

HyLIFT-0

**»DEVELOPMENT AND BENCHMARKING OF A 1ST GEN.
HT-PEM/LI-ION HYBRID MOTIVE POWER SYSTEM FOR FORKLIFTS«**

SLUTRAPPORT APRIL 2010

PROJEKT JORNAL NR.: ENS-63011-0034



Brændselscelle gaffeltruck i drift hos Grene i Skjern

PROJEKTLEDER



PROJEKTET ER STØTTET AF:



Projektdeltagere

H2 Logic A/S

Kontakt person: Karsten Poulsen
Adresse: Industriparken 34B, 7400 Herning, Danmark
Telefon: +45 56 27 96 00
e-mail: kp@h2logic.dk

Teknologisk institut

Kontakt person: Anders Elkjær Tønnesen
Adresse: Kongsvang allé 29, 8000 Århus C, Danmark
Telefon: +45 72 20 13 08
e-mail: aet@teknologisk.dk

Lithium Balance A/S

Kontakt person: Christoffer Torrendrup
Adresse: Baldershøj 26C, 1., 2635 Ishøj, Danmark
Telefon: +45 41 33 46 52
e-mail: christoffer@lithiumbalance.com

GRUNDFOS DK A/S

Kontakt person: Anco Sangers
Adresse: Poul Due Jensens Vej 7, 8850 Bjerringbro, Danmark
Telefon: +45 87 50 14 00
e-mail: asangers@grundfos.com

Atlet Danmark A/S

Kontakt person: Steen Junge
Adresse: Gl.Kongevej 1B, 7442 Engesvang, Danmark
Telefon: +45 72 21 02 10
e-mail: steen.junge@unitruck.dk

Indledning & sammendrag

I begyndelsen af 2008 ansøgte HyLIFT-0 projektet, bestående af en række virksomheder og andre aktører, om midler fra EUDP programmet til udvikling og benchmark af HT-PEM/Li-Ion brændselscelle hybridteknologi til gaffeltrucks.

Formålet med projektet var at udvikle et 1. generation hybridfremdriftssystem, baseret på ny HT-PEM brændselscelleteknologi kombineret med avancerede Li-Ion batterier, samt foretage benchmark og afprøvning af teknologien hos en slutbruger. Benchmarken skulle kaste lys over, om kombinationen af HT-PEM brændselsceller og Li-Ion batterier var en disruptiv teknologi, sammenlignet med de kendte LT-PEM systemer med bly-batterier. Teknologien skulle være disruptiv, ved at kombinationen af HT-PEM og Li-Ion tilsammen skulle udligne den enkelte teknologis svagheder og samtidig give markante fordele sammenlignet med kendte LT-PEM/blybatteri løsninger.

I løbet af projektet har der været nogle ændringer i projektets omfang og plan.

Ændring af WP3

I projektbeskrivelsen var der lagt op til en benchmark af forskellige HT-PEM brændselsceller (WP3). En screening af markedet afslørede, at det var mest hensigtsmæssigt at samarbejde med én leverandør nemlig danske SerEnergy A/S. HyLIFT-0 projektet besluttede derfor at ændre arbejds pakken til en benchmark af forskellige batteriteknologier, udført af Teknologisk Institut.

Grundfos' rolle i projektet

Grundfos deltager i projektet, for at afklare om der er muligheder for at udvikle og levere BoP komponenter til denne nye teknologi, evt. ved at modificere deres nuværende komponenter. På et projektmøde i februar 2009 besluttede projektet, efter Grundfos' ønske, at Grundfos træder et skridt tilbage og følger projektet passivt, da Grundfos ikke har en direkte involvering pt. samt da det på nuværende tidspunkt ikke står klart at det er oplagt at benytte Grundfos' kompetencer i produktet.

Udskydelse af projektet

Afslutningen af WP5 "Udvikling af BMS til Li-Ion batteripakke" blev forsinket grundet uforudsete udfordringer med BMS systemet hos projektpartneren Lithium Balance. Dette resulterede i en forsinkelse af WP6 "Udvikling af HT-PEM/Li-Ion hybrid-system" som H2 Logic skulle udføre, idet BoP systemet fra WP4 og BMS fra WP5 skulle sammenbygges. Dette medførte at projektet anmodede Energistyrelsen om samlet 3 måneders udskydelse af projektet, således at slutdatoen blev 31. marts 2010.

Opsummering af resultater for HT-PEM/Li-Ion brændselscelle hybridsystemet

Der er i HyLIFT-0 projektet blevet udviklet og bygget et HT-PEM/Li-Ion hybridsystem til en gaffeltruck. Systemet er blevet benchmark'et og testet både hos H2 Logic, i en testbænk ved Teknologisk Institut samt ved en slutbruger, Grene A/S, der i forvejen har et brinthybrid køretøj i drift, med LT-PEM system.

HT-PEM/Li-Ion systemet er opbygget om en 1 kW SerEnergy brændselscelle, med en 2,5 kWh Li-Ion batteripakke og tilhørende nyudviklet BMS.

Brændselscellesystemerne er opmålt i testbænk hos Teknologisk Institut og kører ved rated power med en virkningsgrad som vist i nedenstående skema. Konklusionerne er ikke fuldt ud retvisende, da der er mange faktorer der har indflydelse, bl.a. er HT-PEM systemet ikke optimeret fuldt ud.

System:	HT-PEM system	LT-PEM system
Virkningsgrad brændselscelle (eta_FC)	25%	43%
Virkningsgrad brændselscellesystem (eta_Modul)	20%	38%

Benchmarken ved Grene, viste at opvarmningstiden er kritisk for køretøjet, men når det først det er i drift er der ingen forskel til LT-PEM systemet, hverken i oplevet performance eller brugeroplevelsen.

Formålet med HyLIFT-0 projektet er opfyldt, idet målingerne og benchmark'en har kastet lys over teknologiens fordele og ulemper. Helt overordnet er konklusionen, at HT-PEM/Li-Ion hybridbrændselscellesystemet, på nuværende udviklingsstadiet, ikke er en disruptiv teknologi ifht. kendte LT-PEM systemer.

Der er en lang række fordele ved systemet, som beskrevet senere i rapporten, men der er også en række ulemper, der gør at teknologien p.t. ikke er anvendelig i gaffeltrucks – her er det især den lange opstartstid på op til 45 minutter, der ikke kan accepteres af en truckbruger; brugeren ønsker øjeblikkeligt at kunne belaste køretøjet maksimalt og det kan batteriet ikke håndtere i den tid det tager indtil HT-PEM brændselscellen er driftsvarm.

HT-PEM/Li-Ion systemet er relativt simpelt at opbygge og der kan spares en række komponenter ifht. LT-PEM, men den økonomiske fordel ved dette opvejes ved at selve brændselscellen er uforholdsmæssig dyr i indkøb og har en relativ lav virkningsgrad. Pris og virkningsgrad forventes dog at forbedre sig over tid, når HT-PEM teknologien færdigudvikles og volumen øges. Ligeledes kan der være muligheder i at anvende HT-PEM teknologien på reformerede brændstoffer da optimal varmeintegration af reformer og stack kan bidrage til at øge virkningsgraden.

Indholdsfortegnelse

Indledning & sammendrag	3
English Summary.....	6
1. WP2 – Hybrid systemspecifikation.....	8
2. WP3 – Benchmark test forskellige batterityper	9
3. WP4 – Udvikling af BOP system til udvalgt HT-PEM stak.....	13
4. WP5 – Udvikling af BMS til Li-Ion batteripakke.....	16
5. WP6 – Udvikling af HT-PEM/Li-Ion hybridsystem	19
6. WP7 – Benchmark hos slutbruger	20
7. WP8 – Evaluering, afrapportering og formidling.....	26
8. Bilag	30
Bilag 1 – Benchmark test af systemer hos Teknologisk Institut (WP7).....	31

English Summary

In early 2008 a consortium of companies and other actors applied for funds from the Danish EUDP program for a project called HyLIFT-0. The purpose of the project was to benchmark HT-PEM/Li-Ion fuel cell hybrid technology for forklifts.

The objective of the project was to develop a first generation hybrid propulsion system based on the new HT-PEM fuel cell technology combined with advanced Li-Ion batteries and perform a benchmark and test the technology at an end-user. The benchmark should clarify if the combination of HT-PEM fuel cells and lithium-ion batteries was a disruptive technology compared to the known LT-PEM systems with lead-acid batteries. The technology should be disruptive, by linking HT-PEM and Li-Ion technology and thereby eliminating each technology's weaknesses, while providing significant advantages compared with known LT-PEM/lead-acid battery solutions.

During the project there have been some changes in project scope and scale.

Changing WP3

The project description was to benchmark different HT-PEM fuel cells (WP3). A screening of the market revealed that it was most optimal to collaborate with one supplier, SerEnergy A/S. Based on this the HyLIFT-0 project decided to change the work package to a benchmark of different battery technologies, to be carried out by Teknologisk Institut.

Grundfos' role in the project

Grundfos participates in the project; to clarify whether there are opportunities to develop and deliver BoP components for this new technology, possibly by modifying their current components. At a project meeting in February 2009, the project decided, based on the request of Grundfos that Grundfos were to participate passively and follow the project from the side-line, since Grundfos has no direct involvement at the moment and as there currently are no clear obvious to use Grundfos' competencies in the product.

Deferral of the project

Finishing WP5 "Development of a BMS Li-Ion battery pack" was delayed extensively, caused by unexpected challenges with the BMS system at the project partner Lithium Balance. This resulted in a delay of WP6 "Developing HT-PEM/Li-Ion hybrid system", that H2 Logic had to perform, since the BoP system from WP4 and BMS from WP5 were to be assembled. This led to the project asking the ENS for a three-month postponement of the Project, so that the end date was the 31st March 2010.

Summary of results for HT-PEM/Li-Ion fuel cell hybrid system

In the HyLIFT-0 project a HT-PEM/Li-Ion hybrid system for a forklift was developed and built. The system has been benchmark'et and tested both at H2 Logic, in a test bench at the Teknologisk Institut and by an end user, Grene A/S, who already has a hydrogen hybrid vehicle in service with LT-PEM system.

The HT-PEM/Li-Ion system is based on a 1 kW SerEnergy fuel cell, with a 2.5 kWh Li-Ion battery pack and the newly developed BMS.

Both Fuel cell systems were measured in the test bench at Teknologisk Institut and was running at rated power with an efficiency as shown in the table below. The conclusions are not fully accurate because there are many factors influencing such as the HT-PEM system not being fully optimized.

System:	HT-PEM system	LT-PEM system
Efficiency fuel cell (eta_FC)	25%	43%
Efficiency fuel cell system (eta_Modul)	20%	38%

The benchmark at Grene, showed that the heat up time is critical for the vehicle, but once it is in operation, there are no difference to the LT PEM system, either in experienced performance or in user experience.

The purpose of HyLIFT-0 project is met since the measurements and the benchmark has revealed the technology's advantages and disadvantages. Above all the conclusion is that HT-PEM/Li-Ion hybrid fuel cell system at the present stage of development is not a disruptive technology compared to known LT-PEM systems.

There are numerous advantages of the system, as described later in this report, but there are also some disadvantages, doing that, overall, it is not a usable technology in forklifts - it is especially the long start-up time of up to 45 minutes that is unacceptable for the fork lifter user; the user wants to have immediate maximum output and the battery cannot handle this during the time it lasts until the HT-PEM fuel cell is warm and producing power.

The HT-PEM/Li-Ion system is relatively simple to build and it saves a number of components compared to the LT-PEM system, but the economic advantage of this is counterbalanced by the fuel cell being rather expensive and furthermore it has a relatively low efficiency. This will probably change over time when the technology completed development and volume increase.

1. WP2 – Hybrid systemspecifikation

I et hybridkøretøj, skal brændselscellen kunne levere det gennemsnitlige forbrug, mens batteriet skal kunne levere ekstra power boost ved peak belastningerne. Det er derfor væsentligt at kende køretøjets gennemsnitlige forbrug, samt det maksimale forbrug ved spidsbelastning.

Da HT-PEM/Li-Ion systemet er tiltænkt benchmark imod LT-PEM systemet, der p.t. kører hos Grene A/S, var der let adgang til data for køretøjet. Der er udført VDI-målinger på Lifteren (klasse 3 gaffeltruck) som har givet data på peak effektforbrug ved VDI-cyklus og et gennemsnitlige VDI- forbrug. Disse data er blevet anvendt som basis for specifikation af HT-PEM systemet og Li-Ion systemet.

