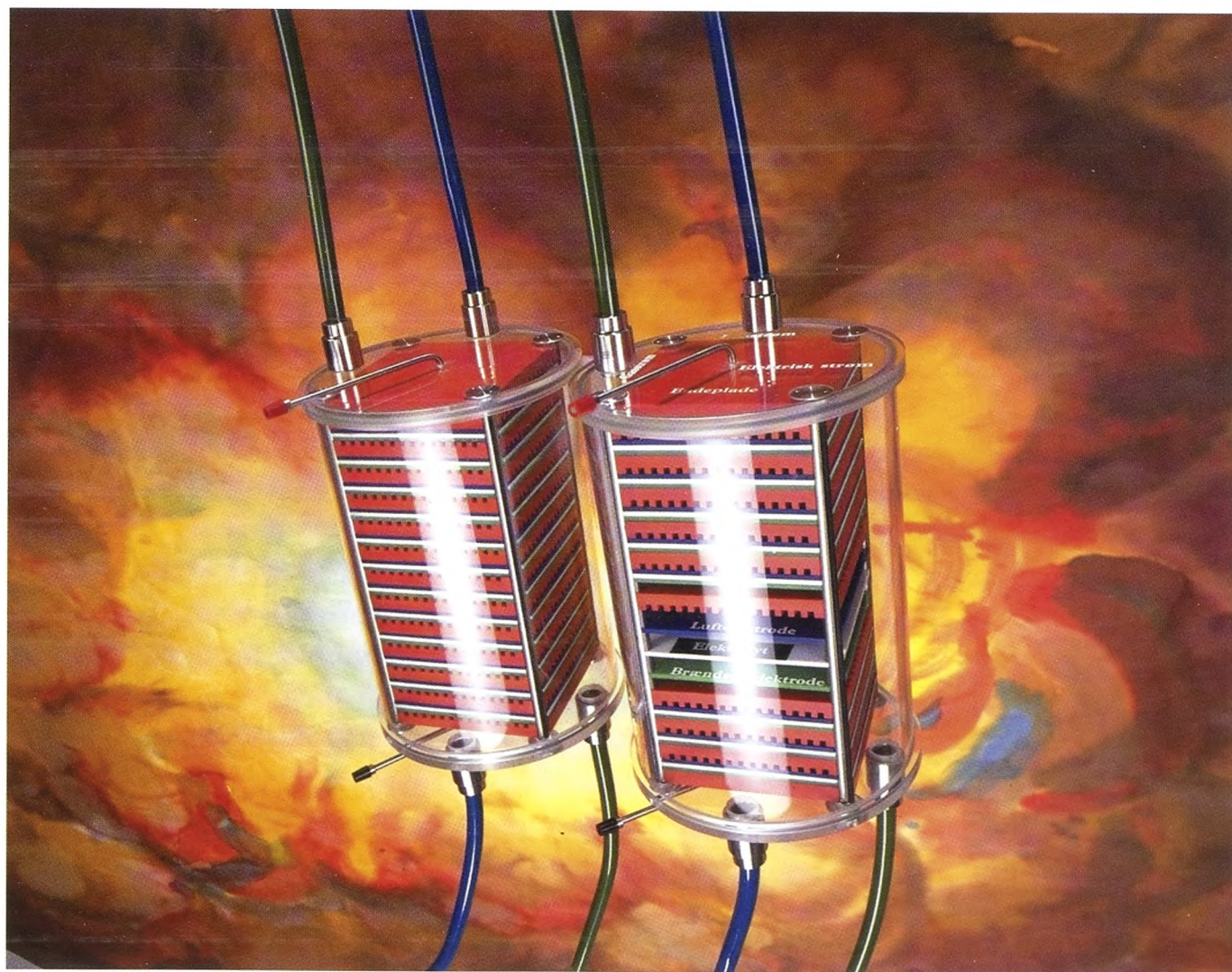


KVANT

Marts
2004

1

Tidsskrift for Fysik og Astronomi 15. årgang



- TEMANUMMER – NYE ENERGITEKNOLOGIER •
- MARS I VORE HJERTER • KVANT-NYHEDER •

LØSSALGSPRIS: 35 KR

KVANT

Tidsskrift for Fysik og Astronomi

Ørsted Laboratoriet, Niels Bohr Institutet
Universitetsparken 5
DK-2100 København Ø

Hjemmeside : www.kvant.dk
E-mail : kvant@kvant.dk

Udgives af
Astronomisk Selskab
Dansk Fysisk Selskab
Dansk Geofysisk Forening
Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Redaktion
Jens Olaf Pepke Pedersen (ansv. red.)
Dansk Rumforskningsinstitut
Robert Feidenhans'l (medredaktør på
dette nummer), Forskningscenter Risø
Michael Cramer Andersen (nyhedsred.)
Astronomisk Observatorium, KU
Camilla Bacher
Kemisk Institut, KU
Jørgen Friis Bak
Aarhus Universitet
Jørn Johs. Christiansen
Torsten Freltoft
Sophion Bioscience A/S
Mogens Esrom Larsen
Matematisk Institut, KU
Finn Berg Rasmussen
Ørsted Laboratoriet, KU
Svend E. Rugh
Ove Østergaard
Silkeborg Amtsgymnasium

Kvant udkommer 4 gange årligt og er med-
lemsblad for de udgivende selskaber.
Abonnementspris: 135 kr/år.

Annoncepriser	
1/1 side	3000 kr
1/2 side	1600 kr
1/4 side	1000 kr
Farvetillæg	1800 kr

Priserne er excl. moms og for repro-
klart materiale. Henv. om annoncer til
redaktøren, tlf. 35 32 57 32 eller 28 91
87 74. Henv. vedr. abonnement til forret-
ningsfører Lene Körner tlf. 35 32 07 62
(koerner@kvant.dk).

Oplag: 3.000. Tryk: P. J. Schmidt A/S,
Vojens. ISSN 0905-8893



Produktionsplan
Nr. 2-04 udkommer ca. 15. maj
Nr. 3-04 udkommer ca. 15. september
Deadline for mindre bidrag og annoncer
er ca. en måned før, længere artikler skal
modtages mindst to måneder før.

Indhold:

KVANT temanummer – nye energiteknologier <i>Robert Feidenhans'l</i>	3
Fremtidens brintsamfund <i>Ib Chorkendorff</i>	4
Brændselscellers fysik og kemi <i>Anders Smith og Mogens Mogensen</i>	14
Nyt fra Astronomisk Selskab	20
Nyt fra Dansk Fysisk Selskab	21
Dansk iværksætter udvikler bærbare brændselsceller <i>Torsten Freltoft</i>	23
Vandstandsstigning og husopvarmning <i>Jens Højgaard Jensen</i>	24
Dansk Geofysisk Forenings Rejselegat	25
FZ silicium – rent silicium til de bedste solceller <i>Jan Vedde</i>	29
Investering i nye energiteknologier <i>Niels Langvad</i>	30
KVANT-nyheder <i>Michael Cramer Andersen</i>	33
Nyt fra Selskabet for Naturlærens Udbredelse	35
Mars i vore hjerter <i>Sune Nordentoft Lauritsen</i>	Bagsiden

Henvendelser vedrørende abonnement og adresseændring bedes ske til
Lene Körner (koerner@kvant.dk, telefon 35 32 07 62). Kvant udsendes
gratis til alle landets gymnasier, HF-kurser, tekniske skoler, seminarier
m.fl. Hvis du er lærer et af disse steder og din arbejdsplads ikke mod-
tager Kvant opfordres du også til at rette henvendelse til Lene Körner.
Bestilling af klassesæt og ældre numre af bladet (20 kr. / stk.) kan ske
på kvant@kvant.dk.

Forsiden:

TEMANUMMER OM NYE ENERGITEKNOLOGIER

I dette nummer af Kvant har vi taget emnet "nye energiteknologier"
op med fokus på de danske aktiviteter og muligheder indenfor området
vedvarende energi.

Forsidebilledet viser en model af to brændselscellestakke. En brænd-
selscelle omdanner kemisk energi direkte til elektrisk energi. Da hver
celle kun giver en spænding på ca. 1 V, stables cellerne i såkaldte stakke
for at få praktisk anvendelige spændinger. Hver stak tilføres brændsel
(f.eks. brint eller naturgas) og luft gennem slangerne, og den elektriske
strøm udtages gennem stakkens ender. De viste modeller anvendes i
undervisningen af studerende på Forskningscenter Risø. (Foto: Boye
Koch).

Læs mere om brændselsceller i artiklen af Anders Smith og Mogens
Mogensen side 14.

KVANT temanummer – nye energiteknologier

Robert Feidenhans'l, Afdelingen for Materialeforskning, Forskningscenter Risø



Alle, der følger med i dagspressen, ved at forsynings-sikkerhed og bæredygtighed, så vel som billig energi, spiller en stor rolle i energipolitiske debat, og at energisektoren står overfor store teknologiske og strukturelle udfordringer. I dette temanummer af Kvant har vi taget emnet "nye energiteknologier" op med fokus på de danske aktiviteter og muligheder indenfor området vedvarende energi, hvor de danske styrkepunkter ligger indenfor vindenergi, solceller, brint- og brændselsceller,

Et af fysikkens hovedområder er at udforske nye muligheder til at frembringe, omsætte eller lagre energi. Nutidens moderne, dynamiske samfund kræver at blive fodret med stadig større mængder energi til elektricitet, til opvarmning, til transport og til en stadig stigende mængde af bærbar elektronik, samtidigt med at der er stigende krav om, at vedvarende og miljøvenlig energi skal udgøre en større og større del af den samlede energiforsyning. Dette kan ingenlunde klares med eksisterende teknologier, men skal løses på basis af nye fysiske principper og teknologier, der måske slet ikke er kendte i dag. Det giver store videnskabelige og teknologiske udfordringer for nutidens og fremtidens fysikere, som det fremgår af artiklerne om henholdsvis "fremtidens brintsamfund" og "brændselscellers fysik og kemi".

Nye videnskabelige ideer indenfor energiområdet er således nødvendige, men ikke tilstrækkelige. Ideerne skal udvikles til nye teknologier, der kan bringes til at arbejde ude i samfundet. Gode ideer alene gør det ikke, vejen til nytte i samfundet går gennem erhvervslivet.

Vekselvirkningen mellem forskning og erhvervsliv er en meget vigtig brik, der sikrer nyten af den forskning, der udføres på samfundets regning. Der stilles derfor i disse år større krav til forskningsverdenen til at få sine ideer ud at arbejde i samfundet. Det forventes af forskeren, at han eller hun er med til at sikre den nødvendige vidensoverførsel i en dialog med erhvervslivet. Her optræder der naturligt spørgsmålet om finansiering. Derfor har vi i dette nummer af Kvant dels et indlæg fra en mindre, højteknologisk dansk virksomhed, Topsil Semiconductor Materials A/S som har satset på at udvikle silicium til solceller, dels to for Kvant lidt mere utraditionelle indlæg; det ene fra et investorselskab, BankInvest, der fokuserer på nye energiteknologier som et deres forretningsområde, og det andet indlæg er et portræt af en entreprenør, der har valgt at nyttiggøre sin viden ved at lave en start-up virksomhed.



Robert Feidenhans'l er afdelingschef, Afdelingen for Materialeforskning, på Forskningscenter Risø. Han er uddannet fysiker fra Aarhus Universitet og Ph.D. indenfor overfladefysik og røntgen synkrotronstråling i 1986. Han har arbejdet på Risø siden.

Fremtidens Brintsamfund

Ib Chorkendorff, Interdisciplinært Forsknings Center for Katalyse (ICAT), Institut for Fysik og Institut for Kemiteknik, Danmarks Tekniske Universitet.

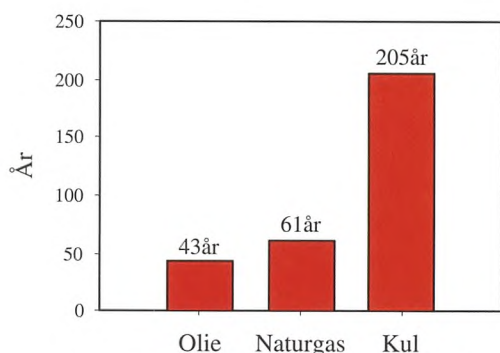
Hvorfor et brintsamfund?

Vores nuværende energiforbrug er baseret på opsparet solenergi i form af fossile brændstoffer. I det lange perspektiv er dette naturligvis uholdbart – ikke mindst pga. de miljøbelastninger det medfører, men også fordi ressourcerne på et eller andet tidspunkt vil slippe op. Hvor langt dette perspektiv er, hersker der dog stor uenighed om. Tabel 1 giver et hurtigt overblik over, hvor stort forbruget er, hvor mange kendte ressourcer der er tilbage – som med den nuværende teknologi kan anvendes – og hvor mange år dette svarer til med det nuværende forbrug.

Energiform Enheder	Olie (m ³)	Naturgas (m ³)	Kul (ton)
Kendte ressurser	$1,93 \cdot 10^{11}$	$1,56 \cdot 10^{14}$	$9,82 \cdot 10^{14}$
Årligt forbrug	$4,4 \cdot 10^9$	$2,54 \cdot 10^{12}$	$4,47 \cdot 10^{12}$
Reserve (år)	43	61	205

Tabel 1. Fossile reserver ifølge [1].

Data i figur 1 giver ikke umiddelbart anledning til panik af flere grunde. For det første er sådanne fremskrivninger baseret på kendte ressourcer og kendt teknologi. Heldigvis bliver begge løbende forbedret og set i lyset af at kun ca. 15% af den olie der er i felterne kan udnyttes i dag, er der stadig plads til betydelige forbedringer. Endvidere findes der enorme ressourcer, som i dag ikke umiddelbart er rentable at udnytte pga. manglende teknologi. Det drejer sig for eksempel om ressourcer i form af tjæresand og metanhydrater.



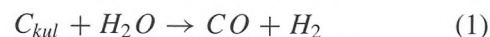
Figur 1. Antal års reserve fordelt på type fossilt brændstof.

Faktum er at lignende opgørelser i slutningen af 70'erne så betydeligt mere deprimerende ud. Et andet forhold er de enorme kulreserver. Ganske vist udgør de

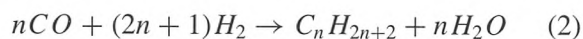


Figur 2. Produktionsplatform til søs som afbrænder ("flare") naturgas, der kommer op sammen med olien. Copyright: Straylight Pictures.

mindre gode energireserver i vores nuværende energiforsyningssystem, der jo i høj grad baserer sig på olie – især inden for transportsektoren. Men det kan der jo blive vendt op og ned på, og desuden har man allerede teknologien til at omdanne kul til benzin, hvis det skulle blive nødvendigt. Faktisk blev denne teknologi i udbredt grad anvendt i Tyskland under 2. Verdenskrig efter at tyskernes felttog mod oliefelterne i Kaukasus var slået fejl. Man blev derfor nødt til at basere sig på kul og i 1944 producerede den tyske krigsmaskine årligt ca. 600.000 ton brændstof til de transportable enheder. Dette forgik ved først at omdanne kul til syntesegas



hvilket jo i øvrigt har været vældigt udbredt og kendt som bygas. Ved hjælp af Fischer-Tropsch processen kan syntesegassen omdannes til kulbrinter:



hvor n er længden af den dannede kulbrinte. Desværre er det umuligt at kontrollere n , og man får derfor en fordeling af kulbrinter som man så i et tredje trin må oprense og destillere, inden man har fået et brugbart, men til gengæld meget rent brændstof [2]. De mange trin betyder at det er dyrt og derfor ikke umiddelbart rentabelt. Et groft overslag antyder at olieprisen skal

Figur 3. S sammensat satellitbillede af jorden hvor man tydeligt ser hvor man bruger energi: Lys fra byerne (= gult), afbrænding af skov m.m. (= lilla) og flaring (= rødt). Man ser også nordlys over Grønland samt den japanske fiskerflåde. Copyright: Foci Image Library.



fordobles fra de nuværende 25 \$ pr. barrel (ca. 0,159 m³) før denne proces er konkurrencedygtig. Dette tal er behæftet med en stor usikkerhed, men synes dog at lægge et låg på hvor meget oliepriserne skal stige før denne teknologi kan implementeres.

CO₂ problemet

Manglen på resurser er ikke det eneste der ansporer vores samfund til at udvikle ny energiteknologi. Påvirkningen af miljøet er en anden betydelig faktor, og – som tallene ovenfor antyder – måske også den vigtigste. Dette område er yderst politisk, idet det er en subjektiv afvejning af, hvor meget man vil belaste miljøet kontra, hvor meget man vil betale for energien med dertilhørende negativ indflydelse på beskæftigelsen, handelsbalancen osv. Et eksempel herpå er “flaring” eller på godt dansk afbrænding af den metangas som uundværligt kommer op sammen med olien fra oliefelterne (se figur 2).

Da det er dyrt af transportere gas over store afstande kan det ikke alle steder umiddelbart betale sig at opsamle gassen og sende den ud til forbrugerne. Det drejer sig især om de store felter der ligger i fjerne områder af f.eks. Sibirien, Mellemøsten og Nigeria (se figur 3).

Her har man i stedet blot brændt gassen af for at undgå eksplosionsfaren og mindske drivhuseffekten, idet metan jo er en 20 gange værre drivhusgas end CO₂. Disse enorme resurser er tidligere gået op i røg, men efter betydeligt politisk pres bliver der nu bygget anlæg, som på trods af det ringe økonomiske udbytte tvinger selskaberne til at omsætte naturgassen til brugbare kulbrinter v.h.a. Fischer-Tropsch processen. Selve udvindingen af de fossile resurser belaster også miljøet hårdt – især udvindingen af kul i forbindelse med minedrift er en stor belastning, men også selve afbrændingen

af fossile brændstoffer belaster miljøet enormt i form af frigivelse af CO, NO_x og SO₂. Med passende katalysatorteknologi kan disse dog efterhånden i udpræget grad elimineres, men det er selvfølgelig dyrt. Netop fordyrelsen kan på globalt plan betyde at udviklingslande, som for eksempel Kina, ikke prioriterer dette højt nok (det er stadig lidt af et luksusproblem), og man kan derfor forvente en yderligere påvirkning af miljøet, idet energiforbrugstilvæksten hovedsageligt finder sted i sådanne lande.

Det største, men måske også det vanskeligste, er CO₂ problemet. De fleste mennesker kan nemt og hurtigt forholde sig til lugten af SO₂, bilos og NO_x advarsler, men med CO₂ er det langt vanskeligere, idet vi her måske står over for en irreversibel langtidspåvirkning. På den ene side synes der ikke at herske nogen tvivl om at såvel CO₂ indholdet i atmosfæren som jordens middeltemperatur stiger – fakta som kan måles med rimelig stor sikkerhed.

På den anden side er fortolkningerne af disse resultater straks mere usikre, selv om der synes at herske en konsensus om at den stigende temperatur alene skyldes det stigende CO₂ indhold i atmosfæren. Som Lord Kelvin formulerede det: “Hvis du kan modellere det, forstår du det” og man har da også konstrueret adskillige modeller der underbygger teorien om at det stigende CO₂ indhold i atmosfæren vil medføre en stigende temperatur – og dermed en drivhuseffekt. Imidlertid er det et rimeligt komplekst problem og de samme modeller er ikke særlig gode til at forudsige noget så essentielt som skydannelse. Da netop vanddamp er den betydeligste drivhusgas i vores atmosfære sætter det naturligvis spørgsmålstegn ved disse modellers validitet.

Iskerneboringer antyder også at lignende fænomener er forekommet før, hvor der er observeret enorme variationer i vores klima. Måske er de variationer vi ser

blot helt naturlige og har intet med vores udslip af CO₂ at gøre. En nylig observation af Svensmark et al. [3] antyder en smuk korrelation mellem jordens middeltemperatur og solens aktivitet. En mulig fortolkning af denne sammenhæng er at solens høje aktivitet forårsager en skærmning af kosmiske partikler som skulle mindske skydannelse og dermed resultere i en forhøjet temperatur. Men det er alternative forklaringer som man må undersøge, og indtil videre agerer vi (landene bag Kyoto aftalen) ud fra forsigtighedsprincippet, om at vi hellere må prøve at mindske effekten, hvis den nu skulle vise sig at være forårsaget af vores nuværende energiforbrugsmønstre. Det bliver nemlig ikke nemt – for ikke at sige umuligt – at rette op på. Det er naturligvis også en politisk diskussion, der i høj grad handler om at tage beslutninger på et ufuldkomment vidensgrundlag. Er begrænsningen af CO₂ emission nu også stedet hvor man får mest ud af sine investeringer? Det kunne måske vise sig at være fuldstændigt uden for vores kontrol, og måske bruger vi investeringerne meget bedre til at forebygge effekten af den stigende temperatur. Dette er den såkaldte Lomborg tilgang til emnet [4], hvor han blandt andet agiterer for en vurdering af, om man nu bruger de forhåndenværende resurser på en optimal måde.

Vedvarende energi

Selvom der er rejst kritik af de modeller der alle viser en entydigt sammenhæng mellem stigende CO₂ og jordens middeltemperatur, så må man sige at bevismaterialet er ved at være så overvældende at kritikken – selvom den naturligvis skal tages alvorligt og udforskes – ikke kan bruges som undskyldning for ikke at gøre noget [5]. På grund af forsyningssikkerheden og miljøbelastningen ved at anvende fossile brændstoffer er der også gode argumenter for i fremtiden at satse på vedvarende energikilder. Det er netop her at brint kan blive en interessant aktør, se også artikel serien i Nature [6]. De vedvarende energikilder er alle direkte eller indirekte baseret på solens indstråling. Jorden modtager ca. 10.000 gange så meget energi som jordens befolkning p.t. forbruger regnet på årsbasis. Dette forhold er desværre ikke så fordelagtigt på vores breddegrader, hvor vi kun modtager 200 gange så meget som vi forbruger på årsbasis, se tabel 2.

