

# Et nyt energisystem baseret på hydrogen

Opbevaring af hydrogen på en effektiv, kompakt og sikker måde er måske den forskningsmæssigt største udfordring på vejen mod et nyt energisystem baseret på vedvarende energi og hydrogen som energibærer

Af Bitten Møller, Lene Mosegaard, Line E. Thomsen, Erik L. Hansen, Maja Olesen, Ronni Burkarl, Jens Erik Jørgensen, Bo B. Iversen, Flemming Besenbacher, Torben R. Jensen, Interdisciplinært Nanoscience Center (iNANO), Kemisk og Fysisk Institut, Aarhus Universitet

I løbet af de seneste år er interessen for udvikling af et nyt »energisystem«, baseret på vedvarende energi og hydrogen som energibærer, vokset voldsomt. Det skyldes politiske interesser, idet man gerne vil være mere uafhængig af de få (ustabile) olieproducerende lande samt svindende reserver af lettilgængelig råolie. Det skyldes også miljøhensyn, idet man gerne vil mindske den menneskeskabte produktion af drivhusgassen CO<sub>2</sub>. Der er dog et meget alvorligt problem: Vedvarende energi er ikke konstant i tid. Solenergi er ikke tilgængelig om natten, og vindenergi kan kun udnyttes, når det blæser. En effektiv energiopbevaring er derfor nødvendig, og det er her hydrogen kommer ind i billedet. Ideen er, at fremstille hydrogen fra ved-

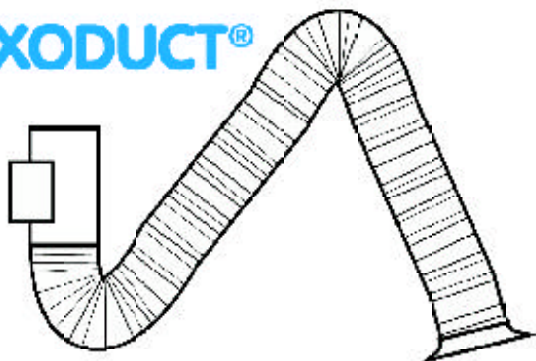
varende energi, som så kan udnyttes til opvarmning af huse, som brændstof i biler osv. Denne ide er skabt af en dansker, Poul la Cour, der producerede hydrogen fra vindenergi allerede i 1895 på Askov Højskole [1].

I denne artikel vil vi beskrive hydrogensamfundets akilleshæl, nemlig hvordan hydrogen kan opbevares på en kompakt, sikker og økonomisk rentabel måde. Desuden vil vi kort fortælle om hydrogenproduktion og -udnyttelse [2-4].

## Produktion af H<sub>2</sub>

Hydrogen findes ikke som frit grundstof i naturen. Det forekommer kun i kemiske forbindelser, f.eks. H<sub>2</sub>O. Til gengæld er ►

**FLEXODUCT®**



### FLEXODUCT Sugearme

Kildefilter  
LAF indblæsning i operationsstuer  
Laboratorievejledning  
Sugeskærme  
Ventilatorer  
Stinkskæbsstyringer  
Flow og trykvagte  
Filterhuse - safeXchange  
Stålrørvarmeblader  
Rustfri arbejde  
Specielle ventilations opgaver..

### Renrum til produktion og forskning ..

Forsknings laboratorier  
Farmaceutisk industri  
Kemisk industri  
Fødevare industri  
Medicinal emballage  
Elektronik-semiconductors  
Hospital og sundhedssektoren

Total levering af renrum -  
en nøglefærdig løsning -  
fra ide til validering - vi har  
viden og produkterne til at opfylde  
Deres krav til højeste kvalitet....

**Jrv**

A/S

Nimbusvej 10  
DK-2670 Greve

TEL 43 950 950  
FAX 43 950 951

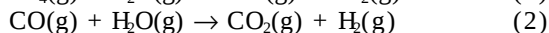
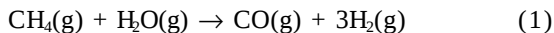
sales@jrv.dk

www.jrv.dk

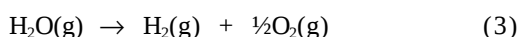


hydrogen det hyppigst forekommende grundstof i universet og antalsmæssigt det tredje almindeligste på jordens overflade, 15.4 mol%. Vægtmæssigt er det det niende almindeligste, hvor det udgør 0.9 vægt%.

Hydrogen skal fremstilles og betegnes derfor ofte som en *energibærer*. I øjeblikket er det billigst og mest effektivt at spalte naturgas med vanddamp til hydrogen og kuldioxid ved dampreformering:



Denne metode kan give de mængder hydrogen, der er nødvendige for at få den nye teknologi startet. Men metoden er ikke miljøneutral, da der udvikles lige så meget CO<sub>2</sub> som ved afbrænding af naturgassen. På længere sigt er det målet at gøre hydrogenproduktionen helt CO<sub>2</sub>-neutral, f.eks. ved spaltning af vand ved elektrolyse eller fotokemisk:



Skal hydrogen opfattes som en miljøvenlig energibærer, kræver det, at elektriciteten produceres fra vedvarende primære energikilder, f.eks. sol-, vind- eller vandenergi. Elektrolyse har en energieffektivitet på ca. 70% og kunne udnytte overskuds-elproduktion fra vindmøller.

