

Technical University of Denmark



## Brændselscellers fysik og kemi

**Smith, Anders; Mogensen, Mogens Bjerg**

*Published in:*  
Kvant

*Publication date:*  
2004

*Document Version*  
Også kaldet Forlagets PDF

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*  
Smith, A., & Mogensen, M. B. (2004). Brændselscellers fysik og kemi. Kvant, (1), 14-20.

## DTU Library

Technical Information Center of Denmark

---

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

# Brændselscellers fysik og kemi

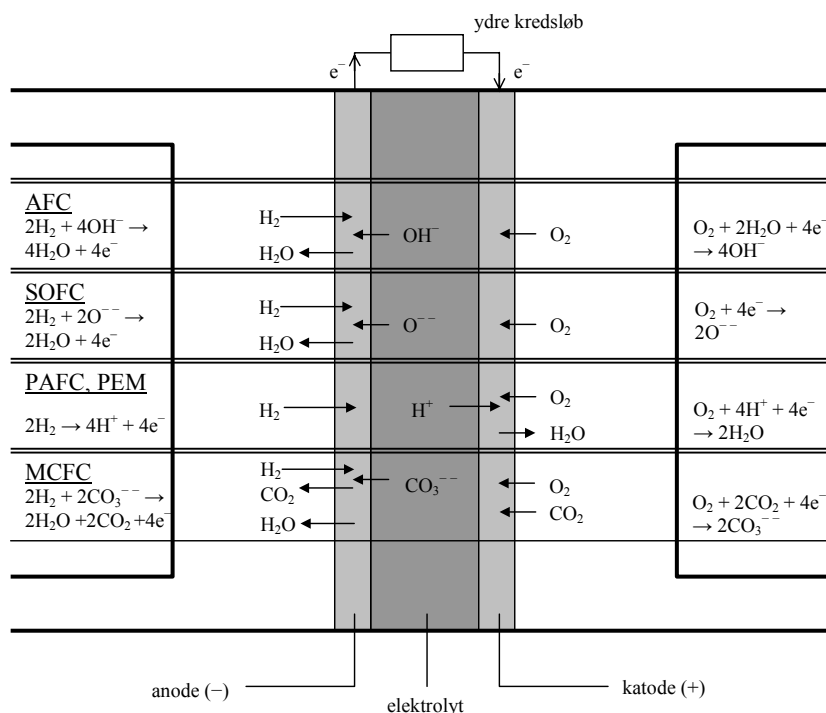
Anders Smith og Mogens Mogensen, Afdelingen for Materialeforskning, Forskningscenter Risø.

## Brændselscellens princip

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

Der findes mange typer af brændselsceller, hvoraf nogle også kan omsætte naturgas (metan, CH<sub>4</sub>) og kulfas foruden brint. Alle har det til fælles, at en celle består af en elektrolyt og to elektroder, ligesom celler i almindelige batterier. Elektroderne skal være katalytisk aktive, således at de kan omdanne enten brint (H<sub>2</sub>) til positivt ladede brintioner (H<sup>+</sup>) eller ilt (O<sub>2</sub>) til negativt ladede ioner, der indeholder iltatomer, f.eks. O<sup>2-</sup> eller OH<sup>-</sup> (hvilken reaktion, der er tale om, afhænger af brændselscellens type).

De dannede ioner passerer gennem elektrolytten og reagerer på den anden side med ilt (hhv. brint), hvorved der dannes vand og evt. CO<sub>2</sub>. De tiloversblevne elektroner fra reaktionerne kan ikke passere elektrolytten, og der opstår derved en elektrisk potentialforskel mellem cellens to sider. Denne potentialforskel kan så bruges til at drive en elektrisk strøm i et ydre kredsløb. Figur 1 viser det grundlæggende princip i en brændselscelles opbygning samt de elektrokemiske reaktioner i de fem hovedtyper, som er benævnt efter deres elektrolyt: Den *alkaliske brændselscelle* (eng. "Alkaline Fuel Cell", AFC) med en elektrolyt bestående af vandigt kaliumhydroxid (KOH), *fosforsyrebrændselscellen* (eng. "Phosphoric Acid Fuel Cell", PAFC), *protonudvekslingsmembranbrændselscellen* eller *fast-polymer-protonleder-brændselscellen* (eng. "Proton Exchange Membrane Fuel Cell" eller "Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell", PEMFC eller blot PEM), hvor elektrolytten er en protonledende polymer (ofte bruges materialet Nafion fra firmaet DuPont), *smeltet-carbonat-brændselscellen*



