og ulike utvidelseskoeffisientene til komponentene i cellene gjør sitt til at det er vanskelig å forsegle skille mellom oksygenet og brenselet i cellen. Den vanligste løsningen på dette problemet har vært å bruke lag av glass som har en overgangstemperatur i samme område som cellens driftstemperatur. Når dette glasslaget blir varmt nok vil det mykne og lage en forsegling rundt hele cellen og på den måten hindre at noe lekker ut. Dette er heller ikke en perfekt løsning da det har vist seg at rester av silika fra glasset ofte setter seg på anoden og reduserer cellens effekt (Bakst 2014). Enkelte produsenter velger å endre selve designet på brenselcellen til en sirkulær modell, noe som i og for seg løser forseglingsproblemet, men reduserer cellens leverte effekt sett i forhold til et flatt design.

¹⁸ Indiskresjonsrate er i litteraturen definert som tiden ubåten bruker på snorkling dividert med summen av tiden brukt på snorkling og tid i neddykket gange (Hootman, Psallidas, & Whitcomb 2010). Formelen kan utledes på følgende måte:

$$IR = \frac{t_{snorkling}}{t_{snorkling} + t_{neddykket}}$$



Figur 2-7 - Plan og sirkulær design av en SOFC (Ceramic Industry 2001; Thissjen 2007).

Det viser seg imidlertid at dette problemet er et velkjent fenomen blant SOFC og det har siden foregått en stor utvikling. Det britisk-amerikanske selskapet Flexitallic Group har utviklet et produkt som de påstår overkommer dette problemet:

«The planar SOFC sealing problem has now been solved by the introduction by the Flexitallic Group of Thermiculite® 866, a compression sealing material dedicated to SOFC application, capable of service to 1000° C and based upon the proven Thermiculite® high temperature sealing material range.»
(Flexitallic UK Ltd. 2015)

SOFC er fortsatt under utvikling og har et bra potensiale. Arild Vik fra CMR Prototech¹⁹ i Bergen mener også at størrelsen på SOFC i fremtiden vil minske uten at effekttapet øker i særlig grad.

¹⁹ CMR Prototech har mer enn 20 års erfaring innen utvikling og testing av kraft- og energisystemer som anvender forskjellige typer brensel. Prototech har spesialisert seg på brenselcelleteknologi (SOFC og PEMFC) (CMR Prototech 2017).

3 Vurdering av system

3.1 Hydrogen fra metallhydrider eller fra reformert diesel?

For å kunne vurdere de forskjellige systemene opp mot hverandre vil det være naturlig å se på hvilke kapasiteter de innehar. Med kapasiteter menes hovedsakelig faktorer som begrenser ubåtens utholdenhet neddykket og på oppdrag generelt.

3.1.1 Kapasiteter

3.1.1.1 HYDROGEN I METALLHYDRIDER

Dersom man ser på det man vet fra 212-klassen og påstanden om at den skal være i stand til å operere neddykket uten å snorkle i inntil tre uker, kan man også se på detaljene som gjør dette mulig. I 2013 skal den tyske ubåten U32 (212A) angivelig seilt 18 dager sammenhengende neddykket uten å snorkle, noe som underbygger påstanden om en kapasitet på rundt tre uker (ThyssenKrupp 2013). Ser en på publiserte tall som sier noe om 212-klassens rekkevidde kan man enkelt utlede en tidshorisont for hvor lenge man kan operere.

Dersom en 212-klasse har 18 metallhydridtanker som hver har et volum på 1200 liter (Browning et al. 2003) og man vet at det frigis 33,3 kWh²⁰ når en kg hydrogen reagerer med oksygen og det er plass til 3 kg hydrogen pr. 55 liter metallhydrid (Niedzwiecki 2001) kan man beregne hvor mye hydrogen en har tilgjengelig:

(3.1)

$$(1200l/55l) * 3kg = 65,45kg H$$

(3.2)

$$65,45kg H * 18 \text{ sylindere} = 1178,18kg H \approx 1200kg H$$

(3.3)

$$33,3 kWh * 1200kg = 39960kWh$$

En 212-klasse er utstyrt med 9x34 kW SINAUVY PEMFC og dersom en kjører på en 20% belastning er virkningsgraden for cellen $\eta = 0,72$ (Hammerschmidt 2013). Med dette som utgangspunkt kan man beregne ca. tid tilbragt under vann:

²⁰ LHV_{H2} = 120 MJ/kg = 33,3 kWh/kg.

(3.4)

$$9 * 34kW = 306kW$$

(3.5)

$$306kW * 0,2 = 61,2kW$$

(3.6)

$$\frac{39960kWh}{61,2kW} * 0,72 = 470h = 19,6 \text{ døgn}$$

Med dette estimatet kan det virke som om påstandene om 18 døgn neddykket ikke er et usannsynlig tall. Det skal sies at disse utregningene ikke tar hensyn til ubåtens andre behov, som for eksempel hotelldrif²¹.

Tabell 3-1 - Oversikt over teknisk data for Siemens SiNavy PEMFC (Hammer-schmidt 2006).

	BZM 34	BZM 120
Rated Power	34 kW	120
Number of Cells	72	320
Rated Current	650 A	560 A
Rated Voltage	52,3 V	215 V
Hydrogen Pressure	2,3 bar a	2,3 bar a
Oxygen Pressure	2,6 bar a	2,6 bar a
Working Temperature	70 - 80°C	70 - 80°C
Size	47x47x143 cm3	176x53x50 cm3
Weight (incl. press. container)	650 kg	900 kg
Efficiency at full load	62%	56%
Efficiency at 20% load	72%	68%

3.1.1.2 HYDROGEN FRA REFORMERT DIESEL

Om man sammenligner disse tallene med et tenkt system som baserer seg på reformert diesel likt det som er beskrevet under pkt. 2.3 kan man med visse antagelser i teorien

²¹ Med hotelldrif²¹ menes alle systemer som står på for å ivareta besetningens behov, i.e. proviantkjøleanlegg, air-condition, varmtvannsberedere etc.

finne ut hvor mye hydrogen et slikt anlegg kan produsere. Når man vet det kan man se hvorvidt dette vil være en begrensende faktor sammenlignet med et system som bruker rent hydrogen fra metallhydrid med.