## Hvorfor hydrogen?

Hydrogen er det letteste grundstof i det periodiske system og har derfor et meget fordelagtigt energiindhold pr. masse, 120 MJ/kg (til sammenligning har benzin masseenergitætheden, 43,9 MJ/kg). Hydrogen er en gas ved stuetemperatur med lavt koge- og smeltepunkt og skal nedkøles til -252°C for at bringes på væskeform. Derfor er hydrogen også meget vanskelig at opbevare på en kompakt måde. Det er faktisk det eneste alvorlige minus ved anvendelsen af hydrogen som energikilde. Det rumfangsmæssige energiindhold er lavt - kun 8,5 MJ/L for flydende hydrogen og 3,0 MJ/L for hydrogengas ved et tryk på 300 bar (til sammenligning er benzins 32.0 MJ/L, se tabel 1).

| Navn                                            | Hydrogen       | Naturgas        | Benzin                            |
|-------------------------------------------------|----------------|-----------------|-----------------------------------|
| kemisk formel                                   | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | 'C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> ' |
| sundhedsfare                                    | ugiftig        | ugiftig         | skadelig                          |
| densitet (g/L)                                  | 70.8           | 425             | 729                               |
| smeltepunkt (°C)                                | -259.3         | -182.5          | -                                 |
| kogepunkt (°C)                                  | -252.8         | -161.3          | 50-153                            |
| masseenergitæthed (MJ/kg)                       | 120.0          | 50.1            | 43.9                              |
| volumenergitæthed * (MJ/L)                      | 8.5            | 21.3            | 32.0                              |
| CO <sub>2</sub> -produktion kg pr. kg brændstof | 0              | 2.74            | 3.19                              |
| g pr. MJ                                        | 0              | 55              | 73                                |

\* I flydende tilstand

Tabel 1. Kemiske og fysiske egenskaber for nogle energibærere [5].

Transportsektoren er en særlig udfordring, og behovet er stort. I Danmark udgør energiforbruget her ca. 18% af det totale energiforbrug og i USA ca. 60%. Et mobilt hydrogenlager til transportsektoren (f.eks. i en bil) skal opfylde følgende krav: (i) høj energitæthed, både på vægt- og volumenbasis, (ii) hurtig fyldning og tømning (hensigtsmæssig kinetik),

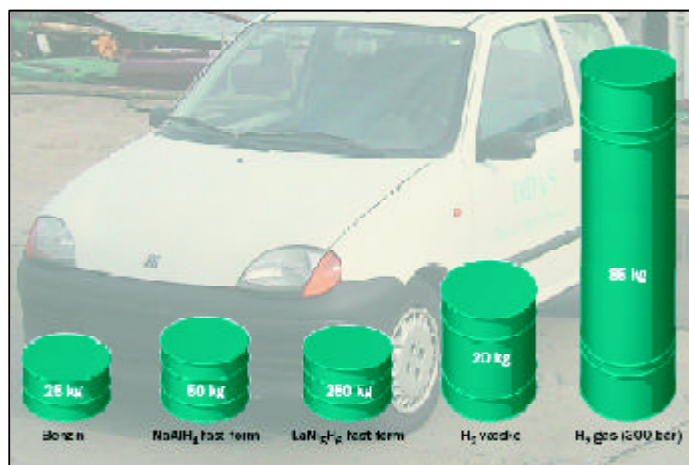
- (iii) lav driftstemperatur og -tryk samt reaktionsvarme (hensigtsmæssig termodynamik),
- (iv) stabilitet ved mange gentagne fyldninger og tømninger,
- (v) høj sikkerhed ved normal brug,
- (vi) lav risiko i uheldssituationer. Desuden skal det være billigt [4].

Det kan også udtrykkes som målsætningen fra det amerikanske energiministerium, tabel 2.

| Målsætning                                    | 2005 | 2010 | 2015 |
|-----------------------------------------------|------|------|------|
| Masseenergitæthed (MJ/kg)                     | 5.4  | 7.2  | 10.8 |
| Hydrogenindhold (vægt%)                       | 4.5  | 6.0  | 9.0  |
| Volumenergitæthed (MJ/L)                      | 4.3  | 5.4  | 9.72 |
| Volumenergitæthed (g H <sub>2</sub> /L)       | 36   | 45   | 81   |
| Pris (\$/kg)                                  | 9    | 6    | 3    |
| Antal anvendelser <sup>a</sup>                | 500  | 1000 | 1500 |
| Hydrogenflowhastighed (g/s)                   | 3    | 4    | 5    |
| Hydrogentryk ved afgivelse (bar)              | 2.5  | 2.5  | 2.5  |
| Responstid (s)                                | 0.5  | 0.5  | 0.5  |
| Optankningshastighed (kg H <sub>2</sub> /min) | 0.5  | 1.5  | 2.0  |

(a) antal gentagne absorptions- og desorptionscykler.