	Jorden	Danmark
Solenergi (J/år)	$3,8 \cdot 10^{24}$	$1,6 \cdot 10^{20}$
Forbrug (J/år)	$3,8 \cdot 10^{20}$	$8,4 \cdot 10^{17}$
Elektricitet (J/år)	$4,6 \cdot 10^{19}$	$1,2 \cdot 10^{17}$

Tabel 2. Jordens energiindstrømning på årsbasis samt det menneskelige energiforbrug. Sidste række angiver andelen forbrugt i form af elektricitet.

Dertil kommer at denne overflod af energi faktisk er ganske vanskelig at omsætte effektivt til en energiform vi umiddelbart kan anvende. Tag blot vindmøllerne som

i dag ganske vist bidrager med ca. 14% (2002 niveau) af vores elforbrug. Hvis vi skulle dække vores totale energiforbrug skulle vi have mindst 50 gange så stor en vindmøllekapacitet som vi har i dag (og det ville endda ikke løse problemet, fordi denne energikilde udviser store tidslige variationer). En anden attraktiv mulighed er omdannelsen af sollys til elektricitet v.h.a. solceller, men disse er også ganske ineffektive og særdeles dyre at fremstille. I begge tilfælde anslås det at man skal anvende ca. 10% af Danmarks areal for at dække vores årlige energiforbrug. En tredje mulighed er naturligvis biomasse, men her synes der heller ikke at være den store frelse, da fotosyntesen ganske enkelt ikke er særligt effektiv. Ganske vist kan nogle enkelte planter (sukkerrør) faktisk fiksere op til 10% af det indkomne sollys, men på årsbasis er resultatet nærmere 1% og det er vel at mærke under optimale betingelser [7]. Det skal dog retfærdigvis nævnes at biomasse med sine ca. 6% af vores årlige energiforbrug udgør den betydeligste vedvarende energi-bidragssyde her i Danmark, og at der netop her er et godt potentiale for videreudvikling. Man kan også tage andre energiformer med i betragtning – såsom bølgeenergi, geotermiske forekomster m.m. Men det ændrer ikke ved, at vi bliver nødt til at satse bredt hvis vi skal basere os på vedvarende energi, idet der ikke er en enkelt energiform som nemt vil kunne dække hele behovet. Hertil kommer at de energiformer, vi her har omtalt, kommer og går som vinden blæser og solen skinner. Ikke særligt hensigtsmæssigt når man tager i betragtning at vores energibehov er rimelig fastlagt og udviser betydelige døgnrytmer (især inden for elsektoren). Det er netop her at brint kommer ind i billedet som en interessant energibærer og energibuffer.

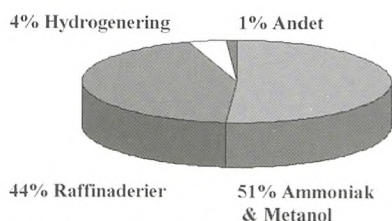
Fremstilling af brint

Allerede i dag anvendes enorme mængder af brint. Som det ses af figur 4 er det især til fremstilling af ammoniak og metanol. Ammoniak, der hovedsageligt anvendes til kunstgødning, er en forudsætning for at man overhovedet kan brødføde jordens nuværende befolkning. Man har her udviklet en særdeles effektiv proces der kan producere ren brint [2], ved gennem en række katalytiske processer at omsætte naturgas til brint samtidigt med at man skaffer sig af med vand og især CO₂ (<1ppm). Denne teknologi kan naturligvis også anvendes til at fremstille ren brint i store mængder til andre formål samtidig med at man har kontrol over den CO₂ der dannes. CO₂ kan man i princippet skaffe sig af med ved at pumpe den ned i undergrunden, hvor man for eksempel tidligere havde naturgas. Dette kaldes CO₂ "sequestration", og princippet bruges allerede til at forøge olieudvindingen eller til at mindske CO₂ udslippet fra gasfelter, som det er tilfældet med Statoils Sleipner felt, hvor CO₂ også kommer med op.

Det vurderes, at det vil koste hvad der svarer til ca. 30% af energiindholdet plus betydelige in-

vesteringer, hvis man skal deponere CO₂ indholdet fra de fossile brændstoffer. Det er et område som i dag vække betydelig interesse, idet man jo på kraftværkerne rimeligt nemt kan trække CO₂ ud [8] mens det i transportsektoren næppe vil være praktisk muligt. Man har altså allerede en betydelig teknologi til at fremstille brint fra fossile resurser, men det vil naturligvis også have en ikke ubetydelig bekostning (selv uden fjernelse af CO₂) i forhold til at anvende for eksempel naturgas direkte som brændsel. På langt sigt skal man naturligvis fremstille brinten direkte fra energikilden dvs. direkte fra sollys ved fotokatalyse – hvor man spalter vand – eller ved elektrolyse, hvor strømmen for eksempel kommer fra vindmøller eller fra solceller. Det sidste princip kan allerede i dag bruges til for eksempel at omdanne såkaldt “overløbsstrøm” fra vindmøller og kraftværker. Strøm kan naturligvis ikke løbe over, men ordet referer til de situationer hvor det f.eks. blæser kraftigt og/eller er meget koldt om natten og hvor der derfor ikke er noget stort elforbrug. Da de konventionelle kraftværker er nødt til at køre hele tiden – for at sikre konstant spænding og frekvens på nettet samt forsyningssikkerhed og derudover i en række tilfælde for at generere varme til forbrugerne (kraftvarmefværker) – er resultatet en meget dårlig kW pris under sådanne omstændigheder. Her kunne man med en ca. 70% effektivitet anvende strømmen til at spalte vand ved elektrolyse og derved fremstille brint. Spørgsmålet er så hvorfor man ikke bare gør det?

Nuværende Anvendelse af Hydrogen



Figur 4. Anvendelsen af brint.

Barrierer for indførelse af Brintsamfundet

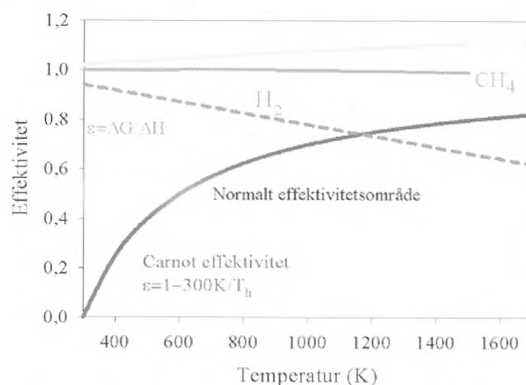
Der er umiddelbart tre barrierer for indførelse af et brintsamfund. Den første er at der stadig er så rigeligt med fossile brændstoffer at manglen endnu ikke (heldigvis) har betydet nogen reel prisstigning – faktisk er det billigere end nogensinde. Der er altså ikke umiddelbart noget økonomisk incitament. Selvom Kyoto aftalen har været kritiseret for ikke at have nogen større effekt [4] så skal man se den som værende et første (og vel at mærke et velkontrolleret) skridt på vejen mod at sætte en pris på miljøbelastningen, at gøre alternativer mere rentable og dermed mindske denne barriere. Den anden forhindring er distributionsnettet, som jo ikke kommer på plads før man er i stand til at producere og forbruge brint i nævneværdig grad. Der

er dog forskellige tiltag og visioner for, hvordan dette skal foregå og indtil videre synes disse visioner i høj grad at være afhængige af hvilke industrielle interesser der måtte være indblandet. For eksempel arbejder de store olieselskaber med visioner hvor kulbrinter (eller eventuelt metanol) fortsat er den store energibærer eller brintlagringsmedie i fremtiden. Andre, som for eksempel gasindustrien, arbejder med visioner hvor et brintnet i lighed med naturgasnettet fordeler brinten og eventuelt lagre den i geologiske lag i lighed med den nuværende naturgaslagring. Man kan allerede i dag producere brint og transportere det i det nuværende gasnet, men ikke mere end nogle få % opblandet med naturgasen [9]. Dette tal kan forøges betydeligt ved at udskifte ikke-brinttætte komponenter, men det nuværende net vil ganske enkelt have for lille kapacitet, hvis det er ren brint der skal transporteres, idet energiindholdet pr. mol brint kun er

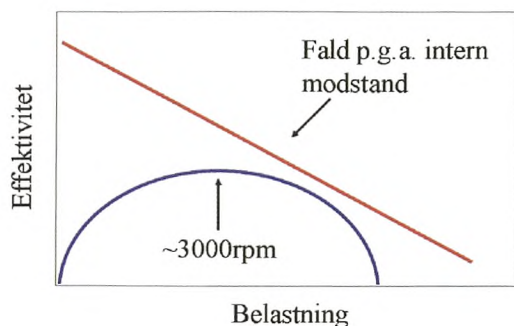
$$\Delta H_{298}^{\circ}(\text{H}_2\text{O}_{\text{gas}}) = 242\text{kJ/mol} \quad (3)$$

mod metans 802 kJ/mol ved komplet oxidation. (Et mol brint og metan fylder det samme.) Et brintnet anslås derfor at skulle have en kapacitet, der er ca. 3 gange større end det nuværende naturgasnet, der i øvrigt også til en vis grad blev etableret for at sikre forsyningen og lette miljøbelastningen.

Den tredje forhindring ligger i at produktions- og omsætningsteknologien ikke er udviklet tilstrækkeligt og derfor er for kostbar. Som nævnt kan brint naturligvis produceres ud fra kul eller naturgas mod en passende merudgift der dækker investeringerne i produktionsanlæg, fordelingsnet og en eventuelt CO₂ elimination, men det løser ikke det grundlæggende problem, idet man så stadig baserer sig på fossile resurser. Det kan dog blive en løsning, hvor man gradvist overgår til vedvarende energi og hvor brinten produceres fra vindmøller, biomasse, solceller og fotokatalyse. Hvad angår omsætningen er teknologien heller ikke klar.



Figur 5. Figuren illustrerer den teoretiske effektivitet af brændselsceller og konventionelle maskiner underlagt Carnot effektivitet som funktion af temperaturen. Bemærk dog at ingen brændselsceller reelt overstiger den sædvanlige effektivitet på 40–50%.



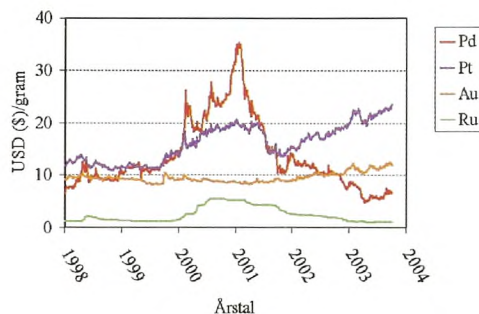
Figur 6. Figuren viser skematisk den principielle forskel mellem den konventionelle forbrændingsmotor (blå kurve) og brændselscellen (rød linie).

Effektivitet ved omsætning

Man har naturligvis brændselscellerne (se artiklen om disse) som jo netop er som skabt til et brintsamfund, da man her direkte kan omsætte kemisk energi til elektricitet. Dette er ikke blevet mindre interessant af at brændselscellers aktivitet ikke er begrænset af Carnot effektiviteten, sådan som alle vore konventionelle motorer og kraftværker er det i dag. Carnot effektiviteten er en absolut øvre grænse for, hvor meget arbejde (i dette tilfælde elektrisk energi) w_{max} , der kan trækkes ud af en proces med energiindholdet q_h , således at man stadig opfylder termodynamikkens 2. hovedsætning om at der erfaringsmæssigt altid skal frigøres entropi ved en given proces. Herved bliver den maximale effektivitet

$$\epsilon_{Carnot}^{Max} \equiv \frac{|w_{max}|}{|q_h|} = 1 - \frac{T_c}{T_h} \quad (4)$$

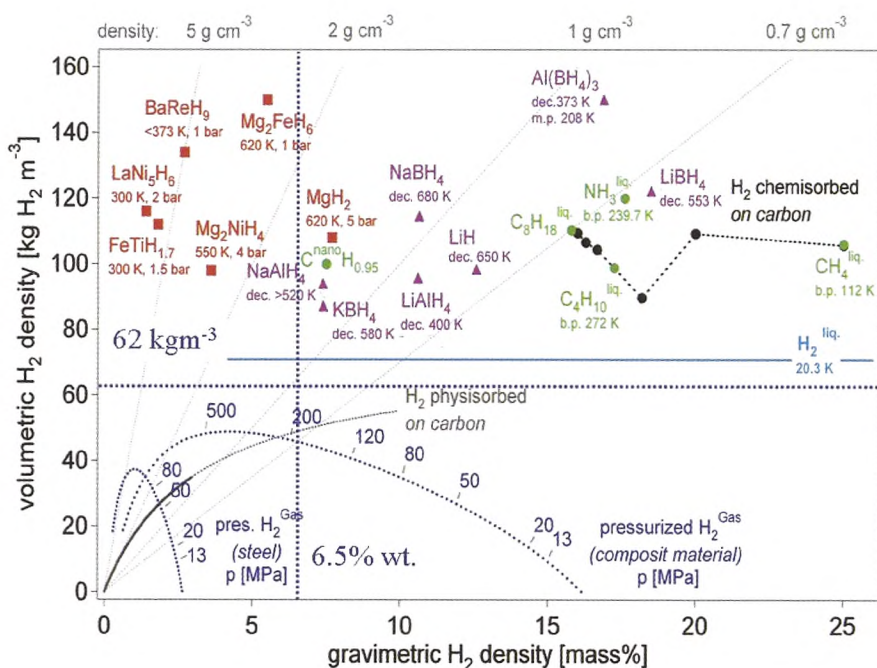
hvor T_c er omgivelsernes temperatur og T_h for eksempel er forbrændingstemperaturen i en motor. Normalt er der ikke så meget at gøre ved omgivelsernes temperatur, der jo ikke normalt kommer under 300 K. Man kan forøge T_h , som det er sket på kraftværkerne, men her er korrosions- og styrkeegenskaberne af materialerne begrænsende. Takket være materialeforskningen sker der dog fremskridt på området, og man har nu kraftværker der kan producere elektricitet med helt op i nærheden



Figur 7. Prisudviklingen for Pt sammen med nogle af de andre kostbare metaller. Fluktuationerne illustrerer, at priserne er meget følsomme overfor efterspørgslen, hvilket skyldes deres ringe forekomster. Fra [10].

af 60% effektivitet. Brændselscellernes effektivitet derimod er givet ved forholdet mellem Gibbs frie energi ΔG og entalpien ΔH for forbrændingsprocessen:

$$\epsilon_{Fuelcell}^{Max} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = 1 - \frac{T \Delta S}{\Delta H} \quad (5)$$



Figur 8. Figuren viser en lang række måder at lagre brint på som funktion af brintdensitet og vægtprocent. Figuren er modificeret fra [12].

hvor ΔS er entropiændringen ved processen. Det betyder at effektiviteten er afhængig af hvilket molekyle der forbrændes i cellen. Effektiviteten er vist for brint, metan og metanol samt for Carnot processer som funktion af temperaturen i figur 5.

Selv om det er en ren kuriositet er det dog interessant at bemærke at termodynamikken principielt ikke udelukker en over 100% effektivitet for metanol. Dette skyldes, at man ved at bruge metanol principielt også kan køle brændselscellen og dermed hente mere energi ud end der er i metanol alene. Imidlertid er dette af ren akademisk interesse, idet alle brændselsceller reelt ligger mellem 40% og 50% og altså ikke er bedre end et almindeligt kraftværk til at generere elektricitet. Først og fremmest skyldes dette at der forekommer en række overpotentialer ved anode- og katode-processerne. Overpotentiale er en term fra elektrokemien som umiddelbart kan oversættes til en energibarriere der skal overkommes for at få en proces til at forløbe. For eksempel har vi nævnt at man kan fremstille brint v.h.a. elektrolyse, men kun med en energieffektivitet på 70%. Principielt behøver man kun en spænding på 1,2 V for at spalte vand til brint og ilt, men i praksis viser det sig at spaltningen først forløber ved en spænding på omkring 1,6V – altså med en over-spænding på ca. 0,4V, som blot omdannes til varme. Hertil kommer yderligere energitab som skyldes den indre modstand i systemet. Disse overpotentialer minder i deres natur om de energibarrierer, som man støder på andre steder i den kemiske industri for at få processer til at forløbe. Her anvendes katalysatorer for at mindske barrieren, og lignende forhold gør sig da også gældende ved valg af elektrodematerialer. Det er derfor nærliggende at anvende nogle af de samme principper inden for elektrokemien, som man med så stor succes har anvendt inden for katalyse til at mindske disse barrierer og dermed forøge brændselscellernes aktivitet. Dette er et forskningsområde i hastig vækst og med god grund, idet der virkelig er noget skelsættende at hente her. Til gengæld må man nok indrømme at der er brug for nogle reelle gennembrud for at brændselscellerne virkelig skal blive dominerende.

Priser på brændselsceller

Brændselsceller er ganske enkelt for dyre at fremstille i dag. Her er ikke behov for en række små forbedringer som måske kan forøge effektiviteten og reducere prisen – nej, her taler vi om prisreduktioner på en størrelsesorden. Man har i dag klart demonstreret brændselscellernes potentiale: Der er adskillige programmer som klart har demonstreret at a) man kan anvende brændselsceller i biler og b) de fungerer fint – hvis man da lige ser bort fra prisen og problemet med at anvende brint i mobile enheder. Hvorfor er man så optaget af at anvende brændselsceller i biler? Det skyldes at bilmotoren (den såkaldte Otto engine) ikke alene er underlagt Carnot effektiviteten, men derudover også er

særdeles ineffektiv fordi de krav vi sætter til en bil gør at motoren er mest effektiv ved et ret højt omdrejningstal som skitseret i figur 6. Den maximale effektivitet opnås ved ca. 3000 omdrejninger pr. minut, hvilket typisk svarer til en hastighed på 120–130 km i timen. Det er dog kun i begrænset omfang at en bil får lov til at køre ved de hastigheder. For det meste foregår kørslen i byområder med lyssignaler hvor bilen enten holder stille mens motoren går i tomgang eller med forholdsvis lav hastighed. Det skønnes derfor at bilmotoren kun yder en effektivitet på ca. 25%. Set i dette perspektiv er brændselscellen ved lave belastninger langt mere effektiv. Hertil kommer at da brændselscellen netop fungerer ved lav temperatur undgår man dannelsen af de giftige NO_x forbindelser som dannes i de konventionelle forbrændingsmotorer sammen med uforbrændte kulbrinter og sod.

Den eneste udstødning fra en brændselscelle er principielt vand (der sine drivhusgas-egenskaber til trods anses for acceptabel, da den jo allerede forekommer i enorme mængder). Det er især Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEM brændselscellen) som er interessant her, idet den fungerer optimalt ved lave temperaturer (80°C) og umiddelbart også kan opereres ved stuetemperatur. I modsætning hertil har vi SOFC cellen som kræver betydeligt højere – og indtil videre også konstante – temperaturer på ~750–800°C, hvilket er upraktisk i for eksempel biler. I dag er en af de dyreste komponenter i PEM cellen selve elektrolytten der tillader protoner, men ikke elektroner, at passere. Materialet kaldet Nafion er patentbeskyttet af Dupont, som således har monopol på materialet. Det faktum at det kun produceres til demonstration og altså ikke masseproduceres og at der er et monopol kan formentligt forklare at netop denne komponent er den dyreste. Men på længere sigt kan man forvente at dette vil ændre sig. Der forskes i dag intensivt i at finde erstatningsmaterialer som kan bryde monopolet. Faktum er at det i bund og grund er et polymermateriale, så der er ingen grund til at det fortsat skal være så dyrt. Langt alvorligere ser det ud med hensyn til elektrokatalysatoren som består af Pt eller Pt/Ru. Denne komponent, der sikrer at man kan spalte brint til protoner på anodesiden, og at man kan få spaltet ilt og få det rekombineret til vand med protonerne, der er vandret gennem Nafionen på katodesiden, er et kostbart metal som antydtes i figur 7. Man har typisk en dækningsgrad på omkring 1 mg/cm². Dette tal er dog blevet reduceret ved at benytte bedre metoder til at opbygge grænsefladen mellem elektroden og elektrolytten, og der er bestemt også store muligheder her, idet mængder af størrelsesorden 10⁻³ mg/cm² teoretisk set burde være tilstrækkelige.

Der er et stort incitament til at deponere nanopartikler netop i grænselaget. Således prøver man at danne nm Pt partikler som deponeres på overfladen af polymeren, hvorefter kontakten slutes ved at presse en grafit elektrode mod disse partikler.

Forbindelse	H ₂ (liq.)	MgH ₂	CH ₃ OH	NH ₃	CO(NH ₂) ₂	Benzin
M_w (g mol ⁻¹)	2	26.3	32	17	60	
ΔG° (kJ mol ⁻¹)	-228	-228	-684	-326	-654	
ρ (g mL ⁻¹)	0.078	1.45	0.79	0.68	1.3	
ΔG° (kJ mL ⁻¹)	8.9	12.6	16.9	13.1	14.1	25–30

Tabel 3. Molvægt, energiindhold pr. mol, densitet og energiindhold pr. ml for en række brintbærere. Bemærk den sidste værdi er den væsentlige og benzin er svær at matche. Fra [2].

En anden vej for at omgåas dette dyre materiale er at finde andre materialekombinationer, som eventuelt kan erstatte Pt. Dette er i forvejen et stort forskningsområde inden for katalyse, idet man også her ønsker at begrænse brugen af Pt. Dette kan ske ved at udforske nye metallegeringer og overfladelegeringer, idet det jo her alene er overfladen som er af betydning. Et eksempel har været Au/Ni legeringen som slet ikke kan forme en egentlig legering, men kan gøre det i overfladen [11]. Dette eksempel viser at der er masser af muligheder og potentiale for at finde nye materialer, som har enestående egenskaber, og som kan være både bedre og billigere end de rene grundstoffer.

