

Möjlighet och potential för bränslecellssystem för energiförsörjning i byggnader



Anna-Karin Jannasch
Catator AB

April 2011

SGC:s FÖRORD

FUD-projekt inom Svenskt Gastekniskt Center AB avrapporteras normalt i rapporter som är fritt tillgängliga för envar intresserad.

SGC svarar för utgivningen av rapporterna medan uppdragstagarna för respektive projekt eller rapportförfattarna svarar för rapporternas innehåll. Den som utnyttjar eventuella beskrivningar, resultat eller dylikt i rapporterna gör detta helt på eget ansvar. Delar av rapport får återges med angivande av källan.

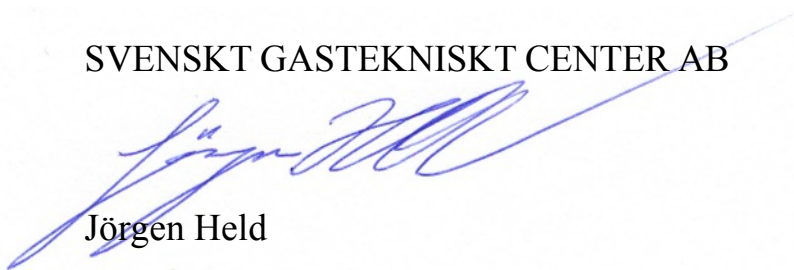
En förteckning över hittills utgivna SGC-rapporter finns på SGC's hemsida www.sgc.se.

Svenskt Gastekniskt Center AB (SGC) är ett samarbetsorgan för företag verksamma inom energigasområdet. Dess främsta uppgift är att samordna och effektivisera intressenternas insatser inom områdena forskning, utveckling och demonstration (FUD). SGC har följande delägare: Svenska Gasföreningen, E.ON Gas Sverige AB, E.ON Sverige AB, Lunds Energikoncernen AB (publ), Göteborg Energi AB, och Öresundskraft AB.

Följande parter har gjort det möjligt att genomföra detta utvecklingsprojekt:

Energimyndigheten
Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, SBUF
Catator AB
E.ON Gas Sverige AB
Lunds Energikoncernen
Öresundskraft AB
Göteborg Energi AB
Stockholm Gas AB
Dansk Gasteknisk Center a/s

SVENSKT GASTEKNISKT CENTER AB



Jörgen Held

Sammanfattning

Vid planering av nya miljövänliga och hållbara bostadsområden i Sverige diskuteras idag bl a användning av bränsleceller för småskalig kraftvärmeproduktion (mCHP). Exempel på sådana områden är SegePark i Malmö och Norra Djurgårdsstaden i Stockholm, där flera av Svenska Byggbranschens Utvecklingsfonds (SBUF) medlemsföretag kommer att medverka i utvecklingen av projekten. Status och potential av bränslecellsteknologin jämfört med konventionell teknologi samt konkurrerande småskaliga teknologier är således idag en mycket intressant frågeställning för både energi- och byggbranschen, som också efterlyser mer kunskap inom ämnesområdet. Detta projekt fokuserar på denna uppgift.

Målsättningarna med denna rapport är att:

1. Ge en översiktlig beskrivning av olika existerande bränslecellsteknologier och nödvändiga, tillhörande systemkomponenter. Bränslecellssystemen diskuteras och utvärderas utifrån verkningsgrad, bränsleflexibilitet, livslängd, komplexitet, mognadsgrad samt kostnad. Systemen jämförs med mCHP-system baserade på små värmemotorer (förbränningsmotor (ICE), Stirling).
2. Ge en "state-of-the-art" rapport om kunskapsläget och teknikens mognadsgrad för småskalig kraftvärmeproduktion och visa på möjligheter och risker med varierande tekniker.
3. Vara behjälplig vid eventuella val av framtida systemlösningar lämpade för olika byggnationer och olika geografiska placeringar.

Studien begränsas till system som är lämpade för småhus ($<5 \text{ kW}_e$) och flerfamiljshus ($< 50 \text{ kW}_e$) belägna i tätorter, där fast elnät liksom gasdistributionsverk av antingen naturgas eller biogas är tillgängligt. Arbetet har genomförts av Catator AB på uppdrag av SBUF med stöd från Svenskt Gastekniskt Center (SGC AB), Skanska och Catator. Studien baseras på öppen litteratur, information given av ledande systemleverantörer samt Catators egna kunskaper och erfarenheter inom ämnesområdet.

I dagsläget är det framförallt tre olika bränslecellsteknologier som är aktuella för småskalig kraftvärmeproduktion: Låg- och högtemperaturpolymerbränsleceller (LT/HT-PEMFC) samt fastoxidbränsleceller (SOFC), där LT-PEMFC i dagsläget dominerar marknaden (80 %) då det är den mest mogna teknologin. Som reformeringsmetod används framförallt ångreforming, med efterföljande atmosfärisk gasrening, då detta ger den överlägset högsta verkningsgraden. På sikt förväntas dock LT-PEMFC ersättas av SOFC-teknologin, vilket i sin tur öppnar upp för signifikanta systemförenklingar, högre elverkningsgrader (40-45 % istället för 30-35 %) och en effektivare värmerekuperering.

Utvecklingen och spridningen av bränslecellsbasead mCHP har uteslutande kommit längst i Japan. Inom EU dominerar Storbritannien och Tyskland. I Sverige har hitintills endast tre olika system installerats och utvärderats. Två av dessa var placerade i Hammarby Sjöstad i Stockholm, under perioden 2002-2008. Det tredje, som är ett hybridsystem med värmepumpsteknologi, utvecklades av Catator under år 2010 under namnet ComfortPower.

I Japan finns idag närmare 6000 anläggningar installerade och i drift i privata bostäder och publika byggnader. Sedan maj 2009 finns ett $\sim 1 \text{ kW}_e/2 \text{ kW}_{th}$ system under namnet ENE-FARM kommersiellt tillgängligt för drift med antingen naturgas/LPG/fotogen. Resultat såsom en el- och en totalsystemverkningsgrad på 35-45 % respektive 85-90 % har redovisats i

kombination med lovande livslängd, $\sim 0.5-1$ % degradering under närmare 20 000 timmars drifttid. Den stora kvarstående utmaningen är kostnaden. ENE-FARMS försäljningspris är i dagsläget 210 kSEK utan statliga subventioner, men priset förväntas drastiskt minska med pågående stack- och komponentförbättringar och med framförallt en ökad produktionsvolym. År 2015 förväntas priset ligga omkring 40-60 kSEK, d v s ungefär detsamma som en ICE-baserad mCHP kostar idag, under förutsättning att produktionsvolymen är omkring 100 000 enheter/år/leverantör. Liknande resultat och prognoser rapporteras från ledande bränslecellsystemutvecklare inom EU.

Marknadspotentialen för mCHP är starkt beroende på den geografiska placeringen. Parametrar såsom existerande el- och uppvärmningsteknik, gas- och elnätverk, el/gaspris, byggnaders energibehov och existerande regelverk är av avgörande betydelse. Störst potential finns i de länder där nätverk för gasdistribution är väl utbyggda och där majoriteten av all hushållsuppvärmning sker med hjälp av gasuppvärmning i konventionella gaspannor och där elen produceras i centrala kol/oljekraftverk, t ex Japan, Tyskland, Storbritannien och Holland. I glesbefolkade länder såsom Sverige, där kraftnätet är mer utbyggt än gasnätet, där el är förhållandevis billigt och där fjärrvärme härstammande från förnybara bränslen ofta tillämpas, är marknadspotentialen däremot betydligt mindre.

Idag finns ingen självklar vinnare bland de olika konkurrerande mCHP-teknologierna, utan det beror helt och hållet på utifrån vilket perspektiv (ekonomiskt, tekniskt, miljömässigt) man belyser teknologin. Man kan dock förvänta sig att bränslecellbaserade system med stor sannolikhet kommer att vara en av flera huvudkomponenter i ett framtida lågutsläpp-alternativt vätgassamhälle, då också även med fördel hybridiserade med andra miljövänliga småskaliga kraft/värme-teknologier såsom med värmepumpar och solceller.

Summary

While planning for new sustainable and environmentally friendly communities in Sweden, discussions on using fuel cells for small-scale power and heat production (mCHP) are today on-going. Examples of such communities are SegePark in Malmö and Norra Djurgårdsstaden in Stockholm, where several members of the Swedish Construction Industry's Organisation for Research and Development (SBUF) are participating in the development. The status and the potential of using fuel cell based mCHP compared to conventional heat and power production technology and other mCHP-technologies (Internal combustion engine (ICE), Stirling) is today therefore a very interesting question for both the energy and the building sector, who also ask for more knowledge within the field. This work focuses on this purpose.

The main goals of this report are:

1. To give an overall description of different existing fuel cell technologies and necessary belonging system components. The fuel cell systems are discussed and evaluated based on parameters such as efficiencies, fuel flexibility, life-time, complexity, maturity and cost. The systems are compared to mCHPs based on small heat engines (Internal combustion, Stirling).
2. To give a state-of-the-art report on fuel cell based mCHPs and to describe possibilities and risks related to different technologies.
3. To guideline for future choices of system solutions suitable for different building constructions and different geographical placements.

The work is limited to systems suitable for small houses ($< 5 \text{ kW}_e$) and larger residential buildings ($< 50 \text{ kW}_e$) situated in population centres/cities where infra-structures for natural gas/biogas and the national grid are available. The project has been performed by Catator AB on the request of SBUF with support from the Swedish Gas Centre (SGC AB), Skanska and Catator. The study is based on the open literature, the information given by leading fuel cell system suppliers and Catator's own knowledge and experience in the field.

Today, there are in general three different fuel cell technologies that are in focus for mCHPs: Low and high temperature polymer electrolyte fuel cells (LT/HT-PEMFC) and solid oxide fuel cells (SOFC). Among these, LT-PEMFC is the most mature technology and is therefore today dominating the market (80 %). As reforming method, steam reforming with downstream atmospheric gas clean-up is the most commonly applied since this is the method resulting in the highest efficiency. In the near future, LT-PEMFC is expected to be replaced by the less mature SOFC, since the use of the latter technology opens up for significant system simplifications, higher electrical efficiencies (40-45 % instead of 30-35 %) and more efficient heat recovering.

Japan is by far the world's leading country in the development and the distribution of fuel cell based mCHPs. In EU, the development in Great Britain and Germany are dominating the market. In Sweden, only three different fuel based mCHPs have been installed and tested so far. Two of those were placed in Hammarby Sjöstad in Stockholm during the period 2002-2008. The third one, called ComfortPower, was developed by Catator during 2010 and is hybridised with a heat pump module.

In Japan, there are today almost 6000 fuel based mCHPs installed and in operation in private houses and public buildings. Since May 2009, there is a $\sim 1 \text{ kW}_e/2 \text{ kW}_{th}$ commercially

available system, called ENE-FARM, for operation on either natural gas/LPG/kerosene. Results such as 35-45 % and 85-90 % in electrical and total system efficiency, respectively, in combination with promising life-time data, i.e. ~ 0.5-1 % degradation during almost 20 000 hours operation, have been achieved. The big remaining challenge is the cost. Today, the price of ENE-FARM is 210 kSEK without subsidies. The cost and hence so also the price is however expected to drastically decrease with on-going stack and components improvements and increasing production volumes. In year 2015, the price is expected to be around 40-60 kSEK, i.e. in the same range as corresponding ICE-based mCHPs cost today, provided that the production volume reaches around 100 000 units/year/supplier. Similar results and predictions have been reported from leading system suppliers in EU.

The market potential for mCHPs is strongly dependent on the geographical placement. Parameters such as prevailing technology for power and heat production, gas and grid infrastructure, the cost ratio gas/electricity, the buildings' energy need and existing legislative regulations are crucial. The largest market potential exists in countries where fuel gases are used for heating in domestic boilers and where the electricity is produced in central power plants (coal/oil). Examples of such countries are Japan, Germany, Great Britain and Holland. In less populated countries such as Sweden, where the national grid is more developed than the gas infrastructure, where the electricity is relatively cheap and where district heating originating from renewable fuels is widely spread, the market potential is much less favorable.

Today, there is no obvious winner among the competing mCHP- technologies, since the answer is depending on from which perspective (economical, technical, environmental) the technologies are being considered. Fuel cell based mCHPs are however expected to become one of the major players in a future low-emission or in a hydrogen society, so also hybridised with other environmental friendly small scale heat or power technologies such as with heat pumps and solar cells.

Innehållsförteckning

	sida
1. Inledning	1
1.1. Bakgrund	1
1.2. Målsättning och avgränsning	3
1.3. Metod	3
1.4. Studiens bakgrund	4
2. Definitioner och centrala begrepp	4
2.1. Cell/Stack	4
2.2. Katalysator	5
2.3. Reformering	5
2.4. Balance-of-Plant (b-o-p)	5
2.5. Verkningsgrad	5
2.6. Emissioner	6
3. Beskrivning av olika teknologier för m-CHP	7
3.1. Förbränningsmotor (ICE)	7
3.2. Stirlingmotorn	8
3.3. Bränsleceller	9
4. Beskrivning av olika bränslecellsystem	11
4.1. Olika bränslecellsprinciper	12
4.2. Olika reformeringsmetoder	16
4.2.1. Ångreformering, SREF	17
4.2.2. Autotermreformering, ATR	17
4.2.3. Partialoxidation, CPO	17
4.3. Olika gasreningsmetoder	17
4.4. Kortfattad sammanfattning beskrivande uppbyggnad av bränslecellsystem för m-CHP	19
5. Beskrivning av olika bränslen	20
6. Förslag och beskrivning av några bränslecellsystem för m-CHP	21
7. Dimensionering och driftstrategi	26
8. Beskrivning av marknadsstatus och viktiga demonstrationsprojekt av m-CHP baserad på bränslecellsteknologi	28
8.1. Marknadsstatus av bränslecellbaserade mCHP i världen	28
8.2. Viktiga demonstrationsprojekt av bränslecellbaserade mCHP inom EU	34
9. Sammanfattande diskussion om m-CHP med fokus på bränslecellsteknologi- dess potential och möjligheter	37

Referenser

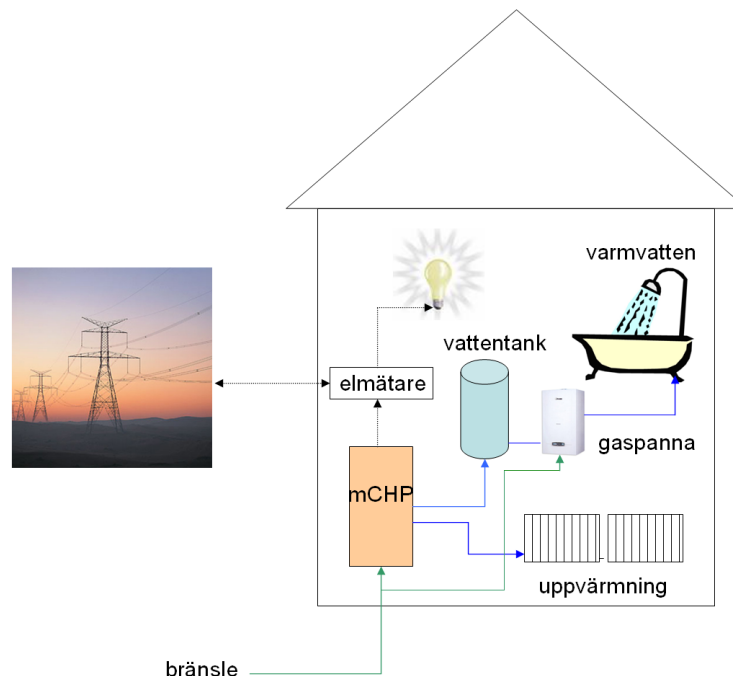
Appendix ”Sammanfattande lista över leverantörer av m-CHP”

1. Inledning

1.1 Bakgrund

För uppbyggande och bibehållande av vår välfärd krävs enorma mängder energi. Europas totala energiförbrukning står idag för omkring 15 % av världens totala energikonsumtion, varav byggsektorn står för en stor andel. Mer än 40 % av EUs totala energikonsumtion används för uppvärmning, kylning samt elförsörjning av privatbostäder och andra publika/kommersiella byggnader. Den största andelen av denna energi, runt 60 %, härstammar från förbränning av fossila bränslen såsom olja och naturgas, vilket i sin tur medför att EUs byggsektor också idag står för en väsentlig andel, omkring 20 %, av EUs totala utsläpp av växthusgaser [1,2].

För att reducera byggsektorns energikonsumtion och utsläpp av växthusgaser så har man i princip tre vägar att tillgå: 1) Minimera energiförlusterna genom användande av förbättrad byggnadsisolering samt effektivare luftbehandlingsanläggningar mm och därigenom mer energieffektivt utnyttja de fossila bränslena, 2) Integration och användning av förnybara energikällor (sol, vind, vatten, jord) samt 3) Integration och användande av förnybara bränslen såsom väte, biogas och bioetanol, m fl. Oavsett val av energikälla så krävs naturligtvis att man också parallellt utvecklar och inför tekniker som uppvisar hög verkningsgrad vid själva energiomvandlingen. Ett sätt för effektivisering är att decentralisera kraft- och värmeproduktionen, s.k. uppbyggande och användande av småskalig kraft- och värmeproduktion, på engelska kallat *small-scale/micro-combined heat and power*, med förkortningen *mCHP*. Principen för decentraliserad kraftvärmeproduktion för ett hushåll beskrivs i Figur 1.1.

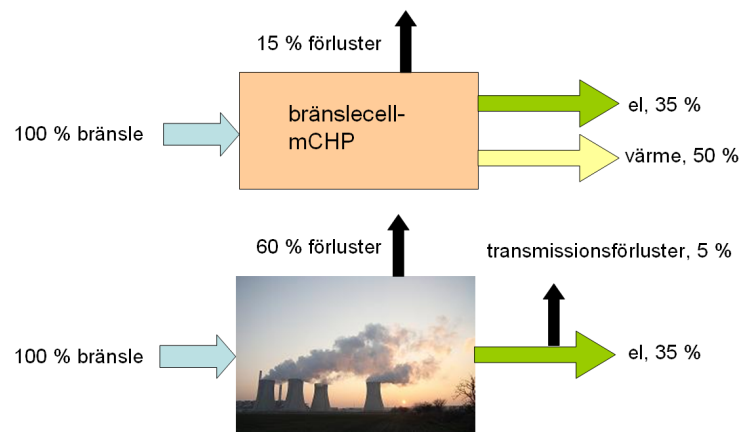


Figur 1.1. Schematisk illustration som visar principen med ett småskaligt kraftvärmeverk (mCHP).

I jämförelse med konventionell energiförsörjning kan stora energi- och miljövinster uppnås (se Figur 1.2), främst beroende på att:

- Den producerade värmen kan tillvaratas som vid centraliserad kraftgenerering, vid avsaknad av värmeverk, annars går till spillo.
- Transmissionsförlusterna minimeras då elkraft produceras på plats och inte behöver transporteras över långa sträckor.
- Bränsleflexibelt. Kompatibelt med förnybara bränslen. Kol kan t.ex. ersättas med naturgas/biogas.

En annan viktig fördel med mCHP är att beroendet av det fasta elnätet avsevärt minskar eller till och med fullständigt kan undvikas, d.v.s. kraftförsörjningens sårbarhet minskar.



Figur 1.2. Schematisk illustration som visar de primära energifördelarna med småskaligt kraftvärmeverk jämfört med konventionell centraliserad kraftproduktion. Angivna %-andelar är ungefärliga och varierar beroende på vilket system som används och den geografiska placeringen/landet där man befinner sig.

Småskalig kraft- och/eller värmeproduktion är möjlig genom ett flertal tekniker innehållande solceller, solfångare, vindkraftverk, värmepumpar, olika typer av värmemotorer och bränsleceller, mfl. Den senare tekniken, bränsleceller, har på senare tid fått stort fokus inom forskning och utveckling världen över då den, förutom den höga elverkningsgraden över ett stort lastområde, kännetecknas av viktiga egenskaper såsom bränsleflexibilitet, låga emissioner, samt låga akustiska och termiska signaturer.