Tabel 2. Det amerikanske energiministeriums (DOE) målsætning for mobil hydrogenopbevaring [6].



Figur 1. Regneeksempel for en mindre bil, der kører 16 km/L benzin og en strækning på 400 km. Benzinforbruget er ca. 25 L, hvilket svarer til 6.6 kg hydrogen i en forbrændingsmotor med en virkningsgrad på ca. 15%. Hvis bilen i stedet var udstyret med en brændselscelle, der elektrokemisk omdanner hydrogen og oxygen til vand, med en virkningsgrad på 30-40%, så var det kun nødvendigt med ca. 3.3 kg hydrogen.

Der er, afhængigt af det valgte hydrogenlager, stor forskel på, hvor meget denne mængde hydrogen fylder og vejer. Benzin er en særdeles effektiv energibærer, hvorimod hydrogengas fylder for meget, og metalhydrid ofte vejer for meget. Komplekse metalhydrid, f.eks. NaAlH<sub>4</sub>, har potentiale som fast H<sub>2</sub>-lager [7].

## Hydrogen på gas- eller væskeform

Den første tanke, der falder én ind, er nok at kondensere hydrogen til væskeform ved nedkøling. Problemet er, at væsken skal opbevares i en åben beholder, dvs. den fordamper, og derfor skal man helst dreje tændingsnøglen og køre, lige når man har tanket. Det kunne være en mulighed ved f.eks. bybuskørsel, men med vore dages teknologi er det stadigvæk ret dyrt at kondensere hydrogengas til væske.

Ståltryktanke kan opbevare hydrogen som en gas, ved f.eks. 300 bar. Jo højere tryk, jo større skal godstykkelsen være, og jo tungere bliver beholderen. Derfor ligger det maksimale hydrogenindhold i tryktanke på ca. 4 vægt%. Man arbejder dog på at

udvikle nye kompositmaterialer til trykbeholdere, der måske kommer op på 6-7 vægt%  $H_2$ .

## Opbevaring af hydrogen på fast form

Der er to principper for hydrogenopbevaring på fast form kaldet *kemi-* og *fysisorption*. Ved førstnævnte reagerer et stof med hydrogenatomer,  $H$ , og der dannes en kemisk binding og et hydrid. Et andet princip for hydrogenopbevaring er fysisorption, hvor hydrogenmolekyler,  $H_2$ , adsorberes i et porøst stof.

Tabel 3 illustrerer de store perspektiver i udnyttelse af hydrogenopbevaring på fast form. Bemærk det høje vægtmæssige hydrogenindhold for hydrider af lette metaller og i særdeleshed det høje volumenmæssige indhold - faktisk indeholder de fleste hydrider mere hydrogen end ren  $H_2(l)$ , nogle mere end det dobbelte ( $\rho(H_2) = 71 \text{ g/L}$ ).

## Metalhydrider

Metallerne i første og anden hovedgruppe i det periodiske system danner ved reaktion med hydrogen saltagtige, ioniske hydrid. Hydriderne  $LiH$ ,  $MgH_2$  og  $BeH_2$  har dog bindinger af betydelig kovalent karakter.

|                                | $r_m(\text{vægt\%})$ | $H_2\text{-indhold}$<br>$r_v(\text{g/L})$ | $p(H_2)(\text{bar})$ | (1) |
|--------------------------------|----------------------|-------------------------------------------|----------------------|-----|
| <b>Trykflaske</b>              | 4.6<br>ca. 6         | 25<br>58                                  | 300<br>700           |     |
| <b>Batteri</b>                 | 0.05                 | 1.5                                       |                      | (2) |
| <b>Kemisorption</b>            |                      |                                           |                      |     |
| <b>Metalhydrider</b>           |                      |                                           | $T(^{\circ}C)$       | (3) |
| $MgH_2$                        | 7.6                  | 110                                       | 280                  |     |
| $LaNi_5H_6$                    | 1.4                  | 121                                       | ca.50                |     |
| $TiFeH_2$                      | 1.9                  | 107                                       | ca.50                |     |
| <b>Komplekse metalhydrider</b> |                      |                                           |                      |     |
| $LiBH_4$                       | 18.5                 | 121                                       | 380                  |     |
| $NaBH_4$                       | 10.7                 | 114                                       | 400                  |     |
| $LiAlH_4$                      | 10.6                 | 87                                        | >125                 |     |
| $NaAlH_4$                      | 7.5                  | 94                                        | 210                  |     |
| $Mg_2FeH_6$                    | 5.5                  | 150                                       | 320                  |     |
| <b>Fysisorption</b>            |                      |                                           |                      |     |
| MOF-5                          | 4.5                  | 27                                        | -195°C/20 bar        |     |
| Carbon-nanorør                 | >2                   | -                                         | -195°C/20 bar        |     |

(1) Hydrogenstryk i gasflaske (700 bar er en målsætning).

(2) Duracell MX1500 AA.

(3) Temperatur for  $H_2$ -afgivelse ved  $p(H_2) = 1 \text{ bar}$ , uden brug af katalysator.