Under alle omstændigheder er der brug for et genembrud på materialeområdet – illustreret ved følgende eksempel: En PEM brændselscelle vil typisk anvende mindst 0,1 mg Pt pr. cm⁻². En cm² giver typisk 0,5A ved ca. 0,7V under optimale betingelser dvs. ca. 0,35W. En typisk bil i dag har en effekt på ca. 100kW, men hvis vi nu antager at vi kunne nøjes med mindre (der er i hvert tilfælde ingen saglig begrundelse for at køre rundt med en firhjulstrækker i Danmark) så ville 35kW måske være et mere rimeligt bud. En typisk bil skal altså indeholde min. 10g Pt. Det lyder umiddelbart ikke så dyrt set i lyset af at Pt kun er en faktor 4 dyrere end guld, se figur 7.

Problemet er bare, at sådan vil det formodentligt ikke blive ved med at være, da verdensproduktionen kun andrager 190 tons i 2003 og altså i dag kun ville kunne forsyne 19 millioner biler – eller betydeligt mindre end 10% af verdens bilpark – hvis al Pt gik til dette formål. Alene USA tegner sig for en bilpark på 0,9 biler/person svarende til ca. 200 mio. biler. Det er tankevækkende set i lyset af at et land som Kina – der er inde i en rivende udvikling som hurtigt omsættes i ny teknologi såsom biler – på nuværende tidspunkt kun har 0,01 bil pr. indbygger! Der er altså al mulig grund til at forvente at dette metal, som i øvrigt kun udvindes i betydelige mængder i Sydafrika og Rusland, vil komme under stort pres hvis brændselsceller slår igennem i biler, og der ikke bliver opfundet erstatningsmaterialer. Pt forekommer vægtmæssigt kun i meget ringe mængder i jordskorpen $\sim 5 \cdot 10^{-9}$ (Ru $\sim 10^{-9}$).

Behovet for brintlagringsmedier

Der er en anden særdeles alvorlig “show-stopper” for anvendelse af brændselsceller i biler, selv om det synes meget attraktivt ud fra et effektivitets- og foruren-

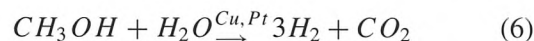
ingssynspunkt – det er lagringen af brint. Brint har ganske vist en faktor tre højere energiindhold pr. vægt end andre brændstoffer, men da det forekommer som en gas og først er flydende ved 20K og her endda med en ringe vægtfylde, er det besværligt at lagre. Der findes i dag ikke nogen fornuftig måde at lagre brint på til mindre mobile enheder. Der er sat ganske specifikke krav fra det amerikanske energiministerium (DOE) til, hvad et sådant lagermedie skal kunne opfylde. Der skal være mindst 6.5% vægtindhold af brint, og det må ikke have en densitet lavere end 62 kg brint pr. m³, se figur 8. Ydermere må opladningen ikke tage mere end 5 min. Disse krav, som løbende bliver skærpet, reflekterer et krav om at aktionsradius, vægt og rumfang skal være det samme som i nuværende biler. Disse (amerikanske) krav er dog ligeså diskutabile som nødvendigheden af at køre rundt i 4-hjuls trækere på 2,5 ton.

I figur 8 er forskellige måder at lagre brint på plottet ind som brintdensiteten mod vægtprocent brint. Mulige løsninger skal ifølge DOE kravene findes i øvre højre kvadrant. Man ser at ståltanke er helt håbløse medens letvægtstanke med 200 bar dog kommer i nærheden af kravene. Umiddelbart ligner flydende brint en løsning, men det er ret upraktisk da det kræver kryogene temperaturer på ca. 20 K. Ikke desto mindre er det, hvad man i udstrakt grad bruger i dag til at demonstrere brugen af brændselsceller i biler. Den bedste løsning ville være metalhydrider og der findes da også metalhydrider som opfylder kvalitetskravene. Imidlertid opfylder de ikke kvalitetskravene om, at brinten skal kunne frigives ved et lavt tryk og lave temperaturer (20-100°C). For eksempel er MgH₂ umiddelbart et udmærket materiale, som hvis det er formålet til et nano-materiale kan optage og afgive brint i de ønskede mængder reversibelt.

Problemet er bare, at det først sker ved en temperatur på 300°C – altså alt for højt. Der er således en intensiv forskning i at finde materialekombinationer som kan gøre dette ved lavere temperatur. Disse findes, men indeholder til gengæld for lidt brint.

Der er dog stadig muligheder og nye materialer undersøges blandt de lette grundstoffer.

En anden tilgang til denne problemstilling er at anvende hydrogenbærere som omsættes til ren brint på den mobile enhed. Det kunne naturligvis være reformering af benzin eller det noget nemmere metanol:



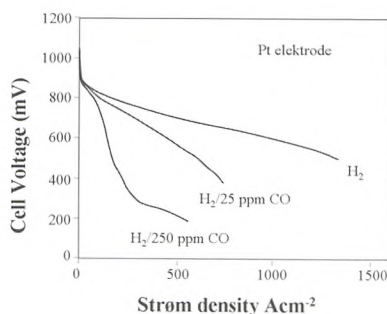
Ammoniak eller ammoniakforbindelser som for ek-

sempel urinstof $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ er også en mulighed, se tabel 3.

Selvom disse brintbærere kræver en mindre kemisk fabrik indbygget på selve enheden, er det er ikke umiddelbart muligt at afskrive denne mulighed.

Det er dog karakteristisk at brændsels-cellerne kræver særdeles ren brint for at fungere optimalt. Som nævnt ovenfor er dette muligt – men også bekosteligt – hvis det skal være i små anlæg på hver eneste bil. For eksempel vil reformering af kulholdige forbindelser uundværligt resultere i en vis mængde CO. Selv meget små mængder af CO kan påvirke en PEM brændsels-celle alvorligt som vist i figur 9 – hvor blot 25 ppm CO i brinten fører til en betydelig forgiftning. Det er faktisk også muligt at køre PEM brændselsceller direkte på forbindelser som allerede indeholder en oxoforbindelse så som metanol. Her vil der så kunne ske en reformerings reaktion direkte på anoden som antyd det ovenfor.

Desværre falder effektiviteten betydeligt da intermedieære forbindelser i lighed med CO vil forgifte anoden så den kun kan opereres ved ca. 0,4V i stedet for de sædvanlige 0,7V. Der hersker stor uenighed om, hvilke forbindelser det er der forgifter. Denne såkaldte direkte metanol PEM brændselscelle har imidlertid den indlysende fordel, at den kan køre på en væske, som er nem at opbevare. IRD A/S i Svendborg har for eksempel bygget en 1kW demonstrationsenhed på størrelse med et mindre køleskab, der kan fungere som nødstrømsanlæg. Det er nok her at vi vil se den første anvendelse af brændselsceller, nemlig til nødforsyninger og batterierstatning. For eksempel må hospitaler ubetinget være sikre på strømforsyning i tilfælde af et udfald, noget der heldigvis sker meget sjældent her i landet.



Figur 9. Figuren viser hvordan spændingen falder for konstant strøm når der er CO tilstede i brinten. Bemærk det kraftige fald fra 1.2 V, lige så snart der trækkes strøm, der skyldes overpotentialer i anode og katode. Modifieret fra [13].

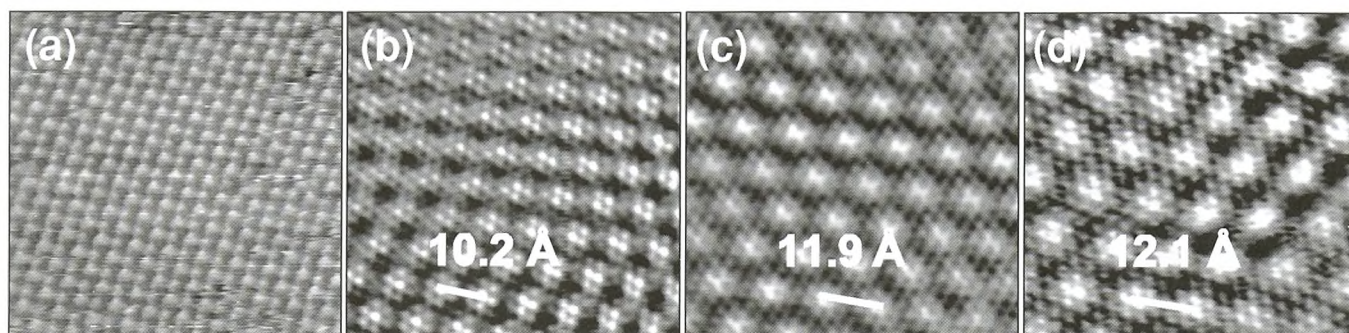
I sådanne situationer er prisen pr. kilowatt fuldkommen ligegyldig hvorimod forsyningssikkerhed er helt essentiel. Et andet område er batterierstatning, som set fra et energisynspunkt er uden betydning, men som ud fra et økonomisk synspunkt kan udgøre et enormt marked. Dette er først og fremmest drevet af militære interesser, hvor en højteknologisk kampsoldat er ud-

styret med satellitkommunikation, natsyn osv. – ting der alle kræver strøm og ofte i situationer hvor man ikke lige kan lade batteriet op. Disse små forsyningsenheder bygget ind på chips kan i fremtiden også anvendes i bærbare PC'er og i mobiltelefoner, der i stedet for en opladning kan "ordnes" med et skud metanol, som er nem at opbevare i en lille ampul. Netop sådanne nichemarkeder kan nemt være det der seriøst introducerer brændselsceller, hvorfra de så kan udfylde større og større energiforsyningsopgaver.

Ovenfor har vi kun omtalt de såkaldte PEM brændselsceller der er baseret på vandholdige polymerer, og som derfor opereres ved temperaturer på under 100°C med en maksimal effektivitet på ca. 40–50 %. Den anden klasse af brændselsceller, SOFC er baseret på en faststofelektrolyt som tillader oxygen at passere i stedet for protoner. Dette kræver imidlertid ret høje temperaturer 750–800°C hvilket har både fordele og ulemper. Det siger sig selv at den høje temperatur giver problemer ved hurtige opstart og eventuelle svigt i brændstoffstilførelsen idet temperatur-svingninger belaster cellen betydeligt. Ydermere giver den høje temperatur betydelige materialeproblemer, og det er hovedsageligt her udviklingen pågår. Den høje temperatur har imidlertid også fordele. SOFC cellen er for eksempel ikke nær så følsom for brændstoffet og kan endog opereres på rene kulbrinteforbindelser så som naturgas. Den høje udgangstemperatur betyder også at den kan kombineres med konventionelle gasturbiner, således at man kan komme op i nærheden af 50–60 % effektivitet, men så begynder man også at tale om store anlæg. Der er således fordele og ulemper forbundet med begge typer, og der vil formodentligt være markeder for begge i fremtiden.

Forskning i nye materialer

Et så vigtigt område som fremtidens energiforsyning er naturligvis noget der forskes i på globalt plan, og satsningerne er da også steget ganske betydeligt de sidste par år. For eksempel deklarerede Præsident Bush "Freedom Car" projektet i 2003 og afsatte ved den lejlighed \$ 1,2 mia. til projektet [14]. EU med Romano Prodi i spidsen har også afsat betydelige beløb til forskning i dette område. Samtidigt er en række nationale programmer også blevet skudt i gang. I Danmark blev der i 2001 initieret et program "Steps towards a Hydrogen Society" til 24 mio. kr. med deltagelse af Danmarks Tekniske Universitet, Århus Universitet, Risø, Haldor Topsøe A/S, Danfoss A/S og IRD A/S. Selv med et beløb af denne størrelse, er man nødt til at fokusere forskningen for at kunne gøre en forskel, og projektet tager derfor først og fremmest udgangspunkt i problemstillinger omkring anode materialer i brændselscellen og lagring af brint. Ydermere er projektet i udpræget grad grundforskningsorienteret selvom teknologioverførelse til danske virksomheder er sikret gennem firmaernes deltagelse i projekterne.



Figur 10. STM billeder af Pt(111)-overfladen med stigende (0–0.7ML) CO dækningsgrader. CO afbildes som små prikker medens det store mønster skyldes en Moiré-interferens mellem CO og Pt gitteret. Fra [15].

Som nævnt ovenfor er der mange forskellige problemstillinger der skal løses – selv inden for dette begrænsede område. Der er tiltag til at effektivisere de katalytiske processer, der skal omsætte fossile brændstoffer eller brintbærere i form af metanol eller ammoniak til ren brint. Der er projekter, der beskæftiger sig med at finde nye elektrodematerialer, som enten er mere resistente overfor forgiftning af CO og andre intermediater, eller ligefrem at udvikle helt nye materialer, der på sigt kan erstatte det dyre og sjældne Pt. Endelig er der også en betydelig indsats for at finde nye lagermedier for brint – alle er det områder som vil kræve egentlige gennembrud. Det vil ikke give nogen mening at forsøge at beskrive de mange projekter som er initieret under dette program, men i det følgende skal vi kort forsøge at beskrive den underlæggende filosofi gennem et enkelt projekt.

Som nævnt er forgiftning af anode materialet med enten CO eller andre intermediære forbindelser et seriøst problem med de metoder, der i overskuelig fremtid er til rådighed for fremstilling af brint.

Det er derfor af stor vigtighed at finde ud af hvordan man mindsker denne forgiftningseffekt. For eksempel ved man at Pt/Ru legeringer er betydeligt mere resistente overfor CO, men der hersker stor uenighed om hvorfor. Den gængse forklaring i elektrokemikredse har været at overfladen blev dækket af et CO overlag som sidder permanent på overfladen. Ved tilsætning af Ru blev overfladen først og fremmest mere reaktiv, således at der, når der blev opbygget et tilstrækkeligt overpotential, kunne ske en spaltning af vand og dermed en oxidation af CO til CO_2 , som ikke blokerer overfladen. Herved kunne der opstå huller i det ellers permanente CO overlag, som gjorde at brint ikke kunne spaltes og dermed kunne få brændselscellen til at fungere.

Nylige fundamentale undersøgelser foretaget i et tæt samarbejde mellem Århus Universitet og DTU har vist at dette billede ikke nødvendigvis er korrekt. Gennem Scanning Tunneling Mikroskopi (STM) studier i Flemming Besenbachers gruppe har man vist, at ganske vist

kan CO danne et tæt overlag på Pt overfladen, men at tætheden er dynamisk, og først ved høje CO tryk (~ 1 bar) mættes overfladen ved en dækningsgrad på ca. 0,7 CO pr. Pt atom i overfladen, se figur 10.

Dette billede, hvor mere og mere CO kan presses ind på overfladen, underbygges af teoretiske kvantemekanisk beregninger af Jens Nørskov og Bjørk Hammer hvor man rent faktisk kan forudsige sådanne fænomener med stadig større sikkerhed, og i særdeleshed hvordan CO bindingsenergien afhænger af dækningsgraden. Direkte målinger på kommercielle brændselsceller har ydermere i min gruppe vist at dette CO overlag ikke er permanent men dynamisk.

Ved først at adsorbere isotopmærket CO (^{13}CO) og dernæst måle, hvor hurtigt dette udskiftes med almindeligt CO har det været muligt at sætte tal på, hvor stabilt CO er på overfladen (se figur 8). Ved at kombinere disse data med de teoretiske modeller og information fra STM undersøgelserne står det nu klart, at CO desorptionsraten er langt større end den oxidationsmekanisme som ellers har været fremherskende.

Da såvel teoretiske modeller og eksperimenter ydermere klart har vist at additionen af Ru til overfladen især vil svække CO bindingsenergien, er det nærliggende at forfølge dette spor i fremtiden for at fremstille bedre elektrodematerialer [15].

Det vigtige her er naturligvis at forstå de grundlæggende principper som overfladefysikken kan give os. Skal man tilsætte mere reaktive metaller for at øge oxidationsraten eller skal man svække CO bindingsenergien. Dette er to vidt forskellige retninger og vil derfor kræve signifikant forskellige legeringer og dertilhørende begrænsninger. Tilsætning af mere reaktive metaller vil hurtigt medføre korrosionsproblemer da PEM brændselscellen udgør et særdeles ”surt” miljø. Skal man derimod reducere bindingsenergien af CO er det i højere grad et spørgsmål om at danne Pt overlag på et metal med mindre gitterafstand end Pt.

Denne måde at tune reaktiviteten af en overflade på er smukt forklaret i arbejder af Bjørk Hammer og Jens

Nørskov [16] og er nu ved at være internationalt anerkendt som "d-bånds skift modellen". Dette arbejde illustrerer hvordan man ud fra helt grundlæggende kvantemekaniske beregninger samt grundlæggende eksperimentel overfladefysik kan trænge til bunds i sådanne problemstillinger og derved formulere succesfulde strategier for hvilke legeringer man skal undersøge – f.eks. for at finde mere CO resistente forbindelser, og på længere sigt, men også langt mere ambitiøst, erstatningsmaterialer for Pt med lavere overpotentialer.

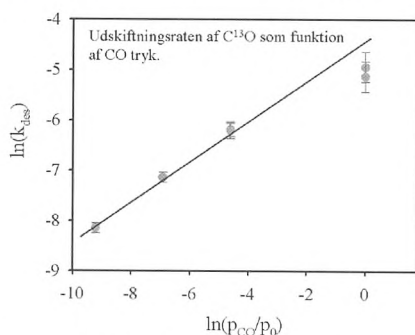


Fig. 11 viser at ^{13}CO udskiftes med betydelig hastighed og med en rate der er proportional til CO trykket over elektroden. Fra [15].

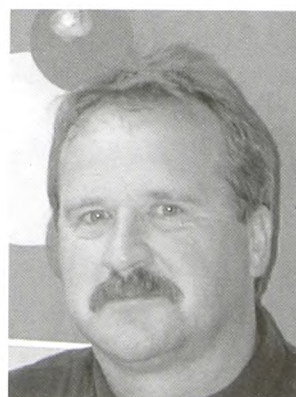
Opsummering

Brint er i sig selv ikke løsningen på vore fremtidige energiproblemer og miljøproblemer, men kan være en energibærer som passer godt ind i de måder hvorpå vi i fremtiden skal anskaffe og omsætte vedvarende energi. Den passer ydermere med brændselscelleteknologien der i disse år undergår en voldsom udvikling og som allerede i dag har et enormt teknologisk potentiale. Det vil derfor nok ikke være nogen helt dårlig ide at forske i og udvikle en ny teknologi før vi har pådraget os uoverskuelige irreversible miljøbelastninger og/eller den sidste dråbe olie er brændt af.

Referencer:

- [1] International Energy outlook 2003, U.S. Department of Energy, www.eai.doe.gov/oiaf/ieo/index.html.
- [2] "Concepts of Modern Catalysis and Kinetics", I. Chorkendorff and H. Niemantsverdriet, Wiley-VCH, Weinheim, (2003) ISBN 3-527-30574-2.
- [3] N. D. Marsh og H. Svensmark, Phys. Rev. Lett., **85** (2000), 5004. ibid **81** (1998) 5027. Se også www.dsri.dk/~hsv.

- [4] "The sceptical Environmentalist", B. Lomborg, Cambridge Univ. Press. Cambridge 2001.
- [5] Sir David King, Science **303** (2004) 176.
- [6] Materials for Clean Energy, Nature **414** (2001) 331.
- [7] "Environmental Physics", E. Boeker and R. Van Grondelle, Wiley (1999) ISBN 0 471 997803.
- [8] M. W. Hansen og J. S. Nielsen, Dansk Kemi, Maj (2002) 20.
- [9] "Brint som Energibærer", Dansk Gasteknisk Center A/S (1999) ISBN 87-7795-172-7.
- [10] www.platinum.matthey.com og www.engelhard.com/eibprices/defaultmain.aspx.
- [11] F. Besenbacher, I. Chorkendorff, B. S. Clausen, B. Hammer, A. M. Molenbroek, J. K. Nørskov og I. Steengaard, Science **279** (1998) 1913–1915.
- [12] A. Züttel, "Materials for hydrogen storage", Materials Today, Sep. (2003) 18–27.
- [13] H. F. Oetjen, V. M. Schmidt, U. Stimming and F. Trila, J. Electrochem. Soc. **143** (1996) 3838.
- [14] Freedom Car project, se www.hydrogen.org.au/hydrogen-car.htm
- [15] J. C. Davies, R. M. Nielsen, L. B. Thomsen and I. Chorkendorff, Á. Logadóttir, Z. Lodziana J. K. Nørskov, W. Li and B. Hammer, S. R. Longwitz, J. Schnadt, E. K. Vestergaard, R. T. Vang and F. Besenbacher submitted for Fuel Cell (2003).
- [16] B. Hammer and J. K. Nørskov, Adv. Catal. **45** (2000) 71.



Ib Chorkendorff er professor i heterogen katalyse og leder af ICAT (www.icat.dtu.dk) i en delt stilling mellem Institut for Fysik og Institut for Kemiteknik på DTU. Ib Chorkendorffs forskningsområde ligger i grænsefladen fysik/kemi og omfatter overfladefysik og materialefysik anvendt i forbindelse med heterogen katalyse og energiproduktion.