Idag finns det ett stort antal företag som utvecklar och producerar bränsleceller/bränslecellsystem för olika effektklasser för skilda tillämpningar såsom batteriersättare, batteriladdare, reservkraftaggregat samt kraft- och värmegenerering för småhus och större byggnationer. Då det gäller den sistnämnda applikationen, kraftvärmeproduktion, så anses bränslecellsteknologin idag vara en kommersiell teknik för dom större effektklasserna ($\geq$ hundra kW_e), men dock fortfarande på utvecklingsstadiet för dom mindre effektklasserna (0.5-50 kW_e), d.v.s. de som är aktuella för kraftvärmeproduktion för enskilda småhus och flerfamiljshus.

Ett flertal mer eller mindre omfattande demonstrationsprogram och utvecklingsprojekt av småskaliga kraftvärmeverk baserade på bränsleceller har ägt och äger nu rum runt om i världen med i nuläget grovt uppskattningsvis omkring 7000 installerade enheter. Resultaten ser lovande ut och allt pekar på att tekniken kommer att vara kommersiell och att försäljningsvolymerna kommer att ta fart fr.o.m. år 2015.

Till skillnad från många andra länder har aktiviteten inom aktuellt område varit ytterst begränsad i Sverige. Enbart tre skilda småskaliga bränslecellbaserade kraftvärmeverk har installerats och testats, två placerade i Hammarby Sjöstad, Stockholm, under perioden 2002-2008 samt ett hybridssystem under namnet Comfort Power utvecklat av Catator under 2010. Stort intresse för tekniken finns dock i landet, speciellt inom bygg- och energibranschen, som nu planerar för nya miljövänliga och hållbara bostadsområden i Sverige, exempelvis Norra Djurgårdsstaden [3] i Stockholm samt Segepark i Malmö [4].

För att kunna göra en rättvis bedömning av potentialen och lämpligheten för bränslecellsbaserade småskaliga kraftvärmeverk krävs generellt att man tar hänsyn till ett stort antal parametrar, både inre faktorer gällande det specifika systemet och yttre faktorer som gäller för den aktuella byggnaden och geografiska placeringen (t.ex. tillgänglighet och typ av bränsle, tillgänglighet till elnät, existerande uppvärmningsmetod, energibehov). Vid jämförelse av olika system är det vidare viktigt att notera att det är nödvändigt att ta hänsyn till prestandan (verkningsgrad, robusthet, geometriska dimensioner) hos alla ingående komponenter såsom bränsleberedningssystem, bränslecellsstack och diverse styr- och reglerkomponenter (fläktar, pumpar, elektriska omvandlare), och inte bara till själva bränslecellen separat. Beroende på denna komplexitet så är det svårt idag att utan en viss baskunskap enbart utifrån bränslecellstillverkarnas givna data eller utifrån ett eller några få enstaka demonstrationsprojekt skapa sig en uppfattning om teknologins lämplighet och ännu svårare, eventuellt kunna göra ett val av en viss typ av bränslecellssystem för en viss byggnation.

1.2 Målsättning och avgränsning

Denna studie vänder sig primärt till bygg- och energisektorn som har lite eller ingen tidigare erfarenhet/kunskap om bränsleceller och bränslecellbaserade småskaliga kraftvärmeverk.

Målsättningen är att:

1. Öka kunskapen om bränslecellsbaserade energiförsörjningssystem.
2. Ge en ”state-of-the-art” rapport om kunskapsläget och teknikens mognadsgrad och om vilka möjligheter som står till buds.
3. Vara behjälplig vid granskning av nationellt och internationellt avslutade och pågående demonstrationsprogram inom mCHP för byggnation i tätorter samt vid eventuella val av framtida systemlösningar lämpade för olika byggnationer och geografiska placeringar.

Studien begränsas till system som är lämpade för småhus ($<5 \text{ kW}_e$) och flerfamiljshus ($< 50 \text{ kW}_e$) belägna i tätorter. Tillgång till fast elnät liksom gasdistributionsnät av antingen naturgas eller biogas förutsätts.

1.3 Metod

Denna rapport är uppdelad i tre delar. Den första delen innefattar en översiktlig beskrivning av olika bränslecellssystem och dess ingående systemkomponenter. Systemen diskuteras och utvärderas med avseende på verkningsgrad, bränsleflexibilitet, robusthet, livslängd, komplexitet, mognadsgrad samt kostnad. Teknologin jämförs även med konkurrerande teknologier baserade på värmemotorer.

Del 1 inleds med en kortfattad beskrivning av centrala definitioner och begrepp som är vanligt förekommande inom aktuellt område och som därmed även upprepande förekommer i denna rapport.

I den andra delen föreslås, beskrivs och utvärderas ett fåtal olika system mer detaljerat med hjälp av tekniska data, processscheman och illustrerande bilder. Resultaten har itererats fram med hjälp av matematiska simuleringar, delvis experimentellt validerade av Catator i tidigare projekt. Exempel på olika driftstrategier som idag tillämpas i olika delar av världen beskrivs och diskuteras också.

I den sista delen ges en omvärldsbeskrivning av pågående aktiviteter inom utvecklingen av småskaliga kraftvärmeverk, med fokus på bränslecellbaserade sådana. Denna följs åt av en sammanfattande beskrivning och diskussion om teknologins marknadspotential i förhållande till existerande konventionella och konkurrerande småskaliga teknologier.

Studien baseras på rådande öppen litteratur, information given från ledande systemtillverkare samt Catators egna kunskaper och erfarenheter inom aktuellt ämnesområde.

1.4 Studiens bakgrund

Denna studie har genomförts av företaget Catator AB på uppdrag av Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF) med stöd från Svenskt Gastekniskt Center (SGC AB), Skanska samt Catator. Catator är ett privatägt företag som grundades år 1990 beläget i Lunds forskningsby Ideon. Catator utvecklar och säljer katalysatorer och katalytiska system för olika tillämpningar inom cleantech och energiteknik, inriktat i huvudsak mot de tre affärsområdena bränslecellsystem, katalytisk förbränning och utveckling av emissionsreducerande katalysatorer. Inom det förstnämnda området, bränslecellsystem, har Catator arbetat aktivt inom ett flertal bränslecellsprojekt på uppdrag av och/eller i samarbete med svenska staten, olika företag och universitet världen över sedan år 2002. Mer specifikt har Catator utvecklat en rad olika reformersystem för småskalig produktion av väterika gaser från olika bränslen, såväl förnybara som fossila. Våra reformersystem har integrerats och utvärderats i kombination med olika befintliga bränslecellsteknologier i samarbete med ett flertal olika världsledande bränslecellstillverkare.

2. Definitioner och centrala begrepp

I detta stycke beskrivs olika definitioner och centrala begrepp som är återkommande inom bränslecellsteknologi och småskalig kraftvärmeteknik och som därmed också används återkommande i föreliggande rapport.

2.1. Cell/Stack

Ordet cell kommer från latinets *cēlla* vilket betyder kammare. Inom elektrokemin består en cell av två elektroder, en plus - och en minuspol placerade i en elektrolyt. Plus- och minuspolen är förbundna via en yttre strömkrets. Då cellen fungerar som en galvanisk cell, d.v.s. som ett batteri eller en bränslecell, fungerar pluspolen som katod respektive minuspolen som anod. Vid elektrolys gäller det motsatta.

Ordet stack betyder ”hög” [5]. Inom bränslecellsteknologin bildar de sammansatta cellerna en cellstack. Eftersom en enstaka cell genererar en låg spänning och en liten ström krävs det i de flesta fall att man kopplar samman flera celler.

2.2. Katalysator

En katalysator är ett ämne som initierar och/eller underlättar en kemisk reaktion utan att själv förbrukas i reaktionen [6].

2.3 Reformering

Ordet reformering betyder ombilda, omdana och förändra [7]. De flesta bränslecellssystem kräver alltid någon typ av bränslereformer såvida inte ren vätgas finns tillgänglig. En bränslereformer ombildar/bryter ned kolväten till gaskomponenter såsom vätgas (H_2), kolmonoxid (CO) och koldioxid (CO_2). Det finns tre typer av reformeringstekniker: ångreforming, autotermisk reformering samt partialoxidation. För en mer utförlig beskrivning, se under rubrik 4.2.

2.4 Balance-of-Plant (BoP)

Med begreppet *Balance-of-Plant* syftar man på alla systemkomponenter som inte ingår i själva reformer, gasreningssystem och bränslecellstack. Exempel på sådana komponenter i ett bränslecellssystem är diverse fläktar, pumpar, ventiler, värmeväxlare, styrsystemkomponenter och elektriska omvandlare, m fl.

2.5 Verkningsgrad

Verkningsgraden är en dimensionslös storhet som betecknar hur effektivt ett system omvandlar energi till nyttigt arbete i någon form. Verkningsgraden betecknas vanligtvis med η och definieras enligt ekv. 1:

$$\eta (\%) = \text{Nyttiggjord energi} / \text{Tillförd energi} \times 100 \quad \text{ekv. 1}$$

I bränslecellsammanhang är det mycket viktigt att notera huruvida angiven verkningsgrad syftar på en enskild enhet, d.v.s. enbart en enskild bränslecell/stack eller det fullständiga systemet. Vidare är det viktigt att notera satta systemgränser för det ansedda systemet, d.v.s. ta reda på vilka systemkomponenter man tagit hänsyn till vid själva beräkningen av angiven systemverkningsgrad. Den maximala teoretiska (termodynamiska) elverkningsgraden hos en enskild bränslecell alternativt bränslecellstack, η_{FC} , är förhållandet mellan Gibbs fria energi, ΔG (J/mol), och bildningsentalpin, ΔH (J/mol), av det i bränslecellen reagerade bränslet, vanligtvis vätgas, och beräknas enligt:

$$\eta_{FC} = (\Delta G / \Delta H) \times 100 (\%) \quad \text{ekv. 2}$$

Den teoretiska elverkningsgraden är omkring 80 %, men i praktiken bestäms den utav den uppmätta cellspänningen, E_{cell} , enligt:

$$\Delta G = - n \times F \times E_{cell} \quad \text{ekv. 3}$$

där n = antal elektroner inblandade i den elektrokemiska reaktionen och F = Faradays konstant (96 487 As/mol elektroner).

I praktiken hamnar den elektriska verkningsgraden för bränsleceller omkring 40-60 % beroende på vald bränslecellsteknologi och aktuella driftbetingelser. Förlusterna som begränsar cellspänningen består av trögheter i elektroreaktionerna (=elektrokinetiken) på anod respektive katod, masstransportbegränsningar för reaktanter och produkter och rent ohmskt motstånd genom elektrolytfilm och vid kontaktytor mellan elektrodpartiklar och/eller elektrod-strömtilliedare, mm. Generellt ökar förlusterna, R, och därmed minskar den elektriska verkningsgraden, i bränslecellen med lasten, d.v.s. ju högre ström som tas ut från systemet, desto lägre blir cellspänningen, enligt sambandet $E_{\text{cell}} = E_{\text{jvt}} - RI$, där E_{jvt} = cellspänningen vid jämvikt d.v.s. då cellen är obelastad.

I praktiska tillämpningar är det vanligtvis inte bränslecellens elverkningsgrad som är den mest intressanta utan istället systemelverkningsgraden, $\eta_{\text{system, EL}}$. I denna studie definieras och beräknas systemelverkningsgraden enligt:

$$\eta_{\text{system, EL}} = ((w_{\text{AC}} - \text{parasitiska förluster}) / (n_{\text{fuel, SYST}} \times \Delta H_{\text{fuel, SYST}})) \times 100 (\%) \quad \text{ekv. 4}$$

, där w_{AC} är den elektriska producerade effekten i form av växelström (dvs alla nödvändiga elektriska omvandlare inkluderas i systemet), $n_{\text{fuel, SYST}}$ samt $\Delta H_{\text{fuel, SYST}}$ är flödet respektive bildningsvärmets av det till systemet ingående bränslet. De parasitiska förlusterna härleds här till alla ingående systemkomponenter såsom fläktar, pumpar, styrsystem m fl.

Det som inte produceras som elektrisk energi i en bränslecell blir till värmeenergi, Q (J/s). Då den producerade värmen också är av intresse i de kombinerade kraftvärmeverken, talar man inte bara om systemets elektriska verkningsgrad utan även om den termiska verkningsgraden, η_{th} , och eller den totala systemverkningsgraden, $\eta_{\text{system, tot}}$. Den termiska och den totala systemverkningsgraden beräknas enligt ekv. 5 respektive 6:

$$\eta_{\text{system, th}} = Q_{\text{system, NET}} / (n_{\text{fuel, SYST}} \times \Delta H_{\text{fuel, SYST}}) \quad \text{ekv. 5}$$

$$\eta_{\text{system, tot}} = \eta_{\text{system, EL}} + \eta_{\text{system, th}} \quad \text{ekv. 6}$$

där $Q_{\text{system, NET}}$ anger den totala mängden nettovärme som systemet levererar till t.ex. uppvärmningen av ett hus och/eller till varmvattenproduktionen.

För en korrekt jämförelse av olika verkningsgrader så är det också viktigt att försäkra sig om att samma typ av specifikt värmevärde, d.v.s. Lower Heating Value (LHV) eller Higher Heating Value (HHV) för det aktuella bränslet har använts vid beräkningen. Skillnaden mellan de båda värdena är att HHV inkluderar vattenångans kondensationsvärme medan LHV förutsätter att allt vatten är i förångad form och att kondensationsvärmets inte utnyttjas i processen. Av historiska skäl har man beslutat att i Europa använda det lägre värmevärdet (LHV) vid beräkningar av verkningsgrader för alla småskaliga kraft- och värmeproduktionssystem, medan i USA och Japan används oftast det högre värmevärdet (HHV). I praktiken skiljer sig t.ex. verkningsgraden för en mCHP-anläggning 2-3 % beroende på om det är baserat på det ena eller det andra värmevärdet, där beräkningar med avseende på det lägre ger det högre värdet.

2.6 Emissioner

Begreppet emission syftar på det som något sänder ut i form av strålning, gas/vätskekomponenter och/eller partiklar.

3. Beskrivning av olika teknologier för m-CHP

Det finns i skrivandets stund ingen formell enhetlig definition på vilket kraft- och värmeintervall som avses då man beskriver småskalig kraft- och värmeproduktion. Enligt EUs direktiv för samproduktion av kraft och värme definierar man att mCHP inbegriper enheter med en maximal kraftproduktion på $< 50 \text{ kW}_e$ [8], medan andra forskargrupper och organisationer definierar mCHP för betydligt lägre kapaciteter, t.ex. $< 15 \text{ kW}_e$ [9] eller $0-3 \text{ kW}_e$ [10], d.v.s. mer anpassade efter kraftbehovet för ett mindre flerfamiljshus eller ett fristående småhus. Ett flertal olika, mer eller mindre mogna, teknologier existerar idag för småskalig kraft- och värmegenerering, vilka är:

- Förbränningsmotor (ICE)
- Stirlingmotorn
- Organic Rankine cycle (ORC)
- Mikrogasturbiner
- Bränsleceller

Av de motorbaserade systemen är omfattningen och delvis mognadsgraden störst för de system som baseras på ICE och Stirlingmotorn, och därav de system, förutom de baserade på bränslecellsteknologi, som inkluderas och beskrivs i denna rapport. En sammanfattande lista för de olika systemen och dess leverantörer är dessutom angiven i rapportens Appendix.

3.1 Förbränningsmotor (ICE)

Småskaliga kraftvärmeverk baserade på ICE är den mest mogna teknologin. ICEs arbetsprincip bygger på konventionell förbränning i en inre sluten förbränningskammare av vanligtvis något fossilt bränsle. Förbränningen/motorn är kopplad till en generator som producerar el. Som bieffekt får man värme som i anläggningen rekupereras via värmeväxling. ICE kan generellt uppdelas i bensinmotorer (Ottocykeln) och dieselmotorer (Dieselcykeln), varav mCHP-anläggningar i storleksordningen $< 30 \text{ kW}_e$ uteslutande är baserad på den förstnämnda. Båda två motorerna är mogna teknologier, kan designas för drift med gas (naturgas, gasol/propan) eller flytande bränslen (fotogen) och finns sedan flera år tillbaka kommersiellt på marknaden från 1 kW_e och uppåt. Exempel på tillverkare är företagen Honda, Vaillant, Baxi-SenerTec, Viessman och Yanmar, m fl. Tekniska detaljer givna för några olika tillverkare för ICE-baserade system finns sammanställda i Tabell 3.1. Som synes ligger den elektriska respektive den termiska verkningsgraden kring 20-30 % och 60-65 % för de system som är lämpade för enskilda hushåll, och något högre för de system som är avsedda för flerfamiljshus, under optimala driftbetingelser och full last. Verkningsgraden minskar dock vanligtvis markant (såvida motorn lastningsregleras och inte varvtalsregleras), t o m till hälften, om enheten körs på del last på grund av ökade inslag av termiska och inre friktionsförluster i motorns rörliga delar [11]. Installationskostnaden för ett komplett ICE-baserat kraftvärmesystem, inklusive ackumulatortank och kompletterande gaspanna/avgasbrännare, varierar i den öppna litteraturen mellan 20 -130 kSEK/ kW_e [12, 13, 14, 15, 16], med generellt det högre kW_e -priset för de mindre effektklasserna omkring 1 kW_e . Nackdelar med ICE-teknologin som vanligen framhålls är relativt höga underhållskostnader och höga bullernivåer samt relativt höga emissioner av oförbrända kolväten, kväveoxider, svaveloxider, sotpartiklar, mm. De två sistnämnda parametrarna har dock på senare tid avsevärt förbättrats via optimerade isoleringsmetoder och användning av effektivare katalytiska emissionsfilter. Leverantörerna redovisar idag bullernivåer omkring 45-55 dB@ 1 m avstånd, se Tabell 3.1 nedan, samt emissionsnivåer på omkring 10X mer än motsvarande emissionsnivåer härstammande från Stirlingbaserade anläggningar [17].

Tabell 3.1. Sammanställning av tekniska data för några kommersiellt tillgängliga småskaliga kraftvärmeverk baserade på ICE. Givna data är hämtade från tillverkarnas egna hemsidor samt referens [15]. Givna siffror för dimensioner och vikt inkluderar motor, värmeväxlare, generator och elkonditionering, dvs exkl. ev. kompletterande gaspanna och vattenackumulatortank. $\eta_{\text{system,EL}}$ anges för nettoproduktionen el från ingående bränsle (LHV).
¹Om kondenserande avgasbrännare inkluderas.

	Baxi-SenerTec Dachs	Honda EcoWill	Vaillant EcoPower	Viessman VitoBloc 200
Produktionskapacitet (kW_e/kW_{th})	5.5/12.5 /15.5 ¹	1.2/3.46	4.7/12.5	18/36
$\eta_{\text{system,EL}}/\eta_{\text{system,th}}$ (%, LHV)	25-30/59-63	20/65	25/65	32 /64
Dimensioner LxWxH (mm)	1060x720x1000	640x380x940	1090x760x1370	1940x890x1220
Vikt (kg)	530	81	390	1000
Bränsle	naturgas, gasol (LPG), biodiesel	naturgas	naturgas, gasol (LPG)	naturgas, biogas
Buller (dB) @ 1 m om ej annat angivits	52-56	44	< 56	66 @2 m

3.2. Stirlingmotorn

Stirlingmotorn är en s.k. termisk motor där, i motsats till i en ICE, värmen produceras externt i en separat kammare. Stirlingmotorn kallas därför även för en extern förbränningsmotor. En stor fördel med Stirlingmotorn är att det inte spelar någon roll hur värmen produceras. Den kan härstamma från förbränning av något fossilt (naturgas) eller förnybart bränsle (biogas), men också från t e x solenergin. Tekniken är således kompatibel med förnybara energikällor. I jämförelse med en konventionell ICE är Stirlingmotorn också generellt tystare, även om det ska noteras att detta inte kan utläsas utifrån de bullernivåer som redovisas av aktuella leverantörer, jfr angivna bullernivåer i Tabell 3.1 med de i Tabell 3.2. Andra fördelar som vanligen lyfts fram med Stirlingmotorn jämfört med ICE är lägre underhållskostnader (3-4 gånger lägre [17]), längre livslängd och lägre emissionsnivåer (upp till en tiondel [17]). Teknologin är däremot betydligt mindre mogen och installationskostnaden rapporteras generellt vara betydligt högre [18], även om de mycket få prisuppgifter som finns tillgängliga för allmänheten varierar över ett mycket stort spann, omkring 60-150 kSEK/kW_e [16, 19]. Även rapporterad elverkningsgrad för dessa system varierar stort i den öppna litteraturen, alltifrån 5 upp till 30 %, med generellt de lägre nivåerna, i genomsnitt 10-15 %, för de mindre effektklasserna runt 1 kW_e [11, 15, 16].

