

Aktuel NATURVIDENSKAB

6 | 2 0 0 8 december



Tema: Energi og energiteknologi

Aktuel Naturvidenskab

Udgiver

Det Naturvidenskabelige Fakultet, Aarhus Universitet
i samarbejde med: Danmarks Tekniske Universitet;
Det Farmaceutiske Fakultet, Københavns Universitet;
Det Jordbrugsvidenskabelige Fakultet, Aarhus Universitet
Det Biovidenskabelige Fakultet, Københavns Universitet;
Det naturvidenskabelige Fakultet, Københavns Universitet;
Det Naturvidenskabelige Fakultet samt Det Tekniske Fakultet,
Syddansk Universitet; Det Ingeniør-, Natur- og Sundhedsvidenskabelige
Fakultet, Aalborg Universitet; Roskilde Universitetscenter samt
Danmarks Meteorologiske Institut og Teknologisk Institut.

Redaktionsudvalget

Kaj Sand-Jensen, professor;
Peter Bondo, seniorforsker;
Carsten Broder Hansen, cand. scient.;
Torben Lund Skovhus, laboratorieleder;
samt de to daglige redaktører: Carsten R. Kjaer og Jørgen Dahlgaard.

Redaktionskomite

Claus Bo Andreasen, Det Jordbrugsvidenskabelige Fakultet, Aarh. Univ.
Tor Bagger, Aalborg Universitet
Niels Hansen, Danmarks Meteorologiske Institut
Peter Hoffmann, Danmarks Tekniske Universitet
Nils Koudahl, Københavns Universitet
Jesper Munck, Det Farmaceutiske Fakultet, Københavns Univ.
Sune Nordentoft Lauritsen, Danmarks Rumcenter
Anne Kathrine Overgaard, Syddansk Universitet
Leif Sønderberg Petersen, Risø DTU
Hans Ramløv, Roskilde Universitetscenter
Michael Bjerring Christiansen, Århus Statsgymnasium
Birgit Schaldemose, Teknologisk Institut
Lykke Thostrup, Det Biovidenskabelige Fakultet, Københavns Univ.

Eftertryk kun efter aftale. Citat kun med tydelig kildeangivelse.
Synspunkter, der fremføres i bladet, kan ikke generelt tages som
udtryk for redaktionens holdning

Ansvarshavende

Dekan Erik Meineche Schmidt

Redaktion

Redaktør Jørgen Dahlgaard og redaktør Carsten Rabæk Kjaer
Tlf.: 8942 5555, Fax: 8942 3596,
E-post: red@aktuelnat.au.dk
Hjemmeside: www.aktuelnaturvidenskab.dk

Postadresse

Aktuel Naturvidenskab
Ny Munkegade, Bygn. 1520
8000 Århus C

Abonnementspris 2008

276 kr. i DK for 6 numre, inkl. moms og porto.

Abonnementsservice

Oxygen Media Service, Postbox 865, 2400 København NV
Telefon: 3816 8026 (hrd. kl. 9 - 13)
e-post: abo@aktuelnaturvidenskab.dk

Abonnement kan også bestilles via hjemmesiden:
www.aktuelnaturvidenskab.dk

Layout: Jørgen Dahlgaard.

Oplag: 8.700

ISSN: 1399-2309 (papirudgaven), 1602-3544 (web)

Tryk: Elbo Grafisk A/S

Foto på forsiden:

Illustration af bæredygtig energi – fødevarer som korn skal ikke bruges
til energiformål. Derimod er halm velegnet på forskellige måder.
Fotograf: Torben Nielsen, Risø DTU.



Aktuel Naturvidenskab udgives med støtte fra
Forskningsrådet for Natur og Univers samt Forskningsrådet for Teknologi og Produktion

Sponsorabonnenter:

DANISCO

First you add knowledge...



Artiklen kommer fra tidsskriftet Aktuel Naturvidenskab. Se mere på www.aktuelnaturvidenskab.dk

Indhold

Velkommen til dette temanummer af *Aktuel Naturvidenskab* om energi og energiteknologi. Vi har sat fokus på konkrete teknologier, som danske forskere arbejder med. I sagens natur har det ikke været muligt at inkludere alle de mange emner, der er relevante i denne sammenhæng. Derfor har vi også en artikel, der giver et overblik over de mange forskellige teknologier, der er i spil til fremtidens energiforsyning. Der sker meget inden for dansk energiforskning pt. God læselyst!

Forskning og nyheder

Fremtidens energisystem – en udfordring lokalt og globalt4

Fremtidens energisystem skal planlægges nu!

Kendt teknologi skal knække CO₂-kurven6

Artiklen gennemgår, hvor langt vi er kommet med de kendte energiteknologier, og hvordan disse kan bidrage til at reducere CO₂-udledningen.

Jeg kan køre
på vindmøllestrøm

Den blå biomasse12

Alger har et stort potentiale for udnyttelse til energi. Udbyttet kan være betydeligt højere end traditionelle afgrøder, der bruges til energi.

Biogas – en gammelkendt teknologi i front i klimakampen15

Ud fra en klimavinkel er biogasbehandling af gylle og restprodukter måske den bioenergi-teknologi, som er mest interessant.

Varmen fra Jordens indre18

Geotermisk energi kan bruges til at opvarme vore huse – og i Danmark har vi et stort uudnyttet potentiale.

Farvestrålende solceller21

Billige, farvede og transparente solceller, printet direkte på glas, kan om få år forsyne bygninger med elektricitet, solafskærmning og udsmykning.

Brændselsceller bliver voksne24

Efter et langt tilløb er brændselsceller blevet en så voksen teknologi, at den er tæt på at blive bragt ud på det kommercielle marked.

Plastik i brændselscellen27

Brændselsceller baseret på plastmaterialer (polymerer) er den type, der forskes mest i verden over – bl.a. fordi bilfabrikanterne satser på disse.

Bæredygtigt brændstof fra affald30

En bæredygtig produktion af biobrændstoffer kræver, at man udnytter affaldsprodukter i stedet for fødevarer. Udviklingen er i fuld gang.

Træsprit i tanken34

Methanol er en fremragende energibærer, der f.eks. kan bruges i brændselsceller. Træsprit er derfor et interessant medie til at lagre energi.

Kunsten at lagre energi37

Lagring af energi kan blive en vigtig faktor i fremtidens elsystem, der i højere grad vil være baseret på fluktuerende kilder som f.eks. vindkraft.

Kort nyt40

Perspektiv og debat

Niels Bohr og UVU42

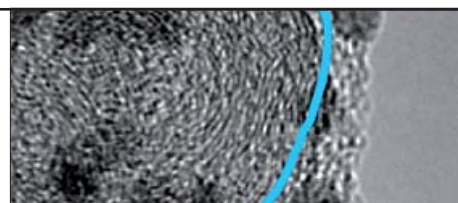
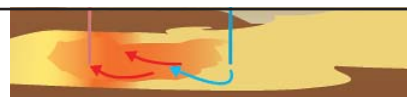
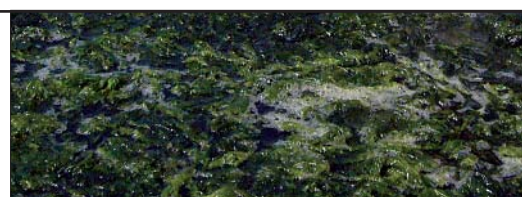
Ville Niels Bohr have været indklaget i 1915?

Synspunkt: Fra laboratorium til energisystemer48

Bøger og service

Bøger m.m.: Alt er relativt – eller er det nu også det? & Verdens Vilde Vejr 44

Artiklen kommer fra tidsskriftet *Aktuel Naturvidenskab*. Se mere på www.aktuelnaturvidenskab.dk



Fremtidens energisystem

– en udfordring lokalt og globalt

Hvordan knækker vi CO₂-kurven og sikrer fremtidens energiforsyning samtidig med, at udviklingslandene ikke forhindres i at opnå samme velstand som os? Det er den udfordring, verden står overfor. Og fremtidens energisystem skal planlægges nu!

Af Hans Larsen

■ Vi står overfor meget store udfordringer på energiområdet nu og i de kommende årtier. Den globale energisituation præges af to altdominerende spørgsmål, der har stor indflydelse på prioriteringer på energiområdet: Forsyningsikkerhed og Klimaændringer. I sin 4. vurderingsrapport anfører FN's Klimapanel (IPCC), at hvis vi ønsker at begrænse den globale stigning i gennemsnitstemperaturen til 2-3 °C skal indholdet af CO₂ i atmosfæren begrænses til ca. 450 ppm. For at det er muligt, skal CO₂-udledningerne toppe før 2020 og efterfølgende falde med mindst 50 % på verdensplan frem til 2050. Vi har således en klar udfordring fra klimaproblematikken, men vi har også den udfordring at vi, dvs. Danmark og andre lande, gerne vil sikre forsyningsikkerheden. Det gælder også i en fremtid hvor en større del af energiforsyningen kommer fra fluktuerende vedvarende energikilder.

Store regionale forskelle

Danmark har i en årrække nydt det privilegium at være det eneste EU-land der er mere end selvforsynende med energi, takket være olie og gas fra Nordsøen desuden med gode bidrag fra vind og biomasse. Det vil være ønskeligt at opretholde den frihed, også efter at Nordsøens olie og gas er brugt. Det gælder også på EU-plan, at der er en fare for, at EU bliver mere og mere afhængige af importerede brændstoffer som f.eks. gas fra Rusland. En tredje udfordring er at de nævnte klimatiltag ikke må gå ud over den økonomiske udvikling specielt i udviklingslandene, der har et legitimt krav/ønske om at komme op på niveau med os andre både angående økonomi og energiservices.

Hvis vi ser på situationen på verdensplan, må vi konstatere at udfordringerne vil være meget forskellige fra region til region, de forudsete konsekvenser af klimaændringerne vil variere meget og de resurse-mæssige og

økonomiske muligheder for at gøre noget ved det vil variere meget. Den globale finanskrisen har her i efteråret og med den usikkerhed den har medført på alle fronter, har ikke gjort det lettere at få vedtaget de nødvendige langsigtede tiltag.

Fremtidens energisystem er decentralt

Fremtidens energisystem skal planlægges nu fordi det tager flere årtier at ændre energisystemerne radikalt. Verden er i dag 80 % fossil og kun 2 % ny vedvarende energi såsom sol og vind. Det kræver forskning og udvikling at bringe de rigtige teknologier og systemer til markedet og det kræver planlægning og tid og enorme investeringer at komme i en situation, hvor CO₂-udledende teknologier kun er en lille del af systemet.

Hvad kan vi så gøre? Vi kan udvikle fremtidens energisystemer så de bliver mere robuste ved at decentralisere både produktion og kontrol. Distri-

buerede produktionssystemer består af mange små, geografisk spredte produktionsenheder og færre store centrale enheder. I et elsystem med mange små, distribuerede produktionsenheder er det vigtigt, at hver enkel enhed yder sit bidrag til det samlede systems stabilitet, forsyningsikkerhed og elkvalitet. Det stiller helt anderledes skrappe krav til kontrol og regulering af den enkelte enhed og at det samlede system skal kunne kommunikere indbyrdes. Det får den konsekvens, at hver enkel forbruger skal have intelligente energisystemer med tovejskommunikation med energileverandøren. På den måde bliver det lettere at balancere produktion og forbrug og at bruge mekanismer som online prissætning og andre adfærdsregulerende mekanismer.

Tiden er knap

Hvis vi skal løse fremtidens store udfordring med CO₂-reduktioner er det bydende

nødvendigt at vi gradvist får mere og mere vedvarende energi inkluderet i systemet, dvs. mere vind, biomasse, sol mv. Der er derfor behov for såvel fortsat forskning i nye energiteknologier samt opbygning af demonstrationsprojekter. Som nævnt er tiden knap, hvorfor det er vigtigt at udbygge samarbejdet mellem forskere, industri og myndigheder for at få introduktionen af de nye bæredygtige energiteknologier til at ske så hurtigt som muligt. Kan vi på den front accelerere udviklingen blot med nogle få år er meget vundet. Ud over forskning i teknologier der kan bringes i spil inden for en kortere årrække, er det også nødvendigt med mere langsigtet forskning i teknologier, der kan bringes på banen på det lange sigt hvor vi skal ned på minimale CO₂-udledninger – det er næppe realistisk at kendte vedvarende energiteknologier kan klare det hele. Her tænkes på fusionsenergi, det supereffektive batteri, brintsamfund mv.

Transporten må ud af olieafhængigheden

En af de største udfordringer vi har på energiområdet er at løsrive transportsektoren fra den totale olieafhængighed. Transportsektoren udgør en stor del af energiforbruget, i Danmark pt. op imod 30 %. Det er samtidig karakteristisk, at energiforbruget til transport i Danmark er vokset med 50 % i perioden fra 1980 til nu – den periode hvor vi normalt er stolte af, at det er lykkedes at holde det samlede energiforbrug nogenlunde stabilt. Det er helt overvejende dieselforbruget, der er vokset i den periode. I den offentlige debat sætter man ofte lighedstegn mellem transport og landevejstransport i personbiler evt. krydret med et ønske om at flytte mere herfra til offentlig transport i busser og tog. Transport er imidlertid meget mere. Flytransport stiger kraftigt ligesom globaliseringen herunder væksten i fjernøsten øger den interkontinentale skibstransport betydeligt. I de store lande i EU udbygges

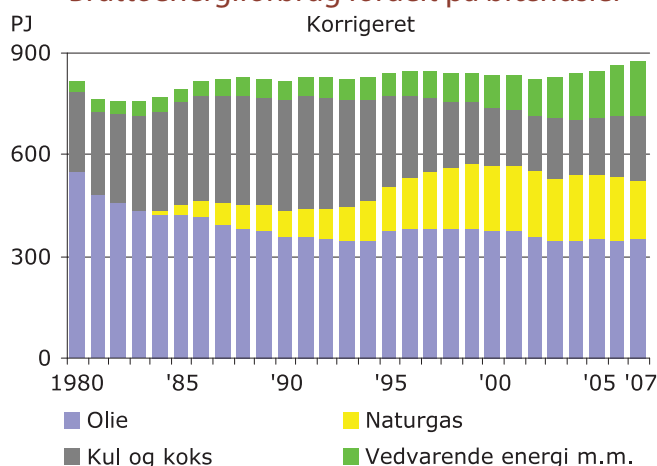
med højhastighedstog som en konkurrent til kortdistanceflyvninger.

Hvis vi skal tænke på at knække CO₂-kurven for transportsektoren har vi flere muligheder, effektivitetsforbedringer er godt i gang, men det rækker kun til at dæmpe væksten. Den eneste reelle mulighed, som jeg ser det, er at få vedvarende energi ind i sektoren. Desværre er det vanskeligt. Man kan fremstille andengenerations-bioethanol og bruge det til hel eller delvis erstatning af benzin, man kan producere biodiesel. Hvis det rigtigt skal flytte noget, må vi nok gå efter øget elanvendelse (elbiler, eltog mv.) baseret på vindmøllestrøm e.l. En anden mulighed vil på længere sigt være brint og brændselsceller; forudsat at brinten er produceret på bæredygtig vis.

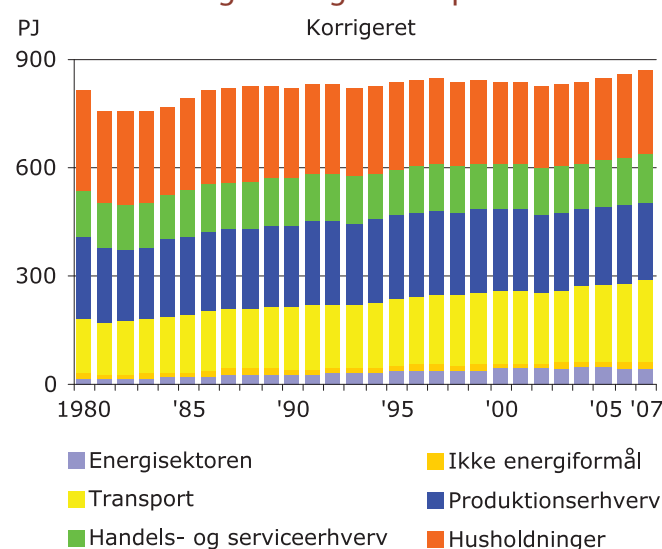
Lavenergihuse giver hovedbrud

Boliger, dvs. huse med al deres indhold og væsen inkl. elektronisk udstyr, hårde hvidevarer mv. er peget på af mange inkl. IPCC som et af de områder hvor der på den korte bane er store muligheder for energibesparelser og dermed CO₂-besparelser for beskedne eller ingen omkostninger. Klimaskærmen kan forbedres gennem øget og mere effektiv isolering. Det elektroniske udstyr kan forbedres til "AAAAA" standard – det er godt på vej. Der kan indbygges aktiv eller passiv solvarme, på sigt kan husene få brændselsceller, der kan levere både el og varme til eget forbrug. Mindst lige så vigtigt kan huset blive intelligent, så det kommunikerer med forsyningsnetten og optimerer forbrug og minimerer spild. Disse mere eller mindre selvforsynende lavenergihuse skal fortsat være koblet på netten, men vil være "dårlige" kunder, da de kun nu og da har brug for at købe, men samtidig vil stille de sædvanlige krav og sikkerhed for leverance, når der måtte være brug herfor. Det vil stille ændrede krav og udfordringer til såvel gas-, varme- som elleverandører i fremtiden.

Bruttoenergiforbrug fordelt på brændsler



Bruttoenergiforbrug fordelt på anvendelser



Bruttoenergiforbrug i Danmark. Kilde: Energi Statistik 2007, Energi Statistiken 2008.

Erhvervsmuligheder som sidegevinst

Det er godt hvis vi i Danmark finder gode løsninger på udformningen af fremtidens energisystem, det er endnu bedre hvis EU samlet finder gode løsninger, men det er allerbedst, hvis vi kan finde en palette af løsninger, der passer til de forskellige behov og forudsætninger der findes i de forskellige lande rundt om i verden. Det er ikke de samme løsninger, der er bedst/mulige i EU som i Afrika som i Kina og Indien. Hvis vi i Danmark er aktive og på forkanten kan vi også bidrage til disse løsninger og måske herved skabe – som en sidegevinst – nye danske erhvervsmuligheder. ■

Om forfatteren



Hans Larsen er afdelingschef Risø National Laboratoriet for Bæredygtig Energi
E-mail: hans.larsen@risoe.dk
Tlf.: 4677 5101

Kendt teknologi skal knække CO₂-kurven

Hvordan knækker vi CO₂-kurven samtidig med, at vi sikrer energiforsyningen, økonomisk vækst og gør verden mindre afhængig af fossile brændstoffer?

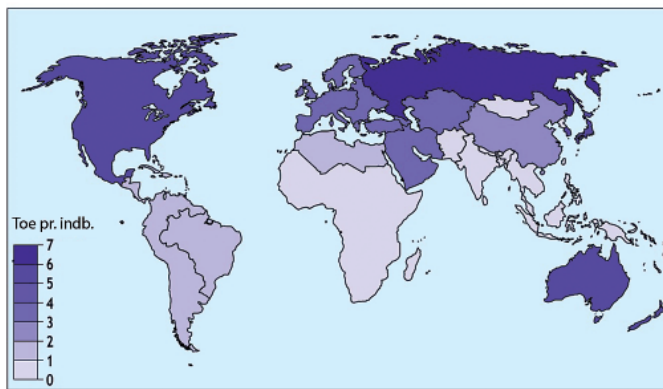
Artiklen gennemgår, hvor langt vi er kommet med de kendte energiteknologier, og hvordan disse kan bidrage til at reducere CO₂-udledningen.

Af Leif Sønderberg Petersen

■ Verden står ved en korsvej, og det er vigtigt, at næste års internationale klimakonference i København fører til en ny international klimaaftale. Det siger Det Internationale Energiagentur (IEA). Fortsætter vi med at producere og forbruge energi som hidtil, vil koncentrationen af drivhusgasser i atmosfæren fordobles inden udgangen af dette århundrede, hvilket giver globale temperaturstigninger på op til 6 grader i gennemsnit.

Det er et par af konklusionerne i IEAs rapport *World Energy Outlook*, der udkom 12. november 2008, ca. 1 år efter FN's Klimapanel's lige så markante udmeldinger i deres 4. vurderingsrapport fra november 2007.

For at holde koncentrationerne af drivhusgasser i atmosfæren på et niveau, hvor den globale temperaturstigning begrænses til 2 grader, vurderer IEA, at det vil kræve investeringer svarende til 0,55 pct.



Verdens forventede årlige energibehov pr. indbygger i 2030. Enheden toe angiver tons olie-ækvivalenter. Kilde: IEA

af BNP per år. IEA understreger, at det vil kræve en massiv indsats fra verdens lande at nå dette mål. IEA regner også på et mindre ambitiøst scenarie, der vil holde temperaturstigningen under 3 grader. Her vurderes de årlige investeringer at være 0,24 pct. af BNP.

FN's klimapanel slog i sin 4.

vurderingsrapport fast, at det er muligt at begrænse temperaturstigningen til 2 - 3 grader med de teknologier, vi har i dag, eller som er på tegnebrættet. Men det forudsætter en hurtig og global indsats. IEAs nye analyse bekræfter klimapanelets budskab: Hvis ikke vi kommer i gang meget hurtigt, bliver det

kun sværere og dyrere at løse denne opgave.

Det væsentligste, der skal til, er international politisk enighed på COP15 næste år i København. Vi ved hvilke energiteknologier, der kan bringes i spil for at opnå de nye politiske mål, der forhåbentlig vedtages. Overordnet kan disse teknologier grupperes inden for tre hovedområder, nemlig 1) energiforsyning, 2) teknologier til forbedret energiudnyttelse og 3) energibesparelser og effektivitetsforbedringer. Artiklen gennemgår de enkelte teknologier under disse hovedoverskrifter. Nogle af emnerne behandles mere indgående i de øvrige artikler i temanummeret.

1. Energiforsyning

Vind

Vindenergi er en veludviklet teknologi med stort potentiale og hurtig udvikling gennem de sidste 25 år. I 2007 producerede

vindmøller 20 % af det danske elforbrug. Vindmøller er i dag konkurrencedygtige med traditionelle kulfyrede kraftværker.

Danmark har en førende international position inden for vindenergiforskning, udvikling og produktion, men i mange andre lande sker der nu en hurtig udvikling af vindenergi.

I fremtiden vil vindmøllerne blive større, på 8 – 10 MW, og de vil blive placeret i vindmølleparker på adskillige hundrede megawatt, både på land og på havet. Det store problem ved at introducere mere vind i energisystemet er at tilpasse elnettet til at rumme så store mængder fluktuerende energi.

De europæiske lande og EU er førende i udnyttelse af vindenergi. Nutidens vindmøller indgår aktivt i kontrol og regulering af elnettet. Vindmøllefabrikanterne vil fortsætte med at udvikle vindmøllerne i denne retning, så større mængder vindenergi kan indpasses i elnettet uden fare for udfald af strømforsyningen.

Solceller

Solceller omdanner lys direkte til elektricitet. Solceller er modulære og indeholder ingen bevægelige dele. Der findes i dag tre forskellige typer solceller. Første generation solceller er fremstillet af krystallinsk silicium. Anden generation solceller er baseret på tyndfilmsteknologi og amorft silicium. Tredje generation kombinerer organiske materialer og halvledere.

Første generation solceller er markedsdominerende i dag. Krystallinsk silicium udgør omkring 90 % af verdensmarkedet og vil dominere indtil 2015. Anden generation solceller øger deres markedsandel med høj-effektive celler til specialformål, herunder satellitter. Tredje generation solceller er stadig på forskningsstadiet. Elektricitet fra solceller forventes at kunne indgå i elnettet omkring 2016.

Tredje generation solceller gør det muligt at integrere solceller i andre produkter ved hjælp af simple trykteknikker og plastfremstilling. Solceller er midt i et teknologisk gennembrud, i



Foto: Torben Nielsen.

Bilen her er en Toyota Prius, som Risø DTU har fået ombygget med bl.a. mulighed for at slutte den til elnettet og større batterikapacitet. På den måde kan bilen indgå i energisystemet og i perioder fungere som "energilag" for overskudsstrøm fra f.eks. vindmøller.

Danmark forskes der i plastsolceller, som på sigt kan blive en meget billig massekonsumvare. (Se artikel side 21).

Termisk solenergi

Brug af solenergi til opvarmning og varmt vand er en gammelkendt teknologi, men nye anvendelsesmuligheder er ved at dukke op, hvor solenergi kan erstatte fossile brændsler eller elektricitet.



Foto: Torben Nielsen.

Et eksempel fra Risø DTU på anvendelse af plastsolceller integreret i en solhat: Solen oplader et batteri, der driver en lille radio.

Solvarmeanlæg har øget deres markedsandel med 17-20 % de senere år. Den største udvikling sker i Kina og Europa. I Europa vokser det tyske marked hurtigst, fulgt af Grækenland og Østrig. I dag kommer ca. 0,15 % af EU's varme vand og rumopvarmning fra solvarmeanlæg.

Et nyt marked for solvarme er industriel procesvarme, fordi den temperatur der kan opnås i et solvarmeanlæg er brugbar i mange industrielle processer.

Solkraftanlæg, der koncentrerer solenergien, kan størrelsesmæssigt tilpasses landsbyer eller netforbundne anvendelser op til 100 megawatt. Nogle systemer udnytter termisk lagring, når det er overskyet og om natten. Især i USA vinder solkraftanlæg frem.

Biomassebrændsler til transport

Biomassebrændsler til transport kan nedsætte CO₂-udledningerne og mindske den vestlige verdens afhængighed af fossile brændsler. Endelig kan der udvikles en national industri baseret på flydende brændsler.

Biobrændsler kan fremstilles på mange måder, f.eks. biodiesel fra raps, etanol ved forgæring og ved GTL-teknologi (Gas til

væske). GTL-teknologien kan give høj effektivitet i omdannelsen af biomasse til flydende brændsler, og teknologien kan udvikles til at behandle mange forskellige slags biomasse. Desværre er GTL-anlæg relativt store og komplicerede.

GTL-teknologien bruges i stor skala til at fremstille methanol fra naturgas. På grund af de høje energipriser er GTL-teknologien igen blevet interessant, og i Kina opføres værker til at fremstille det flydende brændstof DME fra kul. Egentlig storskalaproduktion af transportbrændsler fra biomasse ved hjælp af GTL-teknologien finder ikke sted endnu, men i lyset af behovet for at nedsætte CO₂-udledningerne er denne teknologi en oplagt mulighed.

Biologisk baseret fremstilling af transportbrændsler sker ofte ved forgæring. Storskalaproduktion af biobrændsler foregår i dag i form af førstegenerationsbiobrændsler fremstillet af majs, hvede og sukkerrør.

Anden generation biobrændsler fremstilles af planteaffald som halm, træflis, græs, affaldspapir og andre materialer, der indeholder lignocellulose. Det er dyrere at udvinde og forgære sukkeret til alkohol på denne



Foto: Riso DTU

Samproduktion af el- og varme på kraftvarmeværker er en rationel udnyttelse af energien, og lidt af en dansk specialitet.

måde, men teknologien udvikles hurtigt nu.

I 2030 er det EU's og USA's mål at dække 25-30 % af energibehovet til transport ved hjælp af biobrændsler. Biler med almindelige forbrændingsmotorer kan bruge op til 10 % bioethanol i brændstoffet, mens flexi-fuel motorer kan bruge op til 85 % bioethanol i brændstoffet.

Forbrænding, forgasning og pyrolyse af biomasse

Forbrænding af biomasse og affald i kraftvarmeværker er i dag verdens største bidragyder til CO₂-neutral energi og vil

også i fremtiden udgøre en stor andel af CO₂-neutral energiforsyning. Danmark har en internationalt førende position i forbrænding af affald og biomasse.

Forgasning bruges til at fremstille elektricitet fra fossile brændsler som kul. Forgasning bruges også industrielt ved fremstilling af elektricitet, ammoniak og flydende brændsler via den såkaldte IGCC (Integrated Gasification Combined Cycles) teknologi. Her kan der produceres naturgas og brint til brændsels-celler. IGCC er også en effektiv teknologi, når det gælder om at rense og oplagre CO₂ fra

forbrændingen (se nedenfor). IGCC demonstrationsanlæg blev bygget i 1970'erne, men er først nu ved at blive taget i brug kommercielt.

Forbrænding af fossile brændsler

Moderne industriel udvikling er i stor grad baseret på fremstilling af varme og elektricitet ved at forbrænde fossile brændsler som kul, olie og naturgas. Brug af fossile brændsler er årsag til 85 % af de menneskeskabte CO₂-udledninger. Kul er det mest udbredte fossile brændsel med store ressourcer fordelt over hele verden. Der er nok til adskillige hundrede års forbrug i det nuværende omfang. Derfor er kul mere prisstabil end andre fossile brændsler, og af den grund er kul igen blevet en interessant mulighed. Omkring 40 % af verdens elfremstilling sker på basis af kul.

Kul forbrændes ofte ved at blive pulveriseret og blæst ind i en ovn. Varmen bruges til at opvarme vand til damp med meget høj temperatur, der ledes ind i turbiner, som trækker de generatorer, der udvikler elektricitet. Effektiviteten er øget betydeligt gennem årene og ventes at kunne nå op på 46 %.

Kul kan omdannes meget effektivt gennem såkaldte combined cycle kraftværker, samproduktion af varme og el og en MHD cyklus. MHD står for magneto-hydrodynamisk generator, som omdanner termisk eller kinetisk energi direkte til elektricitet. MHD-generatorer virker ved høje temperaturer uden bevægelige dele. Udstødningen fra en MHD-generator er en flamme, som kan opvarme kedlerne i et kraftværk. Men teknologien er stadig på forskningsstadiet.

Naturgas leverer 21 % af det globale energiforbrug. Mængden af naturgasfyrede kraftværker øges, fordi den slags kraftværker er meget økonomiske med hensyn til investeringsomkostninger, brændselseffektivitet og fleksibel drift. Combined cycle gasturbine (CCGT) kraftværker producerer mindre CO₂ pr. produceret energienhed end

kul eller olie.

Olie udgør ca. 37 % af verdens energiforbrug. Spørgsmålet om olieressourcerne er ved at være udtømte er genstand for stor debat. I øjeblikket er de bedste gæt, at der er olie til 30 til 40 års forbrug. Ikke konventionelle olieressourcer som tjæresand mm. kan derefter blive økonomisk attraktive.