Brændselscellers fysik og kemi

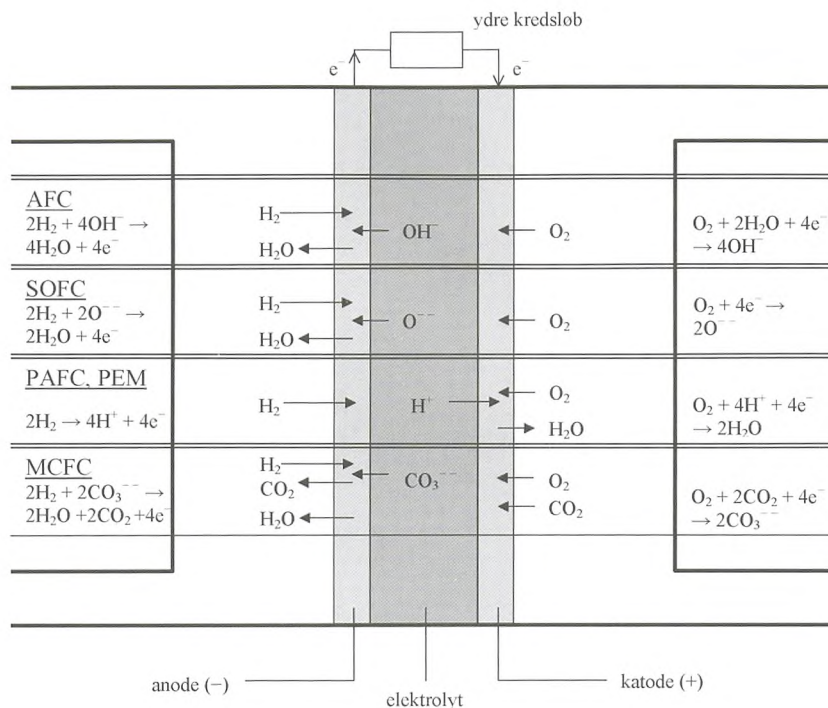
Anders Smith og Mogens Mogensen, Afdelingen for Materialeforskning, Forskningscenter Risø.

Brændselscellens princip

I en brændselscelle omsættes brint og luftens ilt til elektricitet med varme og vand som biprodukter. Selve navnet er lidt misvisende, for der sker ikke en sædvanlig forbrænding med en flamme i en brændselscelle, men derimod en direkte omsætning af kemisk energi til elektricitet. Man kan tænke på en brændselscelle som et elektrisk batteri, hvor opladningen sker løbende ved tilførslen af brint og ilt, således at en brændselscelle kan køre uafbrudt.

Der findes mange typer af brændselsceller, hvoraf nogle også kan omsætte naturgas (metan, CH_4) og kulgase foruden brint. Alle har det til fælles, at en celle består af en elektrolyt og to elektroder, ligesom celler i almindelige batterier. Elektroderne skal være katalytisk aktive, således at de kan omdanne enten brint (H_2) til positivt ladede brintioner (H^+) eller ilt (O_2) til negativt ladede ioner, der indeholder iltatomer, f.eks. O^{2-} eller OH^- (hvilken reaktion, der er tale om, afhænger af brændselscellens type).

De dannede ioner passerer gennem elektrolytten og reagerer på den anden side med ilt (hhv. brint), hvorved der dannes vand og evt. CO_2 . De tiloversblevne elektroner fra reaktionerne kan ikke passere elektrolytten, og der opstår derved en elektrisk potentialforskelle mellem cellens to sider. Denne potentialforskelle kan så bruges til at drive en elektrisk strøm i et ydre kredsløb. Figur 1 viser det grundlæggende princip i en brændselscelles opbygning samt de elektrokemiske reaktioner i de fem hovedtyper, som er benævnt efter deres elektrolyt: Den *alkaliske brændselscelle* (eng. "Alkaline Fuel Cell", AFC) med en elektrolyt bestående af vandigt kaliumhydroxid (KOH), *fosforsyrebrændselscellen* (eng. "Phosphoric Acid Fuel Cell", PAFC), *protonudvekslingsmembranbrændselscellen* eller *fast-polymer-protonleder-brændselscellen* (eng. "Proton Exchange Membrane Fuel Cell" eller "Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell", PEMFC eller blot PEM), hvor elektrolytten er en protonledende polymer (ofte bruges materialet Nafion fra firmaet DuPont), *smeltet-carbonat-brændselscellen*



Figur 1. Principskitse af de fem hovedtyper af brændselsceller. De elektrokemiske reaktioner i anoden og katoden er angivet, når brint anvendes som brændsel. For alle typer er bruttoreaktionen den samme: $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{elektricitet} + \text{varme}$.

(eng. "Molten Carbonate Fuel Cell", MCFC) og endelig *fastoxidbrændselscellen* (eng. "Solid Oxide Fuel Cell", SOFC), som har en keramisk elektrolyt, der kan lede iltioner. De engelske forkortelser anvendes sædvanligvis også på dansk. I tabel findes en oversigt over de fem hovedtyper.

Elektrolytten skal være en god ionleder, men må ikke lede elektroner (da cellen ellers vil blive kortsluttet). Derimod skal de to elektroder være gode elektronledere og desuden være porøse, så gas kan komme ind i dem og reagere. Det er vigtigt, at den porøse struktur er udformet, så der bliver det størst mulige kontaktareal mellem de tre faser: ionledende elektrolyt, elektronledende elektrode og gasfasens reaktanter. Det er i disse såkaldte trefasegrænser, at reaktionerne forløber; som det ses af reaktionsskemaerne i figur 1, indgår både ioner, elektroner og gasmolekyler i begge elektrodeprocesser, uanset hvilken type brændselscelle, der er tale om. I det følgende betragter vi en SOFC, men princippet er det samme for de andre typer: De iltioner, der dannes på katodesiden af SOFC-cellen, vil forbruges på anodesiden. Anodereaktionen fjerner således de negativt ladede iltioner fra det tynde grænselag i elektrolyt-

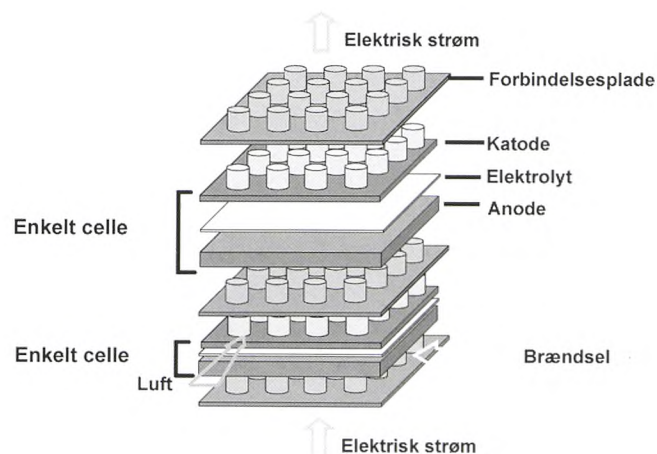
Dansk navn	Den alkaliske brændselscelle	Protonudvekslingsmembran-brændselscellen	Fosforsyre-brændselscellen	Smeltet-carbonat-brændselscellen	Fastoxid-brændselscellen
Engelsk navn	Alkaline Fuel Cell	Proton Exchange Membrane Fuel Cell	Phosphoric Acid Fuel Cell	Molten Carbonate Fuel Cell	Solid Oxide Fuel Cell
Sædvanlig anvendt forkortelse	AFC	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Elektrolyt	Vandig opløsning af KOH	Protonledende polymermembran	Ortofosforsyre	KLiCO ₃	YSZ, dvs. ZrO ₂ doteret med Y ₂ O ₃
Anode	Porøst nikkel	Grafit med platin-katalysator	Grafit med platin-katalysator	Porøst nikkel	Nikkel-cermet, dvs. en fin blanding af metallisk nikkel og YSZ-keramik
Katode	Porøst nikkel	Grafit med platin-katalysator	Grafit med platin-katalysator	NiO med Li ₂ O	LaMnO ₃ doteret med SrO
Brændsel	Absolut ren H ₂	Ren H ₂	CO-fri H ₂ (tåler CO ₂)	H ₂ + CO, naturgas	H ₂ + CO, naturgas
Sædvanlig driftstemperatur, °C	100	80–100	150–200	650	500–1000
Virkningsgrad, %	40	40	40	60	60

Tabel 1. Egenskaber ved de fem hovedtyper af brændselsceller. Virkningsgraderne er angivet med metan som udgangsbrændsel og i % af metans øvre brændværdi (jvf. nedenfor).

ten, der støder op til anoden. Da de dannede elektroner (som jo også er negativt ladede) ikke kan bevæge sig ind i elektrolytten, opbygges der derved en positiv ladning i dette grænselag. Denne ladning giver (sammen med en tilsvarende negativ ladning i grænselaget mellem katode og elektrolyt) anledning til en potentialforskel hen over elektrolytten. Potentialforskellen driver ilt-ionerne gennem elektrolytten, og på denne måde kan der til stadighed opretholdes en spændingsforskel over cellen. En kemiker vil sige, at spændingsforskellen skyldes, at den samlede ændring i Gibbs' fri energi for de elektrokemiske reaktioner i cellen er negativ; når der ikke trækkes strøm fra cellen, vil den samlede reaktion derfor forløbe, indtil den elektrostatiske energi som følge af adskillelsen af ioner og elektroner er lig med ændringen i Gibbs' fri energi:

$$\Delta G + nF\mathcal{E} = 0, \quad (1)$$

hvor ΔG er ændringen i Gibbs' fri energi pr. mol, $n = 4$ er antallet af elektroner, der er involveret i reaktionen, $F = 96485,3383$ coulomb/mol er Faradays konstant (dens talværdi er ladningen af 1 mol elektroner), og $\mathcal{E}$ er spændingsforskellen over den ubelastede celle, også kaldet den elektromotoriske kraft. Hvis man ind sætter talværdier for de specifikke reaktioner, får man for alle typer brændselsceller en elektromotorisk kraft på omkring 1 volt. For at få teknologisk brugbare spændinger er det derfor nødvendigt at forbinde mange celler i serie i en såkaldt stak. Den elektriske set optimale måde er at anvende flade celler, som stables som vist i figur 2. På den måde bliver de indre elektriske spændingstab mindst mulige, da strømmens vej i cellen minimeres. Andre geometrier, f.eks. rørformede celler, anvendes dog også i begrænset omfang, da sådanne celler kan give produktionsmæssige fordele.



Figur 2. Opbygningen af en brændselscellestak med flade celler. Denne opbygning gør strømmens vej gennem cellerne mindst mulig og giver dermed de færreste indre tab. Forbindelsespladen, der skal adskille luft (ilt) og brændsel, kan udformes på forskellig vis, f.eks. med kanaler. Den viste type er udviklet på Forskningscenter Risø.

Brændselscellens fordele

Ved sædvanlig elproduktion forbrænder man et brændsel og skaber derved en gas med høj temperatur. Den kan udnyttes til at udføre et mekanisk arbejde i f.eks. et stempel eller en turbine, og det mekaniske arbejde kan derefter omsættes til elektricitet. I en brændselscelle sker der derimod en direkte omsætning af kemisk bundet energi til elektrisk energi uden mellemtrin, og brændselsceller er derfor ikke underlagt de samme termodynamiske begrænsninger som en maskine, der er baseret på Carnots kredsproces (f.eks. en stempelmotor eller en turbine). Derfor er der mulighed for at få en

høj virkningsgrad. Hvis det anvendte brændstof er ren brint, vil en brændselscelle kun udlede vand som spildprodukt, men da brint ikke findes frit i naturen, må det fremstilles ud fra enten kulbrinter (med CO_2 -udledning til følge) eller ved elektrolyse af vand (hvortil der skal anvendes elektricitet, der, hvis den er produceret på et sædvanligt kraftværk, også har givet anledning til CO_2). Og hvis man anvender naturgas direkte som brændsel, vil der også produceres CO_2 fra cellen. Imidlertid er CO_2 -udslippet lavere pr. produceret kW sammenlignet med sædvanlige kraftværker. Temperaturen i brændselsceller er desuden lav sammenlignet med temperaturen i en flamme, hvorfor der ikke dannes nitrogenoxider (NO_x), så brændselsceller forurener mindre. Sammenfattende kan brændselscellernes potentielle fordele siges at være

- høj virkningsgrad
- lav miljøbelastning
- ingen NO_x
- mindre CO_2
- lavt støjniveau (få roterende dele)
- modulær opbygning, dvs. at både store og små anlæg har omtrent samme pris pr. kW installeret effekt og samme brændselsvirkningsgrad.

Opdagelse og tidlig historie

I 1839 gjorde den engelske fysiker William Grove en bemærkelsesværdig opdagelse. Han havde elektrolyseret fortyndet svovlsyre mellem to platinelektroder med det velkendte resultat: Vandet blev spaltet, og brint boblede op ved den negative elektrode og ilt ved den positive. Da Grove kobede sin strømkilde fra, opdagede han, at processen også kunne løbe den anden vej. Den smule ilt og brint, som sad tilbage på elektroderne, kunne faktisk producere en svag elektrisk strøm. William Grove havde dermed opdaget brændselscellen. Der skulle dog gå mange år, før nogen begyndte at udvikle brændselsceller til produktion af elektricitet.

Brændselscelleforskningen fik den første større landvinding, da den tysk-britiske kemiker Ludwig Mond og hans medarbejder Carl Langer i 1890'erne indførte porøse elektroder. I 1895 lykkedes det den amerikanske ingeniør og kemiker William W. Jacques at lave et større system af brændselsceller, som kunne levere energi af en rimelig størrelse. Jacques sammenkoblede 100 brændselsceller. De bestod hver af en jernelektrode og en kulanode, placeret i smeltet kaliumhydroxid ved 450°C . Der blev blæst atmosfærisk luft ned omkring jernelektroden. Kulanoden var cellens brændstof, som blev oxideret til karbonat. Brændselscellebatteriet kunne yde halvanden kilowatt – nok til at

holde 25 almindelige pærer lysende. Men ikke særlig længe, for karbonatet aflejrede sig omkring kulanoden og blokerede cellen.

Lavtemperaturbrændselsceller

En væsentlig epoke begyndte, da den britiske ingeniør Francis Thomas Bacon i 1933 startede udviklingen af de alkaliske brændselsceller (AFC). De indeholdt kaliumhydroxid i vandig opløsning ved 200°C . Elektroderne af porøs nikkel fik tilført brint og luft ved 45 atmosfærers tryk. Udvikling af brændselsceller tager imidlertid lang tid. Først i 1959 havde F.T. Bacon et 5 kW demonstrationsanlæg klar.

Men AFC har endnu ikke fået et kommercielt gennembrud. Det skyldes hovedsagelig, at den ikke tåler CO_2 . Det reagerer nemlig med OH^- og danner CO_3^{2-} , hvorved elektrolytten ødelægges. Det er nødvendigt, at CO_2 -indholdet i såvel brinten som luften er helt nede på nogle få ppm (parts per million). Det er naturligvis ganske dyrt at fremstille så rene gasser. AFC har dog fået en nicheanvendelse, idet NASA anvendte dem på Apolloprogrammets bemandede flyvninger til Månen og anvender dem på rumfærgen i dag. Til disse anvendelser er prisen ikke afgørende, men effekten pr. kg samt manglen på spildprodukter fra cellen, der kører på ren brint: Vandet, som udledes fra cellen, anvendes til astronauternes forsyninger.

I 1960'erne og 1970'erne begyndte man at udvikle CO_2 -tolerante celler. Den ene type, protonudvekslingsmembran-cellen (PEMFC), har en protonledende ionbyttermembran som elektrolyt. Membranen er ganske dyr og skal for at fungere være mættet med vand, hvilket begrænser det anvendelige temperaturområde. Ved den relativt lave temperatur forgiftes platinkatalysatoren i cellens anode desuden af CO (carbonmonoxid), hvorfor man ikke kan anvende brint fremstillet ved omdannelse (reforming) af kulbrinter uden en fordyrende rensning. Alligevel foregår der i disse år et intensivt udviklingsarbejde på PEMFC, da man mener, at denne type vil være den mest velegnede til anvendelser i biler (se nedenfor). En variant af PEMFC, *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC), anvender metanol (træsprit) som brændsel uden forudgående reformering. Det flydende brændsel er let at håndtere, og denne type vil være velegnet som energikilde til mobiltelefoner, bærbare pc'ere og lignende, hvor dens kapacitet vil være væsentlig større end batteriers.

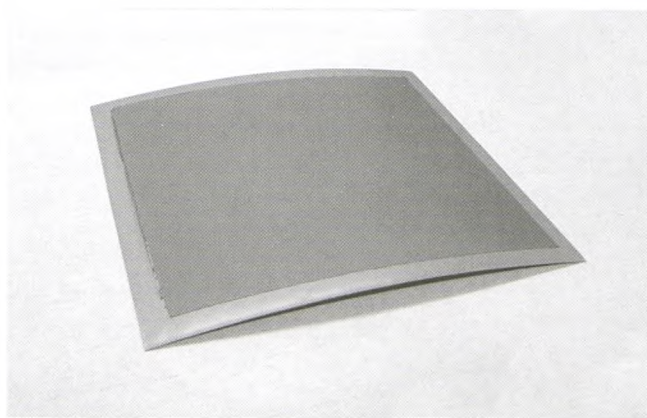
Den anden type er fosforsyrecellen, der var genstand for et stortilet udviklingsprogram i 1970'erne. Elektrolytten er fosforsyre ved $150\text{--}200^\circ\text{C}$, der er CO_2 -afvisende. PAFC-systemer er kommercielt tilgængelige i dag og anvendes i bl.a. hospitaler, skoler og hoteller som selvstændig energiforsyning eller nødstrømsanlæg; et typisk anlæg er på et par hundrede kW. De spås dog ikke nogen bredere anvendelse.

Lavtemperaturbrændselscellerne har det fælles problem, at de ikke kan omsætte kulbrinter eller kul-

monoxid direkte. Det er således nødvendigt, at de forsynes med brint, som sædvanligvis må fremstilles ud fra fossilt brændsel. Brinten må desuden ikke indeholde CO (PAFC tåler dog lave CO-koncentrationer på omkring 100 ppm). Reformeringen af det fossile brændsel til brint indebærer et betydeligt energitab, således at den resulterende virkningsgrad bliver på omkring 40% af øvre brændværdi for metan (se tabel). En bedre virkningsgrad skulle være et hovedargument for at anvende brændselsceller, men da gasturbiner, som anvendes til elproduktionen i stationære kraftværker i dag, kører med en virkningsgrad på over 40%, falder dette argument bort. Derfor er den mest lovende anvendelse for lavtemperaturcellerne (i særdeleshed PEMFC) da også forholdsvis små anlæg til transport og mobile anvendelser.

Højtemperaturbrændselsceller

Højtemperaturcellerne MCFC og SOFC kan omsætte såvel naturgas som CO enten ved intern reformering eller ved en mere direkte omsætning, alt afhængig af elektrodetyper. Det betyder, at de har en betydelig højere virkningsgrad end lavtemperaturcellerne. Begge typer blev opfundet af den schweiziske kemiker E. Baur i 1920'erne og 1930'erne. Det er dog først efter 1980, at udviklingen af dem for alvor har taget fart. Der er bygget demonstrationsanlæg af begge typer i en størrelse på over 100 kW.



Figur 3. Fastoxidbrændselscelle udviklet og produceret på Forskningscenter Risø. Det aktive areal (det mørke område) er 12 cm×12 cm. Tykkelsen er under 1 mm.

I MCFC er det nødvendigt at tilføre CO₂ sammen med luften til katoden, idet det er CO₃²⁻-ionen, som står for ladningstransporten. I tilfælde af, at man omsætter CH₄ i cellen, dannes der også CO₂. Men det dannes ved anoden, hvilket betyder, at det er nødvendigt at udvinde CO₂ fra anodeudstødningen og tilsætte det til katodeindblæsningen. Den flydende saltsmelte mættet med O₂ og CO₂ i MCFC'en er uhyre korrosiv. Dette er det største problem for MCFC i dag, idet det begrænser cellens levetid. Men til trods for dette er der stadig udviklingsaktiviteter i gang for at få dem kommerciali-

seret, fortrinsvis anvendt i store, centrale kraftværker.

SOFC, som er lavet helt igennem af faste oxider (keramiske materialer), synes på mange områder at have de største potentielle muligheder. I demonstrationsanlæg har man vist en høj virkningsgrad (> 50%) og lang levetid (> 50 000 h). Den forholdsvis høje driftstemperatur gør det også muligt at udnytte spildvarmen, enten til fjernvarme eller til at drive en gasturbine, hvorved virkningsgrader helt op til 75% vil være mulige. Siden slutningen af 1980'erne har denne type brændselscelle (sammen med PEMFC til transport og mobile anvendelser) været anset for den mest lovende.

En SOFC fremstår som en tynd plade med et areal på f.eks. 15×15 cm². Pladen er opbygget af en række tynde lag af keramiske materialer. Gennem de sidste 10 år har der været et intensivt udviklingsarbejde for at forbedre materialerne og billiggøre fremstillingsteknologien. Foreløbig er det lykkedes at reducere driftstemperaturen fra 1000 °C til ca. 700 °C, og man regner med, at det vil være muligt at få den endnu længere ned. Dette vil gøre det muligt at fremstille cellen med et bærende underlag af metal, hvilket vil mindske prisen betydeligt.

Om virkningsgrader

Virkningsgraden af en maskine eller et kraftværk er forholdet mellem det nyttige arbejde, maskinen producerer, og den mængde energi, den skal tilføres for at gøre det. I forbindelse med elværker beregnes virkningsgrader ofte med udgangspunkt i den øvre brændværdi af udgangsbrændslet (% HHV = % of Higher Heating Value). Den øvre brændværdi er lig med den varmemængde pr. mol, der udvikles, når brændstoffet forbrændes fuldstændigt, og både udgangsprodukterne og reaktionsprodukterne befinder sig ved 25 °C (298 kelvin) og et tryk på 1 atm. Denne varmemængde er lig med minus ændringen i entalpien ved 298 K og 1 atm (den såkaldte standard-entalpi, H_{298}^0) ved reaktionen. Den maksimale arbejds mængde, man kan få ud af en kemisk reaktion, der forløber ved konstant temperatur og tryk, er lig med ændringen i Gibbs' fri energi, G . Da sammenhængen mellem entalpi og fri energi er givet ved $G = H - TS$, hvor T er temperaturen og S entropien, bliver virkningsgraden af en brændselscelle

$$\eta_t = \frac{\Delta G}{\Delta H_{298}^0} = \frac{\Delta H - T \Delta S}{\Delta H_{298}^0}, \quad (2)$$

hvor Δ angiver forskellen mellem slut- og begyndelsestilstand, og G , H og S udregnes ved den givne driftstemperatur T og de givne trykforhold i brændselscellen.