En teoretisk betraktning av reformeringsreaksjonen (2.9) i en ATR kan gi svar på hvor mye hydrogen som kan produseres i forhold til hvor mye diesel som er tilgjengelig:

Finner først moltallet i 1 kg diesel:

(3.7)

$$n = \frac{1000g}{(12,01 * 14,8 + 1,008 * 26,9) \left[\frac{g}{mol} \right]} = 4,8813 \text{ mol}$$

Reaksjonsligningen (2.9) gir ut 47,2 mol H per mol diesel som igjen tilsvarer:

(3.8)

$$4,8813 \text{ mol} * 47,2 = 230,398 \left(\frac{\text{mol H}}{\text{kg diesel}} \right) = 230,398 * 1,008 = 0,232 \frac{\text{kg H}}{\text{kg diesel}}$$

Videre vil det være nødvendig med visse antagelser for å estimere hvor mye hydrogen som kan produseres. Antar at en ubåt i størrelsesordenen rundt 2000 tonn vil ha med anslagsvis 70m³ diesel fordelt på flere brennstofftanker. Vet at F-76 diesel har en tetthet på 0,860 tonn/m³ ved 15°C som betyr at brennstoffet veier 70*0,860 = 60,2 tonn.

Dermed er det gitt at fra 70m³ F-76 diesel kan man produsere ca.:

(3.9)

$$60,2 \text{ tonn F-76} * 0,232 = 13966 \sim 14000 \text{ kg H}$$

Det vil selvsagt aldri være aktuelt å bruke all dieselen til produksjon av hydrogen, men som et konservativt estimat kan man anta at ca. 20% av dieselen som er på brennstofftankene kan brukes til å drifte AIP-systemet. Dette tilsvarer at en ubåt med 70m³ F-76 diesel om bord kan produsere 14000*0.2 = 2800 kg H, med gitte antagelser.

En annen tilnærming kan være å ta beregne mengde hydrogen fra sammenhengen mellom virkningsgraden til reformeren, nedre brennverdi og mengde diesel og hydrogen:

(3.10)

$$\eta_{\text{reformer}} = \frac{LHV_{H_2} * m_{H_2}}{LHV_{\text{fuel}} * m_{\text{fuel}}}$$

Basert på studiene på SMX® Ocean antas det en virkningsgrad i ATR mellom 70-80% (Bakst 2014), setter $\eta_{\text{reformer}} = 0,75$ og tar i bruk formel for virkningsgrad i en AT-reformer for å beregne hvor mye hydrogen det er mulig å produsere fra tilgjengelig diesel:

(3.11)

$$\eta_{\text{reformer}} = 0,75 = \frac{240 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} * m_{\text{H}_2}}{\left(42,7 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} * \left(70\text{m}^3 * 0,860 \frac{\text{tonn}}{\text{m}^3}\right)\right)}$$

→

$$m_{\text{H}_2} = \frac{0,75 * \left(42,7 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} * 60,2 \text{ tonn diesel}\right)}{240 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}} = 8032 \text{ kg H}_2 = 16064 \text{ kg H}$$

Det vil selvsagt aldri være aktuelt å bruke all dieselen til produksjon av hydrogen, men som et konservativt estimat kan man anta at ca. 20% av dieselen som er på brennstofftankene kan brukes til å drifte AIP-systemet. Dette tilsvarer at en ubåt med 70m³ F-76 diesel om bord kan produsere 14000*0.2 = 2800 kg H dersom fremgangsmåten i (3.7-3.11) anvendes og 16064*0.2 = 3212 kg H dersom (3.10 og 3.11) anvendes. Gjennomsnittet av de to metodene blir 3006 kg H, noe som uansett er mye mer enn hva et system basert på metallhydrid vil kunne levere. Det kan derfor virke som om mangel på hydrogen til brenselcellene ikke vil være en begrensende faktor i et slikt system. Bruker man samme fremgangsmåte som i formel (3.3)-(3.6) får man følgende tall:

(3.12)

$$33,3 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right] * 3000\text{kg} = 99900\text{kWh}$$

(3.13)

$$\frac{99900\text{kWh}}{61,2\text{kW}} * 0,72 = 1175,3\text{h}$$

(3.14)

$$\frac{1175,3\text{h}}{24} = 48,97 \text{ døgn}$$

I og med at hydrogenet utvinnes fra diesel, kreves ikke ekstra plass i form av lagringsenheter som metallhydrider eller kryogentanker, men det kan derimot være behov for større brennstofftanker.