HT-PEM brændselscelle

På baggrund af de indsamlede data vurderedes det at HT-PEM brændselscelle med en effekt på op til 1 kW vil være passende til brændselscellesystemet, da det dækker det gennemsnitlige forbrug og ydermere har lidt overkapacitet til at vedligeholde slade batteriet.

Tidligt i projektet blev én leverandør af HT-PEM udvalgt, nemlig SerEnergy:

Fabrikat:	SerEnergy Serenus 166C
Ydeevne:	1000W
Tomgangsspænding:	50V
Varmelegeme:	50W, 24V

Li-Ion batteri

Der er indhentet motordata hos ATLET-Unitruck, omkring motorernes størrelse, max. effektforbrug og ligeledes om motorcontrollerens max./min. spænding. Disse data har været afgørende ifht. valg af batteriet. Der har i projektet været fokus på ikke at aflade eller oplade batteriet for voldsomt, da det koster levetid på batteriet.

Ved opstart af et koldt system, vil det i brændselscellen indbyggede varmelegeme skulle opvarme brændselscellen til ca. 80 °C, inden brændselscellesystemet kan opstartes; herefter kører brændselscellen ved reduceret effekt indtil den er helt varm ved ca. 150 °C. Energien til dette hentes fra batteriet.

I situationer hvor en truck med et tæt ved afladet batteri parkeres, vil der ikke være energi på batteriet til dette, derfor er det besluttet at trucken må tilsluttes lysnettet ved enhver længerevarende parkering. I valget af hybridisering i HYLIFT-0 projektet er der derfor ikke taget hensyn til opvarmning af cellen ved opstart.

På baggrund heraf er en række forskellige batterier blevet udvalgt til nærmere test.

2. WP3 – Benchmark test forskellige batterityper

Der er gennemført en række batterikapacitets målinger, for at sammenligne forskellige relevante batteriteknologier ved forskellige belastningsprofiler. Med udgangspunkt i den europæiske norm EN61982-2 er der gennemført sammenlignende kapacitetsmålinger. H2 Logic har stillet de testede batteripakker til rådighed, desværre har historikken for de testede batteripakker været lidt forskellige.

Der er desuden udført en accelereret levetidstest på blyceller, henholdsvis med og uden super kondensatorer monteret.

Batteripakker i måleprogrammet

Batteripakke A: (Lithium-Ion)

Denne batteripakke består af en stor mængde celler, der er koblet parallelt for at øge strømkapaciteten og derefter i elektrisk serie for at øge spændingen på batteripakken. Batteriets kemi er litium jern fosfat, hvilket indikerer en god egensikkerhed i cellerne, men ikke førende på energitæthed ift. Konkurrerende teknologi.

Batteripakke B: (Lithium-Ion)

Batteriet kan anvendes som en plug-in erstatning til et traditionelt bly-syre batteri, selvom cellerne internt er baseret på litium teknologi. Mekanisk og elektrisk er batteripakken direkte udskiftelig med et klassisk bly-syre batteri.

Batteripakke C: (Blysyre)

Batteriet er et blysyre batteri som typisk anvendes til transport applikationer f.eks. Liftere.

Batteripakke D: (Blysyre + supercap)

Her er batteripakke C udstyret med en såkaldt super kondensator koblet direkte til batteripakkens klemmer. En super kondensator er kendetegnet med en meget højere kapacitet pr. vægt og volumen i forhold til en almindelig elektrolyt kondensator (faktor omkring 100). Ligesom almindelige kondensatorer, holder super kondensatorer længe og har en meget høj elektrisk effektivitet. Batteripakken indgår i karakteriseringen idet flere kilder antyder at en super kondensator koblet sammen med en blysyre batteripakke, øger levetiden på batteripakken.

Specifikationer for batteripakkerne

I forbindelse med EN61982-2 skal grænseværdierne for batteripakkerne være veldefinerede mht. opladningsspænding og afladningsspænding. Informationerne er samlet på basis af leverandør oplysninger og dels med udgangspunkt i EN61982-2.

De centrale testresultater fra kapacitetsmålingerne er:

-Strømkapacitet i ampere*timer [Ah]: Dette tal er et udtryk for mængden af strømkapacitet batteripakken indeholder

-Energikapacitet i watt*timer [Wh]: Dette tal er et udtryk for energiindholdet i batteripakken, set fra en anvendelsesorienteret synspunkt er dette tal mere relevant end batterikapaciteten i Ah.

Generel testprocedure:

- Batteriet oplades jf. leverandør specifikationer
- Lader frakobles og batteri 'hviler' i 1-4 timer
- Lastbank og DC kilde tilkobles og belastningsprofil programmeres ind
- Hvert sekund i afladningsforløbet logges batteriets klemspænding og batteristrømmen, der bagefter summeres op til strømkapaciteten og energikapaciteten
- Testen afbrydes når nedre klemspænding nås

Alle tests er udført ved rumtemperatur og tryk. Testproceduren gentages for alle 3 typer tests, men med forskellige belastningsprofiler.

- **EN61982-2 4.1** specificerer en 3 timers afladning af batteripakken i et stationært arbejds punkt.
- **EN61982-2 4.2.2** Specificerer en dynamisk belastningsprofil, der afspejler et gennemsnits arbejdsforløb.
- **EN61982-2 4.2.3** Specificerer et dynamisk belastningsprofil, der afspejler et gennemsnits arbejdsprofil, men antager at drivlinjen i køretøjet er i stand til at regenerere bremseenergien.

Konklusion på batterikapacitetsmålingerne

Strømkapacitet

Se testresultaterne for strømkapaciteten samlet i nedenstående tabel, procentsatserne viser afvigelserne ift. leverandørens specificerede kapacitet:

EUT	EN61982-2 4.1	EN61982-2 4.2.2	EN61982-2 4.2.3
A	-7 %	-4,3 %	-4,3 %
B	-11%	-12,3 %	-12,3%
C	+15%	+8,3 %	+3,9%
D	+15%	+8,3 %	+19,6%

Batteripakke A: Litium ion batteripakken ligger generelt lidt under det specificerede, men set i lyset af at historikken for batteripakken er ukendt, er resultatet acceptabelt. Til forskel for bly-syre batteriteknologien, holder litium batteriet strømkapaciteten selv under de dynamiske belastningsprofiler. Dette betyder at litium batterier rent teknisk er meget velegnet til applikationer med meget dynamiske belastninger (varierende strømtræk), for eksempel en palleløfter.

Batteripakke B: Denne batteripakke har generelt en lavere kapacitet end specificeret, men til gengæld holder kapaciteten meget fint selvom belastningsprofilen bliver dynamisk. Igen er batteripakkens historik ukendt, så en lavere strømkapacitet end specificeret kan være acceptabelt.

Batteripakke C: Bly-syre batteripakken uden super kondensator er ved forsøgets start helt ny, og derfor overgår strømkapaciteten det forventede. Overkapaciteten reduceres en del, når batteripakken udsættes for de dynamiske belastninger. Dette skyldes primært batteriets indre modstand, som omsætter en del af den elektriske

energi til varme. Ligeledes betyder den indre modstand at den nedre spændingsgrænse nås hurtigere. Ved belastningsmønsteret med regenererende strøm (EN61982-2 4.2.3), fortsætter faldet i strømkapacitet idet den regenererende energi tabes i batteriet i form af opvarmning. Dette skyldes at den energi der anvendes til at opnå det elektrokemiske overpotential som igangsætter opladningen, tabes umiddelbart efter (5 sekunder jf. belastningsmønsteret), når batteripakkens celledspænding falder tilbage til hvilespændingen.

Batteripakke D: Her anvendes ligeledes en helt ny batteripakke der tilkobles super kondensatoren ved forsøgets opstart. Det kan ses at batteripakkens strømkapacitet ikke påvirkes af super kondensatorens tilkobling for målingerne uden regenerering, her ligger de 2 batteripakker (C+D) ens. For kapacitetsmålingerne med regenerering ligger denne batteripakke dog markant over batteripakke C. Super kondensatoren absorberer bremseenergien med meget lidt elektrisk tab, idet super kondensatorens energiindhold direkte afspejles i klemspændingen. Når det regenererende forløb er tilendebragt, sørger super kondensatorens klemspænding for at opbevare bremseenergien. Dette modsat i batteripakke C, hvor en del af energien fra det regenererende forløb anvendes til at skabe tilstrækkeligt overpotential på cellerne.

Konklusion

Generelt må det siges at en batteripakke baseret på litium teknologi udmærker sig til en applikation med dynamiske belastninger, uanset om der anvendes bremse regenerering eller ej. Dette skyldes batteripakkens lave indre modstand, samt det forhold at ladningen på en litium battericelle foregår med meget lavt elektrisk tab. For bly-syre teknologien kan det anbefales at tilkoble en super kondensator, forudsat at køretøjer enten er af hybridtypen eller anvender regenerering under opbremsning, idet batteriets effektive strømkapacitet derved forøges markant.

Konklusion på accelereret levetidstest af blybatterier m/u supercap

Det er undersøgt hvilken indvirkningen en indskudt "super kondensator" (SuperCap) har på batterilevetiden. Der er blevet udført to accelererede levetidstests (HAL), henholdsvis en med og en uden en SuperCap indskudt i parallel med batteriet. Batterierne sidder monteret sammen med en brændselscellestak i en gaffeltruck. Eftersom batterier bliver slidt med tiden, er det væsentligt at se på hvorvidt levetiden kan forlænges med SuperCaps' monteret.

Batterierne der er testet, er batteripakke C og batteripakke D, da det var disse bly-celler der var tilgængelige for målingen.

Det er højest sandsynligt, at disse gavnlige virkninger kan videreføres til et litium-batteri. For begge batterityper gælder approksimationen, at 10K forøgelse af temperaturen fordobler reaktionshastigheden på de fleste interne kemiske processer. SuperCap'en vil også på et litium batteri holde temperaturen lavere end ellers, og dermed vil degraderingen mindskes. SuperCap'en vil til stadighed reducere Ah-throughput'et i litium batteriet og dermed får batteriet også et mindre slid.

Det skal dog for god ordens skyld bemærkes at der ikke er foretaget nogen HAL test med Litium batterier under dette projekt.

Konklusion

Ved denne HAL test af blybatterier i hybriddrift, med og uden SuperCap monteret, er det konstateret, at SuperCap'en har en gavnlig effekt på blybatteriets levetid.

Ved at lade et batteri op og aflade 130 gange i løbet af 7 døgn (HAL testen), er det konstateret at et blybatteri med en SuperCap parallelt monteret, mister 10,7 procentpoint mindre end et tilsvarende batteri uden SuperCap. Der er derfor 27 % mindre tab af kapacitet med SuperCap end uden. Herudover er det, som forventet, fundet at den indre modstand stiger i forhold til hvor slidt batteriet er.

3. WP4 – Udvikling af BOP system til udvalgt HT-PEM stak

H2 Logic udvikler systemer til material handling markedet. Tidligere har virksomheden udviklet LT-Pem systemer til bl.a. en Lifter fra Atlet Unitruck A/S. Det er fra dette udgangspunkt og erfaring at H2 Logic gik i gang med at udvikle et system baseret på HT-Pem stakteknologien og Litium ion batteriteknologien. Dette system skulle tilsvarende bruges i en Lifter fra Atlet Unitruck A/S.

En af hovedudfordringerne ved at bygge et brændselscellesystem til en Lifter er plads. Her har både litium ion batterier og HT-Pem systemet en fordel.

Litium ion batterierne har en højere energidensitet på volumen basis sammenlignet med blybatterier, og derfor er det muligt enten at medbringe mere energi eller have en mindre energipakke. BOP systemet omkring en HT-Pem stak er noget mindre fordi der pga. den høje drift temperatur ikke er brug for lige så meget køling.

Da det er teknologi under udvikling og hovedkomponenterne stadigvæk er på et tidligt udviklingsniveau kom der løbende fra SerEnergy A/S ændringer af styringsalgoritmer og nye essentielle parametre. Dette gjorde at der løbende måtte ændres på drift parametrene for systemet. Endvidere var nogle af disse ændringer så influerende på systemets drift at det var nødvendigt til at finde helt nye komponenter, selvom systemet var færdigt designet. Resultatet var at der gik meget tid med at indkøbe nye komponenter og drift parametre.

