

Nu går tåget



Slutrappport från Mistras
bränslecellsprogram
September 2010

Nu går tåget

Nu går tåget. Sakta men säkert rullar det ut från stationen med ökande hastighet. Vi vet inte exakt vart det är på väg, men det rullar. Bränsleceller har börjat säljas på rent kommersiella villkor. Marknaden växer. 10 000-tals bränsleceller installeras som reservkraft till basstationer för mobiltelefoni, för drift av truckar för varuhantering och för hjälpkraft till husvagnar, lastbilar och båtar. Den verkligen stora marknaden finns runt hörnet: drift av personbilar. Bilindustrin har deklarerat att de skall tillverka 100 000 bränslecells-bilar per år redan 2015. På framsidan ser vi ett antal bränslecells-bilar, som samlats i Malmö för att köra över bron till den stora klimatkonferensen i Köpenhamn.

Är Sverige med på tåget? Mistras Bränslecellsprogram har hittills varit den biljett vi haft för att få åka med. Nu upphör programmet efter drygt 13 år och fortsättningen är oviss. En framväxande, konkurrensutsatt industri får svårt att klara sig utan organiserat FoU-stöd.

Men finns det liv finns det hopp. Och liv finns. Det nätverk som bildats av forskare och teknikutvecklare inom akademi och företag är villiga att satsa på en fortsättning och arbetar enträget tillsammans för att skapa ett nytt nationellt FoU-program. Med ett sådan skulle det momentum, som utvecklats i Mistras Bränslecellsprogram kunna växlas upp ytterligare.

INNEHÅLL

| | |
|---|-----------|
| 1 Inledning | 1 |
| 2 Varför bränsleceller? | 2 |
| 3 PEFC-bränslecellen 1997 och 2010 | 2 |
| 3.1 Teknik | 2 |
| 3.2 Marknad | 5 |
| 3.2.1 Bärbara tillämpningar | 5 |
| 3.2.2 Mobila tillämpningar | 6 |
| 3.2.3 Stationära tillämpningar | 11 |
| 3.2.4 Referenser | 11 |
| 3.3 Hållbar utveckling | 12 |
| 3.3.1 Referenser | 15 |
| 4 Samarbeten och samverkan | 16 |
| 4.1 Internationella projekt | 18 |
| 4.1.1 Automotive membrane | 18 |
| 4.1.2 Carisma | 18 |
| 4.1.3 New Macromolecular Architectures and Functions for Proton Conducting Fuel Cell Membranes | 18 |

| | |
|---|-----------|
| 5 Vetenskapliga resultat | 19 |
| 5.1 Membran | 19 |
| 5.1.1 Utveckling av nya membran | 20 |
| 5.1.2 Livstidsdiagnostik kopplad till membran-nedbrytning | 24 |
| 5.2 Elektroder | 27 |
| 5.3 Bipolära plattor | 30 |
| 5.4 Cell | 32 |
| 5.4.1 Cellutformning | 32 |
| 5.4.2 Membranelektrodenheten | 32 |
| 5.4.3 Elektroder | 33 |
| 5.4.4 Publikationer | 35 |
| 5.5 Stack | 41 |
| 5.5.1 Konstruktion | 41 |
| 5.5.2 Test | 42 |
| 5.6 Bränsleförsörjning och lagring | 43 |
| 5.6.1 Lagring i metall-organiska föreningar | 43 |
| 5.6.2 Lagring i metallhydrider | 43 |
| 5.6.3 Produktion | 46 |
| 5.6.4 Referenser | 46 |

| | |
|--|-----------|
| 6 Företag i Sverige i bränslecellsbranschen | 47 |
| 6.1 Materialleverantörer | 47 |
| 6.1.1 Outokumpu | 47 |
| 6.1.2 Sandvik | 48 |
| 6.1.3 Svenska Tanso | 48 |
| 6.1.4 Woxna Graphite/Tricorona/Timcal | 49 |
| 6.2 Komponenttillverkare | 49 |
| 6.2.1 Catator | 49 |
| 6.2.2 Höganäs | 49 |
| 6.2.3 Morphic technologies | 50 |
| 6.2.4 myFC | 50 |
| 6.2.5 Nolato | 51 |
| 6.2.6 Opcon | 52 |
| 6.3 Stack- och systemtillverkare | 52 |
| 6.3.1 ABB | 52 |
| 6.3.2 Cellkraft | 52 |
| 6.3.3 myFC | 52 |
| 6.3.4 PowerCell Sweden AB | 52 |
| 6.3.5 Volvo | 53 |

| | |
|--|-----------|
| 6.4 Infrastruktur | 54 |
| 6.4.1 Linde/AGA | 54 |
| 6.5 Användare | 54 |
| 6.5.1 Ericsson | 54 |
| 7 Tankar om framtiden | 55 |
| 8 Programfakta | 57 |
| 8.1 Programvärd | 57 |
| 8.2 Programstyrelse | 57 |
| 8.3 Programledning | 57 |
| 8.4 Budget | 57 |
| 8.5 Programmet i sammandrag sedan starten | 57 |
| 9 Tidigare publikationer i programmet | 58 |
| 9.1 Artiklar publicerade i vetenskapliga tidskrifter | 58 |
| 9.2 Proceedings och konferensbidrag | 61 |
| 9.3 Akademiska avhandlingar och rapporter | 63 |

Summary

Mistra's Fuel Cell Program has been running since 1997 and was closed June 30 2010. The program has been funded by Mistra (The Swedish Foundation for Strategic Environmental Research) with the amount of 124 million SEK and approximately the same amount has been invested by companies participating in the program. 14 companies and 5 universities have participated. The program goal has been to implement Swedish research, with strong traditions in electrochemistry, into environmentally benign fuel cells for transport, mobile and stationary applications.

A unique cooperation between the participants from academy and business is one of the results of the program. New and effective forms of cooperation have developed, where entrepreneurship, role identity, program design and timing have been important elements. 25 PhDs have graduated and 300 scientific articles have been published. Two new fuel cell companies have been started partly due to the program. The research has supported the development of new products and product concepts such as bipolar plates, electrode materials, polymer membranes and stacks. A fuel cell stack with world class performance has been designed and built. Ten inventions have been patented. The companies have produced and delivered material, components and a stack to the program. The companies have been important for identifying research issues.

Fuel cells are effective energy transformers with low or no emissions of greenhouse gases and other air pollutants. During 2008, there was a commercial breakthrough for fuel cells in two niche markets: forklifts for material handling and backup power for mobile phone base stations. Leading companies in the car industry have made a joint statement that they will have produced 100 000 fuel cell cars by

2015. This is an important statement, partly because it is as a power source for cars that the fuel cell has its major potential in terms of contributing to sustainable development, and partly because it highlights the need for intensified R&D.

The program has included research on polymer membranes, electrode materials, bipolar plates, cells and stacks.

Lund University of Technology has synthesized a number of different polymers and used them to make membranes. The focus has been to decrease the uptake of water to obtain mechanically stable membranes, to increase proton conductivity by introducing acid groups to the right positions in the polymer chains and to increase temperature resilience, so that the platinum in the catalyst may be replaced by other less scarce substances. Chalmers University of Technology has studied the degeneration of membranes in order to understand and characterize different causes of degrading fuel cell performance with time. Different laser spectroscopic methods have been used. In cooperation between Chalmers and KTH, a micro cell has been designed which allows Raman spectroscopic measurements during operation.

The Competence Centre for Catalysts (KCK) at Chalmers has developed different types of electrodes, which have been tested in cell tests by KTH. KCK has studied degradation of the electrode through oxidation of the carbon support for the platinum catalyst, and tried to find solutions to this problem.

KTH has acted as program host and had the overall responsibility for the fuel cell performance in all its parts. A method to evaluate new material for bipolar plates has been

developed together with the companies in the program. Experimental techniques and measurement methodology has been developed in order to characterize proton conductive polymers and membranes electrochemically for polymer electrolyte fuel cell applications. Research covers a broad research area ranging from polymer synthesis to electrochemical characterization of electrodes and membranes. A new production method for membrane/ electrode assemblies has been developed. A measurement system for studying current distribution has been built and used to verify a PEFC model. A large number of studies have been conducted and generated increased knowledge on fuel cell processes and performance.

The program has made a footprint in the participating organisations in the sense that research institutions have changed their direction of research and teaching and in the sense that new companies have been started and existing companies developed new products. Several companies are prepared to engage economically in a new Swedish fuel cell centre.

The program board, management and scientists have lately been actively engaged in disseminating knowledge about fuel cell opportunities in Sweden. The goal has been to clarify to authorities and business how important it is to start a new national research program. An outline of a national fuel cell centre has been made and discussed with representatives for authorities, companies and universities. Such a centre will be able to maintain and develop the network created by the Mistra Fuel Cell Program.

Fuel cells are one part of a future complex energy system. The technology needs investments in research, development and demonstration. Sweden needs competence within the area and the jobs it creates.

Sammanfattning

Mistras Bränslecellsprogram har pågått sedan 1997 och avslutades vid halvårsskiftet 2010. Mistra (Stiftelsen för miljöstrategisk forskning) har bidragit med 124 miljoner kronor och de engagerade företagen med lika mycket. 14 företag och fem högskolor/universitet har deltagit. Det övergripande målet med programmet har varit att svensk forskning, med en stark tradition inom elektrokemi, ska omsättas i miljöanpassade bränsleceller för fordon, bärbara apparater och utrustning för stationär energiproduktion.

Programmet har resulterat i ett unikt samarbete mellan parterna från akademi och näringsliv. Nya effektiva samarbetsformer har tillämpats, där entreprenörskap, rollfördelning, programdesign och timing varit viktiga element. 25 doktorer har utexaminerats och 300 vetenskapliga artiklar publicerats. Två nya bränslecells företag har startats, delvis på grund av programmet. Forskningen har stött utvecklandet av nya produkter och produktkoncept såsom bipolära plattor, elektrodmaterial, polymermembran och stackar. En bränslecellsstack har tagits fram med prestanda i världsklass. Tio uppfinningar har patenterats. Företagen har tagit fram och levererat material, komponenter och en stack till programmet. Företagen har varit viktiga kravställare för forskningsinriktningen.

Bränsleceller är effektiva energiomvandlare med låga eller inga utsläpp av växthusgaser och andra luftföroreningar. Under 2008 skedde ett kommersiellt genombrott för bränslecellerna i två nischmarknader: truckar för varuhantering och reservkraft för mobiltelefonstationer. Ledande företag inom bilindustrin har sagt att de år 2015 skall ha tillverkat 100 000 bränslecells bilar. Detta är ett viktigt uttalande, dels för att det är som drivkälla för bilar,

som bränslecellen har sin stora potential att bidra till hållbar utveckling, dels för att det visar på behovet av intensifierad FoU och utbildning.

Programmet har bedrivit forskning på polymermembran, elektrodmaterial, bipolära plattor, celler och stackar.

LTH har syntetiserat ett antal olika polymerer och tillverkat membran. Ambitionen har varit att minska vattenupptaget för att få mekaniskt stabila membran och öka protonledningsförmågan genom att införa syragrupper på rätt plats i polymerkedjorna, samt att öka temperaturlågheten så att platinan i elektroderna kan bytas mot andra mindre sällsynta material. Chalmers har studerat nedbrytningen av membranerna och arbetat på att förstå och kunna diagnostisera olika anledningar till att bränslecellers prestanda försämras med tiden. Olika laserspektroskopiska metoder har använts. En bränslecell i miniformat som tillåter Ramanmätningar under drift har konstruerats i samarbete med TEK/ KTH.

Kompetenscentrum för katalys på Chalmers (KCK) har tillverkat olika elektroder, som sedan testats av KTH i celltester. KCK har även studerat nedbrytning av elektroden genom oxidationen av det kol, som platinakatalysatorn är fastsatt på och sökt lösningar på detta problem.

KTH har varit programvärd och haft det övergripande forskningsansvaret för hur bränslecellen fungerar med alla sina delar. Man har i samarbete med företagen i programmet tagit fram en enhetlig metodik för att utvärdera nya material till bipolära plattor, avsedd att användas av både användare och slutproducenter. Experimentella tekniker och mätmetodik utvecklats för att elektrokemiskt karakterisera

protonledande polymerer och membran för användning i polymerelektrolytbränsleceller. Arbetet omfattar ett brett forskningsområde som sträcker sig från polymersyntes till elektrokemisk karakterisering av elektroder och membran. En produktionslina för tillverkning av membran/elektrodpaket (MEA) har utvecklats. Ett mätsystem för att studera strömfördelning i en bränslecell har utvecklats och använts för att verifiera en matematisk modell. Ett stort antal studier har genomförts och genererat ökad kunskap om olika processer i bränslecellen.

Programmets genomförande har inneburit en ändrad forskningsinriktning i de deltagande institutionerna. Ny kompetens, som genererat ny forskning och utbildning, har byggts upp. Programmet har också resulterat i att nya företag skapats och att befintliga företag positionerat sig i bränslecellsbranschen. Flera företag är beredda att engagera sig ekonomiskt i ett nytt svenskt bränslecellscentrum.

Under det senaste året har programmets styrelse, ledning och forskare arbetat mycket med att sprida kunskap om bränslecellernas möjligheter i Sverige. Målet är att tydliggöra för myndigheter och näringsliv vikten av och värdet i ett nytt nationellt FoU-program. En skiss till ett nationellt bränslecellscentrum har utarbetats och diskuterats med representanter för Näringsdepartementet, Energimyndigheten, Vinnova, tekniska högskolor och företag. Ett sådant centrum kan vårda och utveckla det nätverk som skapats.

Bränsleceller är en del i ett framtida komplext energisystem. Området behöver sina satsningar på forskning, utveckling och demonstration. Sverige behöver kompetens inom området och de arbetstillfällen som bränslecellsteknologin skapar.

Förkortningar

| | |
|----------------|---|
| AFM | Atomic force microscopy, användning av instrument som ”känner” av strukturer i nano-skala i en yta med hjälp av en liten nål |
| APU | Auxillary Power Unit , hjälpkraftaggregat |
| Chalmers | Chalmers Tekniska Högskola |
| confocal Raman | mikrometerupplöst spektroskopisk analysmetod för kemisk sammansättning |
| EQCM | Electrochemical Quartz Crystal Microbalance, våg för mycket små vikter |
| IPHE | International Partnership for Hydrogen Economy |
| IR | Spektroskopisk ljusabsorbtiosteknik känslig för kemisk sammansättning |
| KCK | Kompetenscentrum Katalys |
| KTH | Kungliga Tekniska Högskolan |
| LTH | Lunds Tekniska Högskola |
| MEA | Membrane Electrode Assembly |
| Mistra | Stiftelsen för miljöstrategisk forskning |
| PEFC | Polymer Electrolyte Fuel Cell |
| PEMFC | Proton Exchange Membrane Fuel Cell , annan beteckning på PEFC. |
| SEM | Scanning Electron Microscope |
| SOFC | Solid oxide fuel cell |
| TEK | Avd för Tillämpad Elektrokemi på KTH |
| TEM | Transmission Electron Microscope |
| UAV | Unmanned Aerial Vehicles, små, förarlösa flygplan |
| XPS | X-ray Photoelectron Spectroscopy, instrumentell metod för att analysera en ytas kemiska sammansättning genom bestrålning med röntgenstrålar och detektion av frigjorda elektroner |
| XRD | X-Ray Diffraction, användning av röntgenstrålars diffraktion för att kartlägga kristallstrukturer |

1 Inledning

Mistras bränslecellsprogram har genomförts i tre etapper. Den första etappen startade 1997 och avslutades 2001. Den kallade vi ”batterier och bränsleceller för en bättre miljö”. Syftet var att stärka den elektrokemiska forskningen och utveckla svensk industri. Forskning bedrevs på litium-polymerbatterier, nickel-metallhydridbatterier och på polymermembranbränsleceller. I slutet av perioden tvingades den svenska tillverkaren av nickel-metallhydridbatterier att lägga ner verksamheten och litium-polymerbatterier blev kommersiellt tillgängliga från Japan. Programmet stod därmed inför en situation, där Sverige hade en relativt väletablerad batteriforskning men ingen industri i sikte och en mindre väletablerad bränslecellsforskning med en möjlig framtida industri. Samtidigt begränsades volymen på forskningsprogrammen i Mistra. Vi tog då beslutet att satsa enbart på bränsleceller och programmet kom så småningom att heta ”Mistras bränslecellsprogram”.

Så som det ser ut idag var beslutet att satsa på bränsleceller rätt. En bränslecellsindustri har kunnat växa fram i Sverige med stöd av Mistras bränslecellsprogram. Det hade förmodligen också varit meningsfullt att satsa på batteriforskning, givet det stora intresse som finns idag för hybridfordon, men med de begränsade medel som stod till förfogande, var det knappast meningsfullt att splittra insatserna. Man kan dessutom förmoda att ett uteblivet stöd till bränslecellsforskningen hade fått större negativa konsekvenser än det uteblivna stödet till batteriforskningen.

När vi nu avslutar den tredje etappen den 30 juni 2010, kan vi glädja oss att ha fått vara med om att mycket av de kunskaper som genererats omsatts i industriell verksamhet. Embryon till ytterligare produkter finns. Denna slutrapport från Mistras bränslecellsprogram informerar om forskningen på och utvecklingen av polymerbränsleceller. 13 år är en lång tid och mycket har hänt sedan starten. Egentligen är inte det som hänt särskilt oväntat. De prestandaförbättringar som man hoppats på har i stort sett skett. Om detta fortsätter kommer bränsleceller att vara en självklar del av vardagen om ytterligare 13 år.

2 Varför bränsleceller?

Ett framtida uthålligt energisystem kommer med all sannolikhet att bli komplext och innehålla flera olika teknologier. Bränsleceller är en av kandidaterna till att ingå i ett sådant system. Anledningen är att bränsleceller är effektiva energiomvandlare med låga eller inga utsläpp av växthusgaser och andra luftföroreningar. Jämfört med förbränningsmotorn, vars effektivitet fundamentalt begränsas av den s.k. Carnotcykeln, kan en bränslecell få betydligt högre verkningsgrad. Speciellt inom transportsområdet skulle bränsleceller kunna få stor effekt genom att ersätta förbränningsmotorn.

Många inom fordonsindustrin planerar använda bränsleceller för framdrift. För att understryka det skrev den 9 september 2009 nästan alla stora biltillverkare i världen på ett "Letter of Understanding" i vilket man "strongly

anticipate" marknadsintroduktionen av några hundratusen elfordon med bränsleceller fr.o.m. 2015. Vissa, t.ex. KIA kommer under 2012 att marknadsintroducera sina FCVs tidigare. De biltillverkare som skrev på är: Daimler AG, Ford Motor Company, General Motors Corporation/ Opel, Honda Motor Co. Ltd., Hyundai Motor Company/ Kia Motor Corporation, The Alliance Renault SA and Nissan Motor Co., Ltd. och Toyota Motor Corporation. Bränsleceller har också en potential att inom de kommande 5-10 åren bli en ledande teknik för lokal och småskalig elproduktion. Det skulle möjliggöra ett mer robust energisystem och effektiv användning av lokala energiresurser, som t ex biogas från lantbruk.

Många gör också bedömningen att fluktuerande energi-flöden från vindkraft och solkraft kan lagras i form av vätgas för att sedan användas i bränsleceller för att producera el. Speciellt intressant är det om mycket elenergi ska lagras under lång tid. Vätgas kan förvaras trycksatt i stora berggrum på samma sätt som vi idag lagrar naturgas.

3 PEFC-bränslecellen 1997 och 2010

3.1 Teknik

Magnus Karlström, Vätgas Sverige

Under slutet av 90-talet, när programmet startade, skedde en stark utveckling av portabel elektronik, som krävde bättre batterier. Det fanns också ett behov att minska lokala emissioner från fordonstrafik. Det pågick en diskussion om klimathotet, men den var inte på löpsedlarna i samma uträkning som nu. Fordonsindustrin hade upplevt misslyckade försök att införa elbilar, delvis pga undermåliga batterier. Försöken att införa elfordon med enbart batterier berodde mycket på California Air Resource

Board (CARB) och dess krav att införa nollemissionsfordon. Nickelmetallhydridbatterier kunde inte ersätta nickel-kadmiumbatterier i högeffektstillämpningar. Litiumjonbatterier började användas för portabel elektronik, men kom inte att användas för fordon.

Bränsleceller kom fram som ett alternativ till batterier i fordon under 90-talet. 1989 utvecklades tunnfilmselektroder på Los Alamos National Laboratory i USA. Det gjorde att mängden platina som behövdes för en polymer elektrolytbränslecell minskade till en tiondel. Det ökade sannolikheten att bränsleceller skulle kunna bli tillräckligt kostnadseffektiva. Några få fordonstillverkare började undersöka bränsleceller

i början av 90-talet. Daimler-Benz visade upp två fordon med bränsleceller 1994 (Necar I) och 1996 (Necar II). Runt 1997 satte Daimler-Benz upp ett ambitiöst bränslecellsutvecklingsprogram. Daimler-Benz investerade 700 miljoner US\$ i Ballard och gick ut med uttalande att de skulle kommersialisera elfordon med bränsleceller 2004. Ford gick i en allians med Daimler i december 1997. Ford gick in med 400 miljoner US\$ i Ballard. Efter det följde flera andra personbilstillverkare. Runt 2000 hade de flesta bilföretagen ambitiösa bränslecellsprogram. Flera av bilföretagen forskade och utvecklade reformeringsteknik som skulle vara lämplig att använda ombord på fordonen. Metanol, bensin eller vätgas diskuterades som bränsle till elfordon med bränsleceller. Några av bilföretagen påstod att de skulle kunna massproducera personbilar 2003.

Runt 2000 var effektdensitet för en bränslecellstack acceptabel, men det fanns flera problem kvar att lösa:

- Kostnaden var fortfarande för hög. Även vid massproduktion skulle det vara för dyrt med bränsleceller i fordon
- Drift under noll grader var ej möjligt.
- Bränslecellssystemen hade för kort livslängd
- Bränslecellssystemen var för komplicerade och hade för många komponenter.

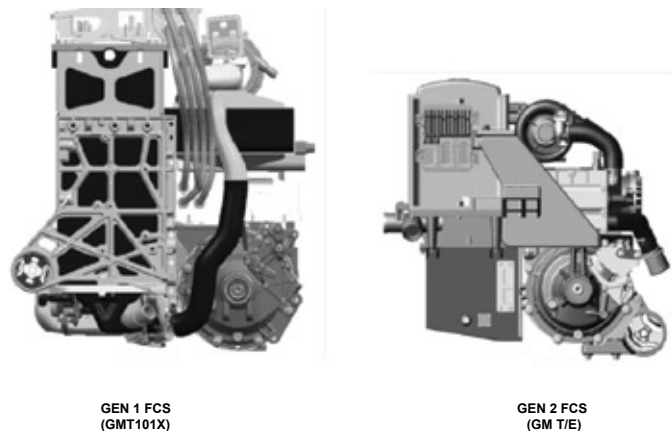
Utvecklingen av bränsleceller fortsatte under 2000-talet. Men med introduktionen av Toyota Prius 1997 ökade fordonsföretagens fokus på hybrider. I slutet av 2000-talets första årtionde kom elfordon med batterier tillbaka och även laddhybrider diskuterades mer och mer.

I dagsläget letar mobiltelefon- och datortillverkare efter bättre alternativ än litiumjonbatterier. Bränsleceller skulle kunna vara ett alternativ. Fordonsindustrin hybridiserar, och satsar tillsammans med energibolagen på laddhybrider (PHEV) och batterielbilar (BEV). Men fordonstillverkarna upplever att batterier och batterikunskapen är den svaga länken. Alla handverktyg använder litiumjonbatterier,

men Toyota Prius använder fortfarande effektoptimerade nickelmetallhydridbatterier. Bilföretagen har övergivit ombordreformering av bränslen till vätgas. Däremot är reformering aktuellt när bränslecellssystemet ska användas som hjälpkraftsystem. ”Smart grids” behöver lokala effektbuffer och ger möjlighet till småskalig kraftvärme produktion där både batterier och bränsleceller skulle kunna passa in. Numera är policyfokus mer att minska de globala utsläppen av växthusgaser än att minska de lokala utsläppen.

Den tekniska statusen för polymelektrolytbränslecellen karakteriseras av att:

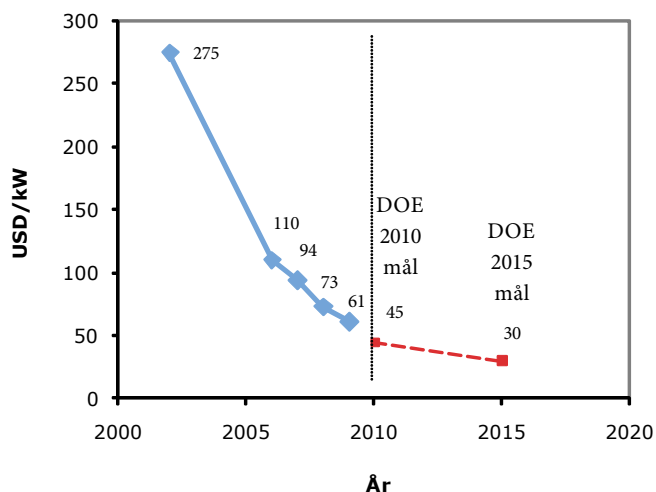
- Fortfarande används ”Nafion” i membranen och platina som katalysator
- Numera är livslängden över 10 000 timmar under vissa förutsättningar
- Platinaanvändningen är kring 0,2 g/kW
- Membrantjocklek är under 10 μm
- Effekttätheter är på över 2 kW/dm³ för en stack



Figur 1 Bild på den nuvarande generationen bränslecellssystem och nästa generation från General Motors.

De flesta fordon med bränsleceller är numera hybridiserade, dvs. eldrift, där elen genereras av bränsleceller och där batterier lagrar och levererar el vid behov. Komprimerad vätgas med trycket 700 bar är standard och personbilarna har en räckvidd på mellan 400-800 km, beroende på hur mycket vätgas de har ombord. Sedan 2003 har de varit möjligt att starta under 0 grader. Flera fordon med bränsleceller kan numera starta när det är -30 grader. Fokus ökar på att förbättra alla andra komponenter än själva stacken

Bränsleceller är fortfarande dyra. En av orsakerna till den höga kostnaden är att bränsleceller inte massproduceras. Department of Energy gör kontinuerligt en utvärdering vad kostnaden skulle vara för ett bränslecellssystem med ett visst års teknik om de massproducerades i storleksordningen 500 000 system/år. I figur 2 visas hur utvecklingen har varit 2003 fram till 2009.



Figur 2 Kostnad (US\$/kW) för ett bränslecellssystem till en personbil vid produktion av 500 000 system/år.

