

Brintlagring på Samsø

Catarina Marcus-Møller (s011285)

Ørsted.DTU, Automation

Danmarks Tekniske Universitet

Bygning 326

2800 Kgs. Lyngby

Vejleder: Jan Jantzen (jj@oersted.dtu.dk)

Efterår 2005

Specialkursus – 5 point

ABSTRACT

I dette paper undersøges to teknologier til lagring af brint. Den ene er den kommercielle teknologi med tryksætning af brint og opbevaring i tryktanke, og den anden teknologi er de nye brintpiller, der er under udvikling. I tryktankene lagres ren brint (H_2) og energitætheden i den tryksatte brint er 3 MJ/L. Den brintmængde der kan produceres ud fra 1 kWh el kan sælges til 2,8 kr., 14 gange mere end prisen på den elektricitet, der skal bruges til produktionen. I brintpillerne lagres ammoniak og energitætheden i pillerne er 13 MJ/L. Den mængde ammoniak der kan produceres og lagres i pillerne, kan sælges til ca. 3 øre, det er lavere end den elomkostning, der er til produktionen. Sælges pillerne i stedet på den brintmængde, der er i ammoniakken, kan man sælge den brintmængde, der produceres og lagres i pillerne til 2,4 kr., 12 gange mere end el omkostningen. Det kan godt betale sig at producere og lagre brint med de to teknologier.

INDLEDNING

Samsø blev i 1997 udnævnt til Danmarks Vedvarende Energi Ø. Der er siden dengang blevet installeret blandt andet 11 landvindmøller på 1 MW og 10 havvindmøller på 2,2 MW per mølle. Vindmøllerne producerer nok elektricitet til, at Samsø er selvforsynende på årsbasis. Men da vindmøller kun producerer strøm, når det blæser, er Samsø ikke reelt set selvforsynende. Der eksporteres strøm fra Samsø når det blæser og importeres strøm, når det er vindstille.

Vindmøllernes produktion er så stor at der kan dækkes mere end Samsøs elforbrug, derfor er der stor interesse fra Samsøs side for at finde en udnyttelsesmulighed for elektriciteten for eksempel i transportsektoren. Hvis denne strøm, som på nuværende tidspunkt sælges i perioder med lav elpris, kan udnyttes på Samsø kan elektricitets-produktionen fra vindmøllerne gøres til et aktiv for Samsø i stedet for at ikke at komme Samsø til gode. Elektriciteten skal lagres, så den kan benyttes på et senere tidspunkt, enten på Samsø, i transportsektoren eller til elektricitetsproduktion, så man undgår at importere el, eller det kan sælges udenfor Samsø og give en pengestrøm øen.

I dette paper undersøges forskellige muligheder for at konvertere elektriciteten til brint og lagre brinten til senere brug eller eksport. Undersøgelserne er ikke kun gældende for Samsø, de er generelle for anlægene.

Dette paper er skrevet som specialprojekt om brintlagring på Samsø, ved vejleder Jan Jantzen Ørsted.DTU, projektet udgør 5 erts point. Specialprojektet er lavet i forbindelse med to andre specialprojekter om Vedvarende Energi på Samsø, der udgør henholdsvis 2 gang 15 og 2 gange 10 erts point. Projekterne hører ind under det Kongelige Energi Akademi på Samsø.

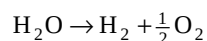
Jeg ønsker at takke Jan Jantzen, Ørsted.DTU, for grundig vejledning gennem hele projektet. Desuden vil jeg takke Rasmus Zink Sørensen, Amminex, for at svare på mine spørgsmål om brintpiller. Ole Bilde har været meget hjælpsom i forbindelse med litteratursøgning og skal derfor også have tak. I forbindelse med dette projekt og de to projekter det hænger sammen med afholdt Søren Hermansen og Jens Peter Nielsen fra SAVE Kontoret Samsø¹ en meget interessant rundvisning på Samsø til nogle af de vedvarendeenergianlæg, for det skal de have stor tak.

METODE

I dette paper undersøges to brintlagringsteknologier, den nye brintpille teknologi og den kendte og kommercielle teknologi med at lagre brint i trykflasker. På nuværende tidspunkt er den mest anvendte teknologi til produktion og lagring af brint, elektrolyseanlæg, der producerer brint (H₂), som lagres under tryk i metal tanke. Denne kendte teknologi sammenlignes med den nye brintpilleteknologi, der er blevet udviklet af et forskerteam på DTU. I det følgende beskrives og undersøges disse to former for brintlagring.