Udviklingen af BOP systemet kan deles op i 6 hovedgrupper

- Stakmodul
- Tankmodul
- Batterimodul
- DCDC modul
- Styringsmodul
- Sikkerhed

Stakmodulet består af en færdig enhed fra SerEnergy, der indeholder en HT-PEM stak, en blæser til proces luft, en varmemåtte og en selvstændig styringsenhed.

Tankmodulet består af en tryktank der kan lagre op til 350 bar brint. Dertil kommer komponenter for at brinttrykket skal reduceres til under 0,1 bar for at kunne bruges i brændselscellestakken.

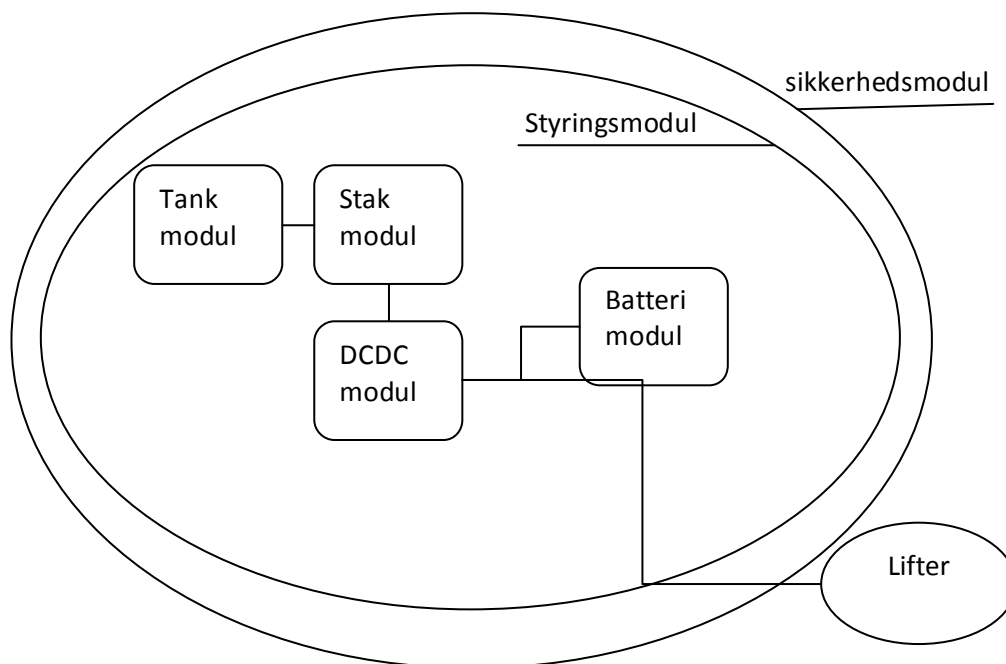
Batterimodulet består af en række celler med BMS fra Lithium Balance A/S. Derudover består det af relæer, sikringer, strøm- og spændingsmålinger.

DCDC-modulet er en enhed der tager den elektriske energi, der bliver produceret i stakmodulet, og leverer det til batterierne eller Lifteren.

Styringsmodul består af en embeded controller der overvåger og styrer de forskellige inputs og outputs. Denne enhed sørger for at den overordnede styring af de andre moduler.

Sikkerhedsmodul er også en del af styringsmodul, ved at der er bygget flere forskellige overvågninger ind i styringsmodul. Men det er mere end det, da der udover software løsninger også er indbygget forskellige hardware løsninger for at gøre dette system til en Lifter så sikker som muligt.

Nedenfor kan der ses et skematisk diagram af det overordnede opbygning:



Ovenstående moduler er færdige moduler der virker som et individuelt modul. En af hovedopgaverne for H2 Logic i dette projekt var at sende styre kommunikationen mellem de forskellige moduler. Dvs. hvis SOC fra batteriet blev for lavt, sendes der et signal til brændselscellemodul om at starte op, og derfra skal der sendes et signal til tank modulet om at leverer brint for til sidst at aktiverer DCDC modul således der kan blive leveret energi til batteriet. Dette sker samtidigt med at alle modulerne bliver overvåget af sikkerhedssystemet.

Sikkerhedssystemet består dels af en hardware del der er forskellige sikkerhedskomponenter. Disse komponenter sørger for, at i tilfælde af at noget uforudset sker i systemet, er der ikke nogen personfare. Derudover består sikkerhedssystemet også af en software der overvåger systemet for fejl og har mulighed for at lukke systemet ned i tilfælde af en målbar fejl. Disse to dele af sikkerhedssystemet er redundante for at sikre mennesker og systemet så godt som muligt.

En af hovedudfordringerne ved HT PEM systemet er opstartstiden. Dette hænger meget sammen med batteristørrelsen, som igen er begrænset af plads.

Da muligheden for at holde stakken varm når systemet ikke kørte (hibernation) blev ændret midt i projektet, grundet nye data fra SerEnergy, blev opstartstiden noget længere, sammenlignet med det oprindelige system layout. Dette blev ændret sammen med en del andre operations parametre, så som tryk og maksimum temperatur, hvilket nødvendiggjorde en del systemændringer, både hardware- og softwaremæssigt.

Inden Lifteren kunne komme ud til en slutbruger til test, krævede det en indkøring af systemet for at sikre at det kørte som det skulle og alle overvågninger virkede. Der var flere forskellige problemstillinger som skulle løses.

Hovedproblemstillingerne var for H2 Logic

- kommunikationen mellem delsystemerne
- Sikkerhedsovervågning
- Brintrykket på HT-Pem stakken
- Udblæsningstemperaturen på luften ud af systemet

Dette blev løst ved tests af systemet hos H2 Logic, dels uden lifter og dels med lifter.

Kommunikationen foregår via CAN beskeder og her var udfordringen hovedsageligt at sende de rigtige beskeder til modulerne ud fra en analyse af de informationer der kommer fra de forskellige moduler.

Som en del af softwaren bliver hele systemsikkerheden overvåget. Det er både personsikkerhed og systemsikkerhed. Denne overvågning tager udgangspunkt i hvad der tidligere er implementeret i en tilsvarende Lifter. Det tidligere overvågningssystem er godkendt af TÜV og derfor ses de grundlæggende principper som meget sikre. Sikkerhedsovervågningen er tilpasset til lige netop dette system, f.eks. er drift temperaturen meget højere end tidligere systemer som H2 Logic har arbejdet med, hvilket ændrer på overvågningsgrænserne.

Da HT-PEM stakken stadigvæk er under udvikling kom der løbende forbedringer til driften af den. Dette betød bl.a. at brintrykket på HT-PEM stakken blev mere end halveret. Det resulterede efterfølgende i at både komponenter og styringen til regulering af brinten skulle skiftes ud. Endvidere skulle sikkerhedssystemet også indkøres igen.

Ved at arbejde med en HT-PEM stak skal der også tages højde for at der ikke sker personskade og komponent skade pga. den høje luft temperatur der kommer ud af stakken. Til dette formål var der installeret 2 ekstra blæsere der leverede ekstra luft for at holde komponenterne kolde. Luften blev efterfølgende blandet med den varme udgangsluft fra stakken for derved at få en luft temperatur som ikke brændte personer.

4. WP5 – Udvikling af BMS til Li-Ion batteripakke

Lithium Balance er en virksomhed som er specialiseret i udstyr til batteristyring. Virksomheden har været involveret i HyLIFT-0 projektet som en samarbejdspartner. Ansvarsområdet har været design og udvikling af Litium ion batteripakke, Battery Management System (BMS), samt integration og interface til HT PEM Brændselscellesystemet.

Dimensionering

Design og udviklingen af litium ion batteripakken har omfattet dimensionering af system kapacitet, design af samme, samt valget af celle type for at sikre, at den ønskede ydeevne er tilgængelig i de respektive batterier.

Målet for batteripakken har været at virke som en buffer for brændselscellesystemet, således at forbrug ud over brændselscellens nominelle effekt kan suppleres af batteripakken. Herefter kan batterierne regenerere energi fra brændselscellen, under lave effektforbrugsperioder fra forbrugssystemet, eller fra truckens motor ved regenerativ bremsning.

Dette stiller krav til at batteripakken kan håndtere det maksimale effektforbrug fra forbrugssystemet. I dette konkrete tilfælde er strømmen afgørende i og med at systemet opererer med en forholdsvis lav systemspænding.

For at tilgodese disse krav, faldt valget på industriens måske bedste, lettest tilgængelige og mest pålidelige Litium ion battericelle. Denne celle udmærker sig ved at have gode egenskaber, bl.a. lav varmeudvikling og høje afladnings og opladnings strømme, som det konkrete system efterspørger.

Design af batteripakken

Under arbejdet med design af batterisystemet har Lithium Balance redesignet den mekaniske batteripakke som normalt benyttes af Lithium Balance til Kokam batterierne. Udfordringen har i denne proces været at ændre de mekaniske komponenter, således at de samme grundkomponenter kunne benyttes til et mindre antal celler. Helt konkret drejede det sig om at lave to batteripakker hvori cellerne er koblet parallelt to og to for at opnå højere kapacitet. Dette var allerede designet, men udfordringen var at have en standard pakke med 4 celler (4s2p) og en pakke hvor der kun var 3 celler (3s2p) for at opnå den nominelle spænding på 24V. Arbejdet med den fysiske batteriintegration har hovedsageligt indebåret mekaniske ændringer.

Den valgte Lithium ion batteriløsning

Det fysiske produkt fra arbejds pakken er to batteripakker indeholdende 14 enkelte 53 AH Kokam Lithium ion polymer celler. To Local Monitoring Unit's (LMU), en for hver batteripakke, to relæer for sikkerhedsafbrydelse samt en Battery Management Control Unit (BMCU) med tilhørende firmware interface til brændselscellen. Batteripakkerne samler de meget uhåndterbare litium ion "pouch cells" i en konstruktion hvor cellerne kobles i henholdsvis parallel og i serie for at opnå den korrekte spænding og kapacitet. Disse cellepakker indeholder både "bussbars", de fysiske strømførende og celleforbindende mekaniske enheder, de nødvendige celledspændingsmålings- og temperaturmålingsforbindelser og PCB, selve LMU'erne samt forbindelser til kommunikation LMU'erne imellem. Disse dele er monteret og støbt i en termisk ledende gummimasse som har til formål at fiksere samtlige dele meka-

nisk, således at vibrationer og fugt ikke kan give komponent fejl eller beskadigelser ved brug i en industriel applikation.

De to Batteripakker, BMCU, strømmålings shunt, hovedsikring og relæer er monteret i en metalkonstruktion i forbindelse med brændselscellen. I konstruktionen er der vist hensyn til varmeudvikling fra brændselscellen således at denne ikke har direkte indflydelse på opvarmningen af litium ion batterierne.

Til dataudlæsning og system konditionering er et diagnosticerings PC software tilgængeligt således at teknikere kan udlæse real tids målinger på systemet. Disse kan logges og benyttes til senere analyse af systemets ydeevne og til vurdering af system design og integration hos såvel udviklingsvirksomheden, men også i høj grad hos slutbrugeren.

Elektrisk integration i brændselscellesystemet

Den elektriske integration har på grund af den lave systemspænding betydet at en række tiltag måtte implementeres, for at sikre optimal ydelse med et minimum af ændringer og ekstra komponenter.

Normalt benyttes det i denne applikation anvendte system til højspændingssystemer, men kan også benyttes helt ned til kun et få antal celler. Grunden til at dette system blev valgt var på baggrund til dets fleksibilitet i form af input og outputs. Det valgte system indeholder bl.a. industristandarden CAN bus, samt 8 inputs eller outputs, forstået på den måde, at de kan benyttes til begge dele alt efter hvad applikationen kræver.

Systemarkitekturen i denne BMS betød dog også at systemspændingen bliver brugt som forsyning til BMS'en. Dette er normalt ikke benyttet i højspændingsapplikationer hvor man holder batterispænding og BMS forsyningsspænding galvanisk adskilt. Dette bevirkede at en række ændringer måtte udføres i BMCU firmvaren. Dette gjorde det dog også muligt at benytte det negative strømførende kabel som reference for strømstyring under opladning og herved spare en række forbindelser i ladestikket. Dette gør i sidste ende systemet mere simpelt og overskueligt.