I framtiden kommer fordon och konsumentelektronikindustrin vara drivande för att utveckla ny teknik. I fordonssektorn kommer hybridisering med batterier sänka energiförbrukningen för alla typer av fordon. Och det kommer ske en hybridisering av allt fler fordon. Ren batteridrift för alla fordon är däremot vare sig tekniskt eller ekonomiskt möjligt idag. Därför kommer det finnas ett behov av en ”primär” energiomvandlare på i de flesta fordon. Vätgas och bränsleceller ger möjlighet att effektivt paketera el i fordon för att få större räckvidd. Storskalig introduktion av bränsleceller i fordon ligger fortfarande fem år framåt i tiden. Innan dess ser vi en successiv kommersiell introduktion av bränsleceller för andra applikationer. Applikationer i närtid är back-up kraft, gaffeltruckar, bussar, men även batteriladdare till portabla applikationer.

Det finns fortfarande tekniska och institutionella problem kvar att lösas innan vi får en storskalig introduktion av bränsleceller.

Tekniska utmaningar är:

- Bränslecellskostnader
- Livslängd.

Institutionella och ekonomiska utmaningar är:

- Standards
- Tillräckligt stor leverantörsbas
- Acceptans hos kunder
- Utbyggnad av bränsleinfrastruktur.

För att hantera utmaningarna är det viktigt att forskningen får fortsätta så att det ska bli möjligt att ta bränsleceller till en storskalig introduktion.

3.2 Marknad

Världsmarknaden för bränsleceller uppskattas växa markant från US\$ 2.5 miljarder år 2011, till US\$ 8.5 miljarder år 2016.

Därför satsar många länder stora belopp på bränslecells FoU. Det statliga stödet till utveckling av bränsleceller var under 2008 i USA 350 MUS\$, i Japan 310 MUS\$, i Tyskland 170 MUS\$ och i EU 100 MUS\$. I Sverige var de statliga satsningarna betydligt blygsammare, runt 1 MUS\$, men i samarbete med företagen har det ändå skett en hel del.

1997 bestod marknaden för bränsleceller av det, som behövdes till alla utvecklings- och demonstrationsprojekt. Man hade identifierat ett antal potentiella marknader, vilket i stort sett är desamma som vi arbetar med idag. Men först 2008 skedde det kommersiella genombrottet för bränslecellerna. Då såldes de första systemen på rent kommersiella grunder. Under 2009 ökade försäljningen, men ökningstakten påverkades tydligt av den ekonomiska krisen, både i positiv och i negativ bemärkelse. Positivt genom alla stödåtgärder till ny teknik och negativt av den allmänna återhållsamheten.

Man brukar dela in marknaden för bränsleceller i tre segment: bärbara, mobila och stationära bränsleceller. Avgörande för den långsiktiga marknadsgenomslaget är förstås vilken framtida kostnad och vilka prestanda som kan uppnås, och hur konkurrerande teknikslag utvecklas. Marknadsutvecklingen på kort sikt (upp till 10 år) analyseras varje år av Fuel Cell Today (FCT) från vars hemsida (www.fuelcelltoday.com) detaljerade rapporter kan laddas ner. Nedan följer en sammanställning av vilka och hur stora de olika marknaderna är idag, samt några tankar om de mer långsiktiga förutsättningarna.

3.2.1 Bärbara tillämpningar

Bränsleceller lämpar sig väl för strömförsörjning av konsumentelektronik. Tillverkare av mobiltelefoner och bärbara datorer önskar sig större kapacitet än vad batterier kan ge. Man vill kunna ge produkterna ännu mera funktioner. Under 2008 såldes cirka 9 000 bränslecellsenheter, mest för leksaker och militära ändamål (FuelCellToday 2010). Under de närmaste åren förväntas försäljningen av laddare för batterier till mobiltelefoner, laptops mm, ta fart.

Bränsleceller för direkt drift av konsumentelektronik dröjer förmodligen ytterligare en tid.

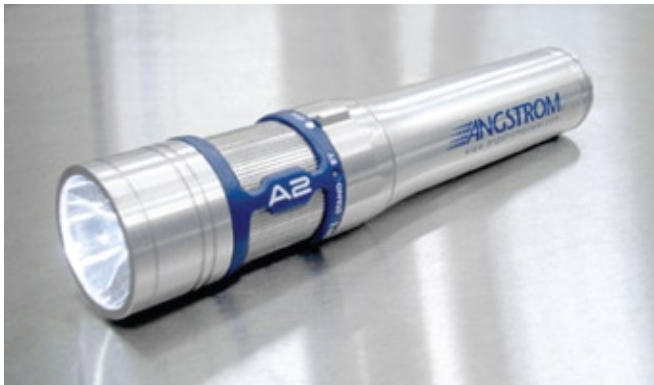
Som nischmarknad för bränslecellsteknologin är de bärbara tillämpningarna viktiga. De har stor spridning och kommer att avmystifiera bränslecellerna. Tillverkare av konsumentelektronik är vana vid stora serier och korta produktutvecklingscykler, så förutsättningen finns för ett stort marknadsgenombrott de närmaste åren. I figur 3-5 ges några exempel på sådana tillämpningar.



Figur 3 Mobiltelefonladdare från myFC.



Figur 4 Bränslecellsdriven laptop från Samsung.



Figur 5 Bränslecellsdriven ficklampa från Angstrom.

Alternativet till bränsleceller som batteriladdare är större batterier och kombinationen solceller/batterier. Sådana finns redan idag att köpa. På sikt torde emellertid bränslecellernas mindre vikt och volym och oberoendet av solljus (Det kan vara svårt för en jäktad nutidsmänniska på resa lägga ut sin laddare i ljuset) att skapa en nisch för bränslecellerna. Möjligen kan de också bli billigare. En annan fördel gentemot batterierna är att de inte laddar ur. För elektronik som används sällan är detta en viktig egenskap.

3.2.2 Mobila tillämpningar

Marknaden för mobila tillämpningar kan delas in i ytterligare sektorer: lätta fordon, nischapplikationer och infrastruktur.

Den största potentiella marknaden för bränsleceller är för fordonsdrift. Alla de stora tillverkarna bygger prototyper av bränslecells-bilar. Längst verkar Honda med sin Honda FCX och GM med sin Equinox ha kommit. När man loggar in på Hondas hemsida, erbjuds man en rad bilmodeller att välja mellan, däribland en FCX-modell, en bränslecells-bil (figur 6). Den har en egen design och säljs i en mindre serie. Under förra året gick ett stort antal bilföretag ut och deklarerade gemensamt att man 2015 skulle producera ”några hundra tusen bilar”. Sådana mål har satts upp tidigare av bilindustrin, men inte kunnat fullföljas, men uttalandet signalerar ändå en vilja att satsa på bränslecellstekniken trots finanskriser och andra problem. Det verkar finnas en strategi att pröva alla olika typer av elektriska drivlinor, från konventionella hybridbilar, till plug-in hybrider och rena batteri eller bränslecells-bilar. I ljuset av behovet av att ersätta fossila bränslen med något mera hållbart, och allvaret i situationen, vore det politiskt oansvarigt att inte pröva alla möjliga vägar till en uthållig transportteknologi. Bränsleceller är en av många olika teknologier som kräver fortsatt FUD. Det finns knappast något annat sätt att testa en teknologi än att införa den fullskaligt. Teknik kan man testa i prototyper och enstaka serier, men en teknologi fordrar att i stort sett alla samhällsfunktioner är inblandade.

Under 2008 producerades det 140 bränslecells-bilar och under 2009 ungefär 180 enheter (FCT 2010). Detta är en försvinnande del av den totala produktionen av personbilar, som ligger på drygt 50 milj bilar/år.

En sak som talar för bränsleceller som ett realistiskt alternativ för framdrivning av bilar är faktisk kostnadsbilden. Idag är det ett av hindren för att bränslecellerna skall kunna etablera sig, men om man antar att kostnaden för en



Figur 6 Hondas bränslecellsbil: Honda FCX.

Foto: Michael Jensen mj@world-photo.dk

bränslecellsstack i volymproduktion ligger i paritet med den för serietillverkade batterier, (de består båda av ett antal celler, som måste tillverkas och sättas samman med hög precision), och att man behöver en femtedel till en tiondel så stor bränslecellstack som batteripack, finns där en kostnadsfördel gentemot batterierna. En bränslecellsstack är dessutom mycket enklare än en konventionell förbränningsmotor om man ser till antalet komponenter. Naturligtvis kompliceras bilden av den kringutrustning, som skall till och av driftskostnadsbild. Kringutrustningen till en bränslecellsstack består av reglerelektronik samt anordningar för hantering av vatten, vätgas och luft och en

vätgastank, alternativt en reformer för reformering av t.ex. biobränsle, men kostnaden för dessa komponenter torde inte nämnvärt ändra bilden. Om bränslecellen drivs med komprimerad vätgas framställd med elektrolys, kommer driften att bli dyrare än batteridrift. Av det skälet talas ofta om hybridfordon, där bränsleceller på sikt ersätter de nuvarande förbränningsmotorerna. Avvägningen av hur mycket batterier och hur stor bränslecell kan göras efterhand som kostnadsbilderna klarnar. Om bränslecellerna drivs med biobränslen via reformers, är det inte självklart att driftkostnaden blir lägre med batterier.



Figur 7 Gaffeltruck med bränslecell från Powercell.

Det framtida elpriset och oljepriset kommer också ha en stor betydelse för bränslecellen som alternativ för framdrivning av bilar. Maxpriset för olja före finanskrisen låg på 140 \$/fat. Därefter sjönk det på tre månader till 50 dollar per fat. I en mycket läst artikel av Nashawi et al (2010) rapporteras resultatet av en ny typ av modellering, som tyder på att världens oljeproduktion kommer att nå sitt maximum 2014, och arabländerna sitt maximum 2026. Därefter sjunker produktionen snabbt. Påverkan på drivmedelspriserna blir antagligen kraftig, bl.a därför att det inte går att bygga ut kapaciteten för alternativen tillräckligt snabbt.

Vad gäller nischapplikationer i den mobila sektorn, är det främst för drift av truckar vid varuhantering, APU (Auxillary Power Units) och s.k. UAV (Unmanned Aerial Vehicles) som bränsleceller har levererats, men även andra nischapplikationer kan bli aktuella såsom lastmaskiner, t.ex. gruvlastmaskiner. APU-leveranserna står för den helt dominerande delen, medan bränsleceller till truckar har ökat mest det senaste året (FCT 2010) (figur 7). Den tidiga marknaden för mobila hjälpkraftsaggregat inriktas främst mot husvagnar, fritidsstugor och båtar. På sikt hoppas tillverkarna på att tunga lastbilar skall utrustas med APUs för att spara bränsle och öka komforten. Idag går många tunga lastbilar på tomgång när de står stilla för att driva luftkonditionering, TV, mm. I Sverige tillverkas APUs av Powercell.

På sikt finns även andra intressanta applikationer, såsom drift av trädgårdsredskap och verktyg av olika slag. Att ha en förbränningsmotor gående för sågen, trimmern eller gräsklipparen förtar en stor del av nöjet i trädgården och är dessutom störande för grannarna. Med en bränslecell kan man höra fågelsången igen.

Marknadspotentialen för dessa nischapplikationer antyds av följande siffror: Det produceras ungefär 2,2 miljoner tunga lastbilar per år i världen och 800 000 utombordare till båtar (Yamaha 2010). Det finns 237 000 registrerade husvagnar



Figur 8 Bränslecellsdriven scooter från Honda.



Figur 9 Segelbåt utrustad med hjälpkraft från bränslecell.

bara i Sverige och över en miljon trädgårdsentusiaster. De främsta konkurrenterna till bränslecellen för drift av tunga fordon är dieseldrift. För drift av lätta fordon är det plug-in-hybrider med bibränsle drivna förbränningsmotorer som komplement.

Marknaden för infrastruktur inbegriper främst tankstationer för vätgas. De kan vara av ”mack-typ” för flera användare eller för ”hemmabruk” för en användare. Två tekniska

landvinningar på senare år har förbättrat de långsiktiga marknadsförutsättningarna: den ökade verkningsgraden för elektrolysörer (80-90% kan uppnås) och möjligheten att nå mycket höga tryck utan kompressorer. Det borde öppna upp för enklare och mera utspridda tankningsmöjligheter eller kanske till och med för att bygga in elektrolysörer i fordon. En vätgastankstation visas i figur 10. En elektrolysör från Morphics dotterbolag AccaGen S.A. visas i figur 11. Vätgasproduktion genom elektrolys har den fördelen



Figur 10 Tankstation för vätgas.

att kapacitetsutnyttjandet lätt kan varieras och små anläggningar kan tillverkas för produktion i ex.vis bostadskvarter. Nackdelen är ett starkt elprisberoende samt att de elektrolysörer som tillverkas idag har relativt låg kapacitet jämfört med anläggningar för ångreforming ($> 100\,000\text{ m}^3\text{ H}_2/\text{h}$). Ångreforming av lätta kolväten är idag också den billigaste produktionsmetoden. De största elektrolysörer som produceras idag har en kapacitet på ca 380 ton $\text{H}_2/\text{år}$ och kräver en eleffekt på 2,3 MW. Den producerade vätgasen räcker för att försörja 1900 - 2000 fordon med en årlig körsträcka på ca 20 000 km per fordon.

Dagens elektrolysörer exkl. hjälpsystem har en verkningsgrad över 80% och strax över 70% för en komplett produktionsenhet inklusive hjälpsystem. El och kapital är de absolut största kostnadsposterna. För en liten kvartersanläggning med en kapacitet på 20 kg H_2/dag är kapitalkostnaden över 70% och elkostnaden strax över 15%. För anläggningar med kapaciteter på 100 resp. 1 000 kg H_2/dag sjunker den relativa kapitaldelen till 55 resp. strax över 30% samtidigt som elkostnadsandelen ökar till 35 resp. 60% .



Figur 11 Elektrolysör från Morphics dotterbolag AccaGen. Vätgas med upp till 200 bar kan genereras utan kompressorer.

3.2.3 Stationära tillämpningar

Man brukar skilja på små enheter under 10 kW och större över 10 kW. De mindre används för kombinerad värme och elproduktion i hus eller som reservkraftaggregat till basstationer för mobiltelefonnät. Under 2008 såldes 4 000 enheter för dessa ändamål (FuelCellToday 2010). 1/3 drivs med vätgas, 1/3 med naturgas och 1/3 med annat bränsle. Marknadsförutsättningarna för bränsleceller som producerar el från biogas anses goda.

Antalet basstationer i världen är ungefär 5 miljoner. Idag utgörs reservkraften främst av dieselmotordrivna generatorer. De kräver kontinuerligt underhåll och stölder av motorer och bränsle är vanliga. Indiska telekombolag har gjort stora beställningar av bränslecellsbaseade back-up-stationer. Svenska Cellkraft tillverkar bränsleceller för detta ändamål.

Idag är mer än 2,1 miljarder människor i 425 miljoner hushåll utan elanslutning (Global Network Institute 2010). Sol och vindkraft kan generera elektricitet under vissa perioder och i kombination med elektrolysörer och bränsleceller kan de även generera el när det är mörkt, resp vindstilla.

3.2.4 Referenser

FuelCellToday, 2010, www.fuelcelltoday.com

Global Energy Network Institute, Electricity for all, targets, timetables, instruments, www.geni.org/globalenergy/library/media_coverage/electricite-de-france/electricity-for-all--targets-timetables-instruments.shtml

Yamaha, 2010, www.yamaha-motor.co.jp/global/news/2000/06/06/outboard.html

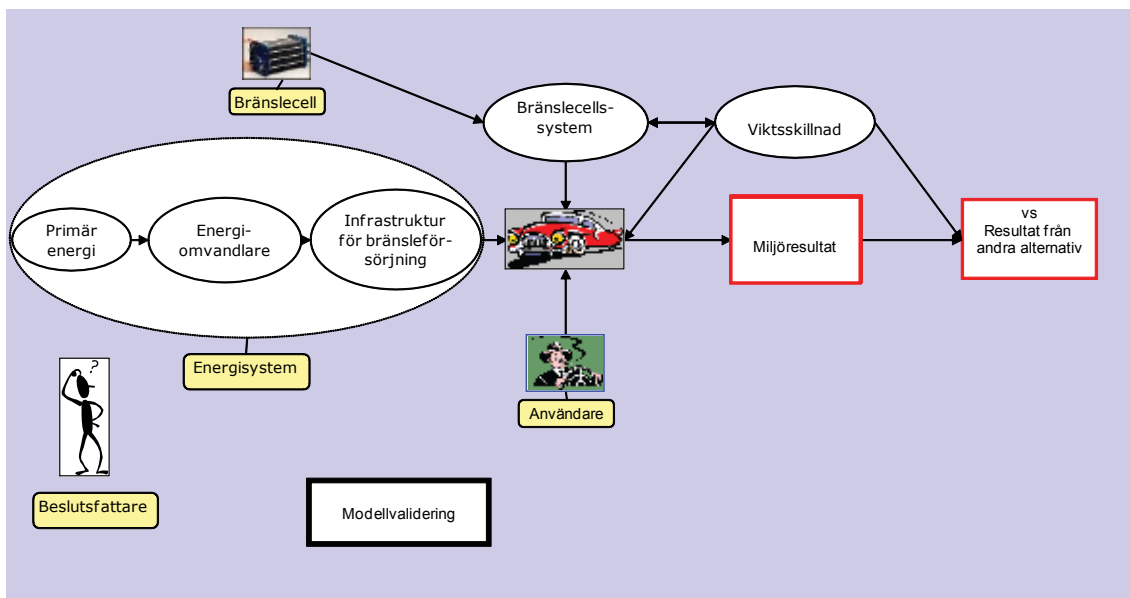
Ibrahim Sami Nashawi, Adel Malallah, and Mohammed Al-Bisharah, Forecasting World Crude Oil Production Using Multicyclic Hubbert Model, Energy & Fuels 2010, 24, 1788–1800

3.3 Hållbar utveckling

Ett av de tyngsta skälen till införandet av bränslecellsteknik är att minska miljöpåverkan och bidra till en hållbar utveckling. Den största effekten får man genom att ersätta förbränningsmotorer med bränsleceller. Programmet har genomfört flera projekt med syfte att bedöma hur miljön och hållbarheten ändras med införandet av bränsleceller och funnit att det finns goda förutsättningar till en förbättring, men att det beror på en rad faktorer hur stor förbättringen blir.

När programmet startade 1997 gjordes en allmän bedömning av att bränslecellerna hade stora miljöfördelar. Genom att emissionerna från bränslecellen enbart består av vattenånga, skulle de lokala luftföroreningarna från trafiken minska kraftigt. Vi insåg emellertid att vi behövde undersöka miljöpåverkan i ett livscykelperspektiv, där även bränsletillverkning och skrotning beaktades.

Det finns en mängd olika tillämpningar för bränsleceller och därmed en mängd olika teknikval att bedöma. I några fall ersätter bränslecellerna batterier, i andra fall förbränningsprocesser. Man kan också tänka sig att bränsleceller kommer att få nya tillämpningar, där det inte finns något gammalt att jämföra med. För varje tillämpning finns också ett antal scenarier, som kan vara av intresse. Ofta ser man miljöanalyser av prototyper, men det som är mest intressant när det gäller att bedöma ny teknik är ju ett scenario, där tekniken har mognat och optimerats. Det är mindre intressant att analysera en bränslecell i ett system där vätgas tillverkas genom att reformera fossila bränslen än ett, där vätgas genererats på ett förnybart sätt. Visserligen kan det i ett övergångskede vara motiverat att framställa vätgas från fossilbränslen, men det torde knappast vara en sådan lösning, som kan motivera en stor teknikomställning på samhälls nivå. Därför är det intressantaste scenariot



Figur 12 System vid livscykelanalys av bränsleceller för fordonsdrift.

att analysera det, som har en signifikant betydelse för att minska samhällets användning av fossilbränsle, dvs. användning av bränsleceller för drift av bilar. Ett sådant teknisksystem modellerades under programmets första etapp. Det visas i figur 12.

Resultatet från dessa analyser (Karlström 2004) och även från senare studier (Karlström & Andersson 2007) visar på att miljöpåverkan kan bli mycket låg om man kan producera vätgas på ett hållbart sätt och att man undviker att förbruka sällsynta metaller såsom Pt-metaller. Att producera vätgas på ett hållbart sätt är tekniskt inte något större problem, men med nuvarande energisystem kan t.ex. användningen av grön el få marginell inverkan på de totala emissionerna. Det beror på att grön el finns i överskott i relation till specificerad efterfrågan på just grön el. Om man ökar användningen av grön el kommer det således inte produceras mer grön el (Wallington et al. 2010). Använder man biomassa riskerar man förmodligen

| | 2008 |
|---|--------|
| El- och värmeproduktion | 7 468 |
| Raffinaderier | 2 218 |
| Tillverkning av fasta bränslen | 452 |
| Diffusa utsläpp | 825 |
| Övrigt | 164 |
| Bostäder, lokaler, förbränning inom areella näringar tot. | 4 294 |
| Inrikes transporter totalt | 20 694 |
| Industrins förbränning | 10 695 |
| Industriprocesser | 6 973 |
| Användning av lösningsmedel och andra produkter | 284 |
| Jordbruk | 8 470 |
| Avfall | 1 740 |
| Totala utsläpp exkl. markrelaterade | 63 963 |

Tabell 1 Utsläpp av växthusgaser år 2008 i Sverige i kton CO₂-ekvivalenter. (källa: Sweden's National Inventory Report 2010, submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change.

samma effekt. Det betyder inte att det måste vara så, man kan ju skapa nyetableringar, som enkom är till för vätgasproduktion.

Att undvika att förbruka Pt-resurser är svårare. Däremot har Pt-förbrukningen kunnat minskas väsentligt sedan programstarten 1997. Vi har även gjort bedömningen att Pt-problematiken inte nödvändigtvis är en återvändsgränd för PEFC-bränslecellerna. Även om någon färdig ersättare inte finns, har vi sett att polyaromater och vissa metalloxider kan fungera kortvarigt. Möjligheten att finna ersättare ökar också med högre temperaturer.

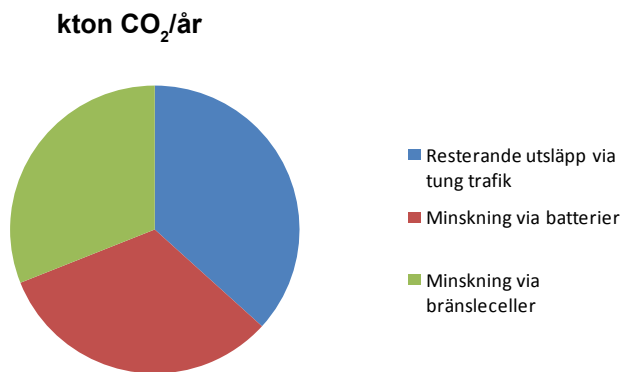
En positiv effekt av bränslecellsteknologin är att den ökar energisäkerheten, något som i sin tur är viktigt för hållbarheten i den meningen att vår förmåga att hantera kriser ökar.

Vilken effekt kan bränslecellerna då få i stort? Dels kan de naturligtvis minska de svenska koldioxidemissionerna och - beroende på hur vätgasen framställs - minska andra miljöeffekter, såsom trycket på exploatering av mark, dels kan de påverka internationellt genom den svenska exportindustrin.

År 2007 släppte vi i Sverige ut 65,4 miljoner ton växthusgaser räknat som koldioxidekvivalenter (se tabell 1). Det är främst i transportsektorn (tabell 2) och i någon mån för produktion av el från biogas som bränsleceller kan minska koldioxidutsläppen. Från vägtrafiken emitteras 19,3 miljoner ton/år, varav 12,2 från personbilstrafiken. Vägtrafiken står för den största ökningen av utsläppen sedan 1990 medan utsläppen från flyg och järnväg minskat. Om hybriddrift av vägfordon införs i stor skala och bränsleceller används i stället för fossilbränsle drivna förbränningsmotorer, kan utsläppen minskas med upp till cirka 6 miljoner ton (figur 13). Biobränslen kan ge liknande effekter och kan användas i såväl förbränningsmotorer, som bränsleceller med reformer. Globalt kan bränslecellerna få stor betydelse. 2004 svarade transporterna för ungefär 23

| | 2008 |
|-----------------------|--------|
| Vägtrafik | 19 355 |
| Inrikes flyg | 635 |
| Inrikes sjöfart | 452 |
| Järnväg | 76 |
| Övriga arbetsmaskiner | 174 |

Tabell 2 Utsläpp av växthusgaser från transporter år 2008 i Sverige i kton CO₂-ekvivalenter. (källa: Sweden's National Inventory Report 2010, submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change).



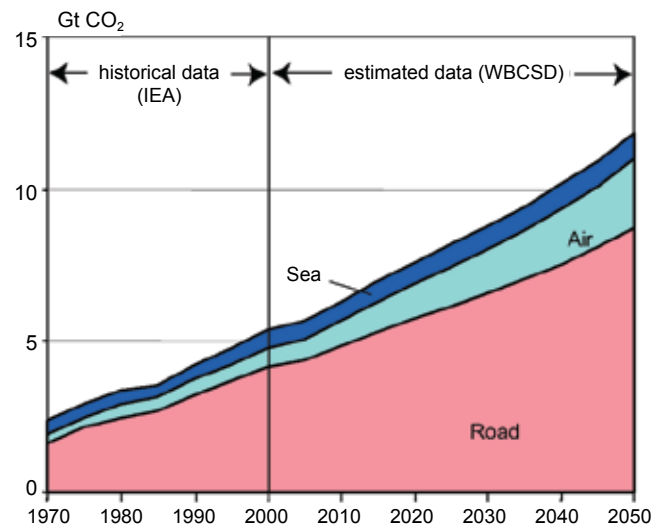
Figur 13 Bränslecellers potential att minska koldioxidutsläppen från vägtrafik är ungefär 6000 kton/år i ett scenario där bränsleceller användes som "range extender" i pluginhybrider.

% av alla energirelaterade utsläpp. Av alla sektorer inom energiområdet är transportsektorn den snabbast växande. En prognos visas i figur 14 (IPCC 2007).

Förutom den påverkan på hållbarheten, som bränslecellerna kan få genom lägre klimatpåverkan, har de också lägre utsläpp av svaveloxider, kväveoxider och flyktiga organiska föreningar, samt lägre bullernivå. Vid produktion av vätgas är kravet på att använda mark, som kan brukas för framställning av mat och andra bioprodukter litet. Detta är en väsentlig fördel i en värld som skall kunna föda en kraftigt växande befolkning och i en värld med kraftig tillväxt i länder som Kina, Indien, Brasilien och Ryssland.

3.3.1 Referenser

Karlström, M., Environmental Assessment of Polymer



Figur 14 Emissioner från transportsektorn, global. (IPCC 2007)

Electrolyte Membrane Fuel Cell Systems, Consequences of an Evolutionary Perspective on Technology Development, PhD thesis, Environmental Systems Analysis Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden 2004

Karlström, M. och Eva Andersson, Miljöpåverkan av vätgasförsörjning - Miljösystemanalys för vätgas i Göteborg, rapport från Vätgas Sverige, Göteborg, Juli 2007.