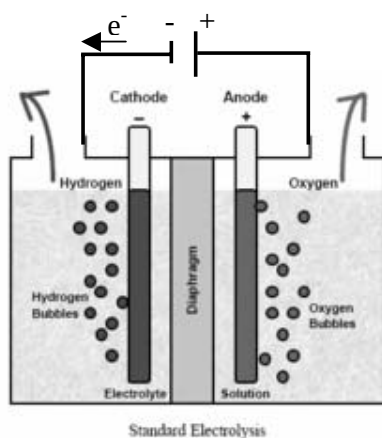
ELEKTROLYSEANLÆG OG TRYKTANKE

Elektrolyse er en proces hvor elektricitet spalter vand (H₂O) til brint (H₂) og ilt (O₂). Spaltningens processen ser ud som følger:



Her ses en skitsering af en forsimplet elektrolyseproces:

¹ <http://www.managenergy.net/actors/A3232.htm> (d. 15/12-2005)



Figur 1 Skitsering af elektrolyse af vand².

Elektrolyseprocessen foregår ved at en anode og en katode puttes i vand (H_2O), der sendes elektricitet gennem anoden og katoden. Ved anoden fjernes der elektroner, og der dannes gasformig ilt (O_2), ved katoden tilføres elektroner og der dannes gasformig brint (H_2). De to gasser bobler op af vandet og kan opsamles.

Der er på nuværende tidspunkt flere elektrolyseanlæg på markedet, blandt andre sælger Norsk Hydro Electrolysers A/S flere forskellige typer. Anlæggene har en størrelse på omkring 1 MW og en virkningsgrad på mellem 70 og 75 %. Levetiden for et anlæg er på minimum 15 år. Elektrolyseanlægget kan startes på 15 min og kan reguleres op og ned i produktion med en hastighed på 0,004 MW/sek³. Denne hurtige opstart og regulering gør elektrolyseanlæg meget brugbare til lagring af overløbsstrøm. Dog er der som med andre kemiske processer, et problem med elektrolyseanlægget, de høje virkningsgrader opnås ved kontinuert kørsel af anlægget og ikke hvis processen startes og stoppes og reguleres.

Efter produktionen i elektrolyse anlægget bliver brinten tryksat og lagret i tanke. Kompressionen af brinten koster ca. 5 % af brintens brændværdi og lagrings tabet i tryktankene er ca. 3 %.⁴ Samlet er der altså et tab på 8 % af brintens brændværdi ved kompression og lagring i tryktanke.

Da brint (H_2) er det mindste molekyle, der findes, har der været problemer med at lave tryktanke, der var tætte nok til at kunne indeholde brinten i længere perioder. Det er dog ikke problemet med de nuværende tanke, og der er ingen begrænsning på, hvor længe brinten kan opbevares i tryktankene.⁵

Tryktankene, der indeholder brint, kan transporteres, men normalt vil transport af brint ske i tankbiler, og brinten vil først komme i mindre tryktanke efter transporten. Brinten kan altså transporteres rundt på eller fra Samsø, så det kan udnyttes til mange forskellige formål enten på eller udenfor Samsø.

Salgsprisen på tryksat brint er på nuværende tidspunkt: 12 kr. per normal kubikmeter (Nm^3)⁶.

² Billedet er hentet fra: <http://www.greencarcongress.com/2004/11/> (d. 14/12-2005)

³ Hentet fra energistyrelsens hjemmeside:

http://www.ens.dk/graphics/Publikationer/Forsyning_UK/Technology_Data_for_Electricity_and_Heat_Generating_Plants/html/chapter26.htm (d. 14/12-2005)

⁴ Boldt og Münster, 2004, side 5.

⁵ Oplysninger fra mail fra Norsk Hydro.

⁶ Denne pris er oplyst af AirLiquid der levere tryksat brint til DTU.

PILLER OG DERES ANLÆG

Brintpiller er en lagringsteknologi, der er udviklet af fem forskere på DTU. De fem har startet firmaet Amminex⁷ som skal videreudvikle pillerne. Teknologien er meget ny, forskerteamet offentliggjorde deres fremskridt i en pressemeddelelse d. 7. september 2005.