Forbrænding gennem brændselsceller

Kul kan udnyttes effektivt til elproduktion ved at brænde det gennem brændselsceller (se nedenfor). Med denne teknologi kan man nå op på 60 – 85 % effektivitet. I dag kan brændselsceller kun omsætte luftformige brændsler. For kuls vedkommende kunne en mulighed være at bruge pulveriseret kul "opløst" i en gas som kvælstof. En anden mulighed er at forgasse kullet med vand.

CO₂-udledningen pr. produceret energienhed kan nedsættes ved at bruge mere avancerede og effektive teknologier, blandt andet ved at operere med højere temperaturer i kraftværkerne.

Kernekraft

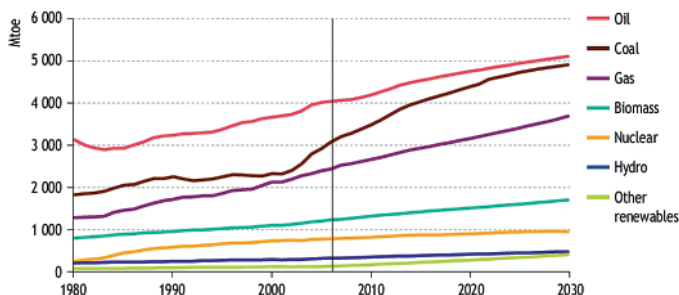
Kernekraft er grundlæggende en CO₂-fri energikilde. I dag leverer kernekraft ca. 15 % af verdens elektricitet. Globalt er 440 reaktorer i drift i 31 lande.

Teknologien er fuldt udviklet, men de fleste eksisterende kernekraftværker er bygget i 1960'erne og 1970'erne. Efter 1990 skete der en nedgang i brugen af kernekraft.

Kernekraft er ikke følsom over for udsving i energipriserne og er baseret på en ressource, som er vidt fordelt over hele jorden. Derfor er forsynings-sikkerheden ikke et geopolitisk spørgsmål.

Nu forudser IEA, IPCC og andre, at kernekraft vil vokse igen, med store regionale forskelle, især på grund af offentlighedens forskellige accept af denne energiteknologi. Stadig flere lande i Asien, herunder Indonesien, Thailand og Vietnam planlægger at udnytte kernekraft.

Kernekraft indgår ikke i den



Verdens energibehov fordelt på energikilder. Kilde: IEA

danske energiplanlægning, og derfor har Danmark meget lille ekspertviden om kernekraft, lige som der ikke er uddannelsesmuligheder inden for området.

Fusionsenergi

En fusionsreaktor bruger vand som brændstof. Eller rettere sagt isotoperne deuterium og tritium fra vand. Ved 150 millioner grader Kelvin starter fusionsprocessen, hvor deuterium og tritium bliver til helium under frigivelse af neutroner med stor energi. Fusionsreaktorer skaber meget mindre radioaktivt affald end kernekraftværker og er grundlæggende mere sikre, fordi de kun rummer brændstof til få sekunder. Den største investering ved fusionsenergi er bygningen af selve fusionskraftværket, mens brændselsomkostningerne er marginale. Fusionskraft vil derfor være mest økonomisk, når den bruges som grundlast i energisystemet.

Fusionskraft befinder sig endnu på det grundlæggende forskningsstadium. Designet og bygningen af den indtil nu største fusionsreaktor ITER er begyndt i et bredt internationalt samarbejde. Den forventes klar i 2016. Fusionskraft ventes først at kunne levere elektricitet til elnettet omkring år 2045.

Geotermisk energi

Geotermisk energi er varme fra jordens indre. Damp og varmt vand produceret i jordens indre kan bruges til opvarmning af bygninger eller fremstilling af elektricitet. Geotermisk energi er bæredygtig energi, fordi vandet erstattes af nedbør og fordi varmen kontinuert produceres i jordens indre (se artikel side 34).

Der er i EU installeret geotermisk energi svarende til 893 MWe i 2005, mest i Italien og Island. Ressourcerne er enorme i mange dele af verden. Potentialet er også stort i Danmark, men det er svært at forudsæ hvor stor en rolle geotermisk energi kan komme til at spille i det danske energisystem. Hos os er temperaturen ikke høj nok til elproduktion, men fjernvarmesystemer med varmepumper (se nedenfor) kan være en god mulighed.

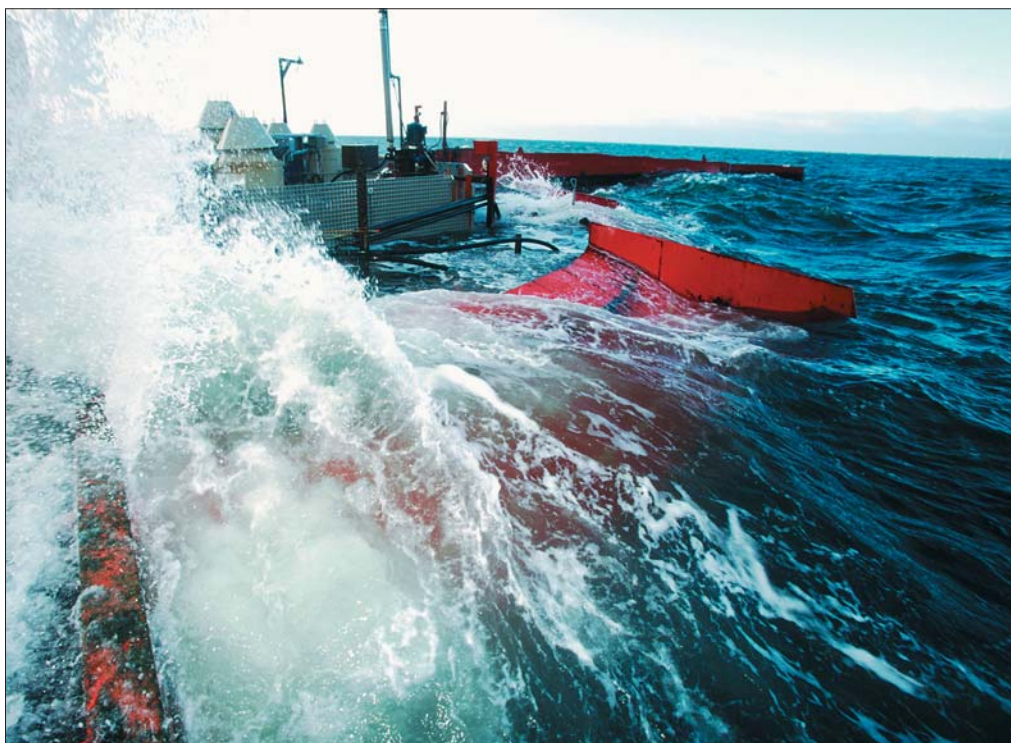


Foto: Wave Dragon Aps / Earthvision.biz

Bølgeenergi kan udnyttes. Her er det bølgeenergi-projektet Wave Dragon under test i Nissum Bredning.

Vandkraft, havstrømme, bølger og tidevand

Teknologier til brug af vandets potentielle, kinetiske eller termiske energi er på meget forskellige udviklingsstrin. Vandkraftværker har igennem mange år været kommercielt konkurrencedygtige. Modsat er bølge- og tidevandsenergi stadig på et tidligt udviklingsstadium.

Store vandkraftværker er en af de mest økonomiske energiteknologier, men har en stor indvirkning på landskabet og kan kræve genhusning af store befolkningsgrupper. Små vandkraftværker er udviklet over lang tid og i lande som Kina vokser antallet kraftigt. Havstrømme rummer masser af kinetisk energi der kan høstes med "undervandsvindmøller". En vindmølle under vand er mindre end en almindelig vindmølle, simpelt hen fordi vand har en meget større massefylde end luft. I Frankrig og England udnyttes denne energiteknologi i mindre grad.

Tidevand kan levere kraft 4-5 timer pr. cyklus og er derfor en meget fluktuierende energikilde. Men tidevandskraftværker kan kombineres med pumpelagre,

som kan genere elektricitet uafhængig af tidevandsstrømmen.

Bølgeenergi kan betragtes som lagret vindenergi, fordi bølger normalt eksisterer 6-8 timer efter vinden er løjet af. Derfor kan bølgeenergi udjævne noget af fluktuationen i vindenergi. Bølgeenergi kan på lang sigt bidrage væsentlig til verdens energiforsyning, hvis det kan udvikles til at blive teknisk stabilt og økonomisk rentabelt. I Danmark har bølgeenergi tiltrukket sig fornyet opmærksomhed gennem et par vellykkede demonstrationsprojekter, Wave Dragon og Wave Star.

2. Teknologier til forbedret energi-udnyttelse

Brændselsceller

Brændselsceller har fået deres teknologiske gennembrud som en meget fleksibel og effektiv energikonverteringsteknologi. Brændselsceller kan forbedre udnyttelsen af bæredygtige energiteknologier som vind, sol og bølgeenergi, og de vil blive en central del af fremtidens brint-samfund. Brændselsceller fungerer nemlig begge veje. Har man

overskudsstrøm fra vindmøller, kan strømmen sendes gennem brændselsceller og danne brint, der kan lagres. Når der er brug for strøm, sendes brinten tilbage gennem brændselscellen og laver strøm. Danmark spiller en vigtig rolle i udviklingen af brændselsceller fra grundforskning til kommercielle produkter (se artikler side 24 og 27).

Lavtemperatur brændselsceller, især de såkaldte PEMFCs, kan erstatte forbrændingsmotorer i biler og bruges allerede i kommercielle UPS strømforsyninger som f.eks. virksomheden Dantherm fremstiller.

Højtemperatur brændselsceller, SOFCs, kan bruge mange forskellige slags brændsler, de er højeffektive og miljøvenlige. De kan køre på brændsler som naturgas, biogas og methanol. Risø DTU er en af verdens førende inden for udvikling af SOFCs i samarbejde med Topsoe Fuel Cell A/S.

Rensning og lagring af CO₂

Rensning og lagring af CO₂ (CCS – carbon capture and storage) er en proces, hvor CO₂ udskilles og lagres i forbindelse med afbrænding af fossile

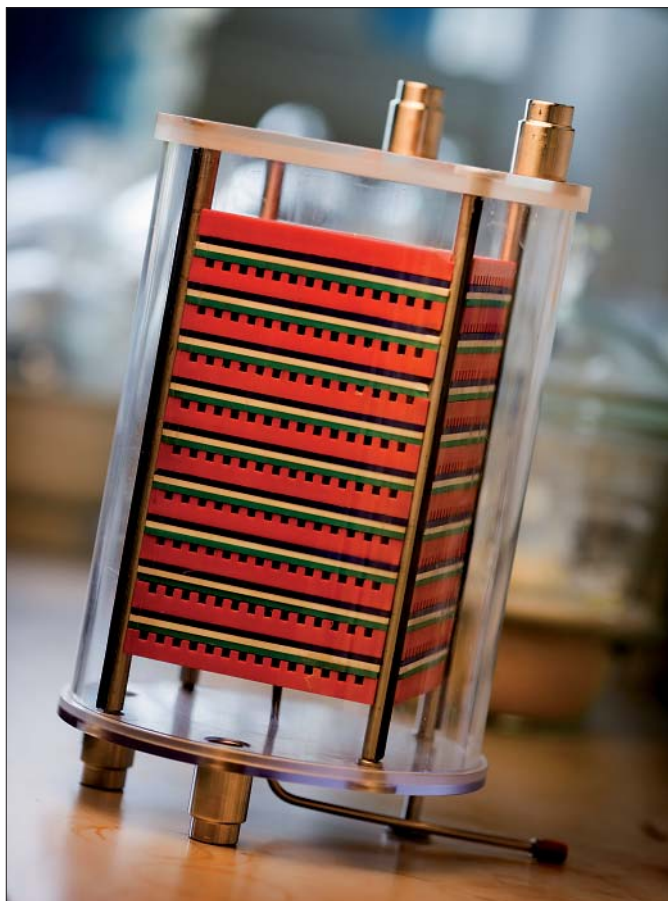


Foto: RISE DTU

Brændselsceller kan blive en vigtig brik i fremtidens energiforsyning.

brændsler i stedet for at blive udledt til atmosfæren. CCS kan bruges i stor skala i kraftværker og i energitunge industrivirksomheder. Den opsamlede CO_2 kan lagres i geologiske reservoirer som olieboringer eller i havbunden. Geologiske reservoirer kan tilbageholde over 99 % af CO_2 'en i over 100 år. Stor-skala nedpumpning af CO_2 i havene er en mulighed, men vil gøre havene mere sure, hvilket kan skade havene økosystemer lokalt. CO_2 kan også bindes kemisk ved at konvertere det til fast stof i form af uorganiske karbonatforbindelser.

CCS er dog meget energikrævende. Et kraftværk med CCS vil forbruge mellem 10 og 40 % mere energi end et tilsvarende kraftværk uden CCS. Rensningen er den mest energikrævende del af processen, men omkostningerne ventes at falde med yderligere forskning og udvikling og kommercialisering af teknologien.

På Esbjergværket er verdens

største demonstrationsanlæg til CCS sat i drift i 2006. Investering i forskning og udvikling inden for CCS kan gavne dansk industri på kort og mellem langt sigt. Der er gode markedsmuligheder for CCS-teknologi globalt, ikke mindst i de store udviklingslande Indien og Kina.

Brint

Brint er en energibærer, ikke en energikilde. Udnyttelsen af brint som energibærer afhænger af, om det lykkes at udvikle økonomiske og effektive metoder til fremstilling, transport og lagring af brint. Brint kan produceres på mange måder, baseret på både fossile og bæredygtige energikilder. Termiske og termokemiske processer, hvor der bruges varme til at fremstille brint, er de mest udviklede teknologier. Elektrolyseprocesser som er "omvendte" brændselsceller, er under udvikling. Her kan bæredygtige energikilder som sol, vind og bølger levere

strømmen til brintfremstilling. Omkostningerne ved elektrolyse er høje, men på vej ned. Graden af bæredygtighed af den fremstillede brint afhænger helt af den benyttede energikilde til fremstillingen. Det er muligt at fremstille brint i forbindelse med rensning og lagring af CO_2 . På den måde kan der skaffes bæredygtige transportbrændstof.

Energilagring

I Danmark arbejdes der på at indføre mere vindenergi, samtidig med at forsyningsikkerheden skal bevares på trods af den fluktuerende vindenergi. Af den grund arbejdes der intensivt på at finde gode lagringssystemer for elektricitet. (Se artikel side 37).

Energi kan lagres som varme eller elektricitet. På begge områder findes der mange mulige teknologier til lagring af energi både i stor og lille skala.

Lagring af termisk energi bruges til procesvarme i industrien, men der kan også opnås store energibesparelser ved at lagre overskudsvarme som varmt vand f.eks. til brug i CIP-anlæg (Cleaning In Place). CIP-anlæg er systemer designet til automatisk rengøring og desinfektion uden demontering af procesanlæg.

I kraftvarme- og fjernvarmesystemer kan man oplagre varme i varmtvandanke og derved adskille varme og elproduktion, hvilket kan give maksimal energjudnyttelse. Varmelagring er forholdsvis simpel teknologi og virkningsgraden er tæt på 100.

Lagring af el kræver flere teknologier, som alle indebærer en eller flere omdannelser fra elektricitet til lagermediet og tilbage til elektricitet. Energiformerne i ellageret kan være potentiel energi, kemisk energi, termisk energi, kinetisk energi eller elektrisk energi, f.eks.:

- Pumpekraftværker
- Trykluftbaserede ellagre
- Batterier
- Flow batterier (hvor ekstra elektrolyt opbevares i en tank uden for batteriet)
- Svinghjul

- Brint
- Superledere

Kun pumpekraftværker og trykluftbaserede ellagre bruges i stor skala.

Lige så vigtig ellagring er for at udnytte bæredygtig energi i større omfang, lige så meget mangler vi de afgørende teknologiske gennembrud for f.eks. batterier, brint og superledere.

Varmepumper

Varmepumper er generelt en moden teknologi, som bruges til rumopvarmning og industrielle formål. I en varmepumpe pumpes termisk energi fra ét varmereservoir (f.eks. koldt) til et andet varmereservoir (f.eks. varmt). Derved kan varmepumpen bruges både til køling i f.eks. køleskabe og airconditionanlæg og til f.eks. boligopvarmning.

De fleste varmepumper fungerer efter kompressormetoden, hvor elektricitet bruges til at overføre varme fra en ekstern varmekilde med lav temperatur til en temperatur, der er høj nok til at bruge varmen til opvarmning. Det kan integreres med et solfangersystem og på den måde kan temperaturen i det opvarmede vand hæves.

Absorptionsvarmepumper bruges i København i forbindelse med byens fjernvarmesystem. I en absorptionsvarmepumpe absorberes kølemidlet i en væske i stedet for at blive fordampet. Anlægget i København bruger geotermisk energi som en lavtemperatur varmekilde og damp fra Amagerbæret som drivvarme fra absorbereren. Absorptionssystemer kræver store investeringer og adgang til spildvarme med høj temperatur til at drive processen.

3. Energibesparelser og effektivitetsforbedringer

Negajoules

Negajoules – dvs. energiforbrug der ikke er afholdt på grund af besparelser – er blevet den mest betydende "energikilde" i EU. Selv om energieffektiviteten er blevet forbedret kraf-



Foto: Carsten R. Klær

Stigningen i transportsektoren har rent CO_2 -mæssigt mere end spist mange forbedringer op inden for andre områder i Danmark.

tigt gennem de sidste årtier er det både teknisk og økonomisk muligt at spare meget mere energi. EU har derfor som mål at spare 20 % af EU's energiforbrug sammenlignet med de nuværende fremskrivninger til år 2020.

Udnyttes denne mulighed, svarende til at spare 390 Mtoe i 2020, vil der være sparet en CO_2 -udledning på 780 millioner ton CO_2 alene i året 2020 – mere end det dobbelte af den fastsatte EU-reduktion under Kyoto Protokollen for den 5-årige periode 2008-2012.

Jo længere nede i kæden, der sker effektivitetsforbedringer, jo større virkning har det på det primære energiforbrug og

CO_2 -udledningerne. Således udløser et elforbrug på 1 kWh hos forbrugeren et energiforbrug på 2,2 kWh i form af brændsel til kraftværket. Det svarer til en CO_2 -udledning på 314 gram.

Tab ved energiomsætning udgør 33 % af det primære energiforbrug i Europa. Disse tab kan skæres kraftig ned ved at indføre kraftvarme. Kun 13 % af al elektricitet i Europa fremstilles på denne måde, mens det er omkring 50 % i Danmark.

Omkring 1/3 af energiforbruget hos slutbrugerne i Europa bruges i bygninger til opvarmning, aircondition, lys og elektrisk udstyr mv. Energiforbruget i bygninger er derfor en af

de store årsager til udledning af CO_2 . Bygninger sluger omkring 40 % af det totale energiforbrug hos slutbrugerne i EU.

Her er der store besparelsesmuligheder, både ved nybyggeri og ved opgradering af den eksisterende bygningsmasse.

Transport

Transport sluger omkring 20 % af verdens energiforbrug og er næsten udelukkende baseret på fossile brændsler. Derfor er transportsektoren også en af de store CO_2 -udledere. Bilindustrien arbejder fortsat på at mindske bilernes energiforbrug f.eks. ved at reducere vægten og forbedre motorstyringen.

Hybridbiler er et energibesparende alternativ i transportsektoren, da disse har en relativt lille forbrændingsmotor suppleret med en elmotor. Samtidig kontrolleres energiforbruget mere intenst i hybridbiler og bremseenergien bruges til at oplade batterierne. Derfor bruger hybridbiler væsentlig mindre brændstof end konventionelle biler. Pluginhybridbiler, der kan kobles på elnettet, kan i højere grad udnytte bæredygtige energikilder som vindmøllestrøm.

På længere sigt er elektriske biler og brændselscellebiler gode alternativer, idet strømmen og brinten kan komme fra bæredygtige energikilder. ■



Foto: U.S. Gov.

Selv i USA er man ved at få øjnene op for energibesparende biler. Her en såkaldt "plug-in hybrid-bil" udstillet på Capitol Hill.

Om forfatteren



Leif Sønderberg Petersen er
chefkonsulent
Risø Nationallaboratoriet for
bæredygtig energi
Tlf.: 4677 4021
E-mail: leif.sonderberg@risoe.dk

Videre læsning

RisøNyt temanummer 1 og 2 i 2007 handler om bæredygtig energi i henholdsvis udviklingslande og industrialiserede lande. De kan ses på www.risoe.dtu.dk/Knowledge_base/publications/risoeneuws/arkiv_risnyt.aspx

Risø Energy Report serien behandler energispørgsmål på globalt, regionalt og nationalt plan. De kan ses på www.risoe.dtu.dk/Risoe_dk/Home/Knowledge_base/publications/Risoe_Energy_Report_series.aspx

Den blå biomasse

Alger har et stort potentiale for udnyttelse til energi. De kan dyrkes i damme på land, og udbyttet kan være betydeligt højere end traditionelle afgrøder, der bruges til energi.

Foto: Annette Bruhn & Lone Thybo Mouritsen

Af Peter Daugbjerg Jensen og Annette Bruhn

■ From well to wheel er en ofte brugt frase, som bl.a. anvendes til at udtrykke udledningen af CO₂ ved brug af forskellige biobrændsler. Biobrændslerne er typisk produceret af korn, majs og sukkerrør og fælles for produkterne er, at de regnes for CO₂-neutrale, men også at de udgør vigtige basisråvarer for verdens fødevarerproduktion. Kritikken over for brug af fødevarer til produktion af brændstof og det øgede pres på ressourcerne af traditionel biomasse fra eksempelvis skovbruget har resulteret i fornyet interesse for akvatisk biomasse eller “den blå biomasse”, som den også kaldes.

Interessen for brug af den blå biomasse i form af alger til energiformål er eksploderet over det seneste par år. Alger har flere umiddelbare fordele: de vokser hurtigt, de kan dyrkes i bassiner

på landområder, som ikke er egnet til fødevarerproduktion, overskydende næringsstoffer fra landbruget og CO₂ fra kraftværker kan potentielt anvendes som henholdsvis gødning og kulstofkilde, og endeligt er der kun en meget begrænset konflikt mellem brug af alger til energiproduktion og fødevarerproduktion.

Perspektiverne er med andre ord enorme og energiselskaber, olieproducenter, bilfabrikanter, flyselskaber og Bill Gates er da også ved at falde over benene på hinanden for at deltage i jagten på de nye “oliefelter”. For nylig har også USA’s militær og flyproducenter som Boeing og Air New Zealand udmeldt, at de forventer at have fly på vingerne inden for de næste 5 – 10 år som er drevet af “algeolie”. Så udtrykket from well to wheel skal måske i fremtiden omskrives til from pond to plane.

Fra alger til energi

Alger opdeles på baggrund af deres størrelse i mikro- og makroalger. Mikro- og makroal-

ger har forskellige umiddelbare potentialer for anvendelse til energiformål, og kræver forskellige dyrknings- og håndterings-



Foto: Prof. Ami Ben-Amotz

Raceways til dyrkning af mikroalger. Bassinerne hører til firmaet Seambiotic Ltd. i Israel, der dyrker mikroalger til både biobrændstof og tilsætningsstoffer til fødevarer. Som de første i verden udnytter de røggassen fra kulfyrede kraftværker i dyrkningen af alger.

betingelser, som primært beror på algeres størrelse. Dyrkning af mikroalger til energiproduktion er undersøgt bl.a. i U.S. Department of Energy, som i en årrække fra 1978 til 1996 støttede et program til at udvikle brændsler til transport fra mikroalger. Programmet blev lukket under Clinton-regeringen, men det har nu fået en renæssance i den fornyede interesse for mikroalger. Flere arter af mikroalger har et højt indhold af lipider, som efter forbehandling potentielt kan anvendes til fremstilling af biodiesel eller jetfuel.

Reaktor med lys og liv

Mikroalger dyrkes som monokulturer i lukkede systemer kaldet fotobioreaktorer eller i åbne bassiner som typisk omtales ved den engelske betegnelse raceways, der referer til bassinets væddeløbsbane-lignende form. Fordelen ved fotobioreaktorer er dels, at algerne kan dyrkes i en meget høj koncentration, dels at algerne kan holdes i en ren monokultur. Det betyder, at man kan dyrke specifikke alger med et højt indhold – eller en favorabel sammensætning – af lipider. En række eksempler fra forsøgsanlæg, som er blevet lukket pga. kontaminering, viser dog, at det er forbundet med betydelige vanskeligheder at holde algekulturer rene for konkurrerende arter. En yderligere ulempe ved fotobioreaktorer er, at vandet skal pumpes rundt for at sikre en optimal algevækst, og det begrænser mulighederne for at opskalere systemet. For de typer af fotobioreaktorer, der anvendes i dag, betyder det, at en opskalering i praksis foregår ved, at flere enheder opsættes uafhængigt af hinanden med selvstændige pumper, ventiler til tilsætning af næringsstoffer osv.

Endnu ikke rentabelt

Dyrkning af mikroalger i raceways foregår bl.a. i Israel, USA, Thailand, Indien, Kina og Pakistan, hvor produktionen er rettet mod fødevarer- og medicinalindustrien. Modsat fotobioreaktorerne er tætheden af biomasse i de åbne raceways betydeligt mindre og samtidig er algerne udsat



Foto: Lars Nicolaisen

Dyrkning af søsalat i et landbaseret forsøgsanlæg ved Dansk Skaldyrcenter, Nykøbing Mors.

Alger - den blå biomasse

Alger er vandlevende organismer, der ligesom planter lever af fotosyntese. Ved fotosyntese omdannes energi fra solen, CO₂ og vand til kulhydrater og ilt. Fotosyntese sker ligesom hos planter i grønkorn; og som planter behøver alger lys og CO₂, næringsstoffer – især kvælstof og fosfor – spormetaller og vitaminer. De inddeles i mikro- og makroalger på baggrund af deres størrelse. Begge grupper er meget heterogene, og rummer adskillige overordnede "riger" af alger, der udviklingsmæssigt er forskellige, og som derfor bl.a. har forskellige indholdsstoffer. Der findes over 30.000 forskellige arter af alger.

Mikroalger (plante-plankton): Encellede organismer, der dog i nogle tilfælde lever sammen i kolonier af flere celler. Størrelsen ligger mellem 2 mikrometer og 0,5 mm. Mikroalger findes både i ferskvand og havvand. Visse mikroalger kan vokse så hurtigt, at de mere end fordobler deres biomasse hver dag. Mikroalger dyrkes i dag bl.a. til fremstilling af bioplastik, farvestoffer, kosttilskud, til forbedring af vandkvalitet og som foder til opdræt af fisk og skaldyr. Til energiformål er man især interesseret i de lipider, mikroalger ophober som energidepoter i cellerne. Lipidindholdet afhænger af art og vækstforhold, og kan udgøre mellem 15 og 77 % af algens tørvægt.

Den øvrige biomasse består af proteiner og kulhydrater.

Makroalger (tang): Flercellede organismer, der lever i havvand. Størrelsen ligger fra nogle få mm og op til 30 m! Makroalger vokser generelt langsommere end mikroalger, men vækstrate på op til 40 % om dagen ses hos de mest hurtigt voksende. Makroalger høstes og dyrkes i dag til konsum (sushi, tørrede tang-snacks, algestivelser som agar og carrageenan), til gødning, biomedicin og som foder til opdræt af fisk og skaldyr. Til energiformål er det makroalgerens indhold af kulhydrater, der er interessant, idet forskellige typer af kulhydrater kan forgæres til bioethanol.

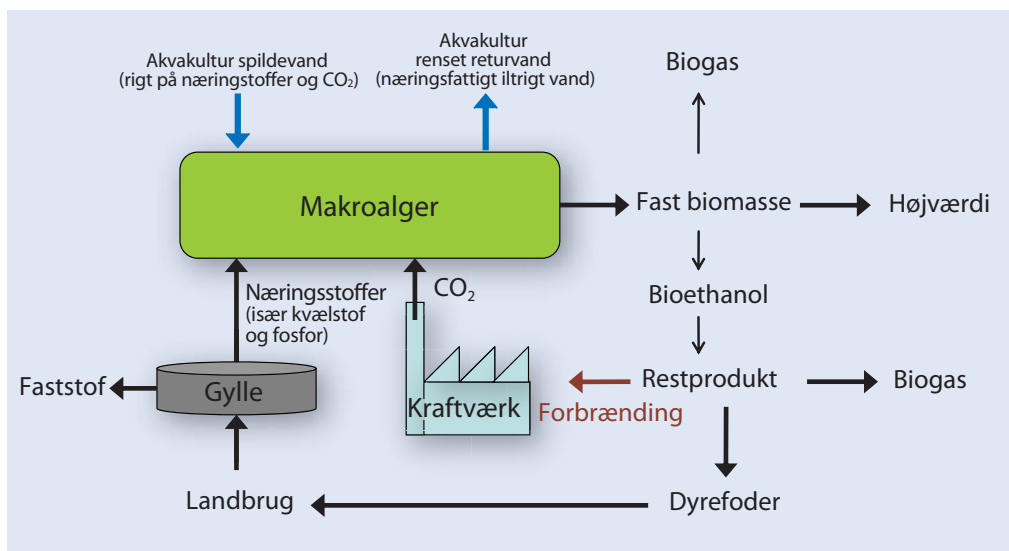
for kontaminering fra andre algearter, bakterier, virus og dyreplankton, der æder mikroalgerne. Dette imødegås bl.a. ved at dyrke algearter, som lever under så ekstreme forhold, at det udelukker konkurrerende arter.

Begge systemer har en række ulemper, som gør, at det i dag ikke er økonomisk rentabelt at dyrke mikroalger til produktion

af bio-olie. Ulemperne er bl.a. forbundet med størrelsen af algerne, som gør at høst, og især opkoncentrering af biomassen, er forbundet med betydelige udgifter. Når der alligevel dyrkes mikroalger i dag, skyldes det, at slutprodukterne til fødevarer- og medicinalindustrien har en betydelig større værdi end bio-olie kan indbringe.

Fornyet interesse for alger

Anvendelsen af makroalger til energiproduktion har ikke den samme opmærksomhed som mikroalger. Dette kan virke overraskende, når man ser på de fordele, der er ved makroalger og skyldes måske den fristende korte vej fra fast biomasse til flydende biobrændsel, som mikroalgerne potentielt



Eksempel på algers indpasning og funktion i et kredsløb med biomasse og energi.

repræsenterer. Makroalger lagrer ikke lipider i samme omfang som mikroalgerne. Til gengæld har flere arter et højt indhold af kulhydrater, som potentielt kan forgæres til bioethanol. Sammenlignet med mikroalger, har makroalger en åbenlys fordel i kraft af deres størrelse, som gør at biomassen kan høstes, og ikke mindst opkoncentreres, med relativt simpelt og billigt udstyr.