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

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

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

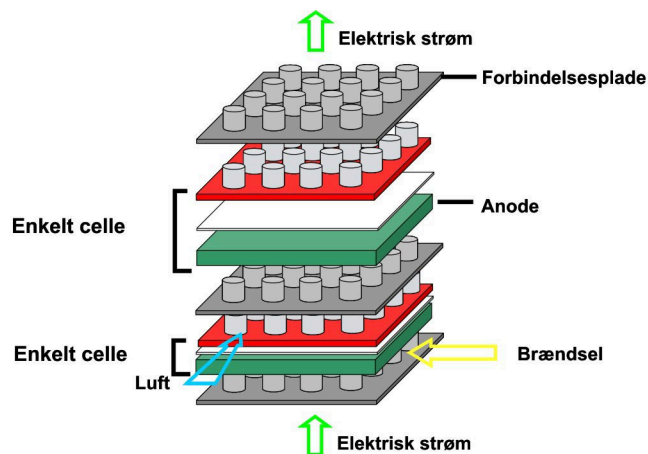
Dansk navn	Den alkaliske brændselscelle	Protonudvekslingsmembran-brændselscellen	Fosforsyre-brændselscellen	Smeltet-carbonat-brændselscellen	Fastoxid-brændselscellen
Engelsk navn	Alkaline Fuel Cell	Proton Exchange Membrane Fuel Cell	Phosphoric Acid Fuel Cell	Molten Carbonate Fuel Cell	Solid Oxide Fuel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

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

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

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

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



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

### Brændselscellens fordele

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

høj virkningsgrad. Hvis det anvendte brændstof er ren brint, vil en brændselscelle kun udlede vand som spildprodukt, men da brint ikke findes frit i naturen, må det fremstilles ud fra enten kulbrinter (med CO<sub>2</sub>-udledning til følge) eller ved elektrolyse af vand (hvortil der skal anvendes elektricitet, der, hvis den er produceret på et sædvanligt kraftværk, også har givet anledning til CO<sub>2</sub>). Og hvis man anvender naturgas direkte som brændsel, vil der også produceres CO<sub>2</sub> fra cellen. Imidlertid er CO<sub>2</sub>-udslippet lavere pr. produceret kW sammenlignet med sædvanlige kraftværker. Temperaturen i brændselsceller er desuden lav sammenlignet med temperaturen i en flamme, hvorfor der ikke dannes nitrogenoxider (NO<sub>x</sub>), så brændselsceller forurener mindre. Sammenfattende kan brændselscellernes potentielle fordele siges at være

- høj virkningsgrad
- lav miljøbelastning
- ingen NO<sub>x</sub>
- mindre CO<sub>2</sub>
- lavt støjniveau (få roterende dele)
- modulær opbygning, dvs. at både store og små anlæg har omtrent samme pris pr. kW installeret effekt og samme brændselvirkningsgrad.

### Opdagelse og tidlig historie

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

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

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

### Lavtemperaturbrændselsceller

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

Men AFC har endnu ikke fået et kommercielt gennembrud. Det skyldes hovedsagelig, at den ikke tåler CO<sub>2</sub>. Det reagerer nemlig med OH<sup>-</sup> og danner CO<sub>3</sub><sup>-</sup>, hvorved elektrolytten ødelægges. Det er nødvendigt, at CO<sub>2</sub>-indholdet i såvel brinten som luften er helt nede på nogle få ppm (parts per million). Det er naturligvis ganske dyrt at fremstille så rene gasser. AFC har dog fået en nicheanvendelse, idet NASA anvendte dem på Apolloprogrammets bemandede flyvninger til Månen og anvender dem på rumfærgen i dag. Til disse anvendelser er prisen ikke afgørende, men effekten pr. kg samt manglen på spildprodukter fra cellen, der kører på ren brint: Vandet, som udledes fra cellen, anvendes til astronauternes forsyninger.

I 1960'erne og 1970'erne begyndte man at udvikle CO<sub>2</sub>-tolerante celler. Den ene type, protonudvekslingsmembran-cellen (PEMFC), har en protonledende ionbyttermembran som elektrolyt. Membranen er ganske dyr og skal for at fungere være mættet med vand, hvilket begrænser det anvendelige temperaturområde. Ved den relativt lave temperatur forgiftes platinkatalysatoren i cellens anode desuden af CO (carbonmonoxid), hvorfor man ikke kan anvende brint fremstillet ved omdannelse (reformering) af kulbrinter uden en fordyrende rensning. Alligevel foregår der i disse år et intensivt udviklingsarbejde på PEMFC, da man mener, at denne type vil være den mest velegnede til anvendelser i biler (se nedenfor). En variant af PEMFC, *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC), anvender metanol (træsprit) som brændsel uden forudgående reformering. Det flydende brændsel er let at håndtere, og denne type vil være velegnet som energikilde til mobiltelefoner, bærbare pc'ere og lignende, hvor dens kapacitet vil være væsentlig større end batteriers.