Tabel 3. Forskellige metoder til opbevaring af hydrogen. Det vægt- og volumenmæssige hydrogenindhold (hhv.  $r_m$  og  $r_v$ ) er angivet samt temperatur eller tryk for hydrogenafgivelse.

Overgangsmetaller som V, Nb og Ta danner ofte interstitielle hydrider med variabel sammensætning, hvor hydrogenatomerne er lokaliseret i huller i metalgitteret. Generelt kan binære hydrider ikke bruges til hydrogenlagring, da afgivelsen af hydrogen kræver relativt høj temperatur.

Siden oliekriserne i 70'erne har man fremstillet nye legeringer til hydrogenopbevaring på fast form, og det er blevet til mere end 2000 legeringer, der kan reagere med hydrogen og danne et hydrid. På nær en håndfuld har de alle den ulempe, at de danner for stærke bindinger til hydrogen. De skal opvarmes



## CFR 21 Part 11-dokumentation...

**Ecolog TH1** er en kimalogger, der er velegnet til mikrobiologiske og medicinske opgaver.



- Temperatur: -35 til 110°C
- Fugt: 0 - 100 % rH
- Hukommelse: 64.000 målinger
- Direkte print af måleværdier og alarmdata.
- Software imødekommer CFR 21 Part 11
- Godkendt til EXX zone 1

METRIC

EUPRO

Metric Industrial A/S • Tlf.: 43 71 64 44 • e-mail: metric@metric.dk

DFM



DANSK  
FUNDAMENTAL  
METROLOGI

Matematiktorvet 307, 2800 Lyngby - Tlf. 4593 1144



## Elektrolytisk ledningsevne

DFM tilbyder:

**certificerede opløsninger**  
med kendt ledningsevne fra  
**10 mS/m (100  $\mu\text{S/cm}$ ),**

sporbare til DFM's internationale  
anerkendte primærnormal, og  
akkrediteret af DANAK.

**Kan anvendes til opfyldelse af  
US og EU Farmakopé krav.**

DFM tilbyder endvidere:

**Karakterisering af opløsninger**  
i området 15 °C – 40 °C,  
0,1 mS/m – 25 S/m

**Kursus på DFM eller i  
virksomheden**

"Best Practice" inden for vore  
kompetencer.

Usikkerhed i henhold til GUM ved  
brug af software produktet  
DFM-GUM<sup>®</sup>



## Ledningsevne CRM

Standardværdier:

1 S/m (10 000  $\mu\text{S/cm}$ )  
0,1 S/m (1 000  $\mu\text{S/cm}$ )  
10 mS/m (100  $\mu\text{S/cm}$ )

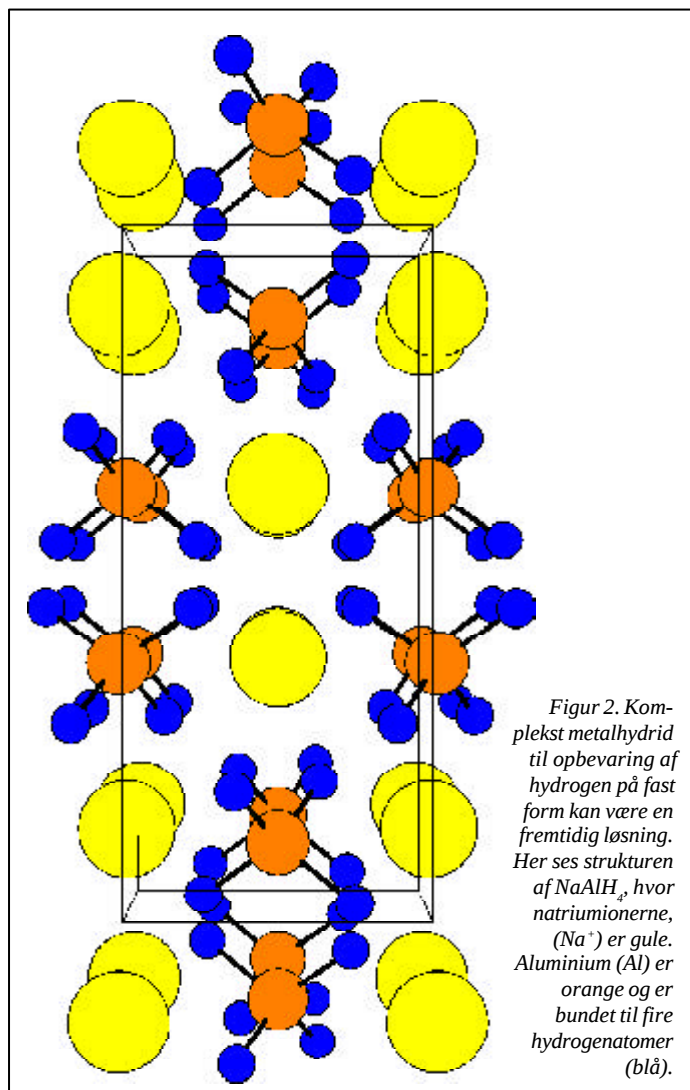
Andre værdier efter aftale.