3.1.1.3 LOX

I gjennomsnitt trenger hvert besetningsmedlem ca. 1 kg O₂ pr døgn. Om man tar høyde for en besetning på 27 pax og en varighet på 20 døgn uten å snørkle vil besetningens behov være 27*20 døgn = 540 kg O₂. I en SiNavy PEMFC vil oksygenbehovet bestemmes av følgende verdier:

(3.15)

$$O_2 \text{ usage} = \frac{I * n}{4F}$$

I er total strøm i cellestacken og n er antall celler i stacken. F er Faradays-konstant som er et mål på den elektriske ladningen til 1 mol med elektroner:

(3.16)

$$I = \frac{Pe}{\text{Single cell voltage} * n}$$

(3.17)

$$I = \frac{34kW}{\left(\frac{52,3V}{72}\right) * 72} = 650A$$

(3.18)

$$O_2 \text{ usage} = \frac{650A * 72}{4 * 96485C} = 0,1212 \frac{mol}{s} = 0,00388 \frac{kg}{s}$$

Dette betyr at O₂-forbruket pr. PEMFC-modul i denne konfigurasjonen krever 0,00388 kg/s som tilsvarer 0,00388*3600s*24h*9stk moduler = 3018,0 kg O₂ pr. døgn om man tar hensyn til at det er 9 slike moduler. Når man legger til besetningens behov blir forbruket neddykket på 3018,9 + 27 = 3045,9 kg O₂ / døgn. Disse beregningene er da ved full last på cellen. Ved 20% last vil forbruket reduseres til 609,2 kg O₂ / døgn.

I en vitenskapelig artikkel fra University of Adelaide anslås det at man trenger ca. 40000 kg LOX til et AIP-system hvor samlet last for fremdrift og hotelldrift er 300kW (Howard 2010). Det vil da si at dersom mengde LOX er begrenset vil denne beløpe seg til:

(3.19)

$$\frac{40000}{3045,9} \left[\frac{\text{kgO}_2}{\frac{\text{kgO}_2}{\text{døgn}}} \right] = 13,13 \text{ døgn ved full last}$$

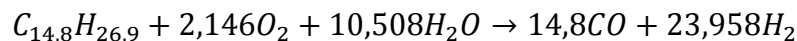
(3.20)

$$\frac{40000}{609,2} \left[\frac{\text{kgO}_2}{\frac{\text{kgO}_2}{\text{døgn}}} \right] = 65,67 \text{ døgn ved 20\% last}$$

Dersom man utvider mengde LOX lagret vil selvsagt denne tiden øke. For et system som inneholder en reformer vil oksygenbehovet være høyere fordi reaksjonene i reformeringsprosessen krever oksygen.

Fra reformeringsreaksjonen (2.9) er det gitt at per mol diesel går det 2,146 mol O₂ og 10,508 mol H₂O for å produsere 14,8 mol CO og 23,598 H₂.

(2.9)



Basert på denne reaksjonen kan man beregne hvor mye oksygen som går med per mol diesel:

$$1 \text{ mol O}_2 \text{ veier } (1 \cdot 2 \cdot 16 = 32 \text{ g/mol}) \rightarrow 2,146 \text{ mol O}_2 = (2,146 \cdot 2 \cdot 16 = 68,672 \text{ g/mol})$$

Må tilføre 2,146 mol O₂ per mol diesel. Vet at moltallet til 1 kg diesel er 4,88

→ 4,88 · 2,146 = 10,475 mol O₂ / per kg diesel → 10,475 mol O₂ / kg diesel * 0,032 kg / mol = 0,3352 g O₂ / kg diesel inn på reformer så sant luftfaktoren λ = 0,29 som beskrevet i pkt. [2.2.1.3](#). Dette vil da si at dersom luftfaktoren holdes konstant og 20% av dieselen brukes vil totalt O₂-forbruk inn på reformer begrense seg til:

(3.21)

$$m_{O_2} = 60200 \cdot 0,2 \cdot 0,3352 = 4035 \text{ kg}$$

Videre antas det en neddykket periode på 20 døgn som ved tidligere beregninger, og dersom en fordeler det jevnt over 20 døgn blir forbruk i reformeren 4035 / 20 = 201,75 kg O₂ / døgn. Det skal sies at det sannsynligvis ikke vil være behov for å reformere så mye som 20% av dieselen da dette gir en hydrogenproduksjon på ca. 3000 kg, og dermed kan det antas at forbruket er en del lavere. I tillegg vil dieselforbruket for hhv 20- 100% last

på cellen variere, men for enkelhetsskyld blir 201,75 kg / døgn brukt i begge sammenhenger.

Når en da summerer forbruket i cellen og besetningens behov med forbruket i reformeren blir det totale oksygen forbruket per døgn:

(3.22)

$$O_2 \text{ totalt forbruk/døgn} = (O_2 \text{ celle} + O_2 \text{ besetning}) + O_2 \text{ reformer}$$

Ved full last:

(3.23)

$$\frac{O_2 \text{ forbruk}}{\text{døgn}} = 3045,9 + 201,75 = 3247,65 \left[\frac{\text{kg } O_2}{\text{døgn}} \right]$$

(3.24)

$$\frac{40000}{3247,65} \left[\frac{\text{kg } O_2}{\frac{\text{kg } O_2}{\text{døgn}}} \right] = 12,31 \text{ døgn ved full last}$$

Ved 20%:

(3.25)

$$\frac{O_2 \text{ forbruk}}{\text{døgn}} = 609,2 + 201,75 = 811 \text{ kg} \left[\frac{\text{kg } O_2}{\text{døgn}} \right]$$

(3.26)

$$\frac{40000}{811} \left[\frac{\text{kg } O_2}{\frac{\text{kg } O_2}{\text{døgn}}} \right] = 49,3 \text{ døgn ved 20\% last}$$

Som det fremkommer av (3.23-3.26) kan det være fornuftig å øke mengde lagret LOX dersom dette er mulig. Et annet alternativ kan være å se på mulighetene for å installere et system som produserer LOX i sjøen. Det pågår i dag forskning på dette området og professor Carl Howard konkluderer i sin artikkel om *Liquid Oxygen Recharge System for Submarines* med at en 5m lang LOX recharge system (LOX RS) modul kan mer enn

doble total tid neddykket sammenlignet med systemer som kun består av en LOX lagringsenhet.

