

# Hydrogen-samfundet

## - en renere fremtid

Verdenssamfundets voksende energiforbrug har gjort et kraftigt indhug i de fossile energiresourcer – samtidig med, at udledningen af CO<sub>2</sub> er med til at skabe klimaforandringer. Et miljøvenligt alternativ er hydrogen, som kan blive fremtidens energikilde.

# H<sub>2</sub>

Af Torben R. Jensen

■ Det er kun et par hundrede år siden, mennesket begyndte at få maskiner til at gøre arbejdet for sig, og dermed begyndte at afbrænde fossilt brændstof for at skaffe energi. Siden er energiforbruget vokset enormt, og konsekvenserne af dette er begyndt at vise sig ved global opvarmning og fare for betydelige klimaændringer inden for en overskuelig årrække.

Det samfund, vi kender i dag, er baseret på energi fra fossilt brændsel – en ressource, der, udover at påvirke klimaet, også har den ulempe, at den er ved at slippe op, og undertiden må importeres fra "ustabile" leverandører.

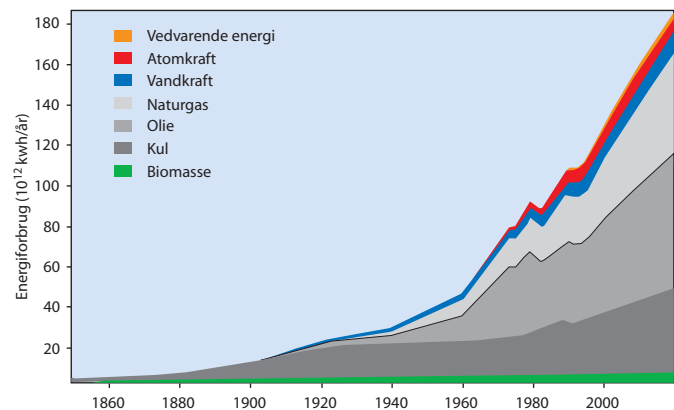
Af disse grunde er der betydelige interesser i at finde alternativer til fossilt brændsel, som vi kan basere vores energiforbrugende samfund på. En af de interessante muligheder er *hydrogen-samfundet*, hvor hydrogen er energikilden. Allerede i dag kan biler køre på hydrogen – enten via en almindelig forbrændingsmotor, eller ved brug af såkaldte *brændselsceller*, som er mere energieffektive. Og i en

ikke så fjern fremtid kan man måske få installeret et hydrogen-gasfyr i sit hus.

### En dansk ide

Hydrogen-samfundet er ikke en ny ide – overhovedet ikke. Faktisk er det måske en dansker, der første gang anvendte hydrogen som energikilde. Poul la Cour (1846-1908) forskede bl.a. i aerodynamik og udviklede nye typer af mere effektive vindmøller. Elektriciteten fra vindmøller var kun til rådighed, når det blæste tilstrækkeligt, så han udviklede en metode til opbevaring af vindenergi. Strøm fra vindmøllerne kunne bruges til at spalte vand til hydrogen og oxygen ved elektrolyse. Gasserne blev opbevaret separat i tanke og blev anvendt til belysning allerede i 1895 på Askov Højskole.

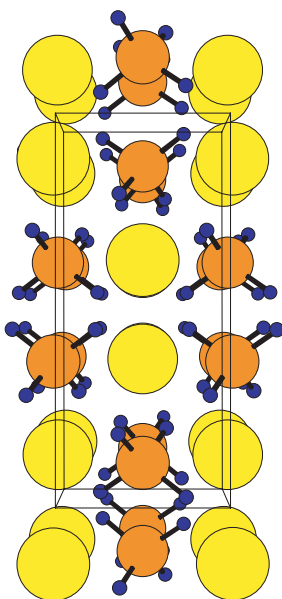
De rigelige mængder af fossilt brændstof kom dog hurtigt til at overskygge udnyttelsen af vindenergi og det var først oliekriserne i 70'erne, der fornyede interessen for vedvarende energi og satte skub i forskningen i bl.a. nye metoder til opbevaring af hydrogen.