Hovedparten af udfordringen i den elektriske integration har været at beskrive, definere og udvikle Interfacet imellem BMS'en og brændselscellesystemet. Interfacet har til dels det formål at sikre den korrekte funktionalitet således at brændselscellesystemet, sammen med batterier og BMS, virker som et samlet forsyningssystem, men også for at sikkerheden i begge systemer ikke bliver kompromitteret. Udfordringer ligger langt hen af vejen i at få to ellers selvstændige systemer til at arbejde sammen og ikke skade hinanden i tilfælde af fejl på et system.

Sikkerhed i HT-PEM/Li-Ion systemet

BMS'en er designet til at beskytte lithium batterierne og det kan den normalt gøres på flere forskellige niveauer, hvor sidste sikkerhedsforanstaltning er at afbryde en belastning eller et effekt input fra batterierne via et relæ. Dette er imidlertid ikke nødvendigvis den rigtige fremgangsmåde for at håndtere brændselscellen. Derfor er det vigtigt at bibeholde sikkerheden, men samtidig indbygge en robust handlingsplan for de to systemer i tilfældet af en fejltilstand. Denne handlingsplan skulle derfor gerne tage højde for begge systemer og sikre korrekt funktionalitet i alle situationer. Begge systemer ligger inde med en stor mængde information om driftstilstand

for sit eget område, men er afhængig af information fra det andet system for at kunne afgøre hvad det bedste handlingsmønster er i en giver situation. På BMS siden er de mest kritiske informationer at give videre til brændselscellesystemet, den aktuelle lade tilstand (State of Charge) og eventuelle fejltilstande som kunne udgøre en sikkerhedsrisiko således at systemet burde lukkes ned.

Konklusion

Under arbejdet med arbejds pakken er der opnået et stort kendskab til de betingelser et batterisystem skal kunne operere under i en Lifter applikation. Herudover er der opnået et stort kendskab til de teknologier som måske på sigt kan inkorporeres sammen med litium ion batterier og sikre en endnu højere ydeevne ved hybrid applikationer. Her har input fra de øvrige arbejds pakker lagt grundlag for videre arbejde og undersøgelser om integration af andre teknologier i forbindelse med litium ion batterier.

Der er i arbejds pakken blevet udviklet et specifikt firmware interface til brændsels cellen således at kritiske fejltilstande bliver givet videre til brændselscellesystemet, både via CAN bus, men også via et hardware signal. Batteripakkens ladetilstand lægges til grund for algoritmen, som er bestemmende for input til brændsels cellen. Herudover er der bygget endnu et lag, som kan suspendere den grundlæggende algoritme i et tilfælde hvor der skulle opstå en utilsigtet fejltilstand.

5. WP6 – Udvikling af HT-PEM/Li-Ion hybridsystem

Hybridsystemets design er lavet på baggrund af erfaring med LT-PEM systemet der kører hos Grene A/S. En af problemstillingerne fundet omkring det system er "turn down ratioen", dvs. hvor langt brændselscellesystemets power output kan skrues ned. Årsagen til at dette er en vigtig faktor er at systemet har bedst af at køre hele tiden i stedet for en masse start/stop cyklusser. Dette hænger også sammen med batteristørrelsen, da en større batteripakke kan optage mere energi fra brændselscellesystemet og dermed kan brændselscellesystemet operere ved et højere output i længere tid uden at skulle lukke ned.

På baggrund af disse betragtninger og viden omkring Lifterens maksimumsforbrug sammen med det gennemsnitsforbruget blev stakstørrelse og batteripakkestørrelse valgt. Dette blev samtidigt gjort ud fra den betragtning at det skulle være produkter der findes på markedet. Denne effekt var muligvis lige i underkanten, men den ville kunne klare de fleste af de forbrugsmønstre der er blevet set ude hos brugere af Lifterne.

HT-PEM stakmodul blev sat sammen med en litium ion batteripakke. Denne batteripakke har ca. den dobbelte kapacitet af den batteripakke der findes i LT-PEM systemet i dag. Dvs. en litium ion batteripakke med en kapacitet på 106 Ah. Årsagen til dette er at det er begrænsningerne i batteripakken fra LT-PEM systemet der har givet problemer med LT-PEM systemet. En større batteripakke giver en bedre fleksibilitet for hvornår systemet skal køre. Litium ion batterierne resulterer i at der var begrænsninger på hvor stort forholdet mellem den leverede effekt og batteristørrelsen kunne være. Denne begrænsning findes også på blybatterier, men det har ikke de samme konsekvenser i de to tilfælde og derfor er det mere vigtigt at overholde specifikationerne for litium ion batterierne sammenlignet med bly batterierne. For litium ion batterierne risikeres der "thermal runaway" ved at lade/aflade batterierne for kraftigt. Thermal runaway er en proces hvor batterierne laver nok varme internt til at det starter en proces hvor de begynder at brænde voldsomt. Thermal runaway kan også forekomme hvis batterierne bliver varmet op af en ekstern varmekilde, hvilket skal overvejes som en del af systemintegrationen idet at litium ion batterierne installeres sammen med en HT-PEM stak.

En af fordelene for litium ion batterierne ved at kombinerer dem i et hybridsystem er batteriernes levetid. Når batterierne er kombinerede med en brændselscellestak bliver de ikke afladt/opladt ret meget for hver cyklus. Denne opladnings- og afladningscyklus har stor indflydelse på batteriernes levetid. Ved at formindske, hvor meget de bliver opladet/afladet på hver cyklus sker der en eksponentiel vækst i levetiden i forhold til hvor lang opladnings-/afladningscyklussen af batterierne er.

6. WP7 – Benchmark hos slutbruger

Erfaringerne fra indkøring af HT-PEM/Li-Ion systemet viste, at der var adskillige problemstillinger forbundet med at sætte systemet i uovervåget drift hos Grene A/S i ugevis, hvilket var den oprindelige tanke.

Opstart af systemet

En HT-PEM brændselscelle kan ikke startes i kold tilstand – den skal opvarmes inden den kan opstartes. Ved opstart af et koldt system, vil det i brændselscellen indbyggede varmelegeme skulle opvarme brændselscellen til ca. 80 °C inden brændselscellesystemet kan opstartes – energien til dette modsvarer 7-8 minutters drift og hentes fra batteriet. Imens opvarmningen står på vil brændselscellen ikke levere energi til drift af Lifteren, dog vil den ved 80 °C starte op ved lav effekt (efter 26 minutter) og nå fuld effekt efter 45 minutter.

Når operatøren tager Lifteren, forventer han øjeblikkeligt at kunne køre med trucken, uden at skulle tage hensyn til hybridsystemet. Derfor vil batteripakken ikke bare skulle opvarme brændselscellen, men også kunne levere energi til truckens drift i de ca. 45 minutter det tager at opvarme systemet.

I situationer hvor en truck med et tæt ved afladet batteri parkeres og afkøles, vil der ikke være energi på batteriet til opvarmning og samtidig drift.

I WP2 blev det besluttet at trucken må tilsluttes lys-nettet ved enhver længerevarende parkering, således at batteriet oplades, men det viste sig at selv korterevarende parkering, som en frokostpause, efterfølgende kræver opvarmning af brændselscellen - og det kan ikke forventes at brugeren tilslutter laderen i fbm. pauser, hvilket gør det ret vanskeligt at sikre at batteriet ikke løber tør for strøm ved sammenfald af uheldige omstændigheder.

En så krævende brugerflade, vil kraftigt påvirke brugerens oplevelse af HT-PEM/Li-Ion hybridsystemet og dermed også påvirke benchmark'en uheldigt.

Sikkerhed

HT-PEM/Li-Ion systemet er opbygget med de sikkerhedsfunktioner der har været implementeret på de køretøjer som H2 Logic tidligere har bygget og opnået godkendelse af hos TÜV. Da køretøjet i HyLIFT-0 projektet er en prototype, vil det ikke give mening at lave en TÜV godkendelse af det.

Batterier

Li-Ion batterier har en række fordele, men også den ulempe at bliver de for varme kan de selvantænde og de lader sig ikke umiddelbart slukke, da der udvikles ilt ved branden (thermal runaway). Under indkøring af HT-PEM/Li-Ion systemet var der en elektrisk forbindelse i batteripakken, der ikke var udført korrekt, med det resultat at batterierne blev så varme at plasticindpakningen deformedes.

Levetid

HT-PEM brændselscellen har en kraftig tendens til at degradere, især hvis ikke den nedlukkes korrekt. Det betyder at i tilfælde af en fejl på hybridsystemet, som pga. sikkerhedssystemerne forårsager Nødstop på systemet, vil stakken degradere kraf-

tigt hvis ikke systemet genstartes og nedlukkes kontrolleret. Når disse fejl sker, skal der tilsluttes en PC på serviceinterface for at identificere, analysere og re-sette fejlen.

Da disse fejlsituationer ikke er ualmindelige på en prototype, vil det i praksis betyde, at der skal uddannes en bruger hos Grene, der vil kunne re-sette denne fejl, hvilket igen vil give en meget uheldig oplevelse med systemet, og sandsynligvis vil brugeren ofte have travlt og være midt i noget, hvorfor køretøjet vil blive kørt på el-drift indtil batteriet er afladet.

Alternativ benchmark

Summen af alle disse faktorer gjorde, at det blev besluttet ikke at sætte HT-PEM/Li-Ion systemet i længerevarende uovervåget benchmark hos Grene A/S.

I stedet er der blevet udført følgende benchmark af HT-PEM/Li-Ion systemet:

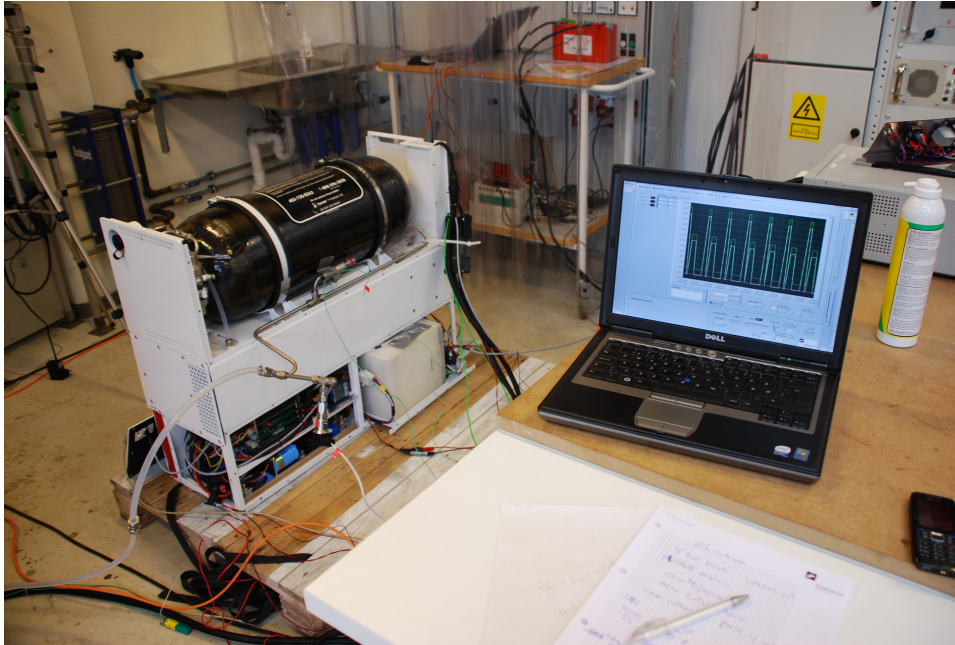
- HT-PEM/Li-Ion systemet og LT-PEM systemet er begge opmålt i den samme testbænk hos Teknologisk Institut, således at deres forbrug og ydeevne kan sammenlignes direkte i udvalgte driftpunkter.
- Ligeledes hos Teknologisk Institut er der udført en VDI-lignende dynamisk test af begge systemer, der danner basis for en sammenligning under dynamiske driftsforhold, tilsvarende forholdene i trucken.
- Der er kørt en dags drift med HT-PEM/Li-Ion systemet i Lifteren hos Grene (med ingeniør tilstede). Ved personligt at være til stede under afprøvningen, ville det være sikret at få fuld feedback fra brugeren direkte. Det vurderedes til at give 90% af det opnåelige udbytte, da en bruger i løbet af ganske kort tid har vænnet sig til et givet systems fordele og ulemper.

Ved denne benchmark er der en meget højere grad af målepunkter som baggrund for sammenligningen med LT-PEM systemer, mens der er knap så lang en bruger benchmark, med "bløde" vurderinger.