Høstpotentialet af såvel makro- og mikroalger er ganske betydeligt. Sammenlignes udbyttet pr. ha. fra forsøg med mikro- og makroalger med høstudbytter fra traditionelle afgrøder som korn, majs og soja ligger tørstofudbyttet fra algerne op til 10 gange over udbyttet fra landbrugsafgrøderne.

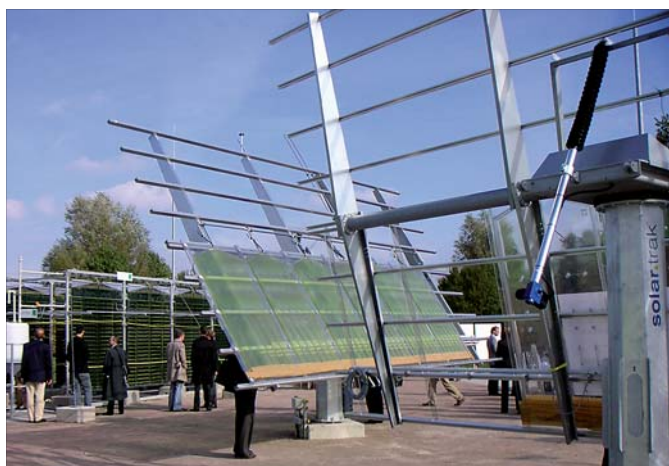
Dansk satsning på søsalat

Uden for Danmark sker i øjeblikket en voldsom stigning i aktiviteterne omkring anvendelsen af alger til bioenergi. Eksempelvis er Shell involveret i bygningen af et pilotanlæg til dyrkning af mikroalger på Hawaii og lige uden for vores hoveddør har det nordtyske energiselskab E.ON Hanse ved Hamborg bygget testfaciliteter til dyrkning af mikroalger i fotobioreaktorer.

I Danmark er der hidtil gjort sporadiske forsøg med alger i form af anvendelse af makroalger i biogasreaktorer samt en litteraturundersøgelse, som beskriver potentialet for anvendelse af udvalgte makroalger. Generelt fokuserer mange på enkelte indholdsstoffer i

algerne, enten lipider eller sukkerstoffer. Et igangværende dansk samarbejde griber sagen anderledes an: Med fokus på at udvikle en optimal og rentabel udnyttelse af alle dele af makroalgen søsalat (*Ulva lactuca*) til energiformål, leder Teknologisk Institut for øjeblikket et 4-årigt projekt i samarbejde med Danmarks Miljøundersøgelser, Forskningscenter RISØ og DONG Energy. De deltagende partnere udvikler viden om dyrkning, høst, konditionering og udnyttelse af energipotentialer af hele biomassen fra søsalat.

I 2008 har et mindre anlæg til dyrkning fungeret på Mors hos Dansk Skaldyrcenter, men på længere sigt er det projektets formål at designe et fuldt mekaniseret anlæg, hvor algerne dyrkes i bassiner tilsat returvarme og evt. CO₂ fra et kraftvarmewerk. Ved at tilføre varme og CO₂ kan algerne væksthastighed, og dermed tørstofudbyttet, forøges. Samtidig udnytter man den CO₂, som ellers ville udledes til atmosfæren og påvirke klimaet negativt. I projektet undersøges forskellige muligheder for energiomsætning af algerne i form af bioethanolproduktion, omsætning i biogasreaktorer og forbrænding i form af hele alger eller ved anvendelse af restprodukter fra produktion af bioethanol og biogas.



Fotobioreaktorer fra E.ON Hanse i Hamborg. Reaktorerne er monteret på drejefodder som følger solens gang og dermed optimerer lysindfaldet.

Om forfatterne:



Peter Daughbjerg Jensen, ph.d.
Teknologisk Institut
Tlf.: 7220 1340
E-mail: Peter.daughbjerg.jensen@teknologisk.dk



Annette Bruhn, post.doc.
Biologisk Institut,
Aarhus Universitet
Tlf.: 89424376
E-mail: Annette.Bruhn@biology.au.dk

Yderligere læsning:

A Look Back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species program: Biodiesel from Algae. NREL/TP-580-24190.

Alger - Akvatisk biomasse – en litteraturundersøgelse. PlanEnergi, Midtjylland, 1998.

Chisti, Y. 2007. Biodiesel from microalgae. Biotechnology Advances 25: 294-306.

Biogas

– en gammelkendt teknologi i front i klimakampen

Foto: Flemming Nelsen, Sory2Media

*Det Jordbrugsvidenskabelige Fakultets
biogasanlæg ved Foulum.*

Ud fra en klimavinkel er biogasbehandling af gylle og restprodukter måske den bioenergi-teknologi, som er mest interessant. Teknologien kan spare atmosfæren for store mængder drivhusgasser og på samme tid sikre en effektiv udnyttelse af næringsstofferne.

Uffe Jørgensen, Henrik B. Møller
og Søren O. Petersen

■ Biogas produceres, når organisk materiale (biomasse) rådner under iltfrie forhold. I denne proces dannes en gas, der overvejende består af methan, CH_4 (65 %) og kuldioxid, CO_2 (35 %). Biogas har været kendt langt tilbage i historien. Alle-rede 1000 år før vor tidsregning er der historiske fortællinger om, at biogas blev anvendt til opvarmning af badevand i Assyrien, og der er beviser for, at der allerede for 2-3000 år siden blev produceret og anvendt biogas i Kina. I dag bruger ca. 22

mio. husholdninger i kinesiske landsbyer biogas til madlavning. De første egentlige biogasanlæg blev bygget i Bombay i Indien i 1859. Den engelske by Exeter begyndte i 1895 at anvende biogas til gadebelysning.

I Danmark er der produceret biogas i næsten 30 år. Det er dels sket på gårdbiogasanlæg, som ejes af en enkelt landmand, og dels på fællesanlæg, som enten er kommunalt ejede eller ejes af flere landmænd. De første gårdbiogasanlæg blev etableret efter energikrisen i 70'erne,

men havde begrænset succes pga. ringe erfaring og en dårlig teknisk standard. Fra slutningen af 80'erne og op igennem 90'erne blev der bygget et stort antal anlæg, som havde større succes, men udbygningen har i de seneste år været stagnerende primært pga. dårlig driftsøkonomi. Med det seneste energiforlig i 2008 har man givet biogassen en håndsrekning i form af en forbedret elafregning, og den erklærede målsætning er at tredoble energiproduktionen fra biogas inden 2025.

Under 5 % udnyttelse

I Danmark anvendes biogas helt overvejende til produktion af el og varme. Fra biogasanlæggene sendes biogassen til kraft-varmeverker, hvorfra den bruges til fjernvarmeproduktion eller til at drive en generator, som laver strøm. Den afgassede biomasse kan anvendes som gødning på landbrugsarealer. I Sverige og Tyskland anvendes biogas også som brændstof i biler og busser. Der findes omkring 40 strategisk placerede gas-tankstationer i Sverige.

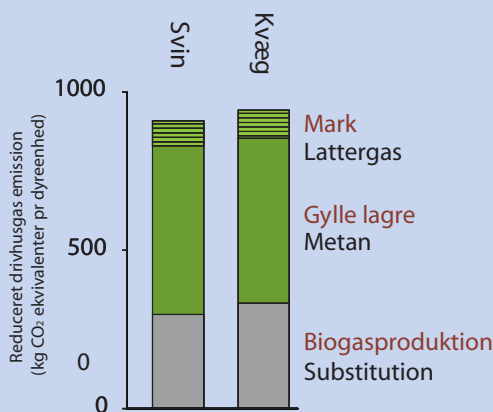
Fordele & ulemper ved biogasproduktion

Fordele

- Kan udnytte energi i biomasse, som ellers er vanskelig at udnytte (f.eks. med højt vandindhold)
- Næringsstoffer i afgasset gødning kan udnyttes bedre
- Meget stor fortrængning af drivhusgasser
- Reduceret risiko for spredning af smitte og ukrudtsfrø (specielt fra termofile anlæg)
- Reduceret gyllelugt ved udbringning

Ulemper

- Ikke fuld udnyttelse af det organiske stof til energi
- Relativt store transportomkostninger ved produktion af biogas på store fællesanlæg
- Lugt omkring anlæggene har hidtil været et problem, men med dagens teknologi kan lugten stort set elimineres.



Den samlede drivhusgasfortrængning fra biogas opgjort som effekten af energiproduktion (substitution af fossil energi), reduceret methan fra lagre samt reduceret lattergas i marken efter udbringning.

Mulig energimængde fra landbruget

Landbruget kan levere ca. 127 PJ bioenergi, hvis alle muligheder udnyttes. I år 2007 leverede landbruget ca. 24 PJ (3 %) af Danmarks energiforbrug på i alt 863 PJ, og det kan altså øges 5 gange. Petajoule (PJ) er en million milliarder (10^{15}) joule

75 % af husdyrgødning afsat på stald omsættes til biogas	22 PJ
80 % af organisk industriaffald udnyttes til biogas	2 PJ
Gyllens fiberfraktion frasepareres efter bioforgasning og afbrændes	3 PJ
75 % af græsareal på lavbund udnyttes til biogas	4 PJ
80 % af kornhalm (foder og strøelse fratrasket)	28 PJ
80 % af rapshalm (foder og strøelse fratrasket)	6 PJ
100 % af animalsk fedt fra slagteriaff. & døde dyr bruges til biodiesel	3 PJ
100 % af rapsolie udnyttes til energi	7 PJ
25 % af brakareal dyrkes med energiafgrøder	9 PJ
15 % af kornareal lægges om til energiafgrøder	43 PJ
Total	127 PJ

Det er i dag under 5 % af husdyrgødningen i Danmark, der udnyttes til biogas. Med en større udnyttelse, kunne energien i husdyrgødning give et stort bidrag til landets energiforsyning (se boks). I øvrigt omsætter anlæggene i dag kun ca. 50 % af gyllens organiske stof til energi, så der er potentiale for endnu større energiproduktion, hvis biogasprocessen kan gøres mere effektiv.

Energiudbyttet kan øges

I danske biogasanlæg består mere end 75 % af biomassen af husdyrgødning. Indholdet af tørstof i gyllen er dog lavt, og omsætteligheden af det organiske stof er ringe (det er jo blevet udnyttet én gang af dyrene). Af hensyn til økonomien tilsætter de fleste biogasanlæg derfor energiholdige affaldsprodukter til gyllen for at øge energiproduktionen pr. reaktorvolumen. Det samlede energipotential i husdyrgødning er dog højt, og der kan opnås en væsentlig reduktion af landbrugets drivhusgasudledning ved biogasbehandlingen. Derfor bør en fremtidig udbygning med biogasanlæg alt overvejende baseres på husdyrgødning. Hvis en sådan udbygning skal være konkurrencedygtig, er der behov for at øge såvel tørstofindholdet som nedbrydeligheden af det organiske tørstof i gylle.

Tørstofindholdet i gylle kan øges ved simple foranstaltninger som vandbesparelser eller "kildeseparering" i stalden, hvor aje og gødning separeres umiddelbart efter udskillelse fra dyret. Alternativt kan man gennemføre en separering, eventuelt med anvendelse af polymerer eller centrifugering. Separering anvendes allerede på en del gårde i dag. Den fraseparerede fiberfraktion kan eksporteres, f.eks. til et centralt biogasfællesanlæg, mens den langt større vandige fraktion, som indeholder det meste af kvælstoffet i gyllen, kan blive på gården og blive anvendt som gødning.

Alternativer eller supplement til gylle og affald som energikilder kunne være planter fra dyrkede arealer, enge eller

naturarealer, der høstes med henblik på produktion af energi, men som også vil kunne benyttes som gødningsmiddel eller eventuelt foder efter afgasning i biogasanlægget.

En milepæl for biogas i Danmark

Det Jordbrugsvidenskabelige Fakultet (DJF) ved Aarhus Universitet indviede i 2007 et af verdens største demonstrations- og forskningsanlæg for biogas og gylleseparatoring i Foulum ved Viborg.

Det nye anlæg er en milepæl for udviklingen af biogasteknologier i Danmark. Det er tale om et fuldskala-anlæg, som giver forskere og anlægsproducenter en unik mulighed for at teste nye metoder og teknologier til biogasproduktion og gyllebehandling på et veldokumenteret videnskabeligt grundlag.

Samlet set skal demonstrationsanlægget behandle omkring 20.000 tons husdyrgødning og ca. 4.000 tons anden biomasse om året fra stalde og marker på Foulum. Driftsanlægget svarer til et almindeligt gårdbiogasanlæg. Foulums demonstrationsanlæg kan producere ca. 850.000 kubikmeter methan om året. Energien herfra svarer til 800 enfamiliehusers elforbrug og 200 huses behov for opvarmning.

Det mest spændende er dog det tilkoblede, fleksible forskningsanlæg. To store forsøgsreaktorer på 30 kubikmeter og to mindre på 10 kubikmeter er kernen heri. Disse reaktorer kan tilsluttes serielt eller parallelt, alt efter opgavetype, og er udstyret med instrumenter, således at biogasprocessens forløb kan monitoreres løbende. Med fire tilhørende fortanke samt doseringssystem for tilførsel af faste produkter som foderrester, dybstrøelse, vandløbsgrøde eller andet kan tilførsler til anlægget styres meget præcist.

Biogas og drivhusgasbalance

Biogasproduktion fra gylle og anden biomasse fortrænger fossilt brændstof, hvilket forbedrer landbrugets drivhusgasbalance.

Men biogasteknologien er ikke bare drivhusgas-reducerende, den er drivhusgas-negativ! Populært sagt betyder det, at jo mere biogas fra husdyrgødning man bruger, jo bedre er det for klimaet. Der er flere årsager til dette.

En årsag er, at der efter udnyttelsen af gylle til biogas ledes mindre methan ud i atmosfæren under den efterfølgende oplagring. Da methan er en stærk drivhusgas (godt 20 gange stærkere end CO_2 , set i et 100-årigt perspektiv), giver det en stor effekt på biogasteknikkens drivhusgasbalance. Den reducerede methanudledning fra gyllelagre betyder omtrent lige så meget som fortrængningen af fossile brændsler ved udnyttelse af biogassen.

Desuden ser det ud til, at afgangningen af gylle reducerer den efterfølgende dannelse af den kraftige drivhusgas lattergas (N_2O), når gyllen udbringes som gødning på marken. I biogasprocessen omdanner bakterier nedbrydeligt organisk stof til methan og CO_2 . Afhængig af processens effektivitet vil det stabilisere den afgassede gylle i den forstand, at der er mindre organisk stof, som skal nedbrydes i jorden efter udbringning. Det er vigtigt for planternes kvælstofforsyning, men påvirker også risikoen for udledning af lattergas. Drivhuseffekten af lattergas er omkring 300 gange kraftigere end effekten af CO_2 .

I forhold til kvælstofomsætning ser der ud til at være et stort potentiale i at afhæste grøngødning til biogasbehandling sammen med gylle. Dels undgår man nedbrydningen i den våde jord i vinterhalvåret med stor risiko for N_2O -udledning, og dels kan man flytte kvælstof og andre næringsstoffer fra grøngødningen til andre afgrøder, og den kan tilføres på et tidspunkt, hvor potentialet for planteoptagelse er større og risikoen for N_2O -dannelse er mindre. Denne anvendelse af grøngødning er særlig interessant for økologiske landbrug, som ikke kan importere kvælstof i handelsgødning. Biogasbe-



Foto: Flemming Nielsen, Story2Media

Biogasreaktoren.

Biogasanlægget ved Foulum

Det Jordbrugsvidenskabelige Fakultets biogasanlæg ved Foulum omfatter en 600 kubikmeter fortank til gylle, to 50 kubikmeter substrattanke (med fedtholdige produkter) og en modtagemikser for energiafgrøder og foderrester. Selve biogasreaktoren er på 1.200 kubikmeter. Anlægget består endvidere af en biogasrenser, en biogaskompressor samt en biogastransmissionsledning fra anlægget til DJF's eksisterende kraftvarmeanlæg, hvor biogassen erstatter det hidtidige forbrug af naturgas.

De første forsøg i det nye forsøgsanlæg kredser primært om forskellige forbehandlingsmetoder, online-målinger af udvalgte stoffer i biogasreaktoren, om seriedrift af reaktorer, og om anvendelse af alternativ biomasse primært i form af dyrkede afgrøder, græs fra naturarealer, alger mm. Et lovende forskningsområde er online-overvågning af biogasprocessen. Hvis man kan opdage uønskede stoffer i tide, mens processerne finder sted, kan man langt bedre styre biogasprocessen og sikre et stabilt højt gasudbytte.

handling repræsenterer således en mulighed for at kombinere energiproduktion med en forbedret næringsstofforsyning.

Miljøgevinst kan gøre biogas rentabelt

De ambitiøse mål for nedbringelse af drivhusgasudledningen inden 2020 gør det nødvendigt at stille krav til alle sektorer, herunder landbruget, om at begrænse udledningerne.

Biogasanlæg kan bidrage til en bæredygtig landbrugsproduktion hvad angår drivhusgasbalancen, men driftsøkonomien har i mange år hæmmet udbygningen med biogasanlæg i Danmark. En forbedret prissætning af den miljømæssige gevinst i form af drivhusgasreduktioner ville muligvis øge interessen for biogasproduktion i tilknytning til husdyrproduktionen i Danmark. ■

Om forfatterne:



Uffe Jørgensen er seniorforsker
Tlf.: 8999 1762
E-mail:
Uffe.Jorgensen@agrsci.dk



Henrik B. Møller er seniorforsker, Tlf.: 8999 3043
E-mail:
henrikb.moller@agrsci.dk



Søren O. Petersen er seniorforsker, Tlf.: 8999 1723
E-mail: Soren.O.Petersen@agrsci.dk

Alle er ved Det jordbrugsvidenskabelige Fakultet, Aarhus Universitet.
www.agrsci.dk

Videre læsning:

Jørgensen, P. J., 2008. Biogas – grøn energi. Rapport fra "Forsker for en dag".
www.forskerforendag.dk

Jørgensen, U., Sørensen, P., Adamsen, A. P. & Kristensen, I. T., 2008. Energi fra biomasse – ressourcer og teknologier vurderet i et regionalt perspektiv. DJF Rapport Markbrug hr. 134. <http://web.agrsci.dk/djfpublikation/djfpdf/djfm134.pdf>

Olesen, J.E. (red.), 2005. Drivhusgasser fra jordbruget - reduktionsmuligheder. DJF rapport Markbrug nr. 113. <http://web.agrsci.dk/djfpublikation/djfpdf/djfm113.pdf>

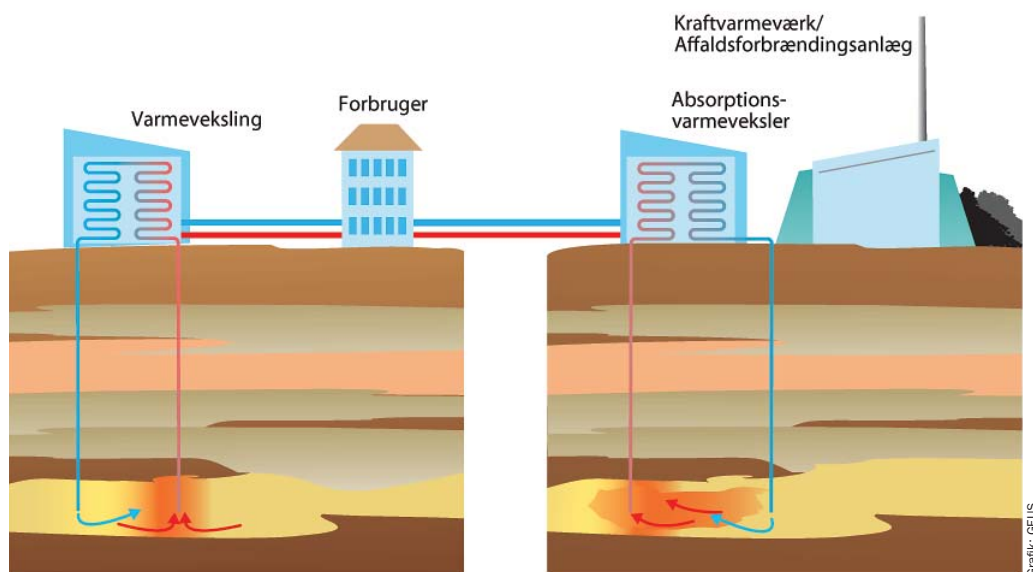
Varmen fra Jordens indre

Fra jordens indre strømmer der uafbrudt varme ud mod jordoverfladen og opvarmer vandet i undergrundens porøse sandstenslag. Denne geotermiske energi kan bruges til at opvarme vore huse – og i Danmark har vi et stort uudnyttet potentiale.

Af Anders Mathiesen

■ De seneste års efterforskning har vist, at der i Danmark findes mange områder med gode sandstenslag, hvor geotermisk energi vil kunne bidrage både til varmeforsyningen og til den lokale forsyningssikkerhed. Denne vedvarende energi kan udnyttes ved at pumpe varmt vand fra undergrunden op gennem en produktionsboring og ekstrahere varmen ved direkte og indirekte varmeveksling. Varmen kan derefter ledes via almindelig fjernvarme til forbrugerne. Det afkølede vand pumpes derefter tilbage ned i reservoiret gennem en injektionsboring (se figur). Rentabel geotermisk varmeproduktion kræver således, at det er muligt at afsætte den producerede varme, f.eks. til et nærliggende fjernvarmenet. Eneste begrænsning og risiko er, at det geotermiske vand skal holdes i et lukket kredsløb – fra produktionsboring, gennem varmeveksler og tilbage igen gennem injektionsboringen og ned i sandstensreservoiret. Kredsløbet skal være lukket, da vandet fra undergrunden kan indeholde bl.a. salt, som hvis det udfældes kan reducere gennemstrømningen.

Danmarks første geotermiske



For at udnytte den geotermiske varme skal man bore to dybe huller det helt rigtige sted, dvs. der hvor man finder de mest optimale geologiske forhold i form af porøse sandstenslag. Fra det ene hul oppumpes varmt vand fra sandstenslaget – f.eks. med en temperatur på ~73 °C som på Margretheholm – op til overfladen, hvor man trækker varmen ud af vandet. Varmen overføres herefter ved hjælp af en varmeveksler til forbrugerne via varmefjernvarmenettet. For at sikre at trykket i sandstenslaget bevares uændret pumpes det afkølede ~15 °C lunkne vand via en injektionsboring et par km derfra tilbage ned i sandstenslagene. Et geotermisk anlæg, som f.eks. Margretheholm er ikke i drift om sommeren, idet overskudsvarmen fra affaldsforbrændingen i denne periode er stor nok til at opfylde fjernvarmebehovet.

anlæg blev bygget i Thisted i 1984, og det har fungeret tilfredsstillende siden. Thisted-anlægget har vist, at geotermalt vand med selv relativ lav temperatur (omkring 50 °C) kan danne basis for en betragtelig varmeproduktion, og at brug af en såkaldt *absorptionsvarmepumpe* kan reducere driftsomkostningerne væsentligt, især

hvis drivvarmen leveres fra et nærliggende affaldsforbrændingsanlæg.

Sandstenens egenskaber

Når man skal etablere et geotermisk anlæg, er det vigtigt at vide, hvor sandstensreservoirerne er, og hvor tykke de er. Samtidig skal de ligge tilstrækkelig dybt, så temperaturen er

høj nok til, at der er økonomi i at hente vandet op fra dem. Grunden til at sandstenslag i reservoirerne er interessante i geotermisk sammenhæng, er at det er nemmere at trække vandet ud af sandsten end f.eks. lerlag, som har en tættere struktur. Dette kræver blandt andet, at reservoirerne har et stort porevolumen (god porøsitet), og at

det varme vand kan strømme frit mellem porerne (god permeabilitet). Generelt falder både porøsiteten og permeabiliteten med dybden på grund af trykket af de overliggende aflejringer og kemiske udfældningsprocesser, der delvist udfylder porerne. Derimod stiger temperaturen af vandet med dybden svarende til ca. 30 °C/km. Ud fra den generelle viden om disse to modsatrettede tendenser er det primært dybdeintervallet 1000–3000 m, der forventes at have det største potentiale.

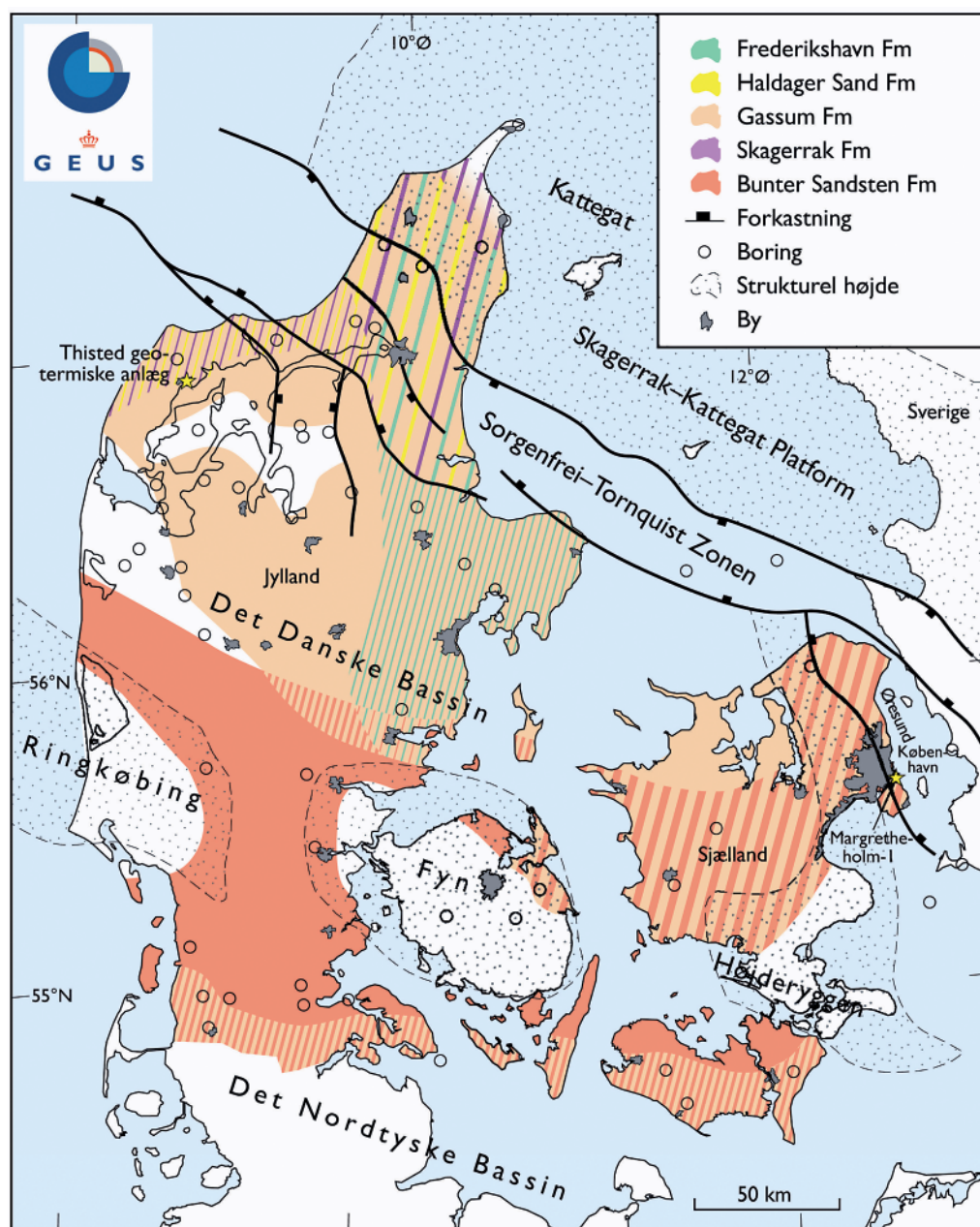
Geotermisk efterforskning

Geologisk set er Danmark ind delt i flere strukturelle elementer og består af to geologiske bassiner adskilt af en strukturel højderyg (Ringkøbing-Fyn Højderyggen) fyldt med sandrige sedimentter og hvor der er adskillige kilometer ned til grundfjeldet.

På baggrund af regionale geologiske studier og resultater fra tidligere tiders olieefterforskning har man identificeret fem sandstensrige enheder i den danske undergrund, som indeholder potentielle geotermiske reservoirer. Disse sandstenslag forekommer ikke overalt i den danske undergrund, men der er store dele af landet, hvor de fem reservoirer har potentiale til at blive udnyttet til geotermisk energi (se kortet).

Kendskabet til den danske undergrund fås ved geologisk at kombinere information fra seismiske data og fra borer. Seismiske data bidrager til forståelsen af udviklingen af de strukturelle elementer, til at vurdere udbredelse, tykkelse og den interne opbygning af undergrunden. Boringer kan skaffe information om reservoirets kvalitet (f.eks. porøsitet og permeabilitet), om reservoirets temperatur, samt om geokemien af porevæsken (salt-indhold).

Specielt permeabilitet er meget kritisk, men svær at forudsige, idet den varierer meget afhængig af aflejringsmiljø, samt sandstenslagets udvikling gennem tid. Alt dette kan beskrives ved hjælp af den geologiske model, som ved at sammenstille alle geofysiske og geologiske



Kort over Danmark som viser det regionale geotermiske potentiale for mulige sandstensrige reservoirer. Kortet er baseret på en begravningsdybde for reservoirerne på 1000–3000 m og at reservoirtykkelsen er større end 25 m. De hvide områder indikerer at reservoiret ikke er til stede (Ringkøbing-Fyn Højderyggen), ligger for grundt (< 1000 m; nordligste Jylland) eller er begravet for dybt (centrale del af Det Danske Bassin). Bemærk fordelingen af de dybe borer, samt placeringen af de to geotermiske anlæg ved Thisted og på Margretheholm nær København. Fm står for formation (enhed).

data kan belyse, afklare og forudsige om de rigtige geologiske forudsætninger og faktorer er til stede.

Vurderingen af potentialet er dog behæftet med store usikkerheder pga. et beskedent datagrundlag, der gør, at kendskabet til reservoirerne er ringe – især i lokalområdet. For at kunne pege på mulige fremtidige borelokaliteter i eller nær en potentiel geotermisk by, er det derfor nødvendigt at supplere med nye

seismiske undersøgelser i lokalområdet, da seismiske data på land generelt er af ældre dato og varierende kvalitet.