Submarine Configuration	Time in Operating Area		Ratio of Time On Patrol to Time in Operating Area (%)	Maximum Submerged Duration
	Total Time On Patrol (Days)	Total Time Recharging (Days)		
Battery Only	47	15	76	3 Days x 16
AIP and Battery	50	12	81	17 Days x 1
AIP and Battery with LOX storage x 2	54	8	87	31 Days x 1
AIP and Battery with LOX RS x 1 Recharge	53	9	85	17 Days x 2
AIP and Battery with LOX RS x 2 Recharge	56	6	90	17 Days x 3

Tabell 3-2 - Tall som viser hvordan et LOX RS kan øke tid neddykket og redusere lade-tid (snorkling) (Howard 2010).

3.1.1.4 VOLUM OG MASSE

Som *tab. 3-1* viser opptar en BZM 34 brenselcellestack et volum på $0,47 \cdot 0,47 \cdot 1,43 = 0,3159 \text{m}^3$ og veier 650kg. Når man tar hensyn til at det er 9 slike moduler blir totalt volum og masse henholdsvis:

(3.27)

$$0,3159 \text{m}^3 * 9 = 2,84 \text{m}^3$$

(3.28)

$$650 \text{kg} * 9 = 5850 \text{kg}$$

For metallhydridsyndrene er det oppgitt en masse på 4,4 tonn når de er toppet opp (Browning et al. 2003). For 18 sylindere følger:

(3.29)

$$4,4 \text{ tonn} * 18 = 79,2 \text{ tonn}$$

Dette er ikke som mye å anse tatt i betraktning at fremdriftssystemet i en ubåt kan ta opptil 55% av tilgjengelig volum og 35% av den totale masse (Burcher & Rydill 1994, 56). I en 212-klasse vil totalt tilgjengelig volum basert på ugraderte opplysninger være:

(3.30)

$$Vol_{ubåt} = \frac{\text{Neddykket deplasement}}{\rho_{sjøvann}}$$

(3.31)

$$Vol_{ubåt} = \frac{1830 \text{ tonn}}{1.025 \frac{\text{tonn}}{m^3}} = 1785 \text{ m}^3$$

Og om man følger prinsippene til Burcher og Rydill fra boken Concepts in Submarine Design (Burcher & Rydill 1994, 56) blir tilgjengelig volum og maks tillatt masse til et fremdriftssystem:

(3.32)

$$Vol_{fremdrift} = 1785m^3 * 0,55 = 981,8m^3$$

(3.33)

$$m_{fremdrift} = 1830\text{tonn} * 0,35 = 640,5 \text{ tonn}$$

I et hybrid AIP-system opptas deler av dette volumet av dieselmotorer med tilhørende generatorsett. Sett i lys av dette antas det at halvparten av det tilgjengelige volumet opptas av maskineri tilknyttet diesel-elektrisk fremdrift, samt halvparten av tillatt massegrense. Antagelsen er basert på hvordan maskinrommet i dagens ULA-klasse er bygd opp, og understøttes av oppgaven til Geir Meidell Nedrevåge fra 2011, hvor han antar det samme (Nedrevåge 2011, 36). Det vil da si at tilgjengelig volum og massegrense til et AIP-system begrenser seg til:

(3.34)

$$981,8m^3 * 0,5 = 490,9m^3$$

(3.35)

$$640,5 \text{ tonn} * 0,5 = 320,25 \text{ tonn}$$

Når man tar i betraktning hvor lite plass 9stk Siemens BZM 34 brenselcellestacker opptar ($2,84m^3$ ref. formel (3.27)), er det tydelig at plassmangel ikke vil bli et problem dersom disse eller lignende brenselcellestacker velges. Den totale massen til et slikt system kan finnes ved å summere massen til metallhydridsyndrene med samlet vekt for brenselcellestackene:

(3.36)

$$79,2 \text{ tonn} + 5,850 \text{ tonn} = 85,05 \text{ tonn}$$

Det er en selvfølge at et system som innbefatter en reformer med tilhørende undersystemer vil oppta et større innvendig volum i forhold til et som får hydrogen fra lagringsenheter, av den grunn at det er flere komponenter som må installeres om bord. Det antas et tilgjengelig volum på $490,9m^3$.

I DCNS sine antagelser i studien fra 2014 om SMX® Ocean antas det at en AIP-plugin modul for et anlegg med brenselceller som leverer opptil 2000kW vil kreve 12m i lengderetning og ha en diameter på omkring 8,8m (Bakst 2014). Dette tilsvarer et volum på $\pi \cdot r^2 \cdot l \rightarrow \pi \cdot 4.4^2 \cdot 12 = 730m^3$. Dette kunne kanskje vært et akseptabelt tall dersom det ikke tilegnes plass til dieselgeneratorer som en del av fremdriftssystemet, men man heller benytter seg av brenselceller i et mono-AIP-system²². I en vanlig diesel-elektrisk/AIP hybrid vil det derimot være for stort. Det er derimot naturlig at et AIP-system på rundt 300kW vil oppta mindre plass og følgelig være mulig å installere i et skrog ≤ 2000 tonn. Dersom det forutsettes at forholdet mellom volum og generert effekt minsker proporsjonalt, kan volumet til et anlegg på 300kW beregnes ved interpolering:

(3.37)

$$\frac{2000kW}{730m^3} = \frac{300kW}{x}$$

(3.38)

$$x = \frac{300kW \cdot 730m^3}{2000kW} = 109,5m^3$$

Dette vil ikke nødvendigvis være en helt nøyaktig tilnærming da det er begrenset for hvor mye en kan skalere ned en reformer og dens tilhørende komponenter, men er heller ment som et estimat.