Benchmark test hos Teknologisk institut:

Nedenstående er en opsummering af bænktesten hos Teknologisk Institut – den fulde testbeskrivelse er i Bilag 1.

Både HT-PEM/Li-Ion systemet og LT-PEM/blysyre systemet har været sat op til test i en testbænk, hvor der er blevet belastet. Målingerne er foretaget ved nominel effekt og minimum effekt. Derud over er der foretaget en test med dynamisk last.



Benchmark testopstilling på Teknologisk institut

Når de to systemer sammenlignes fremgår det at udnyttelsen af energien er meget højere for LT-PEM systemet end for HT-PEM systemet. LT-PEM systemet udnytter energien cirka dobbelt så godt om HT-PEM systemet med en udnyttelsesgrad på hhv. 40 % og 20 %. Den lave udnyttelse af energien i HT-PEM systemet skyldes i stor udstrækning at der purges meget hydrogen igennem stakken. Det har ikke i projektet været muligt at optimere denne purgestrategi, men der er mulighed for at kunne reducere forbruget væsentligt.

Hvis der ses på den teoretiske virkningsgrad η_{IV} vil HT-PEM brændselscellesystemet dog ikke have mulighed for at komme så højt op i virkningsgrad som LT-PEM systemet.

Systemerne er designet så maksimaleffekten er over dobbelt så høj for LT-PEM stakken som for HT-PEM stakken. Makseffekterne kontinuert ud af systemet er hhv. 1400 We og 560 We.

Mht. opstartstid har LT-PEM systemet også en fordel idet LT-PEM stakken kan producere maksimal effekt i løbet af få minutter, mens det tager 45 minutter for HT-PEM stakken at starte fra omgivelsestemperaturen, med den nuværende opstartsstrategi.

Pga. den højere effekt og hurtigere produktion er der derfor behov for en meget mindre batteripakke i LT-PEM systemet. Det forstærkes yderligere af, at der ikke skal benyttes strøm til opvarmning af LT-PEM stakken.

En relativt hård belastning af systemerne via en simuleret VDI test viser at begge systemer har problemer med at klare en VDI test. HT-PEM systemet klarer dog præcist testen når stakken er varmet op på forhånd. At HT-PEM efter opvarmning klarer testen skyldes den større batteripakke end i LT-PEM systemet.

Alt i alt falder testen ud til fordel for LT-PEM systemet pga. meget kortere opstartstid, næsten dobbelt så høj udnyttelse af energien samt mulighed for operation med en meget mindre batteripakke.

Benchmark test hos Grene:

Billedet: Jens Kristian Pedersen, truckkører hos Grene A/S, tester Lifteren med HT-PEM brændselscellesystemet installeret.

Efter at have kørt med Lifteren nogle timer kunne Jens Kristian Pedersen fortælle at der ikke umiddelbart var nogen problemer med det at bruge HT-pem systemet.

Støjmæssigt var det helt fint, der havde ikke været nogen uforventet stop under kørslen eller opgaver den ikke kunne klare.

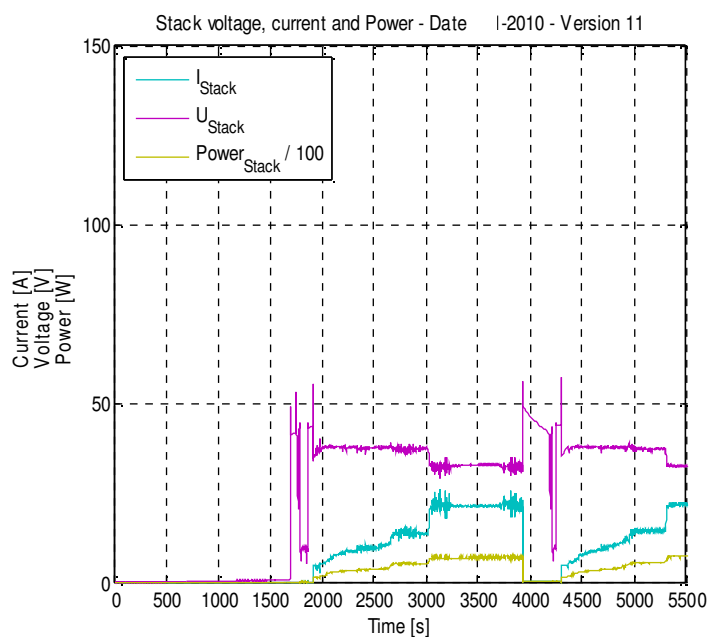
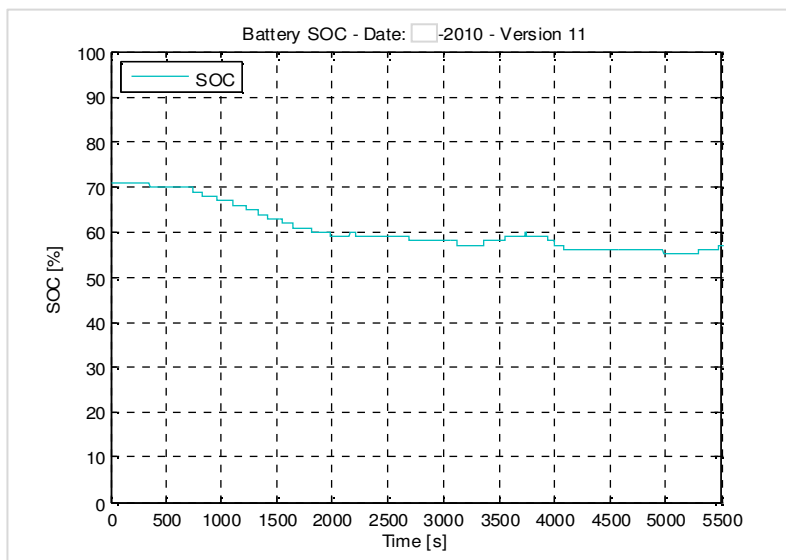
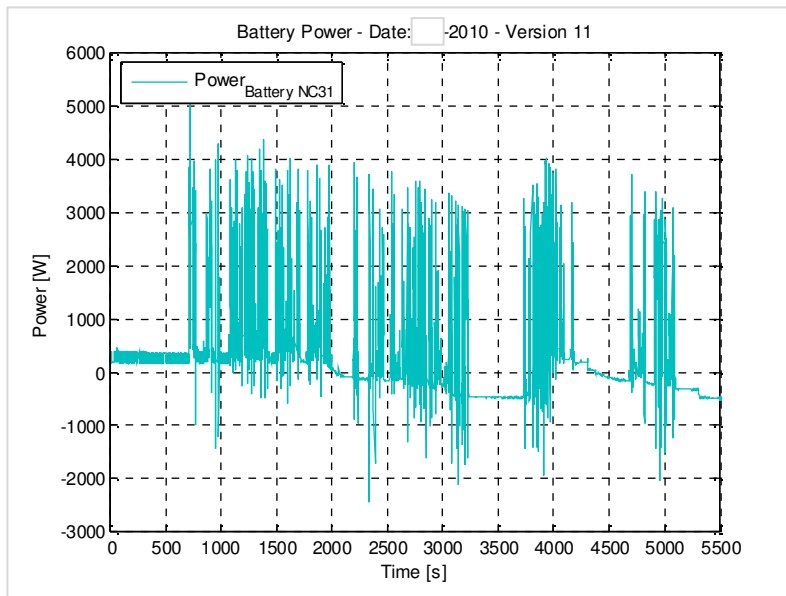
Jens Kristian Pedersen fortalte at Lifteren ikke var blevet brugt til deres daglige rutine brug, men til specialopgaver. Det skyldes at der ikke var installeret en af Grene's administrationscomputer på Lifteren.

Den "varme" udstødning var ikke som sådan et problem. Dette skyldes muligvis også konstruktionen af HT-PEM systemet, således at lufttemperaturen aldrig var så varm at man brændte sig på luften.

Dog var brugeren også gjort opmærksom på at man ikke skulle røre på metal pladen der hvor den varme luft kom ud. Dette er det samme som på et almindeligt udstødningsrør.



Graferne nedenfor viser målte resultater fra driften af Lifteren.



Brændselscellesystem elektrisk effektproduktion

Hvis batteriernes State Of Charge (SOC) sammenlignes med energiforbruget fra Lifteren og den elektriske effektproduktion fra brændselscellesystemet, kan det ses at de første 10-15 minutter (600 til 900 sekunder) bliver Lifteren ikke brugt. Derefter bliver den brugt i 10 til 15 minutter mere før brændselscellesystemet starter op. Det er først efter samlet 50 minutter (3000 sekunder) at brændselscellesystemet er oppe og leverer fuld effekt til batterierne.

Resultatet af dette ses også på batteriernes SOC. I den periode hvor Lifteren bliver brugt uden brændselscellesystemet ikke kører falder SOC med 10 %-point. Og i den efterfølgende periode hvor systemet er i gang med at køre op i effekt falder SOC yderligere 2 %-point.

Lifteren står de første 10 minutter for at brugeren ikke på et senere tidspunkt får brug for at lade Lifteren stå midt i arbejdet. Det kan dog ses at dette ikke burde være nødvendigt. Ved flere indkørings tests havde dette kunne optimeres.

Batteripakken er dimensioneret til at HT-PEM systemet som regel står i en for opvarmet tilstand tilsluttet elnettet. Dette blev midt i projektet ændret af stakproducenten og derfor var det ikke sikkert at batteripakken var helt stor nok til opstarten.

Når brændselscellesystemet kørte samtidigt med at Lifteren blev brugt, kan det ses at SOC var konstant over perioden; Se f.eks. i tidsperioden fra 3.000 til 4.000 sekunder. Dette er selvfølgelig meget afhængigt af hvordan systemet er hybridiseret og hvordan det bruges.

7. WP8 – Evaluering, afrapportering og formidling

I ansøgningen er opstillet en række forventede fordele ved HT-PEM/Li-Ion systemet, der tilsammen kunne indikere at HT-PEM/Li-Ion hybridsystemet ville være en potentiel disruptiv teknologi, sammenlignet med kendte LT-PEM systemer.

Teknologien skulle være disruptiv, ved at kombinationen af HT-PEM brændselscelle og Li-Ion batterier tilsammen skulle udligne den enkelte teknologis ulemper og samtidig give markante fordele sammenlignet med kendte LT-PEM/blybatteri løsninger. Det overordnede formål med projektet er at udvikle og bygge et HT-PEM/Li-Ion brændselscellesystem og efterprøve denne teori.

Udlignede integrerede ulemper

- Tese: *Ved temperaturer under -10°C taber Li-Ion batterier væsentlig kapacitet – i og med at et HT-PEM system opererer ved ca. $140-170^{\circ}\text{C}$, vil der i et kombineret HT-PEM/Li-Ion system være masser af varme til rådighed, så operation ved lave temperaturer ikke er problematisk for batterierne.*

Denne tese er ikke efterprøvet, men det er et faktum at under drift vil der være rigelig varme til rådighed, så kolde batterier vil aldrig være et problem under kontinueret drift. (Kolde batterier ved opstart er behandlet under "Erfarede ulemper ved HT-PEM/Li-Ion systemet" nedenfor)

Til gengæld var der en tendens til at den meget varme udblæsning fra brændselscellen opvarmede hele kabinettet, hvorved batterirummet også blev opvarmet, og det degraderer batterierne. De har det ideelt ved $20-25^{\circ}\text{C}$ og degradering starter ved temperaturer over 30°C .

- Tese: *HT-PEM teknologien kræver, at brændselscellen opvarmes, inden den kan startes – energien til dette kan hentes fra Li-Ion batteriet.*

Som tidligere beskrevet er dette korrekt. Læringen under projektet er dog at under opvarmningstiden (op til 45 min) er der et behov for drift med Lifteren og dermed er energibehovet så stort, at det kræver et uforholdsmæssigt stort batteri – især da det er usikkert hvor stor kapacitet der er på batteriet ved parkering. Energien til opvarmning er altså ikke i sig selv problematisk, den svarer til 7-8 minutters drift, men energien til drift af Lifteren under de op til 45 minutters opvarmning er til gengæld en stor udfordring.