Teknologien bygger på at lagre ammoniak (NH_3), der indeholder meget brint, i et salt som for eksempel magnesiumklorid. Flydende ammoniak hældes over magnesiumkloriden, der er formet som de ønskede piller, ammoniakken bindes i magnesiumkloriden i denne sammensætning: $\text{Mg}(\text{NH}_3)_6\text{Cl}_2$. Når ammoniakken er bundet i saltet, er pillerne klar til brug. Da ammoniak reagerer basisk, hvis det kommer i kontakt med vand, indpakkes pillerne fugttæt og er derefter meget stabile. Selv med hul i indpakningen vil der ikke ske en stor udledning af ammoniak, der vil allerhøjest lugte lidt af ammoniak.

For at frigive ammoniakken fra saltet igen skal pillerne opvarmes. Afdampningen af ammoniakken starter ved omkring 80 °C, og alt ammoniakken er ude af pillerne ved 350 °C⁸.

Offentliggørelsen af de første demonstrationer af teknologien var på små piller af saltet. Det er dog ikke hensigten med teknologien at pillerne skal have pillestørrelse, de skal kunne laves i større blokke. Blokkene kan teoretisk set laves så store som det er ønskværdigt, de er indtil videre lavet så store som ananasskiver, og størrelsen vil kunne tilpasses formålet for pillerne. Blokkene kan transporteres som andet gods i de lufttætte indpakninger, for eksempel i lastbiler eller skibe. Det er en fordel ved brintpillerne, at de er nemmere at transportere end tryksat brint, der skal transporteres i tankbiler eller i de tryksatte flasker.

Som pillerne har pilleproduktionsanlæggene også en meget høj sikkerhed, da der er meget små mængder fri ammoniak til stede, og der er ikke på noget tidspunkt i processen fri brint. Der er ingen teoretisk grænse for hvor store anlæggene kan bygges, men der er ikke nogen kommercielle anlæg endnu kun demonstrations anlæg. Anlæggenes levetid brude være som alle andre industrielle anlægs, dog er det ammoniak meget korroderende, og det er derfor nødvendigt at designe anlægget så de dele, der er i kontakt med ammoniakken, er lavet af et materiale, der kan holde til det. Sådanne materialer er kendt i landbruget, hvor ammoniak bruges som kunstgødning.

I forhold til Samsø er der det problem med pillerne, at ammoniak på nuværende tidspunkt ikke produceres ud fra elektricitet, fordi det produceres meget billigt ud fra naturgas. Dette kan ses på markedsprisen for ammoniak, der ligger på 350 \$/ton. Ammoniak kan produceres ud fra el, men det er endnu så dyrt i forhold til at producere det fra naturgas, at det ikke er kommercielt endnu. Som for pilleanlæggene er der kun lavet demonstrations anlæg, men der forskes i at videreudvikle processen. Da Samsø har en del landbrug kunne det være en mulighed at producere ammoniakken ud fra gylle. Det kan lade sig gøre at producere ammoniak af gylle, da urinstoffer let spaltes i vand og ammoniak, men det er et problem at skille ammoniakken fra resten af gyllen, og det er ikke en teknologi, der benyttes. Brintpillerne er altså ikke på nuværende tidspunkt en teknologi, der vil være velegnet til lagring af strømoeverløb, det bliver det først når ammoniak kan produceres fra elektricitet.

Pillerne kan anvendes både som drivkraft i transportmidler eller til elektricitetsproduktion i stationære anlæg. Det er en fordel for Samsø, da det giver et større marked for pillerne, hvis de skal sælges på eller udenfor Samsø, og det giver flere anvendelsesmuligheder på Samsø.

Pillerne er blevet foreslået som transportdrivmiddel, fordi deres energitæthed overstiger det amerikanske energiministeriums målsætninger⁹ for brintopbevaring til køretøjer.

	Målsætning 2005	Piller
Volumenenergitæthed	4,3 (MJ/L)	13 (MJ/L)

Dette forhold er en af grundene til at pillerne fik så megen omtale ved offentliggørelsen.