Exempel på delvis (med viss begränsning) kommersiellt tillgängliga småskaliga kraftvärmeverk baserade på Stirlingmotorn är det svenska företaget CleanErgys kombinerade kraftvärmeverk (i dagsläget dock inriktat på jordbruk), WhisperTechs, numer uppköpt av Eon, WhisperGen, Baxis EcoGen-system, Ariston/Boschs och Rinnais Infinia samt Disencos HomePowerPlant. Tekniska detaljer för några av dessa är sammanställda i Tabell 3.2. Merparten av systemen som är designade för bruk i småhus är tänkta att levereras antingen färdigpackade med ackumulatortank eller som vägghängt aggregat avsett att anslutas till

separat ackumulatortank [16]. Dessa system är idag alla gasdrivna. Två exempel på existerande soldrivna anläggningar är CleanErgys 10 kW_e Solar Dish Stirling-enhet [17] samt RiPasso Energys 30 kW_e-system [20]. Malmö stad har bl.a. köpt in den senare som installerats och invigdes i SegePark/Malmö i juni 2010 och planeras att generera el till en näraliggande sjukhusbyggnad. Elverkningsgraden beräknas i detta fall ligga omkring 30 % [21].

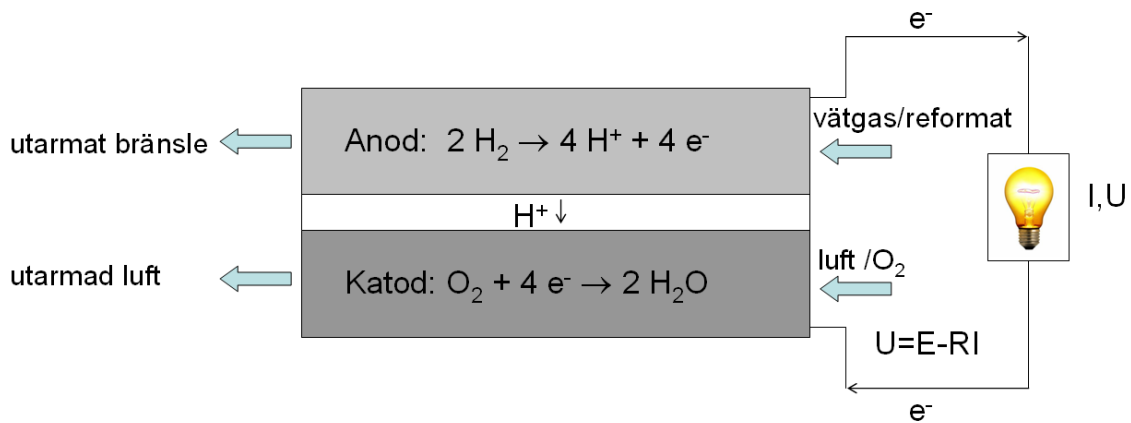
Tabell 3.2. Sammanställning av tekniska data för några kommersiellt tillgängliga kraftvärmeverk baserade på Stirlingmotorn. Givna data är hämtade från tillverkarnas egna hemsidor. Givna siffror för dimensioner och vikt inkluderar motor, värmeväxlare, generator, och elkonditionering. $\eta_{\text{system,EL}}$ anges för nettoproduktionen el från ingående bränsle (LHV).
- = uppgift saknas

	WhisperTechs (Eon) WhisperGen	Baxi EcoGen 24/1.0	CleanErgy CHP version 161
Produktionskapacitet (kW_e/kW_{th}) Stirlingmotor	1.3/12	1/7.7	9/26
Produktionskapacitet (kW_{th}) - Brännare	-	20	-
$\eta_{\text{system,EL}} / \eta_{\text{system,th}}$ Stirlingmotor (%), LHV	-	-	25/67-71
Dimensioner LxWxH (mm)	560x480x840	425x426x920	1280x700x980
Vikt (kg)	137	115	460
Bränsle	naturgas	naturgas, gasol	naturgas, biogas
Buller (dB) @1 m	55	< 45-46	-

3.3. Bränsleceller

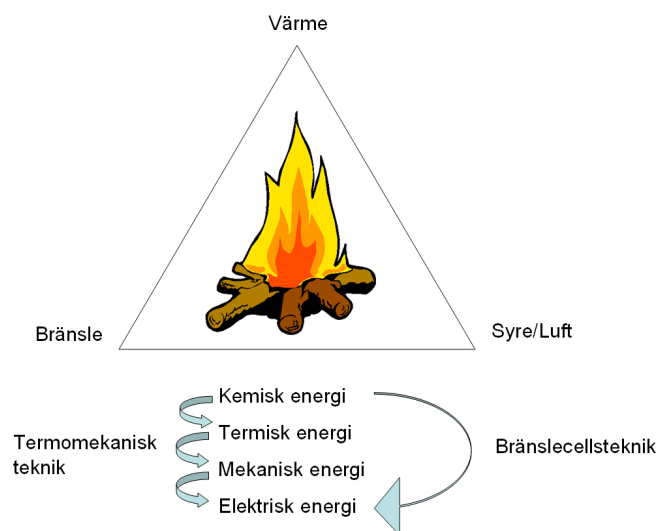
Bränslecellen fungerar i princip som ett batteri förutom att till bränslecellen måste reaktanter, d.v.s. bränsle och luft/syre, tillföras kontinuerligt, medan batterier är satsvisa system d.v.s. lagrar sitt reaktiva material i plus- och minuspol. Batterier lagrar alltså elektrisk energi i kemisk form medan bränsleceller kontinuerligt omvandlar kemisk energi till elektrisk energi.

I Figur 3.1 presenteras en principskiss av en bränslecells huvudkomponenter och funktion. Som exempel illustreras en vätgasdriven polymerelektrolytbränslecell (PEMFC). Bränslecellen byggs upp utav en minuspol, s.k. anod, och en pluspol, s.k. katod, som åtskiljs utav en joniskt, men elektriskt isolerande, elektrolyt. Anod och katod binds ihop av en extern strömtilliedare. Vid normaldrift tillförs anoden kontinuerligt med bränsle, i detta exempel i form av vätgas eller en vätgasrik blandning s.k. reformatgas, medan katoden kontinuerligt tillförs med luft. Vid anoden kommer vätgasmolekylerna att oxideras och bilda vätejoner och elektroner. Elektronerna kommer därefter att vandra genom den externa strömkretsen, via den last som är ansluten till kretsen, till katoden. De bildade vätejonerna transporteras samtidigt via elektrolyten till katoden, där de tillsammans med elektroner reducerar syremolekyler och bildar vatten.



Figur 3.1. Bränslecellens princip. U =uppmätt spänning, E =teoretisk spänning, R =total inre resistans, I =uppmätt ström. Katod (pluspol), Anod (minuspol).

I likhet med en termisk förbränning är det alltså i bränsleceller fråga om en reaktion mellan ett bränsle och syre. Den stora skillnaden är dock att denna reaktion, i de flesta fall, sker vid en väsentligen lägre temperatur och att den är uppdelad på två elektrodreaktioner. Tack vare att bränslecellen omvandlar kemisk energi direkt till elektrisk energi, se Figur 3.2, så kan också högre verkningsgrader generellt uppnås jämfört med då termomekaniska processer tillämpas där den s.k. Carnotverkningsgraden ($\eta = 1 - T_{\text{kall}}/T_{\text{varm}}$) är begränsande [22].



Figur 3.2. Illustrerande principskiss som visar skillnaden mellan traditionella termomekaniska processer och bränsleceller.

Förutom att vara en effektiv teknologi så medför användande av bränslecellsteknologin även andra viktiga fördelar, som summeras nedan:

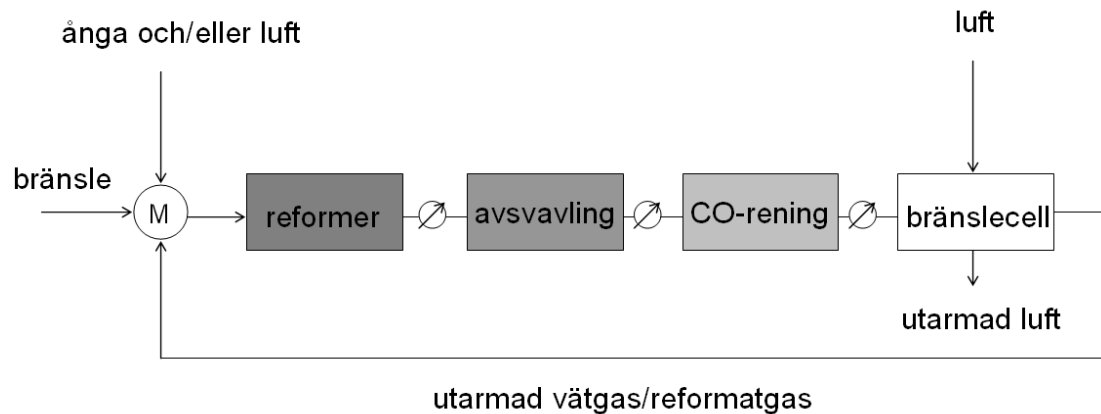
- *Hög elverkningsgrad*, som ligger kring $\eta_{\text{FC, EL}} = 40\text{-}60\%$, $\eta_{\text{SYST, EL}} = 30\text{-}40\%$. Verkningsgraden för olika bränsleceller och bränslecellsystem skiljer sig nämnvärt i litteraturen. Detta beror på att den exakta verkningsgraden hos den enskilda bränslecellen är beroende av driftsbetingelser såsom temperatur, tryck, flöden, gassammansättningar och last, samt inre resistanser kopplade till komponenternas materialegenskaper. Vid beräkning av systemelverkningsgraden måste även, i likhet med andra system, hänsyn till effektiviteten hos alla ingående systemkomponenter tas, vilket kan variera signifikant.

- *Miljövänlig.* Även om fossila bränslen används som bränsle så resulterar ett bränslecellsystem i betydligt lägre utsläpp (omkring hälften eller ännu mindre) av växthusgaser (koldioxid (CO_2), metan (CH_4)) än traditionell förbränningsteknologi. Farliga utsläpp av gaskomponenter såsom svaveloxider (SO_x) och kväveoxider (NO_x) undviks helt eller avges i försumbart låga halter.
- *Tyst.* Bränslecellsdriften i sig själv är en fullständigt tyst process. Nödvändiga systemkomponenter såsom fläktar, pumpar, brännare, m.fl. resulterar dock i en viss bullernivå vid drift. Bullermätningar har visat att ett stationärt bränslecellssystem för småskalig kraft- och värmeproduktion resulterar i ungefär samma bullernivåer såsom en motsvarande kondenserande gasvillapanna, < 30-45 dB, vilket i de flesta fall är betydligt tystare än motsvarande termomekaniska processer, se angivna bullernivåer Tabell 3.1 och 3.2.
- *Inga friktionsförluster* till följd av att inga rörliga delar finns.
- *Bränsleflexibla.* Bränslecellsystemen kan utvecklas som bränsleflexibla system inkluderande både gasformiga (naturgas, biogas, gasol, vätgas) och vätskeformiga bränslen (fotogen, etanol, metanol). Bränsleceller är således kompatibla med förnybara bränslen.
- *Brett reglerområde.* I motsats till konventionella dieselgeneratorer (ICE) så uppnås hög verkningsgrad för en bränslecell över ett brett reglerområde. För den enskilda bränslecellen så kan t o m verkningsgraden öka med minskande last till följd av att de inre resistanserna minskar med minskat strömutfog.
- *Flexibilitet och skalbarhet.* Bränslecellsystem kan lätt designas för olika effektklasser då de konstrueras som cellmoduler. Driftspänningen bestäms framförallt av antal celler som staplas på varandra och storleken på strömmen bestäms utav elektrodstorlek och bränsleflöde.

Även om mycket forsknings- och utvecklingsarbete pågår världen runt och viktiga framsteg görs inom bränslecellsteknologin (se under rubrik 8) är teknologin fortfarande ansedd som omogen. Teknologin är fortfarande mycket dyr samt systemen relativt komplexa. De ekonomiska och tekniska aspekterna av denna teknologi beskrivs mer utförligt under kommande rubriker.

4. Beskrivning av olika bränslecellsystem

I Figur 4.1 visas ett schematiskt blockschema över ett bränslecellsystems huvudsakliga komponenter vid produktion av el (DC) från bränsle. Nyckelkomponenterna består av en reformer och en bränslecell/bränslecellstack. Typ och grad av nödvändig gasrening beror på vilken typ av bränsle som används i kombination med vilken typ av bränslecell som ingår i systemet. Även graden av värmeväxling beror på vald bränslecellsteknologi. I detta avsnitt ges en beskrivning av ovannämnda komponenter.



Figur 4.1. Schematiskt blockschema av ett bränslecellssystem från bränsle till elektricitet (likström). Graden av gasrening och värmewäxling beror av bränsletyp och bränslecellstyp. M=blandningspunkt.

4.1. Olika bränslecellsprinciper

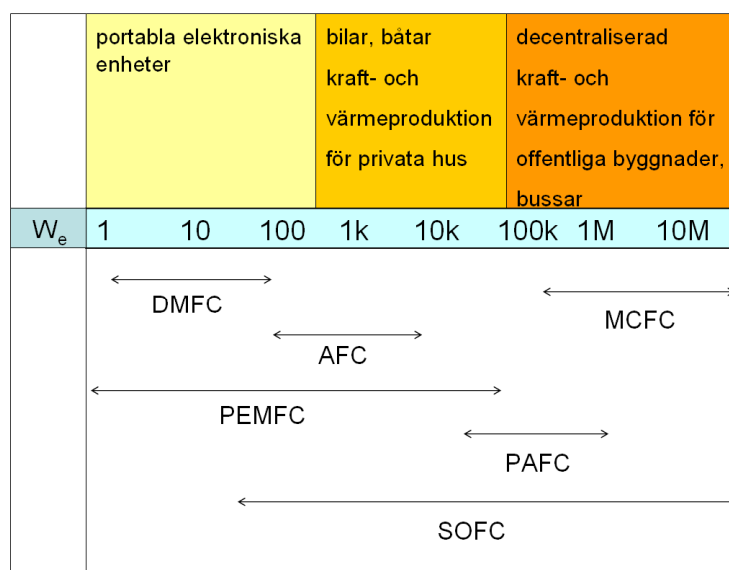
Det finns flera olika typer av bränsleceller. Den stora skillnaden mellan de olika typerna är dess driftstemperatur och därmed vilken elektrolyt och vilka elektrodmaterial som används. Bränsleceller brukar klassificeras som antingen låg- eller högttemperaturbränsleceller. Vidare är de olika typerna namngivna efter vilken elektrolyt som används. Här följer en översiktlig beskrivning av de olika bränslecellerna, deras speciella egenskaper samt vilka tillämpningsområden de är bäst lämpade för. Tabell 4.1 summerar de olika bränslecellsteknologierna, dess driftsvillkor samt materialegenskaper, medan aktuella effekt- och tillämpningsområden för de olika teknologierna sammanfattas i Figur 4.2.

Tabell 4.1 Summering av olika bränslecellsteknologier. LT-PEMFC = lågtemperatur polymerelektrolytbränslecell, HT-PEMFC = högtemperatur polymerelektrolytbränslecell, AFC=Alkalisk bränslecell, PAFC=Fosforsyrabränslecell, MCFC=Smältkarbonatbränslecell, LT/HT-SOFC=Lågtemperatur/Högtemperatur fastoxidbränslecell. PBI=polybenziimidazole, KOH=kaliumhydroxid, H_3PO_4 =fosforsyra, CO_3 =karbonat, YSZ=yttriumstabiliserad zirkonium, Pt=platina, Ru=Rutenium, Ag=silver, Ni=nickel, H_2 =vätgas, CO=kolmonoxid, CO_2 =koldioxid, CH_4 =metan, NH_3 =ammoniak, S=svavel.

¹Angivna katalysatorgifter är de vanligaste förekommande i reformatgas härstammande från naturgas/biogas.

²Elverkningsgraden baseras på vätgasdrift (LHV) och är här angiven för den enskilda cellen [23].

	LT-PEMFC	DMFC	HT-PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	IT/HT-SOFC
drifts T (°C)	60-90	60-90	120-180	50-250	150-200	600-700	550-650/ 700-900
elektrolyt	polymer (nafion) /sulfonsyra	polymer (nafion) /sulfonsyra	polymer (PBI) /fosforsyra	KOH	H_3PO_4	CO_3 -smälta	YSZ-keram
katalysator	Pt/Ru	Pt/Ru	Pt/Ru	Pt,Pd, Ag, Ni	Pt	Ni/NiO	Ni/perovskit
oxidant	luft	luft	luft	O_2	luft	luft+ koldioxid	luft
bränsle	vätgas	vätgas metanol	vätgas	vätgas	vätgas	vätgas kolmoxid metan	vätgas kolmoxid metan
tolerans gasorenheter	mycket låg	mycket låg	måttlig	extremt låg	måttlig	måttlig	måttlig
katalysator- gifter ¹	CO, S, NH_3	CO, S, NH_3	CO, S, NH_3	CO, S, NH_3 , CH_4 , CO_2	S	S	S
dynamik	mycket god	mycket god	måttlig	god	måttlig	dålig	dålig
$\eta_{el,FC}$ ²	50-70	20-30	50-70	60-70	50-60	50-60	60-65



Figur 4.2. Typiska applikationsområden för olika bränslecellsteknologier.

Den mest beprövade och mest kommersiellt etablerade bränslecellsteknologin är polymerelektrolytbränslecellen (PEMFC=Polymer Electrolyte Fuel Cell), även benämnd som PEFC = Proton Exchange Fuel Cell. PEMFC arbetar vid låga temperaturer, runt 60-90°C, vilket gör den snabbstartad. Den kan även starta vid temperaturer under noll. Vidare är bränslecellskonstruktionen termomekaniskt robust. Dessa egenskaper medför att denna teknologi får stor uppmärksamhet av ett flertal industrier, inte minst på sistone av bilindustrin [24].

Även om en låg driftstemperatur resulterar i ett flertal fördelar så medför detta också tyvärr en del nackdelar. Till skillnad mot de bränsleceller som arbetar vid höga temperaturer fungerar enbart vätgas som bränsle. Katalysatorn på elektroderna är dessutom mycket känslig för gasorenheter (kolmonoxid > 50-100 ppm (v), svavel > tiotal ppb (v), ammoniak > 1 ppm (v)) [25, 26], vilket i sin tur kräver omfattande gasrening uppströms bränslecellen vid reformatgasdrift. Bränslecellens elektrolyt, bestående av ett jonledande polymert membran (nafion™, baserat på sulfonsyra (PFSA)), är dessutom känslig för uttorkning, vilket medför att driftstemperaturer över kokpunkten inte är möjliga och att det krävs att tillförda reaktanter (luft, bränsle) kontinuerligt uppfuktas med högkvalitativt avjonat vatten.

En variant av PEMFC är Direktmetanolbränslecellen, DMFC, där man använder metanol som vätebärare istället för ren vätgas. Den stora fördelen med metanol är att den är enkel att lagra i jämförelse med vätgas som kräver tryckbehållning alternativt metallhydrid. Till följd av problem som att membranet släpper igenom metanol samt låg anodprestanda så uppvisar dock DMFC signifikant lägre verkningsgrad än PEMFC som tillförs med vätgas, varav den inte lämpar sig för stora stationära system utan främst riktas in mot den portabla elektronikmarknaden, exempelvis mobiltelefoner, bärbara datorer mm.