Fordele sammenlignet med LT-PEM

- Tese: *En HT-PEM brændselscelle leveres som en turn-key unit, indeholdende blæsere, varmestave og tilhørende styring. Det betyder, at indbygning af brændselscellen er væsentlig nemmere, frem for selv at skulle kombinere et tilsvarende antal komponenter i et LT-PEM system.*

Dette er korrekt, HT-PEM/Li-Ion systemet er meget simpelt at anvende da det består af færre komponenter. Dog forholder det sig sådan at det meget lave tryk i brintkredsløbet er en reguleringsmæssig udfordring da der stilles større krav til tryksvingninger.

- Tese: *HT-PEM brændselscellen er mere tolerant overfor brændselscellens driftsbetingelser, derfor kan et antal komponenter spares ifht. et LT-PEM system,*

som f.eks. befugter, cellespændingsmåling, m.m. Dette giver et billigere og mere simpelt brændselscelle system.

Dette er også korrekt, det lavere driftstryk på brintkredsløbet har dog også gjort nogle komponenter mere avancerede.

- Tese: *Den høje temperatur som HT-PEM brændselscellen operere ved, giver desuden den fordel, at brændselscellen ikke stiller så store krav til brintens renhed – derfor er der mulighed for at køre systemerne på reformat af f.eks. metanol.*

Dette er antageligt korrekt, men ikke afprøvet i HyLIFT-0 projektet.

Det er dog konstateret, at det er nødvendigt at purge meget, da inerte gasser hurtigere ophobes.

- Tese: *Køling af HT-PEM er nemmere, da den højere temperatur giver en mere effektiv køling til omgivelserne.*

Det er korrekt at det er nemt at komme af med varmen, men det har vist sig at være et problem mere end en fordel, da udblæsningsluften kan være op til 170°C, var det nødvendigt at redesigne udblæsningssystemet, da det opvarmede systemkassen, hvilket er uacceptabelt for batterier og brint-tank. Efter at udblæsningen var ombygget, opstod i stedet et temmelig høj udblæsningstemperatur – luften der blæses ud er 80°C, hvilket kan være u hensigtsmæssigt, hvis Lifteren parkeres meget tæt ved siden af ting der kan tage skade af varmen. Dog er luften efter et par centimeter nede omkring 30 – 50 °C pga. en god opblanding.

- Tese: *Styring og regulering af HT-PEM systemet er mere simpel, da der er færre komponenter og processen er mere robust overfor variation omkring det ideelle driftpunkt.*

Dette er delvist korrekt, der er ganske vist færre komponenter at styre, men til gengæld er der som beskrevet flere "standard" controllere der skal kunne kommunikere sammen, da både BMS, brændselscelle og den overordnede controller skal kunne arbejde sammen – dette har vist sig ikke at være helt simpelt.

Erfarede ulemper ved HT-PEM/Li-Ion systemet

- Prisen på et HT-PEM brændselscelle er markant højere end for en tilsvarende LT-PEM brændselscelle, på nuværende udviklingsniveau. Prisforskellen er ca. en faktor 6 målt pr. kW. (selve brændselscellestak med BOP, ekskl. batterier og tryktank)
- Prisen for et Li-Ion batteri er ligeledes markant højere, ca. en faktor 5, sammenlignet med et tilsvarende bly batteri.
- Teknologien er endnu ikke modnet og der er få leverandører der har færdige systemer.
- Opstartstiden for en HT-PEM brændselscelle er forholdsvis lang, selv efter korte stop skal stakken opvarmes. Som beskrevet er dette en af de største tekniske udfordringer ved HT-PEM teknologien.
- Degradering af brændselscellen er kritisk. Brændselscellen degraderer også når den ikke er i drift, specielt hvis ikke den nedlukkes korrekt. Længerevarende parkering (eks. sommerferie) er tillige levetidsnedsættende for brændselscel-

len. Konsekvensen vil blive en relativ hyppig stakudskiftning og dermed en øget serviceomkostning.

- Li-Ion batterierne har nogle problemstillinger omkring brandfare (Thermal runaway), som stiller høje krav til systemintegratorerne som skal varetages under design og håndtering af systemerne.
- Li-ion batterier skal servicelades med 1-2 ugers mellemrum, for at sikre fuld kapacitet på batterierne. Dette fordrer at der tilsluttes en net-lader, der balancerer cellerne. Dette er et forhold som brugere af et batterihybridkøretøj er nødt til at acceptere på nuværende tidspunkt. BMS producenterne arbejder dog på at minimere behovet for balancering.
- Fælles for blybatterier og Li-Ion batterier er en nedsat ydelse i koldt vejr. Som beskrevet er drift ikke problematisk, men batterierne tåler dårligt at blive opladet i frostvejr, det koster levetid, ligesom deres kapacitet i en opstartssituation, hvor der er frostvejr, er kraftigt nedsat.

Konklusionen

HT-PEM/Li-Ion systemet

HT-PEM/Li-Ion teknologien har et potentiale fremadrettet. Den er relativt simpel at anvende, der skal ikke mange komponenter til at bygge et system og den er derfor ret kompakt. I kraft af de få komponenter har teknologien potentiale til at blive prisattraktiv, især hvis brinten kommer fra et reformat lagersystem, der kan sikre lave driftsomkostninger, hvilket kan modvirke den relative lave virkningsgrad. Den lange opstartstid og den hurtige degradering er hovedproblemstillingerne ved HT-PEM brændselscellen, mens batterierne navnlig skal have løsninger på håndtering af ydelsen i frostvejr, især i det kolde nordiske klima.

HT-PEM brændselscellen

Grundlæggende virker brændselscellen fint. Den er nem at bruge og yder det den skal, men virkningsgraden er ikke god og den elektriske integration er krævende. Der vurderes dog at være et uudnyttet potentiale til at virkningsgraden bliver bedre, ved at optimere på driften og ved sammenbygning med reformer. Selve cellen virker som et udviklingsprodukt. Undervejs i projektet blev data for driftpunkter ændret af producenten. Produktet har et stort potentiale, hvis udviklingen færdiggøres, især ifbm. drift på reformat (billigt) og hvis der findes en vej til at udnytte den store spildvarme til noget effektivt, eks. kabinevarme i et køretøj.

Li-Ion batteriet

Et Li-Ion batteri tåler, sammenlignet med et bly batteri, langt bedre den dynamiske drift der er i en truck og cellerne lever generelt op til specifikationerne, hvilket ikke altid er tilfældet med andre batterier. Batteriet har en høj kapacitet og er meget kompakt, sammenlignet med et bly batteri er både størrelse og vægt reduceret med ca. 50%. Prisen for batteriet er høj og der er en avanceret integration i køretøjet, som dog også byder på en mere detaljeret tilbagemelding på batteriets status. Batteriet tåler ikke at blive belastet ud over specifikationerne, hvilket et bly batteri er meget tolerant overfor. Der stilles derfor krav til en kontrolleret driftssituation.

Fremtidige aktiviteter og forskningsområder

Der er i løbet af HyLIFT-0 projektet identificeret nogle områder, der kunne danne basis for fremtidige projekter indenfor HT-PEM/Li-Ion teknologien:

- Det er nødvendigt at arbejde med videreudvikling af HT-PEM brændselsceller. På stak niveau skal der arbejdes med øget virkningsgrad og reduktion af pris. På system niveau er det nødvendigt at udvikle optimerede opvarmningssystemer der kan nedbringe opstartstiden.
- Nye hybridsystemer skal udvikles som er målrettet mod anvendelse til HT-PEM systemer, og den store mængde energi der skal bruges til opvarmning af stakken, samt til drift af køretøjet indtil brændselscellen tager over. Her vil det også være relevant at arbejde videre med supercaps herunder om de kan give en tilsvarende positiv effekt på Li-Ion batterier i dynamisk drift, som det er tilfældet for blybatterier.
- Da virkningsgraden på HT-Pem brændselscellen, på nuværende udviklings-trin, er lav, men brændselscellen er tolerant overfor urent hydrogen, vil det være relevant at undersøge mulighederne for drift på reformerede brændstoffer, som f.eks metanol. Dette vil med optimal integration mellem reformer og brændselscellestak kunne bidrage til at øge virkningsgraden.

8. Bilag

Følgende bilag er vedlagt denne rapport:

- Bilag 1 - Benchmark test af systemer hos Teknologisk Institut (WP7)

Bilag 1 – Benchmark test af systemer hos Teknologisk Institut (WP7)

Testprocedure for performancetest af brændselscellesystem i forbindelse med Hylift_0

Der tages i testen af brændselscellesystemerne udgangspunkt i:

IEC 62282 – 3.2: performance

Formål:

Det er formålet at sammenligne et LT-PEM brændselscelle system med blysyrebatterier, med et HT-PEM brændselscelle system med Li-Ion batterier.

	System 1	System 2
Brændselscelletype	HT-PEM	LT-PEM
Brændselscelleleverandør	SerEnergy	Ballard
Rated brændselscelleeffekt	1000 W	2000 W
Batteritype	Li-Ion	Gel Blybatterier
BMS	Lithium Balance	Spændingsovervågning vha. Styresystem (H2Logic)

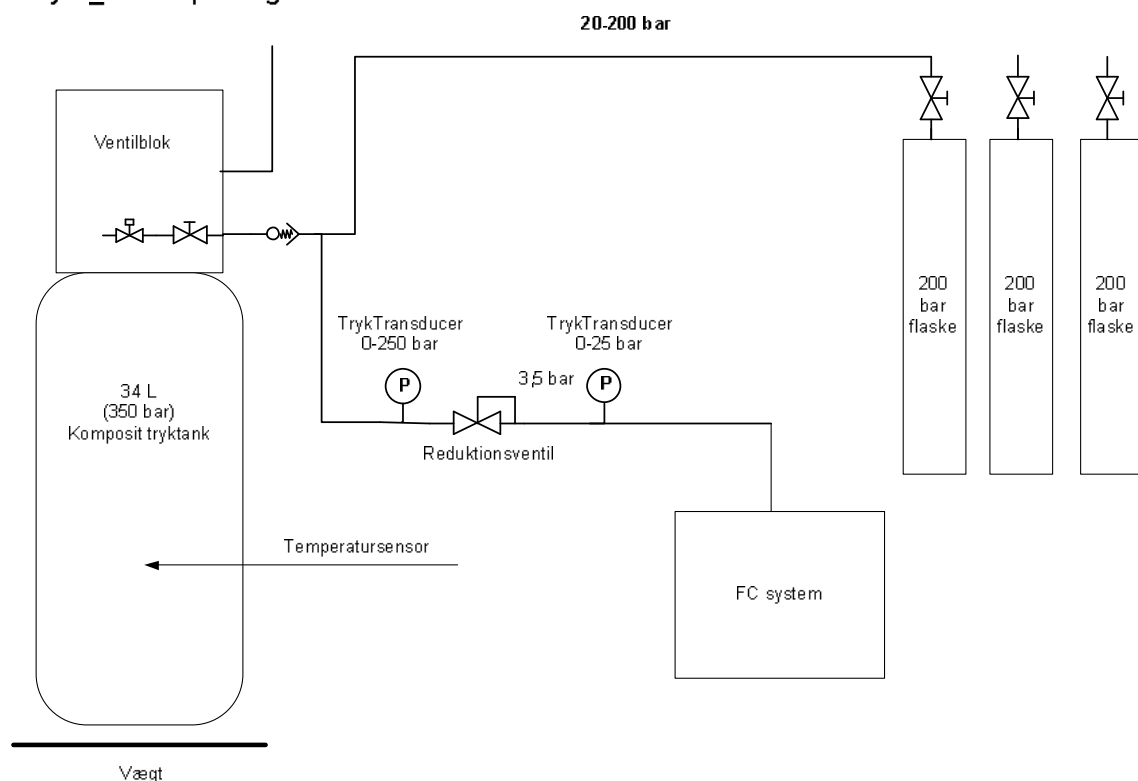
Overordnet specifikation af de to brændselscellesystemer der skal sammenlignes

Som det ses i tabellen er der meget forskel på de to brændselscellesystemer. System 1 har en større brændselscellestak og mindre batterier, mens System 2 har en mindre brændselscellestak og større batterier. Derudover er teknologierne også forskellige fra LT-PEM med blybatterier til HT-PEM med Li-Ion batterier.

Testopstilling:

For at teste systemerne laves der en opstilling, så hydrogenflowet kan bestemmes på 2 uafhængige metoder. Dels vha. en vægt under tryktanken samt vha. trykket og temperaturen i tryktanken.