Figur 1. Verdens energiforbrug. Langt størstedelen af energien stammer fra fossilt brændstof, der repræsenterer energi fra solen, som er ophobet i jordskorpen igennem mange millioner af år. I forhold hertil udgør den vedvarende energi kun en ganske lille del. Bemærk, at der ses en tendens til, at der med tiden bruges mindre carbon-holdige energikilder, idet energiforbruget går fra kul til olie og naturgas, og måske ender det med, at hydrogen, H<sub>2</sub>, anvendes som energikilde.

På verdensplan investeres der i dag store ressourcer i forskning og udvikling inden for dette område. Det ideelle mål er en miljøvenlig energiproduktion, hvor hydrogen produceres vha. elektricitet fra vedvarende energikilder, som spalter

vand (H<sub>2</sub>O) til oxygen (O<sub>2</sub>) og hydrogen (H<sub>2</sub>). Efterfølgende skal hydrogen opbevares på en sikker måde med høj energitæthed, f.eks. som et fast stof (et hydrid), der kan levere hydrogen til brug i brændselsceller til mobil anvendelse. Til stationær



Fremtidig opbevaring af hydrogen i faste metalhydrider kan være en mulighed - her ses strukturen af  $\text{NaAlH}_4$ , hvor natrium ionerne, ( $\text{Na}^+$ ) er gule, aluminium ( $\text{Al}$ ) er orange, og hydrogen er blå.

anvendelse, f.eks. privat bolig, kan hydrogen leveres i rørdninger, som man kender det fra naturgasnettet og fra tidligere tiders bygas, som bestod af ca. 50 % hydrogen.

Før hydrogensamfundet kan blive en realitet er der dog en række forskningsmæssige og teknologiske problemer, der må løses. Dels skal man udvikle effektive metoder til at producere og opbevare hydrogen og dels skal brændselscelle-teknologien yderligere udvikles. I mange tilfælde drejer det sig om at udvikle nye materialer og mere effektive katalysatorer, der kan få kemiske processer til at forløbe hurtigere og ved lavere temperatur, f.eks. i brændselsceller og i forbindelse med hydrogen-opbevaring og -afgivelse.

### Fremstilling af hydrogen

Der findes store mængder hydrogen på Jorden. Hydrogen findes dog ikke naturligt som

frit grundstof,  $\text{H}_2$ , men indgår i kemiske forbindelser som f.eks. vand,  $\text{H}_2\text{O}$ . Hvis man skal bruge hydrogen som energikilde, må hydrogen altså først fremstilles.

I øjeblikket er det billigst og mest effektivt at spalte naturgas med vanddamp til hydrogen og kuldioxid. Denne metode kan give de store mængder hydrogen, der er nødvendig for at få den nye teknologi startet op. Fremstilling af hydrogen fra biomasse kan måske på længere sigt vise sig endnu billigere og mere miljøvenlig. På længere sigt er det naturligvis målet at gøre hydrogenproduktionen helt  $\text{CO}_2$ -neutral. Elektricitet produceret fra vedvarende primære energikilder, f.eks. sol-, vind- eller vandenergi, kan anvendes til at spalte vand ved elektrolyse. Således kan hydrogen, som vist af P. la Cour allerede i 1894, opfattes som en energibærer til miljøvenlig opbevaring af vedvarende energi, der kan kompensere for, at det ikke altid blæser og solen ikke skinner om natten osv.

Den nyeste forskning tyder endvidere på, at det skulle være muligt inden for en overskuelig fremtid at lave kunstig fotosyntese, dvs. spalte vand til ilt og brint ved hjælp af en katalysator og sollys.

### Opbevaringsproblemet

Hydrogen er det letteste grundstof i det periodiske system, og har derfor et meget fordelagtigt energiindhold per masse, 120 MJ/kg (til sammenligning har benzin masseenergitætheden 43,9 MJ/kg). Hydrogen er en gas ved stuetemperatur, med lavt kogepunkt og smeltepunkt, og skal nedkøles til  $-252^\circ\text{C}$  for at bringes på væskeform. Derfor er hydrogen også et grundstof, der er meget vanskeligt at opbevare på en kompakt måde.

Det er faktisk det eneste alvorlige minus ved anvendelse af hydrogen som energikilde – det "fylder" for meget, dvs. energiindholdet pr. volumen 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 har benzin volumenenergitætheden

32,0 MJ/L).