Under de senaste åren har även utvecklingsarbetet av högtemperaturpolymerbränsleceller (HT-PEMFC) tagit fart. Tack vare den högre driftstemperaturen (~160°C) är elektrokatalysatorn betydligt mer tolerant mot vanligt förekommande gasorenheter än LT-PEMFC. Enligt leverantörernas rekommendationer tål bränslecellen upp till 1.5-2 % kolmonoxid och 10-20 ppm (v) svavel vid kontinuerligt drift/35 ppm (v) svavel vid kortvarig drift [27, 28]. Detta resulterar i sin tur i att gasreningssystemet kan väsentligen förenklas eller till och med tas bort (se under rubrik 4.3), d.v.s. systemet lämpar sig mycket bättre för reformatgasdrift än vad LT-PEMFC gör.

En annan viktig fördel med ett system baserat på HT-PEMFC-teknologi är att det kan göras, till skillnad mot LT-PEMFC, vattenoberoende. Detta kommer av att elektrolyten, vanligtvis baserad på ett polymert membran (polybenzimidazol (PBI)) dopad med fosforsyra, inte kräver någon uppfuktning för att fungera.

De faktorer som i litteraturen lyfts upp som kritiska med HT-PEMFC i dagsläget är dess hållbarhet. Även om systemet, i likhet med LT-PEMFC, är ett termomekaniskt stabilt system kan det ändå relativt lätt degraderas om inte rekommenderade driftbetingelser följs. Rekommenderad drifttemperatur då reformatgas används är vanligen omkring 160°C. Toleransen av exempelvis kolmonoxid och följaktligen också verkningsgraden kan dramatiskt förbättras om temperaturen ökas ytterligare 20-30°C, men detta leder i sin tur till degradering av både membran och katalysator. Hög temperatur i kombination med hög cellspänning ska alltid undvikas, då detta leder till degraderande upplösning och återutfällning av katalysator samt oxidation av katodmaterial. En annan viktig restriktion är att systemet alltid måste vara i uppvärmt tillstånd, d.v.s. > 100-120 °C då bränsletillförsel sker. Detta för

att undvika att vatten kondenseras ut och lakar ut fosforsyran i elektrolyten som i sin tur försämrar elektrolytens ledningsförmåga samt kan orsaka allvarliga korrosionsproblem [29,30].

Alkaliska bränsleceller (AFC) är den bränslecellsteknologi som var den första att demonstreras i praktiska applikationer med start på mitten av 1960-talet, i detta fall av NASAs rymdprogram för kraftgenerering och produktion av dricksvatten [31]. AFCs ger generellt en högre elverkningsgrad än övriga bränsleceller och den är också den billigaste att producera. Dessa fördelar överskuggas olyckligtvis utav den stora nackdelen att enbart rengjord syrgas kan användas på katodsidan då systemet är extremt känsligt för koldioxid. Förutom koldioxid, är anodsidan också mycket känsligt för föroreningar såsom vatten och kolvätereater (metan). AFC lämpar sig således uteslutande för drift med ren vätgas och syrgas, d.v.s. slutna system. Förutom från rymdindustrin får AFC uppmärksamhet från marina tillämpningar och nischmarknader såsom den för små elektriska fordon (golfbilar, truckar), m.fl. [32].

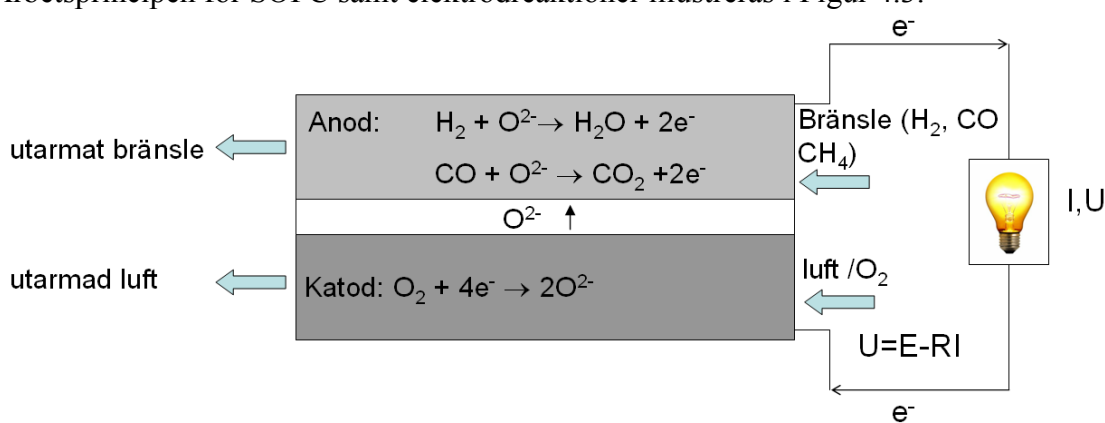
Fosforsyrabränslecellen, PAFC, var den första bränslecellsteknologin som kommersialiserades, och finns i dag i drift som stationära enheter för kraft- och värmeproduktion i offentliga byggnader såsom sjukhus, skolor och hotell, vanligen i storleksordningen 50-200 kW_e/enhet, även om större anläggningar i MW området har installerats och prövats. Arbetstemperaturen är 160-200°C. Till följd av den mycket korrosiva elektrolyten (100 % fosforsyra) och den relativt höga drifttemperaturen lämpar sig denna bränslecell uteslutande för stationärt kontinuerligt bruk då komplexa systemutformningar i detta fall krävs.

Smältkarbonatbränslecellen, MCFC, och Fastoxidbränslecellen, SOFC, tillhör kategorin högttemperaturbränsleceller, och arbetar vid $T > 550-600^{\circ}\text{C}$. Den höga drifttemperaturen medför ett flertal fördelar. En viktig fördel är att reaktioner på båda elektroderna är betydligt snabbare än i lågtemperatursystemen, även utan ädelmetall/platina, varav katalysatorn i dessa fall kan bestå utav betydligt billigare material (nickel). Bränslecellerna är också bränsleflexibla system. Inte bara vätgas utan även kolmonoxid fungerar som direkt bränsle. Högttemperaturbränslecellerna tillåter även direkt tillförsel av vissa kolväteföreningar såsom metan (naturgas) då det är möjligt att vid dessa temperaturer reformera internt på anodsidan, d.v.s. utnyttja s.k. intern reformering [33]. Systemen är också relativt okänsliga mot gasorenheter såsom svavel (< 50 ppm (v)), olefiner och aromater (några tusen ppm (v)) [34]. Möjligheten till intern reformering/partiell reformering (se under rubrik 4.2.) och förenklade gasreningssystem gör att bränslecellssystemen kan utformas till relativt kompakta system. Andra fördelar med högttemperaturbränsleceller är att systemen, i likhet med HT-PEMFC, kan göras vattenoberoende, samt att förlustvärmen (den producerade värmen) är vid högre temperatur och därmed av en högre kvalitet. Det senare är fördelaktigt i kombinerade termiska processer som så är fallet i småskaliga kraftvärmeverk.

Det finns givetvis också kritiska punkter med högttemperaturbränsleceller. Vid höga temperaturer blir materialen och därmed systemen termomekaniskt svagare, vilket ställer tuffa krav på materialens egenskaper samt försvårar snabba, enkla uppstarts- och nedstängningsprocedurer. Höga drifttemperaturer ger också ökad risk för korrosionsproblem. Det senare är ett av de viktigaste materialproblemen hos MCFC där korrosion av strömtilliedare och upplösning av katoden observeras [35]. För att undvika korrosionsproblem och framförallt utveckla billigare system ägnas det idag mycket energi på att hitta lösningar som fungerar väl även vid lägre temperatur.

Då det gäller SOFC-utvecklingen läggs till exempel mycket fokus på att hitta nya katod- och elektrolytmaterial, då syrereduktionen på katodsidan samt elektrolytens ledningsförmåga är de mest begränsande processerna i detta fall. Detta har lett fram till utvecklingen av s.k. IT-SOFC-system, där IT står för ”intermediate temperature”, vilka har demonstrerat acceptabel prestanda redan vid 550-650°C jämfört med de traditionella 700-900°C [36].

Arbetsprincipen för MCFC och SOFC skiljer sig något från den som gäller för lågtemperaturbränslecellsystemen. I MCFC består elektrolyten av en karbonatsmälta i vilken karbonatjonen, och inte vätejonen, fungerar som laddningsbärare. För ett fungerande system krävs dock att koldioxid kontinuerligt recirkuleras från anod till katod, vilken är en komplicerande faktor. Det senare är också ett av huvudskälen till att MCFC bäst lämpar sig för större anläggningar i storleksordningen några hundra kW till MW. I SOFC däremot består elektrolyten utav ett keramiskt material där syrejonen fungerar som laddningsbärare. Arbetsprincipen för SOFC samt elektrodreaktioner illustreras i Figur 4.3.



Figur 4.3. SOFCs arbetsprincip. U =uppmätt spänning, E =teoretisk spänning, R =total inre resistans, I =uppmätt ström.

Till skillnad mot de andra bränslecellerna finns SOFC i flera geometrier där de huvudsakliga är plan och tubulär geometri. Den plana geometrin är den ”sandwichformade” geometrin som de övriga bränslecellerna också har, där elektrolyten ligger pressad som en tunn film mellan elektroderna. I den tubulära konfigurationen leds vanligtvis bränslet in på insidan av röret där anoden finns samtidigt som luft blåses över rörets utsida som utgörs av katoden. Båda geometrierna har sina för- och nackdelar. Den stora fördelen med tubulär geometri är att den är betydligt mer termomekaniskt stabil än den plana vilket möjliggör snabba upp- och nedstängningar. Den är också konstruktionsmässigt lättare att tätas mellan bränsle och luft. Nackdelen är att den har betydligt lägre effektdensitet än den plana geometrin varav den tubulära främst lämpar sig för små effektklasser ($\ll 1$ kW) eller där storleken inte är av någon betydelse.

4.2. Olika reformeringsmetoder

De flesta bränslecellssystem kräver alltid någon typ av bränslereformer såvida inte ren vätgas finns tillgänglig. En bränslereformer bryter ner, på katalytisk väg, kolväten till gaskomponenter såsom vätgas (H_2), kolmonoxid (CO) och koldioxid (CO_2). Det finns i princip tre olika metoder för reformering: ångreforming (SR=steam reforming), autotermisk reformering (ATR=autothermal reforming) samt partialoxidation (CPO=catalytic partial oxidation). Vilken metod man väljer beror på ett flertal parametrar såsom vald bränslecellsteknologi, vikten av verkningsgrad och systemkomplexitet, m m. En översiktlig beskrivning av de tre metoderna ges i följande text.

4.2.1. Ångreforming, SREF

Vid SREF spjälkas kolväten med hjälp av överhettad ånga, se reaktionsformel i ekvation 7. Reformingsreaktionen, som är en endoterm process (kräver energi!), understöds av en exoterm (ger energi!) förbränningsreaktion i en värmeväxlarreaktor. SREF är också den metod som tillämpas om intern reformering utnyttjas i högtemperaturbränslecellerna MCFC och SOFC. Vilken temperatur som krävs för reformeringen beror på vilket bränsle som reformeras. Metanol till exempel reformeras redan vid 250°C, medan metan, som biogas och naturgas i huvudsak består av, kräver så pass höga temperaturer såsom 900 -1000°C.



SREF är den metod som ger högst verkningsgrad, nära 100 % om utgående restgas från bränslecellen recirkuleras och återanvänds på den exoterma sidan av reformingsreaktorn. SREFs nackdel är framförallt att den kräver relativt komplexa system innehållande integrerade brännare, förångare och kylare, mm. Andra nackdelar som bör nämnas är att metoden är svår att använda då vattenoberoende system önskas och att det relativt lätt, speciellt då ångtillförseln fluktuerar, bildas sotpartiklar som blockerar katalysatorn med nedsatt prestanda som följd. I jämförelse med ATR och CPO tillstöter oftare även termomekaniska problem vid uppstart- och nedstängningar, som kan leda till sprickbildningar.

4.2.2. Autotermreforming, ATR

Vid ATR tillförs bränsle, ånga och luft i ett och samma katalytiska steg, och inte åtskilt som då SREF. Verkningsgraden blir i detta fall betydligt lägre än vid SREF, omkring 80 %, men medför fördelar såsom att reaktordesignen kan utformas betydligt enklare än vid SREF samt att de termomekaniska problem som oftare tillstöter i det sistnämnda fallet kan undvikas.

4.2.3. Partialoxidation, CPO

CPO är den reformeringsmetod som är ansedd som den enklaste, men dock med lägst verkningsgrad som följd, omkring 60 %. I detta fall tillförs ingen extern ånga alls utan bränslet oxideras/förbränns partiellt och spjälkas upp till de mindre gaskomponenterna, enligt:



För att förbättra CPOs verkningsgrad något samtidigt som potentiell risk för överhettning och sotbildning minskas kan man återföra utgående restgas från bränslecellen till CPO-reaktorn. Då restgasen innehåller en betydande mängd vattenånga/vätgas så får man på detta sätt ATR-liknande driftsvillkor samtidigt som systemet fortfarande är ett vattenoberoende system. CPO-reaktors design är ofta densamma eller liknar den design som används vid ATR.

4.3. Olika gasreningsmetoder

I de flesta fall krävs att reformatgasen renas uppströms bränslecellen för att ett fungerande system ska uppnås. Vilken reningsmetod man bör ha och till vilken grad gasen måste renas bestäms utav aktuellt bränsle, vilken bränslecellsteknologi som ingår i systemet samt givetvis vilken kravspecifikation gällande systemkomplexitet, verkningsgrad och systemstorlek mm som finns för den givna applikationen. Som beskrivits under rubrik 4.1 så gäller generellt att ju lägre driftstemperatur, ju känsligare system, desto mer gasrening krävs. Det sistnämnda inbegriper både katalysatorn i reformer, gasreningssteg och bränslecell.

Det finns olika metoder för gasrening som används i bränslecellssystem: Kemisk rening och Fysikalisk rening (absorption/adsorption) som sker vid atmosfärstryck samt de trycksatta metoderna Pressure Swing Adsorption (PSA) och Membranrening, vilka kortfattat beskrivs i följande text.

Det kemiska reningsteg som är aktuellt i bränslecellssystem är det för reducering av kolmonoxid. Mängden kolmonoxid utifrån en reformer beror på aktuella driftsvillkor och reformeringsteknik, men ligger vanligtvis omkring 10 vol%. Om LT-PEMFC används måste denna reduceras till < 100 ppm (v) kolmonoxid, om HT-PEMFC räcker det med att gasen renas till 1-2 vol% kolmonoxid och om högttemperaturbränsleceller såsom MCFC och SOFC används behövs i många fall ingen kolmonoxidrening alls. Kolmonoxidkoncentrationen reduceras vanligtvis till någon % via en eller flera s.k. katalytiska vattengasreaktorer (WGS=Water Gas Shift) och därefter, om så behövs, via en eller flera katalytiska selektiva oxidationssteg s.k. PROX-reaktorer (PROX =Preferential Oxidation Reaction). Reaktionsformel, drifttemperaturintervall och aktuella katalysatorer för respektive reningsteg är sammanfattade i Tabell 4.2.

Tabell 4.2. Kemiska reningsteg som används för reducering av kolmonoxid (CO)

Reaktion	Reaktionsformel	Aktuell temperatur (°C)	Katalysator
WGS	$\text{CO(g)} + \text{H}_2\text{O(g)} \leftrightarrow \text{CO}_2\text{(g)} + \text{H}_2\text{(g)}$	200 - 550	Fe-Cr, Cu, Zn, Al, Pt
PROX	$\text{CO(g)} + 0.5\text{O}_2\text{(g)} \rightarrow \text{CO}_2\text{(g)}$	120-170	Pt

Kemisk rening är den vanligaste reningmetoden i bränslecellssystem och också det som idag appliceras i demonstrationsanläggningar för småskalig kraft- och värmegenerering. De främsta skälen till detta är att de är alla förhållandevis små och arbetar vid atmosfärstryck. Andra fördelar inbegriper god skalbarhet, inga rörliga delar finns samt att de är relativt billiga. Den stora nackdelen är att de endast reducerar kolmonoxid och således inga andra potentiella katalysatorgifter (svavel, ammoniak, klorider..). Beroende på använd katalysator är metoderna även, till olika grad, svavelkänsliga, vilket medför att eventuellt svavel måste elimineras uppströms WGS respektive PROX-stegen.

I motsats till kemisk rening kräver PSA trycksatta system. PSAs arbetsteknik bygger på att adsorbenter (aluminium, silikater, aktivt kol..) är kapabla att adsorbera vissa gasenheter vid högre tryck än vid ett lägre. Vätgas adsorberas inte, vilket gör att denna metod lämpar sig för reformatgasrening. Denna teknik genererar reformatgas av mycket god kvalitet, > 99.9 % vid ett förhöjt tryck och är tolerant mot gasenheter (svavel), men är däremot känslig för kondenserbara molekyler såsom vatten och tyngre kolväten. Traditionella PSA-system lämpar sig enbart för stora anläggningar (100-100 000 Nm³/h H₂) då de är mycket stora, bulkiga och dyra enheter innehållande ett komplext ventilsystem med relativt dålig skalbarhet. På senare år har dock en ny variant av PSA introducerats av bl.a. det amerikanska företaget QuestAir, nuvarande Xebec Adsorption Inc., som ska lämpa sig även för småskaliga system, s.k. Fast Cycle PSA [37].

I likhet med PSA så kräver även membrantekniken trycksatta system. Även med denna metod kan mycket god renhetsgrad uppnås, > 99.99 %, men i detta fall, i motsats till PSA, levereras den uppenade gasen vid atmosfärstryck. Arbetsprincipen bygger på att vätgas diffunderar

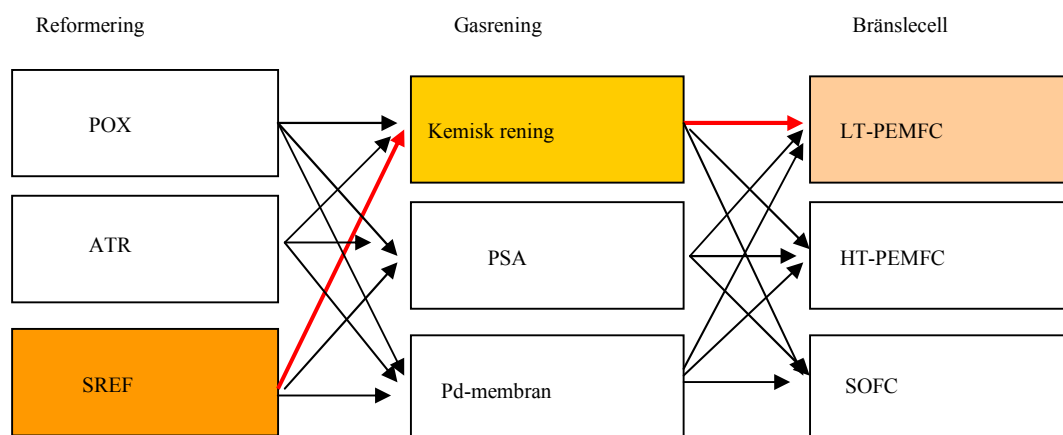
genom ett uppvärmt metallmembran (vanligtvis palladium eller någon form av palladiumlegering) med hjälp av en tryckgradient. Denna teknik är mycket känslig för orenheter såsom svavel, halogener (klorider) och omättade kolväten men också syrgas, även i mycket låga koncentrationer (ett tiotal ppm), som antänder och kan leda till bildning av förstörande "hot spots". En annan stor nackdel är dess höga kostnad.