Rayner, s. and Malone, E., Human choice & Climate change, Vol. 1, The Societal Framework, 1998, Batelle Press, Columbus, Ohio

Wallington, T.J., Grahn, M., Anderson, J.E., Mueller, S.A., Willander, M.I., and Lindgren, K., Low-CO₂ Electricity and Hydrogen: A Help or Hindrance for Electric and Hydrogen Vehicles? Environ. Sci. Technol. 44, 2010, pp 2702-2708.

IPCC, Climate Change 2007: Working Group III: Mitigation of Climate Change, IPCC, Switzerland. Accessed at http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/tssts-ts-3-3-the-role.html

4 Samarbeten och samverkan

Under programtiden har en unik samverkan utvecklats mellan parterna. Företag och akademi har samarbetat med varandra och sinsemellan. Sättet att samverka kan sägas vara ett av programmets viktiga resultat. En central strategi har varit att utforma programmet så att genomförandet kräver samverkan med klara rollfördelningar, bl.a genom leveranser mellan parterna. Figur 15, som visar samverkan under fas 2 illustrerar detta i någon mån. Grafitföretagen Svenska Tanso och Tricorona/Timcal har tillsammans med Outokumpu undersökt och levererat material till bipolära plattor, som tillverkats av Morphin/Cellimpact. LTH har syntetiserat nya membrantyper, som analyserats av Chalmers. Katalysatorer har tillverkats av Chalmers och testats i drift av KTH. Tanso har tillverkat strömtilledaren till en speciell segmenterad cell i grafit, som använts av KTH. Volvo Technology och KTH tillverkade en stack med en strömtäthet i världsklass och lade därmed grunden till bildandet av Powercell. Nolato initierade ett samarbete med LTH där möjligheten att tillverka membran och MEA med inkjet-teknik undersökts. Chalmers och KTH gjorde tillsammans en utvärdering av bränslecellsteknologin ur hållbarhetssynvinkel, där Chalmers gjorde en livscykelanalys och KTH undersökte bränslecellen ur ett samhällsplaneringsperspektiv.

En klar målbild och regelbundna möten är andra element i samverkan. Forskare från olika discipliner har träffat företagsrepresentanter ett par gånger varje år i s.k. koordineringsmöten. Programmet hade under fas 2 en ”Scientific advisory board”, med etablerade utländska forskare och en ”Industrial Advisory Board” med vilka vi kunde diskutera tankar och planer. Detta bidrog till att vi under fas 2 utvecklades till internationellt erkända partners.

Förutom att samverkan på detta sätt leder till val av relevanta forskningsuppdrag, har den andra värden. Den



Figur 15 Samverkan under fas 2 och i stor utsträckning under fas 3.

underlättar rollfördelningen mellan parterna och den bidrar till en god rekrytering. I en forskningsrådutlysning, där forskare från olika högskolor fritt söker forskningsstöd sker rollfördelningen genom en utslagningsmekanism. Den som har det bästa förslaget och meriterna vinner anslagen inom ett visst projektområde medan andra tvingas att avstå efter att ha investerat mycket tid och möda på sina ansökningar. I ett program av detta slag finner parterna sina roller på ett mycket smidigare sätt, och kan gå in för dem utan några ”hard feelings” mot sina kollegor. I vårt fall skapas snarare ett stöd för kollegorna än en negativ kritik. Man är ju beroende av varandra för att helheten skall fungera.

Man kan se värdet av den samverkan som programmet skapat genom att:

- Ett stort antal av de publikationer, som gjorts, har författare från flera forskargrupper
- Flera av forskarna har efter disputation börjat arbeta hos företagen i programmet (3 av 25)
- Många har börjat arbeta inom företag utanför programmet (11 av 25)
- Flera av företagen har tagit hjälp av forskare inom programmet.
- Många av forskargrupperna arbetar tillsammans i internationella projekt
- De produkter som tagits fram under programtiden har utformats av flera företag och forskargrupper
- Positiva omdömen från internationella utvärderare

Vad är det då som skapar en effektiv samverkan? För vår del har det varit flera faktorer som spelat in förutom den programdesign, som nämnts ovan:

- Timing. Vi har fått verka i en tid där forskningen varit nära att kommersialiseras och under de två sista åren faktiskt nått en kommersialiseringsfas på några nischmarknader.
- Erfarenhet. Flera seniora företagsrepresentanter och forskare har erfarenhet av samverkan mellan företag och akademi.
- Atmosfär. Programmet och projekten har varit mötesrum för forskare och företag. Genom att främja sådant som har med arbetsklimatet att göra stimuleras kreativitet och entreprenörskap.
- Meningsfullhet. Att arbeta med viktiga frågor skapar engagemang. Att det dessutom kan leda till kommersiella framgångar ger ytterligare motivation.



Figur 16 Avslutningsmöte inom mistras bränslecellsprogram.

4.1 Internationella projekt, som programdeltagarna medverkat i

4.1.1 Automotive membrane ("AUTOBRANE", EU FP6 Integrated Project, 2005-2009)

Autobrane är ett tvärvetenskapligt projekt, som är inriktat på material-FoU i relation till fordonssektorns behov av komma över de tekniska hinder, som finns för att introducera polymerelektrolytbränsleceller (PEFC) på marknaden. Fokus ligger på grundläggande materialforskning och vidareutveckling av polymerelektrolytmembran, katalysator och MEA, validera dessa i bränsleceller i labbskala och demonstrera dem i en adekvat stack-konfiguration under relevanta förhållanden. Proving och validering genomförs vid erfarna institut. Europas bilindustrier bidrar med information om realistiska driftförhållanden för bilar. Autobrane samlar 31 deltagare från industri, forskningsinstitut och universitet. Autobrane har erkänts som ett internationellt samarbetsprojekt i överensstämmelse med målen för IPHE.

Medverkande grupper: LTH, KTH, Chalmers

4.1.2 Carisma ("CARISMA", EU FP6 Coordination Action, 2007-2008)

Carisma Coordination Action syftar till att erbjuda ett forum för integration av forskningsinsatser i Europa med inriktning på att utveckla högtemperatur MEA för PEM bränsleceller. Integrationen och samverkan mellan grupperna stärks via ett antal hörnstenar som bygger upp FoU-aktiviteterna såsom membra, katalysatorer och högtemperatur MEAs samt tekniska specifikationer för högtemperatur PMFC tillämpningar.

Medverkande grupper: LTH, KTH, Chalmers

4.1.3 New Macromolecular Architectures and Functions for Proton Conducting Fuel Cell Membranes

("MAProCon", sponsrat av "the Danish Council for Strategic Research", 2009-2013)

Programmet är koordinerat av DTU och syftar till att förbättra membranens karakteristika i enlighet med nationella och internationella krav genom att fokusera på nya typer av protonledande membran som i sin tur kan förbättra prestanda och livslängd hos bränsleceller.

Medverkande grupper: LTH

5 Vetenskapliga resultat

Forskning i allmänhet innebär att man deltar i ett internationellt arbete. Man följer vad andra gör och bygger vidare på det. Bränslecells forskning är inget undantag. Det man lär sig är delvis grundat på eget arbete, delvis på vad andra gör. Mistras Bränslecellsprogram har fokuserats på vissa specifika frågeställningar, men på köpet har vi lärt oss mycket om bränsleceller i allmänhet.

Det vi lärt oss har avspeglats i ökad kompetens. 25 nya doktorer har utbildats, fem av våra seniora forskare har blivit professorer och en stor mängd civilingenjörer har fått kvalificerad utbildning i elektrokemi.

Nya membrantyper har utvecklats och utvecklingen av en ny produktionsteknik för membran och membran belagda med elektroder har påbörjats. Mängden platina i katalysatorerna har kunnat minskas från 1 mg/cm² till 0,2 mg/cm² och idéer kommit fram om hur man helt kan eliminera Pt. Detta är viktigt eftersom en fastläsning vid Pt som katalysator minskar möjligheterna att göra PEMFC-bränsleceller till en långsiktigt hållbar teknik.

Forskningen på bipolära plattor har lett till att Outokumpu kan leverera stålsorter, som vi vet fungerar, att vi skapat nya sätt att mäta kontaktresistans och att vi ökat möjligheterna att skapa fungerande ytbeläggningar, som minskar kontaktresistansen.

Avancerade beräkningsmodeller för strömning i bränsleceller har tagits fram och ny celldesign har patenterats och bidragit till skapandet av PowerCell.

PowerCell liksom myFC har kunnat dra nytta av det nätverk som skapats kring Mistras bränslecellsprogram. Man har anställt personer, som utbildats i programmet och tagit hjälp av andra företag i programmet.

Två avancerade testceller har skapats, en segmenterad cell i grafit och en cell för in situ-mätning av membranprocesser med Raman-spektroskopi.

5.1 Membran

I en PEMFC är det protonledande polymera membranet själva "hjärtat". Det är i membranet som laddningsbärande protoner ska transporteras och det är också membranet som samtidigt ska separera anod och katod från elektronisk kontakt så att den nyttiga strömmen kan driva en yttre krets. Prestandan i bränsleceller och bränslecellsstackar bestäms av olika processer i membranet och i programmet har vi utvecklat verktyg och strategier för att kunna observera och skilja dessa processer från varandra. Typiska begränsande processer är uttorkning eller flödning - det vill säga obalans i vattenmängd, kemisk nedbrytning och reaktioner i membranen på grund av radikaler samt produkter från nedbrytning av andra delar av bränslecellen än membranet till exempel packningar etc. Vilka processer som är viktiga beror såväl av materialval som av driftsförhållanden.

De membran, som användes kommersiellt idag är nästa uteslutande av NafionTM-typ. De arbetar vid relativt låga temperaturer, cirka 80 grader, kräver Platina som katalysator och är relativt dyra. Inom programmet har vi inriktat forskningen mot att finna nya membrantyper och att ta fram och tillämpa metodik för att studera transport och nedbrytningsprocesser i membranen.

5.1.1 Utveckling av nya membran

Patric Jannasch och Elin Persson Jutemar

Polymer- och Materialkemi, Lunds universitet

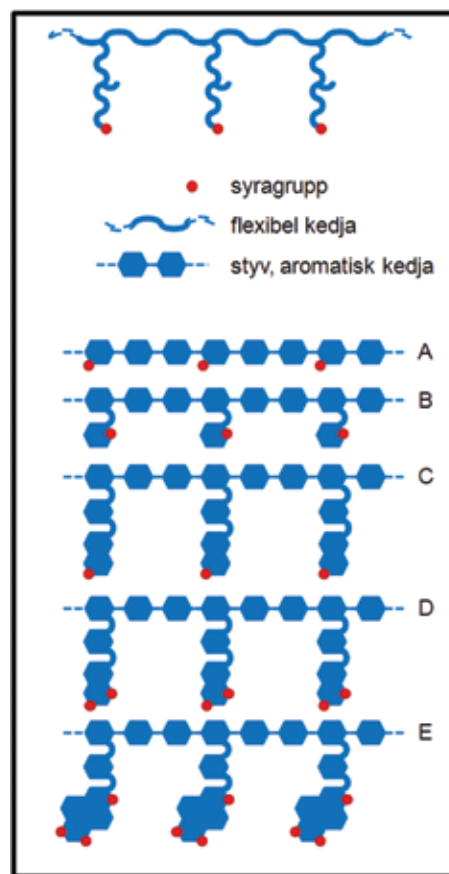
Att utveckla nya protonledande membran för bränsleceller är en stor utmaning - både tekniskt och vetenskapligt. Förbättras en egenskap innebär detta oftast att en annan egenskap försämras. Utvecklingen följs av många kompromisser. Typiska egenskaper som måste beaktas är kompromissen mellan vattenupptag och mekanisk stabilitet. Ett protonledande material som tar åt sig mycket vatten leder protoner bättre än ett material som tar åt sig lite vatten. Men, ju mer vatten som tas upp, desto mer sväller materialet och tappar mekanisk stabilitet. Drömmen är ett material med hög protonledningsförmåga som samtidigt tar upp mycket små eller måttliga mängder vatten.

Hur mycket vatten ett protonledande membran tar upp är starkt sammankopplat med hur många syragrupper som finns i materialet, även kallat jonbyteskapacitet. En hög jonbyteskapacitet leder till högt vattenupptag. Men med ett effektivt vattenporsystem kan mängden vatten hållas nere utan att offra alltför mycket protonledningsförmåga.

Membranets kemiska struktur är mycket viktigt för att förstå hur vattenupptag, jonbyteskapacitet och prestanda hänger ihop. Protonledande polymerer består typiskt av en polymer huvudkedja som modifierats med sidokedjor med sulfonsyragrupper. Det är dessa sura, joniska grupper, som starkt samverkar med vatten och står för den protonledning som eftersöks i materialet. Huvudkedjan däremot, är starkt vattenavstötande. Att de olika delarna i samma molekyl har så olika egenskaper leder till att de sura grupperna samlas och bildar så kallade joniska kluster. När membranet läggs i vatten, eller utsätts för fukt, drar dessa joniska kluster åt sig vatten och bildar vattenfyllda porer i nanoskala. I dessa

porer sker protontransporten genom materialet. Nafion® har ett mycket effektivt vattenporsystem, vilket gör materialet så väl lämpat som protonledande membran.

För att undersöka hur ett bra vattenporsystem uppnås har vår forskargrupp tillverkat olika serier av polymerer som skiljer sig i var syragrupperna är placerade på polymeren. Strukturerna för dessa polymer finns i Figur 17. Enklast möjliga placering är med syragruppen direkt på huvudkedjan



Figur 17 Molekylära strukturer för aromatiska polymerer med olika sulfonerade sidokedjor (A-E). Överst visas principstrukturen för Nafion.

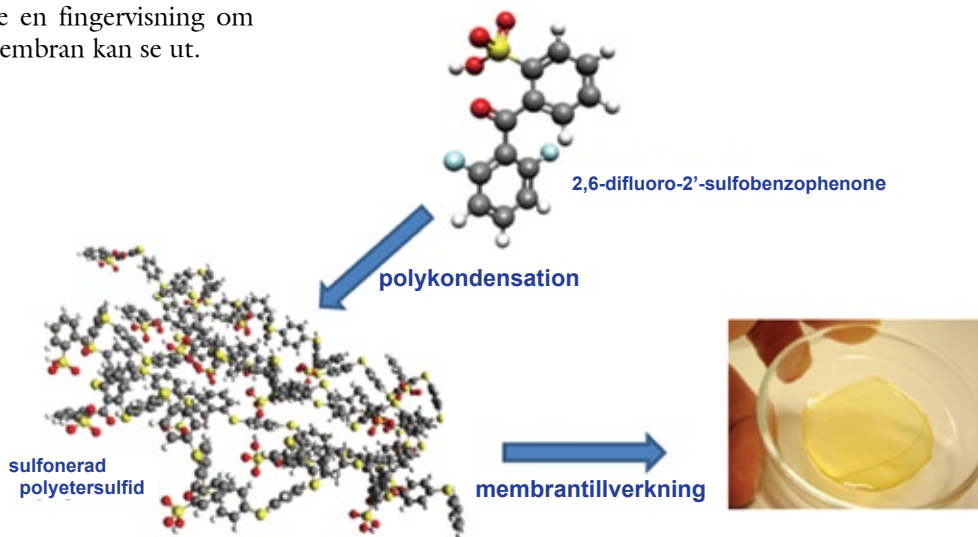
(A). För att separera de, med vattnet starkt interagerande syragrupperna, från de vattenavstötande huvudkedjorna kan syragruppen placeras på en kort sidokedja (B). Detta förväntas öka segregationen och förhoppningsvis därmed även storleken hos vattenporerna. Syragrupperna kan dessutom separeras ytterligare från huvudkedjan genom att placera dessa på en längre sidokedja (C). För att öka den lokala koncentrationen av syragrupper kan två (D) eller tre (E) sådana placeras på samma sidokedja. Inom varje serie kan dessutom det totala antalet syragrupper styras genom hur tätt intill varandra sidokedjorna sitter.

Protonledningsförmåga och storleken på jonklusterna har undersökts med hjälp av impedansmätningar respektive lågvinkelröntgenspridningsförsök (SAXS). Detta har visat att ju längre sidokedja och högre lokal koncentration av syragrupper polymeren har, desto större blir jonklusterna och därmed vattenkanalerna. De större vattenkanalerna har i sin tur visat sig ge ökad protonledningsförmåga.

Dessa serier av polymerer har ökat kunskapen om hur membranets egenskaper påverkas av dess struktur. Med protonledningsförmåga som närmar sig den hos Nafion kan polymererna i denna studie ge en fingervisning om hur nästa generations bränslecellsmembran kan se ut.

Vi har vidare studerat polymerer med syragruppen direkt på huvudkedjan (A). I dessa polymerer är syragrupperna jämnt fördelade längs huvudkedjan. Det har spekulerats i fördelar med att istället fästa syragrupperna tätt i vissa segment, separerade av segment helt utan syragrupper. Vi har under Mistraprogrammets sista del framställt just sådana polymerer. Dessa har framställts från polymerer med segment som tillåter tät utplacering av syragrupper, separerade av segment som inte tillåter utplacering av syragrupper. Vi har med dessa polymerer visat att det är möjligt att fästa upp till 4 sulfonsyragrupper per segment via metallorganisk kemi. Dessa material har i lågvinkelröntgenspridningsförsök visat sig anta en fördelaktig distinkt och regelbunden fassetparation mellan jonkluster och huvudkedjor.

Förutom de ovan nämnda materialen, har många nya protonledande jonomer sett dagens ljus i vårt lab under programmets tredje fas. Som gemensam nämnare för många av dessa material finns den molekyl som visas överst i Figur 18. Vi har utvecklat en metod för att tillverka



Figur 18 Från sulfonerad monomer till sulfonerad polymer och protonledande membranfilm.

denna nya sulfonerade monomer. Dess struktur har flera fördelar. Sulfonsyragrupperna är placerade i en stabil position på grund av närheten till ett karbonylkol, som dessutom aktiverar de två fluoratomerna för vidare reaktion i de polymerisationer monomeren är ämnad för. Genom att låta monomeren reagera med olika icke-sulfonerade monomerer har vi framställt ett flertal olika polymerer, alla med sulfonsyragrupperna placerade på en kort sidokedja, men med olika strukturer på huvudkedjan (Figur 18).

Ett av våra delprojekt har i den tredje fasen av programmet varit inriktat på att utveckla och studera metoder för integrerad tillverkning av elektrodbelagda membran med hjälp av inkjet-teknik. Detta har skett på och i samarbete med Nolato AB. Med inkjet-teknik deponeras ett stort antal små droppar (diameter ca. 30 µm) med stor precision på ett substrat. Om dropparna består av en polymer löst eller dispergerad i ett lösningsmedel bildas en film i samband med att lösningsmedlet avgår. Filmen byggs då upp genom att droppar deponeras lager för lager tills önskad filmtjocklek erhållits. Inkjet-tekniken är mycket lämplig att använda för att tillverka elektrodbelagda membran och har ett antal distinkta fördelar:

- En mycket god kontroll när det gäller filmtjocklek och fördelningen av material i filmen
- En flexibel produktion med hög hastighet
- En hög grad av reproducerbarhet och materialutnyttjande
- Stora möjligheter att kombinera olika lager i laminat ("layer-by-layer")

Ett viktigt delmål i projektet är att utveckla joniska polymerer som är lämpliga att använda med denna tillverkningsmetod. Eftersom polymeren appliceras som en lösning/dispersion är det också viktigt att framställa stabila system med rätt koncentration, viskositet och med lämplig lösningsmedelsavgångshastighet för att filmer med goda mekaniska egenskaper skall bildas.

Med avsikt att fokusera på inkjet-tekniken i sig, har en så enkel jonomer som möjligt valts till dessa försök, en polysulfon med syragrupper direkt på huvudkedjan. Polymera dispersioner testades inledningsvis, men på grund av problem med dessa dispersioners instabilitet valde vi att övergå till polymera lösningar med låg viskositet. Dessa lösningar visade sig vara mycket bättre att använda, och problem med långsam avdunstningshastighet avhjälpes delvis med möjligheten av värma upp substratet. Ojämnt printade membran var dock resultatet trots vissa förbättringar med större droppstorlekar med hjälp av ett nytt printhead med större utgångshål. Substrat av olika material användes för att undersöka ytspänningens inverkan på det tillverkade membranet.

Vi har under detta projekt visat att det är fullt möjligt att deponera polymerer i form av dispersion eller lösning på diverse substrat med hjälp av inkjet-teknik. Flera parametrar återstår dock att optimera innan fullgoda membran kan tillverkas med denna metod.

5.1.1.1 Artiklar från fas 3

Benoît Lafitte and Patric Jannasch, Polysulfone Ionomers Functionalized with Benzoyl(difluoromethylene phosphonic acid) Side Chains for Proton-Conducting Fuel Cell Membranes, *J. Polym. Sci., Polym. Chem. Ed.*, 45, 269-283 (2007).

Yu. A. Dobrovolsky, Patric Jannasch, Benoît Lafitte, N. M. Belomoina, A. L. Rusanov, D. Yu. Likhachev, Achievements in the Field of Proton-Conductive Polymer Electrolyte Membranes, *Russian Journal of Electrochemistry*, 43, 489-501 (2007).

Benoît Lafitte and Patric Jannasch, Proton-Conducting Aromatic Polymers Carrying Hypersulfonated Side-Chains for Fuel Cell Applications, *Advanced Functional Materials*, 17(15), 2823-2834 (2007).

H. Ekström, B. Lafitte, J. Itonen, H. Markusson, A. Lundblad, P. Jannasch, and G. Lindbergh, Evaluation of a

Sulfophenylated Polysulfone Membrane in a fuel cell at 60 to 110 °C, *Solid State Ionics*, 178(13-14), 959-966 (2007).

S. Von Kraemer, A. I. Sagidullin, G. Lindbergh, I. Furo, E. Persson, P. Jannasch, Pore size distribution and water uptake in hydrocarbon and perfluorinated proton-exchange membranes as studied by NMR cryoporometry, *Fuel Cells*, 8(3-4), 262-269, 2008.

Elin Persson Jutemar, Patric Jannasch, Locating sulfonic acid groups on various side chains to poly(arylene ether sulfone)s: Effects on the ionic clustering and properties of proton-exchange membranes, *Journal of Membrane Science* 351, 87-95, 2010.

Elin Persson Jutemar, Shogo Takamuku, Patric Jannasch, Facile synthesis and polymerization of 2,6-difluoro-2'-sulfobenzophenone for aromatic proton conducting ionomers with pendant sulfobenzoyl groups, *Macromolecular Rapid Communication*, in press, DOI:10.1002/marc.201000081.

5.1.1.2 Presentationer:

Benoît Lafitte and Patric Jannasch, Proton conducting membranes prepared from polysulfones carrying di- and trisulfonated aromatic side chains, presented at *Advances in Materials for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Systems*, Asilomar, California, February 2007.

Sophie von Kraemer, Göran Lindbergh, Anders Lundblad, Benoît Lafitte, and Patric Jannasch, Influence of varying the ion exchange capacity of polysulfone ionomers on the permeability and mass transport properties of gas diffusion electrodes (GDEs) and MEAs, presented at *Advances in Materials for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Systems*, Asilomar, California, February 2007.

Elin Persson and Patric Jannasch, Polyaromatic Proton-Exchange Membrane Materials by Polycondensation Reactions using Sulfonated Monomers, poster presented at the *Nordic Polymer Days 2007*, Helsinki, May 2007.

Patric Jannasch, Synthetic Strategies for New Proton Conducting Polymers and Membranes for Fuel Cells, invited plenary lecture at the *Nordic Polymer Days 2007*, Helsinki, May 2007.

Benoît Lafitte and Patric Jannasch, Proton-Conducting Membranes Prepared from Polysulfones Carrying Di- and Trisulfonated Aromatic Side Chains, invited lecture at *IUMACRO'07 - Macromolecules for a Sustainable, Safe and Healthy World*, New York City, June 10-13, 2007.

Sophie von Kraemer, Benoît Lafitte, Göran Lindbergh, and Patric Jannasch, Evaluation of high temperature membrane electrode assemblies based on sulfonated polysulfones, presented at the *Second European Fuel Cell and Applications Conference*, EFC2007, Rome, Italy, December 11-14, 2007.

Patric Jannasch and Benoît Lafitte, Proton-conducting membranes based on polysulfones carrying sulfonated and phosphonated aromatic side chains, invited lecture at *MC8: Advancing Materials by Chemical Design*, University College London, London, July 2-5, 2007.

Patric Jannasch, Design, synthesis and function of novel polymers and membranes for hydrogen fuel cells, invited plenary lecture at the *Nordic Polymer Days 2009*, Copenhagen, 25-27 May, 2009.

Elin Persson, Patric Jannasch, The influence of various sulfonated side-chains on the nanostructure and properties of proton-conducting polysulfone fuel cell membranes, lecture at the *Nordic Polymer Days 2009*, Copenhagen, 25-27 May, 2009.

5.1.1.3 Avhandling:

Benoît Lafitte, *Proton-Conducting Sulfonated and Phosphonated Polymers and Fuel Cell Membranes by Chemical Modification of Polysulfones.*, PhD. thesis, Lund University, Sweden, 2007 (ISBN 978-91-7422-146-6).