For maskiner, der er baseret på Carnots kredsproces, gælder, at

$$\eta_{t, \text{Carnot}} = \frac{T - T_0}{T}, \quad (3)$$

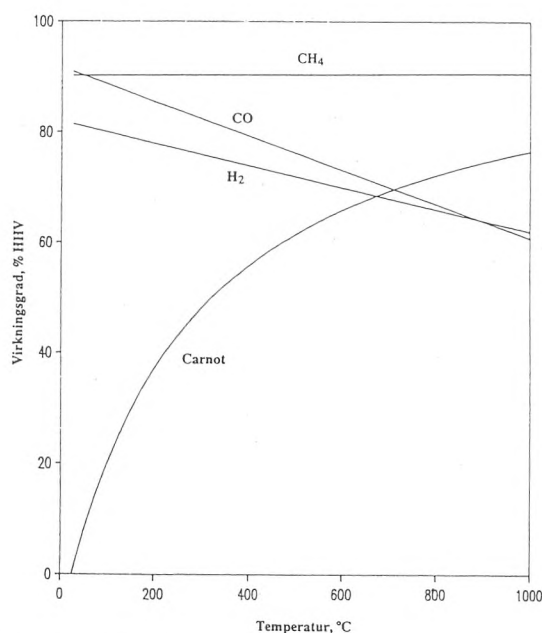
hvor T igen er driftstemperaturen og T_0 er temperaturen i afgangsgassen (udstødningsgassen). Dette er

den højest opnåelige virkningsgrad for en maskine, der har termisk energi som et mellemtrin.

Figur 4 viser en sammenligning af de teoretiske virkningsgrader for brændselsceller for tre forskellige brændselsgasser (H_2 , CO og CH_4) sammen med Carnot-kurven. Det ses, at kun for CH_4 som brændsel er virkningsgraden meget højere end for Carnots kredsproces i hele temperaturområdet 25-1000 °C. Forklaringen på forskellen i virkningsgradens temperaturafhængighed for de forskellige brændselsgasser ses af antallet af gasmolekyler på venstre og højre side af bruttoreaktionsligningerne:



I (4) og (5) ændres antallet af gasmolekyler ved reaktionen fra 3 til 2, hvilket giver anledning til en forøgelse af ΔS og dermed en temperaturafhængig reduktion af η_t . I (6) sker der ingen ændringer i molekyleantallet.



Figur 4. En brændselscelles teoretiske virkningsgrad for tre forskellige brændsler, vist som funktion af driftstemperaturen. I beregningen er der antaget, at alle reaktanter og produkter har partialtrykket 1 atm. Til sammenligning er virkningsgraden for Carnots kredsproces angivet.

I praksis når man naturligvis ikke den teoretiske virkningsgrad, da der altid er indre tab i cellerne. Tabene bevirker, at spændingen over en celle er mindre end den termodynamisk beregnede elektromotoriske kraft; et sådant spændingstab kaldes for en *polarisation*. Polarisationen afhænger dels af elektrodernes elektrokemiske egenskaber (f.eks. hvor hurtigt elektrodereaktionerne forløber), dels af cellens in-

dre (ohmske) modstand. Modstanden kan mindskes ved at have materialer med større ledningsevne og ved at vælge en opbygning, så strømmen skal løbe kortest muligt i de tynde elektroder.

I første tilnærmelse er den indre modstand R_i (inkl. bidrag fra elektrodernes polarisation) uafhængig af strømtætheden j (strømmen pr. tværsnitsareal).¹ Det vil sige, at Ohms lov kan anvendes, og der fås følgende simple sammenhæng:

$$P = \mathcal{E}j - R_i j^2, \quad (7)$$

hvor P er effekttætheden, og $\mathcal{E}$ er den ubelastede cellespænding (den elektromotoriske kraft). Cellespændingen U er:

$$U = \mathcal{E} - R_i j. \quad (8)$$

Spændingsvirkningsgraden η_v defineres som

$$\eta_v = \frac{U}{\mathcal{E}}. \quad (9)$$

Da $\mathcal{E}$ for brændselsceller er nær en volt, bliver cellespændingen (i volt) ved en given belastning derfor tilnærmelsesvis lig med η_v .

Den faktiske virkningsgrad η er

$$\eta = \eta_t \cdot \eta_v \cdot \alpha, \quad (10)$$

hvor α er brændslets udnyttelsesgrad (undertiden også kaldet omsætningsgraden). Den er lig med mængden af omsat brændsel divideret med mængden af tilført brændsel. I ligning (10) er η virkningsgraden målt ud fra den øvre brændværdi af den gas, som tilføres cellen. Tab fra f.eks. ekstern reformering af kulbrinter til brint er således ikke indeholdt i ligningen.

Det viser sig, at prisen på et brændselscelleanlæg med god tilnærmelse er proportional med cellernes indre modstand. En stor del af udviklingsbestræbelserne går derfor på at udvikle nye materialer, der kan give en lavere modstand.

Anvendelser

Der ofres betydelige resurser internationalt på at udvikle brændselscelleteknologierne til et stade, hvor de er kommercielt konkurrencedygtige. USA og Japan har store forskningsindsatser, både i privat og i offentligt regi, men også EU har gennem flere år støttet brændselsceller. USA fremlagde i 2003 en vision om et brint-baseret samfund, hvori brændselsceller vil spille en central rolle, og støtter en række initiativer inden for bl.a. PEMFC og SOFC. Også EU har brændselsceller højt oppe på dagsordenen. I den EU-strategi for fremtidens bæredygtige energi, der blev fremlagt sidste år, er brændselsceller et af de tre centrale emner (sammen med vedvarende energi og alternative brændsler).

¹Mere præcist er R_i den arealspecifikke modstand med enheden ohm-meter². Hvis cellens tværsnitsareal er A , er cellens modstand altså R_i/A , på samme måde som den samlede strøm gennem cellen er lig med jA .

I spørgsmålet om konkurrencedygtighed er der tre hovedpunkter: (anlægs)pris, levetid og virkningsgrad. Kravene til en acceptabel pris og levetid varierer efter anvendelsen. F.eks. er prisen på en sædvanlig bilmotor under 400 kr. pr. kW effekt med en forventet levetid på normalt under 3000 timers drift (300 000 km med 100 km/h), hvilket er ca. 4 måneder. En så kort levetid er naturligvis helt uacceptabel for kraftværker, der kræver mange års levetid for anlæggene. Omvendt kan en meget høj pris være acceptabel til specielle formål, f.eks. nødstrømsanlæg på et hospital. Det vil formentlig være i sådanne nicheanvendelser, man først vil se brændselscellesystemer i handelen; her forventes et egentligt kommercielt gennembrud for både PEMFC og SOFC at blive nået i løbet af 5-10 år.

Mobile anvendelser

I mobiltelefoner og bærbare computere anvender man i dag batterier. De har forholdsvis kort levetid på hver opladning, og opladningen tager lang tid. I et brændselscellesystem kan energitætheden være op til 10 gange større end i et batteri, hvilket giver mulighed for en længere anvendelsestid. Man er ved at udvikle små DMFC-systemer, hvor genopfyldningen sker blot ved at udskifte en tømt metanolbeholder på f.eks. 25 cm³. Bl.a. Toshiba har i 2003 demonstreret sådanne systemer til bærbare computere.

Transport

En stor del af udviklingen inden for PEMFC er rettet mod et system, der kan erstatte forbrændingsmotoren i biler. De fleste store bilproducenter har forsknings- og udviklingsprogrammer inden for området, og bl.a. Mercedes og General Motors har fremvist funktionsduelige demonstrationsmodeller. På et rent økonomisk grundlag bliver det dog svært at konkurrere med en forbrændingsmotor: Et fuldstændigt fremdriftssystem vil bestå af en tank til lagring af brændstoffet (formentlig brint, ellers skal systemet også omfatte en reformer), et brændselscellesystem og en elmotor. Men prisen på elmotoren alene er sammenlignelig med en forbrændingsmotors pris, og der er desuden stadig uafklarede tekniske problemer, bl.a. med lagringen af brinten. Derfor vil det i høj grad være miljøpolitiske beslutninger, der kommer til at drive udbredelsen af brændselscellebiler. Perspektivet med et stærkt forbedret luftmiljø i storbyerne gør dog, at udviklingsarbejdet har høj prioritet. Også spørgsmål om forsyningssikkerhed, f.eks. at være uafhængig af importeret olie og benzin, kan komme til at spille en rolle for brændselscellebilens fremtid. Tidshorizonten for en større omlægning af bilindustrien til brændselsceller er formentlig mindst 20 år.

Et andet sted i transportsektoren, hvor brændselscellerne måske kan få et hurtigere gennembrud, er som ekstra strømforsyning til at forsyne de mange elektriske apparater, der efterhånden kommer i bilerne. Også

på lastbiler og skibe spår man brændselscellerne gode chancer for at erstatte de forurenende og ineffektive dieselgeneratorer, der i dag bruges til at generere strøm, når hovedmotoren ikke er i gang (f.eks. når chaufføren på en kølelastbil holder pause).

Stationære anvendelser

En af brændselscellernes store fordele er, at det er muligt at bygge både store og små anlæg med samme høje virkningsgrad. Og små stationære anlæg i størrelsesordenen 5 kW åbner et spændende perspektiv: Det vil være muligt at have et villasystem baseret på SOFC og med naturgas som brændsel, der både producerer elektricitet og varme. Hvis man bruger mindre elektricitet, end anlægget producerer, kan overskuddet sendes ud på elnettet. Udbredelsen af sådanne anlæg åbner mulighed for en helt ny organisering af energisektoren, hvor energiproduktion næsten udelukkende vil ske decentralt.

Egentlige kraftværker i størrelser fra 200 kW (som f.eks. kan forsyne et hospital) til flere MW (et decentralt kraftværk) er også lovende muligheder. Højtemperaturbrændselscellerne gør det muligt enten at have en samtidig produktion af elektricitet og varme (kraftvarmeværk) eller at anvende varmen til at drive en gasturbine, hvorved man kan opnå meget høje virkningsgrader for elproduktionen.

Energilagring

Som allerede Grove opdagede, er en brændselscelle et "omvendt" elektrolyseapparat. Og faktisk kan man ved at påtrykke en ydre spænding over cellen få de fleste typer af brændselsceller til at fungere som en elektrolysator, hvor vand spaltes til ilt og brint. Specielt vil SOFC-typen være velegnet. En sådan SOEC (*Solid Oxide Electrolysis Cell*) vil kunne få stor betydning i takt med, at en stadig større del af vores elektricitet produceres af vindmøller. Et af problemerne ved vindenergi er jo, at den kun produceres, når det blæser. Men ved at koble et SOEC-system sammen med en vindmølle, kan man udjævne energiproduktionen fra møllen: Når der er overskud af vind, anvendes overskuddet til at elektrolysere vand til ilt og brint; og når der er vindstille, bruges brinten til at producere elektricitet i et brændselscelleanlæg.

Forskning og udvikling i Danmark

De sidste 15-20 år har der været forskning og udvikling inden for brændselsceller i Danmark. I dag er indsatsen koncentreret om PEMFC og SOFC. Inden for PEMFC arbejder forskergrupper på DTU, AAU og SDU, og flere firmaer, bl.a. IRD Fuel Cells A/S, APC Denmark og Danish Power Systems, har udviklingsaktiviteter.

Den største danske forsknings- og udviklingsindsats ligger på SOFC-området. I Afdelingen for Materialeforskning på Forskningscenter Risø arbejder ca. 50 personer med SOFC-udvikling, og flere universiteter,

bl.a. DTU og SDU, har mindre forskningsindsatser på området. Arbejdet på Risø sker i tæt samarbejde med Haldor Topsøe A/S, som vil stå for den fremtidige kommercielle produktion. Man håber at have en kommerciel produktion af celler inden for 5 år.



Anders Smith er ph.d. i fysik fra Københavns Universitet, Ørsted Laboratoriet. Han har i en årrække arbejdet som fagredaktør og redaktionssekretær ved Den Store Danske Encyklopædi og Gyldendal Leksikon. Siden 2003 har han været akademisk medarbejder ved brændselscelleprogrammet på Forskningscenter Risø.

Både PEMFC- og SOFC-aktiviteterne er støttet af Energistyrelsen, af selskaberne Elkraft System og Eltra, der er de systemansvarlige for elforsyningen i Danmark, samt af EU.



Mogens Mogensen er ph.d. fra Danmarks Tekniske Universitet, Institut for metallurgi. Fra 1980 har han været tilknyttet Forskningscenter Risø. Han har arbejdet med SOFC siden 1987 og bl.a. været leder af brændselscelleprogrammet; han er medforfatter til over 200 videnskabelige artikler og patenter. I 2003 blev han udnævnt til forskningsprofessor ved Risø.

Nyt fra Astronomisk Selskab

Astronomisk Selskab

Hjemmeside: AS.dsri.dk

Michael Quaade (formand)
Hviddingvej 48
2610 Rødovre

E-mail: mq@dsri.dk
Tlf. 36 72 36 34 (priv.) / 43 58 69 47 (arb.)

Knud Strandbæk (næstformand)
E-mail: canute@mail.dk

Hans Sørensen (kasserer)
Stavnsholtvej 32
3520 Farum

E-mail: hans-soh@post1.tele.dk
Tlf. 44 95 11 79



Program for dagen:

10:30 Foredrag ved lektor Ole Ahlgren:

Fotometri og spektrometri med digitalkamera

Ole Ahlgren har udviklet en fremgangsmåde der på grundlag af optagelser med et almindeligt digitalkamera og programmerne Photoshop og Excel muliggør magnitudestemmelse af stjerner.

12:00 Frokost

Vi holder en times frokostpause inden generalforsamlingen. Øl og vand kan købes på stedet og mad kan bestilles hos: Paul Elmo Pedersen, 3967 9760, paul.elmo.pedersen@skolekom.dk

13:00 Generalforsamling

Dagsordenen findes i *Knudepunktet* 2004/1. Der er kun adgang for medlemmer af Astronomisk Selskab.

15:00 Foredrag ved Martin Götz, tidligere Teoretisk Astrofysik Center, nu Frederikssund Gymnasium:

Dannelse og udvikling af galakser og galaksehobe

Moderne computersimuleringer gør det i dag muligt at studere, hvordan galakser og galaksehobe i det tidlige univers kunne opstå ud fra en næsten homogen fordeling af stof. Vi skal følge galaksernes og hobenes historie fra de første små byggeklodser til at være nutidens mest storslåede strukturer i universet.

Foredragsrækken

I selskabets foredragsrække præsenteres nogle af de værktøjer som i dag er kilden til ny viden om rummet. De kommende foredrag finder sted **kl. 19.15** på adresserne:

Astronomisk Selskabs generalforsamling, lørdag den 17. april 2004

Traditionen tro er den årlige generalforsamling i Astronomisk Selskab en begivenhed, hvor vi indbyder interesserede til et par foredrag og mulighed for at møde foreningens medlemmer og bestyrelse. Der er adgang for alle til foredragene og frokosten mens den egentlige generalforsamling kl. 13-15 er forbeholdt AS medlemmer. Generalforsamlingen afholdes på Astronomisk Observatorium, Juliane Maries Vej 30, 2100 København Ø.

København:
Auditoriet, Juliane Maries Vej 30
2100 København Ø

Århus:
Matematisk Institut, Aarhus Universitet
Ny Munkegade, Bygning 530
8000 Århus C

- Bjarne Thomsen:
Gravitationsbølge–astronomi.
15. marts i København og 22. marts i Århus
- Michael Linden-Vørnle:
Universets lange bølger – astronomi fra det in-

frarøde til radio.

19. april i København og 26. april i Århus

- Bertil Dorch:
Computere i astronomi, simulering, visualisering.
10. maj i København og 17. maj i Århus

Foredragene afholdes i samarbejde mellem Astronomisk Selskab, Tycho Brahe Planetarium og Folkeuniversitetet. De er tilrettelagt af Michael Linden-Vørnle, Kristian Pedersen, Michael Quaade og Bjarne Thomsen.

Nyt fra Dansk Fysisk Selskab

Dansk Fysisk Selskab

Hjemmeside: www.nbi.dk/dfs

Henrik Bruus (formand)
MIC bygn. 345Ø, DTU
2800 Kongens Lyngby

E-mail: bruus@mic.dtu.dk
Tlf. 4525 6399 / Fax 4588 7762



Jan W. Thomsen (næstformand) (jwt@fys.ku.dk)

Erik Horsdal Pedersen (kasserer) (horsdal@ifa.au.dk)

Per Morgen (per@fysik.sdu.dk)

Ole Bakander (ole.bakander@post.tele.dk)

Dorthe Posselt (dorthe@mmf.ruc.dk)

Hans C. Fogedby (fogedby@ifa.au.dk)

Poul V. Thomsen (pvt@ifa.au.dk)

derbilt Univ, Nashville) *Solid State Interfaces in the Nano Age*. Derudover vil der være parallelsessioner om astrofysik, atomfysik, faststoffysik, højenergifysik, geofysik samt uddannelse og undervisning. Sideløbende hermed vil forskningsresultater blive præsenteret som posters. DFS lægger herunder særlig vægt på at give yngre forskere mulighed for at præsentere deres resultater for en bredere kreds. Endelig vil en række firmaer demonstrere nyt forskningsapparat på en udstilling.

Alle landets fysikere opfordres til at deltage i Dansk Fysisk Selskabs årsmøde med indlæg og posters og ikke mindst til at bidrage til en livlig diskussion.

Program

Årsmødeprogrammet findes på DFS's hjemmeside (www.nbi.dk/dfs). Det vil løbende blive opdateret i takt med modtagelsen af indsendte abstracts. Det endelige program forventes at være klart medio maj.

DFS årsmøde 2004

Dansk Fysisk Selskab afholder sit årsmøde 2004 på Hotel Nyborg Strand. Mødet starter torsdag den 27. maj kl. 11 og slutter fredag den 28. maj kl. 17. På andendagen afholder DFS sin årlige generalforsamling. Bemærk iøvrigt, at der efter årsmødet i september 2004 er valg til DFS-bestyrelsen. Se flere detaljer nedenfor.

Som de foregående år afholdes det årlige astronomimøde, sponsoreret af SNF's Instrumentcenter for Jordbaseret Astronomisk Forskning (IJAF) sammen med DFS årsmødet. Dagen før DFS-årsmødet, onsdag den 26. maj, holder netværk for Kvinder i Fysik (KIF) sit årlige møde.

DFS-årsmødet vil indeholde følgende plenarforedrag: Peter V. E. McClintock (Lancaster University) *Non-linear dynamics*, Claudia Veigel (NIMR, London) *Motor-proteins*, Reinhard Genzel (MPI, Graching) *Massive Black Holes in Galaxies*, Len Feldman (Van-

DFS posterprisen 2004

DFS ønsker at opretholde det øgede fokus indledt sidste år på årsmødets postersession. Kriterierne, som komiteen efter bedste evne vil benytte under udvælgelsen af årsmødets bedste poster er følgende: Originalt videnskabeligt indhold, rimelig informationsmængde, æstetik, overskuelighed, struktur, "special effects", og endelig er en engageret præsentation også et plus. De tre bedste poster vil udover den obligate vin- og chokoladepræmie også blive hædret med diplomer samt få tilbud om at publicere en redigeret version af posteren i Kvant. Endelig vil studerende til og med phd-niveau fra den vindende poster få tildelt et års medlemsskab af DFS. Vinderne kåres udmiddelbart efter DFS's generalforsamling.

Frist for tilmelding og indsendelse af abstracts

Fristen for tilmelding til årsmødet og for indsendelse

af abstracts er **fredag den 2. april 2004**. Tilmeldinger modtages dog også efter denne dato, så længe der er plads på hotellet, men studerende kan ikke søge om friplads (se nedenfor) efter tilmeldingsfristens udløb. Også abstracts kan indsendes efter fristens udløb, men dels kommer disse ikke nødvendigvis med i abstract-bogen og dels får indsenderen kun mulighed for en posterpræsentation.

Tilmelding, indkvartering, priser m.v.

Tilmelding til DFS/IJAF/KIF-møderne foretages direkte til Hotel Nyborg Strand. Benyt venligst internet-linket til hotellet på DFS's hjemmeside (www.nbi.dk/dfs). Møderne samt indkvartering foregår på Hotel Nyborg Strand, Østerøvej 2, 5800 Nyborg. (tlf. 6531 3131, fax 6531 3701). For deltagere med overnatning på enkelt- eller dobbeltværelse er prisen hhv. 2.560 kr. og 2.270 kr. DFS-medlemmer får dog 230 kr. rabat på disse priser. Studerende med overnatning på tre-sengs værelser slipper med 1.750 kr. og her er rabatten 150 kr. til DFS-medlemmer. Det er også muligt at deltage uden overnatning og div. måltider, se hjemmesiden. Betalingsmåder vil fremgå af hotellets bekræftelse, som fremsendes i starten af maj måned. Bemærk, at man frem til den 27. marts frit kan afbestille sin tilmelding, men **efter denne dato er tilmeldinger almindeligvis bindende**.

Fripladser for studerende: Søg inden den 2. april!