Opbevaringsproblemet udgør nok den største forhindring på vejen mod et hydrogen-samfund. Problemet er særligt stort for transportsektoren. Ud fra en økonomisk betragtning skal man udvikle et medie med et hydrogenindhold på mindst 5,0 vægtprocent  $\text{H}_2$ , før en hydrogen-baseret transportsektor vil være rentabel. I USA vil det være nødvendigt med mindst 6,5 vægtprocent  $\text{H}_2$ , da bilerne er noget tungere.

### Opbevaring af hydrogen

Men hvordan opbevarer man bedst hydrogen, som skal bruges i en bil? Den første tanke, der falder ind, er nok at kondensere hydrogen til væskeform ved nedkøling. Problemet er, at væsken skal opbevares i en åben beholder, dvs. det fordamper, og derfor skal man helst dreje tændingsnøglen og køre straks man har tanket på. Det kan være en mulighed ved f.eks. bybuskørsel, som så småt er ved at blive udviklet rundt omkring i Europa på demonstrationsbasis.

Tryktanke kan opbevare hydrogen som en gas f.eks. ved et tryk på 300 bar, men jo højere tryk jo større skal godstykkelsen være i trykbeholderen og jo tungere bliver den. Derfor ligger det maksimale hydrogenindhold i tryktanke på ca. 4 vægtprocent. Man regner dog med, at dette vil komme op på ca. 6 vægtprocent hydrogen i nærmeste fremtid.

Opbevaring af hydrogen på gas eller væske form kan dog udgøre et sikkerhedsproblem (tænk f.eks. på rumfærgen Challenger, der eksploderede efter ret få minutters flyvning med 1535  $\text{m}^3$  flydende hydrogen ombord). Det er dog svært at vurdere, hvor farligt en tankfuld hydrogen er i forhold til f.eks. en tank benzin.

### Materialer til opbevaring af hydrogen på fast form

Siden oliekriserne i 70'erne har man forsket i fremstilling af nye materialer til hydrogenopbevaring. I de sidste ca. 30 år har der været meget fokus på metalhydrider, i særdeleshed nye legeringer med magnesium.

**Tabel 1:** Kemiske og fysiske egenskaber for nogle energikilder

Navn	hydrogen	naturgas	benzin
kemisk formel	$\text{H}_2$	$\text{CH}_4$	Benzin
sundhedsfare	ugiftig	ugiftig	skadelig
densitet (g/L)	70.8	425	729
smeltepunkt ( $^\circ\text{C}$ )	-259.3	-182.5	-
kogepunkt ( $^\circ\text{C}$ )	-252.8	-161.3	50-153
masseenergitæthed (MJ/kg)	120.0	50.1	43.9
volumenergitæthed (MJ/L) *	8.5	21.3	32.0
$\text{CO}_2$ -produkt. i kg pr. kg brændstof	0	2.74	3.19
$\text{CO}_2$ -produktion i g pr. MJ	0	55	73

\* I flydende tilstand

**Tabel 2:** Forskellige metoder til opbevaring af hydrogen.

	$\text{H}_2$ - indhold		tryk/temp. $p(\text{H}_2)/\text{bar}$ (1)
	Masse-energitæthed (vægt %)	Volumenergitæthed (g/L)	
<b>Trykflaske</b>	4.6	25	300
	ca. 6	58	700
<b>Metalhydrider</b>			$T/^\circ\text{C}$ (2)
$\text{MgH}_2$	7.6	110	350
$\text{LaNi}_5\text{H}_6$	1.4	121	ca.50
$\text{TiFeH}_2$	1.9	107	ca.50
<b>Komplekse metalhydrider</b>			
$\text{LiBH}_4$	18.5	121	380
$\text{NaBH}_4$	10.7	114	400
$\text{LiAlH}_4$	10.6	87	>125
$\text{NaAlH}_4$	7.5	94	210
$\text{Mg}_2\text{FeH}_6$	5.5	150	320

(1) Hydrogengastryk i gasflaske (700 bar er en målsætning)

(2) Temperatur for  $\text{H}_2$  afgivelse ved  $p(\text{H}_2) = 1$  bar, uden brug af katalysator

Metalhydriderne (se tabel 2) har det tilfælles, at deres volumenergitæthed er høj – de indeholder faktisk mere hydrogen end ren flydende hydrogen per rumfang. Ydermere er de faste metalhydrider en meget sikker måde at opbevare hydrogen på. Hydrogen frigives ikke spontant, hvis der f.eks. går hul på beholderen – kun hvis den samtidig opvarmes. Metalhydrider er faktisk så sikker en opbevaringsmetode, at det udgør et problem for anvendelsen – hydrogen er simpelthen bundet så stærkt i materialet, at der skal ret kraftig opvarmning til, før det frigives igen.