Fungerer i 30 år

I dag er boreteknikken blevet så avanceret, at man kan bore skråt ned gennem undergrunden frem for lodret, og det gør det muligt at hente mere varmt vand op, fordi en skrå boring rammer en større flade af sandstensreservoiret. Endvidere

betyder de skrå borer, at to borer med 10 meters afstand på overfladen, kan være adskilt mere end 1200 m i reservoirdybde. Denne afstand mellem borerne i reservoirdybde er væsentlig, fordi lokalt vil der ske det, at det afkølede vand fra injektionsbrønden over tid vil begynde at påvirke temperaturen i produktionsbrønden. Med en afstand af 1200 meter vil det tage omkring 30 år. Selvom vandet bliver koldere i produk-

Jordens varme

I mere end 99 % af jordens volumen er temperaturen over 1000 °C og energiindholdet i jordens varme indre er flere hundrede millioner gange så stort som energiindholdet i jordens samlede kul-, olie- og gasreserver. Varme fra jordens indre strømmer til stadighed ud mod jordoverfladen og dannes som følge af radioaktiv nedbrydning af grundstofferne Uran, Thorium og Kalium. Herved frigives der energi, som både opvarmer jordens indre og danner strømbevægelser, som bl.a. får kontinenterne til at bevæge sig. I områder med vulkansk aktivitet stiger temperaturen hurtigt med dybden; f.eks. på Island kan den geotermiske energi udnyttes til el-produktion ved hjælp af almindelige damp-turbiner.

I områder uden vulkansk aktivitet som i Danmark stiger temperaturen imidlertid mere moderat med dybden – typisk med 25-30 °C pr. kilometer med en effekt på 0,067 W/m². I sådanne områder kan den geotermiske energi udnyttes til opvarmning i form af fjernvarme, idet bl.a. vandførende porøse sandstens- og kalkstenslag i undergrunden løbende opvarmes. Fra disse vandførende lag kan geotermisk energi udvindes i form af varmt vand. Den varmestørrelse, der løbende strømmer ud fra undergrunden under Danmark, svarer teoretisk set til ca. 2/3 af Danmarks samlede nuværende fjernvarmebehov. Geotermisk energi kan udover til opvarmning også anvendes til en række andre formål; f.eks. opvarmning af drivhuse, badeanlæg til rekreation og velvære, opvarmning af bassiner til fiskeproduktion etc. Sådanne anvendelsesmuligheder findes endnu ikke i Danmark.

tionsboringen vil anlægget dog fortsat kunne producere, men anlæggets effekt vil med tiden langsomt dale. Hvis det på et tidspunkt vurderes, at fortsat produktion på den pågældende lokalitet ikke længere er rentabel, kan et nyt anlæg etableres få kilometer væk. Når en lokalitet forlades, vil en langsom genopvarmning af reservoiret finde sted, som følge af den konstante strøm af varme fra jordens indre. Det vil dog tage ganske lang tid – op til 5–6000 år – inden reservoiret igen er tæt på sin oprindelige temperatur.

Stort potentiale i hovedstadsområdet

Behovet for boligopvarmning, kombineret med et stort antal kraftvarmeverker, gør Københavnsområdet til et oplagt område for geotermisk udnyttelse. I 2000–2006 undersøgte GEUS og DONG Energy derfor mulighederne for at udnytte geotermisk energi nær København. Resultaterne af denne undersøgelse var så positive, at man i maj 2006 kunne indvie Danmarks andet geotermiske anlæg på Margrethesholm.

Det geotermiske anlæg eks-

traherer 73 °C varmt vand fra sandstenslag i en dybde af ca. 2700 m. En dykpumpe pumper op til 230 m³ vand i timen op fra reservoiret. Vandet afkøles i varmevekslere til ca. 17 °C, inden det sendes tilbage i reservoiret af en injektionspumpe. I alt kan anlægget producere op til 27 MW varme, fordelt på 14 MW fra undergrunden og 13 MW fra drivvarmen. Ifølge DONG Energy svarer den årlige varmeproduktion fra undergrunden til forbruget i ca. 4600 husstande eller omkring 1 % af det samlede fjernvarmebehov i hovedstadsområdet.

DONG Energy har i 2007 vurderet, at anlægget vil kunne udbygges til et såkaldt stjerneanlæg med i alt fem produktions- og seks injektionsboringer og dermed femdobbelte varmeproduktionen. Endvidere tyder overslagsberegninger på, at det teknisk set på sigt vil være muligt at dække mindst 20 % af fjernvarmebehovet i hovedstadsområdet med geotermisk energi og vil dermed kunne bidrage væsentligt til hovedstadsområdets fjernvarmeforsyning i tusinder af år.

De sidste par år har Sønderborg ligeledes ønsket at satse på

geotermisk energi som et attraktivt supplement til fjernvarmeforsyningen af byen, og gradvist erstatte den naturgasbaserede fjernvarmeproduktion med geotermisk energi. Om alt går vel, vil en geotermisk produktion kunne starte i Sønderborg i slutningen af år 2011 og vil kunne producere varme svarende til en tredjedel af byens fjernvarmebehov.

En brik i fremtidens energiforsyning

Geotermisk energi er forbundet med stor forsyningssikkerhed og geotermiske anlæg kan i dag producere store varmemængder ved et lavt el-forbrug. Elforbruget bruges primært til at pumpe det varme underjordiske vand op til overfladen og det afkølede vand tilbage til undergrunden, samt lidt forbrug til at drive varmevekslerne. El-forbruget udgør typisk 5–10 % af den varmeenergi, der produceres.

Selvom geotermi ikke er svarer på hele Danmarks energibehov, kan det blive en ganske central brik i den samlede energiforsyning. Den vedvarende geotermiske energi vil i Danmark kunne bidrage til varmeforsyningen i adskillige hundrede år, idet Danmarks undergrund har meget store geotermiske ressourcer, hvoraf kun en brøkdel udnyttes i dag i Thisted og København.

Nye evalueringer har vist, at et geotermisk anlæg, evt. suppleret med en lagerboring, er meget velegnet til lokalt at etablere en sæsonlagring af varme. Derved kan overskudsvarme eller varme produceret billigt f.eks. i sommerhalvåret flyttes til vinterhalvåret, hvor den kan erstatte dyr produktion baseret på fossile brændsler.

For at kunne øge udnyttelsen af geotermisk energi yderligere, er det vigtigt at styrke den geologiske forståelse af de geotermiske reservoirers udbredelse og beskaffenhed for at reducere risikoen ved geotermisk efterforskning. Dette kan kun gøres ved indsamling af nye data og løbende langsigtet forskning, idet en bedre geologisk database og en bedre forståelse giver en bedre og mere sikker geologisk model. ■

Om forfatteren



Anders Mathiesen er seniorrådgiver, geolog ved De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland – GEUS
Tlf.: 3814 2000
E-mail: anm@geus.dk

Videre læsning:

Sørensen, K., Nielsen, L.H., Mathiesen, A. & Springer, N., 1998: *Geotermi i Danmark: Geologi og ressourcer*. GEUS Rapport 1998/123. 24 pp.

Nielsen, L.H., Mathiesen, A. & Bidstrup, T. 2004: *Geothermal energy in Denmark. Review of Survey activities 2003. Geological Survey of Denmark and Greenland bulletin 4 p.17–20.*

Geografisk Orientering 2007, Nr 5, Oktober 2007.

Relevante web-links:

DONG Energy:
www.geotermi.dk

ENGINE (ENhanced Geothermal Innovative Network for Europe):
<http://engine.brgm.fr>

Farvestrålende solceller

Billige, farvede og transparente solceller, printet direkte på glas, kan om få år forsyne bygninger med elektricitet, solafskærmning og udsmykning. Solcellerne udnytter den seneste udvikling indenfor nanoteknologi – tilsat lidt inspiration fra naturen.

Af Kasper Nørgaard

■ Trods sin afstand af 150 millioner kilometer fra jorden, leverer solens stråler hver eneste time, døgnet rundt, tilstrækkelig energi til at dække hele menneskeheden samlede forbrug på et år. Dermed er solen den i særklasse største kilde til ren og vedvarende energi. I årtusinder har mennesket drømt om at tæmme solens kræfter, og i dag – ved hjælp af solceller fremstillet af silicium – kan solens lys omdannes direkte til elektricitet, som kan benyttes til et utal af formål. Alligevel udgør denne form for energi endnu en forsvindende lille del af klodens samlede energiproduktion. Det skyldes først og fremmest, at dagens solceller er alt for dyre at fremstille og derfor ikke kan konkurrere prismæssigt med andre billigere energiformer – især afbrænding af olie, kul og naturgas. Derfor er det vigtigt at udvikle alternativer til silicium-baserede solceller for at sikre fremtidens vedvarende og rene energiproduktion.

Kunstig fotosyntese

Silicium er et grundstof, der udvindes af jordskorpen. Udviningsprocessen og den efter-

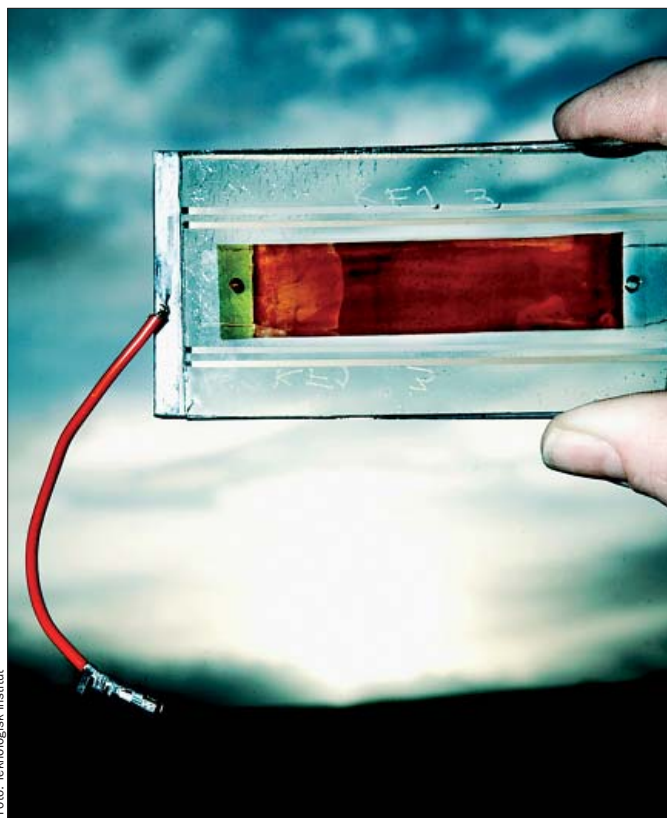


Foto: Teknologisk Institut

Færdigsamlet farvestof-solcelle med påførte elektroder.

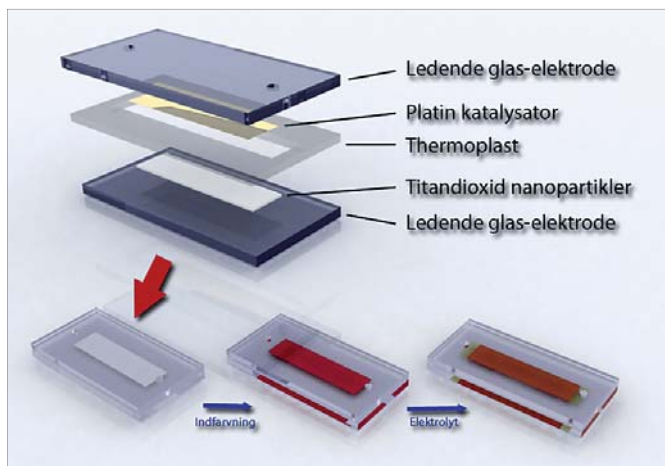
følgende oprensning er begge meget komplicerede og energi-krævende, og der kræves enorme temperaturer (>1900 °C) og en

uhyre renhed (>99,9999 %) for silicium kan anvendes til solceller. I de seneste år har der dog været et øget fokus på at udvikle

solceller baseret på langt billigere råmaterialer og simple fremstillingsmetoder. Den mest lovende af denne kommende generation af solceller er farvestof-solcellen, også kaldet DSC (fra engelsk; Dye-sensitized Solar Cell).

Lys er egentlig elektromagnetisk stråling og består af små "pakker" af energi, kaldet fotoner. Naturen har i form af fotosyntesen udviklet en elegant metode til at høste solens stråler, altså opfange sollysets fotoner og omdanne dem til kemisk energi. Fotosyntesen finder bl.a. sted i planternes grønne blade, der indeholder farvestoffet klorofyl. Klorofyl kan optage en foton fra sollyset og derefter frigive en elektron til omgivelserne. Elektronen vandrer videre i systemet, hvor den til sidst omdannes til kemisk energi i form af organisk stof, der får planten til at vokse.

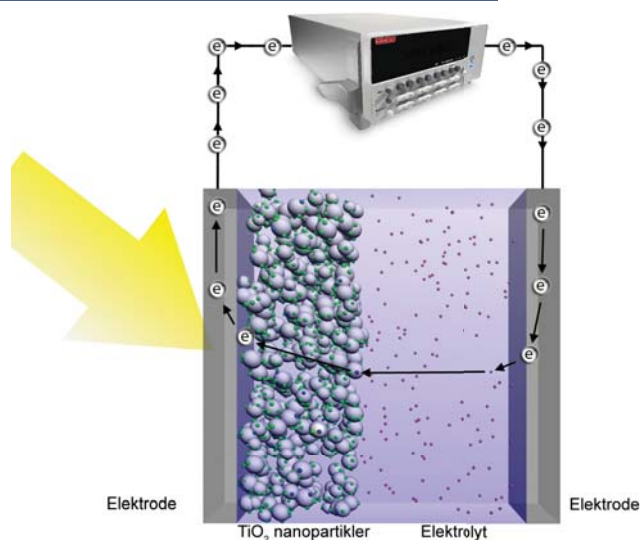
Farvestof-solcellerne er, i modsætning til andre typer solceller, i høj grad inspireret af fotosyntesen, idet de netop benytter et farvestof til at absorbere sollyset. I stedet for at omdanne lysenergien



Opbygning af cellen

Farvestof-solcellen er opbygget som en sandwich-struktur mellem to elektroder (typisk af glas). Elektroderne er gjort ledende vha. et tyndt, gennemsigtigt oxid-lag. Den ene elektrode er påført et tyndt platinlag, der fungerer som katalysator for elektrokemiske processer, og den anden elektrode indeholder et lag nanopartikler af titandioxid. De to elektroder er adskilt af et termoplastisk materiale, der samtidig forsegler cellens indre. Efter samling af cellen bliver nanopartiklerne indfarvet med et kraftigt farvestof, og derefter tilsættes en elektrolyt gennem to små huller i top-elektroden (der til sidst lukkes).

Elektronens vej gennem cellen



1. Farvestof + $h\nu \rightarrow$ Farvestof*
2. Farvestof* $\rightarrow$ Farvestof⁺ + e^-
3. Elektrolyt + $e^- \rightarrow$ elektrolyt⁻
4. Farvestof⁺ + elektrolyt⁻ $\rightarrow$ Farvestof + elektrolyt

Når solcellen belyses, absorberes det indkomne sollys af farvestoffet, der derved exciteres til en elektronisk anslået tilstand (1). Det anslåede farvestofmolekyle frigiver herefter en elektron til halvledermaterialet (2), der sørger for at lede elektronen ud til den ene elektrode. Elektronen indgår nu i et elektronisk kredsløb udenfor cellen, hvor den kan udføre arbejde, for derefter at ende ved den modsatte elektrode. Her medvirker elektronen i endnu en redoxproces, idet den bliver optaget af elektrolytten (der derved reduceres, 3). Kredsløbet sluttes ved at elektrolytten reducerer farvestoffet tilbage til dets grundtilstand (4), hvorefter det er klar til at modtage endnu en foton.

til kemisk energi, bliver de høstede fotoner dog omdannet til elektricitet.

Farvestof-solceller består grundlæggende set af et kraftigt farvestof, der er kemisk bundet til et porøst halvledermateriale og omgivet af en elektrolyt (elektrisk ledende medie). Hele systemet er indkapslet mellem to ledende elektroder. Cellen fungerer gennem en række elektrokemiske processer (redox-reaktioner), der forløber inde i cellen når den bliver belyst, og herved genererer den elektricitet (se faktaboks).

Anvendt nanoteknologi

Hemmeligheden bag farvestof-cellsens virkemåde ligger først og fremmest i det rette valg af materialer. Farvestoffet skal være effektivt til at absorbere det indkomne sollys, og samtidig i stand til at indgå i de elektrokemiske reaktioner. De mest effektive farvestoffer, man kender i dag, er baseret på ruthenium-ioner, men mange andre uorganiske, såvel som organiske, farvestofmolekyler kan i princippet anvendes i en farvestof-solcelle. Dertil hører en række naturligt forekommende farvestoffer fra eksempelvis brombær og persille.

Det porøse halvledermateriale har en struktur, der kan sammenlignes lidt med en badesvamp, blot på meget mindre skala. Det består af et tyndt lag af ekstremt små nanopartikler, hvilket sikrer at sollyset let kan trænge igennem materialet. Ofte benyttes nanopartikler af titandioxid, TiO_2 , der bl.a. også finder anvendelse som pigment i hvid maling. Nanopartiklerne bevirker, at materialet får en enorm stor overflade, hvor farvestofmolekylerne kan binde sig. Jo mere farvestof, der er bundet i cellen, des mere af sollyset kan opfanges og omdannes til elektricitet.

Farvestof-solcellen repræsenterer en af de første reelle anvendelser af nanoteknologi, hvor nanostrukturen har afgørende indflydelse på funktionaliteten.

Cellens to elektroder skal være ledende, så de frigivne elektroner kan transporteres ud

til det ydre kredsløb, men samtidig skal de også være gennemsigtlige for sollyset. Derfor er glas, der er blevet coatet med et tyndt, ledende oxid-lag det mest anvendte elektrodemateriale.

Nanopartiklerne af TiO_2 kan trykkes eller printes direkte på den ledende glaselektrode og derefter indfarves med det valgte farvestof. Denne teknik gør det muligt at designe mønstre eller billeder i forskellige farver som en del af solcellens udformning. De råmaterialer, der benyttes til at fremstille en farvestof-solcelle, er betydeligt billigere end silicium. Typisk vil elektrodeglasset være den dyreste komponent i cellen. Det vil bl.a. betyde, at prisen på en færdigproduceret farvestof-solcelle vil være en brøkdel af prisen på en silicium-celle.

En af de største udfordringer for DSC-teknologien er dog at fremstille effektive celler med lang levetid – gerne på 20-25 år eller mere. De to glaselektroder skal være hermetisk forseglet, så de indre kemiske dele af cellen ikke bliver ødelagt af indtrængende luft eller væske. Dette stiller store krav til valg af forseglingsmateriale og fremstillingsmetode.

På vej mod produktion i stor skala

Gennem en årrække har Teknologisk Institut forsket i at udvikle, teste og forbedre farvestof-solceller så de får høj effektivitet og en lang levetid. Holdbarheden undersøges i instituttets laboratorier, hvor cellerne testes i forhold til bl.a. påvirkning af lys, fugt og temperaturudsving. Dette har givet et stort indblik i hvilke materialer og produktionsmetoder, der kan medvirke til forbedre cellernes levetid og ydelse.

En solcelles effektivitet er defineret som den procentdel af det indkomne sollys, der bliver opsamlet og omsat til elektricitet. Effektiviteten bestemmes i et laboratorium ud fra nogle fastlagte kriterier, der tager højde for temperaturen (25 °C), lysets indfaldsvinkel og vejlængde gennem atmosfæren samt dets intensitet (1000



Foto: Teknologisk Institut

Laborant Julie Gatzwiller i færd med at karakterisere en solcelle i instituttets kunstige sol.

W/m²). De bedste farvestof-solceller yder i dag lidt over 10 % under disse standardbetingelser, hvilket er omkring halvdelen af, hvad de bedste silicium-solceller kan præstere. I verden udenfor laboratoriet ser virkeligheden dog ofte anderledes ud – især på vores nordlige breddegrader.

Solceller bliver ofte meget varme, når de står i solen. For silicium-celler får det effektiviteten til at falde betragteligt, hvorimod farvestof-celler leverer den samme effektivitet over et bredt temperaturinterval. Samtidig er farvestof-celler mere effektive under forhold med lave lysintensiteter, f.eks. tidligt om morgenen, om aftenen og i overskyet vejr. For rigtigt at kunne sammenligne effektiviteten af farvestof-solceller med konventionelle siliciumceller er det derfor vigtigt at foretage målinger under rigtige udendørs forhold over lange perioder. Selvom siliciumceller rent ydelsesmæssigt stadig har førertrøjen på, sker der i disse år kolossale fremskridt inden for den teknologiske udvikling af farvestof-solceller. Teknologisk Institut og andre interna-

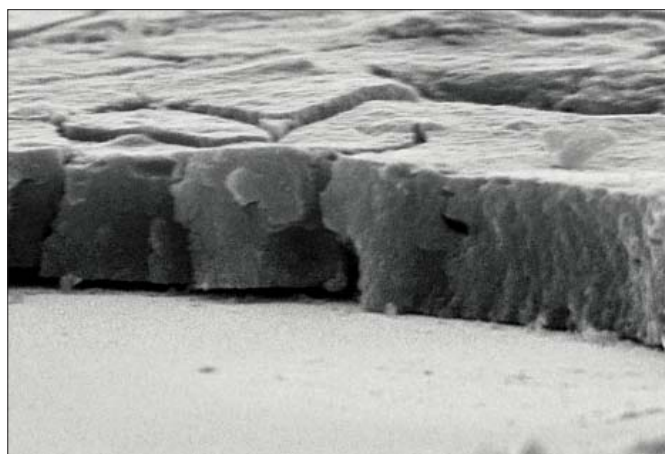
tionale virksomheder arbejder i disse år på at udvikle og klarlægge teknologien bag cellen til en egentlig produktion i stor skala.

Fremtidens solceller trykt på glasfacader

Farvestof-solcellen adskiller sig på ét centralt punkt fra de konventionelle solceller, da den kan fremstilles i transparent, farvet og mønstret glas. Solcellepaneler i glas er et fantastisk byggemateriale, hvor kun fantasien sæt-

ter grænser for anvendelsen. En solcelle i gennemsigtigt glas kan eksempelvis bruges i bygningsfacader på kontorbygninger eller som solafskærmning i vinduer og loftspartier, f.eks. i svømmehaller.

Farvestof-solceller kan altså betragtes som et aktivt byggelement med helt unikke egenskaber, der, udover at levere elektricitet, også afskærmer for solen og giver et tempereret indeklima med et behageligt dagslys. ■



Billede: Anders Rand Andersen

Elektronmikroskopi-billede af grænsefladen mellem ledende glas og nanostruktureret titandioxid.

Forfatter:



Kasper Nørgaard er ph.d., seniorkonsulent ved Teknologisk Institut Center for plastteknologi
E-mail: kasper.norgaard@teknologisk.dk
Tlf.: 7220 2933

Videre læsning:

F. O. Lenzmann & J. M. Kroon, *Recent Advances in Dye-Sensitized Solar Cells, Advances in OptoElectronics*, 2007

www.teknologisk.dk

Brændselsceller bliver voksne

Efter et langt tilløb er brændselsceller – nærmere betegnet såkaldte fastoxid-brændselsceller (SOFC-brændselsceller) – blevet en så voksen teknologi, at den er tæt på at blive bragt ud på det kommercielle marked.

Af Anders Smith

■ Fremtidens energiforsyning er over 150 år gammel. Så længe har princippet bag brændselsceller til fremstilling af elektricitet på en effektiv og miljøvenlig måde været kendt. Imidlertid er de materialemæssige krav til et pålideligt og højtydende brændselscellesystem så store, at teknologien først nu for alvor begynder at gøre sig gældende uden for snævre nicheområder som rumfart. Danske brændselsceller af typen SOFC – udviklet i et tæt samarbejde mellem Risø DTU og Topsoe Fuel Cell – er med helt fremme i kapløbet om at bringe teknologien på markedet.

Brændselsceller sparer omvejen

I en brændselscelle omsættes kemisk energi – lagret i et brændstof som brint eller naturgas – direkte til elektricitet under reaktion med luftens ilt. Det gør det muligt at producere elektricitet mere effektivt. Sædvanligvis fremstiller man nemlig elektricitet ved først at omdanne den kemiske energi til varme

ved afbrænding af brændstof. De varme forbrændingsgasser kan man få til at udføre et mekanisk arbejde i et stempel (f.eks. i en dieselgenerator) eller en turbine (f.eks. i et kraftværk), hvorefter det mekaniske arbejde kan omsættes til elektricitet. I en brændselscelle sparer man omvejen over varme og mekanisk arbejde. Derfor kan virkningsgraden (forholdet mellem den producerede elektriske energi og den varmemængde, man kan få ved fuldstændig forbrænding af brændslet) blive højere.

Den afgørende elektrolyt

En brændselscelle består af en anode og en katode, adskilt af en elektrolyt. Nøglen til brændselscellens virkemåde ligger i elektrolytten. Den består af et stof, der ikke tillader gasmolekyler at passere, men kun helt specifikke ioner (dvs. atomer med et overskud eller underskud af elektroner). På den ene side af elektrolytten leder man brændsel (i det følgende eksemplificeret som

brint) til, mens man på den anden side tillader ilt. På denne måde adskiller man de to halvdele af forbrændingsreaktionen $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$, der som skrevet her, blot frigiver varme. I stedet bliver der to halvreaktioner, som for brændselscelletypen SOFC (jf. nedenfor) ser således ud: $\text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{O}^{2-}$ (katode) og $2\text{H}_2 + 2\text{O}^{2-} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$ (anode). Resultatet bliver, at man "pumper" elektroner (e^-) fra katoden til anoden; elektronerne kan så udføre et elektrisk arbejde i et ydre kredsløb (se boks).

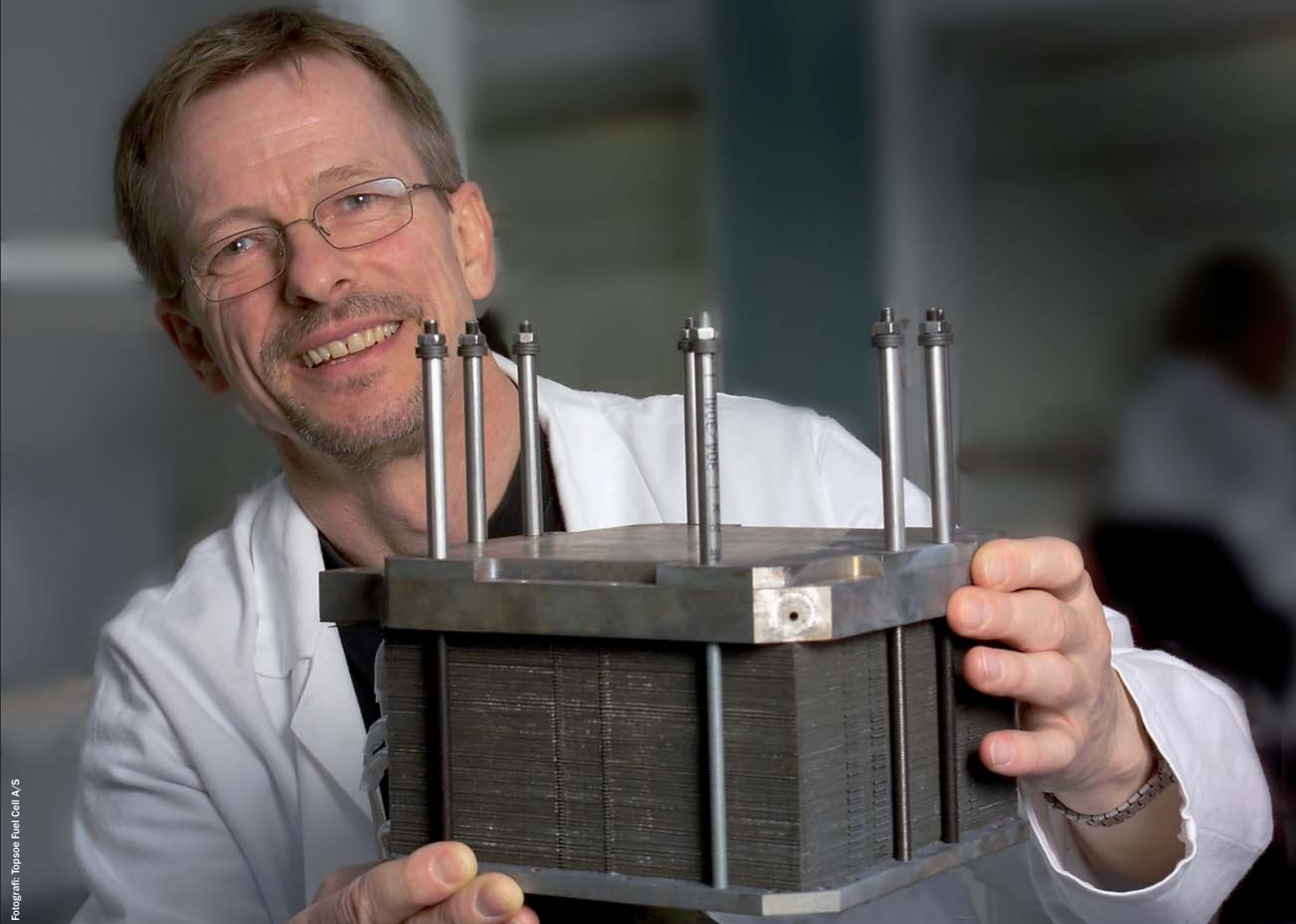
Elektrolytten, der er hjertet i brændselscellen, lægger også navn til den. F.eks. består elektrolytten i PEM-brændselsceller (Polymer Electrolyte Membrane) af en tynd film af et polymermateriale, som tillader brintioner (eller mere præcist H_3O^+ -ioner) at passere. Og i en SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) består elektrolytten af et keramisk materiale (en solid oxide – på dansk et fastoxid), som kan transportere iltioner (O^{2-}). PEM med en driftstem-

peratur på omkring 100 °C (op mod 250 °C for visse typer) og SOFC med en driftstemperatur på 650-850 °C er de to mest lovende typer og de to, som forskningen i Danmark koncentrerer sig om.