For studerende, der ikke er indskrevet på Ph.D.-studiet, vil der være et antal fripladser. Ansøgning om en af fripladserne sker automatisk ved at afkrydse den relevante rubrik på hjemmesiden/tilmeldingsskemaet. Fripladser til astronomistuderende sponsoreres af IJAF, og fordeles uafhængigt af om ansøgeren er medlem af DFS eller ej. Andre studerende kan få friplads af DFS, og her er det en forudsætning, at man er medlem. Fripladserne vil blive fordelt kort tid efter tilmeldingsfristens udløb, og man vil modtage særskilt besked herom den 16. april. Hvis pladserne er brugt op, har man fortsat mulighed for at deltage mod betaling som anført på tilmeldingsskemaet.

Abstracts

Abstracts indsendes via DFS's hjemmeside (www.nbi.dk/dfs). Fristen for indsendelse af abstracts er **fredag den 2. april 2004**.

DFS's sektioner og IJAF (SNF's Instrumentcenter for Jordbaseret Astronomisk Forskning) sammensætter programmet på grundlag af bl.a. de indsendte abstracts, og deltagerne vil få meddelelse herom, hvis deres bidrag er udvalgt til et foredrag. De øvrige bidrag (samt hvis man ikke ønsker foredrag) vil blive præsenteret i en posterudstilling. Posterboards er 1.15 m brede

og 1.45 m høje, og de er hævet ca. 30–40 cm over gulvet. Se endvidere omtalen af DFS posterprisen 2004 ovenfor.

De indsendte abstracts vil løbende være tilgængelige på internettet. Overhold venligst tidsfristen for rettidig indsendelse (se afsnittet om tidsfrister ovenfor).

Sprog

Årsmødets sprog er engelsk. Enkelte af sessionerne, f.eks. indenfor uddannelse og undervisning, vil foregå på dansk. Deltagerne bedes indrette deres præsentationer efter, at hovedparten af tilhørerne er ikke-specialister i det behandlede emne.

Transport

Transport til/fra Nyborg sørger deltagerne selv for. Der bliver arrangeret bustransport mellem Nyborg Station og hotel Nyborg Strand i forbindelse med årsmødets start torsdag formiddag og årsmødets afslutning fredag eftermiddag. Angiv venligst på tilmeldingsblanketten om der påregnes deltagelse i denne fælles bustransport. Det tager dog kun 10–15 minutter at spadsere mellem station og hotel.

Yderligere information

Spørgsmål vedrørende årsmødet besvares ved at sende en e-mail til dfs@nbi.dk. Benyt venligst kun denne adresse til henvendelser vedr. årsmødet.

KIF årsmøde 26. juni 2004

Netværk for Kvinder i Fysik (KIF) afholder sit årsmøde onsdag den 26. maj 2004, ligeledes på Nyborg Strand. Mødet, der starter kl. 10, omfatter faglige foredrag af kvindelige danske fysikere samt et foredrag af en udenlandsk fysiker over et mere generelt "kvinder i fysik"-tema. Alle er velkomne til at overvære foredragene. Dagen afsluttes med et netværksmøde med yderligere udveksling af erfaring og diskussion. For yderligere information, kontakt venligst Dorte Posselt, IMFUFA, Roskilde Universitetscenter, 4000 Roskilde. Telefon 4674 2607, fax 4674 3020, e-post: dorte@ruc.dk. Tilmelding sker via DFS's hjemmeside. Deltagelse uden overnatning koster 310 kr. Med overnatning på dobbelt eller enkeltværelse er prisen hhv. 830 kr. og 1.135 kr. Se også KIF's hjemmeside www.nbi.dk/kif for program, der opdateres løbende, samt tidligere års programmer.

Valg til bestyrelsen og sektionerne i DFS

Der er valg til DFS-bestyrelsen og sektionerne i september 2004. Interesserede kandidater til den næste to-års periode, september 2004 til august 2006 bedes henvende sig til sektionsformændene eller DFS-formanden.

Dansk iværksætter udvikler bærbare brændselsceller

Torsten Freltoft, Sophion Bioscience A/S og Kvant.

Portræt af iværksætter Mads Willum, Alter Cell ApS

Et af de oplagte anvendelsesområder for brændselsceller er i mobile elektroniske produkter, f.eks. bærbare computere og mobil- og satellittelefoner. Energitætheden for brændstoffet til en brændselscelle f.eks. flydende methanol kan være op til ti gange større end i genopladelige batterier. Grunden til at sådanne anvendelser endnu ikke har haft et kommercielt gennembrud er hovedsagelig, at der foreløbig ikke har været udviklet brændselsceller, der var kompakte, robuste og billige nok.

Mads Willum og hans første medarbejder, kemikeren Flemming Jørgensen er ved at lukke og slukke efter en lang dags arbejde i det laboratorie, de har lejet hos Forskerparken Syddansk Innovation i Odense. Klokken er hen ad 20 og Mads må skynde sig hjem, hvis han lige skal nå at kysse sine to piger på hhv. et og fire år godnat inden de sover. Siden etableringen af Alter Cell i januar 2003 har der været fuldt drøn på – typisk 60 timer om ugen og kun en enkelt uges ferie er det blevet til.



Figur 1. Eksempel på bærbar brændselscelle udviklet af Toshiba i Japan

Det, Mads er rigtig god til, er mekanisk design og konstruktion. Han har den sjældne evne at kunne se det færdige resultat for sig i tre dimensioner, når han arbejder på et design. Samtidig har han helt fra sit første job som udviklingsingeniør haft en stor fascination af brændselsceller og deres perspektiver. Mads Willum er uddannet maskiningeniør fra Odense Teknikum i energiteknik og har derfor ikke umiddelbart haft baggrund for de fysiske og elektrokemiske aspekter af brændselscellers virkemåde. Men Mads læste, hvad han kunne finde om området i sin fritid og skrev det hele sammen i en fire siders klumme – mest for sin egen skyld. Men en kammarat publicerede klummen på internettet under en hjemmeside for energiteknik, og

her læste direktør Jørgen Lundsgaard fra IRD Fuel Cells A/S i Svendborg den pædagogiske introduktion. *“Lundsgaard ringede mig op og tilbød mig et job i IRD’s nye 50 kW brændselscelleprojekt til UPS systemer – det kunne jeg ikke modstå”,* siger Mads Willum med et grin. Mads skulle stå for designet og den mekaniske konstruktion af de indgående stakke af hydrogrogen brændselsceller.



Figur 2. Bærbar brændselscelle, også udviklet af Toshiba i Japan

Efter godt halvandet år hos IRD var Mads klar til at starte for sig selv. Han havde længe gået og tumlet med idéer til at forbedre designet af især små brændselsceller til bærbare anvendelser. Som det er forklaret i artiklen “Brændselscellers fysik og kemi” side 14, består alle praktisk brugbare brændselscellesystemer af en stak af enkeltceller. Og typisk har man ved designet af sådanne systemer mest koncentreret sig om enkeltcellen og så placeret dem oven på hinanden bagefter. Mads Willum har simpelthen udtænkt et design, hvor selve brændselscellen og stakken er integreret på en sådan måde, at det samlede system kun fylder det halve af en standard brændselscellestak med den samme effekt. Idéen er egentlig relativt simpel, og den har den sidegevindst, at stakken samtidig bliver billigere at producere og mere robust, siger opfinderen.

Pengene til udviklingen er kommet fra Syddansk Innovation, der har skudt i alt 1,25 millioner i Alter Cell. *“Ja, dvs. de første 30–40 tusind, jeg brugte, var min egen og ikke mindst min kones opsparing”,* forklarer Mads Willum. *“For de penge lavede jeg den allerførste prototype hjemme i garagen – og den virkede faktisk! Pengene blev bevilget i efteråret 2002 og de rækker ca. 36 måneder”.* Mads fortæller, at ca. en trediedel er brugt på at bygge rigtige prototyper, en ekstern teknisk evaluering af prototypen har kostet 10%, omkostninger til patentering af idéen ca. 15%, og resten er gået til løn samt obligatoriske konsulent- og kursuskøb hos Syddansk Innovation.



Figur 3. Iværksætter Mads Willum, 34, stiftede virksomheden Alter Cell ApS januar 2003 med hjælp fra Syddansk Innovation.

“Det tekniske har egentlig ikke været så vanskeligt”, siger Mads Willum. “Det har været meget sværere og

kostet virkelig meget arbejde at udvikle og skrive en rigtig god forretningsplan”. Mads Willum kom i juni 2003 i forbindelse med Connect Danmark, der er et frivilligt netværk af mere erfarne teknologer, industrifolk og investorer med det formål at rådgive og hjælpe iværksættere (se www.connectdenmark.com). “Forretningsplanen er det sted, hvor du dels skal forklare din idé, så selv bankfolk forstår den, samtidig med at ruten fra en fungerende prototype til en millionforretning skal planlægges og beskrives. Især det sidste er ikke let, og det er kun gennem sparring med erfarne forretningsudviklere gennem Connect, at jeg fik lavet en rigtig god forretningsplan”, forklarer Mads. Forretningsplanen er sendt og vurderet af en række potentielle investorer i december, og der er allerede flere positive tilkendegivelser. Men det begynder også at haste. Pengene fra Syddansk Innovation er brugt op hen på foråret, så hvis kedlen skal holdes i kog, skal der flere penge ind. Det vil stadig tage tid, før Alter Cell selv kan løbe rundt, men der er heldigvis meget seriøs interesse fra store aktører på brændselscelleområdet, så Mads er ikke bekymret for fremtiden.

Vandstandsstigning og husopvarmning

Jens Højgaard Jensen, IMFUFA, Roskilde Universitetscenter.

I sidste nummer af Kvant bragte vi opgaverne:

15. For at rense en brønd pumpes den tom for vand. Vandtilstrømningen til brønden kan ses at komme fra kilder nær ved bunden. Hvordan stiger vandstanden i brønden efter tømningen, som tiden går? Begrund svaret.

16. Ved ankomsten til et koldt hus tændes elvarmepanelerne. Hvordan ændrer temperaturen sig i huset som funktion af tiden? Begrund svaret.

For at svare på brøndopgaven skal man gøre sig klart, at det – som opgaven er stillet –, på ethvert tidspunkt under vandstigningen er forskellen på trykket i bunden af brønden fra det overliggende brøndvand (plus atmosfæren) og trykket i grundvandet i samme højde uden for brønden, der driver vandtilstrømningen. Hvis højden af grundvandsspejlet over bundniveauet for brønden kaldes H og vandstandshøjden i brønden kaldes h , vil vandtilstrømningen til brønden pr. tidsenhed som mest nærliggende tilnærmelse derfor være proportional med $(H - h)$. Da ændringen af vandstandshøjden pr. tidsenhed (forudsat ens tværsnitsareal op igennem brønden) også er proportional med vandtilstrømningen pr. tidsenhed, er udviklingen af h som funktion af tiden derfor givet ved:

$$\frac{dh}{dt} = k \cdot (H - h); h(0) = 0 \quad (1)$$

med løsningen:

$$h(t) = H(1 - e^{-kt}). \quad (2)$$

Vandstanden i brønden stiger altså efter tømningen asymptotisk imod det omgivende grundvandsniveau på samme måde som spændingen over en kondensator under opladning stiger imod opladningsspændingen. Den karakteristiske tid, $1/k$, afhænger af brøndens tværsnitsareal, tyngdeaccelerationen, vandets massefylde og vandets viskositet, som er kendte størrelser, men også af geometrien af tilløbet, som vi ikke ved noget om.

Den anden opgave drejer sig om et energiregnskab. Kaldes effekten af elvarmepanelerne i huset for W , husets varmekapacitet for C , temperaturen inde i huset for T_i og temperaturen udenfor for T_u , har vi:

$$W = C \frac{dT_i}{dt} + K(T_i - T_u); T_i(0) = T_u \quad (3)$$

som energiregnskabet: Varmen fra elpanelerne går dels til at varme huset op, dels til at erstatte den varme, der siver ud af huset. Varmeudsvivningen er som nærliggende tilnærmelse sat til $K(T_i - T_u)$, hvor K så er en karakteristisk isoleringskonstant for huset. Ligningen er matematisk set magen til (1), og har derfor også

en løsning, som ved opladningen af en kondensator:

$$T_i(t) - T_u = \frac{W}{K} \cdot (1 - e^{-(K/C)t}) \quad (4)$$

Her er den karakteristiske tid altså givet ved C/K . Det tager længere tid at opvarme et stenhus (stor C) end et træhus (lille C). Da vi kender W , kan vi ved at måle temperaturstigningen i huset som funktion af tiden bestemme C og K for huset.

Kommentar

I efterskriftet fra 1969 til sin meget refererede bog "Videnskabens Revolutioner" karakteriserer Thomas Kuhn fag ved deres såkaldte "faglige matrix" (i første omgang brugte han begrebet "paradigme" til også at karakterisere fag). En afgørende ingrediens i et fags matrix er en række "eksemplarer", konkrete problemløsninger, som fagets udøvere via deres uddannelse er fælles om, og som kan tjene som forbilleder for en større klasse af problemløsninger. "Opladningen af en kondensator" er, som jeg ser det, et sådant eksemplar i faget fysik. Og opgaverne om vandstandsstigning og husopvarmning og løsningen af dem er eksempler på den større klasse af problemløsninger eksemplaret hører sammen med. Sammen med svaret på, hvordan hastigheden af en faldende regndråbe, udsat for luftmodstand, ændrer sig med tiden. Og.... Og....

Fælles for eksemplerne er, at en størrelse (kondensatorens ladning eller spænding, brøndvandstanden, temperaturforskellen mellem inde og ude, dråbens faldhastighed), fra i udgangspunktet at være 0, ændrer sig imod en konstant (kendt eller ukendt) slutværdi. Denne konstante slutværdi er givet ved en eller anden ligevægtsbetingelse, hvor en ændring ikke mere kan finde sted (kondensatorspænding = opladningsspænding, brøndvandstanden på højde med grundvandsspejlet, varmeudsivning fra huset = varmelevering fra el-panelerne, gnidningskraft = tyngdekraft). Endelig er tempoet, hvormed størrelsen ændrer sig, proportional med størrelsens afvigelse fra den konstante slutværdi. Eksemplerne lader sig altså alle matematisk sammenfatte på formen:

$$\frac{dS}{dt} = k \cdot (S_k - S); S(0) = 0 \quad (5)$$

med løsningen:

$$S(t) = S_k(1 - e^{-kt}) \quad (6)$$

I Kuhns tankegang til forklaring af "videnskabelige samfund" og "videnskabens revolutioner" er tilegnelsen af det videnskabelige samfunds fælles række af eksemplarer afgørende i uddannelsen til at blive et af samfundsmedlemmerne. Og tilegnelsen drejer sig eksempelvis i tilfældet "opladningen af en kondensator" om mere end at kunne reproducere lærebogsstof i elektricitetslære og om mere end at kunne finde løsningen til (5). En færdiguddannet fysiker er nærmere karakteriseret ved, at eksemplaret er tilegnet til et niveau, så

vandstandsstigningen og husopvarmningen kan identificeres som analoge til kondensatoropladningen.

Hvor mange eksemplarer skal der så tilegnes i løbet af en fysikuddannelse ifølge Kuhn? 8? Eller 3500? Det er hans begreb ikke skarpt nok til – eller ment til –, at svare på. Det afgørende for ham er at tydeliggøre, at et videnskabeligt samfund er bærere af en faglig matrix (eller paradigme), som også udgør den kultur, der holder det videnskabelige samfund sammen. Og at den faglige matrix, paradigmet, kulturen ikke alene kan aflæses ud af lærebøgerne og forskningsartiklerne eller emnerne og teorierne, men i høj grad også drejer sig om tillærte anskuelsesmåder.

Jeg ved ikke, hvor rimeligt det er at anvende Kuhns tankegang på videnskabsfag i almindelighed. Kuhn er selv uddannet fysiker. Og næsten alle hans eksempler er fra fysik og kemi. Men i forhold til fysik, synes jeg, at han i høj grad rammer plet. Og blandt andet derfor har jeg også bidraget til udviklingen af "Breddekurset" i fysik på RUC i en retning, hvor eksemplariske opgaver som de to i artiklen her skydes foran pensum. Opgaver er eksemplariske, når arbejdet med dem inviterer til tilegnelsen af et eksemplar, et mønstereksempel, der viser vej til noget alment i faget. I stedet for at tilrettelægge undervisningen som først og fremmest teori-gennemgang, hvor tilegnelsen af de Kuhnske eksemplarer sker som en sidevirkning, sigter undervisningen på Breddekurset via opgaverne mere direkte på denne tilegnelse.

Varmeudvikling i stik

Inden næste nummer af Kvant udkommer, kan læserne overveje løsningen til denne opgave (nr. 17, fra sommereksamen 2003):

I en stikkontakt, hvortil der er tilsluttet en vandvarmer, sker der en varmeudvikling på grund af en løst forbindelse i stikkontakten. Hvor stor varmeudvikling kan komme på tale? Begrund svaret.

Løsning og kommentar til opgaven bringes i næste nummer af bladet.

Dansk Geofysisk Forenings Rejselegat

2.-dels geofysikstuderende ved KU og AU kan søge DGF om støtte til registreringsgebyr og rejseudgifter ved deltagelse i konferencer, møder, feltarbejde og lign. Der uddeles årligt op til 10.000 kr. i flere portioner.

Ansøgningen skal indeholde formål, budget, kopi af bachelorbevis og karakterudskrift, samt udtalelse fra vejleder eller lign. Der skal efterfølgende afleveres en kort redegørelse. Ansøgning skal indsendes senest den **1. april 2004** til Dansk Geofysisk Forening, Geofysisk Afd., Juliane Maries Vej 30, 2100 København Ø.

Fortsat fra bagsiden

Kl. 14.05:

Jeg går ind gennem døren til pressecenteret, som er blevet oprettet i anledning af de to Mars-landinger. En håndfuld andre journalister har allerede sat sig til rette ved de sorte borde med deres bærbare pc'ere. Rundt om i lokalet er der opstillet tv-apparater, som kun viser én kanal: NASA's egen tv-kanal, NASA TV, der sender 24 timer i døgnet. Og i aften skal kanalen selvfølgelig følge landsætningen af Opportunity. Der er nu næsten præcis syv timer til, at robotbilen skal lande på Meridiani Planum på Mars.

Ved siden af pressecenteret ligger det store, højloftede rum, hvor pressekonferencerne skal holdes. Rummet ligner en blanding mellem et tv-studie og et rumfartsmuseum. I den ene side af lokalet står en 1:1 model af rumsonden Voyager 1, der efter et kvart århundredes rejse gennem rummet nu befinder sig tæt på heliopausen, og på væggen hænger en kopi af den berømte guld-belagte LP, som Voyager 1 og 2 medbringer som godbid til eventuelle ekstra-terrestriske intelligenser.

I den anden ende af lokalet er der til lejligheden opbygget et helt lille Mars-landskab – komplet med et scenetæppe med en rødlig stenørken som baggrund, rød-brunt sand og grus på gulvet samt en fuldskalamodel af Opportunity, der knejser stolt midt i hele sceneriet. Her kan tv-journalister interviewe Marsforskere med det spektakulære sceneri i baggrunden.

Forrest i lokalet står et højt podium med en række borde, hvor deltagerne i pressekonferencerne skal bænkes. Ovenover hænger store projektorer, der kan bade podiet i lys, og bagerst i lokalet er opstillet platforme med tv-kameraer.

Kl. 19.30:

NASA TV er begyndt på opvarmningen før landingen med et såkaldt "commentary"-program, hvor en ekspert og en journalist live fra kontrolrummet på JPL fortæller om de forestående begivenheder. Selve landingen skal først finde sted kort efter kl. 21. Snakken om Opportunitys lange rejse, landing og kommende mission bliver krydret med animationer og fotos fra tvillingebilen Spirit, der allerede står på den røde planets overflade.

Der er endnu ikke mange journalister, der har indfundet sig i mediecenteret. Også lokalet, hvor pressekonferencerne senere skal holdes, er stadig halvtomt. At Opportunity netop er begyndt at dreje sig i stilling til indtræden i Mars' atmosfære interesserer tilsyneladende ikke mange af journalisterne.

Kl. 20.25:

Jeg går uden for mediecenteret for at trække lidt frisk luft før de store begivenheder. De inviterede gæster er nu for alvor begyndt at strømme til JPL for at overvære

landingen, og mediecenteret er også ved at være godt fyldt op med journalister.

Udenfor har JPLs souvenirshop opstillet en bod, hvor man kan købe Mars Exploration Rovers t-shirts, kasketter og endda LEGO-samlesæt, hvorefter man kan bygge en model af Spirit i de kendte danske plastic-klodser. Det lader til at være populære salgsvarer. Folk flokkes om boden.

"Motorcade!", råber en af de tilstedeværende journalister pludselig. Tynget af deres tunge kameraudstyr begynder alle omkringstående tv- og stillbilledfotografer at humpe hen imod JPL's hovedport, der ligger 50 m fra mediecenteret. Anledningen til den pludselige ståhej er, at Californiens nye guvernør, Arnold Schwarzenegger – "The Governator", som han også kaldes af de lokale – ankommer til JPL i en kortegæ af mørke biler med tonede ruder. Han skal være VIP-gæst i kontrolcenteret og overvære landingen på tættest hold.

De ivrige fotografer når dog ikke at få taget nogen billeder af den berømte gæst. Bilkortegen suser lige igennem den åbne hovedport og kører op mod kontrolcenteret. Kort efter lunter fotograferne slukrede tilbage til mediecenteret.

Jeg går indenfor igen for at være vidne til den anden milepæl i Opportunity landingssekvens: Rumsonden smider som planlagt sin "cruise-stage" og det udløser klapsalver i kontrolrummet. Godt beskyttet af sit varmeskjold er sonden nu klar til at dykke ned i den tynde atmosfære, der omgiver den røde planet.

Kl. 20.55:

Nu begynder det at blive hektisk: I løbet af de næste minutter bliver det afgjort, om NASA's chef Sean O'Keefe, der er fløjet fra hovedkvarteret i Washington for at følge landingen, kan lade champagneproppe springe. Mediecenteret er nu fyldt til bristepunktet med journalister. Alle følger med på de opstillede tv-skærme, hvor NASA TV's live-sending fra kontrolrummet vises.