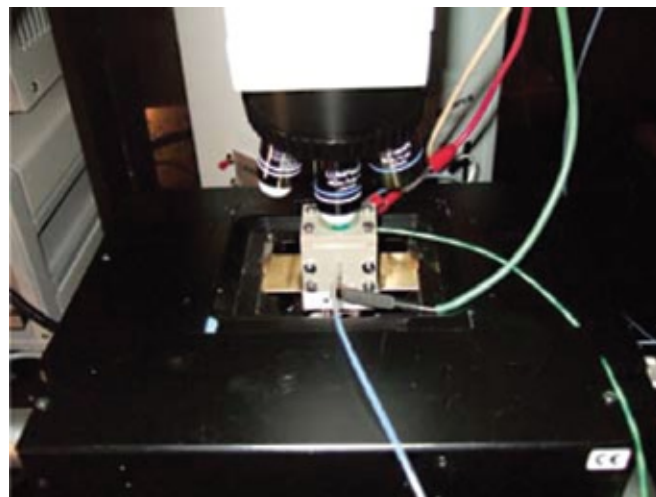
5.1.2 Livstidsdiagnostik kopplad till membran-nedbrytning

Per Jacobsson, Patrik Johansson,

Teknisk Fysik, Chalmers

För en framväxande svensk bränslecellsindustri är det viktigt att förstå och kunna diagnostisera olika anledningar till att bränslecellers prestanda försämras med tiden. I samarbete med Volvo technology inom har vi lärt oss att för olika testcykler kan samma typ av protonledande membran hålla i allt från bara ett par hundra timmar upp till flera tusen timmar. Förståelsen av de mekanismer som bryter ned respektive ”skyddar” ett membran från att åldras för snabbt blir både en konkurrensfördel såväl som en viktig förutsättning för att fokusera på utveckling av rätt delar, hårdvara såväl som mjukvara, för att höja prestanda och framförallt tillförlitlighet. Med anledning av detta har forskare vid avdelningen för Kondenserade Materiers Fysik (KMF), Chalmers, tagit fram laserspektroskopiska metoder, inom MISTRAs bränslecellsprogram, för att analysera membran före och efter bränslecellstester. I huvudsak kan tre olika frågeställningsområden belysas med denna typ av analys:

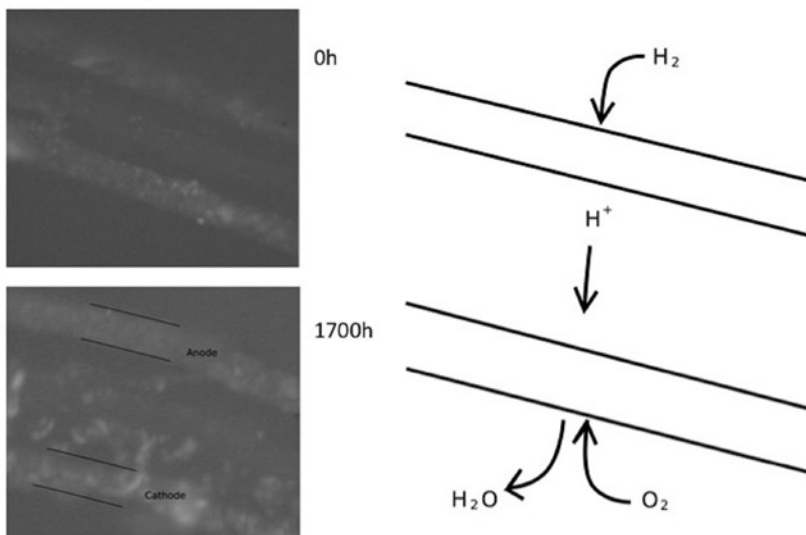
- Att före och efter genomförda cell-/stacktester kunna utvärdera membran m a p kemisk komposition tillsammans med /mekanisk /termisk stabilitet och dessutom korrelera till förändringar i prestanda.
- Att in situ utvärdera förhållanden i membranerna under körning för att tex förstå uttorknings-/flödningsprocesser i större detalj och därmed kunna prognostisera hur detta kan förhindras - t.ex. genom val av driftförhållanden.
- Att kunna utvärdera speciellt designade membran t.ex. de inom MISTRA framtagna membranerna med 3-dimensionell gradering i funktionalitet via ink-jet-teknologi från Nolato.



Figur 19 In-situ bränslecell under Ramanmätning med grön laser.

För att studera nedbrytningsprocesser på molekylär nivå i membranet i detalj använder vi oss både av ex-situ tekniker på protonledande membran före och efter test samt av in-situ tekniker på arbetande membran. Den huvudsakliga tekniken är en laserbaserad teknik - Ramanspektroskopi - som är ytterst känslig för den molekylära kompositionen. Som komplement används standardmässigt flera andra analystekniker (IR absorption och attenuated total reflection tex.). En dedikerad uppställning används för att studera membran från bränslecellsstackar som har plockats isär efter önskat antal körtimmar eller då cellen fallerat efter lång tids operation. Detta benämns ex-situ. En annan uppställning är en bränslecell i miniformat, konstruerad i samarbete med TEK/KTH som tillåter Ramanmätningar under körning så kallad in-situ (se Figur 19).

En speciell styrka med båda dessa uppställningar (både in-situ och ex-situ) är den konfokala tekniken med ett mikroskop som tillåter en spatiell upplösning i x, y, och

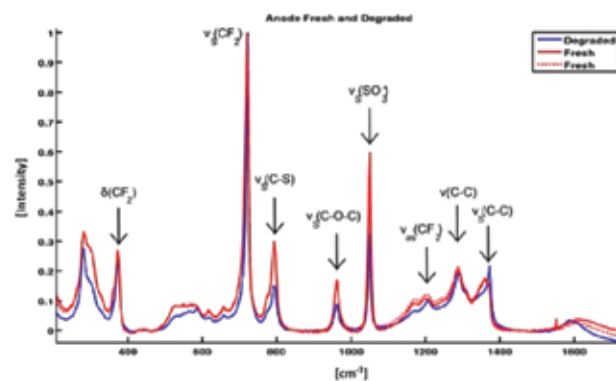


Figur 20 Mikroskopbilder från ett nytt membran och ett membran bränslecellstestat i 1700 timmar vid VTEC. Vid katodsidan på det testade membranet finns makroskopiska förändringar som tyder på förlust av hela polymerkedjor. Samtidigt visar Ramandata mer specifikt att de funktionella SO₃ grupperna har försvunnit över hela tvärsnittet.

z-led ner mot mikrometernivå och därmed skapar en 3-dimensionell representation av hur membranen är uppbyggda och gör det möjligt att studera skillnader i både komposition och nedbrytning över membranens tvärsnitt såväl på ytor som i bulk (jfr pkt 3 ovan).

Ex-situ undersökningar av kommersiella membran som långtidstestat av Volvo Technology inom MISTRA-samarbetet har länge varit av intresse inom programmet. 2008 fick detta arbete också stöd genom att ett EU-program inom FP7 etablerades: DECODE med både Chalmers och Volvo Technology som partners. DECODE samlar många av Europas bästa grupper när det gäller PEMFC i allmänhet och membran-nedbrytning i synnerhet. Genom DECODE-programmet har vi till projektet kunnat knyta en industridoktorand anställd på Volvo Technology (Mikael Holber) som fokuserar enbart på dessa frågeställningar. Under 2009 presenterades de första resultaten vid Electrochemical Society Meeting och i en publikation.

Figurerna 20 och 21 visar tydligt två skilda nedbrytningsmekanismer. Dels en makroskopisk nedbrytning av hela polymeren nära katodsidan, dels en mer mer specifik förlust av funktionella sulfonsyragrupper. Den senare förlusten påverkar starkt protonledningen i materialet medan den förra påverkar den mekaniska stabiliteten.



Figur 21 Raman data - här i en punkt nära anodsidan - visar att efter 1700 timmar har det protonledande membranet förlorat en andel av de funktionella SO₃ grupperna.

Som ytterligare spin-off från ovan nämnda program inom FP7 har vi utvärderat metoder för accelererade nedbrytningstester baserade på Fentons test - tester på tusentalstimmor är kostsamma och ger långa ledtider - i nära samarbete med ZSW i Ulm, Tyskland (Professor Ludwig Jörissen). Så här långt har det varit möjligt att accelerera den makroskopiska processen - förlust av hela bitar av polymeren. Däremot har vi så här långt inte kunnat påvisa en accelererad nedbrytning av de funktionella sulfonsyragrupperna.

Utöver de traditionella vattensvällda protonledande membranerna i fokus under hela Mistras bränslecellsprogram har vi under senare delen av programmet också påbörjat arbeten med strategier som kan leda till helt nya koncept för vattenfria protonledande membran för lågtemperaturbränsleceller. Protiska jonvätskor stabila i vätskefas mellan rumstemperatur och flera hundra grader Celsius har en intrinsisk förmåga att transportera protoner. Detta materialutvecklingsarbete befinner sig i en mycket tidigare fas och vårt arbete här har varit mer explorativt.

5.1.2.1 Publikationer:

A. Martinelli, A. Matic, P. Jacobsson, et al. Physical properties of proton conducting membranes based on a protic ionic liquid, *J. Phys. Chem. B*, 2007, vol 111, 12462-12467.

H. Markusson, J.P. Beliers, P. Johansson, CA Angell, P Jacobsson. Prediction of macroscopic properties of protic ionic liquids by ab initio calculations, *J. Phys. Chem. A*, 2007, vol 111, 8717-8723.

M. Holber, A. H. Carlsson, P. Johansson, L. Jörissen and P. Jacobsson, Raman Investigation of Degradation and Ageing Effects in Fuel Cell Membranes, *ECS Transactions*, 2009, vol 25, 807-811.

P. Jacobsson and P. Johansson, Measurement techniques: Vibrational Spectroscopy (Raman & IR), in *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, Ed. Jürgen Garche, Elsevier, 2009.

5.1.2.2 Konferensbidrag; föreläsningar etc:

Bo Håkansson's Minne (KTH, Eka Chemicals) Stockholm, Sweden, Jan 31, 2006. Föreläsare: Patrik Johansson

Per Jacobsson at LEPMI, Grenoble, France January 2007.

Per Jacobsson höll ett anförande på IVA/MISTRAs bränslecellsdag i december 2008.

Per Jacobsson - NORFA Summer School: New Materials and Technologies for Low Temperature Fuel Cells, Krapu, Finland, Aug 13-16, 2008.

Patrik Johansson - NORFA Summer School: New Materials and Technologies for Low Temperature Fuel Cells, Krapu, Finland, Aug 13-16, 2008.

Bo Håkansson's Minne (KTH, Eka Chemicals) Stockholm, Sweden, Jan 2008. Per Jacobsson presenterade in situ Raman studier som inbjuden talare.

5.2 Elektroder

Anders Palmqvist, Kjell Wikander, Annika Johansson,
Henrik Grönbeck och Björn Wickman

Chalmers

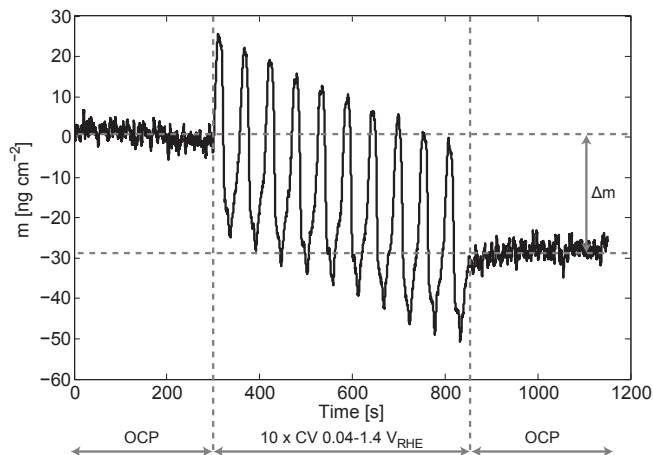
Arbetet med att utveckla nya elektroder har utförts längs två parallella vägar. För att öka förståelsen för de processer och faktorer som bestämmer verkningsgrad och livslängd för elektroder och katalysatorer i bränsleceller har flera experimentella plattformar utvecklats där väldefinierade modellkatalysatorer tillverkas och karakteriseras. Dessutom har arbete med mer konventionella elektrodstrukturer utförts där större fokus lagts på de ingående materialens nano- och mesoporstruktur. Två övergripande frågeställningar har belysts, den ena med målet att utveckla nya elektrodmaterial med lågt eller inget ädelmetallinnehåll och den andra med målet att öka den elektrokemiska stabiliteten hos elektroderna.

Modellsystemen sträcker sig från välkontrollerade plana nanostrukturerade katalysatorer för halvcellsexperiment till mer realistiska elektroder som kan utvärderas i riktig bränslecellsmiljö. I tillverkningen används flera av de tekniker för nanofabrikation som finns i Chalmers renrum, MC2 vilket möjliggör att elektrodens och katalysatormaterialets struktur, mängd och komposition kan kontrolleras med hög noggrannhet. Proverna karakteriseras både före och efter de elektrokemiska utvärderingarna med mikroskopi (t.ex. SEM, TEM, AFM) samt spektroskopi- och spridningsmetoder (t.ex. XPS, XRD). Styrkorna med dessa modellsystem är flera; i) En hög grad av noggrannhet och kontroll vid tillverkning vilket gör det möjligt att variera olika faktorer som påverkar prestanda separat, ii) relativt korta tillverkningstider, från några timmar upp till en dag och ofta kan en hel provserie tillverkas samtidigt och iii) stor flexibilitet och valfrihet i material- och strukturval samt kombinationer av material.

En stor del av den elektrokemiska utvärderingen av modellelektroderna har skett i nära samarbete med Tillämpad Elektrokemi på KTH. Dessutom har utvärdering av prov skett på KCK på Chalmers i egenutvecklade elektrokemiska testutrustningar, som innefattar en singelcell bränslecell, halvceller samt en elektrokemisk kvartskristallsensor (Electrochemical Quartz Crystal Microbalance). Eftersom EQCM-utrustningen kan mäta väldigt små viktförändringar ($\sim 2 \text{ ng/cm}^2$) är metoden väl lämpad för fundamentalastudier av kol- och platinakorrosion som är allvarliga degraderingsorsaker. Under projektiden har bland annat möjligheter att öka stabiliteten och livslängden hos bränslecellselektroder studerats. I Figur 22 visas viktförändring av en platinaelektrod under cykliskt korrosionsexperiment mätt med EQCM-utrustningen. Mätningen börjades med att cellen hölls vid öppetspänning i 5 minuter. Därefter genomfördes tio cykler mellan 0.04 och 1.4 V (50 mV/s) och avslutades med ytterligare 5 minuter med öppetspänning. Resultatet av mätningen visar att elektrodens massa minskade under behandlingen med omkring 30 ng/cm^2 .

Experimenten i Figur 22 har jämförts med motsvarande mätningar för platinapartiklar deponerade på ett kolsubstrat och för enbart kol. Resultaten visar att degraderingen för det kombinerade platina/kol systemet skiljer sig från korrosionen av de separata komponenterna, vilket indikerar att platina katalyserar kolkorrosion.

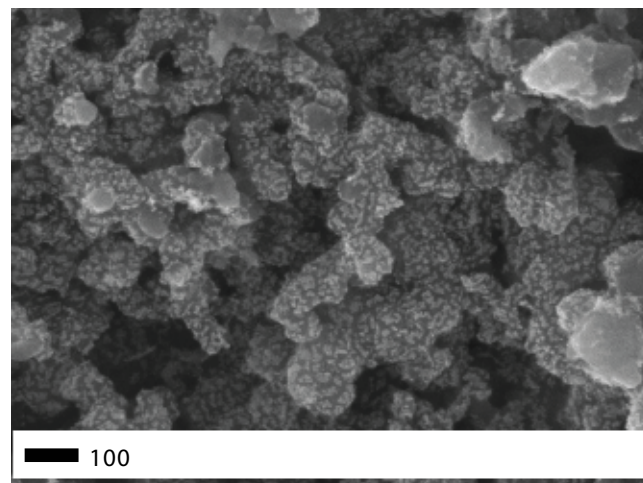
Under programtiden har även andra typer av katalysatormaterial framställts och utvärderats (Wikander 2007, Kjellin 2007, Wikander 2007a). En serie material bestående av kommersiella grafitprov har belagts med nanopartiklar av platina. Syftet med detta arbete har varit att utröna om en kristallin kolstruktur är stabilare än en amorf i PEM miljö och om platinapartiklarnas rörlighet möjligen påverkas negativt av strukturen. Detta arbete har visat att även kolets struktur spelar en stor roll för dess stabilitet i en Pt/C katalysator.



Figur 22 Viktförändring av en platinaelektrod under cykliskt korrosionsexperiment mätt med EQCM-utrustningen på KCK.

Vid Chalmers har möjligheter att öka stabiliteten och livslängden hos bränslecellselektroder studerats. Som ett exempel från detta arbete visar Figur 23 en svepelektronmikroskopbild av en tunn (3 nm) platinafilm, förångad på en kolelektrod, efter ett korrosionsexperiment utförd på KTH. Genom att jämföra med katalysatorstrukturen innan den elektrokemiska behandlingen kan man se att platinapartiklarna har flyttat sig på ytan och blivit något större (på grund av sintring). Dessutom har en viss mängd partiklar försvunnit från provet. Genom att tillsätta en stabil metall eller metalloxid mellan de aktiva platinapartiklarna och kolelektroden har ytterligare experiment visat att platinapartiklarnas stabilitet kan ökas och korrosionen av elektroden minskas (Wickman 2007).

Vidare har det i projektet arbetats med att förbättra livslängden på mer konventionella elektrodstrukturer. Här har katoder av Pt/C typ modifierats med TiO_2 genom att Pt nanopartiklar placerats på TiO_2 som i sin tur placeras på kol vilket gett mycket positiva resultat och en kraftigt förbättrad termisk stabilitet har påvisats (Figur 24) samtidigt

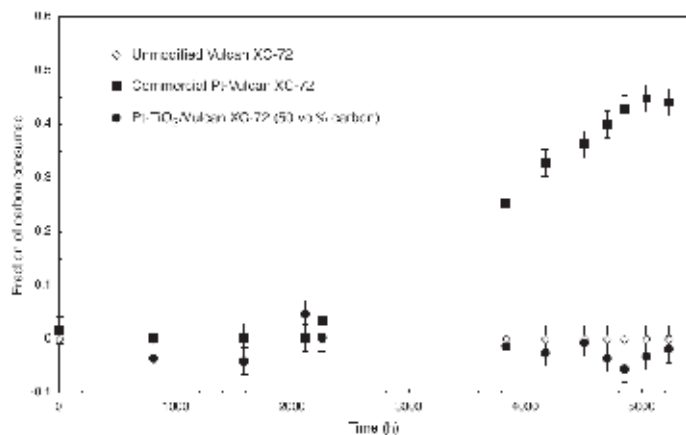


Figur 23 Svepelektronmikroskopbild av 3 nm Pt förångat på kolelektrod efter korrosionsexperiment.

som den elektrokemiska aktiviteten i det närmaste kunnat bibehållas (von Kraemer 2008).

En annan serie material som framställts och karakteriserats på Teknisk ytkemi på Chalmers är en ny typ av katalysatormaterial där syftet varit att skapa katodmaterial helt fria från platina. Här har det varit önskvärt att åstadkomma en aktiv och stabil struktur av materialet. Preliminära elektrokemiska utvärderingar av dessa material har utförts på Teknisk ytkemi på Chalmers med inspirerande resultat.

Materialen har studerats med cyklisk voltametri för att utvärdera deras stabilitet inom det potentialområde där syrgasreduktion sker. Studien visar att vissa material är förhållandevis stabila medans andra uppvisar tecken på att oxideras och reduceras inom det utvärderade potentialområdet. Materialens förmåga att elektrokemiskt reducera syre i en sur vattenlösning har studerats i en jämförande studie med Vulcan-kol och ett kommersiellt Pt/C prov från E-TEK. Några av de nya materialen visar



Figur 24 Termisk stabilitet av Vulcan XC-72 kol jämfört med kommersiellt modifierad 20 vikt-% Pt-Vulcan XC-72 och 10 vikt-% Pt-TiO₂/Vulcan XC-72 komposit (innehållande 50 vol.-% kol). Temperaturen var initialt 170°C och sedan 210°C.

på en betydande elektrokemisk omsättning av syrgas. En roterande disk elektrod (RDE) studie har utförts för att få fram kinetikdata i form av hastighetskonstanter och aktiveringsenergi för de olika materialen vilka planeras att publiceras.

5.2.1 Publikationer

M. Gustavsson et al. Journal of Power Sources 163 (2007) 671-678

B. Wickman, Thin-Film Electrocatalysts for Polymer Electrolyte Fuel Cells, Chalmers, Lic.Eng. Thesis (2007)

H. Ekström, B. Wickman, M. Gustavsson, P. Hanarp, L. Eurenus, E. Olsson and G. Lindbergh, nm-thick films of titanium oxide acting as electrolyte in the polymer electrolyte fuel cell, Electrochimica Acta, 52 (12) (2007) 4239-4245

K. Wikander, Nanostructured Catalysts and Electrode Materials for PEM Fuel Cells, Chalmers, Ph.D. Thesis (2007)

P. Kjellin, et al. Journal of Power Sources 168 (2007) 346-350

K. Wikander et al. Electrochimica Acta 52 (2007a) 6848-6855

Kjellin, P., and Palmqvist, A.E.C., J. Mater. Sci. 43 (22) (2008) 7250-7253

A. Schneider, L. Colmenares, Y.E. Seidel, Z. Jusys, B. Wickman, B. Kasemo, and R.J. Behm, Transport effects in the oxygen reduction reaction on nanostructured, planar glassy carbon supported Pt/GC model electrodes, Physical Chemistry Chemical Physics, 10 (2008) 1931-1943

Y. E. Seidel, M. Müller, Z. Jusys, B. Wickman, P. Hanarp, B. Kasemo, U. Hörmann, U. Kaiser, and R. J. Behm, Nanostructured, Glassy-Carbon-Supported Pt/GC Electrodes: The Presence of Secondary Pt Nanostructures and How to Avoid Them, Journal of The Electrochemical Society, 155 (10) (2008) K171-K179

Y. E. Seidel, A. Schneider, Z. Jusys, B. Wickman, B. Kasemo and R. J. Behm, Mesoscopic mass transport effects in electrocatalytic processes, Faraday Discussions, 140 (2008) 167-184

B. Wickman, H. Grönbeck, P. Hanarp and B. Kasemo, Corrosion Induced Degradation of Pt/C Model Electrodes Measured with Electrochemical Quartz Crystal Microbalance, Journal of the Electrochemical Society, 157 (4) (2010) B592-B598

Y. E. Seidel, A. Schneider, Z. Jusys, B. Wickman, B. Kasemo, R. J. Behm, Transport Effects in the Electrooxidation of Methanol Studied on Nanostructured Pt/Glassy Carbon Electrodes Langmuir, 26 (5) (2010) 3569-3578

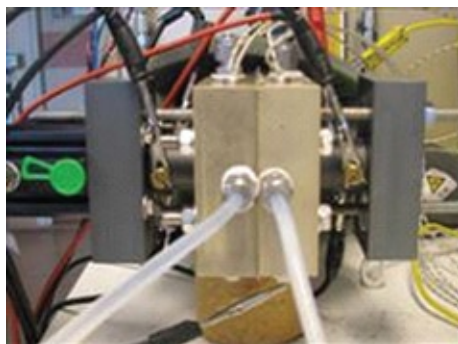
R.W. Lindström, Y. E. Seidel, Z. Jusys, M. Gustavsson, B. Wickman, B. Kasemo, R.J. Behm, Electrocatalysis and Transport Effects on Nanostructured Pt/GC Electrodes, Journal of Electroanalytical Chemistry 644 (2) (2010) 90-102

5.3 Bipolära plattor

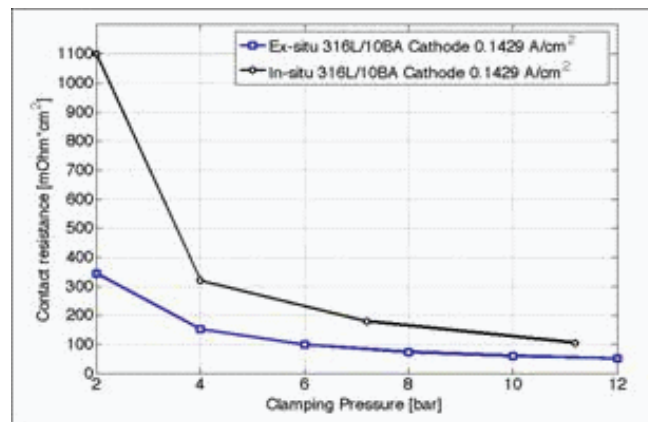
Göran Lindbergh, KTH

Bipolära plattor används mellan varje cell i bränslecellsstackar och har som främsta uppgifter att distribuera och separera bränsle- och luftflödena, underlätta vattenhanteringen och värmetransporten och dessutom fungera som strömtilliedare. För att uppnå dessa specifika krav så är valet av material av största vikt, och idag används främst grafitt, rostfritt stål eller kompositmaterial. Materialen måste uppfylla följande krav: låg kostnad, enkla att forma, låg vikt och volym, god mekanisk och kemisk stabilitet och låg kontaktresistans.

Rostfritt stål är en utmärkt kandidat, men bränslecellsmiljön kan resultera i upplösning av metalljoner. Dessa korrosionsprodukter anses förgifta membran och elektroder vilket medför lägre verkningsgrad och ökad degradering. Rostfritt stål bildar spontant en oxidfilm på metallens yta för att motverka korrosionen. Oxidfilmen har normalt sämre elektriskt ledningsförmåga än bulkstålet, vilket medför en ökning av kontaktresistansen. I ett försök att undvika kontamination av bränslecellen och samtidigt sänka kontaktresistansen appliceras därför skyddande och ledande beläggningar på stålet.



Figur 25 Mätning av kontaktresistans.



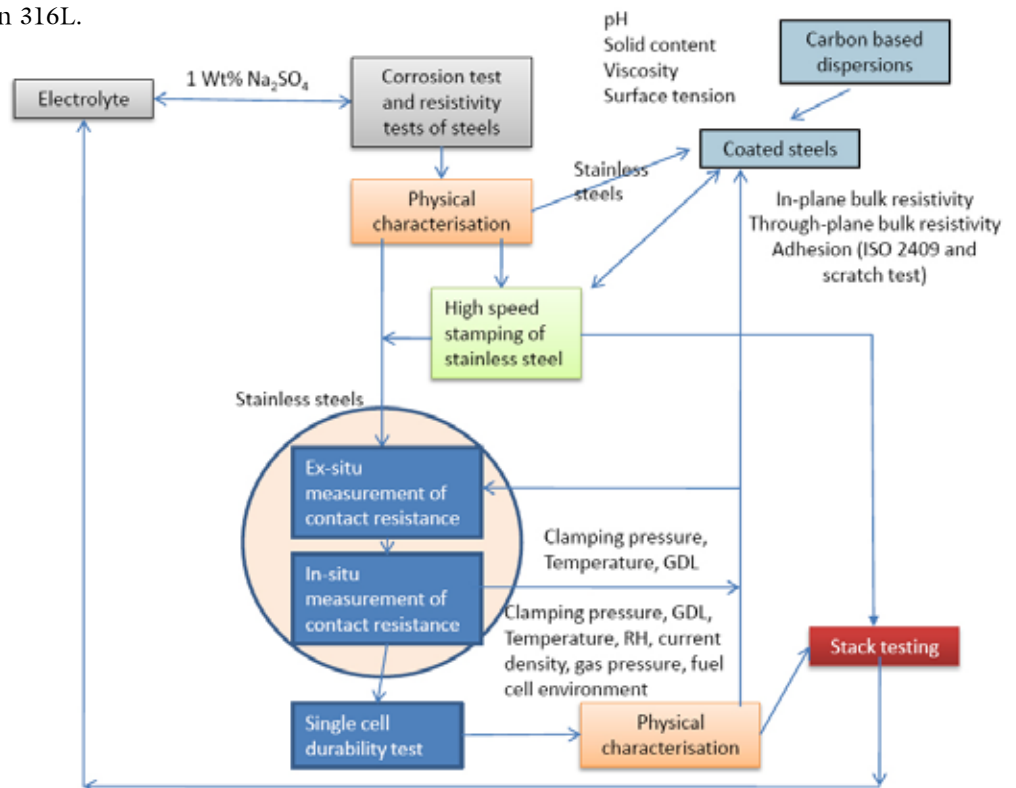
Figur 26 Jämförelse av kontaktresistans vid olika klämtryck mellan ex-situ resp in-situ-mätningar.