Amminex er ved at lave en demonstration af deres piller som transportbrændsel, der skal laves en elektrisk kørestol, der bruger pillerne som drivmiddel. Det er i denne kørestol, der skal bruges piller så store som ananasskiver. Derfor vil

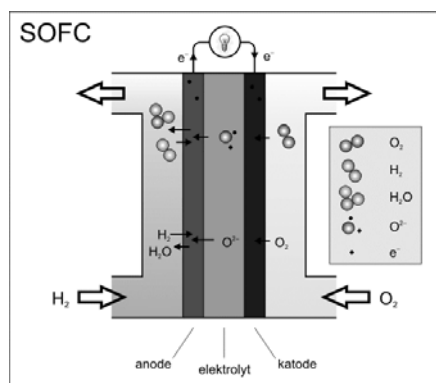
⁷ <http://www.amminex.com/> (d. 14/12-2005)

⁸ Christensen, Sørensen, Johannesen, Quaade, Honkala, Elmøe, Køhler og Nørskov, 2005, side 1.

⁹ Feidenhans'l, R. & Nørskov, 2004, side 18.

pillerne kunne bruges til at udvikle brintkøretøjer på Samsø. Der er stor interesse for brintkøretøjer på Samsø, som gerne vil have demonstrationskøretøjer på vejene hurtigst muligt¹⁰.

Pillerne kan også anvendes i stationære anlæg til at producere elektricitet i perioder med lav produktion og højt forbrug. Anlæggene kunne eksempelvis være brændselscelleanlæg. Da processen med at udtage ammoniakken fra pillerne kræver en temperatur på 620 K, vil det være en fordel at bruge en brændselscelletype, der har en høj driftstemperatur. Den brændselscelletype, Amminex mener, er den mest velegnede er SOFC (Solid Oxide Fuel Cells). Denne type brændselscelle har en driftstemperatur på mellem 500 °C og 1000 °C, temperaturen af brændselscellen passer godt til, at overskudsvarmen kan udnyttes til at udtage ammoniak fra pillerne. SOFC er en af de brændselscelletyper, der forskes i på Risø, og herunder ses en skematisk tegning af en SOFC-celle.



Figur 2 Skematisk tegning af en SOFC brændselscelle¹¹.

Som det ses på Figur 2 virker en SOFC-celle ved at ilten i atmosfærisk luft (O_2) omdannes til ilt-ioner (O^{2-}) i en anode. Ilt-ionerne transporteres gennem en iontransporterende membran til katoden hvor ilt-ionerne reagerer med brint (H_2) og danner vand (H_2O). Dannelsen af vandet udsender to frie elektroner (e^-), som er udnyttelig elektricitet, de to frie elektroner føres tilbage til anoden, gennem det system der skal forsynes, for i anoden kræver omdannelsen fra ilt til iltioner elektronerne.

Udover den passende driftstemperatur har SOFC-celler den fordel i forhold til pillerne, at de kan bruge ammoniak som brændsel direkte og ikke kun ren brint. Det vil sige, at det ikke er nødvendigt med extern reformering af ammoniakken til brint.

PRISER FOR ELEKTRICITETEN

Hvis der opføres et brintanlæg på Samsø, vil det ikke være muligt at få vindmøllestrømmen gratis. Elektriciteten, der produceres, sendes direkte fra vindmøllerne til et elselsskab, og hvis man ønsker at bruge elektriciteten, skal man betale elselsskabet for den. Derfor skal prisen brinten sælges til opvejes mod elprisen. I Danmark styres elprisen af af priserne på den Nordiske elbørs Nordpool, det gav i 2004 var gennemsnits elprisen 20 øre per kWh¹². Dette er elprisen uden afgifter, det er som normal elforbruger ikke muligt at købe elektricitet til denne pris, man hvis man kan kvalificeres som storforbruger kan handle til denne pris. I et tilfælde hvor man vil lagre strøm med et elektrolyse eller ammoniakanlæg vil man formentligt kunne betagnes som storforbruger. Samtidig er Nordpool prisen den pris vindmøllejerne vil kunne få for deres elektricitets produktion når fastpris-aftalen ophører. Derfor er det relevant at sammenligne denne pris, med det man kan få for at sælge en produceret brint mængde. Herunder findes en udregning, af hvad den brint der kan produceres af 1 kWh elektricitet med de to teknologier henholdsvis, kan sælges til.

Tryksat brint

Brint produktionen har den sammenhæng mellem elektricitetsforbruget og brintproduktionen.

¹⁰ Referat fra TEMA-møde om brint hos HIRC.