Det pågår per dags dato en utvikling på dette området og enkelte selskaper har allerede kommersialisert sine produkter. Det svenske selskapet PowerCell har utviklet en systemprototyp som baserer seg på PEMFC som får hydrogen fra reformert diesel. Produktet som de kaller PowerPac (PP) er tilsynelatende komplett utstyrt med reformer, PEMFC og tilhørende elektronikk. De har dog ikke videreutviklet produktet til å forsyne større systemer per dags dato og har bare moduler som leverer opptil 3kW (PowerCell 2017). En slik modul opptar et volum på $0,4m^3$ og om en bruker samme tilnærming som i formel (3.37) og (3.38) tidligere vil et slikt system oppta et volum på $40m^3$ for et anlegg på 300kW. Dette er da med i beregningene at 300kW består av 100 slike moduler i serie, om dette lar seg gjøre er derimot ikke sikkert.

For en SOFC konfigurasjon tas det utgangspunkt i et produkt fra det amerikanske selskapet Redox Power Systems. Deres produkt *The Redox Cube* skal tilsynelatende være i

²² I dette tilfellet er et mono-AIP-system et fremdriftssystem som utelukkende baserer seg på energien som genereres fra brenselceller.

stand til å levere 25kW og er i likhet med PowerPac komplett utstyrt med reformer, brenselceller og tilhørende elektronikk, men her er anvendes da SOFC i stedet for PEMFC (Redox Power Systems 2017). Denne modulen opptar et volum på ca. 1m^3 og er utviklet for å reformere metan.. Dersom man tar høyde for et system på 300kW og antar at hver modul opptar et volum på 1m^3 og leverer 25kW vet man at det trengs $300\text{kW} / 25\text{kW} = 12$ moduler i serie. Disse kan konfigureres ved å stable to i høyden og to i bredden og vil da oppta et volum på:

(3.39)

$$2m * 2m * 6m = 24m^3$$

Det er kjent at diesel er noe vanskeligere å reformere, så det antas at et lignende system for dieselreforming vil oppta noe mer plass.

Ved både PEMFC og SOFC er det sannsynlig at brenselcellene om bord i en ubåt vil ha en felles reformer som i så måte må skaleres opp for å imøtekomme behovet fra alle brenselcellene i serie. Basert på beregningene i dette avsnittet ser en at det innvendige volumet for et system som anvender PEMFC og reformering av diesel vil oppta mer plass enn et tilsvarende system som baserer seg på SOFC. Hvorvidt det er realistisk at et slikt anlegg vil oppta mindre enn 100m^3 er derimot mer usikkert, derfor antas et volum på $\geq 110\text{m}^3$ som beregningene fra formel (3.38) viser til.

3.1.2 Drift og vedlikehold

En av fordelene ved å utnytte dehydrogeneringen fra en jern-titan-hydrogen binding (Fe-TiH) som finnes i metallhydridtankene er at denne delen av anlegget er tilnærmet vedlikeholdsfri. Det er ingen bevegelige deler som kan gå stykker og vedlikeholdsrutiner går stort sett ut på kontrollere ventiler og gjennomføringer. I tillegg kan et system av typen som er installert på dagens tyske ubåter vise til flere års bruk om bord og har dermed en høy teknologisk modenhet, samt utarbeidede vedlikeholdsrutiner. Sammenlignet med et reformeringssystem som både er mer komplekst og ikke kan vise til samme teknologiske modenhetsnivå, vil det på kanskje være økonomisk gunstig å velge metallhydrider.

En driftsmessig utfordring tilknyttet et brenselcellesystem som går på rent hydrogen er tilgjengeligheten på hydrogen i forhold til diesel. Det må i tillegg brukes mye tid og penger på å tilrettelegge for utbygging av påfyllingsstasjoner i Norge. Dessuten vil det alltid være en betydelig risiko forbundet med arbeid som omfatter håndteringen av hy-

drogen. En annen faktor som bør nevnes er de betydelige forskjellene i påfyllingshastighet mellom metallhydridtanker og diesel. I *Fuel Cell Systems Explained* oppgis typisk fyllhastighet for en tank som inneholder 5 kg hydrogen til å være ca. 1 time (Larminie et al. 2003, 289). For å overføre dette til et ubåtsystem som kan romme 1200 kg hydrogen fordelt på 18 tanker vil den totale påfyllingstiden være $1200 \text{ kg} / 18 \text{ tanker} = 66,67 \text{ kg H per tank} \rightarrow 1 \text{ time per } 5 \text{ kg H} \rightarrow 66,67 \text{ kg H} / 5 \text{ kg H per time} = 13,33 \sim 13 \text{ timer}$ dersom en antar at alle tankene fylles parallelt. Det er ikke gitt at dette kommer til å være et stort problem, men det krever definitivt en god del mer planlegging enn ved bunkring av diesel.

3.2 Drøfting

I dette avsnittet blir alle vurderinger, beregninger, fordeler og ulemper sammenfattet og satt opp mot hverandre for å best mulig kunne bedømme hvilket system som egner seg best i en ubåt.