För att utvärdera huruvida ett nytt material är passande för bipolära plattor så krävs det en metodik som är enkel och snabb. Utvärdering av kontaktresistansen kan genomföras utanför bränslecellen (ex-situ) eller i bränslecellsdrift (in-situ). Ex-situ-mätningar är vanligast förekommande, och ger snabb och direkt evaluering av kontaktresistansen mellan två material, vilket gör det en mycket praktiskt metod för snabb utvärdering av olika kandidater för bipolära plattor. Ex-situ-miljön är dock inte kapabel att skapa dynamiska förändringar av förhållandena som under verklig bränslecellsdrift. In-situ-mätningar ger resultat under mer realistiska förhållanden, men är däremot mer experimentellt krävande genom att potentialsonder måste placeras i cellen.

I Mistras Bränslecellsprogram har en enhetlig metodik för att utvärdera nya bipolära material tagits fram, avsedd att användas av både användare och slutproducenter. Arbetet har genomförts i intimt samarbete mellan högskolan och företagen i programmet. Under arbetets gång har experiment genomförts för att undersöka skillnaden mellan olika typer av mätningar, där tre typer av försök har genomförts i likartade experimentella uppställningar: ex-situ-mätningar vid rumstemperatur, ex-situ-mätningar i

simulerad bränslecellsmiljö och in-situ-mätningar i verklig bränslecellsmiljö. Dessutom har det gjorts försök att hitta en lämplig metod för att genomföra accelererade försök.

Arbetet ger en intressant inblick i beteendet hos rostfritt stål i kontakt med olika porösa backing-material. Kontaktresistansen, precis som det passiva beteendet hos rostfritt stål, beror på stålet sammansättning och miljön i vilket mätningarna genomförs. Olika kontaktresistanser erhålls beroende på om mätningarna genomförs ex-situ eller in-situ. En lovande kolbeläggning har hittats, och dessa belagda prover uppvisar mindre skillnad mellan ex-situ och in-situ-mätningar än obelagda plattor. Degraderingstestet visar att rostfritt stål 904L har både lägre kontaktresistans och bättre bränslecellsprestanda än 316L.



Figur 27 Metodik vid test och utveckling av bipolära plattor.

5.4 Cell

Göran Lindbergh, KTH

5.4.1 Cellutformning

I Mistra-programmet har karakteriseringsmetoder och bränslecellshårdvara utvecklats för att studera komponenter till polymerelektrolytbränslecell (PEFC). Uppfuktare och annan utrustning har utvärderats för att utveckla reproducerbara och tillförlitliga experimentella metoder. En uppställning för utvärdering av större celler och staplar har utvecklats. En ny typ av PEFC för forskningsändamål har utvecklats. I denna konstruktion kan strömtilledarmaterial och flödeskanaler på ett enkelt sätt modifieras och elektrodernas potential kan mätas vid gasdiffusionsskiktet (GDL). Detta möjliggör studier av kontaktresistanser som funktion av applicerat tryck. Det är dessutom möjligt att använda referenselektroder. Kontaktresistanser i cellen undersöktes in situ som funktion av tid, applicerat tryck, gastryck och strömtäthet. Ex-situ mätningar utfördes för validering av in-situ mätningarna. Pålitlighet vid användning av referenselektroder och potentialprober utvärderades både med hjälp av datormodeller och experimentella studier.

5.4.2 Membranelektrodenheten

Den centrala delen i den enskilda cellen är den s.k. membranelektrodenheten ("Membrane Electrode Assembly", MEA), i vilken luftens syre och vätgas reagerar elektrokemiskt på olika sidor av ett membran och genererar elektrisk energi. De huvudsakliga hindren med teknologin är kostnads- och livstidsrelaterade. För att åtgärda dessa problem bör komponentkostnaderna reduceras, dessutom skulle ökad drifttemperatur för MEA minska systemkomplexiteten och därmed även systemkostnaden. Tillsammans med kravet på tillräcklig livstid är dessa aspekter starka skäl för utveckling av nya material inom området.

Både membranet och elektroderna innehåller protonledande polymerer. Elektrodernas morfologi och elektrokemiska prestanda påverkas kraftigt av mängden polymer. För membranet är låg gaspermeabilitet, hög protonledning samt god mekanisk och kemisk stabilitet viktiga egenskaper. I Mistras Bränslecellsprogram har experimentella tekniker och mätmetodik utvecklats, samt används för att elektrokemiskt karakterisera protonledande polymerer och membran för PEFC-applikationer. Arbetet omfattar ett brett forskningsområde som sträcker sig från polymersyntes till elektrokemisk karakterisering av elektroder och membran.

En produktionslina för tillverkning av membran-elektrodenheten (MEA) har utvecklats. Egentillverkade MEA har använts både för att studera membranegradning och masstransport. Livlängdsegenskaper hos PVDF-baserade membran studerades genom bränslecellsexperiment. Bränslecellsexperiment kompletterades med ex-situ experiment. Bränslecellstestade membran studerades med Raman-spektroskopi. Ett mätsystem för att studera strömfördelning i en PEFC har utvecklats. Påverkan av ingående luftfuktighet och syrehalt studerades. Dessutom studerades två olika flödesgeometrier. Resultat från experimenten har använts för att verifiera en PEFC model. Karakteriseringsmetoder för GDL har utvecklats, både genom bränslecellstest och ex-situ metoder. Prestanda hos flera olika kommersiella GDL bestämdes under varierande celltryck och katodgasfuktighet. Porositet, porfördelningen och kontaktvinkeluppmättes med ex-situ metoder. Elektriska kontaktresistanser, termiska motstånd och luftpermeabilitet mättes vid olika celltryck. Utvecklingsarbete för att bygga en bränslecellstapel med rostfria stål nät har utförts samt karakterisering av stapelkomponenter. Termiska motstånd och permeabilitet hos flödesstrukturen karakteriserades. Masstransportbegränsningar hos katoder studerades genom att variera elektrod tjockleken, partialtryck av syrgas samt relativ fuktighet.

I programmet har MEA baserade på alternativa material med fokus på nya protonledande polymerer, d.v.s. jonomerer, och katalysatorbärande material studerats. Materialen har utvärderats elektrokemiskt m.h.a. metoder såsom cyklisk voltammetri, polarisations- och impedansmätningar, och morfologiska studier utförs även. Valet av jonomerer i elektroder och membran är avgörande för utvecklingen av stabila högpresterande MEA för dynamiska driftförhållanden. MEA optimeras m.a.p. elektrod-sammansättning och tillverkningsmetod eftersom parametrarna påverkar elektrodstrukturen och därmed MEA-prestanda.

En sulfonerad dendritisk polymer framställdes och användes som protonledande komponent i en ny typ av bränslecellsmembran. Membranen tillverkades genom kemisk tvärbinding samt genom att blanda den sulfonerade polymeren med en basfunktionaliserad polymer, PSU-pyridin. För att studera gaspermeabilitet utvecklades en ny mätmetod baserad på en cylindrisk mikroelektrod. En fördel med den cylindriska mikroelektrodmotoden var att den möjliggjorde mätningar vid förhöjda temperaturer och låga relativa fuktigheter motsvarande de betingelser som uppkommer i bränslecellen. Långtidsegenskaper för strålningsympade bränslecellsmembran studerades in-situ i en bränslecell med hjälp av galvanostatiska långtidsförsök och elektrokemisk impedansspektroskopi (EIS). Långtidsförsöken jämfördes med accelererad nedbrytning i väteperoxid. Bränslecellsexperimenten kompletterades med Ramanspektroskopi och jonbyteskapacitetsmätningar för att direkt studera nedbrytningen. Katodens egenskaper studerades med ett antal olika material och elektrokemiska karakteriseringsmetoder. De elektroder som innehöll 35<x<45 wt % Nafion visade sig ge bäst prestanda. Dessa elektroder begränsades främst av masstransport i agglomeraten, medan elektroder med lågt Nafioninnehåll (<30 wt %) även begränsades av protonledning samt kinetik på grund av låg vätningsgrad. Vid höga Nafionhalter (>45 wt %) var vätningen nästan fullständig och porositeten minskade kraftigt. Dessa elektroder var främst begränsade

av gastransport i porerna genom elektroden. Modeller för membranet och vätgaselektroden konstruerades för att studera påverkan av vattentransport på anod- och membranimpedans. För att validera dessa modeller experimentellt utvecklades ett nytt referenselektrodkoncept baserat på porösa referenselektroder. Membranet och vätgaselektroden studerades experimentellt med steady-statemätningar, strömbrytning och EIS. De experimentella resultaten överensstämde väl med de modellerade resultaten.

MEA baserade på sulfonerade polysulfoner (sPSU) är fördelaktiga att framställa och de visar lovande bränslecellspredanda i ett omfångsrikt temperaturintervall. Dock förorsakar sPSU-membranen masstransportbegränsningar i elektrodena, vilket resulterar i försämrade MEA-prestanda. Membranmorfologin studeras därtill med kärnmagnetisk resonanskryoporometri som avslöjar ett samband mellan storleksfördelning av vattendomäner och mekanisk stabilitet i sPSU-membranen. sPSU-elektrodena har liknande egenskaper som Nafion elektroden, vilket resulterar i hög bränslecellspredanda då elektrodena kombineras med högpresterande membran.

5.4.3 Elektroder

Polymerelektrolytbränsleceller omvandlar kemisk energi till elektrisk energi med en högre verkningsgrad än förbränningsmotorer. De är särskilt lämpliga i fordon eller bärbara tillämpningar på grund av sin höga effekttäthet och låga drifttemperatur. Den sistnämnda utgör dock en nackdel för de elektrokemiska reaktionernas kinetik och i synnerhet för syrereduktion vid katoden. För att höja syrereduktionens hastighet måste den bästa katalysatorn användas, idag platina. Trots detta står katoden för det huvudsakliga spänningsfallet i cellen. Dessutom är platina ett kostsamt material med begränsad tillgänglighet vilket innebär att dess användning måste optimeras. Syftet med arbetet var att öka förståelsen för den porösa katodens

beteende i PEFC. Detta möjliggjordes med hjälp av fysikaliska modeller som simulerar katodens respons vid steady-state polarisationskurvor, strömbrytning (CI) och elektrokemisk impedansspektroskopi (EIS) samt genom att jämföra teoretiska och experimentella resultat. Modellerna tar hänsyn till syrereduktionskinetik samt reaktanternas transport genom elektroden, d.v.s. gasdiffusion och protonmigration. Katodens inre struktur beskrivs i modellerna som agglomerat. Elektrokemiska experiment genomfördes på elektroder med en yta av 0.5 cm² i en laboratoriebränslecell. Katodens sätt att reagera vid olika elektrodsammansättningar, tjocklek, syrgas partialtryck och relativ fuktighet undersöktes experimentellt med steady-state, EIS och CI tekniker. Det framgick att bäst prestanda erhålls när andelen polyelektrolyt i katoden, Nafion, ligger mellan 35 och 43 viktsprocent. Då visar katoden en tydlig fördubbling av den synbara Tafellutningen vid hög strömtäthet. I detta område är strömmen proportionell med katodens tjocklek och syrgasstryck, vilket, enligt agglomeratmodellen, stämmer överens med begränsning p.g.a långsam syrediffusion i agglomeraten. Samma analys gjordes med EIS. Dessutom visade de experimentella resultaten att Tafellutningen ökar med minskad relativ fuktighet. Utöver det blir en katod som har en Nafionhalt lägre än 35 viktsprocent begränsad p.g.a protonmigration. När Nafionhalten överstiger 40 viktsprocent försämras katodens prestanda vid hög strömtäthet. Detta tyder på en ytterligare masstransportbegränsning som visar flera tecken på att vara långsam syrediffusion genom elektroden.

Alternativa katalysatorer har även utvecklats. Järnacetat adsorberat på olika kolpulver och pyrolyserat vid 900°C i ammoniakatmosfär undersöktes som katalysator för syrereduktion. Studien visar att kolet har en väldig effekt. De bästa erhållna katalysatorer var lika aktiva, per vikt, som platina.

Även alternativa katalysatorbärande material har utforskas; kompositelektroder, i vilka kontakten mellan platina och kol minskas genom att titandioxid används som platinabärande,

visar lovande bränslecellsegenskaper och ex-situ termisk stabilitet. Enligt en elektrokemisk degraderingsstudie ökar livslängden för elektroden när grafitiserat kol används som katalysatorbärande material. Somhelhet konkretiserar studierna betydelsen av en noggrann MEA-utvecklingsstrategi med en bred metodik för karakterisering av nya material som integrerade MEA så väl som skilda komponenter. P.g.a. att komponenterna och processerna i MEA växelverkar krävs ett holistiskt tillvägagångssätt för att möjliggöra en framgångsrik utformning av MEA baserade på nya material som slutligen bidrar till utvecklingen av effektiva och förmånliga PEFC-system.

På katoden (den positiva elektroden) i polyelektrolytbränslecellen krävs betydande mängder platina för att katalysera den tröga syrereduktionsreaktionen (ORR). Detta inverkar på kostnaden för högeffektsapplikationer, och för att göra en bred kommersialisering av PEFC teknologin möjlig skulle det vara önskvärt att minska den Pt-mängd som används för att katalysera ORR. I Mistra-programmet har ett antal tekniker som utvecklats för att undersöka katalytisk aktivitet på katoden i PEMFC. Metodiken liknar traditionella treelektrodeexperiment i vätskeformig elektrolyt, med cyklisk voltammetri i inert gas, men med fördelen att försöken utförs i den riktiga PEMFC-miljön. I försök med porösa elektroder visades att det är möjligt att nå massaktiviteter nära 0.2 gPt/kW för potentialer över 0.65V vid 60°C, men massaktiviteterna kan bli betydligt lägre om temperaturen höjs till 80°C, och om potentialsvepgränser och elektrodens tillverkningsmetod ändras.

Försök med modellelektroder resulterade i intressanta resultat rörande ORR i gränsskiktet Pt/Nafion. Genom att använda en ny metodik för att mäta på katalyserade plana elektroder av vitröst kol (glassy carbon), var det möjligt att se att gasernas fuktighet har en betydande inverkan på ORR-kinetiken hos Pt. Tafellutningarna blir brantare och aktiviteten minskar när inloppsgasernas fuktighetsgrad minskar. Eftersom den elektrokemiska

arean hos Pt/Nafion gränsskiktet inte ändrades, ansågs dessa kinetiska effekter bero på en lägre täckningsgrad av Pt-oxider vid lägre fuktigheter, i kombination med lägre protonaktivitet. Genom att använda Nafionmembran belagda med nm-tjocka tvåskiktmodellektroder undersöktes hur Pt i kombination med TiO₂ och andra metalloxider verkar i PEMFC-miljön. Kinetiskt sett hade tillsatsen av metalloxider ingen inre påverkan på aktiviteten, men vid jämförelse med porösa elektroder tycks den specifika ytaktiviteten vara högre hos en 3nm film av Pt på Nafion än för en porös elektrod baserad på 4nm Pt-korn belagda på ett kolbärrmaterial. Jämför man de cykliska voltammogrammen i N₂, kan den högre aktiviteten tillskrivas en lägre grad av Pt-oxidbildning, vilket i sin tur kan bero på en storlekseffekt hos Pt-partiklarna. Försöken med dessa tvåskiktselektroder visade också att TiO₂ kan verka som protonledande elektrolyt i PEMFC.

5.4.4 Publikationer

5.4.4.1 Artiklar

Jari Ihonen, Frédéric Jaouen, Göran Lindbergh, Göran Sundholm, A novel polymer electrolyte fuel cell for laboratory investigations and in-situ contact resistance measurements, *Electrochim. Acta*, 46 (2001) 2899.

Frédéric Jaouen, Göran Lindbergh, Göran Sundholm, Investigation of Mass Transport Limitations in the Solid Polymer Fuel Cell Cathode. Part I: Mathematical Model, *J. Electrochem. Soc.*, 149, (2002) A437.

Jari Ihonen, Frédéric Jaouen, Göran Lindbergh, Anders Lundblad, Göran Sundholm, Investigation of Mass-Transport Limitations in the Solid Polymer Fuel Cell Cathode. Part II: Experimental, *J. Electrochem. Soc.*, 149 (2002) A448.

Peter Gode, Jari Ihonen, Anders Strandroth, Hanna Ericson, Göran Lindbergh, Mikael Paronen, Franciska

Sundholm, Göran Sundholm, Nadja Walsby, Membrane durability in a PEM fuel cell studied using PVDF based radiation grafted membranes, *Fuel Cells*, 3 (2002) 21.

P. Gode, G. Lindbergh and G. Sundholm, In-situ measurements of gas permeability in fuel cell membranes using a cylindrical microelectrode *J Electroanal Chem*, 518 (2002) 115.

Frédéric Jaouen, Göran Lindbergh, Transient Techniques for Investigating Mass-Transport Limitations in Gas Diffusion Electrodes. I. Modeling the PEFC Cathode, *J. Electrochem. Soc.*, 150 (2003) A1699.

Frédéric Jaouen, Göran Lindbergh, Katarina Wiezell, Transient Techniques for Investigating Mass-Transport Limitations in Gas Diffusion Electrodes. II. Experimental Characterization of the PEFC Cathode, *J. Electrochem. Soc.*, 150 (2003) A1711.

Peter Gode, Frédéric Jaouen, Göran Lindbergh, Anders Lundblad, Göran Sundholm Influence of the ink composition on the structure and electrochemical characteristics of the PEFC cathode, *Electrochim Acta*, 48 (2003) 4175.

Frédéric Jaouen, Sébastien Marcotte, Jean-Pol Dodelet, Göran Lindbergh, Oxygen reduction catalysts for polymer electrolyte fuel cells from the pyrolysis of iron acetate adsorbed on various carbon supports *Journal of Physical Chemistry B*, 107, (2003) 1376.

P. Gode, J. Ihonen, A. Strandroth, H. Ericson, G. Lindbergh, M. Paronen, F. Sundholm, G. Sundholm and N. Walsby, Membrane durability in a PEM Fuel Cell studied using PVDF based radiation grafted membranes, *Fuel Cells*, 3 (2003) 21.

E. Birgersson J. Nordlund, H. Ekström, M. Vynnycky and G. Lindbergh, Reduced two-dimensional one-phase model for analysis of the anode of a DMFC, *Journal of The Electrochemical Society* 150 (2003) A1368–A1376.

- Matti Noponen, Jari Itonen, Anders Lundblad, Göran Lindbergh, "Current distribution measurements in PEFC with net flow geometry", *J. Appl. Electrochem.*, 34 (2004) 255.
- Jari Itonen, Mikko Mikkola, Göran Lindbergh, "The flooding of gas diffusion backing in polymer electrolyte fuel cells; physical and electrochemical characterization", *J. Electrochem. Soc.*, 151 (2004) A1152.
- Matti Noponen, Jari Itonen, Erik Birgersson, Michael Vynnycky, Anders Lundblad, Göran Lindbergh, "A two-phase, non-isothermal PEFC model - theory and validation", *Fuel Cells*, 4 (2004) 365.
- P. Gode, A. Hult, P. Jannasch, M. Johansson, L.E. Karlsson, G. Lindbergh, E. Malmström and D. Sandquist, A novel sulfonated dendritic polymer as the acidic component in proton conducting membranes, *Solid State Ionics*, 177 (2006) 787.
- K. Wiezell, G., P. Gode, G. Lindbergh, Steady-state and EIS Investigation of Hydrogen Electrodes and Membranes in Polymer Electrolyte Fuel Cells I. Modelling, *J. Electrochem. Soc.*, 153 (2006) A749.
- K. Wiezell, G., P. Gode, G. Lindbergh, "Steady-state and EIS Investigation of Hydrogen Electrodes and Membranes in Polymer Electrolyte Fuel Cells II. Experimental, *J. Electrochem. Soc.*, 153 (2006) A759.
- K. Wikander, H. Ekström, A.E.C. Palmqvist, A. Lundblad, K. Holmberg and G. Lindbergh, Alternative catalysts and carbon support material for PEMFC, *Fuel Cells* 06 (2006) 21.
- H. Ekström, P. Hanarp, M. Gustavsson, E. Fridell, A. Lundblad and G. Lindbergh, A Novel Approach for Measuring Catalytic Activity of Planar Model Catalysts in the Polymer Electrolyte Fuel Cell Environment, *Journal of The Electrochemical Society* 153 (2006) A724
- S. von Kraemer, M. Puchner, P. Jannasch, A. Lundblad and G. Lindbergh, Gas Diffusion Electrodes and Membrane Electrode Assemblies Based on a Sulfonated Polysulfone for High-Temperature PEMFC *J. Electrochem. Soc.*, 153, A2077-A2084 (2006).
- K. Wikander, H. Ekström, A.E.C. Palmqvist and G. Lindbergh, On the influence of Pt particle size on PEMFC cathode performance, *Electrochimica Acta*, (2007).
- On the activity and stability of Sr₃NiPtO₆ and Sr₃CuPtO₆ as electrocatalysts for the oxygen reduction reaction in a polymer electrolyte fuel cell P. Kjellin, H. Ekström, G. Lindbergh and A.E.C. Palmqvist, *Journal of Power Sources*, 168 (2007) 346.
- M. Gustavsson, H. Ekström, P. Hanarp, L. Eurenus, G. Lindbergh, E. Olsson and B. Kasemo, Thin film Pt/TiO₂ catalysts for the polymer electrolyte fuel cell, *Journal of Power Sources* 163 (2007) 671-678.
- H. Ekström, B. Wickman, M. Gustavsson, P. Hanarp, L. Eurenus, E. Olsson and G. Lindbergh, Nanometer-thick films of titanium oxide acting as electrolyte in the polymer electrolyte fuel cell, *Electrochimica Acta* 52 (2007) 4239-4245.
- N. Holmström, J. Itonen, A. Lundblad and G. Lindbergh, The Influence of the Gas Diffusion Layer on Water Management in Polymer Electrolyte Fuel Cells, *Fuel cells* 4 (2007) 306-313.
- S. von Kraemer, A. I. Sagidullin, G. Lindbergh, I. Furó, E. Persson and P. Jannasch Pore Size Distribution and Water Uptake in Hydrocarbon and Perfluorinated Proton-Exchange Membranes as Studied by NMR Cryoporometry *Fuel Cells*, 3-4, 262-269 (2008).
- S. von Kraemer, G. Lindbergh, B. Lafitte, M. Puchner and P. Jannasch Substitution of Nafion with Sulfonated Polysulfone in Membrane-Electrode Assembly Components for 60-120 °C PEMFC Operation *J. Electrochem. Soc.*, 155, B1001-B1007 (2008).

S. von Kraemer, K. Wikander, G. Lindbergh, A. Lundblad and A. E. C. Palmqvist Evaluation of TiO₂ as Catalyst Support in Pt-TiO₂/C Composite Cathodes for the Proton Exchange Membrane Fuel Cell *J. Power Sources*, 180, 185-190 (2008).

T. Tingelöf, L. Hedström, N. Holmström, P. Alvfors and G. Lindbergh, The influence of CO₂, CO and air bleed on the current distribution of a polymer electrolyte fuel cell, *Int J Hydrogen Energy*, 33(8) (2008) 2064-2072.

A. Oyarce, N. Holmström, A Boden, S Randström and G Lindbergh, In-situ Measurements of Contact Resistance and In-situ Durability studies of Steels and Coatings to be used as Bipolar Plates in PEMFCs, *ECS Transactions*, 25(2009) 1791-1801.

5.4.4.2 Examensarbeten

Alejandro Oyarce Barnett, Ex-situ and In-situ Measurements of Contact Resistance of Stainless Steels and Coatings to be used as Bipolar Plates in PEMFCs, (2008).

5.4.4.3 Konferensbidrag

N. Holmström, J. Ihonon, A. Lundblad and G. Lindbergh, Investigation of Two-Phase behaviour of Gas Diffusion Layers in PEFC, 3rd European PEFC Forum in Luzern, Switzerland (2005) B071.

N. Holmström, A. Lundblad and Göran Lindbergh, Using segmented cell polymer electrolyte fuel cell as a validation tool, presented at Nordic PEMFC 06, Stockholm, Juli (2006).

T Tingelöf, L Hedström, N. Holmström, G Lindbergh, P. Alvfors, Analysis of the dilution and poisoning effects of high CO₂ concentrations at the anode of a PEFC, presented at Nordic PEMFC 06, Stockholm, Juli (2006).

T. Tingelöf, L. Hedström, N. Holmström, G. Lindbergh and P. Alvfors, Investigation of dilution and poisoning effects of high CO₂ concentrations at the anode of a PEFC, Grove Turin (2006).

A. Oyarce, N. Holmström, A. Boden, S. Randström and G. Lindbergh, In-situ Measurements of Contact Resistance and In-situ Durability studies of Steels and Coatings to be used as Bipolar Plates in PEMFCs, presented at 216th ECS Meeting, 4-9 Okt 2009, Vienna, Austria.

A. Lundblad, P. Gode, F. Jaouen, G. Lindbergh, G. Sundholm, Influence of the composition on the structure and electrochemical characteristics of the PEFC cathode, Advances in materials for proton exchange membrane fuel cells, Pacific Grove, California, February 23-26 (2003).

J. Ihonon, E. Birgersson, G. Lindbergh, A. Lundblad, M. Vynnycky, A Two-Phase, Non-Isothermal PEFC Model: Theory and Validation, 2nd European PEFC Forum in Luzern, Switzerland (2003).

P. Gode, F. Jaouen, G. Lindbergh, A. Lundblad, G. Sundholm, Influence of electrode structure on electrochemical performance of the PEFC cathode, 5th international symposium on new materials for electrochemical systems, Montreal, Quebec, Canada (2003).

Henrik Ekström, Patric Jannasch, Benoît Lafitte, Göran Lindbergh and Anders Lundblad, In-situ evaluation of sulfophenylated polysulfone membranes in a hydrogen/oxygen PEFC, 204th Meeting of the Electrochemical Society, Orlando, Oktober (2003).

Anders Lundblad, Fuel cell activities at KTH, Sweden, Nordic and Baltic Applied Fuel Cell Technology Research Network, Start-up workshop, Reykjavik, Iceland, November 12 (2003).

Henrik Ekström, In-situ evaluation of sulphphenylated polysulfone membranes in H₂/O₂ PEFC, Nordic and Baltic Applied Fuel Cell Technology Research Network, Start-up workshop, Reykjavik, Iceland, November 12 (2003). 78.