SOFC har en række principielle fordele: Der indgår ikke ædelmetaller i elektroderne, cellen kan udnytte mange forskellige brændsler og tåler flere urenheder i brændslet, og virkningsgraden bliver højere pga. den høje driftstemperatur. På den anden side bliver de omgivende komponenter i et komplet system noget dyrere, da de skal kunne tåle høj temperatur. Desuden er opstartstiden alt andet lige længere end for et PEM-system.

Stadig store udfordringer

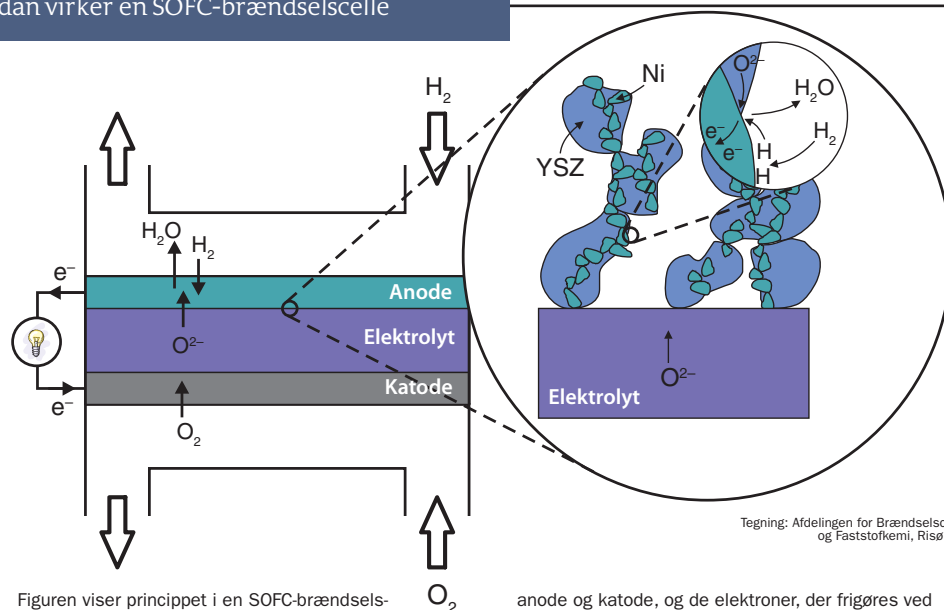
Selv om man har forsket i brændselsceller i mange år, er der stadig store materialeteknologiske udfordringer. Det gælder nemlig om at kunne styre materialernes struktur og egenskaber helt ned på nanoskala, samtidig med at de befinder sig i et hårdt



SOFC-brændselsceller forbundet i serie i en såkaldt stak. Hver brændselscelle er på $18 \times 18 \text{ cm}^2$ med en tykkelse på under $0,5 \text{ mm}$. De forbindes med tynde plader af specielt stål, der dels sørger for den elektriske forbindelse, dels adskiller luft og brændsel. Stakken kan give en elektrisk effekt på 2,5 kilowatt, nok til en gennemsnitlig husstands elektricitetsbehov.

kemisk miljø og skal kunne holde til mange tusind timer under drift. Reaktionen i anoden og katoden involverer tre slags partikler: ioner, elektroner og gasmolekyler. De kan derfor kun forløbe der, hvor både ionledende og elektronledende materiale mødes, og der samtidig er adgang for reaktionsgasserne. For at gøre disse såkaldte trefasegrænser så lange som muligt – og dermed minimere cellernes indre tab – skal de to elektroder dels være porøse, dels bestå af så små partikler som muligt, gerne helt ned til nanostørrelse. Problemet er imidlertid, at små partikler har en tendens til at smelte sammen og blive til større partikler, når temperaturen er høj. Desuden vil der altid være urenheder til stede – både i elektrodematerialerne og i gasserne – som har en uheldig forkærlighed for netop at sætte sig i trefasegrænserne.

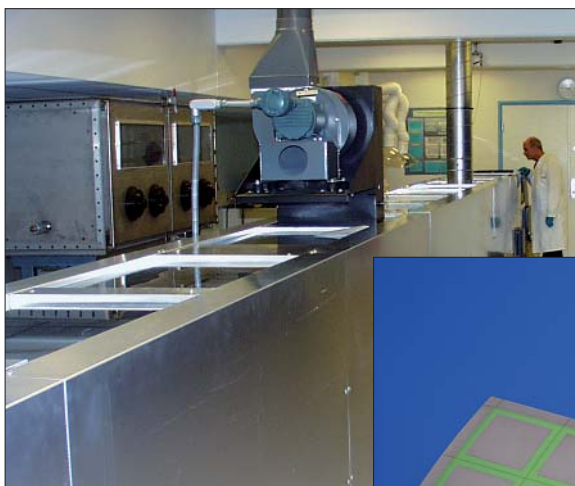
Sådan virker en SOFC-brændselscelle



Tegning: Afdelingen for Brændselsceller og Faststoff kemi, Risø DTU

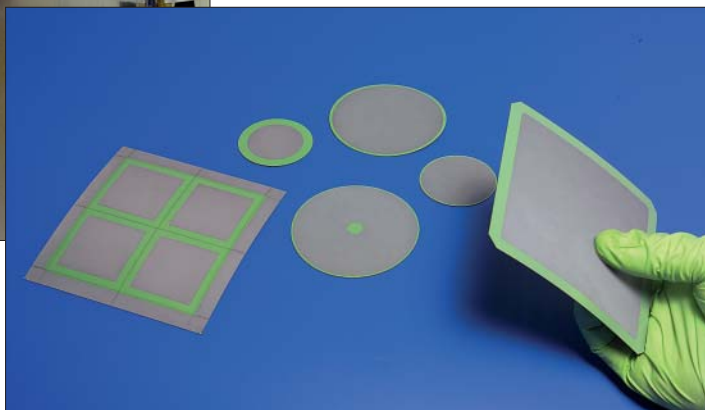
Figuren viser princippet i en SOFC-brændselscelle. Iltmolekyler (O_2) omdannes ved katoden til iltioner (O^{2-}) under tilførsel af elektroner. Iltionerne kan – i modsætning til molekylerne – passere gennem den keramiske elektrolyt. Ved anoden reagerer de med brint under dannelse af vand. Derved opstår der en forskel i elektrisk potential mellem

anode og katode, og de elektroner, der frigøres ved anoden, kan udføre et nyttigt arbejde i et ydre kredsløb (vist som en elpære). Det forstørrede billede viser skematisk den porøse struktur af anoden, som består af det keramiske materiale YSZ samt metallet nikkel. Hastigheden af de kemiske reaktioners forløb afhænger afgørende af anodens mikrostruktur.



Fotos: Afd. for Brændselsceller og Faststofkemi, Risø DTU

← Båndstøbningsmaskinen (tape casteren), der er en del af præ-pilotanlægget på Risø DTU. Brændselscellerne fremstilles af tynde lag af keramik og/eller metal, der efter formgivning brændes (sintres) til det færdige emne.



Her ses færdige brændselsceller i forskellige geometrier. →

Udfordringen er ikke bare at finde materialer og strukturer, der er velegnede, men i lige så høj grad at finde måder at fremstille dem på, som vil være industrielt relevante. Udviklingsarbejdet koncentrerer sig for SOFC hovedsagelig om keramiske fremstillingsprocesser som båndstøbning (tape casting – en proces, hvor man støber tynde baner af keramiske materialer), sprøjtning og silketryk, der er forholdsvis billige og velkendte i andre industrielle sammenhænge.

Kommerciel anvendelse er lige om hjørnet

På Risø DTU har man forsket i SOFC siden slutningen af 1980'erne, men især fra omkring 2000 er indsatsen blevet intensiveret med et omfattende samarbejde med virksomheden Topsoe Fuel Cell (der er ejet af Haldor Topsoe A/S). I dag er der over 50 personer involveret i den forskning og udvikling, som finder sted i Afdelingen for Brændselsceller og Faststofkemi på Risø DTU. Her har man opbygget en omfattende viden om fremstilling og test af brændselsceller og på et såkaldt præ-pilotanlæg kan man i dag rutinemæssigt fremstille tusindvis af SOFC-brændselsceller. De gode resultater man har opnået, har ført til at Topsoe Fuel Cell er ved at opføre en fabrik i pilotstørrelse, der vil mangedoble produktions-

kapaciteten og gøre det muligt at demonstrere teknologien i praktiske anvendelser. Sideløbende hermed fortsætter forskningen og udviklingen, både hos Topsoe Fuel Cell og på Risø DTU. En vigtig indsats sigter på at reducere driftstemperaturen (til omkring 650 °C) og øge robustheden ved at erstatte cellens bærende keramiklag med et porøst metallag. Sådanne celler vil være velegnede til supplerende strømforsyninger i f.eks. lastbiler, hvor man i dag bruger ineffektive og forurenende dieselmotorer. Andre vigtige forskningsområder er en forbedret forståelse af de fundamentale processer, herunder hvordan virkningen af urenheder imødegås; udvikling af nye og bedre elektrodematerialer; og fortsat karakterisering af brændselscellerne på alle niveauer fra deres mikrostruktur til deres elektriske ydelse og holdbarhed.

Selv om brændselscelleteknologien nærmer sig en kommerciel anvendelse, vil der derfor være nok at gøre for forskerne, også i de kommende år.

Interessante sidegevinster

Forskningen inden for SOFC kaster også interessante anvendelser af sig i en række andre sammenhænge. Her skal til slut blot nævnes to:

Når man har en brændselscelle, kan det synes oplagt at forsøge at køre den "baglæns",

således at den virker som en elektrolysecelle, dvs. spalter vand til ilt og brint under tilførsel af elektricitet. Sådanne fastoxid-elektrolyseceller (SOEC – Solid Oxide Electrolysis Cells) kan bruges til fremstilling af brint ud fra overskudsenergi fra f.eks. vindmøller. Da processerne forløber ved en forholdsvis høj temperatur, bliver den termodynamiske virkningsgrad meget høj. Desuden kan man elektrolysere kuldioxid til CO, således at en SOEC kan fremstille syntesegas – en blanding af brint og CO, der er udgangspunkt for en lang række syntesiser i den kemiske industri. Dette er en måde at fremstille flydende transportbrændsler på.

En anden anvendelse tager udgangspunkt i brændselscellens elektrolyt, der jo er uigennemtrængelig for luftens molekyler og kun tillader iltioner at passere. Det kan udnyttes i en iltmembran, som kan fremstille ren ilt fra luft. Hvis forbrændingen i f.eks. et kraftværk sker i ren ilt i stedet for i luft, bliver det væsentlig lettere at opfange og gemme den CO₂, der dannes i forbrændingsprocessen. CO₂-adskillelse forventes at blive en afgørende teknologi for kul-kraftværker, hvis man skal nedbringe CO₂-udledningen.

Disse og en række beslægtede emner er også aktive forskningsområder på Risø DTU. ■

Om forfatteren



Anders Smith er specialkonsulent, ph.d. Afdelingen for Brændselsceller og Faststofkemi Risø DTU Tlf.: 4677 5846 E-mail: anders.smith@risoe.dk

Videre læsning

A. Smith og M. Mogensen: Brændselscellers fysik og kemi. Kvant, 1-04 (marts 2004), s. 14-20

A. Smith og S. Linderorth: Nanoteknologi og materialekemi. Dansk Kemi 85, nr. 12 (2004), s. 18-20

S. Linderorth og A. Smith: Worldwide SOFC overview from a Scandinavian and a European perspective. Ceram. Eng. Sci. Proc. 28 nr. 4 (2007), s. 3-13

(Artiklerne er tilgængelige på www.sofc.dk)

Plastik i brændselscellen

Brændselsceller baseret på plastmaterialer (polymerer) er den type, der forskes mest i verden over – bl.a. fordi bilfabrikanterne satser på disse til brug i brintbiler. Endnu lader det kommercielle gennembrud for denne type brændselsceller dog vente på sig – primært fordi prisen stadig er for høj.

Af Jesper Lebak Jespersen

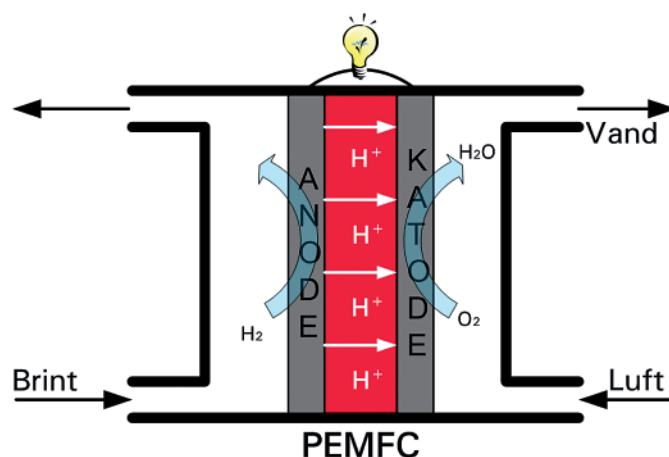
■ Visionen om en fremtid, hvor bilerne kører på brint, afhænger i høj grad af udviklingen af brændselsceller. Den type brændselsceller, bilindustrien satser på, kaldes PEM-brændselsceller (hvor PEM står for *Proton Exchange Membrane* eller *Polymer Electrolyte Membrane*), og de fungerer ved relativt lave temperaturer sammenlignet med brændselsceller baseret på keramiske materialer, som er omtalt i foregående artikel. PEM-brændselsceller er baserede på polymerer – dvs. plastmaterialer – og er den type brændselsceller, der forskes mest i verden over.

Der findes overordnet tre forskellige typer af polymer-brændselsceller (se boks). I Danmark forskes der i alle typerne, ligesom der produceres stakke og systemer baseret på alle de tre typer. Derfor

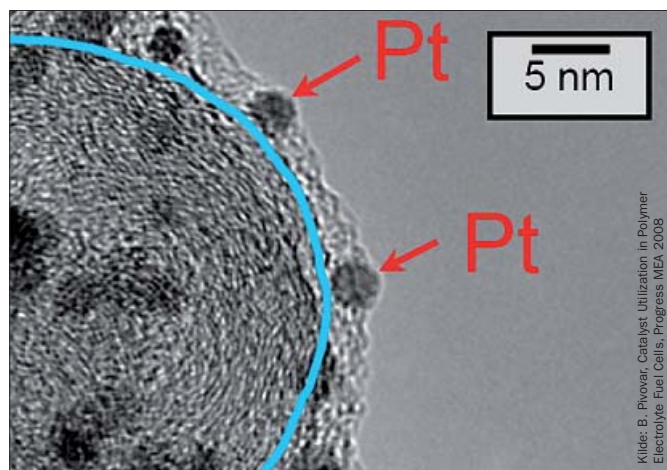
er Danmark godt med i udviklingen inden for PEM-brændselsceller globalt set, selvom det i Danmark ikke er bilindustrien, der driver udviklingen.

Kostprisen driller

Prisen for brændselsceller er stadig den største hindring for commercialisering af brændselsceller. I dag bruger man platin hæftet på kulstof, primært som katalysator på elektroderne i en PEM-brændselscelle. Mængden af platin, der bruges i de forskellige typer af brændselsceller varierer meget, men brugen af platin som katalysator på elektroderne er samlet set den væsentligste årsag til den høje pris på brændselsceller. Derfor forskes der intens i at mindske brugen af platin, bl.a. ved at anvende nanopartikler, hvilket giver det



En PEM-brændselscelle består af en elektrolyt, som populært sagt kaldes cellens hjerte eller proton-pumpen, og af to elektroder (anode og katode), som populært benævnes cellens lunger, hvor brint og ilt omsættes



Billede taget i transmissions-elektronmikroskop af strukturen i elektroden i en PEM-brændselscelle. Små partikler af platin sidder på en struktur af kulstof.

Tre forskellige typer af polymer-baserede brændselsceller

PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell):

Den mest udbredte type, typisk baseret på en syntetisk polymer med sulfonsyregrupper som muliggør protontransport, hvor vand (H_2O) giver protonledningsevne og elektroderne består af en kulstofstruktur med platin. Arbejdstemperaturen er på 60-120 °C.

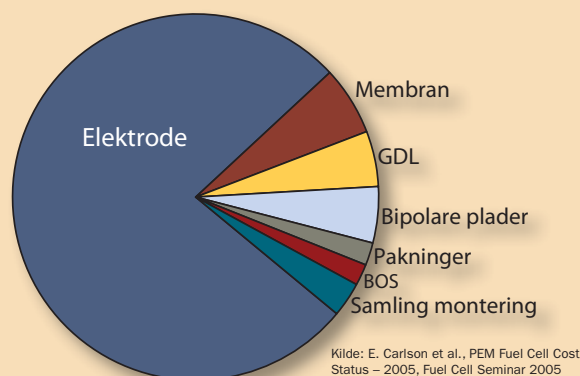
HT-PEMFC (High Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell):

Typisk baseret på membran af en syntetisk højtemperaturbestandig polymer, hvor fosforsyre (H_3PO_4) giver protonledningsevne, og Pt/C elektroder. Arbejdstemperaturen er på 120-190 °C

DMFC (Direct Methanol Fuel Cell):

Typisk baseret på samme type membran som PEMFC, og elektroderne er også tilsvarende, dog med større indhold af platin og kan indeholde rhodium. Arbejdstemperaturen er lavere i størrelsesordenen 25-60 °C

Omkostningsfordeling



Fordeling af omkostninger i en PEM-brændselscelle, baseret på en 80 kW stak og et styktal på 500.000 enheder. Det ses tydeligt, at elektroderne suverænt er de dyreste komponenter, hvilket skyldes brugen af platin.

samme elektrokemiske overfladeareal ved brug af en mindre mængde platin. Man undersøger også, om alternative supportstrukturer af kulstof, herunder karbon-nanorør, kan forøge det elektrokemiske overfladeareal. Endvidere leder man også efter alternative materialer som katalysator, men hidtil er platin langt det bedste materiale.

Når cellen ældes

Udover kostprisen er degradering eller ældning af ydelsen fra brændselscellen, den største hindring for en storskala udbredelse af teknologien. Afhængig af brugen er der forskellige krav til levetiden for brændselsceller. For biler forventer man 5.000 timer, for busser 20.000 og for stationære mikro-kraftvarmeanlæg forventer man levetider på mindst 40.000 timers drift. Ældning eller degradering af brændselsceller er en irreversibel proces. Der er flere mekanismer, som gør at cellen ældes, nogle er specifikke for den enkelte brændselscelle-type, mens andre er generelle.

Et generelt ældningsfænomen er, at det elektrokemiske overfladeareal mindskes over tid, dvs. at der er færre steder hvor reaktionerne, f.eks. reduktion af ilt: $O_2 + 4e^- \rightarrow 2O^{2-}$, kan finde sted. En anden generel ældningsmekanisme er, at membranmaterialet (elektrolytten) over tid bliver ringere til at lede protoner. I en type af PEM-brændselsceller (HT-PEMFC) er det fosforsyre (H_3PO_4) som udgør det protonledende element i elektrolytten. Fosforsyren forsvinder fra membranen over tid via reaktanterne, hvilket mindsker ledningsevnen og dermed ydelsen af cellen. Desuden kan der, typisk under opstart og nedlukning af cellen, opstå skader på kulstofstrukturen i elektroderne, fordi kulstoffet kan korrodere under høje spændinger i brændselscellen.

PEM teknologi og kulbrinter

Mens man hidtil har haft svært ved at finde gode metoder til lagring og distribution af ren brint, så er der ikke samme problemer med lagring og distribution af kulbrinter, såsom

alkohol og naturgas. Det er dog nødvendigt at reformere kulbrinterne til en brinholdig gas før den kan bruges i brændselscellerne. Denne brinholdige gas vil indeholde koncentrationer af kulmonoxid (CO), som kan påvirke ydelsen på brændselsceller meget. Kulmonoxid sætter sig på de aktive steder på katalysatoren, og forhindrer derved brint i at reagere på elektroden. Temperaturen af brændselscellen er dog afgørende for i hvor høj grad kulmonoxid påvirker katalysatoren. Såkaldte højtemperatur-PEM-brændselsceller (HT-PEMFC) kan derfor tolerere meget høje koncentrationer af kulmonoxid (2-3 %), hvor en almindelige PEM-brændselscelle kun kan klare 5-15 ppm kulmonoxid i anodegassen.

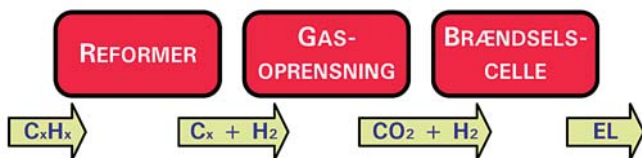
Ekstremt fleksibel teknologi

Brændselsceller er en ekstremt fleksibel teknologi og kan anvendes i hele effektområdet fra mW til MW. Ofte deles anvendelserne op i stationære, transportable og automotive. Det er vidt forskellige krav, der stilles til de forskellige områder, hvor der for det automotive område er høje krav til de dynamiske egenskaber og effekt-tætheden, mens man mere fokuserer på levetiden for det stationære område. Ens for begge disse områder er dog, at prisen for systemet er afgørende. Det er knap så kritisk på det transportable område som små palle-løftere, gaffeltrucks mv., og derfor er der også flest anvendelser på dette område.

Inden for alle områder findes der dog nicheområder, hvor brændselsceller i dag konkurrer med andre teknologier. Et eksempel er den danske virksomhed Dantherm, der i dag tilbyder et power back-up modul til mobile sendemaster baseret på PEM-teknologi. I takt med, at brændselsceller bliver billigere at producere og levetiden forbedres, stiger incitamentet for at bruge teknologien i bredere sammenhænge, for brændselsceller er den mest effektive måde at omdanne kemisk energi til elektrisk energi.

Reformering af kulbrinter

Reformerprincip



For at kulbrinter som alkohol eller naturgas kan bruges i PEM-brændselsceller, må kulbrinterne først reformeres til en brinholdig gas. Principskitsen viser en sådan reformeringsproces. Normalt kan man ikke direkte anvende brint fremstillet ved reformering af kulbrinter uden en fordyrende rensning. Undtagelsen er brug af højtemperatur-PEM-brændselsceller (HT-PEMFC).

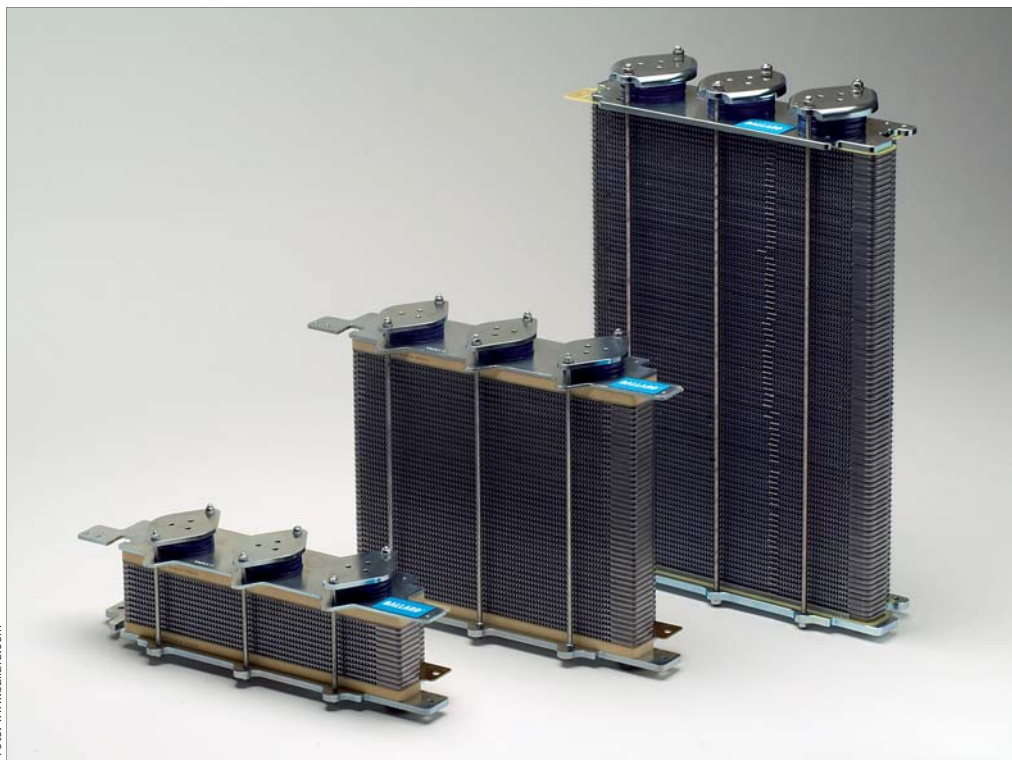


Foto: www.ballard.com

En enkelt brændselscelle kan ikke levere megen spænding, og derfor sættes brændselsceller i serie i en brændselscellestak for at opnå højere spænding. En brændselscellestak er derfor fleksibel i sin opbygning: ønskes højere spænding sættes flere celler i serie, ønskes højere strømstyrke øges det aktive areal af cellerne. Billedet viser forskellige størrelser af stakke af brændselsceller fra det canadiske firma Ballard. Denne type er kølet med luft – der findes også vandkølede brændselsceller.

Om forfatteren



Jesper Lebak Jespersen er civilingeniør ved Center for Vedvarende Energi og Transport, Teknologisk Institut, Tlf.: 7220 1251
E-mail: Jesper.Jespersen@teknologisk.dk

Forslag til yderligere læsning:
J. Larminie and A. Dicks:
Fuel Cell Systems Explained,
2nd edition, Wiley (2003)

Kilder:
www.hydrogenlink.dk

J. Wu et al., Journal of Power Sources 184, (2008), p104-119

Korsgaard et al., Journal of Power Sources 162, (2006), p239-245

www.stfc.dk

CAND. SCIENT'ER BLIVE ENDNU KLOGERE?

JA! Se hvordan på
www.candscient.nu

IDA er med flere end 67.000 medlemmer landets største interesseorganisation for tekniske og naturvidenskabelige kandidater. Flere og flere cand.scient.er har allerede opdaget, at de er bedst stillet i IDA. Udover økonomiske fordele som landets formentlig billigste og bedst dækkende forsikringer, får du som medlem adgang til mere end 700 arrangementer årligt, deltagelse i fagtekniske selskaber og meget mere. Brug 5 minutter på www.candscient.nu og læs om alle fordelene. **Velkommen som cand.scient. i IDA.**

IDA
VIDEN DER STYRKER

Bæredygtigt brændstof fra affald

En bæredygtig produktion af biobrændstoffer kræver, at man udnytter affaldsprodukter i stedet for fødevarer. Udviklingen er i fuld gang, og et nyt dansk innovationskonsortium skal sikre, at alle led i processen bliver taget i betragtning.

Af Hans Ove Hansen, Sune D. Nygaard,
Lene Bonde og Anders Theilgaard Madsen

■ Siden 1972 er Danmarks forbrug af olie næsten halveret. Det skyldes, at en stor del af den olie, som før blev brugt i industrien og til boligopvarmning, er blevet erstattet af biomassefyrede fjernvarmeanlæg og naturgas.

Til gengæld er forbruget af olie til transport steget kraftigt. Hvor transportens andel af det samlede danske olieforbrug var 23 % i 1972 er den i 2007 steget til 70 %.

Udslippet af CO₂ fra transportsektoren er i perioden fra 1990 til 2005 steget med 26 % fra 10,3 mio. tons til 13,1 mio. tons. Langt størstedelen af udslippet (93 %) stammer fra vejtransporten, altså lastbiler, varevogne, personbiler og motorcykler.

Fra 1. til 2. generation

Alene for at begrænse udledningen af drivhusgasser er det nødvendigt at se sig om efter

alternativer til de almindelige brændstoffer, der er fremstillet af fossil råolie. Der er et stort potentiale i fremstilling af forskellige typer af flydende brændstoffer ud fra fornybare ressourcer som erstatning for de almindelige fossile brændstoffer.

Såkaldt førstegenerationsbiobrændstoffer er fremstillet ud fra fødevarerressourcer som korn, majs og andre spiselige afgrøder. Da det i sagens natur ikke er hensigtsmæssigt at bruge fødevarer som brændstof, sigter udviklingen af andengenerationsbiobrændstoffer på at bruge affaldsprodukter fra bl.a. fødevarerproduktionen. Et nyt dansk innovationskonsortium Waste-2-value med deltagelse af erhvervsliv, forsknings- og uddannelsesinstitutioner arbejder nu med hele værdikæden fra fremstilling, lagring og distribution til anvendelse af biobrændstof. Det er Europakommissionens målsætning, at bio-

brændstoffer skal udgøre mindst 5,75 % af transportsektorens energiforbrug i 2010. Danmark kan tage et stort skridt på vejen mod som minimum at opfylde denne målsætning, hvis potentialet for fremstilling af andengenerations biodiesel udnyttes. Det arbejder parterne i det nye konsortium for at opfylde.

Fremstilling af biobrændstof

Internationalt arbejdes der i hovedtræk med fire forskellige teknologier, der alle kan anvendes til at fremstille flydende biobrændstof. Ingen af de fire metoder udelukker hinanden, men komplementerer derimod hinanden med hensyn til råvare og slutprodukt. Produkterne fra de fire forskellige metoder er i øvrigt fuldt blandbare med hinanden og kan alle, i større eller mindre omfang anvendes som dieselbrændstoffer. Forskellige betegnelser såsom biodiesel eller green diesel anvendes, afhængig

af brændstoffets kemiske struktur (se figur).

I innovationskonsortiet arbejder vi med to af disse metoder kaldet *omestring* og *superkritisk konvertering*.

Teknikken kaldet omestring er principielt den mest simple måde at lave flydende biobrændstof på, og det er også den metode, der langt overvejende bruges i dag. Den kan anvendes til både planteolier og andre typer fedt. Fedt er kemisk set en triester (et triglycerid) bestående af glycerol bundet kemisk til tre fedtsyrer gennem esterbindinger. Fedt og olie reagerer med træsprit (methanol) ved omtrent 60 °C og normalt tryk, omrøring samt ved brug af en mindre mængde basisk katalysator. Herefter skiftes glycerolen i molekylet ud med methanol, og glycerol og tre fedtsyre-methylestere fås som produkt (se boks på side 3).

Ofte er affaldsfedtstoffer ret urene, og de kan bl.a. have et



Selskabet OK's tankbiler kører på diesel iblandet 5 % biodiesel i Århus-området.