Kontakt:

Bestilling og information: CRM@dfm.dtu.dk

til for høj temperatur, før de igen afgiver hydrogen, ofte over 400°C. Tabel 3 viser, at det er lykkedes at fremstille legeringer, der afgiver hydrogen ved ret lav temperatur (dvs.  $T < 100^\circ\text{C}$ ). De har dog den fejl, at de er opbygget af for tunge grundstoffer, så hydrogenindholdet pr. masseenhed er for lavt, se f.eks. lant-hannikkel- ( $\text{LaNi}_5\text{H}_6$ ) og titanjern- ( $\text{TiFeH}_2$ ) legeringerne i tabel 3. Der har især været fokus på fremstilling af legeringer med magnesium, der er billigt, ugiftigt og findes i rigelige mængder. Der er dog flere problemer ved brug af hydridet,  $\text{MgH}_2$ . Det er for stabilt og afgiver kun langsomt hydrogen ved  $T > 280^\circ\text{C}$ . Dvs. der skal fjernes/tilføres for meget varme til  $\text{H}_2$ -lageret, når det fyldes/tømmes ( $\Delta H \gg -75 \text{ kJ/mol}$ ). Man har undersøgt en lang række Mg-baserede legeringer, der i nogle tilfælde afgiver hydrogen ved lavere temperatur (dvs. har bedre termodynamik).

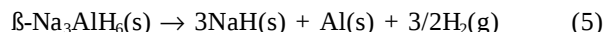
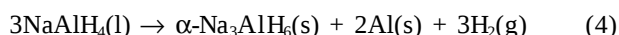
Afgivelseshastigheden (kinetikken) er også langsom og kan forøges ved at knuse hydridet til nanopartikler, hvorved diffusionsvejen for H-atomer i  $\text{MgH}_2/\text{Mg}$  formindskes. Man kan også tilsætte en katalysator, f.eks. nanopartikler af et overgangsmetal, Ti, Fe eller Ni, eller et oxid, f.eks.  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ .



## Komplekse metalhydrider

Inden for de sidste fem år har der været stor opmærksomhed omkring komplekse metalhydrider, f.eks.  $\text{NaAlH}_4$ , der dannes af nogle få overgangsmetaller og tredje hoved-gruppe (B, Al, Ga). Det nye er, at optagelse og afgivelse af hydrogen kan katalyseres til at forløbe ved en moderat temperatur. Denne gruppe af metalhydrider består ofte af lette metaller og har derfor både høj volumen- og masse-energitæthed.

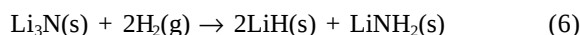
Ikke kun strukturen er »kompleks«, men også reaktionen for hydrogenoptagelse og -afgivelse, eksemplificeret for  $\text{NaAlH}_4$ , der smelter ved,  $T = 185^\circ\text{C}$ :



Reaktion 4 illustrerer, at der ofte dannes et oktaederisk koordineret metalhydrid som intermediet under hydrogen-afgivelse. Her sker det ved  $T = 230^\circ\text{C}$  under frigivelse af 3.7 vægt%  $\text{H}_2$ . Det komplekse hydrid omdannes fra kubisk ( $\alpha$ -) til monoklint  $\beta\text{-Na}_3\text{AlH}_6$  ved  $T = 252^\circ\text{C}$ . Reaktion 4 og 5 er reversible og giver teoretisk ca. 5.5 vægt%  $\text{H}_2$  (i praksis ca. 4.5 vægt%  $\text{H}_2$ ) ved 120-180°C, hvis stoffet er katalyseret af f.eks. Ti-nanopartikler. Nogle metalhydrider afgiver hydrogen ved tilpas lav temperatur, selv uden anvendelse af en katalysator. Det har også været muligt at modificere dannelsesent-halpien ved kationssubstitution. Derfor er denne klasse af materialer meget lovende i jagten på en mulig kandidat til et mobilt hydrogenlager.

## Nitrider af lette metaller

Lithiumnitrid kan reagere med hydrogen under dannelse af imid,  $\text{Li}_2\text{NH}$ , og amid,  $\text{LiNH}_2$ :



Hvis amidet opvarmes, afgives der ammoniak, og systemet kan ikke optage hydrogen igen. Det kan en 1:1-blanding af  $\text{LiH}/\text{LiNH}_2$  derimod, idet ammoniak afgivet fra amidet momentant reagerer med hydrid under dannelse af imid [8].



Blandinger af amider og hydrider af calcium, magnesium og lithium er også foreslået som muligt hydrogenlager.

## Carbon-nanorør

De første undersøgelser af hydrogen fysisorption i carbon-nanorør viste et stort indhold af  $\text{H}_2$  på helt op til 67 vægt%. Disse resultater har dog aldrig kunnet eftervises af andre [9]. Der synes nu at være nogen enighed om at  $\text{H}_2$ -kapaciteten for nanorør med et lag carbon som væg er ca. 2 vægt% ved  $-196^\circ\text{C}$  svarende til adsorption af et monolag hydrogen. Der adsorberes mindre end 0.2 vægt% ved ca.  $20^\circ\text{C}$  [10].