¹¹ Billedet og specifikationer for SOFC-celler er fundet på Risø's hjemmeside:

http://www.risoe.dk/afm/sofc/fuel/types_dk.htm#SOFC (d. 14/12-2005)

¹² Priser er hentet fra Eltras hjemmeside: <http://www.eltra.dk/show.asp?id=14844> (d. 29/11-2005)

Elforbrug	7,87 (GWh/år)
H ₂ produktion	5,32 (GWh/år)
H ₂ mængde	1.905.772 Nm ³ /år

Tabel 1 Sammenhæng mellem elforbrug og brintproduktion¹³.

Ud fra oplysningerne i Tabel 1 kan udregnes at der produceres:

$$\frac{5,32 \text{ GWh} - \text{br int}}{7,87 \text{ GWh} - \text{el}} = 0,656 \frac{\text{kWh} - \text{br int}}{\text{kWh} - \text{el}}$$

0,656 kWh brint for 1 kWh elektricitet. Samtidig kan den mængde brint der svarer til 0,656 kWh brint udregnes ud fra:

$$1 \text{ kWh brint} \equiv \frac{1905772 \text{ Nm}^3 - \text{br int}}{5,32 \cdot 10^6 \text{ kWh} - \text{br int}} = 0,358 \frac{\text{Nm}^3 - \text{br int}}{\text{kWh} - \text{br int}}$$

1 kWh brint svarer altså til 0,358 Nm³. Den brintmængde der produceres af 1 kWh elektricitet, er dermed:

$$\text{H}_2 - \text{mængde} = 0,358 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kWh}} \cdot 0,656 \text{ kWh} = 0,233 \text{ Nm}^3$$

Som det tidligere blev beskrevet er tabet til komprimering og lagring af brint sat til 8 % af brintens brændværdi. Der skal altså trækkes 8 % fra den producerede brintmængde, det giver en brintmængde på: 0,233 Nm³.

Denne brintmængde kan med en salgspris på 12 kr/Nm³-brint sælges til 2,80 kr. Når elprisen er sat til 20 øre/kWh, kan den brint der produceres sælges til 14 gange det elektriciteten kunne sælges til. Der er altså en rentabelt at producere, tryksætte og lagre brint i tryktanke.

Brintpiller

Da brintpille teknologien er så ny, er der endnu ingen der kender størrelsen af tabet ved lagringen, derfor er dette tab anslået til at være omkring 8 %, som det er for komprimering og lagringen af tryksat brint. Samtidig er processen at producere ammoniak ud fra elektricitet heller ikke en kommerciel teknologi, og virkningsgraden for processen er derfor heller ikke tilgængelig. Processen med at lave ammoniak fra el kan sammenlignes med elektrolyse processen, og derfor kan virkningsgrader for processerne også sammenlignes. Elektrolyseanlæg har på nuværende tidspunkt en virkningsgrad på 70 % - 75 %, da ammoniak processen ikke er kommerciel endnu og stadig mangler noget udvikling, sættes virkningsgraden i den lave ende af elektrolyseanlæggets. Virkningsgraden for ammoniak produktionen ud fra elektricitet sættes til ca. 70 %. Sammensættes disse to anslåede virkningsgrader, findes en samlet virkningsgrad for produktionen af ammoniak og lagring i pillerne på 60 %. Det mængde ammoniak, der kan produceres og lagres ud fra 1 kWh elektricitet, bliver:

$$1 \text{ kWh} \cdot 3,6 \frac{\text{MJ}}{\text{kWh}} \cdot 0,60 = 2,16 \text{ MJ}$$

2,16 MJ ammoniak på pilleform. Brint har et energiindhold på: 120 MJ/kg (Benzin 44 MJ/kg)¹⁴, og her regnes med at ammoniak har samme energiindhold som brint. Det giver:

$$\frac{2,16 \text{ MJ}}{120 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}} = 0,018 \text{ kg}$$

Ud fra 1 kWh kan der produceres 0,018 kg ammoniak, salgsprisen for ammoniak er på nu værende tidspunkt 350 \$/ton, det giver en salgspris for ammoniakken lavet af 1 kWh elektricitet på:

¹³ Tallene er hentet fra energistyrelsens hjemmeside: http://www.ens.dk/graphics/Publikationer/Forsyning_UK/Technology_Data_for_Electricity_and_Heat_Generating_Plants/html/chapter26.htm (d. 14/12-2005)

¹⁴ Feidenhans'l, R. & Nørskov, 2004, side 17.

$$\frac{0,018\text{kg}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{ton}}} \cdot 350 \frac{\text{\$}}{\text{ton}} = 0,0063\text{\$}$$

Det svarer til ca. 3 øre for den ammoniak der kan produceres ud fra 1 kWh. Hvis man betaler 20 øre/kWh for elektriciteten, er det ikke rentabelt at omdanne elektriciteten til ammoniak.