Det forutsettes visse krav som må bestås for at slike systemer i det hele tatt er verdt å vurdere. Systemene blir vurdert opp mot hverandre i forhold til volum og operativ utholdenhet basert på tilgjengelig hydrogen og LOX. Andre faktorer som signatur, drift og vedlikehold er også med på å bestemme valg, men vektet ikke like tungt. Volum er ansett som et absoluttkrav, og dersom et system overskrider maks tillatt volumgrense, vil ikke systemet være mulig å installere om bord dersom gitte antagelser er gjeldene. Når det gjelder ubåtens operative utholdenhet er det først og fremst antall dager neddykket uten å snorkle som blir brukt som sammenligningskriterium. Det er derimot ikke gitt at et system utelukkes på bakgrunn av denne sammenligningen, da utholdenheten til ubåten i stor grad kan bestemmes ut fra mengde lagret LOX og diesel. Å utvide/installere flere LOX- og brennstofftanker er ikke nødvendigvis en omfattende og kostbar prosess og det vil ikke ha nevneverdig innvirkning på ubåtens oppdrift. Dette er da gitt et system som anvender reformering av diesel. Dersom hydrogenet er opplagret i metallhydrider vil derimot massen til sylindrene føre til at mengde lagret hydrogen direkte begrenses av ubåtens størrelse, og dermed begrenser neddykket utholdenhet. En metallhydridsylander som er beskrevet i oppgaven veier ca. 3,6 tonn når den er tom. I ubåtskrog under 2000 tonn vil det dermed være begrenset hvor mange slike sylindere som kan installeres uten det går på akkord med båtens oppdrift.

Med bakgrunn i *Concepts in Submarine Designs* prinsipper om at 55% av tilgjengelig volum og 35% av fartøysmassen i en ubåt kan tilegnes fremdriftssystemet (Burcher et al.

1994, 56) er beregnet volum- og massegrense for fremdriftssystemet til et ubåtskrog på ≤ 2000 tonn, i dette tilfellet 1830 tonn (212A), henholdsvis $490,9\text{m}^3$ og 320,25 tonn. Disse verdiene tar utgangspunkt i en antagelse om at det diesel-elektriske fremdriftssystemet opptar 50% av tilgjengelig volum og veier 50% av tillatt massegrense, med andre ord er dette tilgjengelig volum og massegrense for et AIP-system.

Tabell 3-3 – Sammenfatning av de ulike systems kapasiteter

System	Volum [m^3]	Masse [tonn]	Utholdenhet fra mengde hydrogen [Døgn neddykket]	Utholdenhet fra mengde LOX [Døgn neddykket]	Bestått
PEMFC og metallhydrid	2,84*	85,05	19,6 (20%)	13,13 (100%) 65,67 (20%)	Ja
PEMFC og reformer	110-150	20**	****48,97	12,31 (100%) 49,3 (20%)	Ja
SOFC og reformer	≤ 110	5,4***	****48,97	\geq PEMFC	Ja

Som *tab. 3-3* viser til er det store forskjeller på systemene som baserer seg på rent hydrogen fra metallhydrider og det som benytter reformerte hydrokarboner. Begge systemtypene kommer med fordeler og ulemper. Fra et ubåtperspektiv er det viktig med en lav indiskresjonsrate derfor kan reformerforsynte PEMFC og SOFC være et attraktivt valg i så måte. Grunnen til dette er at diesel som hydrogenbærer kan utnyttes og dermed øke tiden tilbragt under vann. Det fremkommer av teksten at antall døgn neddykket er begrenset av mengde LOX, men dette kan justeres enten ved å utvide LOX-tanken, eller se på mulighetene for et regenereringssystem for LOX om bord. Fordelene ved dieselreforming kommer ikke uten noen ulemper på andre områder. Det er blant annet et mye mer komplekst system enn metallhydrider, noe som vil føre til ekstra drifts- og vedlikeholdskostnader. Men dette vil kanskje utjevne seg med tanke på pris og tilgjengelighet for diesel kontra hydrogen. I tillegg er det sannsynlig at reformeringssystemer vil støye mer enn et anlegg på metallhydrider av den enkle grunn at det er flere bevegelige deler.

Dersom et system som baserer seg på reformering av diesel og SOFC bør det nevnes at systemet kan få en høyere termisk signatur enn et lav-temperaturs anlegg. IT-SOFC vil som nevnt ha en utløpstemperatur på mellom $500\text{-}700^\circ\text{C}$ og det kan med andre ord være behov for en varmeveksling av utløpgassen for å redusere den termiske signaturen. Dette vil sannsynligvis ikke være noe problem på større dybder, men gjør seg heller gjeldende dess nærmere overflaten ubåten kommer. Siden potensialet for tid neddykket er så bra, kan det løses ved å holde seg i dypet til en eventuell trussel er borte. En annen løsning

kan være å slå av AIP-anlegget for å redusere signaturen dersom ubåten må opp til periskopdybde når trusselbildet er høyt, det fordrer da at batteriene kan overta lasten i den perioden.

4 Konklusjon med anbefaling

Det vurderes dithen at en slående konklusjon i forhold til valg av system er noe vanskelig å utarbeide. Det ligger til grunn flere faktorer som kan endre helhetsvurderingen av systemene. Det fremgår av beregninger gjort i oppgaven at et system som baserer seg på dieselreforming gjennom ATR i kombinasjon med IT-SOFC er et meget gunstig valg både i forhold til systemets totale virkningsgrad, pris og tilgjengelighet på brensel, samt den operative utholdenheten ubåten får med slikt anlegg. Sett i forhold til de andre systemene som vurderes i oppgaven er det ingen tvil om at ATR+IT-SOFC scorer best på disse kriteriene. En ubåt med ATR+IT-SOFC vil potensielt sett kunne holde seg neddykket i over 30 døgn lenger enn en som bruker metallhydrider, om en da ser bort fra alle andre begrensende faktorer.

Når det er sagt er det fortsatt noe usikkerhet rundt et slikt system, og det kan ikke vise til samme modenhetsnivå som AIP-systemet som er installert om bord i dagens tyske ubåter. Men dersom det gis rom for etablering av et ATR+SOFC system vil det potensielt sett være et billig og pålitelig system i det lange løp, dette med tanke på at de har en mye høyere forventet levetid og dermed ikke trenger å skiftes ut så ofte. SOFC har også den beste virkningsgraden av brenselceller og kan med fordel utnytte reformert diesel og potensielt sett også andre typer brensel.