Egentlig er det ironisk: Op imod et halvt hundrede journalister er kommet til JPL for at følge landingen på "tættest hold" via en tv-kanal, som de lige så godt kunne se hjemme i deres stuer eller redaktionslokaler. Kun et par såkaldte "pool"-fotografer, der tager billeder på NASA's vegne, har fået lov til at komme helt ind i kontrolcenteret for at forevige begivenhederne på første hånd. Men stemningen i mediecenteret er uægtelig en anden, end hvis man sad alene foran en tv-skærm.

Jeg har sikret mig en plads i det store lokale, hvor pressekonferencen senere skal holdes. Her kan jeg følge slagets gang i kontrolrummet på et stort lærred, hvor billederne fra NASA TV bliver projiceret op.

Man kan mærke, at stemningen bliver mere og mere spændt – ikke bare i kontrolrummet, men også blandt journalisterne. Og det er svært ikke at lade sig gribe af stemningen. Det er virkelig et fortættet drama, både

menneskeligt og teknologisk, der skal til at udspille sig i løbet af de næste minutter.

Kl. 21.00:

Mission Control rapporterer, at Opportunity er trængt ind i atmosfæren. To minutter senere når rumsonden en maksimal deceleration på 6–7 g.



Figur 3. “We’re on Mars everybody”. Jubel i kontrolrummet lige efter landingen. (Foto: NASA)

Kl. 21.07:

“Vi hopper på Mars!”, lyder den begejstrede melding fra kontrolrummet. Efter en nervepirrende tur ned gennem Mars’ atmosfære – først som ildkugle og siden i faldskærm – hopper robotbil nr. 2 nu som en gigantisk hoppebold hen over Meridiani Planum. Opportunity er gået fra en hastighed på knap 20.000 km/t til 0 i løbet af seks minutter. Og utroligt nok har NASA’s Deep Space Network kunnet følge sondens signaler hele vejen ned mod overfladen.

Klapsalver og jubelråb bølger gennem kontrolrummet. Lettelsen er tydelig. Også i mediecenteret applauderer begejstrede journalister den teknologiske præstation, som man ikke kan være andet end imponeret over. Det er utroligt, at også landing nr. 2 på Mars er gået helt perfekt, tænker jeg.

På NASA TV kan jeg se, at guvernør Schwarzenegger er gået ned i kontrolrummet for at lykønske de glade ingeniører, der har stået for landingen. Ingeniørerne forklarer guvernøren om landingen og om de data fra Opportunity, som skærmene viser. Også tidligere vicepræsident Al Gore er ankommet – uden det store ståhej, som fulgte Schwarzenegger. Gore står lidt forlegent i baggrunden og lytter interesseret. Det er tydeligt, at The Governator er i centrum.

“Vi ruller stadig”, melder Rob Manning, der er chefindeniør for landingssystemet, en halv snes minutter efter at Opportunity første gang har ramt overfladen. Det spreder lidt forvirring.

Kl. 21.35:

Nu er der få minutter til det første pressemøde efter

landing. Lokalet, hvor pressemødet skal holdes, er pakket med journalister, fotografer og VIP-gæster. De første deltagere i pressemødet – heriblandt NASA’s chef Sean O’Keefe, hvis panderynker nu er blevet en smule mindre markerede – indfinder sig på podiet i lys fra blitz og projektører.

Pludselig lyder der høje jubelråb nede bagfra i lokalet. Folk vender sig overrasket om og ser holdet af ingeniører og teknikere, som har været ansvarlig for landsætningen af Opportunity, ankomme hujende til pressemødet med armene i vejret. Holdet bevæger sig gennem mængden af journalister, mens de uddeler “high-fives” til højre og venstre. Stemningen er nærmest som i et omklædningsrum efter en sejr i en sportskamp.

Også journalisterne klapper for at vise deres begejstring over den tekniske bedrift det er at lande en rumsonde på en planet, der befinder sig mere end 100 millioner km væk. Der er ikke meget kritisk distance tilbage blandt mediefolkene – mig selv inklusive. Det er svært ikke at lade sig rive med af den bølge af begejstring, der ruller gennem lokalet.

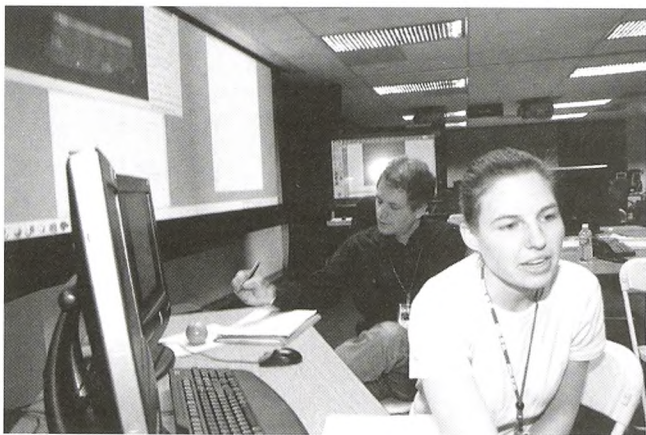
Hele showet minder egentlig om en af de pinagtige “klappescener”, som ofte afslutter b-film fra Hollywood, hvor helten bliver hyldet for at have reddet verden. Men den smittende begejstring, som alle udviser, er komplet afvæbnende: De ironiserende parader over for klæbrig amerikansk sentimentalitet, som jeg normalt ville mønstre, er faldet. Hvis teknik og naturfag kunne skabe bare en brøkdel af den samme entusiasme i Danmark, tænker jeg, ville der ikke være nogen rekrutteringsproblemer at klynke over.

Sean O’Keefe henter en flaske champagne frem og begynder at skænke op for projektdeltagerne, der har bænket sig på podiet for at være klar til pressekonferencen. “We’re two-for-two”, annoncerer lederen af Mars Exploration Rover projektet, Pete Theisinger, som indledning til sin rapport om landingen. Meldingen besvares med klapsalver og jubelråb fra salen.

Da pressekonferencen er ovre, møder jeg Preben Bertelsen og Morten Bo Madsen fra Center for Planetforskning ved Københavns Universitet. De to forskere er en del af missionens danske hold, som har et sæt magneter om bord på både Spirit og Opportunity. Jeg har bedt dem om at komme over i mediecenteret, så jeg kan interviewe dem om deres oplevelse af landsætningen. Både Preben og Morten er meget begejstrede over den vellykkede landing, og bruger ord som “intense”, “fantastisk” og “overvældende”.

Kl. 22.55:

Pressekonferencen er ovre, og jeg er gået tilbage til min pind for at skrive de første artikler. Rundt omkring mig sidder andre journalister og tamper hektisk på deres bærbare computere. New York Times, CNN og Science er nogle af de medier, der rapporterer fra begivenheden – hver med deres deadlines, der skal nås.



Figur 4. Nogle dage efter landingen: Morten Bo Madsen fra Center for Planetforskning ved Københavns Universitet er ved at sammensætte et aktivitetsprogram for panorama-kameraet på Spirit sammen med Heather Arneson fra Cornell University. (Foto: Sune Nordentoft Lauritsen).

Kl. 01.45:

Den amerikanske Mars Odysseey sonde passerer i dette øjeblik hen over området, hvor Opportunity er landet. Hvis alt er gået godt, skulle Mars Odysseey gerne modtage de første data og billeder fra Opportunity og sende dem tilbage til Jorden.

Kontrolrummet er tæt pakket med spændte ingeniører og forskere, der venter på de første bits fra Opportunity. Efter en halv snes minutter kommer der besked om, at der er 20 megabit data på vej. Det lover godt og udløser klapsalver i kontrolrummet.

Bifaldet bølger igen og ledsages af hujen, da de første billeder bliver blæst op på storskærmen i kontrolrummet. Sammen med en håndfuld andre journalister betragter jeg måbende de første billeder, der er kommet ned fra Opportunity. "Det er jo fantastisk", mumler en af journalisterne.

Det landskab, billederne viser, er vitterligt af en anden verden. Ikke langt fra landingsstedet kan man se nogle hvidlige klippepartier, der stikker op af den meget mørke overflade. Opportunity er tilsyneladende landet i en slags fordybning. Efterhånden som flere og flere billeder kommer op på skærmen, bliver det klart, at det sandsynligvis er et meteorkrater.

Selvom alle i princippet kan se de samme billeder via NASA TV over hele verdenen, er der alligevel noget særligt ved at sidde på JPL og se de første billeder

strømme ned fra Meridiani Planum. Det giver en sær fornemmelse af at være i begivenhedernes centrum, at være de første vidner til de alleførste billeder fra en fremmed verden – hvilket vi jo også er, omend sammen med en større seerskare.

I kontrolcenteret er forskerne straks gået i gang med at studere de fascinerende billeder. De står i små grupper omkring storskærmene og gestikulerer ivrigt.

Kl. 02.05:

En ny pressekonference er begyndt. Denne gang handler det om de første billeder og Opportunitys tilstand efter landingen. Folk er stadig begejstrede, men trætheden er også begyndt at sætte sig.

Den videnskabelige leder af Mars-missionen, Steve Squyres, har svært ved at finde de rette ord, da han skal beskrive de første billeder fra Opportunity. Men det er tydeligt, at han er overrumplet af, hvad han har set. En journalist spørger ham, om han i sine vildeste drømme har kunnet forestille sig at lande i et sådant sted. "Det er præcis, som det så ud i mine vildeste drømme!", svarer Squyres rapt, "Men de var ret vilde!"

Jeg går tilbage til min arbejdsplads i pressecenteret og sender bulletiner om de første billeder hjem til Danmark.

Kl. 03.45:

Mørket har sænket sig over Meridiani Planum, og Opportunity er gået til ro efter sin første korte, men meget udbytterige arbejdsdag på Mars. Nu er det også tid til, at jeg pakker sammen. Jeg samler mine ting og trasker udmattet over mod parkeringspladsen, hvor jeg har stillet min bil. Luften er kølig og natten er klar. Oppe på himlen lyser Mars som en rødlig stjerne.

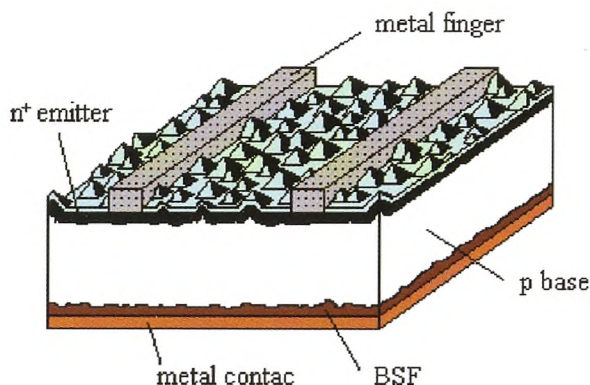


Sune Nordentoft Lauritsen er informationsmedarbejder ved Dansk Rumforskningsinstitut.

FZ silicium – rent silicium til de bedste solceller

Jan Vedde, Topsil.

Topsil har gennem de sidste tre år beskæftiget sig med at udvikle, fremstille og sælge et siliciumsubstrat med brug af Flyde-Zone (FZ) krystaldyrkningsmetoden, der kan anvendes af solcelleindustrien. Baggrunden herfor er dels forretningsmæssig, idet det er hensigten at forøge virksomhedens omsætning og tjene penge på dette nye produkt, men parallelt hermed giver det også en god fornemmelse, at kunne bidrage til udviklingen af en vedvarende energiform, der producerer forureningsfri elektrisk energi direkte af sollys, uden brug af miljøfarlige stoffer. Denne energiform er velegnet til decentral modulopbygget drift, og produktionen i dagtimerne er synkroniseret med behovet for elektricitet. Overfor alle disse positive udsagn står lidt forenklet kun et enkelt problem: prisen.



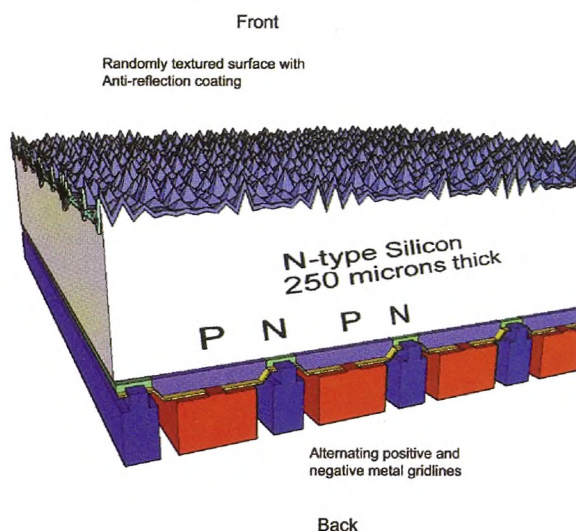
Figur 1. Opbygning af en traditionel 15 % effektiv solcelle.

Mulighederne for at opnå et gennembrud i anvendelsen af solceller, hænger direkte sammen med reduktionen i prisen pr. produceret kWh energi, og i solcellebranchen har dette forhold medført, at der har været høj fokus på at få reduceret prisen for at fremstille selve solcellen. Selve solcellen udgør imidlertid kun en del af det samlede system, der også omfatter laminering og indramning af flere solceller til et modul, transport til brugsstedet, opsætning, elektrisk kobling af de enkelte paneler med en dc-ac inverter samt tilslutning til det offentlige el-net. Idet langt de fleste omkostninger i et færdiginstalleret system faktisk vokser med anlæggets areal, er det særdeles vigtigt at opnå så stort et output pr. m² som muligt, idet omkostninger jo skal fordeles på den samlede produktion, som for et givet areal er bestemt af systemets maksimumeffekt (W_p). Det nøgletal der ofte benyttes til at beskrive økonomien i et solcelleanlæg, er således prisen pr. installeret effekt (kr/W_p), og dette nøgletal kan reduceres mindst lige så effektivt ved at forøge output, end ved blot at reducere

fremstillingsprisen for en delkomponent.

Som følge af den hidtil ensidige fokusering på fremstillingsprisen for solcellekomponenten, er det blevet almindeligt at anvende det absolut billigste form for substrat til solcellen, nemlig overskudssilicium fra elektronikindustrien. Dette affaldsprodukt omsmeltes til store blokke af multikrystallinsk silicium, hvorefter man skærer de tynde siliciumskiver. Problemet med denne strategi er, at materialets kvalitet sætter nogle begrænsninger for, hvor effektive solceller der kan fremstilles, og faktisk omsætter de celler der i dag er kommercielt tilgængelige typisk kun 15 % af energiindholdet i sollyset til brugbar elektrisk energi.

En typisk solcelle (figur 1) er opbygget af en 0,3 mm tyk skive af silicium, hvor den aktive pn overgang – som sikrer at de lysinducerede ladningsbærere bliver trukket ud til kontakterne på hhv. for- og bagside – er dannet ved at diffundere et tyndt lag af fosfor (som giver n-type halvleder egenskaber) ned i overfladen af en skive der ellers er homogent doteret med bor (som giver p-type halvleder egenskaber).



Figur 2. SunPowers 20 % effektive solcelle, der har alle kontakterne placeret på bagsiden.

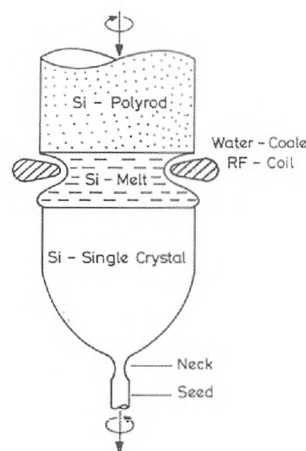
Der er imidlertid i udviklingslaboratorier verden over udviklet langt mere effektive typer af solceller, der dog hidtil ikke er blevet sat i produktion. En væsentlig årsag hertil er, at den forbedring af effektiviteten der ligger i de mere avancerede solcelletyper, kun kan realiseres såfremt man benytter et mere rent substrat – og dette renere substrat har hidtil været anset for at være alt for dyrt at fremstille, når der sammenlignes med de priser solcelleindustrien er villig til at betale.

Den rene version af siliciumsubstratet, skal fremstilles ved brug af den krystaldyrkningsmetode som an-

vendes på Topsil. Det har således længe været kendt, at monokrystallinsk silicium fremstillet med FZ-metoden, er perfekt egnet som aktivt substrat for de mest effektive solceller i verdenen. Således er effektivitetsrekorden for siliciumsolceller p.t. 24,7 %, og substratet til disse solceller er lavet med FZ metoden. Da Topsil meddelte, at vi har udviklet en metode der gør det muligt at fremstille FZ silicium til næsten samme pris som konventionelt solcellesilicium, blev det med et slag muligt at sætte de mange mere effektive solcelledesigns i produktion. Som den første producent, har den amerikanske solcelleproducent SunPower satset på at kommercialisere en ny type solceller, der er udviklet af den tidligere Stanford-professor, Richard Swanson (figur 2). Denne solcelle yder minimum 20 % i virkningsgrad, hvilket bl.a. bliver nået ved at placere alle kontakter på bagsiden, og ved at forøge opsamlingseffektiviteten, d.v.s. ved at sikre, at næsten alle de elektron-hul-par der dannes som følge af lysabsorptionen faktisk også bliver nyttiggjort. Et kritisk element i denne forbindelse er disse ledningsbæreres middellængde i siliciummaterialet, som naturligvis gerne skal overstige afstanden hen til kontakterne, og som kun kan fastholdes tilstrækkeligt lang, når siliciumsubstratet er tilstrækkeligt rent og perfekt, idet både urenheder, krystaldefekter og korngrenser i materialet vil give anledning til tabsgivende rekombination af ledningsbærere.

For Topsil har udviklingsprocessen drejet sig om at opfinde nye procesopskrifter og procesudstyr, der gør det muligt at omsmelte en meget billigere siliciumråvare til rent monokrystallinsk silicium. Den omtalte FZ metode gør brug af en hurtig og energieffektiv smeltemetode: induktions opvarmning af råmaterialet ved brug af en højfrekvent spole med kun en vin-

ding. På denne måde opvarmes silicium materialet til smeltepunktet uden nogen siden at komme i kontakt med en forurenende "støbeform", og eventuelle urenheder fordampes fra smelteoverfladen eller fastholdes i den flydende fase, som "trækkes" gennem materialet og afsætte urenhederne opkoncentreret i den sidst størknede krystaltop, som herefter kan skæres af og kasseres (se figur 3).



Figur 3. FZ metode til fremstilling af rent monokrystallinsk silicium.

Med SunPower på banen som den første solcelleproducent der satser stort på at øge virkningsgraden fra 15 til 20 % i en kommerciel produktion af solceller, er perspektiverne for både Topsil og solcelleenergien overordentligt gunstige, og forhåbentlig udgør denne 30 % forbedring af outputtet, et vigtigt skridt imod en egentlig masseudbredelse af solceller.

Investering i nye energiteknologier

Niels Langvad, BankInvest New Energy Solutions

Indledning

I sommeren 2002 etableredes Nordens første investeringsfond med fokus på udvikling af nye og/eller alternative energiteknologier. BankInvest New Energy Solutions (NES) investerer i små og mellemstore teknologiske innovative virksomheder og har ved udgangen af 2003 gennemført 3 investeringer.

Markedet for nye energiteknologier

NES's teknologiunivers omfatter:

- Decentral el-produktion.
- El-produktion fra vedvarende energikilder som sol, vind og vand.

• Elektrisk og termisk energi fra rene brændsler som naturgas og bio-brændsler.

• Komponenter og produkter for effektiv energiudnyttelse, herunder effektelektronik.

EU's støtte til Kyoto-aftalen betyder, at man kan forvente, at EU vil initiere ganske betydelige investeringer i decentral og mere miljøvenlig energiproduktion. I 2010 er det EU's mål, at mere end 20% af elektricitetsproduktionen skal komme fra vedvarende energikilder, hvilket kræver investeringer over det næste årti på mellem 200 og 300 mia. euro.

I efteråret 2003 har der været en række omfattende strømsvigt i Nordamerika og Europa. Strømsvigtene

har vist, at forholdsvis små uheld kan have store konsekvenser for el-forsyningen og har samtidig demonstreret nytten af distribueret el-produktion. Især det nordamerikanske strømsvigt forventes at udløse massive investeringer i udbygning af transmissions- og distributionssystemer for elektricitet. Den fremadskridende liberalisering af energimarkederne har tvunget energiproducenter og energidistributører til at fokusere på nye distribuerede energiteknologier, hvorved større centrale installationer vil blive erstattet af mindre og fleksible kombinerede kraftvarmeanlæg. Der er ligeledes fokus på teknologier, der øger effektiviteten i de eksisterende produktions- og distributionssystemer.

Investeringsprocessen og venturekapitalinvesteringer

Fondens kapitalgrundlag er på 385 mio. DKK og ejerne er:

DONG	EUR	11.5 mio.
Kirkbi (Lego)	EUR	5.0 mio.
Tryg-Baltica	EUR	10.0 mio.
VækstFonden	EUR	6.5 mio.
PFA	EUR	10.0 mio.
Industriens Pension	EUR	8.0 mio.
Sum	EUR	51.0 mio.
	DKK	385 mio.

Tabel 1. Investorer i BankInvest New Energy Solutions.