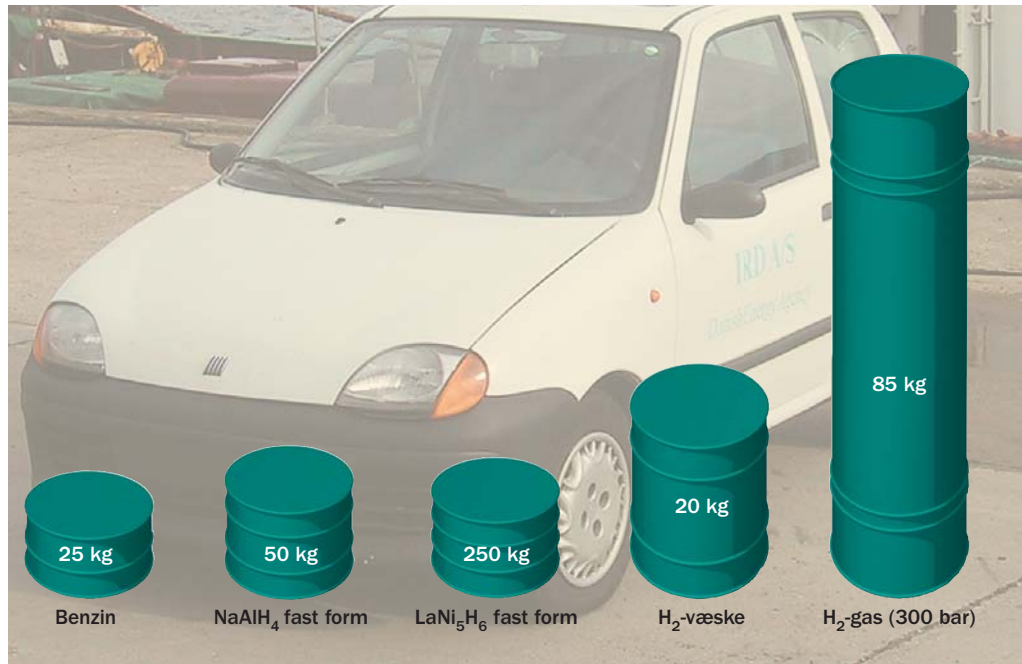
Der er fundet nogle få legeringer, der afgiver hydrogen ved moderate temperaturer, men de består alle af tungmetaller og derfor er det vægtmæssige hydrogenindhold for lavt til mobile anvendelser.

Inden for de sidste ca. fem år er der kommet stor opmærksomhed omkring en gruppe af faste metalhydrider, nemlig de såkaldte komplekse hydrider, f.eks.  $\text{NaAlH}_4$ . Dette stof kan opfattes som et salt opbygget af natriumioner ( $\text{Na}^+$ ) og sammensatte ioner af aluminium og hydrogen,  $\text{AlH}_4^-$ . Den nye opdagelse er, at optagelse og afgivelse af hydrogen kan katalyseres til at forløbe ved en moderat temperatur på ca.  $120^\circ\text{C}$ .

Ved kemisk institut, Aarhus Universitet, har vi startet et nyt forskningsområde, hvor vi studerer fysiske og kemiske egenskaber samt nye syntese- og katalysemetoder for komplekse metalhydrider, som i øjeblikket regnes for det mest lovende hydrogenopbevaringsmateriale, der kan realisere en bæredygtig hydrogenøkonomi. Denne gruppe af metalhydrider består ofte af lette metaller og har derfor både høj volumen- og masseenergitæthed.