Hylift_0 test opstilling



Opstilling til bestemmelse af hydrogen flow til brændselscellesystemet.

Forsøgsindstilling:

Ud fra IEC 62282 – 3.2: Performance ønskes følgende Steady State (SS) parametre. Det er muligvis ikke muligt at opnå alle punkter, afhængig af brændselscelle- systemets konfiguration.

Systemerne varmes op og sikres at de er stabile inden hvert forsøg startes. Hvert forsøg udføres i ca. 1 time for at få en tilstrækkelig nøjagtighed.

FC SS settings:

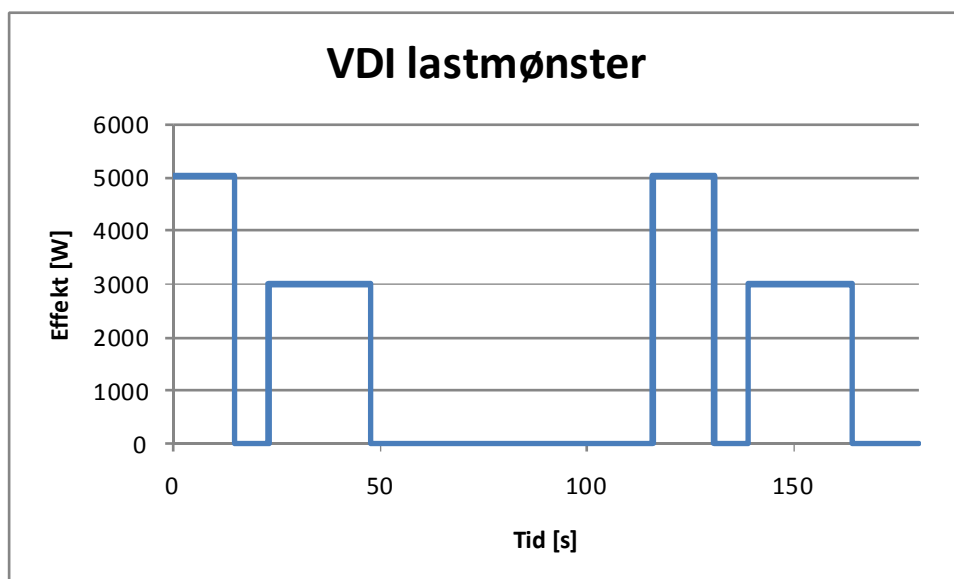
- a) SS rated power (eg. 100 %)
- b) SS midpoint (eg. $(100-25)/2 = 62,5$ %)
- c) SS minimum power (eg. 25 %)
- d) SS at maximum power (eg. 120 %)
- e) Transient conditions (opstartstid etc.)

VDI lastmønster

Derudover laves et forsøg med et VDI belastningsmønster optaget via den aktuelle Lifter. Der køres forsøg i 1 time, som specificeret i VDI testen, hvorefter batteripakken eventuelt lades op igen.

VDI lastmønstret findes ved at bestemme den elektriske effekt ved kørsel af en VDI cyklus for den aktuelle Lifter. Disse data kan derefter benyttes til indkodning af belastningsforløb til lastbankene, se **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet..** Lifteren har også et kort regenerativt forløb, som ikke medtages. Det vurderes dog at dette ikke har nogen større betydning for testen, idet det er i kort tid samt med en relativt lav effekt.

For at bestå VDI testen skal systemet kunne gennemføre cyklussen 20 gange (1 time i alt).



Forsimpleret VDI lastmønster ud fra målinger. Gentages 20 gange (1 time i alt).

Målepunkter:

Der opstilles et loggeprogram der logger parametrene i **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.** Der logges data hvert 5. sekund. Specielt er der fokus på vægtudslaget, temperatur og tryk i tryktanken samt strømme og spændinger i systemet, som efterfølgende skal benyttes til bestemmelse af makseffekter, virkningsgrader etc.

Kanal	Signal	Værdi 1	Værdi 2	Signal 1	Signal 2	Vsupply	Beskrivelse
1 M vægt	RS-232						Signal fra vægt
5 T liner	V						Type K [C]
6 P_H2_cylinder	mA	0	448	4	20	24 V	Tryktransducer, [bar(g)]
7 T_int.	mV					eg 5 V	Dynetek Temperatur sensor, $T=44,44*(5/V_{ref}*V_{out})-61,11$
8 T_omg	V						Type K [C]
9 T_batteri	V						Type K [C]
10 T_exhaust (midt)	V						Type K [C]
11 P_low	4-20 mA	0	10	4	20	24 V	Tryktransducer, [bar(g)]
Tid							Automatisk vha. loggesystem, [s]
12 T_exhaust 2 (side)	V						Type K [C]
15 Batteristrøm, I_batt	V	0	50	0	4	+/-V15	Strøm fra batteri, [A]
16 FC-strøm, I_FC	V	0	50	0	4	+/-V15	Strøm fra FC-Stack, [A]
17 Modulstrøm, I_modul	V	0	100	0	4	+/-V15	Samlet strøm fra modul, [A]
18 FC-Spænding, U_FC	V	0	60	0	10		Spænding på stack, [V]
19 Modulspænding, U_modul	V	0	30	0	10		Spænding fra modul, [V]

Specifikation af loggede værdier og kanaler

Beregnete parametre:

Ud fra forsøgsdataene beregnes følgende parametre

- FC electrical power
- Modul electrical power
- Brændstofforbrug
- Eleffektivitet for modul samt brændselscelle alene
- Stabile driftspunkter (eg. 100 %, 62,5 %, 25 % (minimum))
- VDI last-mønster (1 time ex. opvarmning)
- 1 skifts opgørelse (VDI last-mønster i 6 h incl. opvarmning, hvis mulig)
- 2 skifts opgørelse (VDI last-mønster i 12 h incl. opvarmning, hvis mulig)

En forklaring af de vigtigste parametre kan ses i tabellen nedenfor:

Parameter	Benævnelse	Beskrivelse
Modul electrical power	P_modul_FC	Elektrisk effekt der trækkes ud af det samlede modul (uden brug af batteri)
FC electrical power	P_FC	Elektrisk effekt direkte fra brændselscellestakken.
Balance of Plant forbrug	P_BOP	Tabt elektrisk effekt i BOP (i effektelektronik, til blæsere, styresystem etc.)
Brændstofforbrug	m_Hydrogen	Totalt forbrug af hydrogen til brændselscellesystemet.
Eleffektivitet af brændselscellestak	Eta_FC	Eleffektivitet af brændselscellestakken alene
Eleffektivitet for modul	Eta_Modul	Eleffektiviteten for det samlede modul (uden brug af batteri)
Teoretisk effektivitet af brændselscellestak	Eta_IV	Teoretisk eleffektivitet for FC, baseret på målt stakspænding

Purge Gas Consumption		Delvist teoretisk beregnet forbrug af Purge gas
Brændstofudnyttelsesgrad	My_f (H2 usage)	Andel hydrogen der udnyttes til elproduktion (teoretisk beregnet)
Elektrisk energiforbrug opvarmning		Elektrisk energi der skal til at varme FC systemet op til produktionstilstand
Opvarmningstid 1		Opvarmningstid fra omgivelsestemperatur til produktion
Opvarmningstid 2		Opvarmningstid fra omgivelsestemperatur til fuld produktion
Evt. Opvarmningstid 3		Opvarmning fra standbytemperatur til produktionstemperatur.
Evt. Opvarmningstid 4		Responstid til Rated Power ved produktionstemperatur
Nedlukningstid		Fra Rated Power til specificeret nedlukningsstadi

Forklaring til beregnede parametre. Alle virkningsgrader og den kemisk effekt er beregnet i forhold til hydrogens nedre brændværdi (LHV).

System 1: HT-PEM brændselscellesystem med Li-Ion batterier

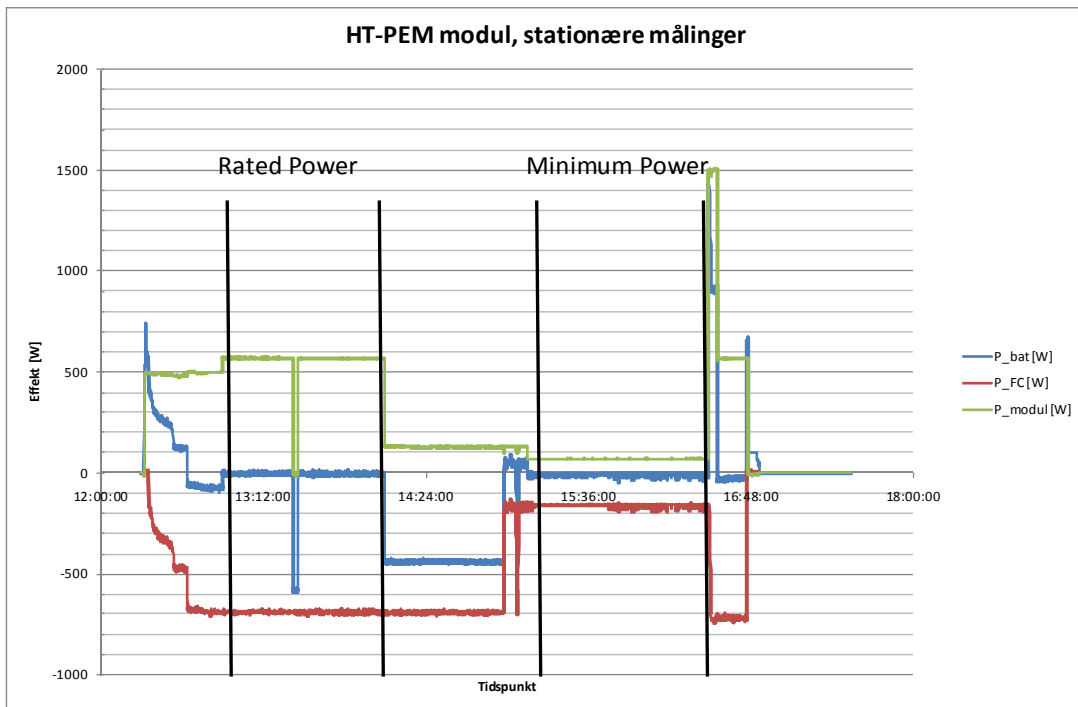
Stabile punkter

For HT-PEM brændselscellesystemet med Li-Ion batterier var det muligt at operere med brændselscellestakken i to operationspunkter, Rated og Minimum. Det er derfor disse to punkter der medtages her.

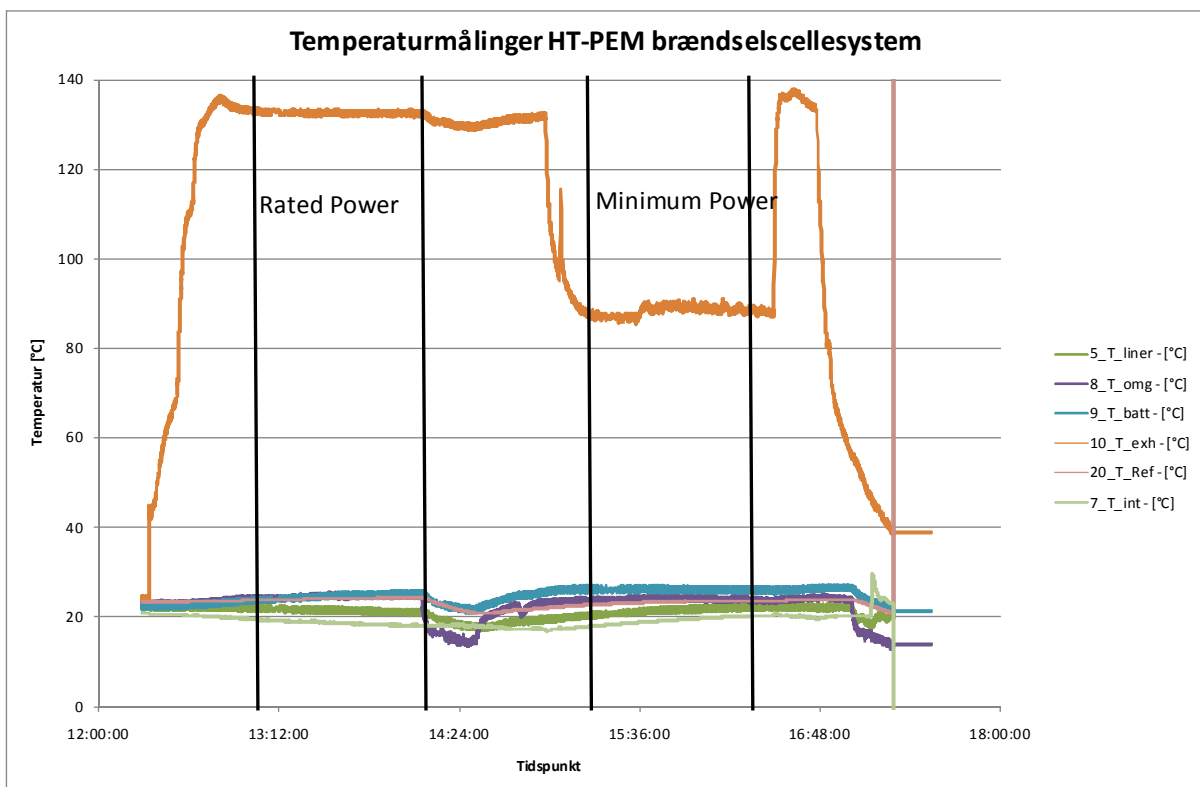
Rated Power

Rated Power		
P_Modul	565,0	W
P_FC	690,2	W
P_BOP	125,2	W
m_Hydrogen	82,9	g/h
eta_FC	25%	
eta_Modul	20%	
eta_IV	40%	
Purge Gas consumption	1020,9	W
my_f (H2 usage)	63%	