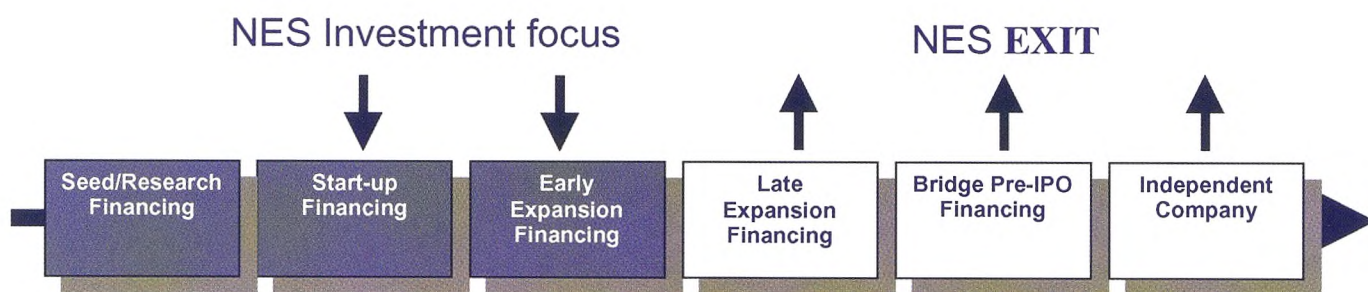
NES's investeringsteam udgøres af økonomer og ingeniører med erfaring indenfor international forretningsudvikling, ledelse samt forskning og udvikling. NES vil typisk investere mellem 2-3 mio. euro i det enkelte selskab, og vil som oftest tilstræbe at syndikere med andre investorer. Fonden vil typisk have en ejerandel på mellem 15% og 30%. NES kan investere, når virksomheden er på et tidligt stadie, men da risikoen ved en sådan investering er stor, forventer NES i sådanne tilfælde også en forrentning der modsvarer risikoen. Målet er at sælge ejerandelen med fortjeneste efter 3-4 år.

NES ventes at foretage endnu en investering i et udenlandsk selskab indenfor kort tid. Dette selskab er først i verden med at udvikle en kommerciel teknologi, hvor el-produktionen er baseret på tidevandskraft, og potentialet for teknologien er betydeligt.

Til den teknologiske og markeds-mæssige analyse samarbejder NES ofte med eksterne konsulenter, typisk personer med en specialviden indenfor det aktuelle teknologiområde. Fonden har etableret et internationalt netværk af forskere fra universiteter og forskningscentre, og benytter desuden konsulenter med industriel erfaring. På nuværende tidspunkt har NES evalueret mere end 180 investeringsforslag.

	Investering A	Investering B	Investering C
Opfindelse	Sensor til at overvåge belastningen i højspændingsnettet, udstyr til at fjerne sne og is fra højspændingsledninger samt sikkerhedsudstyr.	Lineær variation af magnetisk flux og permeabilitet ved 2 ortogonale magnetfelter: et lille felt kan benyttes til styre hovedfeltet.	En modulerende olie- og/eller gasbrænderteknologi, samt tilhørende reguleringsteknik.
Anvendelse	Effektiv udnyttelse af eksisterende højspændingsnet.	Nyt effektelektronisk princip til styring af strøm og spænding.	Ny teknologi til olie og gasfyrede kedler.
Antal ansatte	3	15	18
Ejerkreds	2 finansielle investorer og iværksættere	3 finansielle investorer, 1 privat og iværksættere	4 finansielle investorer og iværksættere
Bestyrelse	5 medlemmer, heraf 3 investorrepræsentanter	4 medlemmer, heraf 3 investorrepræsentanter	5 medlemmer, heraf 4 investorrepræsentanter
Baggrund	Iværksætter fra industrien.	Industrielt forskningsmiljø.	Universitet.

Tabel 2. Investeringer.



Figur 1. Investeringsforløb

Teknologi	Antal
Vindkraft	17
Bølgekraft	13
Tidevandskraft	3
Vandkraft	5
Solceller	10
Solfangere	10
Bio-brændsler	22
Brændselsceller	21
Gasturbiner og -motorer	15
Decentrale kraftvarmeanlæg	4
Energilagring	8
Effektelektronik	15
Komponenter og sensorer	8
Diverse	29
Total	180

Tabel 3. Investeringsforslag fordelt på teknologier.

Land	Antal
Danmark	53
Norge	26
Sverige	26
Finland	5
UK	16
Holland	6
Tyskland	11
Schweiz	4
USA	22
Andre	11
Total	180

Tabel 4. Investeringsforslag fordelt på lande.

NES vil typisk investere, når selskabet består af en mindre organisation, prototyper af produktet er testet, og teknologien er afprøvet hos de første kunder. Det er endvidere vigtigt, at teknologien er patenteret – eller egnet til patentering – og konkurrencedygtig på et stort og internationalt marked.

Den tilførte kapital vil typisk blive benyttet til en industrialisering og videreudvikling af teknologien, samt til at udbygge markedskendskabet og selskabets kommercielle og ledelsesmæssige kompetencer.

Profil af BankInvest

BankInvest Gruppen er blandt Nordens førende uafhængige forvaltere af investeringsforeninger samt større private og institutionelle porteføljer. Herudover forvalter Gruppen flere større venturefonde inden for områderne bioteknologi, IT og alternativ energi.

BankInvest Gruppen er grundlagt i 1969 og forvalter i dag midler for over 130.000 investorer. Gruppen er ejet af 45 lokale og regionale danske pengeinstitutter. Den samlede formue under forvaltning udgjorde ultimo 2003 over 50 milliarder kr.



Niels Langvad er Investment Manager i NES. Niels Langvad er civilingeniør (M) fra Danmarks Tekniske Universitet og har mere end 20 års industrierfaring, herunder med brændselsceller og materialeteknologi (Haldor Topsøe A/S), keramik og højtemperaturmaterialer (Hasle Refractories A/S) produktion og ledelse (Royal Scandinavia A/S) og investeringserfaring fra VækstFonden.

KVANT-nyheder

Af Michael Cramer Andersen

Mars Express kortlægger overfladen af Mars

Den første europæiske rumsonde til Mars ankom til planeten den 25. december 2003 og kom i perfekt kredsløb de følgende dage. Rumsonden "Beagle 2" som skulle have landet på overfladen og foretaget astrobiologiske eksperimenter har man imidlertid ikke fået radiokontakt med og man gav op efter et par ugers forgæves forsøg.



Figur 1. 3D-kort over en del af den store dal Valles Marineris, konstrueret på grundlag af data fra Mars Express' stereokamera. Foto: ESA.

Mars Express er begyndt at sende data tilbage fra sin kortlægning af hele Mars-overfladen med et højtoppløsningsstereokamera, der kan opløse detaljer ned til 10 meter. Mars Express skal også kortlægge mineralforekomster samt cirkulationen i Mars' atmosfære. Den har bekræftet, at der er is på Mars' sydpol som er dækket af støv, hvilket hidtil har gjort det vanskeligt at fastslå om der var is.

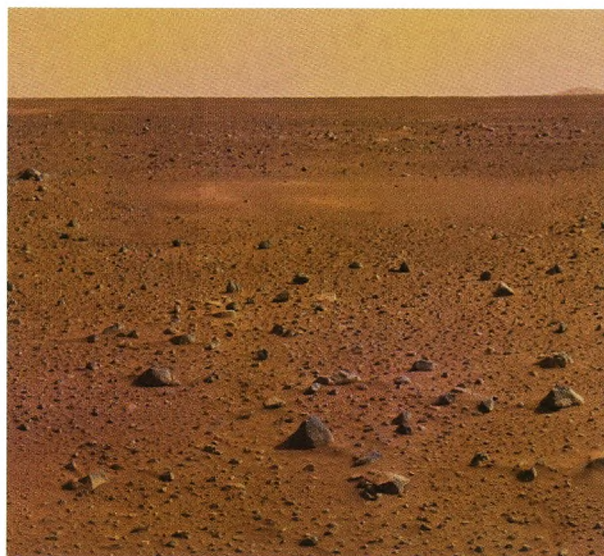
Kilde: mars.esa.int.

Billeder fra overfladen af Mars

De to Mars Exploration Rovers (MER) er begge landet på deres bestemmelsessteder ved Mars' ækvator hvor de kan udnytte sollys til solpanelerne.

Roveren "Spirit" har optaget et panoramabillede i meget høj opløsning fra landingsstationen i Gusevkrateret. Den anden rover "Opportunity" landede også perfekt og de er begge kommet ud at køre og er begyndt at undersøge nærliggende sten med mikroskopkamera og spektrometre. Opportunity har taget billeder af sten der ligner grundfjeld og har fundet grå hæmatit, og bekræfter dermed målinger foretaget med Mars Global Surveyor. Grå hæmatit dannes typisk under tilstedeværelse af vand.

Kilde: marsrovers.nasa.gov.



Figur 2. Udsnit af panoramabillede optaget i Gusevkrateret hvor Spirit er landet. Foto: NASA.

USA vil opbygge permanent base på Månen – og forberede en bemannet mission til Mars

I kølvandet på de imponerende billeder fra Mars annoncerede USAs præsident Bush den 14. januar, på et møde i NASAs hovedkvarter, at NASA vil satse på bemannet rumfart. Første fase bliver at udvikle et nyt rumfartøj som erstatning for rumfærgerne, der udfases omkring 2010.



Figur 3. Om det bliver et rumskib som dette (X-33), der kan lette fra Jorden, vende tilbage igen og genbruges, er uvist.

Næste skridt er at etablere en permanent base på Månen hvorfra missioner til f.eks. Mars kan forberede

des. Planerne er blevet modtaget med en blanding af optimisme og stærk kritik fordi det vil være alt for dyrt.

Et flerårigt samarbejde med producenten af militærfly, Lockheed Martin, kulminerede i 1999 i en test af prototypen X-33 som skulle videreudvikles til en større kommerciel variant "VentureStar", der kunne erstatte rumfærgerne.

Fremtidens rumfartøjer omtales som Crew Exploration Vehicles eller "CEV" og de skal kunne bruges fra 2014. Robotrovere skal undersøge mulige landingssteder på Månen allerede fra 2008 og de første astronauter kan tage til Månen fra 2015–2020. Derefter er banen kridtet op for Mars omkring 2035.

Det amerikanske rumprogram, ikke mindst den bemandede rumfart, har givet mange nyttige anvendelser indenfor bl.a. medicin, kommunikation og luftfart. Men fordi rumfærgeprogrammet er i krise efter Columbia katastrofen og USA har et hovedansvar for opbygningen af Den internationale Rumstation ISS, må en billigere afløser for rumfærgen udvikles nu. Ellers vil USA ikke kunne benytte rumstationen efter 2010.

Desuden har Kina indledt et bemanded rumprogram (i tæt samarbejde med militæret) der har til formål at opsende en kinesisk rumstation og at komme til Månen. Måske er USA blevet provokeret og et nyt kapløb om udnyttelsen af rummet er på vej?

Måske har Bush sat rumrejser på den politiske dagsorden som et valgtema og fordi den militære udnyttelse af rumfærgerne også må finde en erstatning. Bemanded rumfart er ekstremt dyrt og derfor må NASA (med et budget på 15 mia. dollars om året) samarbejde med flyproducenter som Boeing og Lockheed Martin, der i øvrigt begge leverer issenkram til USAs misilforsvar. NASA må vente på afgørende budgetstigninger idet USA har en rekordhøj offentlig gæld på $7 \cdot 10^{12}$ dollars. Lignende planer om rejser til Mars, fremsat af tidligere præsidenter, strandede fordi de store visioner ikke blev fulgt op af højere bevillinger.

Det var derfor NASA for ca. 10 år siden satsede på billige, hurtige men mere risikable robotmissioner til Mars, hvilket har givet mange fine resultater – og et par fiaskoer – men mere forskning for pengene. Europa har som bekendt satset på ubemandet rumforskning hidtil. Den nye vision vil flytte ressourcerne væk fra ubemandede rumsonders udforskning af Solsystemet og er i høj grad et prestigeprojekt som måske kan genvinde noget af ånden fra Apollo-dagene. Opbygningen af en Månebase og forberedelsen af en bemanded mission til Mars vil medføre kæmpevækst af uddannelser og virksomheder, som under Apollo programmet, så det vil gavne alle lande der deltager. *Vil Danmark/ESA?*

Chefforsker Steven Squyres fra Cornell Universitetet, der leder Mars Roveren "Spirit", er tilhænger af bemandede ekspeditioner og siger, "Der er ingen større fan af robotudforskning end mig. Men den bedste udforskning, den mest komplette udforskning, den mest omfattende udforskning må gøres af mennesker". Præsidenten for Mars Society, Robert Zubrin,

er enig i at Månen skal være mellemstation for den større mission til Mars, men frygter at det bliver ved det. Når rumfærgerne begynder at flyve igen reserveres opsendelserne til opbygningen af ISS. Det betyder bl.a., at servicemissionerne til Hubble Rumteleskopet bliver afløst og rumteleskopets levetid sandsynligvis forkortes til 3–5 år mere. Hubbles afløser, James Webb Rumteleskopet, planlægges opsendt i 2011.

Kilder: New Vision for Space, www.whitehouse.gov/news/releases/2004/01/20040114-1.html

Tycho Brahe Nyheder, www.tycho.dk/article/view/1848/1/32/; NASAs X-fleet, science.howstuffworks.com/space-plane1.-htm;

Kinas rumplaner, edition.cnn.com/2003/TECH/space/10/09/china.space.plans/

Nærbillede af kometkerne - prøver på vej tilbage

Den 4. januar passerende rumsonden Stardust tæt forbi kometen Wild 2, som er en relativt ung komet, der derfor må formodes at repræsentere nogle af de ældste objekter i Solsystemet. Under passagen, i en afstand af ca. 240 km, blev kometkernen fotograferet flere gange hvilket blandt andet resulterede i nedenstående billede hvor flere kratere kan ses.



Figur 4. Stardusts billede af kometen Wild 2's kerne.

To kometkerner er tidligere blevet fotograferet af rumsonder ved tætte passager, komet Halley (Giotto, 1986) og komet Borrelly (Deep Space 1, sep. 2001). Stardust indsamlede også flygtige gasser og støv fra komaen i et materiale kaldet "airgel" som er fyldt med huller. En probe med prøverne bliver returneret til Jorden i 2006 for nærmere analyse.

Kilder: Astronomy Picture of the Day 3. januar 2004, apod.gsfc.nasa.gov/apod/archivepix.html; Stardust, stardust.jpl.nasa.gov/science/; Tycho Brahe Nyheder, www.tycho.dk/article/view/1859/2/32/.

Fysikuddannelse til det 21. århundrede

Selv om fysikkens love er de samme over hele verden, er der store forskelle på hvordan fysik-undervisningen gribes an selv indenfor samme land. I januar-nummeret af PhysicsWeb diskuteres flere idéer til at udvikle undervisningen i fysik så den kan tiltrække og fastholde de

unges interesse. Mange matematisk dygtige unge vælger i dag hellere uddannelser indenfor computervidenskab eller økonomi i stedet for den traditionelle fysik. Selv om der er stærke argumenter for at studere fysik (uddannelse af den næste generation af fysikere, samfundet er meget teknisk og virksomheder skal bruge forskning og teknologi for at konkurrere), så er der et stort frafald af studerende hen til andre fag. Fysikere finder ansættelse i mange forskellige erhverv og kun alt for få vælger at undervise den næste generation af fysikere. Lederen af Chase Academy, Mark Ellse, mener at fysik må være elitært og for de få, mens professor i Science Education ved Kings College, Jonathan Osborne, mener at fysik-undervisningen skal formidle begejstringen til alle.

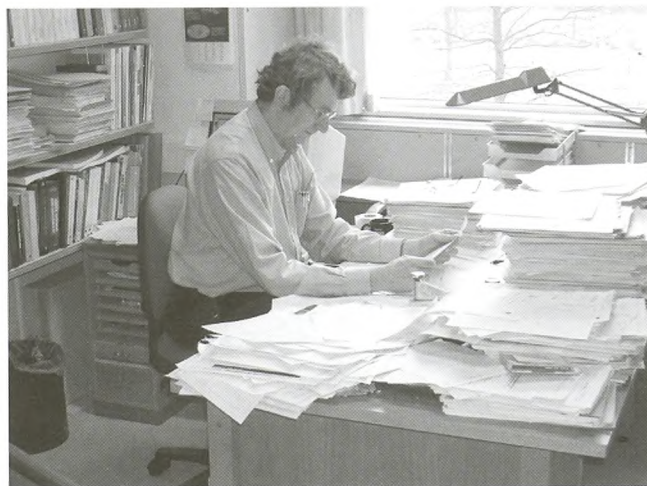
Kilder: New dimensions in education (and Related stories), physicsweb.org/article/world/17/1/1

Astrofysikforskning i fare

Arbejdstilsynet er gået til kamp mod de papirbunker, der hober sig op på skrivebordene på Aarhus Universitet og har – ledsaget af en trussel om politianmeldelse – givet universitetets forskere frist til 1. april til at bringe orden i roderiet. Påbuddet skal sikre, at rengøringspersonalet kan komme til at gøre ordentligt rent.

Det er imidlertid ikke alle forskerne, der er til sinds uden videre at rydde op i bunkerne. Professor i astrofysik Jørgen Christensen-Dalsgaard, som benytter et særligt arkiveringssystem, hvor dokumenter aflejres som sedimenter, og derfor kan findes frem igen ved hjælp af avancerede kronologiske principper, og hvis

kontor derfor er kendt for at indeholde særligt store bunker af papir udtaler til Kvant:



Figur 5. Jørgen Christensen-Dalsgaard ved sit forskerbord. (Foto: Hans Kjeldsen).

“Det vil være et indgreb i mit arbejde, og det kan ligefrem skade forskningen. Hvis jeg skulle til at flytte rundt og arkivere alting i reoler, ville jeg miste overblikket, og det vil være et alvorligt slag mod forskningen i astrofysik her i landet”.

Jørgen Christensen-Dalsgaard er dog indstillet på at indgå i forhandlinger for at finde en acceptabel løsning på problemet.

Kilder: TV-avisen, TV2-Øst, Jyllands-Posten, MetroXpress, Information og Debat m.fl.

Nyt fra Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Hjemmeside: www.snu.nbi.dk

Direktionen for SNU udgøres af:

Professor Dorte Olesen (formand)
UNI-C
Vermundsgade 5
2100 København Ø
E-mail: bente.egaa@uni-c.dk
Tlf. 35 87 88 04

Professor Søren Brunak

Direktør, Ph.D. Søren Damgaard

Professor Poul Erik Hansen

Lektor Erik Schou Jensen

Direktør, adjungeret professor Ole Mørk Lauridsen

Lektor Malte Olsen



Forårets program 2004

Forårets tema er *Statistik og Sandsynlighed*. Det næste foredrag i serien holdes af lektor Per Hedegaard, Niels Bohr Institutet, og har titlen “Statistiske sider af fysikken”. Foredraget holdes **den 8. marts 2004** kl. 19.30 på H. C. Ørsted Institutet.

Den 29. marts 2004 kl. 19.30 holder videnskabelig datamedarbejder Jørgen Nørrevang Jensen, ICES foredrag om “Statistik i miljøsammenhænge”. Dette foredrag holdes på Geologisk Museum.

Sidste foredrag bliver **den 19. april 2004 kl. 19.30**, hvor Overlæge Kåre Mølbak, Statens Seruminstitut, taler om “Matematiske algoritmer og analytisk epidemiologi i udredning af sygdomsudbrud”. Dette foredrag holdes også på Geologisk Museum og efter foredraget er der generalforsamling.

Mars i vore hjerter

Sune Nordentoft Lauritsen, Dansk Rumforskningsinstitut

Pasadena, Californien:

Lørdag d. 24. januar 2004, kl. 13.35:

Det første, jeg lægger mærke til, da jeg kører op mod Jet Propulsion Laboratory, er et kæmpemæssigt amerikansk flag, som vajer på toppen af den høje administrationsbygning. Den prægtige, solbeskinnede flagdug, der bugter sig i vinden, kan ses vidt omkring, og lader ingen være i tvivl om, at her er man stolte af at være amerikanere.

Jeg ruller frem mod den første portvagt, som skal sørge for, at kun personer med behørig akkreditering nærmer sig JPL's omfangsrige *campus*, der ligger i udkanten af Pasadena ved foden af San Gabriel bjergene. Jeg har endnu ikke fået udleveret mit pressekort, så jeg må fiske mit pas frem, så portvagten kan tjekke, at jeg er den danske journalist, jeg udgiver mig for at være. Det rødbedefarvede pas synes at forvirre portvagten om, at jeg ikke er en potentiel terrorist, og jeg bliver vinket frem mod JPL's hovedindgang.

Lige uden for hovedindgangen har tv-selskaberne allerede opstillet ob-vogne og en del af vognenes teleskopantennener er skudt i vejret for at være klar til at transmittere aftenens begivenheder.



Figur 1. En begejstret guvernør Schwarzenegger får forklaret de tekniske detaljer i landsætningen. I baggrunden Al Gore. (Foto: NASA/JPL).

Jeg triller ind på en stor parkeringsplads, stiller bilen og begiver mig til fods over mod receptionsbygningen, der med sin mørke glasfacade egentlig ikke virker

særligt gæstfri. I receptionen kan jeg afhente min presseakkreditering, har jeg fået at vide.



Figur 2. En hal på JPL's campus rummer et simuleret Mars-landskab, hvor forskerne kan teste planlagte manøvrer med robotbilerne, før kommandoerne bliver sendt af sted til Mars. Her er forskere og teknikere ved at teste udrulningen af Opportunity fra platformen. Testen foregik mellem kl. 2 og 3 om natten. (Foto: Sune Nordentoft Lauritsen).

Men, ak: JPL kan landsætte rumsonder på Mars, men organisationen har ikke formået at få færdigbehandlet min ansøgning om akkreditering, selvom det er tre uger siden, jeg faxede papirerne af sted. Så jeg må igen vise mit pas og vente en rum tid på, at mit navn bliver clearet af JPL's interne sikkerhedstjeneste. Derefter får jeg udleveret et håndskrevet, midlertidigt pressekort, som giver adgang til det forføjtede område bag adgangskontrollen.

Fortsættes inde i bladet side 26.