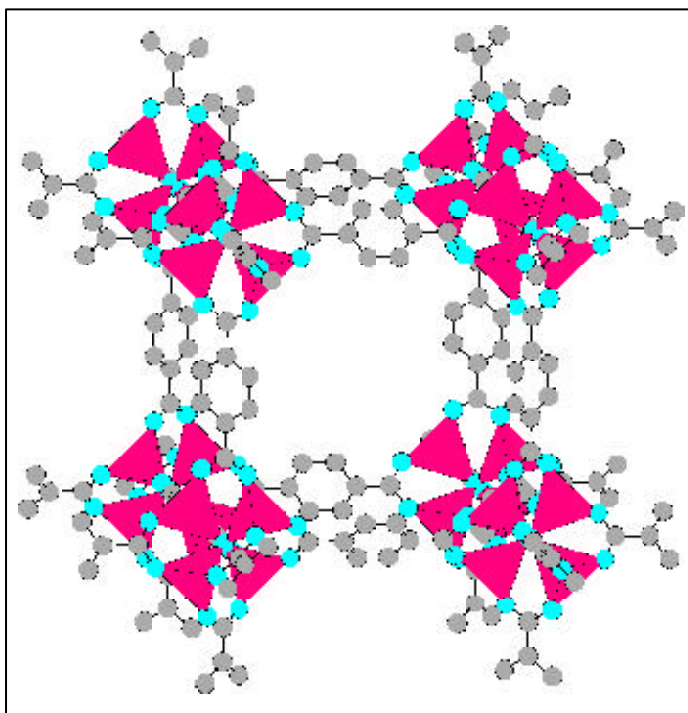
## Molekylære organiske netværk - MOF

Metal-organiske netværksforbindelser (MOF) har ofte en me-

AAS · ICP/MS  
UV-VIS · LC/MS  
GC/MS · FT-IR/NIR

Ny GC-MS?  
- Så er det også os!

**Thermo**  
FISHER SCIENTIFIC CORPORATION  
48 16 62 00 · Gydevang 17-19 · 3450 Allerød



Figur 3. Organisk/uorganisk netværksforbindelse, kaldet MOF-5, med en meget åben struktur [11]. Zink er placeret i centrum af de røde tetraeder og er bundet til 4 iltatomer (lyseblå), der sidder i hjørnerne. Tetraederne er bundet sammen til tetramere og holdes sammen af benzendicarboxylsyre (BDC-linkere). Carbonatomerne er grå.

get åben struktur med store 3D-hulrum. Et typisk eksempel på en MOF-forbindelse er vist på figur 3.

MOF er fremstillet i mange varianter [12] og har generelt en ekstremt lav densitet pga. den åbne struktur ( $\rho(\text{MOF-5}) = 0.59 \text{ g/mL}$ ). I strukturen af MOF-5 udgøres ca. 25% af volumen af atomer. De resterende ca. 75% er pore og hulrum, der er tilgængelige for gasadsorptionen, selektiv katalyse og andre anvendelser. Neutronspredning viser, at MOF-5 har positioner for hydrogenadsorption ved Zn-tetramere og de organiske linkere. Et hydrogenoptag på 4.5 vægt% ved  $-195^\circ\text{C}$  og 1 vægt% ved  $20^\circ\text{C}$  (og  $p(\text{H}_2) = 20 \text{ bar}$ ) er målt for MOF-5 [13].

Det kan tænkes, at optagelsen af hydrogen kan forbedres ved at lave nye forbindelser med andre organiske linkere og metalatomer. En række faktorer har indflydelse på gasadsorption såsom poreform og -størrelse. Desuden har det indre overfladeareal stor betydning. Overfladearealet er meget stort for MOF-forbindelser, f.eks. har MOF-5  $2500\text{--}3000 \text{ m}^2/\text{g}$ .

### Hydrater

Hydrogen-isblandinger har også været nævnt til opbevaring af hydrogen ved fysisorption, f.eks. klatrasilhydratet  $\text{H}_2(\text{H}_2\text{O})_2$ . Det lyder jo som en billig og miljøvenlig løsning, men den er desværre ikke særlig energieffektiv i øjeblikket, da disse forbindelser fremstilles ved et tryk på  $2\text{--}3000 \text{ bar}$  og ved ca.  $-30^\circ\text{C}$ . Ved yderligere nedkøling,  $T < -196^\circ\text{C}$  eksisterer stoffet også ved  $p(\text{H}_2) = 1 \text{ bar}$  og har et fornuftigt hydrogenindhold på op til 5 vægt%. Tilsættes lidt THF kan strukturen stabiliseres på bekostning af  $\text{H}_2$ -indholdet, men syntesetrykket kan reduceres til ca.  $120 \text{ bar}$  [14, 15].