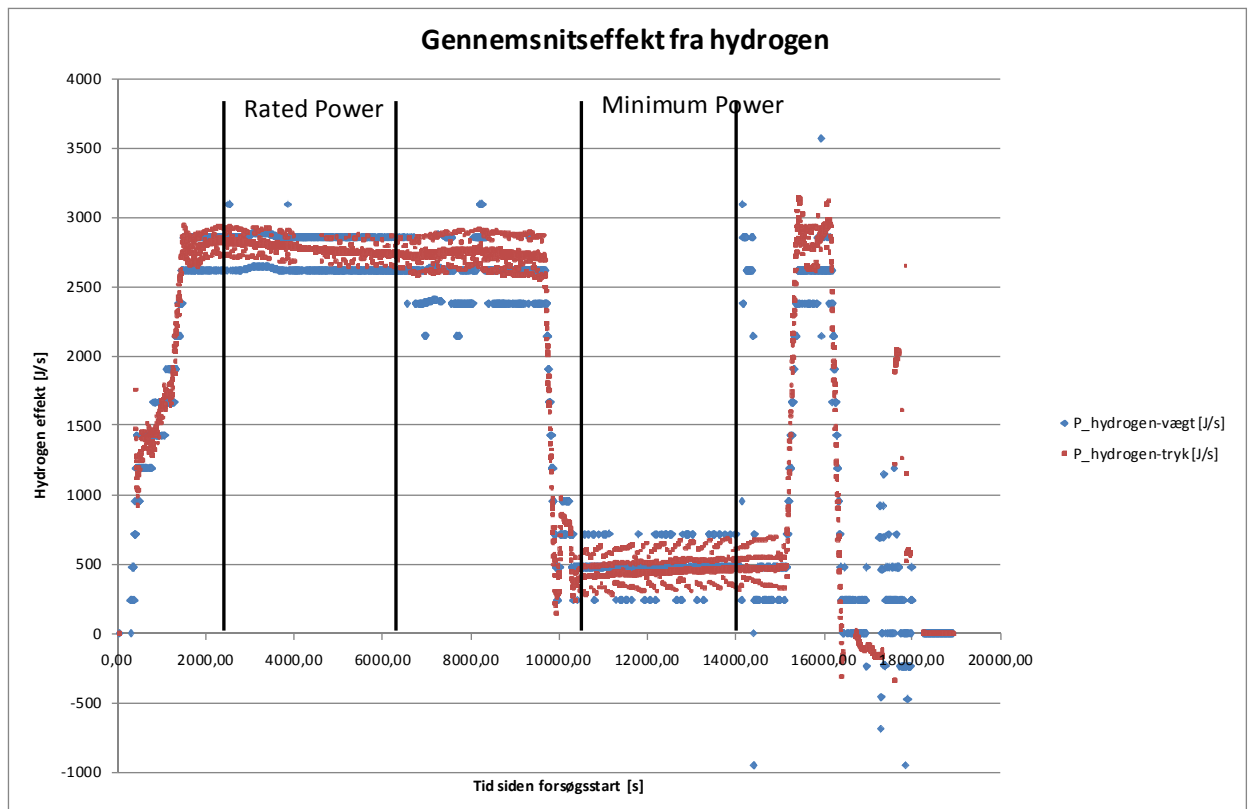
Efterfølgende vises nogle grafer fra forsøget med HT-PEM systemet. De stationære målinger ved hhv. Rated og Minimum Power er udtaget af dataene, hvor de er stabile. Se evt. markeringer på graferne. Tilsvarende databehandling er lavet for LT-PEM systemet, men medtages ikke her.



Effektoutput og produktion fra HT-PEM systemet, Stationære målinger

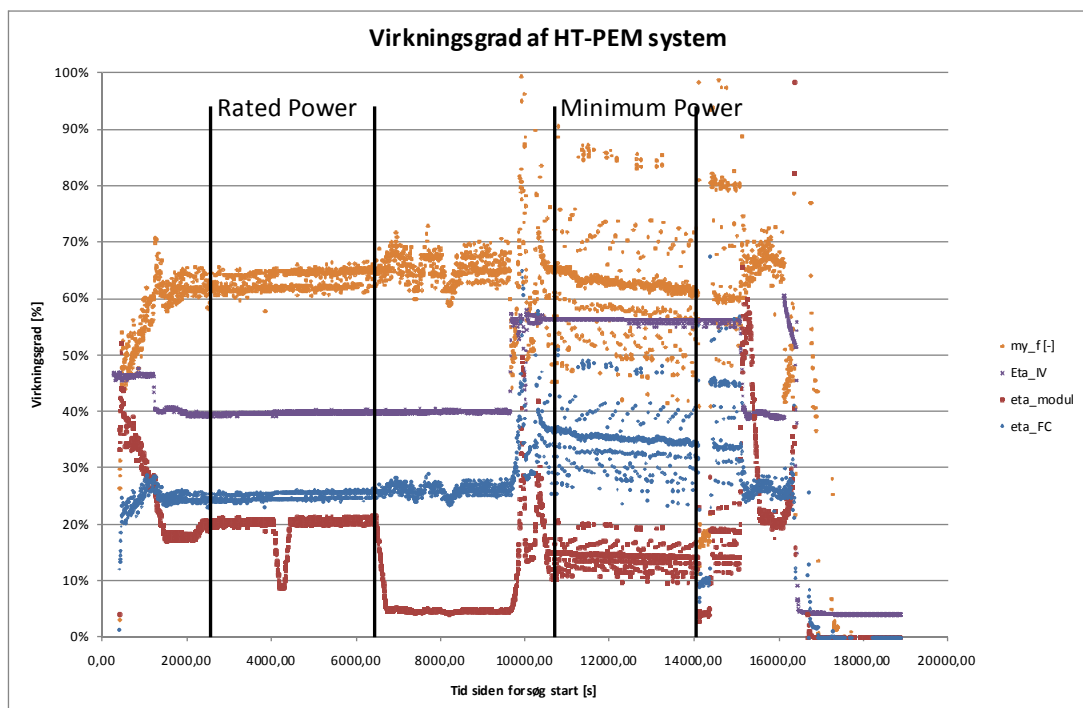


Temperaturmålinger ved stabile punkter ved HT-PEM systemet



Effekt tilført via hydrogen for HT-PEM system.

Det ses på figuren ovenfor at der er meget godt sammenfald mellem målingerne af hydrogenforbruget ved hhv. vægt samt tryk og temperatur.



Virkningsgrader af HT-PEM system ved de stationære målinger.

Virkningsgraderne af systemet kan ses på figuren ovenfor. Ved tallene i skemaerne er der midlet over intervallet, så måleusikkerheden bliver minimeret. Pga. det lavere hydrogenflow er usikkerheden større ved minimum belastning. Brændstofudnyttelsesgraden bliver beregnet på basis af Eta_IV og Eta_FC, så her bliver usikkerheden per måling stor. Ved den efterfølgende midling mellem værdierne bliver målingen meget mere nøjagtig.

Minimum belastning

Minimum Power		
P_Modul	66,8	W
P_FC	162,3	W
P_BOP	95,5	W
m_Hydrogen	14,1	g/h
eta_FC	35%	
eta_Modul	14%	
eta_IV	56%	
Purge Gas consumption	182,8	W
Gas usage	62%	

Opstartstid for brændselscelle

20 °C til fuld produktion	45	Minutter
20°C til produktionsstart	26	Minutter

Elektrisk Energi til opvarmning

Elektrisk energi til opvarmning ca: 70 Wh

Energiforbruget til opvarmning svarer til ca. 7 ½ minuts operation ved rated power.

Nedlukningstid

Nedlukningstid fra rated power til modulet er lukket helt ned: 5 minutter

VDI lastmønster

HT-PEM systemet kan præcis klare en VDI test på 1 time, når brændselscellesystemet er varmet op inden forsøget starter. Gennemsnitsforbruget ved VDI testen er højere end det maksimale brændselscellestakken kan producere, så det interne Li-Ion batteri aflades gradvist i løbet af testen. Det er altså ikke muligt at opnå en ligevægt, hvor der lades tilsvarende på batteriet som der fjernes i løbet af en givet tidsperiode. Det kan overvejes at udføre en tilsvarende test med et lavere gennemsnitsforbrug en anden gang, hvor systemet kan opnå ligevægt.

Kommentar

En stor del hydrogen bliver brugt til purge af brændselscellestakken. Der er altså mulighed for optimering af purgestrategien.

System 2: LT-PEM brændselscellesystem med Bly batterier

Stabile punkter

For LT-PEM brændselscellesystemet med blybatterier var det muligt at operere med brændselscellestakken i forskellige arbejds punkter. Der blev lavet stabile målinger ved hhv. Rated Power, Minimum Power samt ca. midt imellem disse (Midpoint Power).

Rated Power

Rated Power		
P_Modul_FC	1384,6	W
P_FC	1537,8	W
P_BOP	153,2	W
m_Hydrogen	108,0	g/h
eta_FC	43%	
eta_Modul	38%	
eta_IV	45%	
Purge Gas consumption	165,5	W
my_f (H2 usage)	96%	

Minimum belastning

Minimum Power		
P_Modul_FC	732,3	W
P_FC	834,0	W
P_BOP	101,7	W
m_Hydrogen	53,9	g/h
eta_FC	46%	
eta_Modul	41%	
eta_IV	51%	
Purge Gas consumption	153,1	W
Gas usage	92%	

Medium belastning

Midpoint Power		
P_Modul_FC	1019,4	W
P_FC	1137,0	W
P_BOP	117,6	W
m_Hydrogen	68,7	g/h
eta_FC	50%	
eta_Modul	45%	
eta_IV	49%	
Purge Gas consumption	-28,7	W
Gas usage	101%	

Forbrugsmålingerne og virkningsgrader ved Midpoint power har en vis usikkerhed, da der var nogle problemer med vægtmålingen.

Opstartstid for brændselscelle

20 °C til fuld produktion	3	Minutter
20°C til produktionsstart	1	Minutter

Elektrisk Energi til opvarmning

Elektrisk energi til opvarmning: 0 Wh

LT-PEM systemet starter produktionen hurtigt, og varmer sig selv op uden brug af elopvarmning.

Nedlukningstid

Nedlukning fra rated power til modulet er lukket helt ned: 7 minutter

VDI lastmønster

LT-PEM systemet kan præcis ikke klare en VDI test på 1 time. Der mangler ca. 1½ cyklus eller 5 minutter i at kunne fuldføre testen. Gennemsnitsforbruget ved VDI testen er højere end det brændselscellestakken maksimalt kan producere, så det interne blybatteri aflades gradvist i løbet af testen indtil lasten kobles fra pga. for lav spænding på batterierne. Det er altså ikke muligt at opnå en ligevægt, hvor der lades tilsvarende på batteriet som der fjernes i løbet af en givet tidsperiode. Det kan overvejes at udføre en tilsvarende test med et lavere gennemsnitsforbrug en anden gang, hvor systemet kan opnå ligevægt.