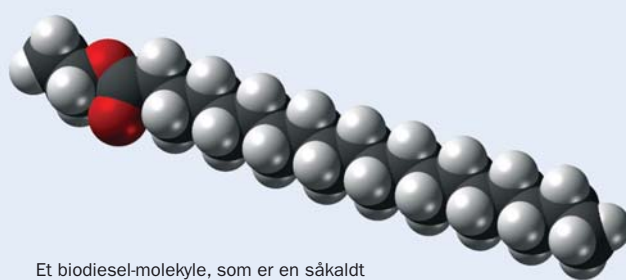
højt indhold af frie fedtsyrer, som vil reagere med basen i processen og danne sæbe, hvilket gør det besværligt at skille produkterne ad efterfølgende.

Biodiesel fremstillet på denne måde har favorable smøreegenskaber og lidt bedre tændingsegenskaber end fossil diesel. Til gengæld kan det være udfordrende at opbevare i længere tid, idet den ved tilstedeværelse af vand og bakterier vil kunne nedbrydes mikrobielt, hvilket dog også i mindre omfang er tilfældet for fossilt diesel. Kuldeegenskaberne af biodiesel er ikke så gode som fossil diesel, idet der ved lave temperaturer kan opstå en udfældning af nogle af biodieselens komponenter i tanken. Men så længe den blandes med fossil diesel i lave forhold på f.eks. 5 eller 10 %, udgør kuldeegenskaberne kun en mindre udfordring, idet den fossile diesels kuldeegenskaber her dominerer. Sandsynligvis vil

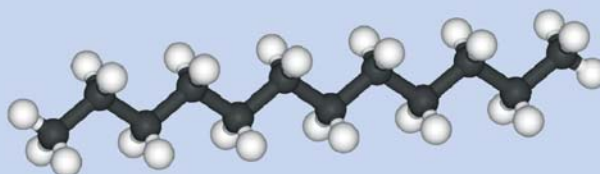
problemet dog kunne løses ved at udvikle tilsætningsstoffer, der kan forhindre udfældning ved lave temperaturer.

Biodiesel fra animalsk fedt

Virkomheden Daka a.m.b.a arbejder med at bortskaffe slakteri- og landbrugsaffald. I denne proces fremkommer et restprodukt, som tidligere kun kunne bruges til afbrænding. Daka har ladet opføre en biodiesel-fabrik, hvor man nu i stedet forædler fedtstofferne og omdanner dem til biodiesel ved hjælp af omestring-teknikken. I den forbindelse er der blevet udarbejdet en livscyklusanalyse med fokus på CO_2 -fortrængning og ressourceforbrug. Analysen viser, at biodiesel fra animalsk fedt medfører en reel CO_2 -besparelse også sammenlignet med anvendelse af animalsk fedt til varmeproduktion. Dette skyldes primært den høje effektivitet i konverteringen af fedt til biodiesel samt

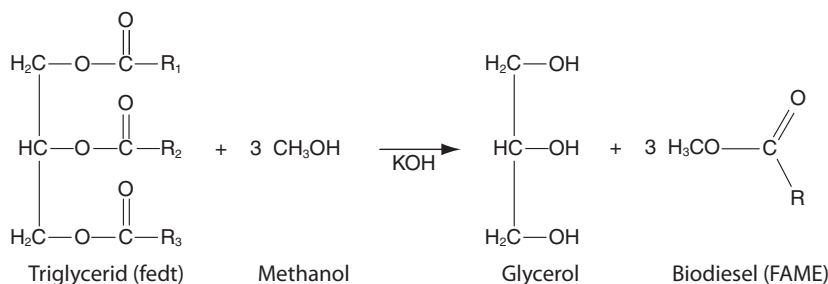


Et biodiesel-molekyle, som er en såkaldt fedtsyremetylester. Grundlæggende kan biodieselmolekylet deles op i to enheder, som også definerer navngivningen af dette. En del af molekylet stammer fra methanol og den anden del stammer fra en fedtsyre, der oftest er enten 16 eller 18 kulstof-atomer lang. De to dele er bundet sammen vha. en esterbinding, og derfor kaldes disse forbindelser med et fælles navn for fedtsyremetylester.



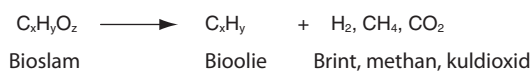
En typisk diesellignende komponent, som er kendetegnet ved den ligekædede alkan-struktur og fraværet af iltatomer. Alkaner er lange ligekædede kulbrinte-forbindelser, der hverken indeholder ilt, svovl eller andre grundstoffer. Denne type kemiske forbindelse er dominerende i såkaldt green diesel eller renewable diesel.

Metoder til fremstilling af biobrændstof

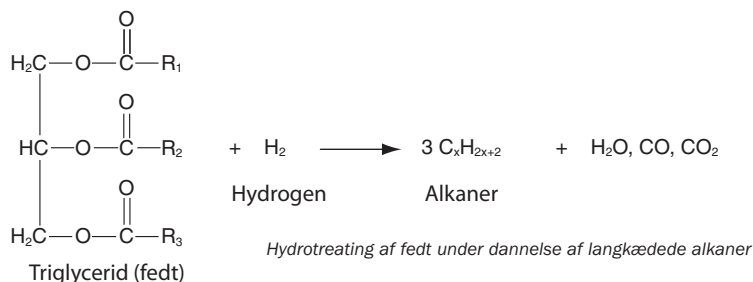


Omestring af fedt til biodiesel vha. basisk katalyse. Herved skiftes glycerolen i molekylet ud med methanol, og glycerol og tre fedtsyre-methylestere fås som produkt.

Udover de to teknikker nævnt i teksten (omestring og superkritisk konvertering), er der to andre metoder, der anvendes til fremstilling af biobrændstoffer. Såd kaldt *hydrotreating* er en proces, der indebærer behandling af fedt og planteolier med brint ved et tryk mellem 20 og 100 bar og ved temperaturer mellem 300 og

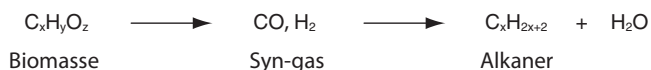


Superkritisk konvertering af vandholdigt slam til bioolie ved opvarmning til næsten 350 °C og et tryk omkring 240 bar samt brug af katalysatorer



450 °C over en fast katalysator. Processen kan i princippet udføres i det samme udstyr, som man i forvejen bruger til afsvovling af fossil dieselolie, og derfor er den ganske velegnet til eksisterende olieaffinerier. Faktisk er det muligt, at den kan udføres sammen med afsvovlingen af fossil diesel med samme katalysator, hvorved man får en blanding af biodiesel og fossil diesel, som er direkte klar til brug. Ikke overraskende er det ofte de eksisterende olieselskaber, der gerne vil benytte denne måde at fremstille biodiesel på.

Ulemperne er den kradse behandling, som man må udsætte fedtstoffet for – temperaturer over 300 °C, tryk over 20 bar og forbruget af brint. Til gengæld skal man ikke bruge træsprit (methanol) til fremstillingen. Det resulterende biobrændstof, ofte kaldet green diesel eller renewable diesel, har pga. sit tætte kemiske slægtskab med fossil diesel ikke biodiesels gode smøreegenskaber, men dette biobrændstof har til gengæld meget bedre tændingsegenskaber og kuldeegenskaber end biodiesel fremstillet ved omestring af fedt.



Dannelse af green diesel ud fra biomasse ved gasificering eller Fischer-Tropsch syntese.

Gasificering og Fischer-Tropsch-syntese er en metode, som kan ses som en slags sidste udvej, hvis andre og mildere processer ikke er gangbare. Alle typer biomasse kan i princippet anvendes, men et højt indhold af næringssalte, svovl eller kvælstof kan komplicere processen.

Biomassen opvarmes til meget høje temperaturer i underskud af ilt og evt. ved tilstedeværelse af damp, hvorved biomassen efterhånden afgasser, primært som CO₂, CO, H₂O og H₂, m.fl. Denne blanding oprenses og reageres, så CO og H₂ er tilbage i et forhold omkring 1:2 – denne blanding kaldes syntesegas eller syn-gas. Dette ledes over en kataly-

sator, hvorved der dannes alkaner af forskellig kædelængde (se figur).

Biobrændstof fremstillet ud fra biomasse ved denne metode kaldes ofte syn-diesel. Denne type biobrændstof har omtrent de samme egenskaber, som det biobrændstof der fremstilles vha. hydrotreating-processen, idet de rent kemisk består af de samme forbindelser – nemlig langkædede alkaner.

Tyskland producerede syntetisk brændstof på denne måde under Anden Verdenskrig ud fra kul, og Sydafrika har ligeledes med kul anvendt teknikken under Apartheidstyret – hvor landet var ramt af olieembargo.

en større CO₂-besparelse ved at erstatte fossilt brændstof med biodiesel, i stedet for at lade fedtet erstatte naturgas i centrale forbrændingsanlæg.

I innovationskonsortiet testes i skrivende stund forskellige blandingsforhold af animalsk biodiesel og fossil diesel under kontrollerede forhold på Teknologisk Institut og i det virkelige liv på både personbiler, lastbiler og busser med almindelige forbrændingsmotorer.

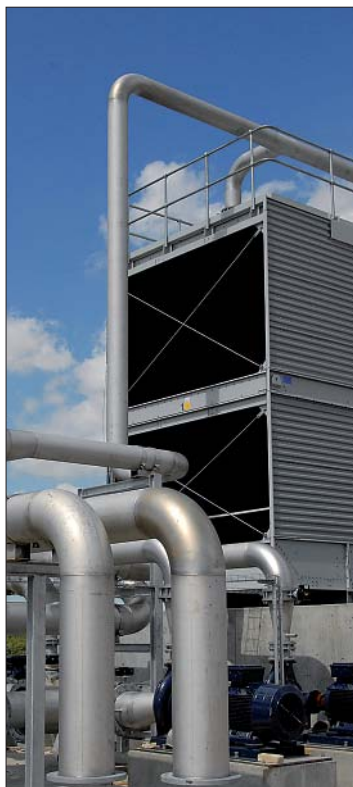
Superkritisk konvertering

Den anden teknik, vi arbejder med i innovationskonsortiet kaldes superkritisk konvertering, der udnytter våd biomasse som f.eks. spildevandsslam og husdyrgødning. Den våde biomasse opvarmes til næsten 350 °C og udsættes for et tryk omkring 240 bar. Ved disse betingelser virker vand meget korrosivt på udstyr og biomasse og ved at anvende en særlig katalysator, begynder biomassen at nedbrydes til små og simple molekyler, der herefter på en anden katalysator samles til længere kæder. Ligeledes produceres en brændbar blanding af gasser. Efter afkøling skiller opløsningen i en bioolfase og en vandfase, hvor bioolfasen har visse ligheder med fossil råolie. Yderligere behandling af bioolien er nødvendig, hvis den skal kunne anvendes som diesel i transportsektoren, men den kan umiddelbart anvendes som fyringsolie i industrianlæg beregnet til heavy fuel olie.

Bioolie fra spildevandsslam

Virksomheden Grundfos arbejder med at omdanne slam fra et biologisk spildevandsrensningsanlæg til bioolie vha. superkritisk konvertering

Grundfos har i 2007 og 2008 gennemført tests på et pilotanlæg til superkritisk konvertering af våd biomasse til bioolie, hvor den første bioolie blev produceret. Indledende test og analyser af den fremstillede bioolie er blevet foretaget på Teknologisk Institut. Herunder er bioolien blevet testet som brændstof i en dieseldrevet generator både i ren form samt i en 50/50 blanding



Waste-2-Value

Waste-2-Value er et nyt innovationskonsortium, som er støttet af Forsknings- og Innovationsstyrelsen og går på tværs af erhvervsliv og forsknings- og uddannelsesinstitutioner. Formålet med konsortiet er at samarbejde om fremstilling, lagring, distribution og anvendelse af andengenerations biodiesel til transportsektoren, der kan erstatte fossilt diesel. Andengenerations biodiesel stammer ikke fra råvarer, der alternativt kunne anvendes til fødevarer som f.eks. raps eller soya, men fremstilles derimod fra animalske eller vegetabiliske restprodukter. Målsætninger er udover fremstilling af andengenerations biodiesel også at etablere en generel forståelse for, hvordan disse brændstoffer bedst opbevares, distribueres og anvendes i motorer samt hvordan de mest effektive partikelfiltre udvikles.

Partnerne i konsortiet er:

- ◆ Daka Amba – producerer biodiesel ud fra animalsk fedt
- ◆ Grundfos New Business A/S – udvikler processer til konvertering af spildevandsslam til biobrændstof
- ◆ Dinex Emission Technology A/S – udvikler partikelfiltre
- ◆ Peugeot Danmark A/S – afprøver biobrændstoffer til biler
- ◆ OK Amba – rådgiver omkring brændstoffer og smørelser samt formidler resultater opnået i projektet
- ◆ Danmark Tekniske Universitet (DTU) – udvikler nye katalysatorer til biodiesel fremstilling
- ◆ Teknologisk Institut – etablerer et test- og videnscenter for biobrændstoffer

med fossil diesel. Grundfos er nu ved at konstruere det første fuldskala-demonstrationsanlæg, der vil danne basis for kommercialisering af teknologien som industrielle slambehandlingsanlæg. Dette anlæg ventes at stå færdigt i første halvdel af 2009.

Videncenter for biobrændstof

Der findes som nævnt også andre metoder end de her nævnte til fremstilling af biobrændstoffer (se boks). Et af målene med det nye innovationskonsortium er at medvirke til at opbygge et videncenter for biobrændstof i Danmark, som kan deltage i standardiseringsarbejdet omkring de mange nye forskellige typer biobrændstoffer. I Europa er standardiseringen af biodiesel primært baseret på erfaringer med fremstilling af biodiesel ud fra planteolier via teknikken omestring. Man må derfor forvente, at de gældende standarder for biodiesel ikke nødvendigvis kan tage højde for alle de forskellige råvarer og forskellige konverteringsmetoder, der i dag ses anvendt til fremstillingen af biobrændstof med diesellignende egenskaber.

På Teknologisk Institut samles kompetencerne omkring fremstilling, lagring og anvendelse af biobrændstoffer, hvor der også forefindes faciliteter til omfattende fysisk og kemisk karakterisering af biobrændstoffer af denne type.

Som en del af konsortiet har Teknologisk Institut foretaget kemisk og fysisk karakterisering af den fremstillede biodiesel. Der er f.eks. blevet foretaget motorforsøg med biodiesel i forskellige blandingsforhold med fossil diesel, hvor der er blevet målt både gas- og partikel emissioner. Der er i dag meget stor fokus på udledningen af partikler og herunder specielt ultrafine partikler med en størrelse under 0,1 µm. Der er derfor foretaget analyser af partikelstørrelsesfordelingen under forskellige driftsforhold. Resultaterne af de analyser der bliver foretaget hos Teknologisk Institut vil løbende blive offentliggjort på konsortiets hjemmeside.

Biodiesel kan dække 8,2 % af Danmarks forbrug

Olie- og energiselskabet OK arbejder i konsortiet med markedsmodning af biodiesel gen-

nem indsamling af erfaring omkring lagring, håndtering og distribution. Samtidig kører OK's tankbiler i Århus-området på diesel iblandet 5 % biodiesel. OK er i samarbejde med Peugeot Danmark og Teknologisk Institut i gang med afprøvning af biodiesel i personbiler, hvor der løbende bliver udtaget olieprøver til analyse samt foretaget effektmålinger på de enkelte køretøjer. Dinex Emission Technology A/S arbejder med at udvikle partikelfiltre, som er tilpasset de nye biobrændstoffer, som udvikles på baggrund af konsortiesamarbejdet.

Alene omdannelse af animalsk fedt til biodiesel ved hjælp af kendte kemiske processer udgør en kilde på min. 100.000 tons/år svarende til 3,8 Petajoule (PJ). Det er estimeret, at spildevandsslam udgør en kilde til biodiesel svarende til 2,7 PJ. Eftersom Danmarks årlige energiforbrug i form af diesel til vejtransport er 79,7 PJ (2005), har biodiesel fra de to nævnte kilder et potentiale svarende til 8,2 % af Danmarks dieselforbrug til vejtransport.

Om forfatterne



Hans Ove Hansen er projektleder Center for Vedvarende Energi og Transport Teknologisk Institut Tlf.: 72 20 13 16 E-mail: hans.ove.hansen@teknologisk.dk



Sune D. Nygaard er udviklingskonsulent, Center for Kemi- og Vandteknik Teknologisk Institut



Lene Bonde er Informationschef OK a.m.b.a. Tlf.: 23 31 06 19 E-mail: lbo@ok.dk



Anders Theilgaard Madsen er ph.d. studerende, Center for Bæredygtig og Grøn Kemi, Danmarks Tekniske Universitet

Læs mere på:
www.waste2value.dk

Træsprit i tanken

Træsprit (methanol) er en fremragende energibærer, der f.eks. kan bruges i brændselsceller. Træsprit er derfor et interessant medie til at lagre energi i fremtidens energiforsyning baseret på vedvarende energikilder.

Af Jesper Lebæk Jespersen

■ Danmark skal i fremtiden være selvforsynende med vedvarende energi. Det har regeringen for nylig lagt op til. Denne vision stiller store krav til distributionssystemet af energi, herunder til elnettet, fjernvarmenettet og tankstationerne. Især elnettet er problematisk, da de vedvarende energikilder ofte er meget varierende i produktion – her tænkes specielt på sol-, vind- og bølgeenergi. Derfor er der brug for at kunne lagre store mængder energi, dels når produktionen er stor, og dels når forbruget er lavt.

Forskere og politikere har længe talt om, at brint er et perfekt medie for lagring af vedvarende energi, da brint kan fremstilles ud fra stort set alle vedvarende energikilder. Problemet er, at fremstilling, distribution og specielt lagring af brint er særdeles vanskeligt. Der skal ske deciderede videnskabelige gennembrud for, at brint kan lagres effektivt nok til at kunne bruges i f.eks. biler. Brint er det foretrukne brændstof for brændselsceller, og bilindustrien satser derfor også på ren brint i udviklingen af brintbiler. Produktionen af brint er også ofte forbundet med betydelige tab, især med de eksisterende løsninger baseret på elektrolyse. Uden



Der er stadig et stykke vej til at vi kan tanke ren brint på bilerne, methanol kan dog vise sig at være en genvej til brintsamfundet.

markante fremskridt vil et brintsamfund derfor i høj grad være spild af energi.

I denne forbindelse kan methanol (træsprit – CH_3OH) måske spille en væsentlig rolle, da methanol er en fremragende energibærer specielt i sammenhæng med brændselsceller. Og hvis vi anvender methanol base-

ret på f.eks. biomasseressourcer vil vi samtidig reducere udledningen af CO_2 .

Fleksibel fremstilling af methanol

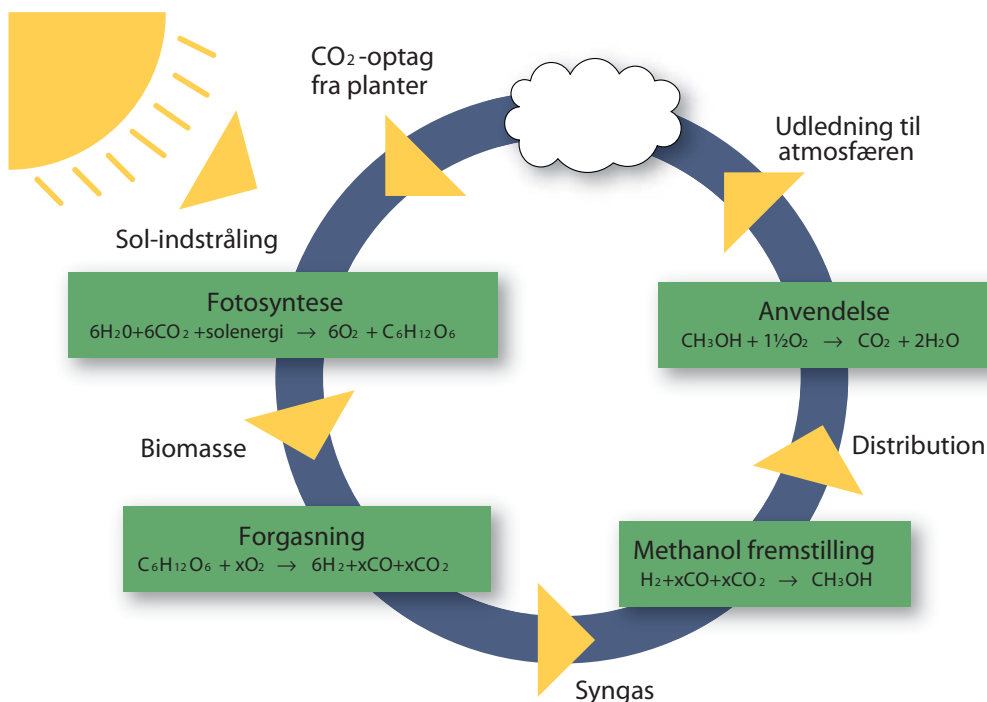
Methanol er et interessant medie til energilagring, da det ligesom brint kan fremstilles via forskellige processer og energi-

kilder. Forgasning af biomasse kan være en særdeles bæredygtig måde at producere methanol på, da de miljømæssige påvirkninger er meget lave, samtidig med at den samlede virkningsgrad er fornuftig, når man vurderer hele energikæden fra produktion til forbrug (hvilket kaldes Well-to-wheel studier). Den isolerede virkningsgrad for methanolfremstilling på basis af biomasse er i et studie vurderet til ca. 41 %. Det er dog stadig et problem at håndtere tjæredannelsen under forgasningsprocessen.

En interessant måde at producere methanol på er ved en form for "omvendt brændselscelle" kaldet SOEC (Solid Oxide Electrolysis Cell), hvor brint fremstilles ved elektrolyse ud fra overskudsstrøm. På Risø-DTU forskes der i denne teknologi, og indledende forsøg har vist, at det er muligt på en meget effektiv måde at spalte vand til brint. Og det til en pris, der er konkurrencedygtig med brint fremstillet på basis af naturgas, som det er tilfældet for langt den største del af brintproduktionen i dag.

Her er det interessant, at det også på denne måde er muligt at spalte kuldioxid (CO_2) og vand til kulmonoxid (CO), brint og

Figur 1. Selvom Methanol er en kulbrinte, der udleder CO₂ ved oxidation, kan methanol være et bæredygtigt brændstof, hvis der benyttes biomasse ressourcer til fremstillingen af methanol.



ilt, hvor der efterfølgende kan dannes methanol af produkterne.

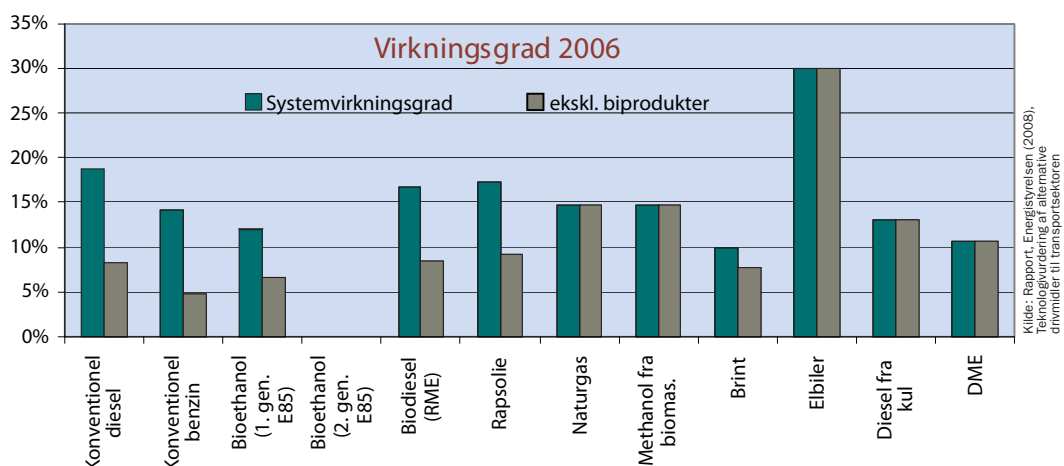
Nem håndtering af methanol

Det er også interessant, at det er muligt at blande methanol i benzin. Det gør det nemmere at introducere methanol til brug i transport-sektoren.

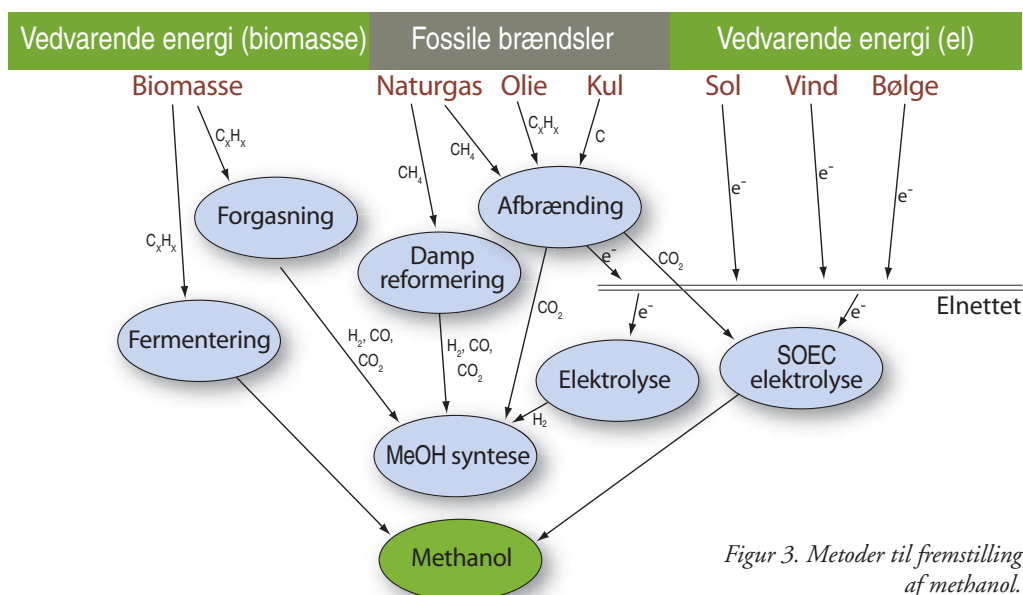
En væsentlig fordel, der taler for methanol i netop transportsektoren, er, at methanol under normale betingelser er på væskeform og derfor nemt kan implementeres i det eksisterende distributionssystem. Sikkerhedsmæssigt skal methanol behandles med omtanke, men det er ikke mere farligt end benzin. Ved spild nedbrydes methanol biologisk i naturen og kan ved større udslip fortyndes med vand.

Methanol og brændselsceller

Methanol er et glimrende brændstof til brændselsceller. Methanol kan anvendes direkte i en type brændselsceller kaldet DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) eller reformeres til en brinholdig gas f.eks. vha. en dampreformeringsproces. Reformering af methanol er særligt interessant, da der med god ter-



Figur 2. Well-to-wheel-sammenligning af forskellige brændstoffer og teknologier til transportsektoren.



Figur 3. Metoder til fremstilling af methanol.



År 2006	Miljøpåvirkning (luftemissioner)			
	CO ₂ -ækv. Kg/GJ mek	SO ₂ Kg/GJ mek	NO _x Kg/GJ mek	Partikler Kg/GJ mek
Konventionel diesel	398	0,01	1,12	0,04
Konventionel benzin	517	0,02	0,22	0,00
Bioethanol (1. gen. E85)	353	0,14	1,00	0,00
Bioethanol (2. gen. E85)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Biodiesel (RME)	182	0,02	1,61	0,04
Rapsolie	169	0,01	1,62	0,04
Naturgas	451	0,03	0,20	0,00
Methanol fra biomas.	115	0,08	0,32	0,00
Brint	678	0,59	1,61	0,00
Elbiler	252	0,22	0,60	0,00
Diesel fra kul	519	0,07	1,49	0,04
DME	164	0,12	1,38	0,04

Kilde: Rapport, Energistyrelsen (2008), Teknologivurdering af alternative drivmidler til transportsektoren.

Figur 4. Miljøpåvirkning fra forskellige energibærere til transportsektoren.

misk integration mellem brændselscelle og reformer kan opnås elvirkningsgrader på mere end 40 %. Her er det en fordel, at arbejdstemperaturen på brænd-

selscellen er forholdsvis høj – omkring 180 °C. Den høje temperatur bevirker, at urenheder, f.eks. kulmonoxid (CO), ikke påvirker katalysen i brænd-

selscellen betydeligt. Desuden gør den høje temperatur det muligt at udnytte restvarmen fra brændselscellen.

Lokale forhold er vigtige

Et fremtidigt energiscenarium baseret på 100 % vedvarende energi er en kæmpe udfordring for energisystemet. Methanol som energibærer har umiddelbart nogle klare fordele. Men andre teknologier og medier, der kan opbevare vedvarende energi, kommer uden tvivl også til at spille en rolle i fremtiden. Det er ofte de lokale forhold, der afgør hvilke energiresourcer, der er til rådighed. Derfor er det ofte også de lokale forhold, der har indflydelse på, hvilken lagringsteknologi, der bør sættes på.

F.eks. kan biodiesel fremstillet på animalsk fedt være en glimrende løsning i områder med meget slagteriaffald. Methanolfremstilling kan derimod være en løsning i områder med megen biomasse, f.eks. træaffald, hvor man i forvejen har decentral varmeproduktion. Her kan methanolproduktionen tilkobles fjernvarmenettet til at aftage overskudsvarmen, hvilket giver en øget virkningsgrad af det samlede system. ■

Om forfatteren



Jesper Lebak Jespersen er civilingeniør ved Center for Vedvarende Energi og Transport, Teknologisk Institut, Tlf.: 7220 1251
E-mail: Jesper.Jespersen@teknologisk.dk

Videre læsning:

G.A. Olah, A. Goepfert, G.K.S. Prakash, *Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy*, Wiley (2006).

S.H. Jensen, P.H. Larsen, M. Mogensen, *International Journal of Hydrogen Energy* 32 (2007), p 3253-3257.

Weel & Sandvig, *Perspektiver for dansk ammoniak- eller metanolfremstilling...* (2007).

J.O. Jensen, et al., *International Journal of Hydrogen Energy* 32 (2007), p 1567-1571.

A.R. Korsgaard, R. Refshauge, M.P. Nielsen, M. Bang, S.K. Kaer, *Journal of Power Sources* 162, (2006), p239-245.

Rapport, DTU (2007), *Life Cycle Assessment of Bio-diesel from Animal Fat*.