15. - 17. november 2005

## Besøg PharmaTech – Skandinavien's første specialmesse for procesudstyr til farmaceutisk industri

Maskiner & Procesudstyr · Emballager & Emballeringsudstyr · Ingredienser & Additiver · Sporbarhed · FoodTech

### INTERNATIONAL FAGMESSE FOR FOOD- OG PHARMATEKNOLOGI

#### Nyheder til farmaprocesing

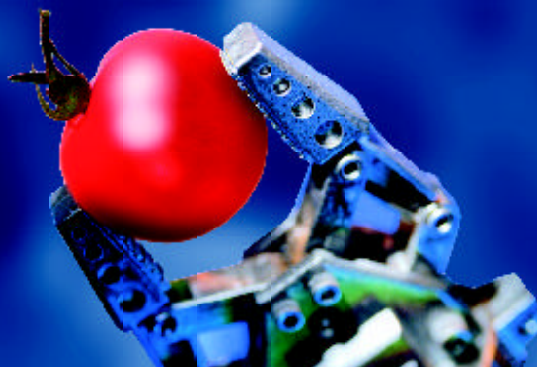
- ▲ Nyheder fra 350 udstillere
- ▲ Nordeuropas største fagmesse for pharma og food processing
- ▲ International conference om GMP
- ▲ International conference om Lean Manufacturing
- ▲ FoodTech Innovation Award
- ▲ Scanstar Award

#### ÅBNINGSTIDER

- ▲ 15. – 17. november 2005
- ▲ Dagligt kl. 9.00 – 17.00

Spar DKK 75,-

Bestil dit personlige adgangskort på  
[www.foodtech.dk](http://www.foodtech.dk) og spar entréen



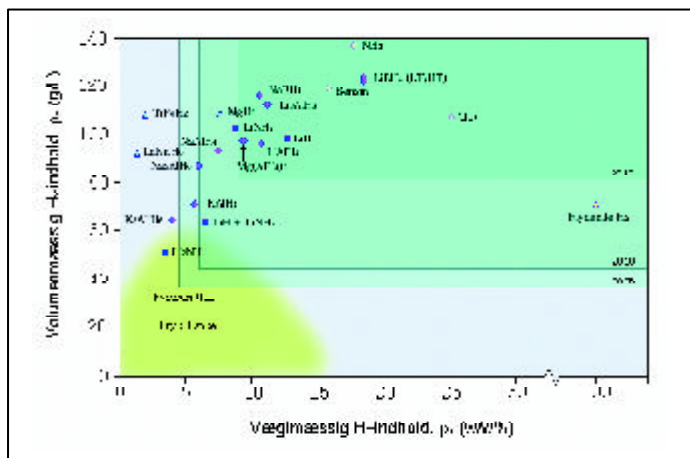
MESSECENTERHERNING



## Udnyttelse af hydrogen i brændselsceller

Forbrændingsmotoren, som vi kender fra en bil, er ret ueffektiv, fordi den kemiske energi i benzin først omdannes til varme og derefter til mekanisk energi (bevægelse af bilen). Det store varmetab gør, at effektiviteten kun er ca. 10-20%. Kraftværker til elproduktion virker efter samme princip ved forbrænding af kul og olie med en effektivitet på op til 50%. Kraftvarmeværker udnytter også varmen, der frigives ved forbrændingen, og effektiviteten når op til ca. 88%. Mobile anvendelser er altid mindre energieffektive end stationære.

En brændselscelle virker efter samme princip som et almindeligt batteri, ved at en kemisk reaktion adskilles i to delreaktioner: en reduktions- og en oxidationsproces, der forløber i hver sin beholder. I modsætning til batteriet er der en konstant tilførsel af reaktanter, f.eks. hydrogen og oxygen, i brændselscellen. I dette tilfælde udvikler brændselscellen strøm, varme og vanddamp som eneste udstødningsgas, og den regnes derfor for en miljøvenlig teknologi [16].



Figur 4. Hydrogen-lagerkapacitet for en række forskellige forbindelser sammenlignet med målsætningen (tabel 2). Det volumenmæssige hydrogenindhold ( $r_V$ ) i masse af hydrogen pr. rumfang stoffer angivet som funktion af det vægtmæssige hydrogenindhold ( $r_M$ ) i vægtprocent hydrogenindhold.

## Nye perspektiver for $H_2$ -opbevaring

Selv med brændselscelleteknologien er et højt hydrogen-/energiindhold i brændstoftanken nødvendigt - vel at mærke både målt på volumen og vægtbasis. Figur 4 viser energiindholdet i fossile brændsler som benzin og naturgas sammenlignet med hydrogen opbevaret på forskellig vis. Tabel 2 viser, at der er nogle faste stoffer, f.eks.  $LiBH_4$ , der indeholder mere energi end benzin. Figuren viser også, at man skal kigge efter nye forbindelser opbygget af lette atomer for at opfylde kravene til et mobilt hydrogenlager. Fysisorption af hydrogen ( $H_2$ ) i porøse materialer ligger i øjeblikket i samme område som opbevaring i tryktanke. Men fysisorption er stadig ikke undersøgt særligt grundigt, og mange af de porøse forbindelser har lav densitet.