Hvis man skal producere ammoniak og brintpiller, skal brintpillerne ikke sælges som ammoniakken de indeholder, det er ammoniak for billigt til. Pillerne skal sælges som brintpiller, og vil blive købt til anlæg, der kun kan bruge pillerne. Det er ikke til at sige hvad prisen på brintpillerne vil være i fremtiden, når der er et marked for dem, men den vil formentlig ligge højere end ammoniakprisen. Herunder er det undersøgt, om det kunne betale sig at lagre ammoniakken i pillerne, hvis man solgte brinten i ammoniakken og ikke ammoniakken selv.

I normalkubikmeter er den mængde brint, der er i pillerne:

$$\frac{18\text{g}}{0,0000899 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} \cdot 10^{-6} \frac{\text{Nm}^3}{\text{cm}^3} = 0,202\text{Nm}^3$$

Da brints densitet er $0,0000899 \text{ g/cm}^3$ ved 25°C og 1 atm tryk.¹⁵

Hvis den brint mængde, der er i pillerne, sælges til 12 kr/Nm^3 , giver det en pris på 2,4 kr.

Hvis man kan sælge pillerne på baggrund af brinten i pillerne og ikke ammoniakken, kan man sælge den brintmængde der produceres fra 1 kWh el til 2,4 kr. Med en elpris på 20 øre/kWh, kan man sælge brinten for 12 gange det man kan sælge elektriciteten for. Det vil altså kunne betale sig at lagre ammoniak i pillerne hvis man kan sælge brinten i pillerne og ikke ammoniakken.

Pillerne skal altså have nogle andre fordele så deres salgspris er højere end salgsprisen for ammoniak. Der skal skabes et marked for brintpillerne, før det kan betale sig at lave elektricitet om til ammoniakken, der skal flydes i dem.

I de to teknologier er det tilfældet at man kan sælge brinten for henholdsvis 12 og 14 gange så meget som den elektricitet der skal bruges til produktionen koster. Men priserne på el og brint kan ændre sig, og det vil formentlig ske ved at elprisen stiger og brintprisen falder, hvilket vil gøre overskuddet for brintsalget mindre. Hvis man ser bort fra alle andre omkostninger i brint produktionen, og antager at brintprisen holder sig på de 12 kr./Nm^3 , må en 1 kWh el højest koste, det man kan sælge brinten til, det vil sige, 2,8 kr. hvis der laves tryksat brint, og 2,4 kr. hvis der laves brintpiller. Hvis det derimod er elprisen, der holder sig konstant, og brintprisen der falder, er minimumsprisen for brinten, hvis denne er tryksat:

$$\frac{20 \frac{\text{øre}}{\text{kWh,el}}}{0,235 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kWh,el}}} = 79,1 \frac{\text{øre}}{\text{Nm}^3}$$

Hvis den er i brintpiller:

$$\frac{20 \frac{\text{øre}}{\text{kWh,el}}}{0,202 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kWh,el}}} = 99,0 \frac{\text{øre}}{\text{Nm}^3}$$

Minimumsprisen på brint er altså 80 øre/Nm^3 . Hvis brinten er i brintpiller er minimumsprisen 1 kr./Nm^3 , denne pris behøver ikke være brints markedspris men det skal være pillernes markedspris. Hvis der bliver skabt et marked for brintpiller, skal markedsprisen for den brint der lagres i pillerne være mere end 1 kr./Nm^3 .

¹⁵ <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/pertab/h.html> (d. 14/12-2005)

I de ovenstående beregninger er enten brintprisen eller elprisen konstant, det er mere realistisk at de vil ændre sig samtidig. Men selv med en højere elpris, over de 20 øre/kWh men under 2,4 kr/kWh, og en lavere brintpris mellem de 12 kr. og ca. 1 kr. per Nm³. kan det betale sig at lagre brinten i enten piller eller under tryk.