Svavel är en vanlig förekommande orenhet i många bränslen, som kan elimineras direkt från bränslet uppströms reformersystemet med hjälp adsorption till aktivt kol [38] och/eller från reformatgasen nedströms reformerreaktorn via absorption till exempelvis zinkoxid (Zn/ZnO) [39]. Det senare förutsätter att bränslet inte innehåller alltför höga svavelhalter (> tusentals ppm (vikt)) och att reformerkatalysatorn är svaveltolerant.

Då biogas används som bränsle så bör man även beakta gasrening med avseende på eventuellt förekommande siloxaner, klorider och ammoniak då dessa kan orsaka allvarlig degradering av katalysator i bränsleomvandlingssteg och/eller i själva bränslecellen, se under rubrik 5. I likhet med svavel kan siloxanförening absorberas med hjälp av aktivt kol [40]. För borttagande av klorider används vanligen absorbenter såsom kaliumkarbonat [41] medan ammoniak kan på katalytisk väg oxideras till ofarligt kväve med hjälp av zeoliter [42].

4.4. Kortfattad sammanfattning beskrivande uppbyggnad av bränslecellsystem för m-CHP

Som framgår av ovanstående stycken så kan ett bränslecellssystem vara uppbyggt på ett flertal olika sätt, både med avseende på typ av reformering, gasrening och bränslecell. Val av systemuppbyggnad beror på aktuell tillämpning och den aktuella kravspecifikationen gällande parametrar såsom verkningsgrader, driftprofil (kontinuerlig drift/cyklingar), vattentillgång/vattenoberoende system, geometriska dimensioner, vikt, bränsle, m fl. I dagsläget baseras den absolut största majoriteten av alla installerade mCHP-enheter på LT-PEMFC (ca 80 %) [11] då detta är den mest mogna, beprövade teknologin, resterande är huvudsakligen baserade på SOFC. Som reformeringsmetod används vanligtvis ångreformering då detta är den metod som ger den överlägset högsta verkningsgraden, i kombination med atmosfärisk gasrening av kolmonoxid och eventuellt svavel, se Figur 4.4. Beskrivningar av olika småskaliga kraftvärmeverk som baseras på bränslecellsteknologi ges under rubrik 6 och 7.



Figur 4.4. Olika potentiella systemkonfigurationer för stationära bränslecellsystem. I dagsläget är majoriteten bränslecellsbaserade mCHP-anläggningarna uppbyggda enligt de färgade markeringarna.

5. Beskrivning av olika bränslen

De bränslen som behandlas i denna studie är de bränslen som idag finns tillgängliga i gasdistributionsnätverket. Fokus ligger på de svenska förhållandena, även om situationen i andra länder där bränslecellsutvecklingen pågår också belyses.

Vätgas är naturligtvis det bränsle som är enklast att använda i bränslecellssystem. Inget reformeringsteg behövs och all annars nödvändig gasrening kan helt och hållet slopas. I dagsläget finns dock inget nätverk för vätgasdistribution. Denna avsaknad är förknippad med vätgasens låga energiinnehåll per volymenhet ($2.95 \text{ kWh/nm}^3 @ 0^\circ\text{C}$, LHV motsvarande ca 1/3 av den upparbetade biogasens) vilket resulterar i både höga och kostnadskrävande materialkrav vid lagring, distribution och vid den slutliga användningen. Dessa problem undviks genom att reformera kolvätebaserade bränslen i direkt anslutning till bränslecellen, se under rubrik 4.

I Sverige finns gasnät för naturgas och biogas. Naturgas är den energigas som används mest, motsvarande omkring 2 % av Sveriges totala energiförsörjning (i jämförelse med ca 25 % i Centraleuropa) [43]. Det finns idag endast en naturgasledning i Sverige som sträcker sig från Trelleborg upp till Stenungssund med förgreningar österut mot Gnosjö i Småland. Naturgasen kommer från Danmark där den i sin tur mestadels utvinns från gasfält belägna i Nordsjön, men också delvis importeras, av ekonomiska skäl, från andra länder såsom Ryssland, m fl. Den typiska gassammansättningen för dansk gas i tabell 5.1. I avsaknad på gasledning så kan naturgas levereras i vätskebaserad form, s.k. Liquified Natural Gas (LNG). Det senare används bl.a. i Stockholmstrakten, dit LNG fraktas med båt och därefter med tankbilar till olika anläggningar. Naturgasanvändningen ses här som en brygga till en kommande situation där biogasen ersätter naturgasen. En typisk LNG innehåller 86-92 % metan och resten tyngre kolväten, framförallt etan [44].

Tabell 5.1. Typiska gassammansättningar för energigaser använda i Sverige [44,45]. Den uppgraderade biogasen kan innehålla, i värsta fall, någon enstaka ppm av svavelväte, ammoniak och kloriner. % anger volym%.

naturgas (dansk)	biogas (prod. via rötning)	uppgraderad biogas	uppgraderad biogas med lufttillsats
89.6 % metan 5.9 % etan 2.4 % propan 0.9 % butan 0.2 % pentan 0.1 % hexan 0.3 % kväve 0.7 % koldioxid 5 ppm svavelväte	60-70 % metan 30-40 % koldioxid 0.2 % kväve < 1000 ppm svavelväte	97.5 % metan 2.5 % koldioxid	51 % metan 1 % koldioxid 10 % syre 38 % kväve

I motsats till naturgasen är biogasen ett förnybart bränsle, och tillför således vid förbränning inget nettotillskott av växthusgaser. Gasen kan utvinnas vid nedbrytning av organiskt material i en syrefattig miljö, s.k. rötning, eller via termisk förgasning av trädbänslen och annat kolhaltigt bränsle. Många reningsverk har idag sina egna biogasproduktionsanläggningar. Gassammansättningen för biogas kan variera mycket beroende på typ av råvara, anläggningens ålder, hur välskött anläggningen är o.s.v, men består mestadels av metan och

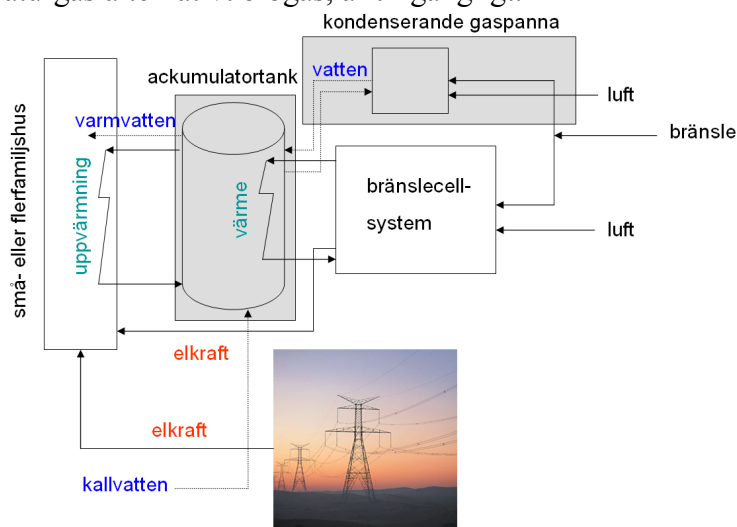
koldioxid. En typisk sammansättning för biogas framställd via rötning ges i tabell 5.1. För att reducera mängden koldioxid och nå s.k. naturgaskvalité så uppgraderas biogasen vanligen till mestadels metan innan den leds ut på nätet. Variationer i gassammansättningar för uppgraderad biogas är generellt mycket små i jämförelse med icke-uppgraderad gas. Förutom svavelväte så kan man i biogasen även finna små mängder av siloxaner, ammoniak (< 100 ppm) och klorföreningar (0-5 mg/Nm³) [45].

Till skillnad mot i resten av landet så blandar man i Stockholmstrakten även in luft i naturgasen (produktionsanläggningen för biogas är ännu inte färdigbyggd [45]). Detta görs för att gasen, från januari 2011, ersätter den tidigare använda, lättbensinbaserade stadsgasen. För att kunna använda det befintliga stadsgasnätverket krävs det då att man späder gasen för att få samma wobbeindex som den ursprungliga stadsgasen har. Så fort biogasanläggningen är färdigställd avser man ersätta naturgasblandningen med biogas, som även den kommer att vara utblandad med luft, se typisk förväntad sammansättning för upparbetad biogas med lufttillsats given i Tabell 5.1.

I övriga världen finner man även andra bränslen som är aktuella och utvärderas i småskaliga stationära bränslecellsanläggningar. I Japan t.ex., där det långt ifrån största bränslecellsprogrammet pågår (se under rubrik 8), är, förutom naturgas, även bränslena gasol (förkortas på engelska LPG=Liquified Petroleum Gas) och fotogen aktuella. Stationära bränslecellssystem som drivs på gasol utvecklas och utvärderas även i ett större antal enheter i bl.a. Storbritannien.

6. Förslag och beskrivning på bränslecellssystem för m-CHP

Figur 6.1. visar en generell schematisk illustration av ett bränslecellsbaserat kraftvärmesystem. För att täcka tillfälliga toppar i värmebehov, kompletteras bränslecellsystemet vanligen av en avgasbrännare/gaspanna och/eller en vattenackumulatortank. Den exakta storleken av de olika komponenterna baseras därefter på byggnadens/husets aktuella behov av el och värme samt aktuell bränslecellsteknologi, men framförallt också med avseende på den driftstrategi som är mest gynnsam för den aktuella geografiska placeringen. Då den aktuella studien inriktar sig på småskalig kraft- och värmegenerering för byggnader och småhus i tätorter förutsätter man i denna studie att både el- och gasnät, med naturgas alternativt biogas, är tillgängligt.



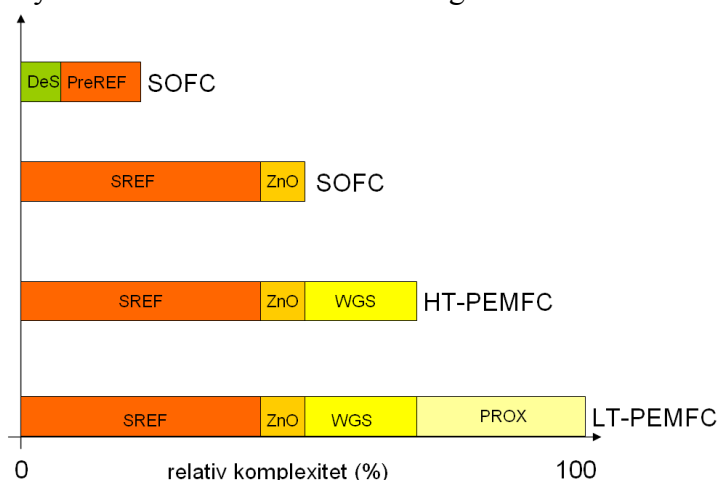
Figur 6.1. Schematisk illustration av en bränslecellsbaserad m-CHP anläggning för ett små- eller flerfamiljshus beläget i tätort.

Catator har på uppdrag av bl.a. SGC och Försvarets Materialverk (FMV) fullständigt utvecklat eller, inom diverse EU-projekt, varit delaktig och utvärderat, både med hjälp av teoretiska beräkningar och experimentella metoder, ett fåtal olika bränslecellssystem som lämpar sig för småskalig kraft- och värmegenerering. Några av dessa beskrivs och diskuteras mer i detalj i nedanstående text.

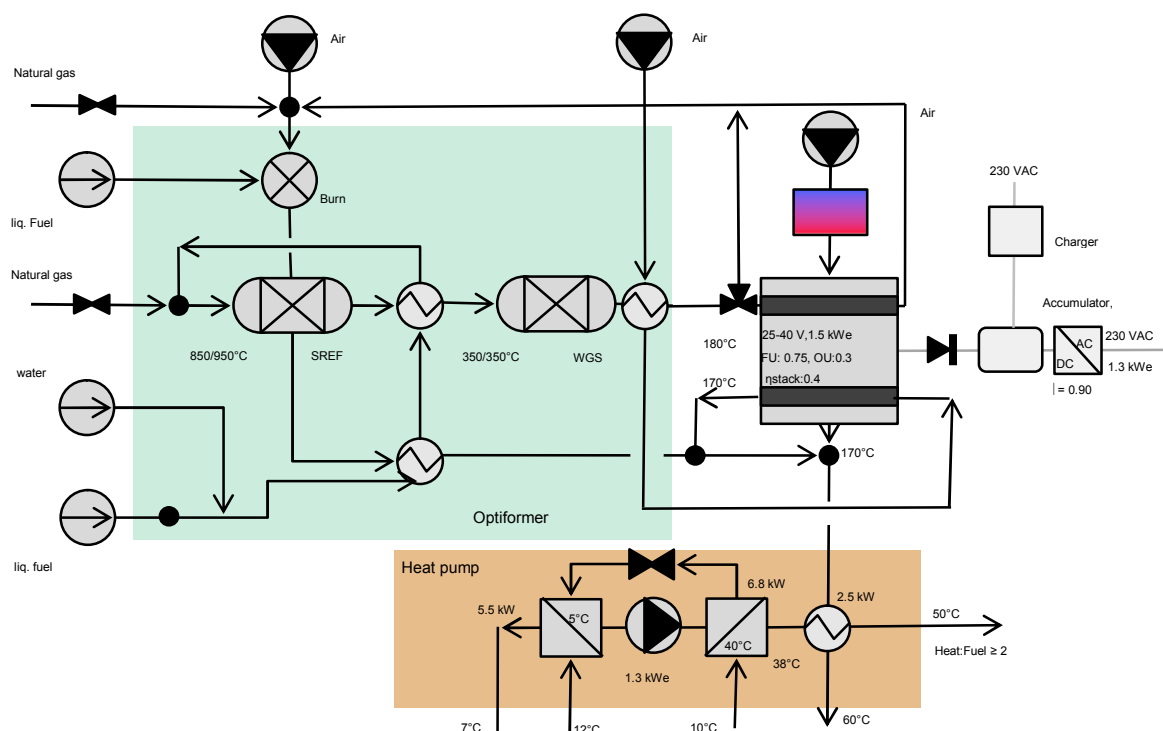
Som beskrivits under rubrik 4 är det LT-PEMFC, HT-PEMFC och SOFC som i dagsläget är de mest aktuella bränslecellsteknologierna för småskalig kraftvärmegenerering. Utav dessa är LT-PEMFC uteslutande den mest frekvent använda. Det senare förklaras primärt av att LT-PEMFC är den mest mogna teknologin, dock långt ifrån den mest lämpade utifrån enkelhet och teknisk prestanda. Figur 6.2 åskådliggör hur bränslecellssval inverkar på den processtekniska komplexiteten. Som framgår av figuren minskar systemets komplexitet drastiskt då LT-PEMFC ersätts av SOFC främst beroende av att:

- Ångreforming (alt. ATR/CPO) kan ersättas av intern reformering. För att undvika koksbildning samt minska effekterna (termomekaniska spänningar!) av den extremt endoterma ångreformeringsreaktionen rekommenderas dock att man partiellt reformerar bränslet uppströms bränslecellen med hjälp av en sk Pre-Reformer.
- Ingen rening från kolmonoxid krävs, vilket gör att man kan utesluta både WGS och PROX-reaktorerna.
- Systemet kan göras vattenoberoende, d.v.s. ingen tillförsel eller rening (jonbytarfilter) av vatten krävs.

Förutom enkelheten och möjligheten till kompakthet resulterar ett SOFC-baserat system även i en högre elverkningsgrad (omkring 40-45 jfr. 30-35 %) samt i kylvatten som avgår vid en betydligt högre temperatur (flera hundra grader högre än då LT-PEMFC används), vilket i sin tur möjliggör för en mer effektiv värmerekuperering. Ett förenklat processchema för ett sådant system med kompletterande katalytisk avgasbrännare illustreras i Figur 6.3. Systemet är här dimensionerat för att passa ett småhus, men de komponenter som är tänkta att ingå är alla skalbara och systemet i sin helhet lämpar sig därmed även för flerfamiljsbostäder. Som synes, i motsats till övriga system, föreslås avsvavling i detta fall uppströms reformersteget, i detta fall vid rumstemperatur via adsorption till en bädd bestående av aktivt kol. Detta kommer av att pre-reformern arbetar vid en lägre temperatur än då annan fullständig reformering används, vilket gör att dess katalysator också är mer svavelkänslig.



Figur 6.2. Relativ komplexitet för olika bränsleberedningssystem för olika typer av bränslecellsteknologier. SREF=Ångreforming, ZnO=Zinkoxid/svavelfälla, WGS=Vattengasreaktor, PROX=Selektiv CO-oxidation. DeS=Avsvavlingsenhet baserat på aktivt kol (vid rumstemp.), PreREF=Förreforming/Partiell reformering.



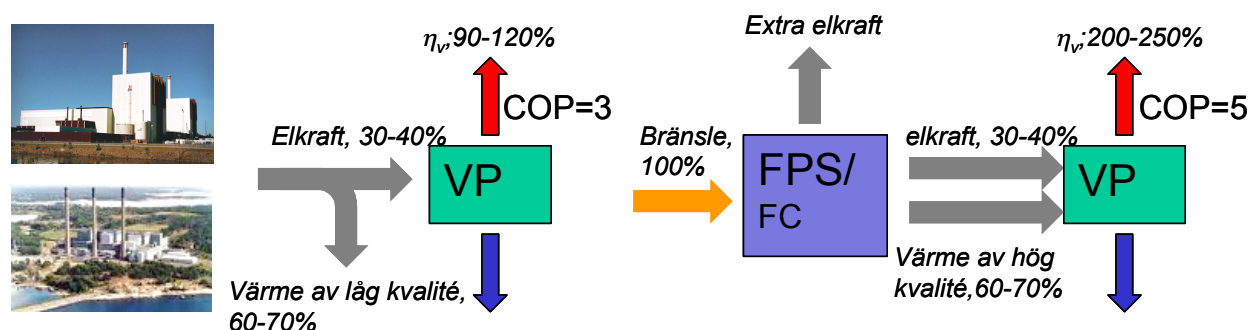
Figur 6.4. Förenklat processchema för ComfortPower. FU=bränsleutnyttjande, OU=syreutnyttjande/luftutnyttjande.



Figur 6.5. ComfortPower, en hybrid mellan värmepump och bränslecellsteknologi, visat framifrån, från sidan samt utan ytterhölje. Från ovensidan räknat syns kontrollsystem, värmepumpsmodul och bränslecellstack inkl. blyackumulator (vid ö-drift) och elkonditioneringssteg. $V=600 \times 600 \times 1650$ mm, vikt=240 kg.

I ComfortPower kan den producerade elen ($\eta_{EL,SYST}=25-32$ % beroende på bränsle och driftbetingelser) användas till att driva värmepumpens kompressordel samtidigt som bränslecellstackens värmeproduktion kan användas för att förbättra värmepumpens driftpunkt (coefficient of performance (COP) ökas från 3 till 5), se Figur 6.6. Som resultat fås en termisk verkningsgrad i storleksordningen 200-250 % (beroende på önskad temperatur av utgående vatten), vilket åtminstone är en fördubbling av vad som kan förväntas i det konventionella fall som oftast råder på kontinenten där gaspannor används för uppvärmning. Förutom värme kan

systemet också producera kyla med en verkningsgrad omkring 100-150 %. Om HT-PEMFC-stacken dessutom i framtiden byts ut av en SOFC-stack kan den termiska verkningsgraden för ComfortPower förväntas att öka ytterligare, uppskattningsvis till 250-300 %, d.v.s. systemet har potential att vara 2,5-3 gånger mer energieffektiv och släppa ut en 2,5-3 gånger mindre mängd växthusgaser än en konventionell gasvillapanna.