Store plask kan have hjulpet livet i gang

Meteoritter kan have kickstartet livet på Jorden i dens barndom ved at danne organiske molekyler, når de smadrede ned i oceanerne. Denne ide blev oprindeligt foreslået af den amerikanske astronom Carl Sagan i en enkelt linje i en artikel fra 1970'erne, men nu har japanske forskere med laboratorieforsøg bekræftet, at der faktisk kan dannes organiske forbindelser på denne måde. Takeshi Kakegawa og kolleger fra Tohoku University har i laboratoriet simuleret forholdene, når en meteorit med en fart af ca. 2 km i sekundet rammer oceanet. De affyrede minimissiler mod blandinger af grafit, jern, vand nitrogen og ammoniak, og ved disse forsøg blev der dannet carboxylsyrer og aminer såvel som små mængder af aminosyren glycine.

Grafit og jern er komponenter i såkaldte chondritter, der er de



Illustration: Don Davis/Nasa

mest almindelige typer af meteoritter. Ifølge de japanske forskere skabte deres små missiler i lighed med deres langt større slægtninge et stort tryk og temperaturer over 2600 grader, hvilket er forhold, der fremmer dannelsen af organiske molekyler.

Selvom det meste materiale vil

fordampe ved sådanne temperaturer, mener forskerne, at på den tidlige Jord kunne store mængder biomolekyler være dannet efterhånden som vandet afkøledes efter et nedslag. I teorien ville en serie af meteoritnedslag have kunnet danne stadig mere komplekse molekyler.

Kritikere mener dog, at de mængder organiske molekyler de japanske forskere har kunnet danne er for små til at mekanismen kan have spillet en afgørende rolle. Mængden af aminosyren glycine i havet fra et enkelt meteoritnedslag ville således være i størrelsesordenen 10⁻³⁰ gram pr. liter. De japanske forskere hævder sig dog ved, at alene den enorme energi udløst fra meteoritnedslag gør, at sådanne begivenheder kan have spillet en betydelig rolle. Andre har foreslået, at undersøiske vulkaner kunne have produceret vigtige organiske molekyler, men sammenlignet med energien i et meteoritnedslag er den totale energi fra sådanne begivenheder meget lille.

CRK, Kilde: www.rsc.org/ChemistryWorld/Nature Geoscience, 2008, DOI: 10.1038/NGEO383

Kunsten at lagre energi

Lagring af energi kan blive en vigtig faktor i fremtidens elsystem, der i højere grad vil være baseret på fluktuerende kilder som f.eks. vindkraft.

Af Brian Elmegaard

■ Lagret energi kan have en væsentligt større værdi for forbrugeren end energi, som ikke er lagret.

F.eks. koster en pakke Duracell AA-batterier ca. 50 kroner, og fra et sådant batteri kan man ifølge specifikationerne hente omkring 0,003 kWh. Det giver en pris på omkring 4000 kr. per kWh, hvilket kan sammenlignes med den typiske elpris på 2 kr. per kWh. Altså er forbrugeren villig til at betale en pris, der er omkring 2000 gange højere for den samme energivare for at have den til rådighed på det ønskede tid og sted.

For leverandøren af energivaren betyder det, at der er mulighed for en god betaling for energien. Økonomi er altså et vigtigt incitament for at lagre energi. Men der er også andre incitamenter for lagring af energi. Et af de væsentlige er, at lagring af energi vil gøre det muligt i langt højere grad at udnytte vedvarende – og dermed miljøvenlige – kilder som vind og sol i energisystemet, fordi overskydende produktion kan lagres og dermed gemmes til tidspunkter, hvor der ikke produceres tilstrækkeligt.

El og varme som varer

Set ud fra et grundlæggende fysisk synspunkt er der ved energikonvertering forskel på kvali-



Pumpelagerkraftværk ved Kruonis i Litauen – et eksempel på lagring af energi ved hjælp af vand og en højdeforskel på ca. 100 m. De store rør leder vandet ned til eller op fra turbin/pumpehallen. Den maksimale effekt er 900 MW og reservoirsoen har et areal på 3 km².

teten af en given energimængde. Kvalitet af energi opgøres ved dens potentiale for anvendelse. I praksis betyder det, at varme ved relativt lav temperatur, f.eks. fjernvarme, energimæssigt er en langt dårligere vare end elektricitet, olie eller naturgas. Det er derfor også indlysende, at omsætning af varer med høj kvalitet til varme ved lav temperatur rent energimæssigt er

fråds, det gælder både ved konvertering af el, olie og gas til opvarmningsformål.

Energiens kvalitet opgøres i dens "konverterbarhed" eller exergi. Jo højere exergi, jo mere konverterbar er energien, og jo højere værdi har den. Når man i daglig tale snakker om "energi" er det meget ofte i betydningen exergi og anvendelighed. Energifrisen drejede sig ikke om

knapthed på energi, men snarere om exergi i form af olie.

Hvad energilagring angår er der også markant forskel på energi med højt og lavt exergindhold. Hvis man ser bort fra lagring af fossile brændsler, som er fungerende teknologi, og i stedet ser på, hvordan energilagring kan foregå i et energisystem med fluktuerende, vedvarende energiressourcer,



Behovet for ellagring

En vurdering af behovet for at lagre el i det danske elsystem, kan laves ud fra markedsdata fra det nordiske elmarked Nordpool, som kan findes på Energinet.dk. Her kan man finde data for både priser, produktion, forbrug, import og eksport for det danske elsystem. Elsystemet i Danmark er opdelt af Storebælt, så der findes to markeder: Øst og Vest. Den største mængde vindkraft er installeret i Vestsystemet.

Nedenstående vurderinger er baseret på udtræk af data for perioden 1/1-2000 til 5/11-2008.

Sammenligning af samlet vindproduktion og eksport til Tyskland i Vest
Den samlede vindproduktion i Vestdanmark i den undersøgte periode er 39 TWh, mens der netto er eksporteret 30 TWh til Tyskland. Ud fra denne vurdering kan man altså sige, at der kun er implementeret 23 % af vindproduktionen i det danske system.

Sammenligning af samlet vindproduktion og samlet eksport
Den samlede vindproduktion i hele Danmark i den undersøgte periode er 51 TWh. Den samlede nettoeksport til Sverige, Norge og Tyskland er 18 TWh. Ud fra denne vurdering kan man altså sige, at der er implementeret 65 % af vindproduktionen i det danske system.

Sammenligning af vindproduktion og nettoeksport på timebasis
En anden vurdering laves ved at se på de enkelte timer og opgøre, hvor meget af vinden i den enkelte time, som anvendes nationalt. Denne opgørelse giver, at 26 TWh ikke anvendes men eksporteres. Denne opgørelse betyder altså, at 49 % af vindproduktionen ikke er implementeret.

Sammenligning af vindproduktion og nettoeksport per time og elprisen i disse timer
Hvis man i sammenligningen tager hensyn til den pris som el har været handlet til i de timer, hvor eksporten har fundet sted findes et lidt andet billede. Langt de fleste MWh er eksporteret til en pris, som er meget tæt på gennemsnitsprisen i elmarkedet. Hvis man definerer elpriser under 10 % af gennemsnitsprisen som lave er det bare 3 % af vindproduktionen, som ikke er implementeret i elsystemet.

Eksemplerne viser, at behovet for ellagring kan opgøres forskelligt afhængig af, hvilke forudsætninger man stiller op. Eksemplerne viser samlet, at behovet for lagring af el ligger et sted mellem 0,2 TWh og 5,6 TWh om året.

findes der ikke en teknik, som er anvendt med succes i nævneværdig udstrækning.

For varme anvendes lagring til gengæld med succes, f.eks. på kraftvarmeværkerne, da store vandtanke kan lagre det varme fjernvarmevand, således at levering af el og varme til forbrugerne kan afkobles i tid, samtidig med at produktionen kan ske, så der opnås størst mulig indtjening for den leverede el.

Udfordringen for energilagring i det moderne danske energisystem består altså i at implementere løsninger, som med lav investering og lave tab kan lagre store mængder energi af høj kvalitet – det vil sige ellagring i forbindelse med vindkraft.

Konvertering af overskydende vindkraft til varme er en mulighed, men den vil fysisk set medføre en omsætning fra høj til lav kvalitet.

Energisystemet og behovet for ellagring

At vurdere behovet for at lagre el er vanskeligt, da det i høj grad afhænger af de forudsætninger, man stiller op. Ser man på det samlede system eller bare en del af det? Ser man på systemet samlet over lang tid eller ser man mere detaljeret på det? Er det nødvendigt, at produktion bruges nationalt eller kan man acceptere eksport, hvis prisen er fornuftig?

En del af den danske elenergi stammer fra vindmøller, men noget af denne eksporteres til udlandet, fordi den ikke kan udnyttes i det danske system. Man snakker om, hvor stor en del, der er implementeret i det danske energisystem. Hvor stor denne del er, kan opgøres på flere måder (se boks). Ved at lagre energien vil den kunne udnyttes i det danske system, og i det nuværende system kan behovet for lagring opgøres til mellem 0,2 TWh og 5,6 TWh om året – afhængig af hvilke forudsætninger, man stiller op.

Man må dog forvente, at lagring i stor skala vil få en indflydelse på prisdannelsen, og vil dermed kunne ændre markedet – formentlig med en udglætning af priserne til følge. Der-

med vil ellagring i sig selv fjerne noget af sit indtjeningsgrundlag. En yderligere implementering af vedvarende energi vil på den anden side medføre større behov for lagring og øge presset på forbindelserne til omgivende lande og det må derfor, forventes at der opstår et større behov for lagring.

Lagring af el som varme er ikke optimalt

Som nævnt skelnes mellem lagring af varme til almindelige opvarmningsformål og lagring af energi ved højt exergiindhold. Lagring af varme er i princip kendt teknologi. På et kraftvarmeværk lagres varmt vand i store beholdere, og på den måde kan man lade værket producere el, når der størst behov og dermed afkoble de to produkter.

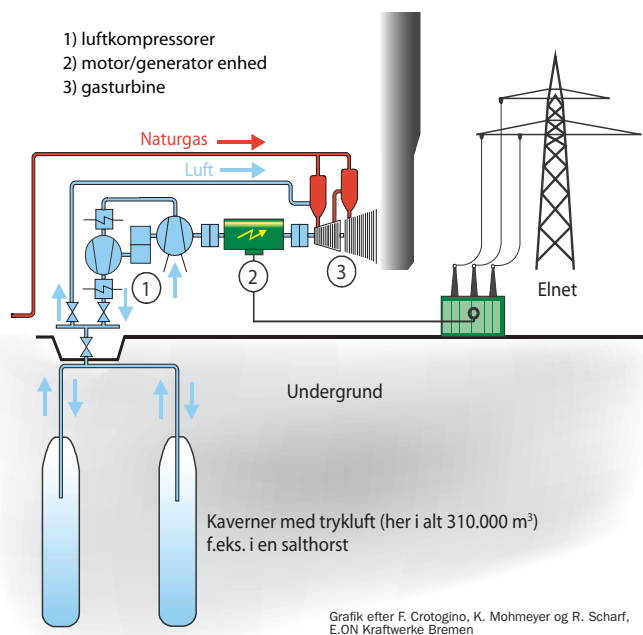
En nærliggende metode for at udnytte den overskydende vindproduktion er at konvertere den til varme, enten ved at installere elpatroner, som direkte konverterer elektriciteten til varme eller ved brug af varmepumper, som kan konvertere el til varme med en effektfaktor på 2-3. Der er umiddelbart to problemstillinger ved denne løsning:

1. El konverteres irreversibelt til varme. Det bidrager derfor ikke til yderligere indpasning af vedvarende energi i elsystemet.
2. Lagervolumenet for at udnytte den overskydende vindproduktion kan blive helt uhåndterligt stort.

Ud fra fysikken må konvertering af el til varme ses som sidste udvej. Lagring af el som højværdig energi for genanvendelse som el er principielt bedst. Med hensyn til lagring af el er der et væld af teknologier og lagringsmedier i spil, enten i drift eller i forsknings- og udviklingsøjemed. Da det er svært at give en fuldstændig oversigt nævnes i det følgende kun de mest aktuelle for implementering inden for en overskuelig fremtid.

Teknologier for lagring af energi

Det mest nærliggende er at lade kraftværker regulere produktionen efter de vedvarende energikilders ydelse. Dermed



Principskitse over trykluftlagringen i Huntorf, Tyskland. Anlægget rummer også en gasturbine til naturgas, hvilket forbedrer den samlede effektivitet. Turbinen kører typisk ved akutte spidsbelastninger på elnettet.

kan man udnytte værkernes brændselslagre som ellager. En anden nærliggende mulighed er at bruge større industriforbrugere eller klynger af privatforbrugere som fleksible forbrugere. Dette bør udnyttes i størst mulig grad, da det for en mindre indsats kan give de samme muligheder som dedikerede energilagere.

Batterier anvendes ikke i udbredt grad som lager i stor skala, men med den udvikling som finder sted for nuværende, er batterier en meget konkurrencedygtig teknologi set ud fra en lagervirkningsgrad. Fra el-input tilbage til el kan man forvente en virkningsgrad på omkring 65-75 %. Levetid og lagerstørrelse er nogle af de problemer som større integration må imødesee. En spændende mulighed for anvendelse af batterier til ellagring er at integrere transport i elsystemet i form af elbiler. DONG energy er en af de danske interessenter i dette potentielle marked.

Vandkraftværker kan udstyres med en pumpe, som ved behov for lagring kan anvende el til at pumpe vand til et højtliggende reservoir. Denne teknik

anvendes verden over. I sig selv har denne teknik en høj virkningsgrad på 80-85 %. For danske forhold skal man tage hensyn til at geografin kræver, at man transporterer el over lange afstande for at lagre det. Dette vil indebære yderligere tab, så man kan forvente en virkningsgrad fra el til el på omkring 60-65 %.

Trykluftlagring er i drift i Huntorf, Tyskland og McIntosh, Alabama, USA. Man anvender overskydende el til at drive en kompressor, som leverer 50-100 atm tryksat luft til underjordiske lagre, som kan gå flere hundrede meter ned i undergrunden.

Når der er behov for elektricitet anvendes den tryksatte luft til at drive gasturbiner. Teknikken er i dag baseret på anvendelse af konventionelle gasturbiner og kræver derfor en stor andel naturgas for at fungere. Dette komplicerer analyse af virkningsgrad, men den ligger omkring 45-55 %. Med udvikling af nye anlæg, som lagrer kompressorernes varmeoverskud, sigter man mod at kunne opnå endnu højere virkningsgrad (70 %).

Fremtidige teknologier

At konvertere el til brint (eller andre kemiske lagermedier) ved elektrolyse er en spændende mulighed, som er en af grundstenene i ideen om "brintsamfundet" og anvendelse af brændselsceller i stor udstrækning. Dermed ville man kunne anvende brint som primær energibærer for både el, varme og transport. Der findes ikke for nuværende gode metoder for at opnå tilstrækkelig høj virkningsgrad i et sådant system. Forventeligt kan man opnå virkningsgrader på 30-40 % for et ellager baseret på brint og brændselsceller.

Flowbatterier er populært sagt en mellemting mellem batteri og brændselscelle. Et kemisk lager opnås ved at have beholdere med medier, som kan adskilles ved tilførsel af elektricitet og omsættes for igen at producere el. Et flowbatterisystem kan opnå virkningsgrader i samme størrelsesorden som de ovenfor nævnte. Andre, mere eksotiske, teknologier som f.eks. superledere og supermagneter er under udvikling på et indledende forskningsstade.

Energilagring giver højere priser

Der findes en lang række af spændende teknologier med stort potentiale, som er eller kan blive anvendelige til lagring af elektricitet i stor skala. Hvis vi vælger at implementere sådanne teknologier, må man se i øjnene, at lagring af energi i stor skala vil medføre:

- store investeringer
- betydelige tab
- store behov for lagerkapacitet i form af geografisk areal og/eller volumen

Det betyder i sidste ende, at energilagring som metode for at implementere yderligere vedvarende energi i energisystemet, vil kræve højere priser for at kompensere for investering og tab. Der er formentlig ingen tvivl om, at energi fremover vil stige i pris, og hvis man kan få mere vedvarende energi mod at betale for investering i lagre, åbner der sig nye muligheder for både markeder, forskning og udvikling. ■

Om forfatteren

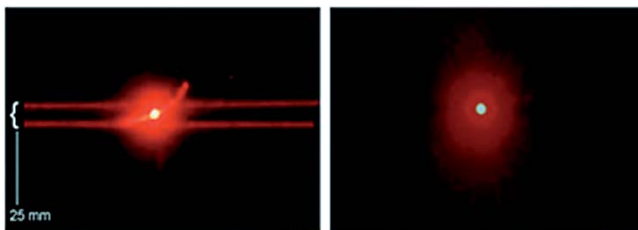


Brian Elmegaard er lektor og sektionsleder ved DTU Mekanik
Tlf.: 45254169
E-mail: be@mek.dtu.dk

Læs videre:

Marc A. Rosen. *Should we educate the public about exergy? Exergy, an International Journal*, 2:21113, 2002.

Jay Mariyappan et al., 2004: *Pushing a least cost integration of green electricity into the european grid. Technical Report ITP/788, IT Power Ltd, July 2004.*



Afslør piraten

Det er ikke altid nemt at se, om den nye Batman-film, du står med i hånden er den ægte vare eller en piratkopi. Nu har spanske forskere udviklet en metode, der nemt kan afgøre sagen. I princippet er metoden så enkel, at enhver der er udstyret med en almindelig laserpen vil kunne kontrollere ægtheden af en cd eller dvd.

Selvom kommercielle cd'er og dvd'er ikke umiddelbart kan være til at skelne fra piratkopier, er fremstillingsmetoden ret forskellig. Kommercielle cd'er fremstilles i store mængder med en hydraulisk presse og ud fra en master indspilning, mens piratkopier brændes en af gangen med en laser. De to metoder giver sig udslag i strukturelle forskelle i den færdige cd, som er nøglen til den nye metode. En kommerciel cd indeholder mikroskopiske huller, der er overlejret af et klart plastmateriale, og afspillerens laser aflæser forskelle i overfladehøjde som enten audio- eller videosignaler eller begge dele. Derimod indeholder en skrivbar cd en forbindelse, som en laser kan brænde små mærker i. Hvis man belyser cd-skiven med en laser vil den reflekterede stråle se forskellig ud, afhængig af om cd'en er lavet på den ene eller den anden måde. På en massefremstillet disk vil den reflekterede stråle ses som en lille plet på en hvid overflade, mens pletten på et kopiprodukt vil være større og derudover have to parallelle linjer over og under pletten. Forskellen er betinget af, hvordan lys afbøjes om forskellige strukturer – et fænomen kaldet diffraction.

Forskerne beskriver i tidsskriftet American Journal of Physics deres teknik anvendt på mere end 100 cd'er og DVD-skiver af forskellige mærker og med forskelligt indhold. Ifølge forskerne er metoden fuldstændig troværdig, og de har derfor indsendt patentansøgning på metoden og det tilhørende udstyr.

CRK, Kilde: Science, Am. J. Phys., Vol. 76, No. 12, December 2008

Små forbrydelser

Små tegn på kriminel adfærd som smadrede ruder eller graffiti kan føre til, at uvæsenet spredes eller det, der er værre. Sådan er filosofien bag såkaldt nul-tolerance politik, der i visse kredse anses for at være den eneste vej mod et samfund med et minimum af kriminalitet. Det har dog skortet på beviser, der kunne bakke denne ide op.

Nu har Kees Keizer og kolleger fra universitetet i Groningen, Holland, forsøgt at undersøge sagen. Keizer observerede medborgere, der fik mulighed for at stjæle en konvolut, der tydeligvis indeholdt en 5 euro-seddel fra en postboks. Når postboksen var ren og pæn var der 13 %, der faldt for maddingen. I modsætning dertil var der 27 %, der huggede konvolutten, når boksen var overmalet med graffiti, og 25 % når der var affald rundt om boksen. Andre forsøg viste, at folk var mere tilbøjelige til at kaste affald fra sig, når der var graffiti eller efterladte indkøbsvogne i nærheden og efter at have hørt brag fra illegalt fyrværkeri.

CRK, Kilde: www.scienceexpress.org



Elefanter lever betydeligt kortere i zoologiske haver end i beskyttede nationalparker i deres hjemlande, viser nye studier.

Lev i zoo - dø ung

Et nyt studium af elefanter i zoologiske haver offentliggjort i tidsskriftet Science viser, at elefanter lever væsentligt kortere i zoologiske haver end i beskyttede reservater i deres hjemlande. Forskere knyttet til dyreværnsforeningen Royal Society for the Prevention of Cruelty to Animals (RSPCA) i England har sammenlignet medianlevetiden for ca. 800 afrikanske og asiatiske (indiske) elefanter i europæiske zoologiske haver gennem de sidste 45 år med elefanter fra Kenyas Amboseli National Park og tamme arbejdslefanter fra en tømmervirksomhed i Burma. Analysen afslørede, at afrikanske zoo-elefanter havde en levetid omkring 17 år, mens den var 56 år for elefanter fra Amboseli-nationalparken. For de indiske elefanter vedkommende var medianlevetiden omkring 19 år i zoologiske haver, mens den for de tamme elefanter i tømmervirksomheden var næsten 42 år. Ydermere var dødeligheden af unger blandt asiatiske elefanter så meget som tre gange højere i zoologiske haver. De nye resultater viser også, at elefanter født i fangenskab klarer sig dårligere end elefanter, der er født i naturen, og siden er kommet til zoologiske haver.

Nogle af elefanternes problemer i zoologiske haver stammer fra den praksis, at unge kalve tages væk fra deres mødre, og at hunner overføres mellem zoologiske haver, normalt med avl for øje. Begge dele bryder elefanternes bånd til hinanden og forårsager formodentlig et mentalt stress. I naturen forbliver hunner altid med deres mødre, og forlader aldrig den flok hvori de er født. Desuden er zoo-elefanter ofte overvægtige på grund af for lidt plads at bevæge sig på.

Man kan forvente, at det nye studie vil føre til ophedet debat, da det er et følelsesladet emne. Organisationen RSPCA har længe advokeret for at udfase elefanter i zoologiske haver ved at stoppe avlsprogrammer og import af nye dyr. Til Scientific American siger Robert Wiese fra San Diego Zoo and Wild Animal Park, at studiet i bedste fald afspejler, hvordan man drev zoologiske haver før i tiden. Lige nu vil man kun kunne vurdere, hvordan man behandlede dyrene i 1960'erne og 1970'erne, mens der vil gå lang tid før man kan vurdere, hvor godt man klarer sig i dag, hvor der ifølge Robert Wiese er indført flere elefantvenlige tiltag i de zoologiske haver.

CRK, Kilde: Science vol. 322 p.1649

Fra asken til ilden

Bor man i en jordskælvszone, må man leve med risikoen for, at et stort jordskælv kan vende op og ned på livet fra den ene dag til den anden. For at føje spot til skade har engelske forskere nu vist, at der er en tydelig top i antallet af vulkanudbrud i tiden efter de største jordskælv i det forrige århundrede. Disse vulkanudbrud kan endda være lokaliseret hundrede kilometer væk fra jordskælvenes epicentre.

Umiddelbart virker det indlysende, at rystelserne fra et stort jordskælv i aktive seismiske zoner, kan sætte bevægelse i magma dybt under Jordens overflade. Nylige studier har også kædet de to fænomener sammen, idet der er påvist en sammenhæng mellem jordskælv og efterfølgende vulkanudbrud i umiddelbar nærhed. Men ingen har før de engelske forskere lavet en analyse, der dækkede et længere tidsrum, eller set på den mulighed, at store jordskælv også kunne udløse vulkanudbrud fjernt fra epicenteret. Konkret har de engelske forskere analyseret historiske data af jordskælv langs med den chilenske forkastning på vestkysten af Sydamerika. Specielt fokuserede de på data dækkende de sidste 150 år, hvor man blandt andet finder jordskælvene i 1906 og 1960 i det sydlige Chile, hvor det sidstnævnte er det største jordskælv, der nogensinde er registreret. Forskerne viser, at udbrudsraten blandt 15 vulkaner så langt væk som 1000 km fra epicentrene firdobledes inden for et år efter disse to begivenheder. Dette skal sammenlignes med en rate på normalt 1 udbrud. Forskerne er sikre på, at sammenhængen er reel, da de ikke finder tilsvarende toppe i udbrudsraten hos vulkaner i det sydlige Chile på noget tidspunkt i historien, uden at det er i forbindelse med store jordskælv.

Med dette in mente mener forskerne, at det er et godt tidspunkt at analysere vulkanske begivenheder i Indonesien, som kan have fulgt det store jordskælv i 2004, et andet stort jordskælv i 2005 og 2 i 2007. Nogle udbrud er allerede sket blandt Sumatras 36 aktive vulkaner, som har tilknytning til den aktive brudzone, der er årsag til jordskælvene.

CRK, Kilde: ScienceNOW Daily News 8. december



Foto: Bitterroot

Nye studier viser, at vulkaner kan vågne op i kølvandet på store jordskælv – selv hvis de ligger flere hundrede km fra skælvets epicenter.

Da nutiden begyndte

Istiden sluttede ikke for ca. 11.000 år siden – nej, den sluttede for præcis 11.711 år siden! Det er nu blevet afgjort en gang for alle af Den Internationale Geostratigrafiske Kommission, der er blevet præsenteret for ekstremt detaljerede data fra NordGRIP-isjerneboringen i Grønland. Det er forskere fra Niels Bohr Institutet med Jørgen Peder Steffensen i spidsen, der har analyseret den grønlandske iskerne og fundet, at overgangen fra istid til vores nuværende varme mellemistid var markeret af et klimaskift så brat som ved et tryk på en knap. Nu er det islag, hvor det bratte skift optræder, blevet gjort til international standardreference i lighed med f.eks. den officielle reference for vægtenheden kilogram, som opbevares i Paris. Laget ligger i 1492,45 meters dybde i NordGRIP-boringen, og stammer ifølge dateringer fra sne, der faldt 11.703 år før år 2000.

Der er megen prestige i at være indehaver af internationale standarder for, hvordan geologiske tidsperioder defineres. Processen med at få anerkendt de grønlandske data som standard former sig i praksis som en retssag, hvor en "advokat" fremfører sagen for et dommerpanel, der skal afgøre sagen. De danske data var så gode, at det ikke var den store opgave for talsmanden, professor Mike Walker fra Lampeter University i Wales, at overbevise dommerne.

Det er første gang, at en iskerne bliver international standardreference for en geologisk tidsalder, hvilket Jørgen Peder Steffensen opfatter som en stor anerkendelse af de ekstremt detaljerede videnskabelige data.

CRK, Kilde: pressemeddelelse fra Niels Bohr Institutet



Foto: Niels Bohr Institutet

Jørgen Peder Steffensen viser en del af den iskerne, hvor den nye internationale standard for hvornår istiden sluttede og nutiden begyndte findes.

Niels Bohr og UVVU

Ville Niels Bohr have været indklaget til Udvalgene vedrørende videnskabelig uredelighed og erklæret videnskabelig uredelig, hvis udvalgene havde eksisteret i 1915?

Af Peter Sigmund

■ I sin artikel om "Videnskabs-teori på afveje" (Aktuel Naturvidenskab nr. 5/2008) kommer David Favrholt bl. a. ind på Udvalgene vedrørende videnskabelig uredelighed (UVVU) og skriver (mine fremhævelser)

»Hvis man havde haft UVVU i 1915 var Niels Bohr *uden al tvivl* blevet indklaget og erklæret for videnskabeligt uredelig. *De principper, som UVVU opererer med, gælder kun for den mest primitive, anvendte forskning* – den, der kommer under "Fra forskning til faktura"-princippet. Slet ikke for grundforskning i almindelighed.«

Med fare for at blive erklæret for videnskabeligt uredelig af min kollega David Favrholt vil jeg melde mig med en beskedent tvivl.

Ifølge bekendtgørelsen fra 2005 forstås videnskabelig uredelighed som »en forsætlig eller groft uagtsom adfærd i form af forfalskning, plagiering, fortielse eller lignende, der indebærer en utilbørlig vildledning om egen videnskabelig indsats og/eller videnskabelige resultater« Jeg har endog meget svært ved at

forestille mig, hvem der skulle kunne indklage Niels Bohr for bare en af disse forseelser.

Det samme gælder *uden al tvivl* for de eksplicit angivne eksempler:

- Uoplyst konstruktion af data eller substitution med fiktive data.
- Uoplyst selektiv eller skjult kassation af egne uønskede resultater.
- Uoplyst usædvanlig og vildledende anvendelse af statistiske metoder.
- Uoplyst ensidig eller forvredet fortolkning af egne resultater og konklusioner.
- Plagiering af andres resultater eller publikationer.
- Uretmæssig angivelse af forfatterrolle, titel eller arbejdssted.
- Afgivelse af urigtige oplysninger om videnskabelige kvalifikationer.

Bemærk den gentagne anvendelse af ordet *uoplyst*. Hvem vil anklage Niels Bohr for ikke at have oplyst om de ræsonnementer, der lå bag hans vitterligt

usædvanlige tanker?

Jeg tror, at David Favrholt er enig i at en klage over Niels Bohr, der beskylder ham for nogen af ovenstående punkter, ville være absurd.

Det, Favrholt formentlig hæfter sig ved, er at en del af Bohrs forskning var kontroversiel, specielt atomteorien fra 1913, der på flere måder var i strid med fysikkens arveguld. Hvis man havde haft anonymt peer review dengang, ville Bohr formentlig være kommet i alvorlige vanskeligheder med at få sin atomteori publiceret i et velrenommeret tidsskrift, ikke mindst i højimpaktbladet *Physical Review Letters*, som mange af nutidens fysikere forsøger at komme i oftest muligt.

Her kommer endnu en bestemmelse ind i billedet:

»Udvalgene kan ikke behandle sager, der vedrører videnskabelige teories holdbarhed eller sandhed eller sager, der vedrører forskningskvaliteten af et videnskabeligt produkt.«

Der er ikke udelte enighed om dette punkt: Enkelte medlemmer har forladt UVVU, fordi de finder denne bestemmelse

for restriktiv. Uanset hvad man mener herom, så ville denne bestemmelse imidlertid sikre, at en klage til UVVU på foranledning af Niels Bohrs atomteori ville have været afvist administrativt.

David Favrholt har uddybet sin kritik af UVVU i flere skrifter, som er citeret i hans artikel. Her henviser han til tidligere sager, hvor UVVU har truffet sin afgørelse bl.a. under henvisning til "god videnskabelig praksis". Disse afgørelser blev truffet, mens en tidligere bekendtgørelse var gældende. Den nugældende bekendtgørelse er påvirket af debatten der udspandt sig dengang, som også David Favrholt bidrog til med vægt. Jeg synes det ville være passende at anerkende, at nogen har lært af disse begivenheder.