Birgersson, E., Fallenius, B. & Vynnycky, M., Heat and mass transfer in the cathode of a polymer electrolyte fuel cell with a porous flow distributor, presented at HEFAT 2005, Cairo, Egypt, 19-22 September (2005).

Vynnycky, M., Nordlund, J. and Bark, F. H., Fuel cells and mobile energy supply, Proceedings of the Stockholm 1st International Conference on Military Technology, 10-11, pp. 103-110 (2003).

Birgersson, E., Fallenius, B. & Vynnycky, M., Heat and mass transfer in the cathode of a polymer electrolyte fuel cell with a porous flow distributor, presented at HEFAT 2005, Cairo, Egypt, 19-22 September (2005).

Per Hanarp, Henrik Ekström, Marie Gustavsson, Kjell Wikander, Per Kjellin, Anders Palmqvist, Krister Holmberg, Göran Lindbergh, Anders Lundblad, Bengt, Non-conventional PEMFC electrodes and catalyst materials, Presented (poster) at the Ninth Grove Fuel Cell Symposium, London, UK, 4-6 October, (2005).

Marie Gustavsson, Henrik Ekström, Per Hanarp, Dan Pettersson, Anders Lundblad, Göran Lindbergh and Erik Fridell, Model PEMFC electrodes prepared by colloidal lithography, Presented (poster) at the 4th International Conference on Environmental Catalysis, Heidelberg, Germany, 5-8 Juni (2005).

H. Ekström, M. Gustavsson, B. Wickman, P. Hanarp and G. Lindbergh, Titanium oxide – a proton conductor for fuel cells?, presented at Nordic PEMFC 06, Stockholm, Juli (2006).

S. Kraemer, G. Lindbergh and A. Lundblad, PEM fuel cell characteristics of gas diffusion electrodes (GDEs) and nanocomposite MEAs based on novel sulfonated polysulfones, presented at Nordic PEMFC 06, Stockholm, Juli (2006).

K. Wiezell, P. Gode and G. Lindbergh, Steady-State and EIS investigations of hydrogen electrodes and membranes in polymer electrolyte fuel cells, presented at Nordic PEMFC 06, Stockholm, Juli (2006).

A. Lundblad, A. Önsten, G. Lindbergh, F. Jaoun and Y. Kiros, Catalysts for PEFC cathodes based on Fe and CoTMPP, presented at Nordic PEMFC 06, Stockholm, Juli (2006).

Gode Peter, Ihonen Jari, Jaouen Frédéric, and Lindbergh Göran, The Solid Polymer Fuel Cell (SPFC) project and the MISTRA programme, poster presented at the Nordic seminar on catalysis in low temperature fuel cells, Turku, Finland, October 19-20, 1998.

Ihonen Jari, Separation and Identification of different iR losses in PEM Fuel Cells, poster presented at the Nordic Workshop on Hydrogen in Electrochemical Energy Conversion, Geilo, Norway, March 3-5, 1999.

Ihonen Jari, Jaouen Frédéric, Gode Peter, Lindbergh Göran, Sundholm Göran, Separation and Identification of different iR losses in Polymer Electrolyte Fuel Cell, poster presented at the 50th Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry, Pavia, Italy, September 5-10, 1999.

Gode, Peter, Lindbergh, Göran and Sundholm, Göran, A new electrochemical method to study gas permeability in proton conducting membranes. Poster presented at the Nordic Polymer Days, Helsinki, Finland, May 24-26, 2000.

Ihonen Jari, Jaouen Frédéric, Lindbergh Göran and Sundholm Göran, A mathematical and experimental study of the cathode of a solid polymer fuel cell, Poster presented at the 7th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, Germany, June 26-27, 2000.

Lundblad Anders, Ihonen Jari, Schwartz Stephan and Lindbergh Göran, SPFC research at Applied Electrochemistry, KTH, Sweden, Presentation given at the IEA/Annex XI-meeting in Portland, USA, November 3-4, 2000.

Jaouen Frédéric, Investigation of the cathode in the polymer electrolyte membrane fuel cell. Oral presentation at the 4th Nordic Symposium on Hydrogen and Fuel Cells for Energy Storage, Helsinki, Finland, December 4-5, 2000.

Ihonen, J., PEMFC research at KTH - single cell and stack development. Oral presentation held at the 4th Nordic Symposium on Hydrogen and Fuel Cells for Energy Storage, Helsinki, Finland, December 4-5, 2000.

H. Ericson, P. Gode, J. Ihonen, A. Strandroth, N. Walsby, P. Jacobson P., G. Lindbergh, M. Paronen, F. Sundholm, G. Sundholm, Degradation studies of PVDF-(g)-PSSA membranes for fuel cell applications. Presentation at "the Nordic Polymer Days", Stockholm, Sweden, June 13-15, 2001.

K. Dannenberg, S. Enbäck, P. Gode, J. Ihonen, F. Jaouen, G. Lindbergh, A. Lundblad and G. Sundholm, Modelling of PEFC electrodes and cells, 1st European PEFC Forum, Luzern, Switzerland, July 2-6, 2001.

A. Lundblad and J. Ihonen, Formation of microstructure and pore morphology during MEA fabrication, 1st European PEFC Forum in Luzern, Switzerland, July 2-6, 2001.

J. Ihonen, F. Jaouen, G. Lindbergh, A. Lundblad and G. Sundholm, Investigation of the structure of the Membrane Electrode Assembly for SPFC, 4th international symposium on new materials for electrochemical systems, Montréal, Canada, July 9-13, 2001.

P. Gode, G. Lindbergh, J. Nordlund and G. Sundholm. A new method to study permeation of gases in proton conducting membranes. presentation at the joint international 200th ECS and 52nd ISE meeting, San Francisco, September, 2001.

J. Ihonen, F. Jaouen, G. Lindbergh, A. Lundblad and G. Sundholm, Investigation of Mass-Transport Limitations in the Solid Polymer Fuel Cell Cathode, presentation at the joint international 200th ECS and 52nd ISE meeting, San Francisco, USA, September 2001.

H. Ericson, P. Gode, J. Ihonen, A. Strandroth, N. Walsby, P. Jacobson, G. Lindbergh, M. Paronen, F. Sundholm and G. Sundholm, Degradation studies of PVDF-(g)-PSSA membranes for fuel cell applications, presentation at the NERP workshop: New materials and technologies for polymer electrolyte fuel cells, Helsinki, September 27-28, 2001.

Frédéric Jaouen, Göran Lindbergh, Katarina Wiezell, Transient Techniques for Investigating the PEFC Cathode, poster presented at the 53rd ISE meeting, Düsseldorf, September 2002.

Peter Gode, Frédéric Jaouen, Göran Lindbergh, Anders Lundblad, Göran Sundholm, Influence of ionomer content in PEFC cathode active layer on pore morphology and performance, poster presented at the 53rd ISE meeting, Düsseldorf, September 2002.

P. Gode, J. Ihonen, G. Lindbergh, G. Sundholm, M. Paronen, F. Sundholm, N. Walsby, H. Ericsson, A. Strandroth, Degradation Studies of PVDF-g-PSSA Membranes for Fuel Cell Applications, poster presented at the 53rd ISE meeting, Düsseldorf, September 2002.

P. Gode, F. Jaouen, G. Lindbergh, A. Lundblad och G. Sundholm, Tillverkning och karakterisering av PEFC katoder, Bränsleceller och batterier – aktuell högskoleforskning i Sverige, 30 September - 1 Oktober, 2002, Malmö.

P. Gode, J. Ihonen, G. Lindbergh, G. Sundholm, M. Paronen, F. Sundholm, N. Walsby, H. Ericsson, A. Strandroth, Degradation Studies of PVDF-g-PSSA Membranes for Fuel Cell Applications, Bränsleceller och batterier – aktuell högskoleforskning i Sverige, 30 September - 1 Oktober, 2002, Malmö.

Frédéric Jaouen, Sébastien Marcotte, Jean-Pol Dodelet, Göran Lindbergh, Effect of the carbon support on the performance of non-noble metal-based cathode catalysts for low temperature fuel cells, E-MRS 2002 Spring Meeting, June 18-21, 2002 - Strasbourg (France).

Frédéric Jaouen, Sébastien Marcotte, Jean-Pol Dodelet, Göran Lindbergh, Effect of the carbon support on the performance of non-noble metal-based cathode catalysts for low temperature fuel cells 4th international conference on electrocatalysis, Como, Italy, 23-25 Sept 2002.

M. Noponen, J. Ihonen, A. Lundblad och G. Lindbergh, Strömfördelning på en 54 cm² PEFC cell, Bränsleceller och batterier – aktuell högskoleforskning i Sverige, 30 September - 1 Oktober, 2002, Malmö.

M. Noponen, J. Ihonen, A. Lundblad och G. Lindbergh, Current distribution measurements in net-type flow geometry PEMFC, poster presented at Norfa Summer school, Göteborg, August 2002.

S, Schwartz, J. Ihonen, A. Lundblad och G. Lindbergh, Utveckling av en 1 kW polymerbränslecellstapel (PEFC), Bränsleceller och batterier – aktuell högskoleforskning i Sverige, 30 September - 1 Oktober, 2002, Malmö.

S. von Kraemer, M. Puchner, P. Jannasch, A. Lundblad and G. Lindbergh Proc. of 209th Electrochemical Society Meeting, Denver, USA, 601, 173 (2006).

S. von Kraemer, B. Lafitte, G. Lindbergh and P. Jannasch Proc. of the Second European Fuel Cell Technology and Applications Conference (ASME), Rome, Italy, EFC2007-39251 (2007).

S. von Kraemer, M. Puchner, P. Jannasch and G. Lindbergh American Chemical Society: Advances in Materials for PEMFC Systems, Asilomar, CA, USA, 48-I (2005).

S. von Kraemer, G. Lindbergh, A. Lundblad, B. Lafitte, and P. Jannasch American Chemical Society: Advances in Materials for PEMFC Systems, Asilomar, CA, USA, 45-B (2007).

S. von Kraemer and G. Lindbergh, 1st Carisma Conference: Progress in MEA Components for Medium and High Temperature Polymer Electrolyte Fuel Cells, La Grande Motte, France (2008).

S. von Kraemer, K. Wikander, G. Lindbergh and A. E. C. Palmqvist EU Carisma Workshop: Degradation Issues for MEAs and Their Components, Grenoble, France, PP-2 (2007).

A. Sagidullin, S. von Kraemer, I. Furó and G. Lindbergh EU Carisma Workshop: Ionomer Membranes for Medium and High Temperature PEM Fuel Cells, Stuttgart, Germany, PP-16 (2007).

5.5 Stack

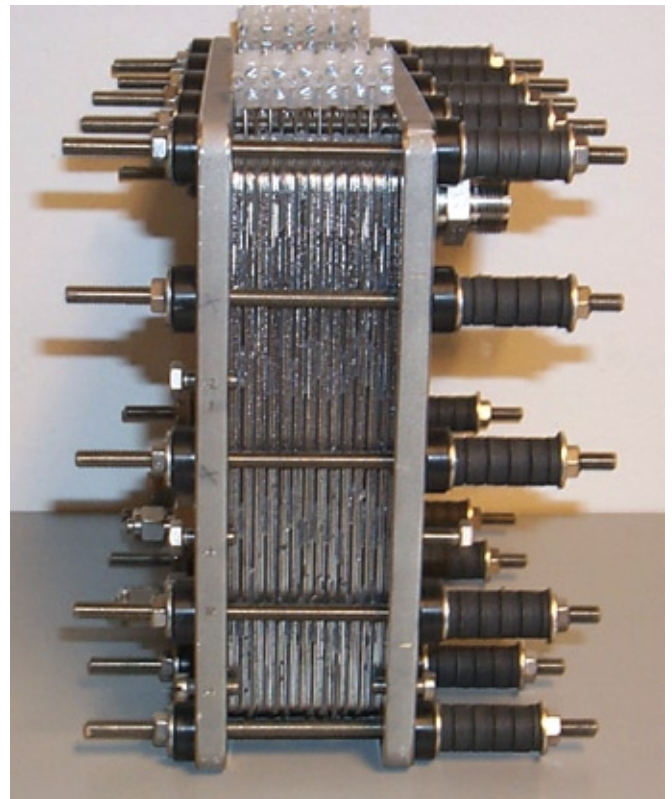
5.5.1 Konstruktion

Göran Lindbergh, KTH

En bränslecellsstack består av ett antal celler som integrerats med anordningar för gasdistribution, kylning och eventuellt uppfuktning. Varje cell består av en membran med elektroder (MEA) tillsammans med ett gasdiffusionsskikt och strömtilledare. För att åstadkomma en bränslecellstack med goda prestanda krävs en djup förståelse av såväl elektrokemin i cellen som strömning, massöverföring och värmeöverföring i och mellan stackens olika komponenter.

Stacken måste vara väl integrerad med sitt kringssystem för att en hög effektivitet skall kunna uppnås. Stackdesignen beror därmed på ett antal faktorer som bestäms av kringssystemet, såsom primärt bränsle, driftstemperatur, gastryck etc. Krav och begränsningar hos cellens komponenter, huvudsakligen MEA är interna faktorer av stor betydelse. Bränslecellen kan således inte optimeras enskilt utan måste konstrueras med tanke på kringssystem, cellflöden och MEA-karakteristika.

Under slutet av fas 1 byggdes ett par bränslecellsstackar. Den första var en 54 cm^2 stack och använde egentillverkade MEA med $0,1 \text{ mg Pt/cm}^2$. Stacken uppnådde för den tiden normala prestanda (400 mA/cm^2 med luft och 700 mA/cm^2 med syrgas vid 60°C och $0,6 \text{ V}$ cellspänning). Den andra var på 1 kW (fig 28) och använde sig av kommersiella MEA med $0,3 \text{ mg Pt/cm}^2$. Stacken testades av Volvo och visade sig ge $1,5 \text{ A/cm}^2$ vid $0,6 \text{ V}$ och 60°C med H_2/Luft . Resultaten motsvarade en energieffektivitet på lite mer än 1 kW/l , vilket vid den tiden var det högsta värde vi kunde finna i världen.



Figur 28 1 kW bränslecellsstack.

5.5.2 Test

Per Ekdunge, Powercell

För att kunna skapa en så optimal celldesign som möjligt är det viktigt att kunna testa effekten av olika kritiska parametrar. Under 2003 införskaffade Volvo en första teststation (fig 29) som driftsattes för detta ändamål. Utrustningen var designad för att just kunna studera enskilda celler eller ett fåtal celler tillsammans ("småstackar"). Flöden och temperatur, för både gaser och kylmedium, går att variera för att utvärdera olika konstruktioner och material. Senare kompletterades testlaboratoriet med fler utrustningar.

Som ett komplement till testning av olika celldesigner har simuleringar varit en nyckelaktivitet för att ytterligare optimera designen. Flöden och värmebalanser kan då studeras på ett helt annat sätt än i en experimentell uppställning. Dessa simuleringar har bl.a. visat på hur viktig flödesbilden är för att man skall kunna få det tryckfall man önskar över stacken/cellen.



Figur 29. Teststation för enskilda celler eller småstackar.

5.6 Bränsleförsörjning och lagring

I omvärlden har betydande framsteg gjorts vad gäller framställning av vätgas via elektrolysörer och trycksättning av vätgasen. Effektiviteter på över 80% har demonstrerats och man siktar ännu högre. Det innebär att de hinder för bränslecellsteknologin, som bristen på distribuerad vätgas var i slutet på 1990-talet har minskat.

Vår forskning på detta område har varit relativt begränsad, och i huvudsak inriktad på vätgaslagring, dels i metall-organiska föreningar, dels i metallhydrider. Den avslutades under fas 2, dvs 2006.

5.6.1 Lagring i metall-organiska föreningar

Patrik Johansson, Chalmers

Vätgaslagring av metall-organiska nätverksstrukturer (MOFs) har studerats via kvantmekaniska beräkningar. Den mest studerade av dessa, MOF-5, kan lagra ca. 4.5 vikts% H vid 78 K. BASF marknadsför f.n. MOFs under namnet BASOSTOR. Som mått på möjligheten för vätgasadsorption på interna ytor kan anges att 2g av en MOF har en yta som motsvarar en fotbollsplan och därmed en enorm teoretisk gaslagringskapacitet. Vårt projekt har undersökt hur vätgasen adsorberas på ytor i olika MOF-strukturer och därmed lagt grunden för förbättrade MOFs m.a.p. maximal lagringskapacitet (volym och viktsbaserad), minimalt självläckage och minimerad kostnad etc.

När en vätgasmolekyl adsorberar till en yta i en MOF är det huvudsakligen genom fysisorption och van der Waals (vdW)-växelverkan och detta är mycket krävande att beräkna korrekt för komplicerade material. De första beräkningsstudierna på MOFs, gjorda under de senaste fem åren, använder till stor del täthetsfunktionalteori som bas, men denna ger tyvärr inte ens i teorin en korrekt

fysikalisk behandling av vdW-växelverkan och därmed inte heller kvantitativa resultat för styrkan i vätgas: MOF. Därför har ett annat, delvis nytt, sätt att modellera dessa material applicerats och utvärderats för att ge en konsistent bild av vätelagring i metall-organiska nätverksstrukturer. Dessa beräkningar har visat på rollen för vätgasadsorption av aromaticitet, som är möjlig att förändra, i den organiska delen av MOF, och hur olika adsorptionslägen till metalldelen av MOF-5 kan besättas och kvalitativt identifieras.

Forskningen som intierades (och avslutades) under MISTRA fas 2 erhöll m h a uppnådda resultat vidare finansiering från Ångpanneföreningens forskningstiftelse samt är nu en del av ett ramprogram med finansiering från FORMAS. Nya studier på framförallt ”dekorerade” MOFs och alternativa material är nya forskningsspår.

5.6.2 Lagring i metallhydrider

Dag Noreus, Stockholms Universitet

Utvecklingen av metallhydrider följer två spår:

- Förbättra korrosionsstabilitet och robusthet hos metallhydriderna för att underlätta användbarheten.
- Ökning av lagrad viktprocent väte genom att använda lättare metaller som kan binda fler väteatomer.

Metallhydrider lagrar stora mängder vätgas inom en liten volym, eftersom elektronerna i den relativt stora H₂ molekylen binds till de omgivande metallatomerna, när molekylen delas och väteatomerna lagras in i hålrummen mellan metallatomerna. Väteatomernas bindningsstyrka till metallgittret bestämmer hur lätt vätgasen sedan kan avges, d v s till vilken temperatur metallhydriden måste värmas för att avge vätgasen vid ett visst tryck. För att ett praktiskt fungerande metallhydridlager bör vätgasen helst avges

omkring rumstemperatur och i de flesta tillämpningar skall metallhydriden inte behöva värmas över 100 - 150 °C. Metallhydrider fick sitt storskaliga genombrott under 90-talet i metallhydridelektroden i laddningsbara NiMH batterier.

I konventionella, kommersiella metallhydrider, som t. ex. används i NiMH batterier, justeras väteatomernas bindningsstyrka genom att anpassa sammansättningen i metallegeringen.

De mer elektropositiva metallatomer till vänster i periodiska systemet (V, Ti, La...) bildar stabila hydrider där väteatomerna binds hårt till metallatomgittret. Genom att legera in metaller från höger sida av periodiska systemet (Mn, Co, Ni...), som inte bildar stabila hydrider, kan vätebindningsstyrkan minskas. Metallhydriden släpper då ifrån sig vätgasen vid lägre temperaturer. Den volymetriska lagringskapaciteten är hög, ofta dubbelt mot flytande väte LH₂. Men eftersom metallerna som används är relativt tunga blir den viktsmässiga lagringskapaciteten 1- 2 wt%.

Denna typ av hydrider har emellertid utvecklats från att ha varit luftkänsliga och brandfarliga pulver till att bli mycket hanterbara material som kan användas i korrosiva och oxiderande miljöer i t. ex. som väteelektroder i laddbara NiMH batterier och alkaliska bränsleceller, där de är i kontakt med starkt korroderande batterielektrolyter. Metallhydrider som tidigare hanterades i grammängder under skyddsatmosfär i laboratoriemiljö bearbetas numera tonkvantiteter och hanteras i luft. Denna utveckling är resultat av att man lärt sig att skapa passiviserande skyddande skikt på metallhydriden i kombination med att kristallstorlek och kornstorlek kan kontrolleras. Denna utveckling har gjort NiMH batteriet till en tåligt, högeffektsbatteri som är en förutsättning för den snabba introduktionen av HEV-fordon. De grundläggande forskningsgenombrotten skedde på 80-talet. Och det kommersiella genombrottet för denna tillämpning kommer nu, mest beroende på att

marknaden har saknats för dessa produkter. NiMH batterier för elektronik branschen kom redan i början på 90-talet. En vidareutveckling av detta har vi gjort genom att ta fram metallhydrider som är så pass okänsliga för fukt att de kan användas under vatten. Det underlättar system som lagrar vätgas direkt från en elektolysör för senare användning i en bränslecell i och med att torkning och återfuktningen av vätgasen kan förenklas eller elimineras.

För att komma vidare och öka den viktsmässiga lagringskapaciteten försöker man använda de lättaste men samtidigt också de mest elektropositiva metallerna längst till vänster i periodiska systemet. (Li, Na, Mg...) Dessa ämnen bildar mycket stabila hydrider men är samtidigt svåra att legera med metaller till höger i periodiska systemet. Vissa framgångar har gjorts med att kombinera dem med p-elementen ännu längre till höger. I alanater som NaAlH₄ är det åtkomliga väteinnehållet nästan 5 wt% vid temperaturer kring 150°C. Kinetiken är dock dålig och höga tryck behövs för återhydreringen. Förbättringar har varit möjliga genom upptäckten att dopning med tidiga övergångsmetaller (TM) som V och Ti kan snabba upp reaktionskinetiken. Den bakomliggande mekanismen är dock ännu så länge okänd. Väteinlagringen respektive frisättningen är för dessa hydrider också förknippad med en större omlagring av metallatomgittret, som även inbegriper att faser separerar ifrån varandra under reaktionerna. Hypoteser, om att de tillsatta metallerna underlättar bildning och spjälkning av vätemolekylen (H₂) alternativt underlättar diffusionen i metallhydriden eller underlättar de nödvändiga omlagringarna i metallatomgittret, testas av olika forskargrupper. Efter några år av positiv utveckling har dock intresset för alanater svalnat något. Problem har uppstått med att behålla de positiva effekterna av TM tillsatsen vid långtidscykling samt att alanaterna är allmänt korrosiva och praktiskt svårhanterliga. Problemen borde dock kunna lösas när ett mer reellt behov av vätelagring börjar påskynda en mer tillämpad utveckling av dessa material.

En annan möjlighet att nå väterika inte allför stabila hydrider är att använda de lätta metallerna som elektrondonatorer för att bilda formellt lågvalenta övergångsmetall-vätekomplex. Hydrider är känsliga för störningar i gitterstrukturen, vilket kan utnyttjas för att hitta metoder där en destabilisering av gittret kan göra vätet mer lättåtkomligt. Väteatomen som består av kärna med enbart en proton är begränsad att bilda som mest ett k-skal när den bildar en hydridjon (H⁻). Elektronaffiniteten för att göra detta är signifikant lägre än för att fylla den konventionella oktetten i valensskalet i mer vanliga föreningar. Detta gör väte till en mycket polariserbar partner i kemisk bindning. Möjligheten att kunna varieras mellan H⁺ - H⁻ - H⁻ med en mycket lätt deformbar elektrontäthet, har intressanta konsekvenser för många fastfasfenomen. Dessutom visade det sig vara speciellt viktigt för stabiliseringen av metallhydrider. För hydrider baserade på formellt lågvalenta övergångsmetall-vätekomplex är effekterna extra stora som t. ex. i Na₂PdH₂, NaBaPdH₃, Ba₂PdH₄, Mg₂NiH₄ (Olofsson et al 1998, Olofsson-Mårtensson et al 1999, Olofsson-Mårtensson et al 2000, Blomqvist et al 2002, Häussermann et al 2002).

Dessa hydrider är uppbyggda av elektronrika formellt nollvalenta övergångsmetall-väte komplex. Normalt stabiliseras lågvalenta oxidationstillstånd hos centralatomen med hjälp av s. k. ”back donation” av elektrondenstitet till antibindande orbitaler på liganden. Med väte som ligand är detta ej möjligt. Istället kan väteatomens lätt deformbara elektrontäthet användas som en mekanism för att föra ut elektrontäthet från centralatomen till omgivande motjoner som ett sätt att stabilisera strukturen. En sådan mekanism blir emellertid mycket känslig för störningar av gitterstrukturen och är beroende av kristallstorlek, kristallinitet och närvaro av störande dopämnen. Under projektet har vi försökt undersöka hur viktig dessa effekter är för ett antal system, både tidigare kända och nya system som syntetiserats under projektet. I en studie av serien Mg₂NiH₄, MgCaNiH₄, MgSrNiH₄ och den nyligen av oss syntetiserade MgBaNiH₄ har vi kunnat förstå hur magnesium bidrar till stabiliteten.

Med sin starkt polariserande inverkan på hydridjonerna hjälper den till att stabilisera NiH₄-komplexet. Genom att försvaga magnesiums inverkan med t. ex. dopning med alkalimetaller har vi hittat ny intressanta system för praktisk vätelagring som t. ex. Na₂Mg₂NiH₆. Här motverkar alkalimetallen magnesiums stabilisering av komplexet.

Magnesiumhydrid MgH₂ har länge varit av intresse för vätelagring. Lagringkapaciteten är hög, 7.6 wt%. Men reaktionskinetiken är dålig både för uppladdning och urladdning. Stabiliteten är också för hög, så att temperaturer över 400°C är behövs för att få ut vätet vid praktisk hanterbara tryck av åtminstone några bar. Nu kan emellertid ett genombrott vara på väg genom kombinationen av resultat från flera håll:

1) TM tillsatser till magnesiumhydrid t. ex. genom att intensivt blanda eller mala pulver av magnesium/magnesiumhydrid med olika TM eller föreningar med TM ger en förbättrad reaktionskinetik. Dock påverkas inte stabiliteten med avseende på väteuppladdning eller urladdning.

2) Med högtrycksyntes har vi i samarbete med grupper i Japan framställt metastabila TM dopade magnesiumhydrider med typiska sammansättningar Mg₆₋₇(TM)H₁₂₋₁₄ (TM = Ti, Zr, Hf, V, Nb och Ta) (Kyoj et al 2004, sato et al 2006). Alla har en ytcentrerad kubisk struktur som skiljer sig från magnesiumhydridens normala hexagonala rutilstruktur. Vid upphettning släpper dessa föreningar ifrån sig sitt väte ca 150°C tidigare än vanlig magnesiumhydrid. Teoretiska beräkningar i samarbete med univertitet i Island visar att jämviktstrycket 1 bar skulle motsvara en temperatur av 60°C (Stier et al 2005). I början av projektet kunde vi inte göra reversibla system då övergångsmetallerna (TM) separerar ut ur gittret när hydriden desorberas. Men nu förstår vi hur detta kan förhindras igenom att behålla ungefär hälften av vätet i hydriden. Då bildas stabila TM-hydrid liknande element som hjälper till att hålla ihop strukturen.