Vi har beskrevet to principper for hydrogenopbevaring, der begge har gode egenskaber, men også svagheder. Der tegner sig i øjeblikket et billede af, at fysisorption er en lidt for svag vekselvirkning. Materialet skal ofte nedkøles og være under tryk for at opretholde et rimeligt hydrogenindhold. Det er ikke overraskende, da van der Waals vekselvirkning er svag, 1-20 kJ/mol. Kemisorption derimod er ofte for stærk en vekselvirkning (typisk bindingsenergi  $\sim 200$  kJ/mol), og der skal tilføres meget varme for at frigive hydrogen igen. Figur 4 viser også, at hydrogen i øjeblikket ikke pakkes så tæt ved fysisorption som ved binding i et hydrid.

Ved iNANO, Aarhus Universitet, har vi startet et nyt forskningsområde, hvor vi studerer fysiske og kemiske

egenskaber samt nye syntese- og katalysemetoder for bl.a. komplekse metalhydrid, metalnitrider og nanoporøse forbindelser som MOF. Disse materialer regnes i øjeblikket for de mest lovende hydrogenopbevaringsmaterialer, der kan realisere en bæredygtig hydrogenøkonomi. Men man har endnu ikke fundet et enkelt stof, der opfylder alle krav til mobil opbevaring. Man forestiller sig, at nanovidenskaben kan udnyttes til at designe nye materialer - måske en helt ny klasse af stoffer, der kombinerer de omtalte måder at binde hydrogen i et fast stof.

## Konklusion

De ideer til et nyt energisystem, der er beskrevet her, kan blive virkelighed, før vi forventer det. I dag har man udviklet velfungerende brændselsceller, der dog stadig er ret dyre at producere. Man kan som nævnt opbevare hydrogen i metalhydrid, som dog stadig har et lavt vægtmæssigt hydrogenindhold. Men disse teknologier er allerede effektive nok til at udkonkurrere f.eks. køretøjer drevet af et blybatteri. Den såkaldte H2 Truck udviklet af H2 Logic og A. Flensburg, Herning Maskinfabrik har dobbelt så lang driftstid og meget kortere »energi-påfyldningstid« end et tilsvarende blybatterikøretøj [17].

Det er naturligvis vanskeligt at konkurrere med benzin, som er et effektivt energilager, der hverken fylder eller vejer meget. Man skal dog huske, at for hver forbrændt liter benzin udvikles der 2.3 kg  $CO_2$ , svarende til 1.3 m<sup>3</sup>  $CO_2$ -gas. Endvidere er der knaphed og stigende priser på fossilt brændsel. Derfor kan andre energisystemer med flere tabsgivende led (f.eks. hydrogenproduktion), højere pris, men lavere miljøpåvirkning måske snart blive nødvendige og på længere sigt konkurrencedygtige.

E-mail-adresse

Torben R. Jensen: trj@chem.au.dk

## Referencer

1. Povl-Otto Nissen: Poul la Cour og vindmøllerne. Polyteknisk Forlag, 2003.
2. T. R. Jensen, *Aktuel Naturvidenskab*, 2004, **1**, 13.
3. I. Chorkendorff, *Kvant*, 2004, **1**, 4-13.
4. Brintforskning i Danmark - udfordringer og perspektiver, Hvidbog om forskningsstrategi for brintbaseret energiforsyning i Danmark. Red.: Jens K. Nørskov og Robert Feidenhans'l. ([http://www.ens.dk/graphics/ENS\\_Forskningogudvikl/Brintstrategi/Hvidbog\\_final.pdf](http://www.ens.dk/graphics/ENS_Forskningogudvikl/Brintstrategi/Hvidbog_final.pdf))
5. [www.bp.com](http://www.bp.com)
6. U. S. Department of Energy (DOE), <http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/hydrogen/storage.html>.
7. Figuren er gengivet fra ref. 2 og brændselscelle bilen er udviklet af IRD Fuel Cells A/S ([www.ird.dk](http://www.ird.dk)).
8. P. Chen, Z. Xiong, J. Luo, J. Lin, K. L. Tan, *Nature*, 2002, **420**, 302.
9. M. Hirscher og M. Becher, *J. Nanosci. Nanotech.* 2003, **3**, 3.
10. A. Züttel, *Naturwissenschaften*, 2004, **91**, 157.
11. H. Li, M. Eddaoudi, M. O'Keeffe, O. M. Yaghi, *Nature*, 1999, **402**, 276.
12. R. D. Poulsen, A. Bentien, M. Chevalier og Bo B. Iversen, *J. Am. Chem. Soc.*, 2005, **127**, 9156.
13. N. Rosi, M. Eddaoudi, D. Vodak, J. Eckert, M. O'Keeffe, O. M. Yaghi, *Science*, 2003, **300**, 1127.
14. W. L. Mao og H.-K. Mao, *PNAS*, 2004, **101**, 708.
15. H. Lee, J.-W. Lee, D. Y. Kim, J. Park, Y. T. Seo, H. Zeng, I. L. Moudrakovski, C. I. Ratcliff, J. A. Ripmeester, *Nature*, 2005, **434**, 743-746.
16. A. Smith og M. Mogensen, *Kvant*, 2004, **1**, 14-19.
17. [www.h2logic.com](http://www.h2logic.com) og [www.af-truck.dk](http://www.af-truck.dk)