### På vej mod hydrogen-samfundet

Rundt omkring i Europa kører der i øjeblikket enkelte hydrogen-drevne biler og bybusser omkring, endnu mest på demonstrationsbasis, da den nye teknologi ikke er økonomisk rentabel. Shell har således en



Figur 2. Her ses et regneeksempel med en mindre bil, der kan køre 16 km/l benzin og har en rækkevidde på 400 km. Benzinforbruget bliver ca. 25 l svarende til ca. 7 kg hydrogen forbrændt i en forbrændingsmotor med en virkningsgrad på ca. 15 %. Hvis bilen i stedet var udstyret med en brændselscelle, der elektrokemisk kan forene hydrogen og ilt til vand, med en virkningsgrad på f.eks. 30%, var det kun nødvendigt med ca. 3,5 kg hydrogen. Hvor meget denne mængde hydrogen fylder, afhænger af opbevaringsmetoden - og som det fremgår er der betydelig forskel.

hydrogen-servicestation i henholdsvis Amsterdam og Reykjavik på Island, hvor man har bybusser drevet af en hydrogenbrændselscelle. Reykjavik har en målsætning om, at alle bybusser skal køre på hydrogen produceret med strøm fra vandkraft inden år 2005.

I USA og resten af verden er

der en voldsom forskningsmæssig interesse for anvendelse af hydrogen som energikilde, som ikke er blevet mindre efter præsident Bush talte om vigtigheden af dette forskningsområde i sin årlige tale til nationen 2003 og bevilgede ekstra 1,2 mia US\$ til forskning inden for dette område.

Prisen for en brændselscelle og hydrogen produceret  $\text{CO}_2$ -neutralt er i øjeblikket høj, men man forventer, at det gradvist bliver billigere i takt med flere brugere og flere ressourcer sættes ind på udvikling af den nye teknologi og i takt med, at den energimæssige infrastruktur udbygges.

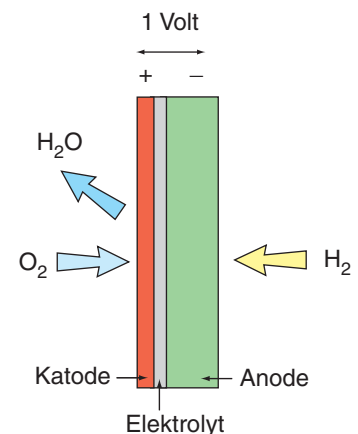
## Brændselsceller

Brændselsceller er en miljøvenlig teknologi, der har mere end 150 år på bagen. Teknologien er dog forbundet med store udgifter til materialer, hvorfor den hidtil kun har vundet indpas i meget specielle miljøer.

En brændselscelle kan opfattes som et batteri, hvor reaktanterne (hydrogen og oxygen) for den strømgivende reaktion tilføres med samme hastighed som de forbruges, i modsætning til et almindeligt batteri, der er en lukket beholder. Det vil sige, at der forløber en elektrokemisk reaktion, hvor hydrogen og oxygen forenes under dannelse af vand, og elektronoverførslen sker i et ydre kredsløb. Således omdanner brændselscellen direkte kemisk energi (hydrogen og oxygen) til

elektrisk energi ved lav temperatur (ca.  $80^\circ\text{C}$ ) og med et lille varmetab. Brændselsceller kan have en energieffektivitet på op til 60%. Ved en forbrænding i en bilmotor forenes hydrogen og oxygen under dannelse af vand, som kan omdannes til mekanisk arbejde. Forbrændingstemperaturen er høj, og det er varmetabet også, så bilens energieffektivitet er kun 10-20%. Til sammenligning kan nævnes at energieffektiviteten i et dansk kraftvarmeværk er ca. 60%.

Forskere ved Risø og IRD Fuelcells A/S har udviklet brændselsceller, og har for tiden en lovende eksperimentiel produktion med henblik på kommerciel produktion af brændselscellestakke til parcelluse og biler.



Princippet i en lavtemperaturbrændselscelle (PEMFC).



Fotos: IRD Fuelcells A/S



Virksomheden IRD Fuelcells A/S i Svendborg har i samarbejde med Fiat udviklet en demonstrationsbil, der kører på strøm fra en hydrogen-drevet brændselscelle.