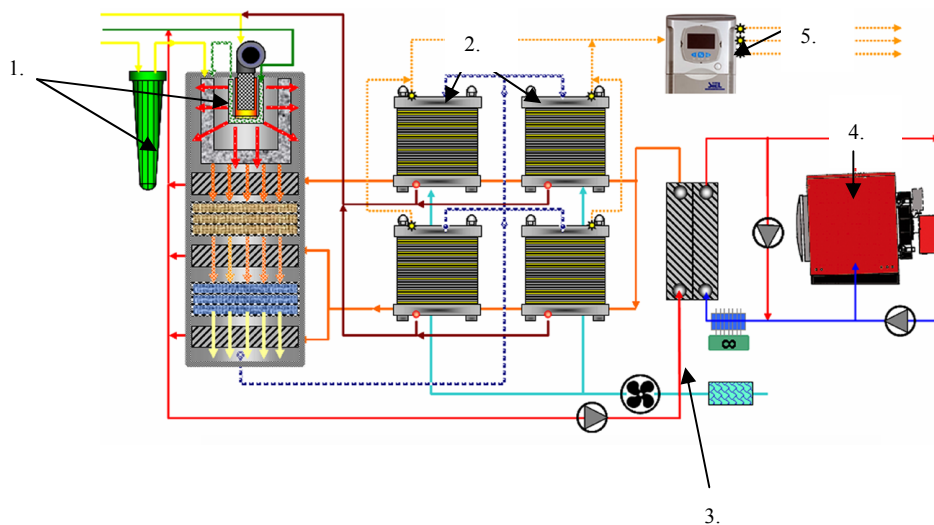


Figur 6.6. Schematisk illustration som visar på skillnaden mellan det konventionella sättet att driva en värmepump och ett sådant med bränslecellsteknologi.

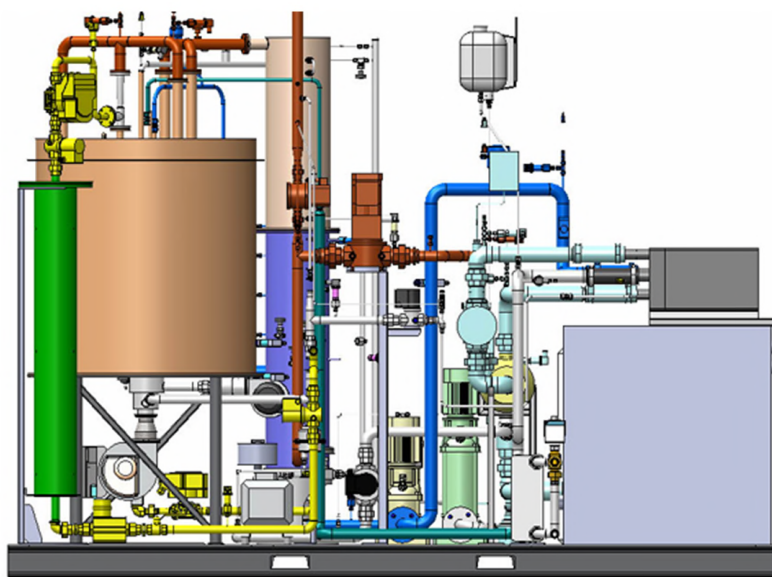
Ett exempel på ett system som lämpar sig för ett flerfamiljshus är det som utvecklats inom det nyss avslutade EU-projektet H2Ome (se under rubrik 8), även kallat SIDERA 30 [48]. SIDERA 30 är designat för att täcka energibehovet (uppvärmning, varmvatten, el) för en byggnad med 20-25 stycken lägenheter med en stabil produktionskapacitet på 28 kW_{el}/48 kW_{th} som vid tillfälliga toppar i värmebehov är tänkt att backas upp av en kondenserande gaspanna. Den elektriska och den termiska verkningsgraden för själva bränslecellssystemet (exklusive gaspanna) ligger omkring 33 respektive 50 %. Nyligen var enheten installerad och testad intill ett hotell i Polen där den var ansluten både till det elektriska och det termiska nätet. Systemet dimensioneras för att fullständigt ersätta små gaspannor installerade i varje enskild lägenhet, som ofta är det traditionella metoden för varmvattenproduktion i byggnader belägna i övriga Europa, och/eller värmekraftproduktion från ett centraliserat kol/oljekraftverk. I likhet med andra bränslecellssystem är SIDERA 30 uppbyggt av 5 huvudsakliga segment, vilka i detta fall består utav:

1. *Bränsleomvandling och gasrening.* SIDERA 30 drivs med avsvavlade naturgas som reformeras via ångreformering. Då vald bränslecellsteknologi är LT-PEMFC, måste gasen renas med avseende på kolmonoxid till < 100 ppm (v), i detta fall via WGS och PROX. Inkluderad reformering och nedströms gasrening bygger på Catators teknik.
2. *Bränsleceller.* Systemet innehåller 4 st LT-PEMFC stackar.
3. *Elkonditioneringssteg* som förser byggnaden med anpassad elkraft.
4. *Värmeåtervinningssystem* som rekupererar värmen producerad i olika systemkomponenter såsom bränsleomvandlingssteg och bränslecellstackar.
5. *Kontrollsystem.*

En schematisk bild av dessa fem segment samt en tillhörande 3-dimensionell ritning av systemet i sin helhet visas i Figur 6.7a respektive 6.7b.



Figur 6.7a. Systembeskrivning av SIDERA 30; ett P-system utvecklat för ett flerfamiljshus. De olika färgade linjerna beskriver olika flöden enligt: röd=högtempererat vatten, gul=naturgas, turkost=luft, blått= lågtempererat vatten, orange=medeltempererat vatten, grönt=vatten, mörkrött/vinrött=utarmad reformatgas, streckad orange=elektrisk anslutning, streckad blått=anodgas/reformatgas. Figuren är från referens [49].



Figur 6.7b. 3D-bild av SIDERA 30. Figuren är från referens [49].

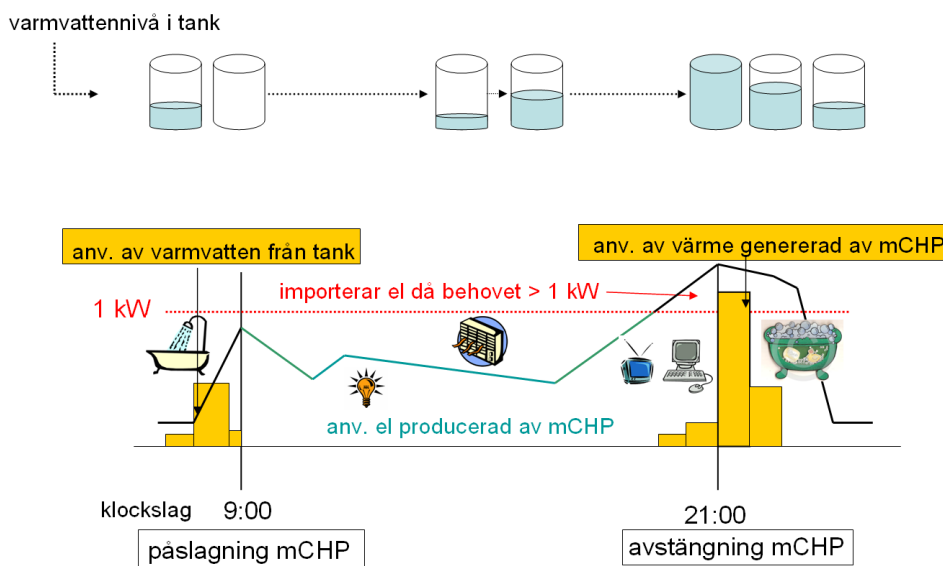
Sidera 30 väger omkring 2000 kg och dess volym är 1300x300x2600 mm. Därtill tillkommer elektrisk omvandlare av dimensionen 1100x800x1400 med vikten 400 kg.

7. Dimensionering och driftstrategi

Hur ett mCHP-system dimensioneras samt vilken driftstrategi man väljer är vanligtvis en kompromiss mellan ett flertal parametrar såsom effektivitet (bränslekostnad), anläggningens kostnad, det aktuella grundbehovet av värme/el inklusive dess svängningar över dygnet och årstid, och framförallt möjligheten att köpa från och sälja el till det fasta nätet. Alla dessa aspekter, förutom själva investeringskostnaden, är starkt beroende av den aktuella geografiska placeringen och typ av byggnad/småhus [11, 50, 51].

Inom EU dimensionerar man vanligtvis mCHP-systemet i huvudsak efter det termiska behovet [52, 53]. Anläggningen är i dessa fall oftast kontinuerligt i drift dygnet runt, dock vid en något lägre last under nattetid. Denna driftstrategi motiveras av de ekonomiska förutsättningarna som gäller, d.v.s. då all dumpning av överskottsvärme är ekonomiskt förkastligt och då det fasta elnätet kan användas som "en energilagringenhet", från vilken man har möjlighet att både köpa och sälja el till. Försäljningen av egenproducerad el till det fasta elnätet gynnas här av det ekonomiska stödsystemet Feed-in-tariff (FIT) som införts i flertalet av EUs medlemsländer. I Storbritannien t e x innebär FIT-systemet att varje kund återbetalas med 10 p (~1 SEK) för varje kWh egenproducerad el samt ytterligare 3 p (~30 öre) /kWh exporterad el, vilket i sin helhet möjliggör att kostnaden för mCHP-systemet redan i dagsläget kan återbetalas inom ett par år [32].

I Japan råder andra ekonomiska omständigheter och därmed ser den valda driftstrategin i landet något annorlunda ut. Till skillnad från många EU-länder tillåter man där export av egenproducerad el endast om den är fullständigt förnybar (i dagsläget återbetalas man med 48 Yen (~3,4 SEK)/kWh vid export jfr med elkostnaden 28 Yen (~2 SEK)/kWh vid import) [54]. Då framställning och användande av biogas ännu inte har haft något genombrott begränsas i praktiken det japanska FIT-systemet idag till el producerad av solceller eller vindkraftverk, d.v.s. varken de bränslecell- eller de motorbaserade mCHP-systemen är inkluderade. För att undvika behovet av ackumulatorer har man i Japan därför beslutat att dimensionera och driva de bränslecellbaserade mCHP-systemen efter hushållets elektriska behov, se Figur 7.1. Då enheten är baserad på LT-PEMFC är den endast påslagen under dagtid d.v.s. då elbehovet är som störst. Under nattetid och då elbehovet > 1 kW importeras el från det fasta nätet. Den värme som mCHP samtidigt producerar används för varmvattenproduktionen. Då elbehovet sjunker och då ackumulatortanken är full stängs mCHP-enheten av. mCHP-enheten backas vid behov upp av en integrerad gaspanna. Då systemen baseras på SOFC-teknologi används i princip samma strategi förutom att enheten då är kontinuerligt i drift. Under nattetid är enheten vid en låg s.k. minimum last som täcker det elektriska behovet men också, med visst stöd från en separat eluppvärmare, är tillräcklig för att kunna bibehålla SOFCs driftstemperatur.



Figur 7.1. Start-stop strategi (då LT-PEMFC) med avseende på hushållets elektriska behov. mCHP-enheten stängs av då ackumulatortanken är full [55]. Linje och staplar anger hushållets el- respektive varmvattenbehov.

8. Beskrivning av marknadsstatus och viktiga demonstrationsprojekt av m-CHP baserad på bränslecellsteknologi

8.1. Marknadsstatus av bränslecellbaserade mCHP i världen

Under de senaste åren har utvecklingen och användningen av småskalig kraftvärmegenerering tagit fart, och marknaden ser ut att fortsätta att växa. Forskning- och utvecklingsarbete sker idag världen runt, inte bara för bränslecellsbaserade system, utan även för de konkurrerande, mer eller mindre redan kommersiella systemen baserade på de olika småmotorerna (ICE, Stirling, Gasturbiner, Rankine, mfl). I detta avsnitt ligger dock fokus på den aktivitet som rör de bränslecellbaserade systemen.

Den största spridningen av mCHP står Japan för, med fler än 90 000 enheter installerade [56], där majoriteten av enheterna utgörs av Hondas ICE-baserade EcoWill-system, se Tabell 3.1, som också globalt sett den mest sålda mCHP-enheten [57]. Japan har även i särklass det största pågående programmet för utveckling och demonstration av bränslecellsbaserade system, det s.k. METI-NEDO-NEF-programmet (METI=Ministry of Economy, Trade and Industry, NEDO=The New Energy and Industrial technology Development Organization, NEF=New Energy Foundation). Programmet drivs av den japanska staten tillsammans med ett flertal japanska systemtillverkare (Toshiba, Ebara, Panasonic, Sanyo) och gas- och oljebolag (Tokyo Gas, Osaka Gas, Nippon Gas, Kyushu Oil, mfl). Programmet startade redan 2002 som ett led för att drastiskt minska landets växthusgasutsläpp, vars uppsatta målsättning är med 25 % år 2020 relativt 1990 års utsläppsnivå. Inom programmet finns idag drygt 3300 enheter i drift utplacerade i japanska hem, skolor, affärer och sjukhus, m.fl. [55]. Leverantörerna har utöver detta sålt ett par tusen anläggningar för privat och kommersiellt bruk. Varje system, med designkapaciteten 0.7-1 kW_e/knappt 2 kW_{th}, täcker i stort sett hela basbehovet av värme och omkring 60-70 % av det totala elbehovet i ett japanskt hushåll. Som beskrivits under föregående rubrik, är bränslecellens drift i detta fall fullt ut automatiserad med avseende på det elektriska behovet (Figur 7.1).

Då elbehovet överstiger maximala > 700 W, backas det upp av det fasta elnätet. Bränslecellens värmeproduktion backas i sin tur upp av en traditionell ackumulatortank (50-200 L, 60/80°C) och en gasbrännare (40 kW_{th}). I stort sett alla utplacerade system är baserade på LT-PEMFC med uppström reformering- och gasreningsenhet. Sedan maj 2009 är systemen kommersiella och tillverkas av tre olika företag (Panasonic, Toshiba FCS och ENEOS CellTech) under det gemensamma logotypnamnet ENE-FARM, se Figur 8.1a-b.



Figur 8.1a. Foto av ENE-FARM. Bränslecellsystemet är integrerat i den mindre boxen till höger och ackumulatortanken (200 L, 60°C) inkl. brännare (40 kW_{th}) är integrerat i den större boxen till vänster.



Figur 8.1b. Foto av en sk smart house control-enhet som optimerar mCHP systemet efter husägarens förbrukningsprofil.

I slutet av december 2009 hade man samlat in data under mer än 2 års drifttid och producerat mer än 25 GWh. Under denna tid har endast en liten degradering av systemets prestanda kunnat observeras, $\leq 0.5\text{-}1\%$ [55]. Systemet har utvärderats med naturgas, avsvavlad fotogen samt gasol (LPG). Tekniska prestanda för ENE-FARM är sammanställda i Tabell 8.1.

Ur ett miljöperspektiv kan installation och användande av ENE-FARM eller liknande system medföra stora fördelar. Resultaten visar att man i genomsnitt kan minska den primära energiåtgången med 15-18 % samtidigt som koldioxidutsläppen kan minska upp till 30 % jämfört med den mest vanligt förekommande konventionella metoden som används i Japan för el- och värmeproduktion [55,58].

Idag, i början av 2011, är listpriset för en ENE-FARM 210 kSEK (2.7 miljoner Yen), förra året, år 2010, låg priset omkring 250-270 kSEK (3.2-3.5 miljoner Yen), inklusive ackumulatortank och gaspanna. För att underlätta för kommersialiseringen har den japanska staten infört frikostiga subventioner till de kunder som installerar produkten, idag upp till 1.4 miljoner Yen vilket motsvarar upp till drygt 40 % av den totala installationskostnaden, samtidigt som vissa gasleverantörer ger rabatterade gaspriser för drift av småskaliga kraftvärmeverk [58]. Kostnaden och därmed försäljningspriset uppskattas att drastiskt minska med ständigt pågående stack- och komponentförbättringar och en ökad produktionsvolym. Målsättningen för år 2015 är att priset ska sjunka till 40-60 kSEK/enhet (500-700 000 Yen) under förutsättning att produktionskapaciteten då är på en nivå av 100 000 enheter/år och leverantör, d.v.s. ett pris som då blir av samma storleksordning som för vad motsvarande ICE-baserade system kostar idag, och då också vara kommersiellt attraktiva även utan några statliga subventioner.

Sedan 2007 utvecklas och utvärderas även mCHP-system baserade på SOFC, vilka tillverkas av företagen Kyocera, Toyota/Aisin, Nippon Oil, m.fl. I slutet av år 2010 fanns 78 sådana enheter utplacerad och i drift i Japan [57]. Systemen ligger typiskt omkring 0.7-1 kW_e i produktionskapacitet och backas i likhet med det LT-PEMFC-baserade systemet upp av en ackumulatortank (50 L, 80°C) och gaspanna. Den elektriska och den termiska verkningsgraden ligger omkring 41-43 % respektive 35-49 %. Livslängdsdata för enstaka sådana enheter upp till drygt 18 000 timmars kontinuerlig drifttid finns idag tillgängliga.

En annat asiatiskt land som satsar stort på utvecklingen av bränslecellbaserade mCHP-enheter är Sydkorea. Sedan år 2010 pågår ett statligt demonstrationsprogram inom området, som främst drivs av myndighetsorganisationerna MEST (Ministry of Education, Science, and Technology), MKE (Ministry of Knowledge Economy) samt the National RD&D Organisation for Hydrogen and Fuel cells tillsammans med inhemska systemtillverkare (GS Fuel Cell, FuelCell Power, Hyosung, mfl) samt Sydkoreas gasleverantör KOGAS. I landet planerar man för kommersialisering av både LT-PEMFC och SOFC-baserade system. Idag finns omkring 200 stycken 1 kW_e-enheter installerade i hem, skolor och andra publika byggnader. Nästa år planeras antalet att växa till omkring 500 enheter. På längre sikt, inom ramen av ett nationellt s.k. "Green Home Project" har staten som målsättning att installera 100 000 enheter före år 2020, till en kostnad av 20 – 30 kSEK/kW_e (3000-5000 \$ (US)). Målsättningarna för den tekniska prestandan är då 40 och 50 % i elektrisk respektive termisk verkningsgrad, med en livslängd på 90 000 timmar. I likhet med många länder existerar stödsystemet FIT samt, i likhet med den japanska staten, har den sydkoreanska staten infört frikostiga subventioner vid själva installationen av bränslecellbaserade mCHP-system. I dag, t o m år 2012, uppgår dessa upp till 80 % av installationskostnaden. F r o m år 2013 planeras att dessa ska minskas till 50 % för att sedan, i likhet med i Japan, helt tas bort f r o m år 2015. Förutom de statliga subventionerna finns dessutom lokala subventioner (motsvarande omkring 10 %), vilket gör att konsumentpriset redan idag i vissa regioner är omkring 10 000 SEK/kW_e [59, 60].

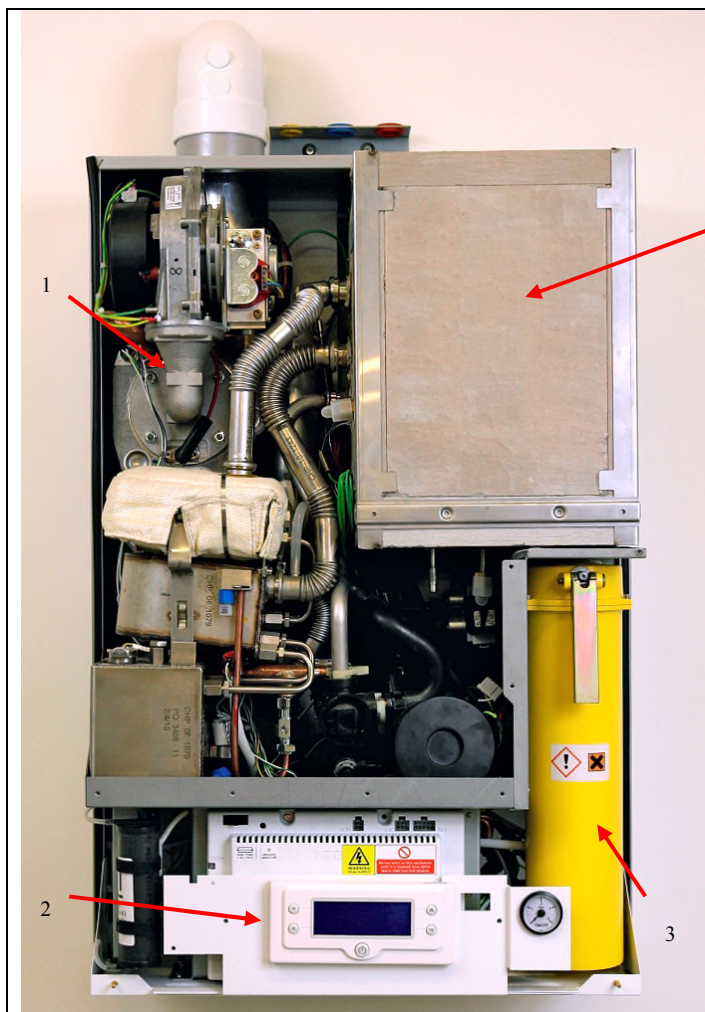
Inom Europa leder Tyskland, Storbritannien och Nederländerna utvecklingen och/eller introduktionen av småskaliga kraftvärmeverk. I dessa länder, förutom Nederländerna, där system baserade på Stirlingmotorn får den största uppmärksamheten, får idag bränslecellsbaserade system stort fokus. Liksom i ett flertal andra europeiska länder har man i Tyskland och Storbritannien infört lagstiftning som gynnar användningen av småskaliga kraftvärmeverk inkluderande både bonusprogram och stödsystemet FIT.