Konklusjonen er derfor at ATR+SOFC er en seriøs utfordrer til dagens tyske AIP-system. Anbefalingen blir dermed å vurdere et slikt system på ubåter i fremtiden. Kanskje ved en eventuell levetidsforlengelse på Norges nye ubåter, dersom det viser seg vanskelig å installere til de første ubåtene skal være klare på slutten av 2020-tallet.

Så for å svare på problemstillingen: Ja, det er mye som tyder på at reformering av hydrokarboner til hydrogenproduksjon om bord kan være et attraktivt valg for fremtidens ubåter.

Bibliografi

Bøker

Almås, Terje

2003. *EMNE SIN2043 FORBRENNINGSMOTORER, DEL 2: KAPITTEL 5-8*. Marinteknisk senter, Trondheim (NTNU).

Burcher, R og Louis Rydill

1994. *Concepts In Submarine Design*. Cambridge: Cambridge University Press.

Cha, Suk-Won, Whitney Colella, Ryan O'Hayre og Fritz B. Prinz

2006. *Fuel Cell Fundamentals*. John Wiley & Sons, New York 2006.

Dawody, J, B. Lindström, J.A.J. Karlsson, P. Ekdunge, L. De Verdier, B. Häggen- dal, M. Nilsson, L.J. Pettersson

2009. *International Journal of Hydrogen 34 (2009). Diesel fuel reformer for automotive fuel cell applications*. International Association of Hydrogen Energy. Publisert av Elsevier Ltd. 5. februar 2009.

Dicks, Andrew og James Larminie

2003. *Fuel cell systems explained*.

Date, Anvil W.

2011. *Analytic Combustion: With Thermodynamics, Chemical Kinetics and Mass Transfer*. Cambridge: Cambridge University Press.

Chapek, M. Richard & Dr. Howard Pearlman

1999. *Research & Technology*: Glenn Research Center at Lewisfield: NASA/TM.

Artikler og foredrag

Bakst, A.

- a) 2014, 26. desember. *DFATR-PEMFC. The Probable AIP Structure of Submarine SMX® Ocean (concept), Part 1*. Bakst System Engineering & Consulting 26. desember 2014.

- b) 2014, 26. desember. *DFATR-SOFC. The Supposed AIP Structure of Submarine SMX® Ocean (concept), Part 2*. Bakst System Engineering & Consulting 26. desember 2014.
- c) 2014. *SMX® Ocean (Concept). AIP System Performance – AIP Power Calculation*. Bakst System Engineering & Consulting Desember 2014.

Browning, Dr. D.J. & Dr. J.B. Lakeman

2003, 7-10. april. *The Role of Fuel Cells in the Supply of Silent Power for Operations in Littoral Waters*. RTO AVT Symposium: RTO-MP-104.

Hammerschmidt, Dr. Albert E.

2006. *Fuel cell propulsion on submarines*. Erlangen 21. August, 2008: Siemens AG.

Hootman, John C., Konstantinos Psallidas og Clifford A. Whitcomb

2010. *Design of Conventional Submarines with Advanced Air Independent Propulsion Systems and Determination of Corresponding Theater-Level Impacts*. American Society of Naval Engineers, 2010.

International Energy Agency

2006. *Hydrogen Production and Storage*. OECD/IEA, France.

Krummrich, S.

2010. *Fuel Cell Methanol Reformer System for Submarines*. Institute of Energy Research – Fuel cells: Forschungszentrum Jülich GmbH, Zentralbibliothek, Verlag, 2010.

Margeridis, J og Peter L. Mart

1995. *Fuel Cell Air Independent Propulsion of Submarines*. Department of Defence – Defence Science and Technology Organisation. Commonwealth of Australia 1995.

Niedzwiecki, A.

2001. *State-of-the-art technology and estimates for system volumes and weights for vehicular compressed gas, cryogenic liquid, and hydride storage of 3 kg H₂*. US DoE Vision Meeting, November 2001.

Stambouli, A. Boudghene and E. Traversa

2002, 2. april. *Solid oxide fuel cells (SOFCs): a review of an environmentally clean and efficient source of energy*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier Science Ltd.

Thijssen, J.

2007. *The Impact of Scale-up and Production Volume on SOFC Manufacturing Cost*. National Energy Technology Laboratory, US Department of Energy 2007.

Nettsider**Air Products**

2007, 12. Juli. *Hydrogen Powers Greece's First Fuel Cell Submarine*. Hentet fra <http://www.airproducts.com/Company/news-center/2007/07/0712-air-products-fuels-new-hydrogen-submarine-for-hellenic-navy.aspx>.

CMR Prototech

2017. *Fuel Cell Technology*. Hentet fra <http://prototech.no/expertise/10038/fuel-cell-technology/>.

Flexitallic UK Ltd.

2015. *Fuel Cell Sealing Materials for Automotive and Auxiliary Power Units*. Hentet fra <http://www.flexitallicsofc.com/index.html>.

Fuel Cell Norway ANS

2006. *Produksjon av hydrogen*. Hentet fra http://www.fuelcell.no/hydrogen_production_no.htm.

Hauge, Anton.

2016, 22. desember. *Partialtrykk*. Store medisinske leksikon. Hentet fra <https://sml.snl.no/partialtrykk>.

Matthey, Johnson

2017. *PEMFC*. FuelCellToday, 2017. Hentet fra <http://www.fuelcelltoday.com/technologies/pemfc>.

Norges Forsvarsdepartement

2017, 3. februar. *Tyskland valgt som strategisk samarbeidspartner for nye ubåter*. Hentet fra <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/tyskland-valgt-som-strategisk-samarbeidspartner-for-nye-ubater/id2537621/>.