3) Forskargrupper vid Philips och universiteten i Eindhoven och Amsterdam funnit att tunna förångade skikt av motsvarande metallblandningar kan cyklas elektrokemiskt till samma höga vätelagringskapaciteter. I de tunna skikten stoppar tydligen substratet separationen av metallerna vid cyklingen. Räknat på metallinnehållet i skikten motsvarar lagringskapaciteten 1 500-1 700 mAh/gram vilket är 5 ggr den i konventionella batterilegeringar. (Niessen et al 2005, Borsa et al 2006) I samarbete med dessa forskare har vi hittat kopplingen mellan de film- och högtrycksyntetiserade hydriderna (Moser et al 2009). Målet är att kunna tillverka motsvarande hydrider i bulk mängder både för gaslagring och elektrokemisk lagring.

5.6.3 Produktion

Någon direkt forskning på vätgasproduktion har inte bedrivits inom programmet, men vi har bevakat utvecklingen inom området. Den är ju en av nycklarna till bränslecellsteknologin. Idag görs den mesta vätgasen genom reformering av naturgas. Det blir i dagsläget billigast och kan hjälpa till att överbrygga hindren mot en utbyggd infrastruktur. Samtidigt forskas det en hel del på att göra produktionen av vätgas fossilbränsleoberoende. Det finns två huvudspår: reformering av biobränslen och elektrolys av vatten. Elektrolysörerna har blivit billigare och effektivare och man kan komma upp i verkningsgrader över 80 %. Dessutom kan man direkt få trycksatt vätgas, så att man slipper kompressorer.

5.6.4 Referenser

- M. Olofsson, M. Kritikos and D. Noréus, *Inorg. Chem.* 37 (1998) 2900.
- M. Olofsson-Mårtensson, M. Kritikos and D. Noréus, *J. Am. Chem. Soc.* 121 (1999) 10908.
- M. Olofsson-Mårtensson, U. Häussermann, J. Tomkinson and D. Noréus, *J. Am. Chem. Soc.* 122 (2000) 6960.
- H. Blomqvist and D. Noréus, *J. Appl. Phys.* 91 (2002) 5141.
- U. Häussermann, H. Blomqvist and D. Noréus. *Inorg. Chem.* 41 (2002) 3684.
- D. Kyoj, T. Sato, E. Ronnebro, N. Kitamura, A. Ueda, I. Atsushi, M. Ito, S. Katsuyama, S. Hara, D. Noréus and T. Sakai. *J. Alloys and Compounds* 372 213 (2004).
- T. Sato, D. Kyoj, E. Rönnebro, N. Kitamura, T. Sakai and D. Noreus. *J. Alloys and Compounds* 417 230 (2006).
- W. Stier, L. G. Camargo, F. Oskarsson and H. Jonsson. Prepr. Pap. – *Am. Chem. Soc., Div. Fuel Chem* (50)1, (2005)15.
- R. A. H. Niessen and P. H. L. Notten, *Electrochem. Solid-State Lett.* 8, A534 (2005).
- D. M. Borsa, A. Baldi, M. Pasturel, H. Schreuders, P. Vermeulen, P. H. L. Notten, B. Dam, and R. Griessen, *Appl. Phys. Lett.* 88, 1 (2006).
- D. Moser, D.J. Bull, T. Sato, D. Noréus, D. Kyoj, T. Sakai, N. Kitamura, H. Yusa, T. Taniguchi, W.P. Kalisvaart, P. H. L. Notten, *Journal of Materials Chemistry* 19 (2009) 8150.

6 Företag i Sverige i bränslecellsbranschen

Det finns ett stort antal företag i Sverige som berörs av en introduktion av bränslecellteknik. Det finns materialleverantörer, komponenttillverkare, stack- och systemtillverkare, samt de, som kan komma att använda bränsleceller i sina produkter. Dessutom krävs utbildare, servicepersonal och konsulter av olika slag. Nedan presenteras några av de företag som har positionerat sig i bränslecellsbranschen. Många har varit aktiva inom Mistras bränslecellsprogram, några har vi haft kontakt med via programmets olika aktiviteter.

6.1 Materialleverantörer

6.1.1 Outokumpu

Outokumpu är en global aktör inom rostfritt stål som verkar inom ett trettiotal länder med cirka 8 000 anställda. Huvudkontoret ligger i Espoo, Finland. Koncernens metallprodukter, tjänster och teknologi används världen över av kunder inom många olika industrier. I verken i Finland, Sverige, Storbritannien, USA och Nederländerna tillverkas ett brett utbud av produkter i rostfritt stål, till exempel varm- och kallvalsade band och plåt, rör och rördelar, långa produkter samt ett omfattande utbud av tillbehör. Produkterna finns i olika kvaliteter, dimensioner och ytbehandlingar.

Rostfritt stål skyddas av ett mycket tunt skikt av framförallt kromoxider. Vid mekanisk skada kan det omedelbart självläka, och gör det på så vis underhållsfritt. Denna egenskap gör att rostfritt stål kan användas i en rad

krävande miljöer, från bestick till kemisk industri och olje- och gasindustrin. Genom den stora mängd olika rostfria stål som finns kan korrosionsmotståndet och de mekaniska egenskaperna anpassas till applikationen.

Dessa egenskaper och det faktum att rostfritt stål är fullständigt återvinningsbart gör att det är ett mycket intressant material i framtidens energiapplikationer, där den begynnande bränslecells-industrin spelar en stor roll. Outokumpu ser applikationsområden som bipolära plattor, men också kringutrustning såsom värmeväxlare, rör och annan kringutrustning nya möjligheter att tillverka komponenter i rostfritt stål för både PEFC såväl som andra typer av bränsleceller.

Outokumpu har inom Mistras program för bränsleceller fått möjlighet att in situ, dvs i fungerande celler, undersöka olika kvaliteter av rostfritt stål som bipolära plattor i PEFC. Eftersom den bipolära plattan ska vara lätt att forma, korrosionsresistent, mekaniskt stabil, ha en hög elektrisk ledningsförmåga till en rimlig kostnad, är detta en utmaning, men genom det stora nätverk som Mistras bränslecellsprogram innebär har man kunnat samarbeta med intressenter inom svensk industri för att framförallt förbättra stålytans ledningsförmåga med bibehållet korrosionsmotstånd. Därför är Mistras bränslecellsprogram ett viktigt kontaktnät för Outokumpu inom dessa nya energitillämpningar, där högskola och näringsliv får möjlighet att samarbeta och utbyta idéer och erfarenheter av forskning inom detta område.

Inom programmet har Outokumpu valt ut, testat och levererat olika stålqualiteter till bipolära plattor. Tillsammans med Morhic och Timcal har man format och ytbehandlat bipolära plattor som sedan testats på KTH.

6.1.2 Sandvik

Sandvikskoncernen är verksam inom tre huvudområden:

- Verktyg i hårdmetall och snabbstål för metallbearbetning samt ämnen och komponenter i hårdmetall och andra hårda material.
- Maskiner och verktyg för bergavverkning.
- Rostfria och höglegerade stål, specialmetaller, motståndsmaterial samt processsystem.

Sandvik har inriktat sig på rostfritt stål till SOFC-bränsleceller för stationära ändamål. Denna verksamhet har legat utanför Mistras bränslecellsprogram.

6.1.3 Svenska Tanso

Svenska Tanso AB är ett högteknologiskt SME-företag och distributör åt Japanska Tanso, som är världsledande tillverkare av syntetisk grafit. Det etablerades 1981 och är aktivt inom följande produktområden:

- elektrodmaterial och tillbehör för EDM
- grafitpulver, syntetiskt- och natur-
- fiber/processmaterial för kompositområdet
- vissa metaller och kemikalier

Företaget har en avancerad maskinverkstad för bearbetning av grafit. Svenska Tanso AB har deltagit i Mistra-programmet och levererat material till bipolära plattor och delar till segmenterade celler. Genom programmet har företagets kunskap om bränslecellsmarknaden ökat och programmets nätverk fått tillgång till en viktig specialkompetens.



Figur 30 Verkstadsbild från Svenska Tanso.

6.1.4 Woxna Graphite/Tricorona/Timcal

Woxna Graphites fyndighet av naturlig kristallin grafit (Kringelgruvan) är en relativt ny svensk grafitgruva. Brytningen påbörjades 1997 men gruvan ligger sedan några år tillbaka i malpåse och försäljning sker endast från lager. I början av programmet fann man att den grafit som redan brutits och fanns tillgänglig i gruvan kunde renas så att den gick att använda till batterielektroder. Fördelen med detta var att kostnaden blev mycket lägre än för syntetisk grafit. Grafit är ju även aktuell som material i bränsleceller, vilket innebar att Woxna, som ägs av börsnoterade miljökoncernen Tricorona AB, kan bli en svensk leverantör av högren kristallin grafit. Woxna Graphite ingick under etapp 2 ett avtal med den Kanadensisk/Schweiziska koncernen Timcal Graphite & Carbon Ltd, som bl.a innebar ett forsknings-samarbete. På så sätt kom Timcal att medverka i programmet.

Timcal är en världsledande producent av syntetisk och naturlig grafit samt kolbaserade pulver och dispersioner. Produktionen omfattar hela kedjan från råvara till högt förädlade material för högteknologisk industri. Företaget startades 1908 och har idag produktionsanläggningar i Kanada, Belgien, Schweiz, Kina och Japan.

Inom MISTRA-programmet har Timcal arbetat med att ta fram grafitbaserade dispersioner för ytbehandling av flödesplattor av rostfritt stål. Avsikten är att skydda plattorna och dessutom ge dem ett elektriskt ledande ytskikt. Den optimala dispersionen skall ha hög vidhäftningsförmåga på stål, hög elektrisk ledningsförmåga samt låg kontaktresistens.

Timcal har även levererat kolmaterial till katalysatorgruppens försök. Mycket små kolpartiklar används där som support för de ultrafina platinapartiklar som utgör själva katalysatorn, d.v.s. där elektrisk ström bildas.

6.2 Komponenttillverkare

6.2.1 Catator

Catator AB grundades 1990 av en grupp forskarstuderande vid Lunds universitet. Catator utvecklar -ofta i samarbeten med andra företag - katalysatorer och katalysatorsystem. Man har kunder inom flera områden: miljö kemi, petrokemi, processkemi, läkemedel och energi.

Genom dotterbolaget Catex AB säljer man reformers till bränsleceller. I reformers omvandlas vanliga bränslen, t.ex. biogas till i huvudsak vätgas och koldioxid.

6.2.2 Höganäs

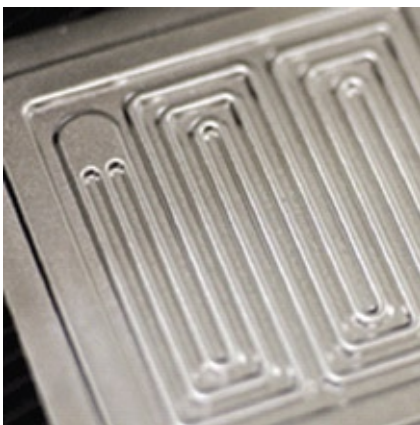
Höganäs AB är världens största tillverkare av metallpulver. Med pulvermetallurgi tillverkas olika komponenter för tillverkningsindustrin. Höganäs deltog i fas 1 och var då inriktade på utvecklingen av legeringar till Nickelmetallhydrid-pulver. Med snabbstelnande atomisering kunde man få en mycket homogen legeringssammansättning samt erhålla gynnsamma kristallstorlekar och kristallformer vilket i sin tur gav såväl en bra aktiv slutyta på metallhydrid pulvret i den färdigaktiverade NiMH cellen som en god korrosionsstabilitet. När den enda svenska NiMH-batteritillverkaren upphörde med sin verksamhet inför fas 2 avslutades utvecklingsarbetet av NiMH pulver i programmet.

Höganäs är en potentiell leverantör av komponenter till bränsleceller och kringutrustning. Företaget har även deltagit i utvecklingen av SOFC-bränsleceller, men utanför Mistras bränslecellsprogram.

6.2.3 Morphic technologies

Morphic är en svensk koncern med verksamhet inom Bränsleceller och Vindkraft. Kärnverksamheten inom koncernen är indelad i två verksamhetsområden; bränsleceller och vindkraft. Huvudkontoret finns i Stockholm.

Ett av koncernens dotterbolag, Cell Impact AB, riktar sig direkt till den internationella bränslecellsmarknaden och erbjuder produktion av kundspecifika bipolära plattor i främst stål, se figur 31.



Figur 31 Exempel på bipolär platta producerad av Cell Impact AB.

Morphic har utvecklat en teknik som gör det möjligt att kostnadseffektivt producera bipolära plattor i stora volymer med hög produktionstakt. Tekniken medger prägling av komplexa flödesgeometrier i de flesta stålsorter och legeringar samt i grafit. Den patenterade metoden utnyttjar rörelseenergin från en hydrauliskt driven slagkolv. Materialet placeras i ett formningsverktyg, i princip likvärdigt med ett verktyg för konventionell varm- eller kallformning, som sedan utsätts för ett snabbt, hårt slag. Metallen i plattan formas under ett mycket kort ögonblick och fyller ut verktyget. Själva formningen sker på ett par millisekunder och hela formningscykeln tar mindre än 50 millisekunder.

En första automatiserad produktionsanläggning för flödesplattor i stål togs i drift våren 2006 med en kapacitet på 1 platta per sekund. En andra anläggning, dimensionerad efter specifika krav från fordonsindustrin har byggts och driftsatts.

Inom MISTRAs bränslecellsprogram har Morphic bidragit med kunskaper och resurser för tillverkning och tillverkningsanpassning av bipolära plattor. Morphic har även producerat de formade plattor som har använts inom projektet. Morphic har i programmet främst verkat tillsammans med materialleverantörerna inom programmet; Svenska Tanso, Timcal, Outokumpu, samt Powercell Sweden AB och KTH.

6.2.4 myFC

myFC AB utvecklar, producerar och säljer bränsleceller till mobila konsumentprodukter, såsom mobiltelefoner, laptops, GPS-mottagare och MP-3 spelare. myFCs energilösningar är baserade på myFCs patentskyddade bränslecellsplåster, som kan massproduceras till en låg kostnad och har stor flexibilitet att anpassas till olika produktdesigner.

myFC AB grundades 2005 som spin-off från Kungliga Tekniska Högskolan i Stockholm av en av programmets forskare. Det har nu utvecklats till ett bolag med ett tiotal anställda och med en intressant produktportfölj.

Företaget visar på sin hemsida tre produkter, en laddare för batterier till mobiltelefoner och liknande, ett mindre bränslecellsplåster och ett större för integration i produkter (se figur 32-34).

myFCs intresse för MISTRA programmet gäller framför allt framtagandet av legeringar och ytskikt för att minska kontaktresistanser mellan stål och GDL i bränslecellen.



Figur 32 myFC Outdoor Charger.



Figur 33 myFC:s "B" Series Fuel Cell Battery Extender".



Figur 34 myFC:s "Blade".

Under programmet har olika klämtryck och mönster på klämplattan testats för att utröna deras inverkan på prestanda.

6.2.5 Nolato

Nolato utvecklar och tillverkar polymera komponenter och produktsystem till ledande kunder inom Telecom, fordon, vitvaror, medicinteknik, hygien och andra industrisegment.

Nolato grundades 1938 och har idag drygt 5000 anställda i Sverige, Kina, Ungern, Estland, Malaysia och Japan. Bolaget börsnoterades 1984 och B-aktien är idag noterad på OMX nordiska lista i segmentet Mid Cap.

Nolatos potential i en bränslecellsindustri är effektiv tillverkning av packningar, MEA och polymera komponenter. Det är inom dessa områden man deltagit i Mistras bränslecellsprogram.

Nolato tillverkar bränslecells-komponenter till myFC och har varit initiativtagare till användningen av inkjet-tekniken för tillverkning av membran och MEA. Den möjliggör tillverkning av MEA med hög precision till låg kostnad. Än så länge är tekniken i sin linda vad gäller MEA och membran, men Nolato har stor erfarenhet av inkjet-tekniken, och det verkar motiverat med en fortsatt FoU inom detta område.

6.2.6 Opcon

Opcon är en energi- och miljöteknikkoncern som utvecklar, producerar och marknadsför system och produkter för miljövänlig, effektiv och resurssnål energianvändning. Opcon har verksamhet i Sverige, Kina, Tyskland, Storbritannien och Danmark. Antalet anställda är cirka 380. Aktien är noterad på Nasdaq OMX Stockholm.

I dotterbolaget Svenska Rotor Maskiner (SRM) utvecklar man skruvkompressorer, en typ av roterande displacementskompressor som är mycket kompakt, ursprungligen en svensk uppfinning från SRM. Skruvkompressorn är idag den dominerande för tillämpningar som tryckluft och köldmediekompression. SRM är ledande inom utvecklingen (som licensgivare till de flesta skruvkompressortillverkare i världen) och har dessutom egen tillverkning för bl.a. bränsleceller, under märket Autorotor.

6.3 Stack- och systemtillverkare

6.3.1 ABB

ABB deltog under fas 1 och har därefter haft viss verksamhet vad gäller stationära bränsleceller. Som producent av utrustning för produktion och distribution av el, har företaget länge och i varierande omfattning arbetat med bränsleceller. ABB har deltagit i demonstrationsprojektet i Hammarby Sjöstad, där en bränslecell testats.

På senare år har företaget alltmer fokuserat sin verksamhet på transmission och transformation av el och satsningarna på produktion (t.ex. via bränsleceller) i stort sett upphört. En storskalig introduktion av bränsleceller kräver dock kunskaper inom transmission och transformation och där kan ABB finna en roll som passar denna inriktning. Ett sådant exempel är elmotorer för fordon.

6.3.2 Cellkraft

Cellkraft tillverkar och säljer vätgasdrivna bränslecellssystem av PEFC-typ. Cellkrafts stationära kraftaggregat är lastföljande och startar automatiskt vid behov. De stationära systemen finns i effektstorlekar mellan 50, och 2000 W. Cellkraft har bl.a. sålt ett kraftaggregat till en forskningsstation i Antarktis. Cellkraft deltog i Mistras Bränslecellsprogram under fas 2 och samarbetade bl.a. med Outokumpu, som kunde prova sina rostfria material i Cellkrafts bipolära plattor.

6.3.3 myFC

se beskrivning ovan 6.2.4.

6.3.4 PowerCell Sweden AB

PowerCells vision är att leverera elkraftssystem som är skonsamma för miljön och som går att driva med bränsle som är lättillgängliga. PowerCells elkraftssystem eller APU (Auxiliary Power Unit) har fördelen att kunna drivas med diesel och andra idag konventionella bränslen, men även framtida förnyelsebara bränslen. Företaget har utvecklat en reformer, som transformerar diesel och andra bränslen till vätgas av god kvalitet som sedan omvandlas till elektricitet i en bränslecell. Denna lösning gör därmed att PowerCells bränslecellssystem inte blir beroende av en infrastruktur för vätgas.

PowerCell är en spin-off från Volvo Technology AB. PowerCells första stack koncept bygger delvis på patent, som skapats genom Mistras bränslecellsprogram. PowerCells kärnteknologi är bränsleceller framförallt för reformat samt bränsleomvandlare s.k. reformers.

PowerCell är den största bränslecellstillverkare i Sverige. Under 2009 gjordes en kapitalsatsning i företaget som klassades av det engelska analysföretaget FuelCellToday som en av de tre största bränslecellsinvesteringarna i världen



Figur 35 Marine APU - som tagits fram för transporter på land och vatten. Ett 5 kW system som drivs av diesel, hittills den enda i sitt slag. Systemet två huvudkomponenter är bränsleomvandlaren och bränslecellsstacken.

för året. Från hösten 2009 till våren 2010 växte Powercell från runt 10 anställda till 60. Under 2010 togs nya lokaler i bruk på Hisingen i Göteborg. De nya lokalerna är på 5000m² med plats för kontor, provning, produktion och utveckling.

Kärnverksamheten är utveckling och produktion av ett brett sortiment av: bränsleceller, bränsleomvandlare och kompletta system för internationellt bruk i privat, industri och transport sektorn.

PowerCells roll i programmet har varit central. PowerCell har, speciellt på senare år, varit programmets viktigaste forskningsbeställare.



Figure 36: En konceptbild på en monterad APU på lastbil.

6.3.5 Volvo

Volvo har deltagit i programmet genom Volvo Technology (VTEC) och har en central roll i bränslecellsutvecklingen i Sverige. Koncernen är en potentiell användare av bränsleceller som APU för lastbilar och båtar, samt som drivkälla till båtar. VTEC har ett bränslecells-labb, där man testat bränsleceller och komponenter. VTEC har byggt programmets första stack och apparatur för klämtryckstest. PowerCell bildades som en avknoppning från VTEC. VTEC har anställt flera forskare från programmet.

6.4 Infrastruktur

6.4.1 Linde/AGA

Företaget är en etablerad leverantör av vätgas och utrustning för hantering av vätgas. Vätgas är ju en stor industrigas. Inom bränslecellsområdet har man bl.a byggt tankstationer (se fig 10). Företaget har varit representerat i programstyrelsen.

6.5 Användare

En viktig förutsättning för en svensk bränslecellsindustri är att det finns företag, som kan ta bränslecellerna till marknaden. Förutom Volvo, som nämnts ovan finns en rad företag som kan tänkas använda bränsleceller i sina produkter, såsom Ericsson, Husqvarna, Hägglunds, SAAB, Volvo Cars och Scania.

6.5.1 Ericsson

Ericsson var med i programmets fas 1, och var då mest intresserad av Li-polymerbatterier (LPB). Under fas 1 genomförde Ericsson systemstudier av LPB för telefonapplikationer. En del av denna kunskap användes för att bygga prototyper till 100 mAh LPB. Li-polymerbatterier blev kommersiellt tillgängliga från Japanska leverantörer inför fas 2, så motivet för att vara med i ett fortsatt FoU-program minskade.

Ericsson är en potentiell användare av bränsleceller, dels för kraftförsörjning av mobiltelefoner, dels som reservkraft till basstationer. I ett nyss genomfört examensarbete vid Ericsson och Chalmers jämförs miljö och ekonomi för olika typer av reservkraft för basstationer. Bränslecellsalternativet hävdar sig rätt väl, men ekonomin behöver förbättras något.

7 Tankar om framtiden

Det har under de senaste åren funnits två FoU-program för bränsleceller i Sverige:

Energimyndighetens/Elforsk program för stationära bränsleceller (mellan 2002 och 2008), där det investerats 40 milj från Energimyndigheten och 10 miljoner kr från näringslivet.

Mistras bränslecellsprogram (slutar vid halvårsskiftet 2010), där Mistra har investerat 124 miljoner kronor och näringslivet ungefär samma belopp, mest i form av naturinsatser.

Flera svenska företag har positionerat sig inom en framväxande bränslecellsindustri. Svenska forskare är internationellt erkända.

Om bränsleceller införs frekvent inom transportsektorn och för elproduktion från biogas finns en potential att minska Sveriges totala utsläpp av växthusgaser med cirka 10 %, samt att till 2050 möjliggöra ”nollutsläpp” från fordonssektorn.

Stora satsningar görs sedan länge i USA, Japan, Sydkorea, Kina och Tyskland. EU har nyligen startat ett samlat FUD-program för bränslecellsteknik. Våra nordiska grannländer investerar betydligt högre summor på bränslecells forskning än Sverige, trots att de är mindre.

Vad skall vi göra i Sverige? Det vore mycket olyckligt om den lilla men ändå naggande goda kapacitet vi byggt upp skulle gå om intet. Så länge vi inte vet hur de framtida energisystemen kommer att se ut är det viktigt att bedriva forskning, utveckling och demonstration om och av bränsleceller. Och denna bör till stor del ske i programform så att resurserna utnyttjas väl.

Och förutsättningarna för en framgångsrik bränslecells-FoU är goda. Dessa förutsättningar kan sammanfattas i följande punkter:

- Timing. De tidiga nischmarknaderna har börjat utvecklas. Bränsleceller har sedan 2008 sålts på kommersiella grunder. 2015 beräknas tillverkningen av bränslecellsbilar ta fart. Även om tidpunkter av det slaget har en tendens att förskjutas, innebär det att forskningen redan nu börjar lämna den s.k. ”non-competitive phase” och bli mera stängd. De forskare, som nu forskar på bränsleceller behöver besked nu, för att inte övergå till annan forskning.
- Sverige har en industri, som kan använda bränsleceller i sina produkter. Nyckeln till framgång för bränslecellstillverkarna ligger i närheten till marknader. FoU-verksamhet i programform underlättar teknikspridning.
- Det finns ett etablerat nätverk med kompetenta forskare, företag och myndigheter. Allt finns som behövs för en s.k. ”triple helix”.
- Sverige har en framväxande bränslecellsindustri, som kan exploatera forskningsresultat och ta vara på den kompetens som växer fram. Den svenska bränslecellsindustrin kan vidare få svårt att överleva i Sverige om det inte finns utbildade ingenjörer och forskare att anställa.
- Flera företag är beredda att engagera sig ekonomiskt i ett svenskt bränslecellscentrum, såväl de som deltagit i programmet, som andra.

Vi tror att ett sådant bränslecellsprogram bäst drivs via ett svenskt bränslecellscentrum, som omfattar forskning, utveckling, demonstration och testverksamhet. Då skapas en miljö för samverkan, som även omfattar den svåra övergången mellan forskning och industri. Ett sådant centrum kan bygga vidare på Mistras bränslecellsprogram och vårda det nätverk som skapats. Det skulle kunna

- Bidra till hållbar energiförsörjning
- Generera kunskap och kompetens
- Stärka svenskt näringsliv
- Stärka och underlätta internationellt samarbete
- Skapa en effektiv rollfördelning mellan parterna
- Sprida kunskap om bränslecellers möjligheter och begränsningar.

Vi har haft omfattande diskussioner med potentiella deltagare i detta centrum, såväl producenter av material, komponenter, hela bränsleceller och bränslecellssystem, samt med potentiella användare. Intresset är stort. Verksamhet inom en rad områden har diskuterats:

Användning av bränsleceller

Frågor kan tas upp som underlättar introduktionen av bränsleceller i Sverige och olika hinder och svårigheter belyses. Olika möjliga användningsområden för bränsleceller i Sverige och internationellt kommer att studeras och analyseras. Inom området kan test och demonstrationsanläggningar i Sverige ingå.

Stack och systemutveckling

Frågor angående FoU rörande bränslecellsstackar och system är av intresse. För företagen i Sverige, en del i internationellt ledande position är i första hand PEFC teknik aktuell, på högskolorna även stack- och systemteknik för högtemperaturbränsleceller.