I Tyskland finns idag ett par tusentals mCHP-enheter installerade, där majoriteten, i likhet med i Japan, fortfarande utgörs av ICE-baserade system (EcoPower Marathon/Vaillant). De tyska myndigheterna uppskattar dock att antal installerade bränslecellsbaseade mCHP-enheter inom den privata bostadssektorn kommer att stiga till hela 850 000 enheter inom närtid, vilket motsvarar omkring 5 % av det totala antalet tyska hushåll [12]. Sedan år 2008 pågår ett stort samarbetsprojekt vid namn Callux i Tyskland, där tysklands alla större energileverantörer (Eon, MVV Energi, EnBW, mfl) och tillverkare av småskaliga kraftvärmeverk (Baxi Innotech, Hexis, Vaillant) deltar [61]. Projektet, vars totala investeringsvolym uppgår till omkring 860 miljoner SEK, syftar till att demonstrera mognadsgraden av bränslecellsbaseade system för småhus och på olika sätt undersöka eventuella marknadshinder och underlätta för vidare kommersialisering. I projektet ingår ett stort antal fälttester, där planen är att installera och driftsätta omkring 800 enheter i privatbostäder runt om i landet fram till år 2012, som därefter planeras vara i drift och utvärderas fram till år 2015. Fälttesterna inbegriper system baseade på såväl SOFC (Hexis Galileo 1000 N, Vaillants Fuel Cell Heating Appliance) som LT-PEMFC-teknologi (Baxi Innotechs GAMMA 1). För tekniska detaljer gällande Vaillants och Baxis bränslecellbaseade kraftvärmesystem, se Tabell 8.1.

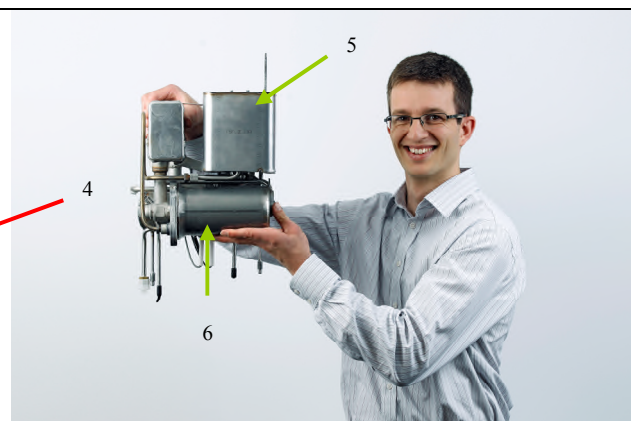
Under perioden 2003-2007 utvecklade den brittiska staten, via The Carbon Trust Fund (http://en.wikipedia.org/wiki/The_Carbon_Trust), ett program kallat Micro-CHP accelerator vars målsättning var att undersöka potentialen för småskaliga kraftvärmeverk och genomförde bl.a. fälttester med olika sådana system. Man uppskattade att omkring 1000 småskaliga kraftvärmeverk var i drift i Storbritannien redan år 2002. Majoriteten av systemen var baseade på ICE (Baxi-SenerTec Dachs) och Stirlingmotorn (Whispergen-Eon), även om ett antal bränslecellssystem vid denna tidpunkt också då utvärderades. Vad beträffar bränslecellsbaseade system i landet så leder företaget Ceres Power utvecklingen. Ceres Power har utvecklat en vägghängd anläggning basead på en $0.8 \text{ kW}_e/1.2 \text{ kW}_{th}$ lågtemperatur (IT)-SOFC-stack för drift med naturgas/gasol (LPG). Ett foto av enheten samt vissa tekniska detaljer ges i Figur 8.2. respektive i Tabell 8.1. Hur systemet fungerar och svarar vid olika driftförhållanden förklaras och visas i en "live-demonstration" som kan laddas ner från Ceres Powers hemsida, se

<http://www.cerespower.com/InvestorRelations/PresentationsandVideos/CHPPProductDemonstration/>.

På uppdrag av de tre stora energileverantörerna British Gas, Calor Gas samt Bord Gais Energy har Ceres Power fått en framtida order på att placera ut och driftsätta drygt 70 000 av sina mCHP-anläggningar fram till år 2012 [62].



Figur 8.2. a. Foto av Ceres Powers vägghängda mCHP-enhet. 1. Kondenserande gaspannemodul (eng. boiler) inkl. brännare och värmeväxlare, 2. Styr- och reglerelektronik, 3. Bränslefilter, 4. Bränslecellsmodul. Fotot är taget med tillåtelse från referens[63]



Figur 8.2 b. Foto av Ceres Powers bränslecellsmodul som är integrerad i mCHP-enheten i figur a). 5. Bränslecellstack (SOFC), 6. Bränsleberedning inkl. reformer och gasrening. Fotot är taget med tillåtelse från referens[63]

Intelligent Energy är ännu en brittisk aktör inom utveckling och tillverkning av bränslecellsbaserade kraftvärmeverk. År 2008 annonserade de att de tillsammans med Storbritanniens näst största energileverantör Scottish and Southern Energy skapat ett joint-venture företag vid namn Intelligent Energy CHP (IE CHP) [64]. Tillsammans utvecklar de och installerar anläggningar i privatbostäder i framförallt Skottland och Irland. Utvecklingsarbetet finansieras även av DOE (USA). Systemens kontinuerliga produktionskapacitet ligger idag på omkring $10 \text{ kW}_e/10 \text{ kW}_{th}$ och baseras på LT-PEMFC-teknologi som drivs på vätgas. Vätgasen produceras i sin tur från framförallt naturgas via systemets ångreformeringsenhet med nedströms gasrening i form av fast-cycle PSA (se under rubrik 4.3). Systemen är således trycksatta.

Sedan 2006 pågår ett nationellt bränslecellsprogram i Danmark, där ett flertal danska företag deltar såsom DONG Energy, Danskt Gasteknisk Center a/s, Danfoss, Dantherm Power, IRD, Topsoe Fuel Cell, m fl. Programmet är på totalt omkring 200 miljoner SEK och är uppdelat i 3 faser omfattande produktutveckling, laborietorietester samt slutliga fältförsök, med avslut år 2012. I likhet med majoriteten av pågående demonstrationsprogram, är det system som är

lämpade för det enskilda småhuset som är den primära marknaden (1 kW_e). Ursprungliga planen var att utvärdera både LT-PEMFC, HT-PEMFC och SOFC för drift med vätgas och/eller naturgas, men då tveksamheter kring HT-PEMFCs hållbarhet uppkom under inledande tester ändrades planerna till att endast inkludera system baserade på LT-PEMFC och SOFC. IRD utvecklar system och bränslecellstackar baserade på LT-PEMFC avsedda för vätgasdrift. Dantherm utvecklar systemen avsedda för naturgasdrift baserade på LT-PEMFC samt SOFC där bränslecellstackarna levereras av Ballard samt Topsoe Fuel Cells. Sedan slutet av 2010 pågår de slutliga fältförsöken som skall omfatta totalt 80 system [65]. På Lolland skall 35 vätgasdrivna LT-PEMFC system från IRD testas, samtliga är anslutna till ett lokalt vätgasnät. Vid de inledande fältmätningarna uppmättes elverkningsgraden till 47,2 % och totalverkningsgraden till 86,2 %. För de naturgasdrivna enheterna är målsättningen att man efter den avslutande testfasen skall uppnå en elverkningsgrad på 35 %, en totalverkningsgrad på 90-95 % samt att livslängden skall överstiga 40.000 timmar.

Även i USA har myndigheterna infört skattelättnader för att underlätta introduktionen av småskaliga kraftvärmeverk i privatbostäder. Vad beträffar den inhemska systemutvecklingen sker optimering och kommersialisering av framförallt SOFC-baserade system. Det senare är på uppdrag av SECA (Solid State Energy Conversion Alliance) och dess syfte är att utveckla och arbeta för kommersialisering av 3-10 kW_e stora enheter med avslut år 2015. Programmet involverar totalt 6 olika företag, däribland Acumentrics, Versa Power Systems, Fuel Cell Energy, General Electrical Power Systems and Siemens Westinghouse Power Corporation, som arbetar oberoende av varandra och konkurrerar därmed med att utveckla systemet [66]. Programmets resultat verkar lovande. I juni 2010 rapporterade t e x Acumentrics att deras vägghängda kraftvärmeverk (baserat på en tubulär SOFC-stack) uppvisat resultat såsom $\eta_{el}=35-40\%$, $\eta_{tot}=85\%$, 25 minuters uppstartstid från 20 °C, samt en livslängd på > 5000 timmar med mindre än 5 % degradering. Målsättningen är att systemet ska kosta \$550/kW_e (tillverkningskostnad!) år 2015, d.v.s. enligt DoEs specifikation, se under rubrik 9 [67]. Företaget Bloomenergy är ännu ett exempel på ett amerikanskt företag som utvecklar mCHP-system baserade på SOFC-teknologi. Deras system är dock betydligt större (100 kW_e) och således lämpade för kraft- och värmeproduktionen för ett eller flera flerfamiljshus [68].

Ett annat företag fokuserat på kommersialisering av SOFC-baserade mCHP-anläggningar är det australiensiska företaget Ceramic Fuel Cells Limited (CFCL). Företaget har slutit avtal med ett flertal större energi- och pannleverantörer världen över, däribland den franska energileverantören GDF Suez, den tyska energileverantören EWE, brittiska Eon UK, och det japanska pannföretaget Paloma, m fl, och lanserar idag ett mCHP-system (2 kW_e) vid namnet BlueGen™ [66, 69]. För tekniska detaljer, se Tabell 8.1. CFCL uppskattar att priset för BlueGen™ -systemet kommer att kunna vara omkring 45-50 kSEK då massproduktionen kommit igång.

Tabell 8.1. Sammanställning av tekniska prestanda för olika bränslecellsbaserade småskaliga kraftvärmeverk. Alla system inbegriper samtliga systemkomponenter d.v.s. reformer, gas- och vattenrening, bränslecellstack, elkonditionering, värmeväxling, pumpar, fläktar, mfl. I vissa fall inkl. även gasbrännare och är då noterat. $\eta_{\text{system,EL}}$ anges för nettoproduktionen el (AC) från ingående bränsle (LHV). Om inte annat angivet är givna data hämtade från leverantörernas hemsidor.

- =saknar uppgift

¹ENE-FARM tillverkas av 3 olika tillverkare därav viss variation i prestanda och storlek, mm. Alla system, förutom det japanska ENE-FARM, är designade för inomhusplacering.

²beroende på uttagen elektrisk effekt, 400 W_{el} ($\eta_{\text{system,EL}}=36\%$), 2000 W_{el} ($\eta_{\text{system,EL}}=60\%$)

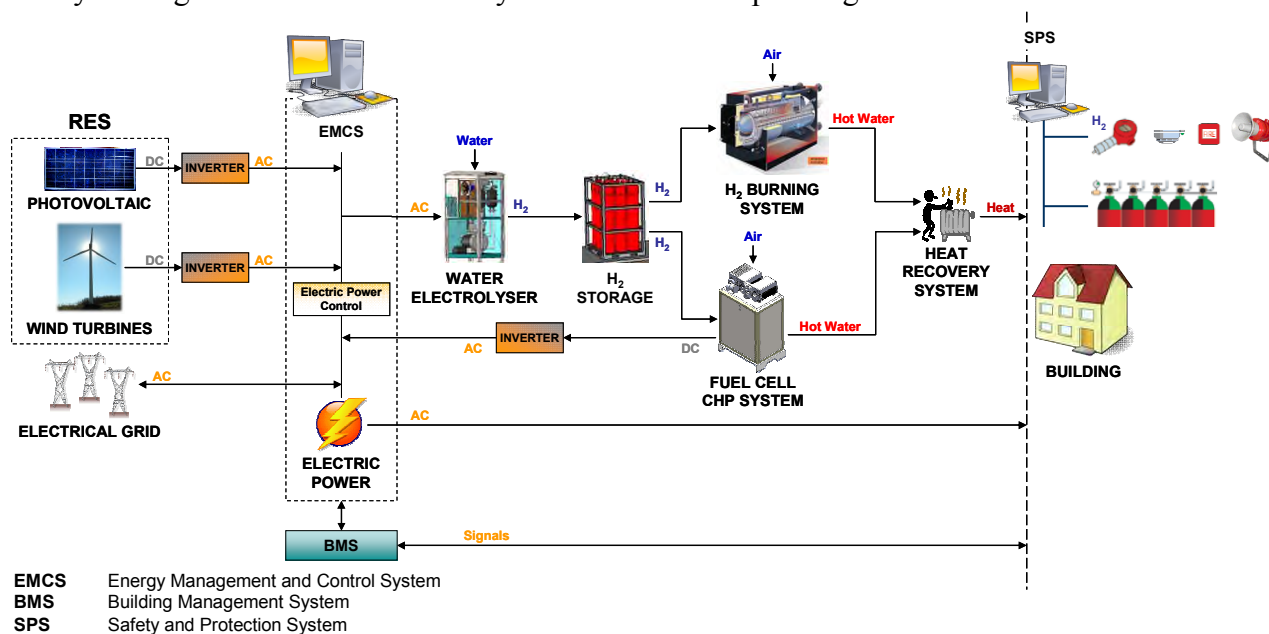
³beroende på mängden rekupererad värme och condensat.

	ENE-FARM ¹ [54,55,58]	Ceres Powers mCHP [63]	Hexis Galileo 1000 N	Baxi Innotech GAMMA 1	CFCLs BlueGEN	IRD GAMMA
Bränslecellsteknologi	LT-PEMFC	LT-SOFC	HT-SOFC	LT-PEMFC	HT-SOFC	LT-PEMFC
Produktionskapacitet (kW_e/kW_{th})-bränslecellsystem	0.7-1/2	0.8 /1.2	1/2	1/1.7	2/1	1,5/1,6
Produktionskapacitet (kW_{th}) - brännare	40, komb. med 200 L vattentank	-	4-20	3.5-15 eller 3.5-20	kan kombineras med vattentank	kan kombineras med vattentank
$\eta_{\text{system,EL}}$ / $\eta_{\text{system,th}}$ LHV-bränslecellsystem	35-37 /45-52	34/-	30/-	32/53	36-60 ² /-	44,3/48,1
$\eta_{\text{system,tot}}$ LHV (%)	>80	-	90	85	60-85 ³	92,5
Dimension system WxDxH (mm)	780-900x300-400x860-900 exl. brännare	W=600, H=920 mm inkl. brännare	550x550x1600 inkl. brännare	600x600x1600 inkl. brännare	660x600x1010	Som en vägghängd gaspanna
Vikt system (kg)	104-125 exkl. brännare	-	170 inkl. brännare	200 inkl. brännare	200	50 exkl. inverter
Bränsle	naturgas, LPG,fotogen	naturgas, LPG	naturgas	naturgas, biogas	naturgas	vätgas
Buller (dB) på 1 m avstånd	< 40	som en kondenserande gaspanna [70]	< 30	-	< 45	-

8.2. Viktiga demonstrationsprojekt av bränslecellbaserade mCHP inom EU

Flera olika EU-projekt har pågått och pågår inom utvecklingen av bränslecellbaserade mCHP-system. Ett välkänt projekt som bedrevs inom ramprogrammet FP5 är ”Virtual Fuel Cell Power Plant” och som pågick under 2004-2005 och drevs av 11 olika partners med företagen Vaillant och Plug Power i spetsen. Inom detta projekt installerades och utvärderades 31 anläggningar, baserade på LT-PEMFC med produktionskapaciteten 4.6 kW_e/9kW_{th}, i Tyskland, Spanien och Portugal. Systemen drevs med naturgas. Data insamlade under totalt 38 000 timmar drifttid och 400 000 kWh ackumulerad elproduktion analyserades. Resultaten var i överlag positiva och uppvisade elverkningsgrader på drygt 30 % [66].

Detta projekt följdes därefter upp utav projektet "NextGenCell" (ramprogram FP6) som pågick under perioden 2006-2009. I detta fall samfinansierades projektet av EU och Department of Energy (DoE, USA) med företaget Vaillant som projektledare, och företag såsom Plug Power och PEMEAS, m fl, som deltagare. Syftet var att utveckla ett reglerbart 1-5 kW_e kraftvärmeverk baserat på HT-PEMFC för en global marknad [66, 71, 72]. Andra exempel på EU-finansierade projekt som utvecklar småskaliga kraftvärmeverk baserade på PEMFC-teknologi är H2Susbuild [73] och H2ome [74] (inom ramprogrammet FP7). I det förstnämnda, som pågår sedan slutet av 2008 med avslut 2012, utvecklas och utvärderas ett autonomt hybridsystem för kraft- och värmeproduktion (ca 50 kW_e) i en kommersiell byggnad alt. ett flerfamiljshus. Anläggningen, som är uppförd i en byggnad utanför Aten, Grekland, omfattar solceller, vindgenerator, elektrolysör, konventionell gaspanna, trycksatt vätgaslager och en LT-PEMFC-stack, se Figur 8.3. Systemet drivs på naturgas och vätgas. I detta fall drivs bränslecellen dock bara på ren vätgas producerad av elektrolysören. Naturgasen används enbart som bränsle till gaspannan för att täcka byggnadens värmebehov. I detta projekt deltar bl.a. Skanska och Catator. Catators bidrag har varit att utveckla en effektivare elektrolysör med hjälp av vår patenterade katalysatorteknik samt leverans av en katalytisk avgasbrännare tillhörande systemets värmerekupereringsdel.



Figur 8.3. Schematisk beskrivning av det autonoma kraftvärmeverk som utvecklas inom EU-projektet H2Susbuild. Figuren är framtagen inom aktuellt EU-projekt och med tillåtelse tagen från referens [75].

Som nämnt under rubrik 6, har Catator även deltagit i projektet H2ome, som avslutades i slutet av 2010, med italienska pannföretaget ICI Caldaie i spetsen. Målsättningen var som beskrivits i detta fall att utveckla ett bränslecellsbaserat kraftvärmeverk, SIDERA 30, som skulle kunna tillgodose el- och värmebehovet i ett flerfamiljshus med omkring 20-25 lägenheter. Försäljningspriset för SIDERA 30 uppskattas idag till omkring 3 miljoner SEK, d.v.s. per kW_e räknat i samma storleksordning som de japanska ENE-FARM-systemen i nuläget kostar [53].

Ett EU-projekt som fokuserat på utveckling av ett kraftvärmeverk baserat på partialoxidation och SOFC-teknologi är "Flame SOFC" (FP6) [66, 71]. Projektet pågick mellan 2005-2009 och dess främsta målsättning var att utveckla ett 2 kW_e bränsleflexibelt system, fungerande med både gasformiga (främst naturgas av olika kvalitet och gasol/LPG) och vätskeformiga bränslen (industri- och biodiesel). I projektet deltog 22 partners från 10 länder med det tyska företaget VDI-Innovation som projektledare.