RESULTATER OG DISKUSSION

Herunder ses en sammenligning af de karakteristika der er beskrevet om de to teknologier og de resultater der er fundet for dem i de tidligere afsnit af dette paper:

	Trykflasker	Brintpiller
Brint lagres som	Brint	Ammoniak
Kapacitet	ca. 3 MJ/L	13 MJ/L
Tryk	20-350	Ikke tryksat
Produktion før lager	Elektrolyse anlæg	?
Pris på indpakning	Høj	Lav
Salgspris	Brint 12 kr/Nm ³	Ammoniak 350 \$/ton
Sikkerhed	Høj	Meget stabile
Transportabel	Ja i tankbiler eller i de tunge tryktanke	Ja i almindelige lastbiler eller skibe
Eksisterende teknologi	Ja	Nej
Salgspris for det der kan produceres og lagres for 1 kWh el	2,8 kr.	0,03 kr. (ammoniak) 2,4 kr. (brint)
Max. elpris med brintpris på 12 kr./Nm ³	2,8 kr.	2,4 kr.
Min. brintpris med elpris på 20 øre/kWh	79 øre/Nm ³	99 øre/Nm ³

Tabel 2 Sammenligning af tryktanke og brintpiller.

I tryktankene lagres brint (H₂), og med denne teknologi kan den mængde brint, der kan produceres og lagres ud fra 1 kWh el, sælges til 2,8 kr., hvilket er 14 gange mere end den elpris, der regnes med i projektet. Det kan derfor godt betale sig at producere og tryksætte brint. Teknologien med at lagre brint under tryk er en kendt og kommerciel teknologi, det er både muligt at købe produktionsanlæg og færdigt tryksat brint. Det at brinten er tryksat kan give nogle problemer med transport og opbevaring af brinten, blandt andet skal transport udføres i tankbiler eller i biler der er godkendt til at transportere tryktanke.

I brintpillerne lagres ammoniak (NH₃), der ved opvarmning omdannes til brint. Den mængde ammoniak, der kan produceres og lagres af 1 kWh el med denne teknologi, kan med dagens ammoniak priser sælges for ca. 3 øre, hvilket er mindre end den el pris, der regnes med. Ammoniak er for billigt til, at det kan betale sig at producere det ud fra strøm og lagre det i brintpillerne. Sælger man i stedet den brintmængde, der er i ammoniakken i pillerne, kan det sælges for 2,4 kr./Nm³, hvilket er 12 gange højere end elomkostningen. Det kan altså også betale sig at lagre brint i pillerne. Brintpille teknologien er ikke en kommerciel teknologi endnu, men det er teoretisk muligt at lave både pillerne og anlæggene så store som det er ønskværdigt. Pillerne er ikke tryksatte, og er derfor nemme at transportere, hvilket kan ske i almindelige lastbiler.

I fremtiden vil brintpillerne kunne være en konkurrence dygtig teknologi hvis der skabes et marked for dem, og de har nogle fordele i forhold til tryksat brint. Pillerne er ikke under tryk, hvilket gør det nemmere at omgås og pillerne har en højere energitæthed, end den der findes i tryksat brint i dag.

Under beregningerne lavet en række antagelser, der vil blive diskuteret i det følgende.

I beregningerne for brintpillerne regnes der med, at man sælger pillernes kapacitet, der medregnes ikke den energi og dermed omkostning, der vil være i forbindelse med at få ammoniakken ud af pillerne, eller den energi der vil gå til at reformere ammoniakken til brint. Det vil gøre den salgbare mængde brint eller ammoniak en smule mindre, og dermed økonomien for brintpillerne en smule dårligere. Men da energien der vil gå til at udtage ammoniakken fra pillerne og reformere brinten, i nogle anlæg vil være spildvarme er omkostningen i disse tilfælde ikke væsentlige.

Elprisen på 20 øre/kWh bygger på en antagelse om at et brintlagrings anlæg kan fritages fra afgifter ved købe af elektricitet. Denne antagelse bygger på, at man som storforbruger af el kan få hel eller delvis afgiftsfritagelse, og der har været tale om, at ved lagring af overløbsstrøm kan elforbruget afgiftsfritages. Det er dog ikke sikkert at brintlagringsanlæg kan afgiftsfratages fuldstændigt, men som det er vist i beregningerne ovenfor er det også rentabelt at producere og lagre brint til en langt højere elpris end de 20 øre/kWh, og så hvis brintprisen bliver lavere end 12 kr./Nm³.

De 12 kr./Nm³ er opgivet fra AirLiquid, der leverer tryksat brint til DTU. Denne brintpris er forholdsvis høj, og det er ikke sikkert, at brintpris vil forblive på dette niveau. Men som det ses i beregningerne ovenfor, kan brintlagringsteknologierne også betale sig med lavere brintpriser.