Materialutveckling och tillverkningsteknik

I Sverige finns flera intressenter och ledande större exportföretag som arbetar med materialutveckling och tillverkningsteknik för olika typer av bränsleceller. För dessa företag är det viktigt att samarbeta med högskolorna inom FoU och för utbildning av doktorander så att kompetensen förstärks inom landet.

Komponenter och kringutrustning för bränslecellssystem

Flera intressenter, små och medelstora företag är etablerade på exportmarknaden för leverans av komponenter och kringutrustning till bränsleceller och bränslecellssystem. Utveckling av dessa produkter speciellt anpassning för storskalig industriell tillverkning är nödvändigt för en framtida kommersialisering av tekniken.

Bränsle för bränsleceller

Bränsleceller skall i första hand använda förnybara uthålliga bränslen exempelvis olika typer av biobränslen och vätgas producerat med minsta möjliga CO₂-emissioner. Frågor angående anpassning av bränslecellssystem för att kunna använda lokalt producerade bränslen i Sverige samt ekonomi, distribution, marknad, säkerhet, lagar mm behöver studeras. I Sverige finns fler intressenter gasföretag och komponentleverantörer som har intresse av utveckling av tekniken och marknaden kring bränslen för bränsleceller.

Nu återstår bara att realisera det hela i en programskrivning och i bindande avtal. Detta hoppas vi kan ske till största delen före utgången av 2010.

8 Programfakta

8.1 Programvärd

KTH, Kungliga Tekniska Högskolan

8.2 Programstyrelse

Lars Öjefors, ordf., 1997-2010

Per Ekdunge, Powercell, 2006-2010

Ingemar Grenthe, KTH, 1997-1999

Paul Hammergren, Tricorona, 2003-2010

Magnus Hansson, Ericsson, 1997-2000

Anders Hult, KTH, 2002-2006

Christer Morén, AGA-Linde Gas, 2001-2010

Ivars Neretniks, KTH, 2003-2004

Jan-Gunnar Persson, KTH, 2006-2010

Anders Romare, Volvo, 1997-2000

Jan Tengzelius, Höganäs, 1998-2000

Margareta Wester, AGA och Chalmers, 1997-2000

Göran Wirmark, Volvo 1997- 2006

Britt Marie Bertilsson, adj. i egenskap av Mistra representant

8.3 Programledning

Göran Johansson, Volvo, programchef 2000-2010.

Bertil Nygren, ABB programchef 1997-2000.

Bengt Steen, Chalmers tekniska högskola, vice programchef, kommunikatör 2002-2010

8.4 Budget

Totalt har Mistra bidragit med 124 miljoner kr och företagen med ungefär lika mycket i form av naturinsatser.

8.5 Programmet i sammandrag sedan starten

En bränslecellstack har byggts och demonstrerats

25 doktorer har utexaminerats

14 företag, har deltagit, varav två bildats som följd av programmet

Unikt samarbete mellan fem universitet/ tekniska högskolor och näringsliv

Över 10 patent

Utveckling från forskning till industriell utveckling och kommersialisering

Flera svenska företag har positionerat sig inom området.

Svenska forskare har blivit internationellt erkända.

Cirka 300 vetenskapliga artiklar har publicerats

9 Tidigare publikationer i programmet utöver de som redovisats i kapitel 5

9.1 Artiklar publicerade i vetenskapliga tidskrifter

- [1] Benoît Lafitte, Lina E. Karlsson, Patric Jannasch, Sulfophenylation of Polysulfones for Proton Conducting Fuel Cell Membranes, *Macromol. Rapid Commun.*, 23, 896-900 (2002).
- [2] Patric Jannasch, Recent Developments in High-Temperature Proton Conducting Polymer Electrolyte Membranes., *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, 8, 96-102 (2003).
- [3] L. E. Karlsson, B. Wesslén, and P. Jannasch, Water Absorption and Proton Conductivity of Sulfonated Acrylamide Copolymers., *Electrochim. Acta*, 47, 3269-3275 (2002).
- [4] L. E. Karlsson, P. Jannasch, and B. Wesslén, Preparation and Solution Properties of Amphiphilic Sulfonated Acrylamide Copolymers., *Macromol. Chem. Phys.*, 203, 686-694, (2002).
- [5] K. Wikander, C. Petit, K. Holmberg and M.-P. Pileni, Size control and growth process of alkylaminestabilized platinum nanocrystals: A comparison between the phase transfer and reverse micelles methods, *Langmuir*, 22(10), 4863-4868 (2006).
- [6] K. Wikander, A.B. Hungria, P.A. Midgley, A.E.C. Palmqvist, K. Holmberg, and J.M. Thomas, Incorporation of Pt nanoparticles in ordered mesoporous carbon, *J. Colloid Interface Sci.* 305(1), 204-208 (2007).
- [7] S. von Kraemer, K. Wikander, G. Lindbergh, A. Lundblad and A.E.C. Palmqvist, Evaluation of TiO₂ as catalyst support material for the PEMFC cathode, To be submitted to *J. Electrochem. Soc.* (2007).
- [8] Palmqvist, Anders. E. C., Synthesis of ordered mesoporous materials using surfactant liquid crystals or micellar solutions, *Curr Opin Coll Interface Sci* (8), 145 (2003).
- [9] Birgersson, K. E., Nordlund, J., Ekström, H., Vynnycky, M. and Lindbergh, G., Reduced two-dimensional one phase model for analysis of the anode of a DMFC, *Journal of the Electrochemical Society*, 150(10), A1368-A1376 (2002).
- [10] Vynnycky, M. and Birgersson, K. E, Analysis of a model for multicomponent mass transfer in the cathode of a polymer electrolyte fuel cell, *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 63(4), 1392-1423 (2003).
- [11] Birgersson, E. and Vynnycky, M., A quantitative study of the effect of flow-distributor geometry in the cathode of a PEM fuel cell, *Journal of Power Sources* 153 76-88 (2005).
- [12] F. Jaouen, G. Lindbergh, G. Sundholm, Investigation of mass-transport limitations in the solid polymer fuel cell cathode, Part I: Mathematical model, *J. Electrochemical Soc*, 149 A437 (2002).
- [13] J. Ihonen, F. Jaouen, G. Lindbergh, A. Lundblad, G. Sundholm, Investigation of mass-transport limitations in the solid polymer fuel cell cathode, Part II: Experimental, *J. Electrochemical Soc*, 149 A448 (2002).
- [14] V.P. Zhdanov and B. Kasemo, Kinetics of electrochemical reactions: from single crystals to nm-sized supported particles, *Surf. Sci.* 521, L655 (2002).

- [15] V.P. Zhdanov, Electrochemical reactions on catalyst particles with three-phase boundaries, *Phys. Rev. E* 67, 042601 (2003).
- [16] V.P. Zhdanov and B. Kasemo, Simulation of CO electrooxidation on nm-sized supported Pt particles: stripping voltammetry, *Chem. Phys. Lett.* 376, 220 (2003).
- [17] V.P. Zhdanov and B. Kasemo, One of the scenarios of electrochemical oxidation of CO on single-crystal Pt surfaces, *Surf. Sci.* 545, 109 (2003).
- [18] Birgersson, E., Noponen, M., and Vynnycky, M., Analysis of a two-phase non-isothermal model for a polymer electrolyte fuel cell, to be submitted to *Journal of the Electrochemical Society* (2004)., *Journal of the Electrochemical Society*, 152 (5) A1021-A1034 (2005).
- [19] Birgersson, K. E., Nordlund, J., Vynnycky, M., Picard, C. and Lindbergh, G., Reduced two-phase model for analysis of the anode of a DMFC, *Journal of the Electrochemical Society*, 151 (12) A2157-A2172 (2004).
- [20] Nordlund, J., Picard, C., Birgersson, E., Vynnycky, M. and Lindbergh, G., The design and usage of a visual direct methanol fuel cell, submitted to *J. Appl. Electrochemistry* (2003)., *J. Appl. Electrochemistry*, 34 (8): 763-770 (2004).
- [21] Lina E. Karlsson, Patric Jannasch, Polysulfone Ionomers for Proton-Conducting Membranes: Sulfoalkylated Polysulfones., *J. Membrane Sci.*, 230, 61-70 (2004).
- [21] V.P. Zhdanov and B. Kasemo, Role of the field fluctuations in electrochemical reactions, *Applied Surface Science*, 219, 256-263 (2003).
- [23] Magnus Karlström, Local environmental benefits of fuel cell buses - a case study, *Journal of Cleaner Production*, 13(7), 679-685 (2005).
- [24] Lina E. Karlsson, Patric Jannasch, Polysulfone Ionomers for Proton-Conducting Membranes: 2. Sulfoalkylated Polysulfones and Polyphenylsulfones, *Electrochim. Acta*, 50(9), 1939-1946 (2005).
- [25] M. Noponen, J. Ihonen, E. Birgersson, M. Vynnycky, A. Lundblad and G. Lindbergh, A two-phase non-isothermal PEFC model – theory and validation, *Fuel Cells*, 4(4) 365-377 (2004).
- [26] Gode, P., Jaouen, F., Lindbergh, G., Lundblad, A., Sundholm, G., Influence of composition on the structure and electrochemical characteristics of the PEFC cathode, *Electrochim. Acta*, 48, 4175 (2003).
- [27] Jaouen, F., Lindbergh, G., Transient techniques for investigation of mass-transport limitations in gas diffusion electrodes. I. Modelling of the PEFC cathode, *J. Electrochem. Soc.*, 150, A1699 (2003).
- [28] Jaouen, F., Lindbergh G., Wiezell, K., Transient techniques for investigation of mass transport limitations in gas diffusion electrodes. II. Experimental characterization of the PEFC cathode, *J. Electrochem. Soc.*, 150, A1711 (2003).
- [29] Göran Lindbergh, Transient techniques for investigating the polymer electrolyte fuel cell, *Gordon Research Conference on Fuel Cells*, Roger Williams University Bristol, US, July 27 – August 1, (2003).
- [30] Benoît Lafitte, Patric Jannasch, Phosphonation of Polysulfones via Lithiation and Reaction with Chlorophosphonic Acid Esters, *J. Polym. Sci., Polym. Chem. Ed.*, 43, 273-286 (2005).
- [31] Patric Jannasch, Fuel Cell Membrane Materials by Chemical Grafting of Aromatic Main-Chain Polymers, *Fuel Cells*, 5(2), 248-260, (2005), invited.
- [32] Sandén, B. and Karlström, M., Positive and negative feedback in consequential life-cycle assessment, *Journal of Cleaner Production*. In Press, Corrected Proof, Available online 30 May (2006).

- [33] Karlström, M. and Sandén, B., Selecting and assessing demonstration projects: the Case of Fuel Cells and Hydrogen systems in Sweden., *The International Journal for Innovation Research, Commercialization, Policy Analysis and Best Practice*. 6(2):286-293 (2004).
- [34] Hanna Matic, Anders Lundblad, Göran Lindberg and Per Jacobsson, *In Situ Micro-Raman on the Membrane in a Working PEM Cell*, *Electrochemical and Solid State Letters*, 8(1), A5-A7, (2005).
- [35] Benoît Lafitte, Mario Puchner, Patric Jannasch, Proton Conducting Polysulfone Ionomers Carrying Sulfoaryloxybenzoyl Side Chains, *Macromol. Rapid Commun.*, 26, 1464-1468 (2005).
- [36] Iversen, A.K., Stainless steels in bipolar plates - Surface resistive properties of corrosion resistant steel grades during current loads, *Corrosion Science*, vol 48 1036-1058 (2006).
- [37] Benoît Lafitte, Patric Jannasch, On the Prospects for Phosphonated Polymers as Proton-Exchange Fuel Cell Membranes, *Advances in Fuel Cells*, Vol. 1, Ch. 3, p. 119-185, Elsevier Ltd, Oxford, UK (2007).
- [38] P. Gode, A. Hult, P. Jannasch, M. Johansson, L.E. Karlsson, G. Lindbergh, E. Malmström and D. Sandquist, A novel sulfonated dendritic polymer as the acidic component in proton conducting membranes, *Solid State Ionics*, 177, 787-794 (2006).
- [39] Benoît Lafitte and Patric Jannasch, Polysulfone Ionomers Functionalized with Benzoyl(difluoromethylenephosphonic acid) Side Chains for Proton-Conducting Fuel Cell Membranes, *J. Polym. Sci., Polym. Chem. Ed.*, in print 2006.
- [40] Zhdanov V.P., and Kasemo B., Towards the understanding of the specifics of reactions in polymer-electrolyte fuel cells, *Surface Science*, 554, p103-108 (2004).
- [41] Zhdanov V.P., and Kasemo B., Kinetics of electrochemical O₂ reduction on Pt, *Electrochemistry Communications*, 8, p1132-1136 (2006).
- [42] Gustavsson M., Ekström H., Eurenus L., Lindbergh G., Olsson E., Kasemo B. and Hanarp P., Screening of bilayer thin film PtMe (Me=Au,Ir,Ti) catalysts for the oxygen reduction reaction in the polymer electrolyte fuel cell, Submitted to *Fuel Cells* (2006).
- [43] Forsberg P and Karlström M., On optimal investment strategy for a hydrogen filling station, *International Journal of Hydrogen Energy*. In Press, Corrected Proof, Available online 25 July (2006).
- [44] Rydh CJ & Karlström M, Life cycle inventory of recycling portable nickel-cadmium batteries., *Resources, Conservation and Recycling*. Volume 34, Issue 4, Pages 289-309 (2002).
- [45] Steen, Bengt, Describing Values in Relation to Choices in LCA, *International Journal of LCA*, 11, (3), 277-283 (2006).
- [46] Steen, Bengt, Abiotic Resource Depletion: Different perceptions of the problem with mineral deposits, *Int J LCA*, 11 (1) pp. 49-54 (2006).
- [47] K. Wikander, H. Ekström, A.E.C. Palmqvist, and G. Lindbergh, On the Influence of Pt Particle Size on PEMFC Cathode Performance, *Electrochim. Acta*, 52, (2007), 6848-6855.
- [48] P., Kjellin, H., Ekström, H., and A.E.C. Palmqvist, On the Activity and Stability of Sr₃NiPtO₆ and Sr₃CuPtO₆ as Electrocatalysts for the Oxygen Reduction Reaction in a Polymer Electrolyte Fuel Cell, *J. Power Sources*, 168, (2007), 346-350.
- [49] P. Kjellin, and A.E.C. Palmqvist, Synthesis of Nanosized Zn₂PtO₄, *J. Mater. Sci.* 43 (22), (2008), 7250-7253.

[50] K. Wikander, H. Ekström, A.E.C. Palmqvist, and G. Lindbergh, On the Influence of Pt Particle Size on PEMFC Cathode Performance, *Electrochim. Acta*, 52, (2007), 6848-6855.

9.2 Proceedings & konferensbidrag

[1] A. Iversen, Stainless Steels in bipolar plates –Surface resistive properties of various stainless steel grades during cyclic current load, ECS meeting in Salt Lake City (2002).

[2] Lina Karlsson, Benoît Lafitte, and Patric Jannasch, Sulfoalkylated and sulfoarylated polysulfones for fuel cell membranes, Presented at "Advances in Materials for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Systems", Asilomar, CA, February (2003).

[3] Lina E. Karlsson, Benoît Lafitte, and Patric Jannasch, Ionically Grafted Polysulfones for Proton Conducting Membranes., Presented at the "8th International Symposium on Polymer Electrolytes", Santa Fe, NM, May (2002).

[4] Lina E. Karlsson, Benoît Lafitte, and Patric Jannasch, Proton Conducting Sulfoalkylated and Sulfoarylated Polysulfones for Fuel Cell Membranes, Presented at the "Europolymer Congress 2003", Stockholm, Juni (2003).

[5] Lina Karlsson, Benoît Lafitte, and Patric Jannasch, Sulfoalkylated and sulfoarylated polysulfones for fuel cell membranes, Presented at "Frontiers in Battery and Fuel Cell Research", Uppsala, Juni (2002).

[6] Benoît Lafitte, Lina E. Karlsson and Patric Jannasch, Preparation and Properties of Polysulfone Ionomers for Fuel Cell Membranes, Presented at the "Nordic Polymer Days", Copenhagen, Augusti (2003).

[7] Wikander, Kjell , Palmqvist, Anders E.C., Holmberg, Krister, Microemulsion based synthesis of Pt/Co nanoparticles for fuel cells, International Workshop in Nanochemistry, Zakopane, 28-31 Augusti (2003).

[8] Vynnycky, M., Nordlund, J. and Bark, F. H., Fuel cells and mobile energy supply, Proceedings of the Stockholm 1st International Conference on Military Technology, 10-11, pp. 103-110 (2003).

[9] Benoît Lafitte, Mario Puchner and Patric Jannasch, Development of Proton Conducting Membranes for High Temperature PEM Fuel Cells, presented at the NorFA workshop "New Materials and Technology for Low Temperature Fuel Cells", Odense, Denmark, December (2003).

[10] Magnus Karlström and Björn A. Andersson, Selecting and Assessing Demonstration projects: the Case of Fuel Cells and Hydrogen systems, Knowledge and Economic and Social Change: New Challenges for Innovation Studies, ASEAT, Manchester (2003).

[11] Magnus Karlström and Per Hultén and Lars Bagge, Preliminary assessment of a fuel cell public transport system for a medium-sized city in the year 2020, Urban transport 2004, Dresden (2004).

[12] Per Hultén, Magnus Karlström and Lars Bagge, Fuel Cells in a Medium-Sized City in the Year 2020, Urban Transport 2004, Dresden (2004).

[13] P. Gode, F. Jaouen, G. Lindbergh, A. Lundblad, G. Sundholm, Influence of electrode structure on electrochemical performance of the PEFC cathode, 5th international symposium on new materials for electrochemical systems, Montreal, Qubec, Canada (2003).

[14] Henrik Ekström, Patric Jannasch, Benoît Lafitte, Göran Lindbergh and Anders Lundblad, In-situ evaluation of sulfophenylated polysulfone membranes in a hydrogen/oxygen PEFC, 204th Meeting of the Electrochemical Society, Orlando, Oktober (2003).

- [15] Anders Lundblad, Fuel cell activities at KTH, Sweden”, Nordic and Baltic Applied Fuel Cell Technology Research Network, Start-up workshop, Reykjavik, Iceland, November 12 (2003).
- [16] Henrik Ekström, In-situ evaluation of sulphphenylated polysulfone membranes in H₂/O₂ PEFC, Nordic and Baltic Applied Fuel Cell Technology Research Network, Start-up workshop, Reykjavik, Iceland, November 12 (2003).
- [17] Patric Jannasch, Utveckling av membran till polymerbränsleceller, presentation på Sveriges Energiting, Eskilstuna, mars (2004).
- [18] Patric Jannasch*, Benoît Lafitte, and Mario Puchner, Proton-conducting ionomers by chemical grafting reactions on polysulfones, presented at the 12th conference on ”Solid State Proton Conductors” Aug. 15-19, Uppsala, Sweden (2004).
- [19] Benoît Lafitte, Mario Puchner and Patric Jannasch, Polysulfones having sulfonic acid units on aromatic side-chains, presented at the 12th conference on ”Solid State Proton Conductors” , Aug. 15-19, 2004, Uppsala, Sweden. (2004).
- [20] Benoît Lafitte, Lina E. Karlsson, Mario Puchner, and Patric Jannasch, Proton-conducting ionomers by chemical grafting reactions, presented at the 9th International Symposium on Polymer Electrolytes, Mragowo, Poland, Aug. 22-27, (2004).
- [21] Patric Jannasch, Synthetic Strategies for Proton Conducting Polysulfone Membranes, presented at the NorFA workshop ”New Materials and Technology for Low Temperature Fuel Cells”, Smögen, Sweden, August (2004).
- [22] Mario Puchner and Patric Jannasch, Polysulfone-based proton exchange membrane materials prepared by using sulfonated naphthalene monomers, Presented at ”Advances in Materials for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Systems”, Asilomar, CA, February (2005).
- [23] Benoît Lafitte, Mario Puchner and Patric Jannasch, Chemically grafted polysulfones for proton exchange membranes, Presented at ”Advances in Materials for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Systems”, Asilomar, CA, February (2005).
- [24] Mario Puchner, Benoît Lafitte, och Patric Jannasch, Protonledande membran för högtemperatur-PEM bränsleceller, poster, Sveriges Energiting, Eskilstuna, mars (2004).
- [25] Birgersson, E., Fallenius, B. & Vynnycky, M., Heat and mass transfer in the cathode of a polymer electrolyte fuel cell with a porous flow distributor, presented at HEFAT 2005, Cairo, Egypt, 19-22 September (2005).
- [26] Patric Jannasch, New Proton-Conducting Polymers and Membranes for Fuel Cells, ”Nordic Polymer Days”, Copenhagen, May (2006).
- [27] Benoît Lafitte and Patric Jannasch, Sulfonated and Phosphonated Polysulfones by Chemical Grafting for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells, MACRO2006, Rio de Janeiro, Brazil, July (2006).
- [28] Benoît Lafitte and Patric Jannasch, Side-chain sulfonated and phosphonated polysulfones for proton conducting membranes, Presented at ”Nordic PEMFC 06”, Stockholm, Juli (2006).
- [29] Benoît Lafitte and Patric Jannasch, Proton-conducting nanocomposite membranes containing organically modified zirconium phosphate for high-temperature PEMFC operation, Presented at ”Nordic PEMFC 06”, Stockholm, Juli 2006.
- [30] K. Wikander, A.E.C. Palmqvist, and K. Holmberg, Surfactant-templated nanomaterials - Applications in PEM fuel cells, Energitinget, Eskilstuna, March 9-10 (2003).
- [31] K. Wikander, C. Petit, K. Holmberg and M.-P. Pileni, Preparation of Platinum Nanoparticles using

the Phase Transfer Method and Reverse Micelles with Alkylamines as Stabilizing Agent, International Workshop in Nanochemistry (COST D19), Koc University, Istanbul, September (2005).

[32] K. Wikander, A.B. Hungria, P.A. Midgley, A.E.C. Palmqvist, K. Holmberg, and J.M. Thomas, Incorporation of Platinum Nanoparticles in Ordered Mesoporous Carbon, COST D19 Final Workshop, Sitges/Barcelona, May (2006).

[33] K. Wikander, A. Berggren, A.E.C Palmqvist, Particle size relation between ordered mesoporous silica and carbon, IMMS 2006, Shanghai September (2006).

9.3 Akademiska avhandlingar och rapporter

[1] Lina E. Karlsson, Proton-Conducting Polymers and Membranes for Fuel Cells - Preparation and Properties, Ph.D. thesis, Lund University, Sweden, 2003 (ISBN 91-7422-023-3) (2003).

[2] Benoît Lafitte, Synthesis and Characterization of Sulfoarylated Proton Conducting Polysulfones, MSc Thesis, Lund University, Sweden, (2002).

[3] Erik Birgersson, Modelling of Transport Phenomena in Direct Methanol and Proton Exchange Membrane Fuel Cells, TRITA-MEK Technical Report 2003:02, Licentiate thesis Stockholm, KTH, ISSN 0348-467X (2003).

[4] J. Itonen, Development of characterisation methods for the components of the polymer electrolyte fuel cell, December (2003).

[5] Birgersson, E., Mathematical modelling of transport phenomena in polymer electrolyte and direct methanol fuel cells, TRITA-MEK Technical Report 2004:02, Ph.D. thesis Stockholm, KTH, ISSN 0348-467X (2004).

[6] Frédéric Jaouen, Electrochemical characterisation of porous cathodes in the polymer electrolyte fuel cell (2003).

[7] Henrik Bernquist, Sulfophenylation of polystyrene and styrene copolymers - a synthetic route to new ion-exchange membranes., MSc Thesis, Lund University, Sweden, (2004).

[8] Magnus Karlström, Environmental Assessment of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Systems, PhD thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, (2004).

[9] Martin Stener, Synthesis and Characterization of Phosphonated Polysulfone Membranes for Use in Fuel Cells, MSc Thesis, Lund University, Sweden, (2005).

[10] Marie Gustavsson, Nanostructured Fuel Cell Catalysts, PhD thesis, Chalmers, Göteborg (2006).

[11] Kjell Wikander, Nanostructured Catalysts and Electrode Materials for PEM Fuel Cells, Tekn. Lic. Thesis, Chalmers, Göteborg, December 2005.

Forskning med användarvärde för hållbar utveckling

Stiftelsen för miljöstrategisk forskning, Mistra, stöder forskning av strategisk betydelse för en god livsmiljö och hållbar utveckling. Stiftelsen ska främja utvecklingen av starka forskningsmiljöer av högsta internationella klass med betydelse för Sveriges framtida konkurrenskraft. Forskningen ska medverka till att viktiga miljöproblem löses och till en miljöanpassad samhällsutveckling. Möjligheterna att uppnå industriella tillämpningar ska tas till vara.

Mistra investerar i forskargrupper som i samverkan med användare bidrar till att lösa viktiga miljöproblem. Stödet uppgår till ca 200 miljoner kronor per år och Mistra investerar i ett tjugotal stora forskningsprogram, som vart och ett kan löpa mellan sex och åtta år.

Mistras övergripande mål är att resultaten från forskning på högsta vetenskapliga nivå ska komma till praktisk användning inom företag, förvaltningar och frivilligorganisationer. På det sättet kan Mistras forskningsinvesteringar bidra till en lösning på miljöproblemen.

För mer information, besök Mistras hemsida: www.mistra.org

Mistras Bränslecellsprogram

Bränsleceller kan ses som ett slags kontinuerliga batterier, som man kan tanka eller "ladda" med bränslen. De har stor potential att bidra till skapandet av ett uthålligt energisystem. MISTRAs bränslecellsprogram har inriktat sig på den typ av bränsleceller, som brukar kallas polymerelektrolytmembranbränsleceller eller kortare: PEFC-bränsleceller. I programmet har Chalmers, KTH, LTH, Stockholms Universitet, Uppsala Universitet och ett flertal företag deltagit för att öka det svenska kunnandet om PEFC-bränsleceller, ta fram nya material och komponenter samt ny celldesign. Detta är av stor strategisk betydelse i en tid där bränslecellerna har fått sina första kommersiella genombrott.

Rapporten är en slutrapport och beskriver arbetet i programmets 1997-2010.

- En bränslecellstack har byggts och demonstrerats
- 25 doktorer har utexaminerats
- 14 företag, har deltagit, varav två bildats som följd av programmet
- Unikt samarbete mellan fem universitet/ tekniska högskolor och näringsliv
- Över 10 patent
- Utveckling från forskning till industriell utveckling och kommersialisering
- Flera svenska företag har positionerat sig inom området.
- Svenska forskare har blivit internationellt erkända.
- Cirka 300 vetenskapliga artiklar har publicerats