Pedersen, Bjørn

2012, 16. mars. *Spontan prosess*. Store norske leksikon. Hentet fra https://snl.no/spontan_prosess.

Ph.D. Helmenstine, Anne M.

2017. *Oxidant Definition in Chemistry: What Oxidants Are and How They Work*. Hentet fra <https://www.thoughtco.com/definition-of-oxidant-605455>.

PowerCell

2017. *PowerCell PP – Fuel Cell System Prototype*. Hentet fra http://www.powercell.se/offerings_head/fuel-cell-systems.

Ing, David

2017, 24. januar. Spain's first S-80 submarine to lack AIP. IHS Jane's Defence Weekly. Hentet fra <http://www.janes.com/article/67182/spain-s-first-s-80-submarine-to-lack-aip>.

Jacobsen, Einar

2016, 3. mars. *Nernsts Ligning*. I Store norske leksikon. Hentet 28. april 2017 fra https://snl.no/Nernsts_ligning.

Norges Forskningsråd

2006, 6. juli. *Produsjon av hydrogen*. Hentet fra http://www.forskningsradet.no/prognett-hydrogen/31_Innledning/1234130630356.

Redox Power Systems

2017. *The Redox Cube – The Future of Distributed Generation*. Hentet fra <http://www.redoxenergy.com/products>.

The Welding Group

2017. *High Temperature Corrosion*. Hentet fra <http://www.twi-global.com/capabilities/materials-and-corrosion-management/corrosion-testing/high-temperature-corrosion/>.

ThyssenKrupp Marine Systems

2013. *Naming ceremony of fuel cell submarine "U36" for the German Navy in Kiel*. Hentet fra <https://www.thyssenkrupp.com/en/newsroom/press-releases/press-release-47511.html?id=182402>.

US Department of Energy

2017. *Hydrogen Storage*. Hentet fra <https://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>.

Oppgaver

Nedrevåge, Geir Meidell

2011. *Luftuavhengige framdriftssystem for nye undervassbåtar*. Prosjektoppgave ved Sjøkrigsskolen, Marineingeniør-Maskinlinjen.

Villalba, Gustavo A. Ortigoza

2013. *Design & Development of Planar Solid Oxide Fuel Cell Stack*. Ph.D. Thesis Politecnico di Torino, Dipartimento Energia mai 2013.

Thorsteinsson, Lars Ivar

2016. *Bruk av brenselceller og litium-ionbatteri på ubåtar*. Bacheloroppgave ved Sjøkrigsskolen, Marineingeniør-Maskinlinjen.

5 Vedlegg

5.1 Konstanter og viktige verdier

Konstanter:

Faraday-konstanten:

$$F = 96485 \left[\frac{A * sec}{mol} \right] = 96485 \left[\frac{Coulomb}{mol} \right]$$

Gass-konstanten:

$$R = 8,314 \left[\frac{J}{K * mol} \right]$$

LHV_{H2}:

$$241,82 \left[\frac{kJ}{mol} \right] = 119,96 \left[\frac{kJ}{g} \right] = 33,3 kWh$$

HHV_{H2}:

$$285,83 \left[\frac{kJ}{mol} \right] = 141,79 \left[\frac{kJ}{g} \right] = 39,4 kWh$$

LHV_{Diesel}:

$$42,7 \left[\frac{kJ}{g} \right]$$

LHV_{CO}:

$$283,5 \left[\frac{kJ}{mol} \right]$$

Tetthet sjøvann, $\rho_{sj\ddot{o}}$:

$$\rho_{sj\ddot{o}} = 1025 \frac{kg}{m^3} = 1,025 \text{ tonn}/m^3$$

Tetthet diesellolje, F-76:

$$\rho_{diesel} = 876 \frac{kg}{m^3} = 0,876 \frac{tonn}{m^3}$$

5.2 Nernst-ligningen

«Nernsts-ligning, en ligning som viser en indikatorelektrodes potensial som funksjon av konsentrasjonen (aktiviteten) av det aktuelle ion. For en halvreaksjon $A_{oks} + ne^- = A_{red}$ er Nernsts-ligning:

$$E = E_A^0 - (0,0592/(n * \log \left[\left(\frac{A_{red}}{A_{oks}} \right) \right]))$$

hvor n er antall elektroner som deltar i reaksjonen, E^0 er standard elektrodepotensialet, $[]$ betegner aktiviteten av de reagerende stoffer (for gasser benyttes partialtrykket og for rene væsker og faste stoffer settes aktiviteten lik 1,00). Settes en indikatorelektrode ned i f.eks. en kobberløsning ($Cu^{2+} + 2e^- = Cu$), blir potensialet av elektroden:

$$E = E_{Cu}^0 - (0,0592/(2 * \frac{[1]}{[Cu^{2+}]}))$$

Ved at man måler dette potensialet, E , kan aktiviteten (evt. konsentrasjonen) av kobber beregnes.» (Direkte sitert fra Jacobsen, Einar. Hentet fra https://snl.no/Nernsts_ligning.)

5.3 Teknisk info NATO F-76 diesel

Tabell 5-1 – Teknisk info NATO F-76

NATO-76 Marine Diesel Fuel Characteristics	Units	Characteristics value
Molecular formula (avg)	-	C _{14,8} H _{26,9}
Molecular weight	g*mole ⁻¹	205
Density, at 15°C, (max)	kg/m ³	860
H/C ratio (molar)	-	1.82
Hydrogen content	wt,% (min)	12.5
Sulfur content	(%) (max)	0.5
Low Heating Value	kJ/kg	42,700
Final distillation point	°C (max)	385

Source :U.S. Department of Defense, 2006, MIL-DTL-16884L, Detail Specification Fuel Naval Distillate, 23 October 2006