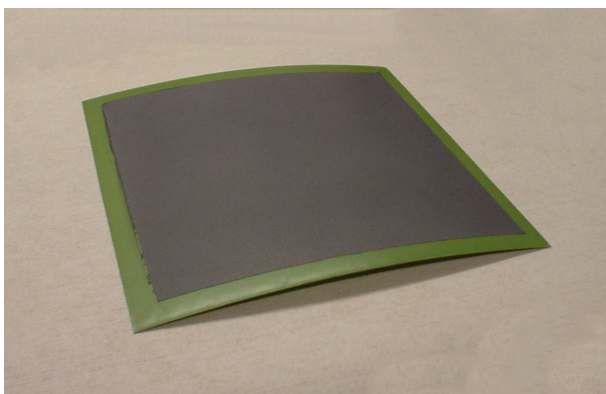
Den anden type er fosforsyrecellen, der var genstand for et stortilet udviklingsprogram i 1970'erne. Elektrolytten er fosforsyre ved 150-200 °C, der er CO<sub>2</sub>-afvisende. PAFC-systemer er kommercielt tilgængelige i dag og anvendes i bl.a. hospitaler, skoler og hoteller som selvstændig energiforsyning eller nødstrømsanlæg; et typisk anlæg er på et par hundrede kW. De spås dog ikke nogen bredere anvendelse.

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

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

### Højtemperaturbrændselsceller

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



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

I MCFC er det nødvendigt at tilføre CO<sub>2</sub> sammen med luften til katoden, idet det er CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>-ionen, som står for ladningstransporten. I tilfælde af, at man omsætter CH<sub>4</sub> i cellen, dannes der også CO<sub>2</sub>. Men det dannes ved anoden, hvilket betyder, at det er nødvendigt at udvinde CO<sub>2</sub> fra anodeudstødningen og tilsætte det til katodeindblæsningen. Den flydende saltsmelte mættet med O<sub>2</sub> og CO<sub>2</sub> i MCFC'en er uhyre korrosiv. Dette er det største problem for MCFC i dag, idet det begrænser cellens levetid. Men til trods for dette er der stadig udviklingsaktiviteter i gang for at få dem kommerciali-

seret, fortrinsvis anvendt i store, centrale kraftværker.

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

En SOFC fremstår som en tynd plade med et areal på f.eks. 15×15 cm<sup>2</sup>. Pladen er opbygget af en række tynde lag af keramiske materialer. Gennem de sidste 10 år har der været et intensivt udviklingsarbejde for at forbedre materialerne og billiggøre fremstillingsteknologien. Foreløbig er det lykkedes at reducere driftstemperaturen fra 1000 °C til ca. 700 °C, og man regner med, at det vil være muligt at få den endnu længere ned. Dette vil gøre det muligt at fremstille cellen med et bærende underlag af metal, hvilket vil mindske prisen betydeligt.

### Om virkningsgrader

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

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

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

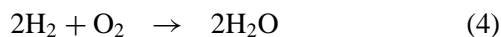
For maskiner, der er baseret på Carnots kredsproces, gælder, at

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

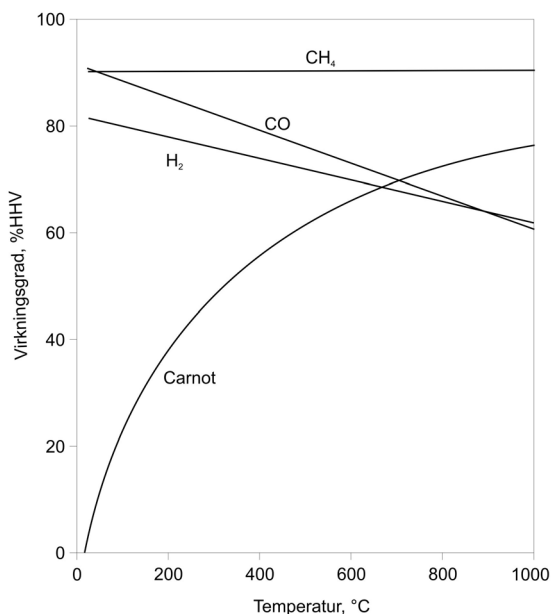
hvor  $T$  igen er driftstemperaturen og  $T_0$  er temperaturen i afgangsgassen (udstødningsgassen). Dette er

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

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



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



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

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

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

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

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

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

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

Spændingsvirkningsgraden  $\eta_v$  defineres som

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

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

Den faktiske virkningsgrad  $\eta$  er

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

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

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

## Anvendelser

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

<sup>1</sup>Mere præcist er  $R_i$  den *arealspecifikke* modstand med enheden ohm-meter<sup>2</sup>. Hvis cellens tværsnitsareal er  $A$ , er cellens modstand altså  $R_i/A$ , på samme måde som den samlede strøm gennem cellen er lig med  $jA$ .

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

### Mobile anvendelser

I mobiltelefoner og bærbare computere anvender man i dag batterier. De har forholdsvis kort levetid på hver opladning, og opladningen tager lang tid. I et brændselscellesystem kan energitætheden være op til 10 gange større end i et batteri, hvilket giver mulighed for en længere anvendelsestid. Man er ved at udvikle små DMFC-systemer, hvor genopfyldningen sker blot ved at udskifte en tømt metanolbeholder på f.eks. 25 cm<sup>3</sup>. Bl.a. Toshiba har i 2003 demonstreret sådanne systemer til bærbare computere.

### Transport

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

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

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

### Stationære anvendelser

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

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

### Energilagring

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

### Forskning og udvikling i Danmark

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

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

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

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



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



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