Imidlertid har jeg med nogen undren læst David Favrholt's bemærkninger til induktionsmodellen, »Forskeren foretager nogle observationer, så han har nogle data at gå ud fra. På basis af disse data inducerer (dvs. generaliserer) han sig frem til en hypotese. Ud fra hypotesen deducerer han sig frem til

nye observationer. Hvis disse bekræfter hypotesen, må den anses for verificeret, men dog ikke endeligt.»

hvorefter der kommer et eksempel med observation af sorte ravne, som skal illustrere modellens naivitet. Jeg synes ellers, at citatet ganske godt illustrerer opståelsen af Bohrs teori om brintspektret bl.a. på basis af Balmers observationer, de efterfølgende forsøg på at anvende teorien på røntgenspektre, samt den lange periode, hvor teorien ikke ansås for endelig, hvad den heller ikke var. Favrholt skriver:

»I UVVU opererer man med induktions-modellen og har med den som grundlag stemplet flere danske forskere som videnskabeligt uredelige«,

og bruger dette som argument for at inddrage Niels Bohr som eksempel. Jeg mener, der må foreligge en fejlslutning.

Det er indlysende, at ikke alle i UVVU-bekendtgørelsen nævnte eksempler på videnskabelig uredelighed passer på alle videnskabelige discipliner. Motivationen til videnskabelig snyd er muligvis også større i strategisk og anvendt forskning

end i "unyttig" grundforskning. UVVU blev etableret for at forebygge uredelig adfærd og efter behov at påtale den. Men der er så mange folk involveret i forskning, at et totalt fravær af brådne kar ikke kan forventes.

Det er ikke UVVUs opgave at lægge hindringer i vejen for banebrydende forskning. Men der er spilleregler, som gælder al forskning og som i sjældne tilfælde bliver overtrådt.

Kære David, jeg værdsætter og ynder at læse dine skrifter, men her synes jeg du tager fejl. ■

Om forfatteren



Peter Sigmund er professor emeritus Institut for Fysik og Kemi Syddansk Universitet
Tlf.: 6550 3522
E-mail: sigmund@ifk.sdu.dk

Replik fra David Favrholt

■ Peter Sigmund er en af vores tids store fysikere, kendt verden over og på Nobelpriseniveau. Og så længe han sidder i UVVU, er jeg ikke bekymret med hensyn til sagsbehandlingen i organet.

Sigmund har ret i, at min kritik rammer lidt ved siden af nu, efter at UVVU fik den nye bekendtgørelse i 2005. Men jeg føler stadig, at UVVU's retningslinjer i de forkerte hænder kan blive misfortolket, således som det skete i sagerne mod Bjørn Lomborg og Anders Pape Møller. Her nedsatte man udvalget, som havde meget snævre begreber om forskningsmodeller, og som mest holdt sig til Karl Poppers induktionsmodel, med påstanden "Alle ravne er sorte" som eksempel på en videnskabelig påstand, der er falsificerbar og derfor ikke kan hævdes at være absolut sand. Det var med blandt andet Popper in mente, at man kritiserede Lomborgs dokumentation for sine teorier.

Når jeg nævner Niels Bohr som et eksempel på én, som kunne have fået sin sag for i sin tid, hvis man dengang havde

kunnet klage over ham til et UVVU, er det fordi han jo – med rette – så bort fra alt, hvad elektromagnetismen dengang havde at byde på. Da han blev indstillet til Nobelprisen i 1917 blev netop dette anført som begrundelse for, at han ikke kunne få den tildelt. Sandt nok holdt Bohr ikke noget hemmeligt; tværtimod kundgjorde han højt og tydeligt, at hans atomteori fra 1913 brød med såvel determinisme som med kontinuitet, så man ville ikke have kunnet anklage ham for »Uoplyst ensidig eller forvredet fortolkning af egne resultater og konklusioner«. Men i den *ukyndige* kontrollants hænder kunne han nok være blevet beskyldt for "Uoplyst ensidig eller forvredet fortolkning af andres resultater og konklusioner". Og selv om han var blevet frifundet, ville han således være blevet sværtet til.

Men indrømmet – jeg vil ikke udelukke, at Peter Sigmund i denne tvist har bedret kort på hånden end jeg. Dog vil jeg fastholde, at induktionsmodellen er en alt for simpel forskningsmodel i den form,

hvor den serveres i lærebøgerne i videnskabsteori. Det som de studerende får ud af det, er, at sådan noget som, at sølvs smeltepunkt er 962 °C, er noget, man blot har konstateret ved gentagne forsøg, og at det kan være, at man næste gang når til et helt andet resultat, og at påstanden dermed er falsificeret. Når man, som jeg plejer at gøre det, henviser til, at den dybere forklaring er at finde i Det periodiske system, i kernefysik med videre, får jeg blot at vide, at det jo også er noget, der blot bygger på induktion, og af samme grund nok bliver falsificeret om nogle år. Og det kan jo godt vildlede nogle politikere, der skal tage stilling til bevillinger til projekter inden for naturvidenskabelig grundforskning. ■

Om forfatteren



David Favrholt er dr. phil., professor emer. tilknyttet Institut for Filosofi, Pædagogik og Religionsstudier, Syddansk Universitet.
E-mail: favrholt@ifpr.sdu.dk
d.favrholt@webspeed.dk

Alt er relativt

– eller er det nu også det?

Anmeldt af Charlotte Autzen, cand. scient. i videnskabsformidling og nyhedsredaktør på Københavns Universitet. E-mail: chau@adm.ku.dk

■ Kunsten at sætte sig mellem to stole uden at ramme gulvet med et hult drøn, mestrer forfatterne bag bogen *Alt er relativt* desværre ikke. Mine forventninger var ellers høje, inden jeg gik i gang med læsningen. Godt hjulpet på vej af bogens omslag med beskrivelser som »Undervejs hører vi om dialektforskning blandt køer« og »Efter endt læsning vil du også have fået svar på hvad der sker, når partikelfysikere læser for meget Anders And«, stoppede jeg gladelig bogen i rygsækken til indtagelse på min daglige togtur mellem Nyborg og København. Her var jo to forfattere, der ifølge bogens omslag ligefrem insisterede på »At selv når naturvidenskaben er nyttig, kan den godt være stærkt underholdende«. Ikke at jeg er enig i, at naturvidenskab nødvendigvis er sjovt, men hvis bogen nu kan gøre nysgerrig og skabe interesse og dermed bidrage til et ædelt formål i en tid, hvor riget fattes kloge hoveder, der har lyst til at lægge dem i blød i netop naturvidenskab, så giver jeg den gerne en chance.

Desværre viste bogomslagets virkelighed sig ret hurtigt at være lige så relativ som titlen. Den korte og kontante beskrivelse af bogen er "ikke bestået". Skal jeg anbefale den til noget, så må det blive til et kursus i kommunikation, hvor den vil tjene som udmærket eksempel på, hvor galt det kan gå, når man laver populærformidling uden først at tage sin målgruppe i ed og uden at sætte sig grundigt ind i formidlingens muligheder og faldgruber. Her gælder for så vidt lige vilkår for naturvidenskab og formidling. Sætter

man sig ikke grundigt ind i de regler og lovmæssigheder, der gælder på området, så kan man ikke forvente at få brugbare resultater ud i den anden ende.

Bag *Alt er relativt* står to forfattere, en fysiker (Anders Smith) og en biolog (Jørn Madsen). Dette forhold afspejler sig tydeligt i bogens emnevalg og struktur. Uden at vide det, vil jeg formode, at fysikeren har skrevet kapitlerne om fysik, og biologen har skrevet om biologi. Måske de af hensyn til læseren skulle have byttet roller? Det helt store spørgsmål efter endt læsning er nemlig, hvem der er målgruppen for denne bog? Nybegyndere kan det næppe være. Bogen er på visse steder direkte svær. F.eks. jonglerer forfatterne lystigt rundt med gener, enzymer, og proteiner i en historie om, hvor lidt forskel der er mellem chimpanser og os mennesker. Desværre drukner de fine pointer hurtigt blandt støjen af milliarder af basepar og andre biologiske finesser, der ikke bidrager med brugbare kroge til ophæng af nyt stof for ikke biologer. Samme problemer genfindes i fysikerens første halvdel af bogen, der både er svær og visse steder også kedelig pga. den megen pligtstof, vi i bedste naturvidenskabelige stil skal trækkes igennem, før vi har fået skabt universet, opdaget tyngdeloven og skrevet de gamle fysikers kongerække. Her finder vi også et eksempel på åben kamp mellem forsøget på at inddrage det pædagogiske og oplysende eksempel og den videnskabelige fremstillingsskema, som bogen, trods forsøg på det modsatte, så rigeligt slæber rundt på. Efter næsten fem

siders svær tilgængelig gennemgang af den almene relativitetsteori, kommer gps'en endelig på banen – det dagligdagse eksempel, der måske kunne have fået mig til at hænge på og forstå så meget af fysikken, at jeg også ville kunne have husket lidt bagefter. I stedet overvejer jeg en kort overgang om jeg, efter dette lille hårdt tiltrængte aha, gider læse de fem sider igen i håbet om at forstå. Svaret blev nej. Her er selvfølgelig en risiko for, at det er mig, den er gal med. Måske er jeg ikke en del af målgruppen og derfor går det galt med kommunikationen. En anden mulighed er, at forfatterne slet ikke har gjort sig klart, hvem de egentlig skrev denne bog til. Er den til fagfæller, der i forvejen ved en masse om naturvidenskab, men efter forfatterens mening trænger til at få pepet fagsproget lidt op? Eller er den, som der står på omslaget, bogen om (næsten) alt, hvad du bør vide om naturvidenskab og dermed til læsere uden særlige faglige forudsætninger, som blot bør vide noget om naturvidenskab. Under begge omstændigheder mangler bogen alle de knagerækker, den gode formidling bruger som læserhjælp til ophængning af ny viden.

I stedet for at skrive en bog på den gode formidlings præmisser, så reproducerer forfatterne, set med mine øjne, den videnskabelige fremstilling af naturvidenskaben. Som den gammeldags skolebog, er bogen velforsynet

med navne på gamle gråhårede og for længst afdøde fysikere (og måske i anledning af Darwin-året også en enkelt biolog). Der remses op tilbage fra de gamle grækere, i og for sig et udmærket træk på den måde at vise læserne, at noget af det interessante i naturvidenskab netop er, at det er mennesker, der skaber fremstillingen af naturen, og at naturvidenskab ikke er en ophøjet objektiv størrelse. Men desværre er dette også relativt, for omtrent da vi når til vores hjemlige Bohr, hører denne eksemplariske name-dropping på besynderlig vis op. Den moderne naturvidenskab består åbenbart ikke af mennesker på opdagelse i vores forunderlige natur. At forskeren, der studerer bjergsøen i Schweiz for spor efter tidligt liv måske hedder Kirsten og er en gæv fynsk forsker, og at ildsjælen, der jagter fossilt dna kunne hedde Eske og en gang måske havde været pelsjæger, det melder historien ikke det fjerneste om. Nok en gang står læseren tilbage med billedet af naturvidenskab, som noget der mest af alt består af gamle gråhårede mænds historiske bedrifter. Synd at et sikkert ærligt forsøg på at gøre en forskel, i den grad ikke lykkes og slet ikke kan bære den poppede indpakning, som bogen er forsynet med.

Jørn Madsen og Anders Smith:
Alt er relativt. Gads forlag 2008.
368 sider, 269,- kr.



Verdens Vilde Vejr

Anmeldt af Niels Hansen, pressechef ved
Danmarks Meteorologiske Institut. nsh@dmi.dk

Jesper Theilgaard afslører i sin nye bog *Verdens Vilde Vejr* skjulte facetter af sit ellers så gemytlige tv-meteorolog-image. *Verdens Vilde Vejr* vil nemlig mere end at være stor, flot og underholdende. I bogen fortæller han historien om de enorme, utæmmelige kræfter vejret indeholder. Og i stedet for en lang geofysisk udredning har forfatteren valgt at drive pointen igennem med eksemplets magt. Bogen indeholder således hen ved 70 dobbeltsider med konkrete historier om konsekvenserne af ekstremt vejr på alle kontinenter – fra højvande i Holland over sandstorm i Sudan til arktisk armod i Alaska.

Jesper Theilgaards egentlige sigte med bogen er imidlertid at rabe vagt i gevær overfor fremtidige klimaændringer. Det gør han ved håndgribeligt at påpege, hvor galt det allerede går i dag og så – med faglig tyngde – at fremskrive, hvad vi har i vente efterhånden som den menneskeskabte globale opvarmning tager fart.

Lidt frækt vil jeg påstå, at Jesper Theilgaard med *Verdens Vilde Vejr* springer ud som en mand med meninger. Han analyserer og kommenterer forskellige regerings håndtering af naturkatastrofer og tager et klart og velkvalificeret standpunkt i klimadebatten. Det gør på mange måder bogen mere påtrængende og provokerende end forfatterens tidligere udgivelser, og bogen rumsterer videre i hovedet efter man har sluppet den.

På billedsiden demonstrerer bogen tydeligt, hvorfor al vejrformidling ikke for længst er flyttet over på nettet. De mange fotos er af langt højere kvalitet end det, vi kan

se på f.eks. dmi.dk. Og Jesper Theilgaard udnytter sin adgang til internationale bildebureauer til det yderste. Mit eksemplar af *Verdens Vilde Vejr* lå fremme derhjemme og min yngste faldt i staver over den. Én time senere hamrede hun den sammen med et brag og proklamerede at »nu har jeg læst hele den her store bog, far«. I sin verden havde hun altså bladet forbi alle siderne og studeret mange af billederne. Vi har senere snakket om et par stykker, som foruroligede hende – hun er kun fem – men det korte af det lange er, at hun rent faktisk var fastholdt usædvanligt længe af bogen og det er i sig selv et kvalitetsstempel, når en publikation er interessant for mere end én person i familien.

Ud over de 70 eksempler indeholder bogen en beskrivelse af de vigtige elementer i det globale klima, forklaringer på naturlige klimaændringer og en udredning af de processer, som ofte bliver nævnt i den danske klimadebat. Her til kommer fremtidens klima opdelt på kontinenter, et afsnit om konsekvenserne af klimaændringer og et om, hvordan vi bedst afbøder og tilpasser os dem. Vi kommer altså rigtig godt ud i hjørnerne af emnet "klima".

En lille anke har jeg dog. Løber man de ca. 70 eksempler på ekstremt vejr igennem, så slår det en, at fænomenerne er ret begrænsede i antal. Derfor burde forfatteren underbygge med blot ti små, generelle tekster om: tørke, tropiske orkaner, extratropiske orkaner, snestorme, kraftig regn, støvstorme, skovbrande, tornadoer, isslag og hedebløge. På den måde kunne man f.eks. hoppe



fra de samfundsmæssige konsekvenser af Supercyklonen Sidr i Bangladesh til en mere overordnet udredning af den tropiske orkan som vejrphenomen.

På mange punkter ligner *Verdens Vilde Vejr* bestselleren fra 2006: *Det Danske Vejr*. Og hvorfor skulle den ikke det? Jesper Theilgaard og Gyldendal har naturligvis analyseret, hvad der fungerede særligt godt med *Det Danske Vejr* og så forsøgt at gøre det én gang til med et beslægtet emne. Der er altså igen tale om et smagfuldt, fagligt veltillavet værk som kan pletlæses eller gennemgraves efter behag. Og en del af de, som begavede sig selv, venner og familie med *Det Danske Vejr* vil også gå målrettet efter den nye publikation uden at blive skuffede. Samtidig tager Jesper Theilgaard med *Verdens Vilde Vejr* et skridt videre fra den gemytlige vejrformidler og det gør han rigtig godt.

Jesper Theilgaard: *Verdens Vilde Vejr*. Gyldendal 2008. 293 sider, 299,- kr. ■



Invasive planter – uønskede arter
I septembernummeret af Natur og Museum beskrives en række invasive plantearter, deres naturlige udbredelsesområde og deres indflydelse på den danske flora og fauna. Desuden fortæller om de metoder, man kan anvende til at holde dem nede eller direkte udrydde dem.

Jan Kjærgaard Jensen & Hans Erik Svart: *Invasive planter – uønskede arter*. Natur og Museum nr. 3/2008. 36 sider, 60 kr. i løssalg. Kan bestilles på www.nathist.dk

Aktuel Naturvidenskab i undervisningen

Af Carsten R. Kjaer og Jørgen Dahlgaard

■ Husk, at du nu kan finde undervisningsmateriale til udvalgte artikler fra Aktuel Naturvidenskab på vores hjemmeside. Materialet er beregnet til undervisningen i gymnasiet, og det fremgår af materialet, hvilket niveau det er beregnet til. Både undervisningsmaterialet og de tilhørende artikler er frit tilgængelig på hjemmesiden, og der er netop nu opgavesat til 9 forskellige artikler.

Undervisningsmaterialet består af spørgsmål til artiklerne, regneopgaver, diskussionsoplæg mv., og er tænkt som et relevant supplement til lærebøgerne inden for naturvidenskab.

En gruppe gymnasielærere med Michael Bjerring Christensen fra Aarhus Statsgymnasium står bag udformningen af materialet. Ambitionen er, at

der fremover jævnligt skal lægges nyt materiale ud på sitet. Indtil videre knytter alle opgavesættene an til artikler fra vores omfattende artikelarkiv. På længere sigt vil vi gerne kunne lancere undervisningsmateriale samtidigt med udgivelsen af det trykte blad for særligt aktuelle emner.

Hvis du har kommentarer til undervisningsmaterialet, hvad enten det er i form af ris eller ros eller forslag til andre artikler, du godt kunne tænke dig, at der blev knyttet materiale til, er du meget velkommen til at kontakte projektlederen eller redaktionen. Vi vil selvfølgelig også meget gerne høre, hvis du savner artikler om bestemte emner i bladet, som kunne bruges som aktuelt supplement til undervisningen i gymnasiet. ■

Kontakt til lærergruppen:

Projektleder, lektor Michael Bjerring Christensen,
Aarhus Statsgymnasium
e-post: michael.christiansen@science.au.dk

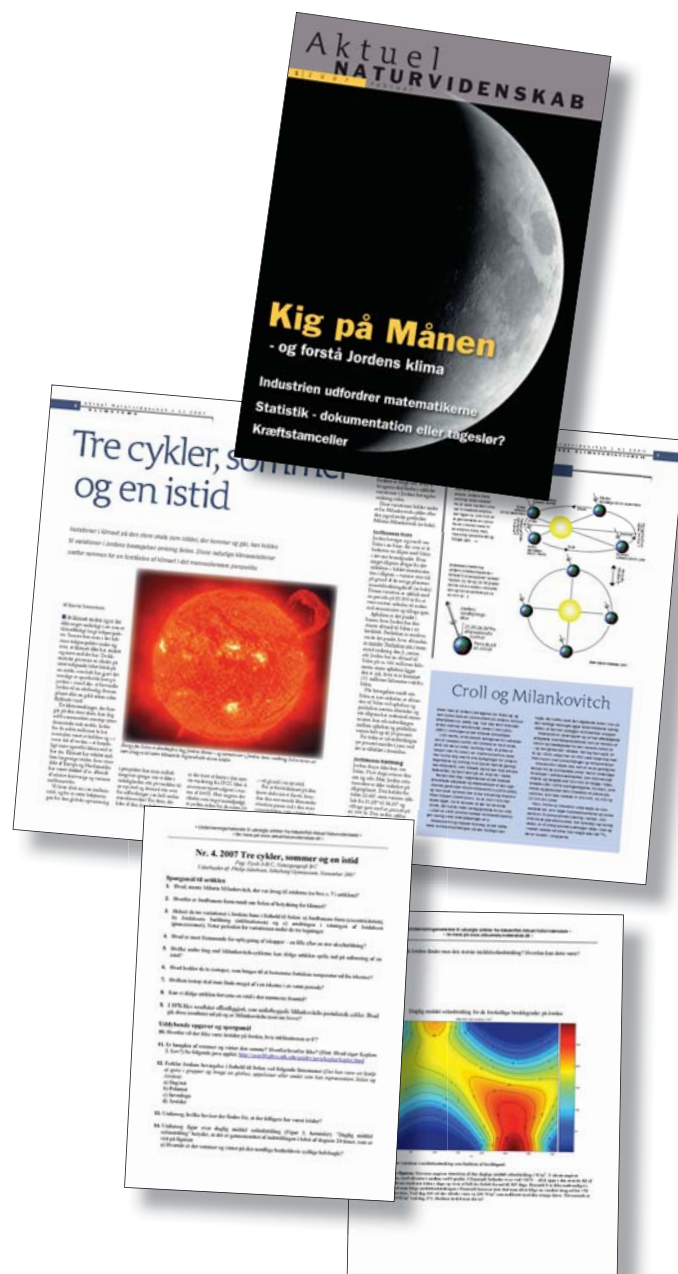
Kontakt til Aktuel Naturvidenskab:

e-post: red@aktuelnat.au.dk
Tlf.: 8942 5555

Undervisningsmaterialet kan ses på hjemmesiden:

www.aktuelnaturvidenskab.dk

under punktet: *undervisningsmateriale*



Et eksempel på et opgavesæt.

Fagredaktører

Aktuel Naturvidenskab samarbejder med en bred skare af fagfolk, der stiller deres faglige viden til rådighed for bladet. Listen af fagredaktører opdateres løbende.

Michael Cramer Andersen, astrofysiker og videnskabsformidler.
Flemming Besenbacher, professor, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet.

Tom Fenchel, professor, Marinbiologisk Laboratorium, Københavns Universitet.

Claus Hviid Christensen, director, Exploratory & Emerging Projects Haldor Topsøe a/s

Lars Lindberg Christensen Informationschef, Hubble rumteleskopet (ESA)/(ESO), München

Jesper Dahlgaard, seniorforsker, Cancer Research, Medical Prognosis Institute, Hørsholm.

Søren B.F. Dorch, astrofysiker, ph.d., Københavns Universitetsbibliotek, adjungeret lektor, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet.

Michael Drewsen, forskningslektor, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

Claus Emmeche, lektor, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet.

Jens Morten Hansen er statsgeolog ved GEUS samt adjungeret professor i naturfilosofi ved Københavns Universitet.

Vagn Lundsgaard Hansen, professor, Inst. for matematik, DTU.

Peter K.A. Jensen, adm. overlæge, Klinisk genetisk Afdeling, Aarhus Universitetshospital

Mikkel Willum Johansen, matematiker samt cand.mag. i filosofi, Center for Naturfilosofi og Videnskabsstudier, Københavns Universitet

Anne Mette K. Jørgensen, Danmarks Meteorologiske Institut.

Peter C. Kjærgaard, lektor, Institut for Filosofi og Idéhistorie, Aarhus Universitet.

Helge Kragh, professor, Steno Institutet, Aarhus Universitet.

Gunnar Larsen, cand. scient., Miljøministeriet, Miljøcenter Odense.

Benny Lautrup, professor, Niels Bohr Institutet, Københavns Univ.

Bent Lauge Madsen, biolog (pensioneret fra Miljøministeriet).

Ole G. Mouritsen, professor, Institut for Fysik, Syddansk Universitet.

Bent Nielsen, gymnasielektor, Københavns VUC.

Henry Nielsen, lektor, Steno Institutet, Aarhus Universitet.

Rasmus Pagh, lektor, IT-Universitetet i København

Jens Olaf Pepke Pedersen, seniorforsker, Danmarks Rumcenter.

Kaj Sand-Jensen, professor, Ferskvandsbiologisk Laboratorium, Københavns Universitet.

Theresa S. S. Schilhab, forsker, Learning Lab Denmark

Klaus Seiersen, ph.d., Århus Sygehus, Afd. for Medicinsk Fysik.

Torben Lund Skovhus, konsulent, ph.d., Teknologisk Institut.

Carl-Erik Sølberg, civilingeniør, Institut for Fysik, Aalborg Universitet.

Tilbud til undervisere:

Køb temanumrene om

Energi og energiteknologier 6-2008

Klima og klimaændringer 4-2007

som klassesæt

Prisen på 360,- kr. dækker et klassesæt på 32 stk. og er inklusive moms, porto og ekspedition.

Bestil på tlf.: 8942 5555 eller via e-mail: red@aktuelnat.au.dk

Abonnementsservice:

varetages af

Oxygen Media Service

Postbox 865

2400 København NV

Telefon 3816 8026 (hverdage kl. 9 - 13)

Fax 3916 2617

email: abo@aktuelnaturvidenskab.dk

Husk at melde flytning!



NB: Du kan også bestille via hjemmesiden: www.aktuelnaturvidenskab.dk

☐ Ja tak – jeg vil gerne tegne abonnement på bladet Aktuel Naturvidenskab. Pris kun 276,- kr. for seks numre.

Navn: _____

Firma: _____

Adresse: _____

Postnr. og by: _____

Evt. tlf. nr. / e-post: _____

Jeg ønsker at starte mit abonnement med blad nr.:

6-2008: ☐ senest udkomne nr.: ☐ Andet: ☐ _____

Abo. + intropakke med 8 tidligere numre: ☐ (tilbudspris: 336,- kr.)

Jeg er medlem af UNF og ønsker at få UNF-rabat på abo.: ☐

UNF-indmeldelsestidspunkt: _____

Artiklen kommer fra tidsskriftet Aktuel Naturvidenskab. Se mere på www.aktuelnaturvidenskab.dk

Indsendes til Aktuel Naturvidenskab inden december, 2009



Sendes ufrankeret
Modtageren
betaler portoen

Abonnementsservice
Oxygen Media Service
Postbox 865
+++ 3540 +++
2400 København NV

Synspunkt

Fra laboratorium til energisystemer



*Af Brian Vad Mathiesen
er ph.d., adjunkt
Institut for Samfundsudvikling
og Planlægning ved
Aalborg Universitet
Tlf.: 99 40 72 18
e-mail: bvm@plan.aau.dk
www.plan.aau.dk/~bvm*

■ Massive investeringer i forskning og udvikling af fremtidens energisystemer skal være en vigtig faktor i Europas vej ud af den nuværende økonomiske krise. Sådan lød tonerne fra et treklover bestående af EU-kommissionens formand Jose Manuel Barroso, den franske ministerpræsident Nicolas Sarkozy og Englands premierminister Gordon Brown, da de mødtes med erhvervsfolk i London for nylig. Udmeldingerne er blot den seneste af mange, der har placeret energi tårnhøjt på den internationale dagsorden. Men der er også flere rigtig gode grunde til at interessere sig for fremtidens energiforsyning – hvor den økonomiske krise blot er den mest aktuelle. Bekymringen for menneskeskabte klimaændringer og afhængigheden af ustabile mellemøstlige stater som leverandører af olie er to andre. Også i USA kobles de to dagsordener sammen, så energisektorens miljøpåvirkning kan mindskes, samtidig med, at vi kan komme ud af den økonomiske krise.

Nu hvor der er lagt op til, at der i de kommende år vil blive pumpet milliarder af kroner ud i energiforskning, er der ekstra grund til at tænke sig godt om. I Danmark har statsministeren meldt ud, at den langsigtede ambition er, at Danmark skal blive 100 % selvforsynende med vedvarende energi. Vi ved endnu ikke, hvornår dette mål skal være opfyldt, men på kort sigt er folketingets partier enige om, at vi skal op på 20 % i 2012.

Vi har nu brug for konkrete handlingsplaner, der viser, hvordan og hvornår vi kan nå op på 100 % vedvarende energi. Der findes naturligvis ikke kun én måde at indrette et sådan system på, men det er vigtigt, at forskellige veje diskuteres, så vi ikke drøner ud af en tangent med kortsigtede initiativer. At nå et sådant mål kræver, at vi investerer massivt i energibesparelser, vedvarende energi, effektive kraftvarmeverker med brændselsceller, store varmepumper, elbiler og jernbanen.

I første omgang må der laves scenarier for, hvordan sådanne systemer kan sammensættes rent teknisk. I næste omgang må økonomiske analyser vise, hvad omkostninger til sådanne systemer er. For at kunne se længere ud end 20 år, kræver sådanne scenarier, at man anbefaler en mere rea-

listisk samfundsøkonomisk rente fra Finansministeriets og Energistyrelsens side. Det hænger ikke sammen, at renten til at evaluere samfundets investeringer er dobbelt så høj, som hvis private personer skal optage lån i friværdien til et nyt badeværelse. På det seneste har det Internationale Energiagentur (IEA) fordoblet deres forventning til olie, kul og gasprisernes udvikling. Hidtil har disse været lave sammenholdt med den forventede udvikling i energiforbruget. Dette vil sandsynligvis blive omfattet af myndighedernes anbefalinger om kort tid, hvilket vil gøre de samfundsøkonomiske analyser af investeringstunge energiteknologier såsom vedvarende energi, energibesparelser og banebåret transport mere fordelagtige.

Ligesom nye teknologier ikke opfinder sig selv, kan man heller ikke forvente, at nyudviklede teknologier kan springe ud på det etablerede marked og klare sig mod eksisterende teknologier. Derfor er det nødvendigt med "teknologikuvøser", der hjælper nye teknologier i den svære overgang fra forskningslaboratorierne til markedet. Ellers risikerer vi, at mange gode ideer aldrig når længere end til tegnebrættet – eller må fortsætte i udlandet, sådan som vi så det med f.eks. bølgeenergiprojektet Wave Dragon. En mulighed er f.eks. at udbyde 100 MW med et fast tilskud pr. kWh fra bølgekraft, som forskellige udviklere eller firmaer derpå kan byde ind på. Dette vil sikre, at nye teknologier får en chance for at opbygge et produktionsapparat, der kan give erfaringer med masseproduktion med mere driftsikre systemer og reducerede enhedsomkostninger til følge. Samtidig vil modellen sikre, at udgifterne for samfundet ikke løber løbsk.

Også teknologier som f.eks. vindmøller eller biogasanlæg, der er nået skridtet længere i udviklingen, har brug for opbakning på flere planer. Det er vigtigt at få den lokale befolknings opbakning til sådanne anlæg og at sikre økonomien for investorer, så alt for svingende eller lav betaling ikke forhindrer at disse investeringer finder sted. Uden politisk, økonomisk og folkelig opbakning kommer vi ingen steder. Mulighederne for fremtidens energisystem er mange. Vi har nu fået en vision – lad os få konkretiseret målet og vejen derhen. ■