Også i Danmark satses der på forskning inden for området, f.eks. igennem en "større tværgående forskergruppe" (se boks). Gruppen består af forskere fra universiteter, sektorforskningsinstitutioner og private virksomheder, som arbejder med forskellige aspekter af den store udfordring det er at udvikle teknologi, der kan gøre hydrogen-samfundet til en realitet.

### Ren energi har en pris

Den største udfordring i forbindelse med indføring af hydrogensamfundet bliver måske, at man skal vænne sig til, at energi koster noget. I dag betaler vi groft sagt ikke for energien – kun for at pumpe den op af undergrunden i form af råolie eller naturgas og for raffinering og transport. I hydrogensamfundet skal man

inkludere en væsentlig udgift, nemlig miljøvenlig produktion af hydrogen ved hjælp af dyre vindmøller eller solceller eller fra vandkraft.

Men ser man på det stigende globale energiforbrug og den deraf følgende CO<sub>2</sub>-produktion er der måske ingen vej uden om radikale ændringer i energiproduktion inden for en overskuelig årrække. ■

## Kostpriser for at fremstille hydrogen

Kilde	dollars/GJ
H <sub>2</sub> fra kul/olie/naturgas	1-5
H <sub>2</sub> fra naturgas minus CO <sub>2</sub>	8-10
H <sub>2</sub> fra kul minus CO <sub>2</sub>	10-13
H <sub>2</sub> fra biomasse	12-18
H <sub>2</sub> fra atomkraft	15-20
H <sub>2</sub> fra vindkraft (på land)	15-25
H <sub>2</sub> fra vindkraft (på vand)	20-30
H <sub>2</sub> fra solceller	25-50

For at være økonomisk bæredygtigt, skal prisen være mindre end 5 dollars/GJ

## Dansk forskning

Den danske forskning i anvendelse af hydrogen som energikilde er koncentreret i en større tværgående forskergruppe støttet af Statens Naturvidenskabelige og Tekniskvidenskabelige Forskningsråd (SNF og STVF) med 24 mio. kr. over 5 år til arbejdet. Forskergruppen består i øjeblikket af tre virksomheder, Danfoss A/S, Haldor Topsø A/S og IRD fuelcells A/S samt forskergrupper fra Det Tekniske Universitet i København (DTU), Aarhus Universitet (AU) og Forskningscenter Risø.

Siden 2002 har forskergruppen startet en række projekter, som hovedsagelig er fokuseret omkring udvikling af nye anodematerialer til brændselsceller og lagring af hydrogen. Arbejdet er af grundforskningens karakter og vil i høj grad blive publiceret i internationalt anerkendte tidsskrifter, men hvert enkelt resultat vurderes omhyggeligt for eventuelle anvendelsesmæssige muligheder og patentering. Det kunne i såfald foregå som et samarbejde mellem forskningsinstitutioner og virksomheder. Der holdes jævnligt møder, hvor forskningsmæssige og produktorienterede synsvinkler kan mødes.



### Om forfatteren

Torben R. Jensen er forskningslektor ved Interdisciplinary Nanoscience Center, iNANO, Kemisk Institut Aarhus Universitet  
e-mail: trj@chem.au.dk  
www.chem.au.dk

### Litteraturreferencer:

Poul-Otto Nissen: *Poul la Cour og vindmøllerne*, Polyteknisk Forlag, 2003.

A. Smith og M. Mogensen, *Brændselscellers fysik og kemi*, *Kvant* nr. 1, 2004, side 14

I. Chorkendorff, *Fremtidens Brintsamfund*, *Kvant* nr. 1, 2004, side 4

Karsten Pedersen, *Brint fra organisk materiale med ny proces*, *Dansk Kemi*, 2001, vol. 12, side 30.

Axel Hauge Pedersen, *Brint som energibærer i Danmarks fremtidige energisystem*, *Dansk Kemi*, 2001, nr. 10, side 20.

Bent Sørensen et al, *Int. J. Hydrogen Energy*, 2004, vol. 29, side 23.

M. W. Hansen og J. S. Nielsen *Kraftværker med separation og deponering af CO<sub>2</sub> (zero emission plant)*, *Dansk Kemi*, 2002, nr. 5, side 20.

www.ird.dk