I beregningerne for begge teknologier er der kun regnet på den eludgift, der vil være til produktionen og lagringen af brint. Dette er en meget forsimplet udregning, og der vil være mange andre udgifter tilknyttet brintlagring. Udgifter som anlægsomkostninger, driftsomkostninger og udgifter til emballage. Alle disse udgifter vil fordyre processen og gøre brintlagring mindre rentabelt end det ser ud i de udførte beregninger.

Da der endnu ikke er bygget et brintpilleanlæg eller et anlæg til produktion af ammoniak ud fra elektricitet, er det ikke muligt at finde virkningsgrader for disse typer af anlæg. Virkningsgraderne er derfor anslået ud fra virkningsgrader for lignende anlæg. Ammoniakproduktionsanlægget er sammenlignet med et elektrolyseanlæg og der er valgt en virkningsgrad på ca. 70 %. Tabet i pilleanlægget er sammenlignet med tabet ved tryksætning og lagring af brint i tryktanke, den sættes til ca. 8 %. Hvis virkningsgraden for det reelle anlæg bliver lavere eller tabet i pilleanlægget højere end det er antaget vil rentabiliteten for brintpilleteknologien falde. Men da der ikke findes nogle virkningsgrader for anlæggene er det ikke muligt at vurdere om antagelserne i dette paper er fejlagtige.

KONKLUSION

Hvis der på nuværende tidspunkt skulle anlægges et brintlagringsanlæg til lagring af overskudsstrøm, ville den kommercielle teknologi med tryktanke, være den mest interessante af de to teknologier, da brintpille teknologien ikke er kommerciel endnu. Hvis et sådant anlæg skal installeres skal den opbygges et elektrolyseanlæg og i forbindelse dermed et tryksætnings og tankfyldningsanlæg. Anlæggene kræver ikke døgnbemanding, men skal tilses jævnlige.

Hvis der ikke skal bygges store anlæg til kommerciel brintlagring, men derimod mindre demonstrationsanlæg, ville et pilleanlæg være mere interessant, da det er en teknologi under udvikling. Det kunne være interessant at se demonstrationsanlæg af både et brintpilleanlæg og af et anlæg der producerer ammoniak ud fra elektricitet. Det er projekter som disse der kunne være spændende for Samsø kommende Energi Akademi.

Før det kan betale sig at investere i fuldskala brintpilleanlæg, skal de to teknologier til lagring af ammoniak i pillerne og produktion af ammoniak ud fra elektricitet, undersøges nærmere. Derudover er det nødvendigt, at der udvikles produkter, der bruger pillerne som drivmiddel, så der skabes et marked for afsætning af brintpillerne.

I fremtidige projekter:

Teknologien omkring produktion af ammoniak ud fra elektricitet bør undersøges nærmere så det kan klargøres hvornår der vil kunne laves demonstrationsanlæg eller egentlige produktionsanlæg.

Da Samsø har meget landbrug kunne det være meget interessant at undersøge mulighederne for at producere ammoniak ud fra gylle. Hvis dette er muligt vil pilleanlægget ikke kun kunne bruges til at lagre strømløb, men også til at gøre det muligt at sælge gylle, i stedet for at sprede det ud på marken.

Der skal laves en egentlig økonomisk analyse for opstillingen af brintlagringsanlæggene hvori aspekter som anlægspriser og driftsomkostninger medtages.

REFERENCER

Boldt, J. og Münster, M.: "Scenarier for samlet udnyttelse af brint som energibærer i Danmarks fremtidige energisystem". RUC, april 2001. "Et kommenteret sammendrag, set gennem el-systems briller", april 2004.

Christensen, C. H., Sørensen, R. Z., Johannesen, T., Quaade, U. J., Honkala, K., Elmøe, T. D., Køhler, R. og Nørskov, J. K.: "Metal ammine complexes for hydrogen storage", *Journal of Materials Chemistry*, 2005, 15, 4106-4108.

Feidenhans'l, R. & Nørskov, J. K.: "Brintforskning i Danmark – udfordringer og perspektiver", 2004.

Hartmann-Petersen, P.: *Håndbog i Kemiske fragmenter*, 1. udgave, Gyldendal, 2004.

Referat fra TEMA-møde om brint hos HIRC i Herning 20. september 2005, internt arbejdsblad.