Ytterligare exempel på SOFC-baserade mCHP-system är de demonstrationsanläggningar som utvecklas och testas av det finska företaget Wärtsilä i samarbete med VTT, TEKES, m fl, under benämningen WFC 20 & WFC50 med produktionskapaciteterna 20 respektive 50 kW_e. Systemen är liksom ovanstående beskrivna bränsleflexibla, och är utvärderade med både naturgas, metanol samt deponigas av varierande metanhalt. Resultaten är lovande. WFC20 har t.ex. varit kontinuerligt i drift med deponigas under mer än 1500 timmar och uppvisar elverkningsgrader > 43 %. Enheterna bygger på det danska företaget Topsoe Fuel Cells bränslecellsteknologi [76]. Förra året slöt även Wärtsilä affärsavtal med det japanska företaget Hitachi Zosen för vidareutveckling och marknadsföring av dessa system i Japan.

Aktiviteten inom utvecklingen av mCHP-system för byggsektorn har i Sverige under årens lopp varit mycket begränsat. Tre skilda bränslecellsdrivna mCHP-anläggningar har installerats och utvärderats. Två av systemen har varit belägna i GlasHusEtt, Hammarby Sjöstad i Stockholm, och det tredje är det hybridsystem som utvecklades och utvärderades av Catator under namnet ComfortPower under 2010, se under rubrik 7 samt referens [47].

Det första systemet som uppfördes i Hammarbysjöstad drevs av bl.a. ABB och Fortum och utvärderades under perioden 2002-2005. Under de första två åren, d.v.s. mellan 2002-2004, inkluderade systemet en LT-PEMFC-stack, inköpt från företaget H Power med designkapaciteten 4 kW_e/6.5 kW_{th}, en reformer, solceller, elektrolysör, trycksatta vätgastankar, och en ackumulatortank (500 L). I detta fall var syftet att demonstrera och utvärdera ett kombinerat solcell-bränslecellssystem fungerande som ett energisparande komplement till den existerande el- och värmeproduktionen. Bränslecellen drevs på ren vätgas producerad av elektrolysören samt reformatgas som producerats från uppgraderad biogas härstammande från närliggande reningsverk. Resultaten visade först och främst på möjligheten att driva ett bränslecellssystem med både vätgas, producerad via solenergi från vatten, och biogas, och var därmed ett av världens första biogasdrivna bränslecellssystem. Uppmätta prestanda visade sig dock bli betydligt lägre än beräknat med elverkningsgrader strax över 10 % (specifikationen från leverantör låg på 18 %) och en termisk verkningsgrad på drygt 50 % (specifikationen från leverantör låg på 40 %) [77, 78]. Efter en hel del driftstörningar till följd av praktiska problem med bullernivåer, otillräcklig kylning till följd av för liten lokal samt bristfällig teknisk support från stackleverantör, m m, beslutades det att man skulle byta den befintliga stacken till en annan LT-PEMFC stack. År 2005 installerades därav en 1 kW_e-stack från företaget Avista, i detta fall, i motsats till föregående system, enbart för drift med ren vätgas.

Det andra systemet som utvärderades i Hammarbysjöstad installerades år 2007 och bestod av en 5 kW_e m-CHP anläggning från det amerikanska företaget Acumentrics. Anläggningen inkluderade en POX-reformer, svavelfälla, samt tubulära SOFC-stackar hybridiserad med batterier. Systemet driftsattes och utvärderades under totalt 1600 timmar med reformatgas producerad från den upparbetade biogasen. Projektet avslutades år 2008. Under denna tid visade resultaten på en med drifttid relativt snabb degradering av prestanda.

Degraderingen härleddes till eventuell förgiftning av bränslecellen till följd av otillräcklig gas- och luftrening (svavel/siloxaner/klor) och/eller termomekaniska problem hos innefattande bränslecellskomponenter. Endast ca 60 % av beräknad designkapacitet kunde erhållas med en elverkningsgrad på omkring 30 % och en total systemverkningsgrad på knappt 50 % [79].

9. Sammanfattande diskussion om m-CHP med fokus på bränslecellsteknologi- dess potential och möjligheter

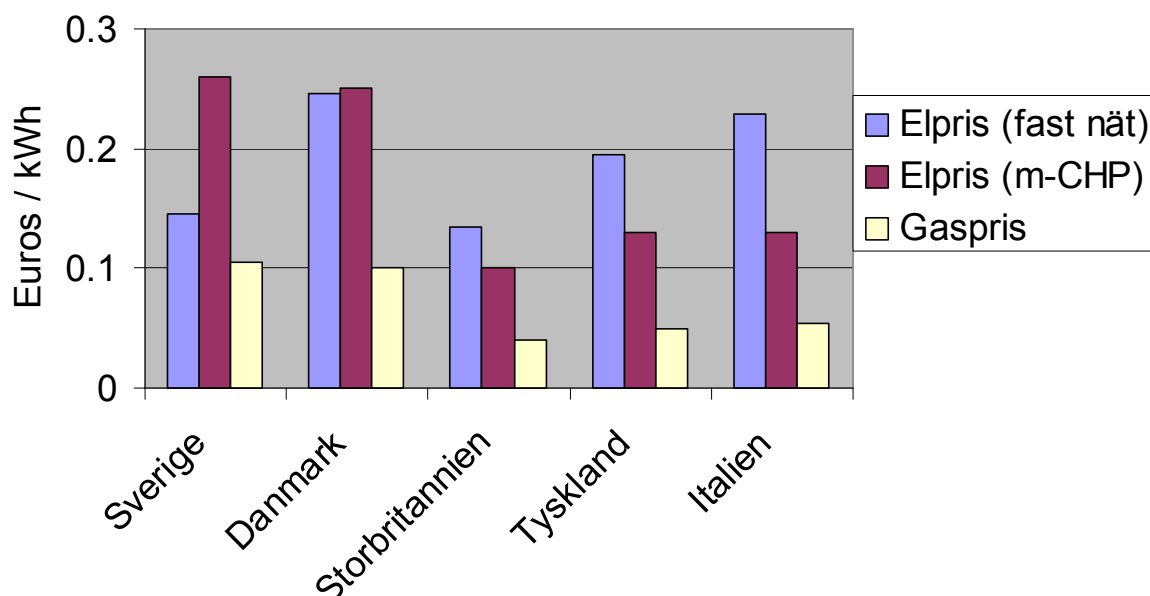
Marknadspotentialen för ett småskaligt kraftvärmeverk, såväl värmemotor- och bränslecellbaserad, beror på ett flertal parametrar såsom:

- Aktuell (konventionell) teknik för elproduktion och uppvärmning
- Tillgång och utbyggnad av gasnätverk
- El/gaspris
- Hushållets energibehov (förhållandet mellan värmebehov/elbehov)
- Regelverk

Alla ovanstående nämnda parametrar är som lätt kan förstås högst beroende på den geografiska placeringen, d.v.s. i vilket land man befinner sig och huruvida man befinner sig i en tätort eller ute på landsbygden.

Störst marknadspotential finns i länder där nätverk för gasdistribution existerar och är väl utbyggda, och där majoriteten av all hushållsuppvärmning idag sker med hjälp av gasförbränning i konventionella gaspannor. I dessa länder har man möjlighet att relativt lätt byta ut en av hemmets enheter som bara producerar värme till en ”multi-enhet” som producerar både värme och el. Tydliga miljö- och energivinster kan erhållas på dessa platser samtidigt som beroendet av det fasta elnätet avsevärt minskar.

Förhållandet mellan el- och gaspris är naturligtvis en annan avgörande faktor. Marknadspotentialen är störst då gasen är billig i förhållande till elen. Detta förhållande råder generellt i länder där gasnätverket är väl utbyggt och där elen i huvudsak produceras i centrala gas- och kolkraftverk, som t.ex. i Japan, Storbritannien, Holland och Tyskland. I mer glesbefolkade länder såsom Sverige, där kraftnätet är mer utbyggt än gasnätet, och där elen är förhållandevis billig, är marknadssituationen däremot betydligt mindre gynnsam, se Figur 9.1.

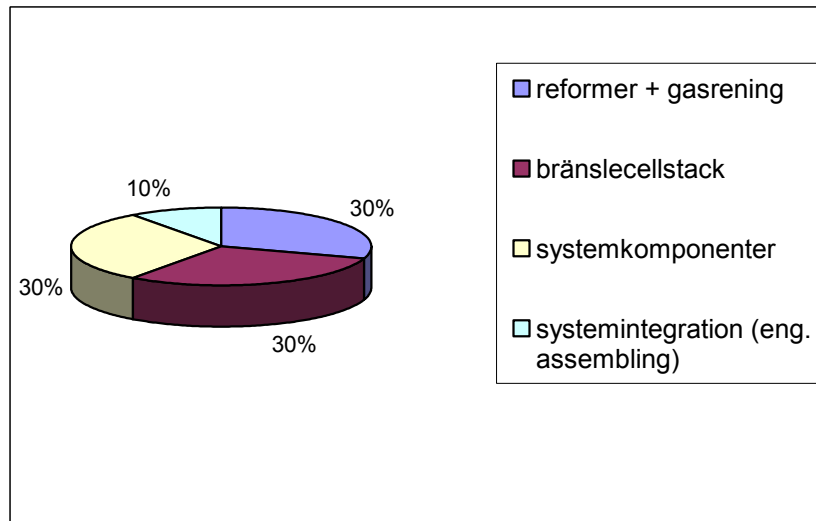


Figur 9.1. Jämförelse av el- och gaspriser för ett visst utvalda länder inom EU. Priserna är tagna från EUs energiportal [80] och baseras på det genomsnittliga priset för ett hushåll med en elkonsumtionen på 3500 kWh/år samt en gaskonsumtion på 15 000 kWh/år. Priserna inkl. energiskatter och moms. Angivet pris för el producerad av mCHP är beräknat under antagandet att $\eta_{\text{system,EL}}=40\%$.

Förutom utbyggnad av gas- och elkraftnät är det också viktigt att beakta utbyggnad och pris för fjärrvärme (närvärme). Till skillnad från merparten av övriga länder på kontinenten är fjärrvärmeverken väl utbyggda i Sverige, och många gånger här den konventionella uppvärmningsmetod man bör jämföra med vid en eventuell installation av ett småskaligt kraftvärmeverk. Mer än hälften av alla bostäder och lokaler i Sverige värms idag upp av fjärrvärme, i tätorter är siffran ännu högre, på vissa håll ända upp till 90 %. Fjärrvärmens i Sverige är förhållandevis miljövänlig då den till ca 70 % härstammar från förnybara bränslen, och i jämförelse med el- och gasuppvärmning också den mest ekonomiskt fördelaktiga (50-60 öre/kWh i jämförelse med 105-110 öre/kWh (el) och 80-85 öre/kWh (gas) inkl. skatter + moms) [81].

Hushållens/byggnadens faktiska energibehov är också av betydelse. Störst marknadspotential för småskaliga kraftvärmeverk finns i de hus/byggnader där man har ett stort värmebehov i förhållande till elbehov och där värmebehovet också är relativt konstant under hela året om.

Förutom kraftvärmeverk baserade på konventionell förbränningsteknologi (ICE) så är de småskaliga kraftvärmeteknologierna som står till buds, framförallt den bränslecellsbaserade, omogna teknologier som idag är mycket kostsamma, 210 kSEK/kW_e (se under rubrik 8). Kostnaden och därmed priset för bränslecellbaserade system förväntas dock att sjunka i snabb takt med att stack- och andra systemkomponenter förbättras, se Figur 9.2, och med framförallt en snabbt ökande produktionsvolym.



Figur 9.2. Illustration av den ungefärliga kostnadsfördelningen för ett bränslecellsbaserat småskaligt kraftvärmeverk [54].

Hur snabbt kostnaden kommer att sjunka i praktiken och vad prisbilden kommer att hamna om några år, typ år 2015, är dock fortfarande svårt att veta, speciellt då prisförväntningar och kostnadsmålsättningar världen över fortfarande avsevärt skiljer sig åt. Som nämnts under rubrik 8 så uppskattar man i Japan att priset för en ENE-FARM år 2015 kommer att kunna ligga runt 40-60 kSEK/kW_e, utan statliga subventioner. Denna prisuppskattning sammanfaller hyfsat väl med den målsättning som EU (European Hydrogen and Fuel Cell Platform) satt upp, vilken är 50-60 kSEK/kW_e under förutsättning att omkring 80 000 1-10 kW_e-enheter installerats [65]. En gedigen genomförd empirisk prisuppskattning har även presenterats av bl.a. Staffell et al. [82], som är baserad på de data som det japanska bränslecellsprogrammet presenterade under perioden 2004-2008 för just ENE-FARM-enheten. I detta fall uppskattas priset sjunka med omkring 20 % för varje produktionsfördubbling. Detta innebär i sin tur att priset beräknas sjunka under 100 000 SEK/kW_e först då 60-90 000 enheter är sålda, d.v.s. i linje med ovanstående prediktioner, men samtidigt att så pass många såsom ett tiotals miljoner installerade enheter krävs för att nå 10 000 SEK/kW_e. Samtidigt har amerikanska DoE satt upp preliminära kostnadsmålsättningar som är betydligt mer optimistiska, drygt 4000 SEK/kW_e (\$550/kW_e) år 2015 under förutsättning att 50 000 enheter installeras/år [83]. Det skall dock noteras att DoEs kostnadsmålsättning relaterar till tillverkningskostnaden, och inte, som i övriga fall, till försäljningspriset.

Hur pass stor är då marknaden och hur pass snabbt förväntar den sig att växa? Som beskrivits i ovanstående stycke så förväntar man sig att mellan 50-80 000 bränslecellsbaserade mCHP-enheter kommer att vara installerade år 2015, vilket är 10-15 ggr flera anläggningar än som finns idag. Då år 2015 också är det år då dessa system förväntas bli kommersiellt attraktiva, även utan statliga subventioner, förväntas tillväxten av produktionsvolymen för om detta år också ordentligt ta fart. Den brittiska branschorganisationen DELTA Energy & Environment uppskattar att man i bara Europa kommer att nå försäljningssiffror omkring 100 000 enheter år 2020 och 1000 000 enheter år 2025. För Japan uppskattar man samma siffror som för hela Europa. I USA förväntas också betydande försäljning komma igång, dock betydligt mindre omfattande än för övrigt nämnda, omkring 10 000 sålda enheter år 2020 samt 100 000 sålda enheter år 2025 [84].

Om dessa siffror blir verklighet eller inte återstår att se, men tydligt är i alla fall att småskaliga kraftvärmeverkteknologierna i dagsläget får stort intresse världen över, så också bränslecellsbaserade, då de medför på många håll utomstående energi- och miljövinster jämfört med på många håll existerande konventionell teknologi. Marknadsintroduktionen underlättas givetvis signifikant i de länder där man ser avsevärda fördelar med teknologin och där man också infört statliga subventioner vid installation, diverse skattelättnader vid drift, infört möjligheten att både importera och exportera el till det fasta nätet samt infört stödsystemet FIT. Förutom nationella regelverk har man infört ett s.k. EcoDesign-direktiv (2005/32/EC), som premierar produkter med en god *ecodesign*, d.v.s. produkter med en låg energiförbrukning, låga emissioner och en bra livscykelanalys [85]. En högprioriterad sådan produkt är just småskaliga kraftvärmeverk för bostäder och fastigheter. I Sverige har man i skrivandet stund inte infört FIT. Statliga bidrag vid installation av småskalig förnybar energi finns däremot, men är i nuläget begränsad till installation av solceller samt, i vissa län för jordbrukare, även till installation av vindkraftverk.

Hur står sig då bränslecellbaserade mikrokraftvärmeverken i förhållande till de motorbaserade teknologierna? Som bl.a. kan utläsas från tabell 3.1, 3.2 och 8.1 finns i dagsläget ingen klar vinnare, utan det beror snarare på från vilket perspektiv man belyser teknologin.

Utifrån installationspriset är naturligtvis ICE-baserade system i dagsläget överlägsna. Samtidigt, i motsats till de bränslecellbaserade systemen, är priset för dessa stabilt och förväntas inte sjunka något nämnvärt inom de närmaste åren då teknologin är ansedd som mogen. Förutsatt att försäljningsprognosen för de bränslecellbaserade systemen blir verklighet kan vi därför förvänta oss att prisskillnaden för de olika teknologierna redan inom ett par år kommer att vara mycket liten eller rent utav obetydlig.

En annan viktig ekonomisk aspekt att ta hänsyn till är det aktuella värme:el-förhållandet som teknologin har möjlighet att producera. Då användning av bränslecellsbaserade system resulterar i ett betydligt lägre värme:el-förhållande (0.5-2:1) än de motsvarande motorbaserade teknologierna (2-10:1) kan också de förstnämnda bättre ”matcha” nybyggnationer vars energibehov ständigt går mot ett sjunkande värme:el-förhållande till följd av förbättrade isoleringsmetoder. En bättre balans mellan produktion och behov leder i sin tur till minskade energiförluster och en bättre ekonomi.

Om man enbart tar hänsyn till bränslecellen i sig själv, och inte tillhörande reformer, gasrening och övriga nödvändiga systemkomponenter är bränslecellstekniken definitivt den mest lämpade utifrån ett tekniskt perspektiv att använda i privatbostäder. Till skillnad mot värmemotorerna involverar de inga rörliga delar samtidigt som de är helt tysta och vibrationsfria. I dagsläget, med avsaknad av vätgasinfrastruktur, måste dock det fullständiga systemet för drift med naturgas/biogas eller något annat tillgängligt bränsle naturligtvis beaktas och därmed blir teknologins specifika fördelar mindre framträdande. Bränslecellsystemen är i överlag komplexa system uppbyggda av flera katalytiska delsteg som kräver, till skillnad från värmemotorerna, mycket god kvalitetskontroll av både ingående luft, bränsle och eventuellt vatten. Denna komplexitet leder i sin tur till bristande livslängd, som också anses, fränsett kostnaden, vara en stor kvarstående utmaning för teknologin som sådan innan den är kommersiellt gångbar för de stora volymerna. Organisationen European Hydrogen and Fuel Cell technology Platform (HFP) har satt upp som målsättning för år 2015 att livslängden för ett stationärt bränslecellsystem (för småskalig kraftvärmeproduktion) ska maximalt inte överstiga 10 % degradering under 40 000 timmars drift [77]. Fränsett de mycket lovande livslängdsdata som presenterats för den japanska ENE-FARM-enheten (se

under rubrik 8) så rapporteras degraderingshastigheten i dagsläget för många LT-PEMFC och SOFC-system vara betydligt mer allvarlig, från någon upp till 5 % per 1000 timmars drifttid [12].

Utifrån ett miljöperspektiv är bränslecellsbaserade system däremot att föredra. DoE redovisade nyligen resultat från en livscykelanalys att bränsleceller avger omkring 75-90 % mindre mängd kväveoxider (NO_x) och omkring 75-80 % mindre mängd partikelutsläpp än övriga mCHP-teknologier [86]. Bränslecellsteknologin är också den som resulterar i högst elverkningsgrad, d.v.s. den teknologi som jämfört med då el importeras från det fasta nätet som resulterar i den största vinsten då det gäller minimering av växthusgaser.

Sammanfattningsvis, med hänsyn till alla ovanstående aspekter, kan man förvänta sig att bränslecellsbaserade kraftvärmeverk kommer med stor sannolikhet att vara *EN av FLERA* huvudkomponenter i ett framtida lågutsläpp- alternativt vätgassamhälle. Dess potential är i dagsläget som sagt helt beroende på den geografiska placeringen och vilka omständigheter som råder på plats. Teknologin är dock fortfarande omogen och utmaningar kvarstår. Framförallt måste tillverkningskostnaden och därmed försäljningspriset avsevärt minska. För detta krävs, förutom ökade produktionsvolymen, att forskningen och utvecklingen gällande framtagande och användande av billigare material och komponenter för bränslecellstack, bränsleberedning och övriga systemkomponenter går framåt. Om dessutom infrastruktur för vätgas byggs upp erbjuder bränslecellsteknologin mycket kompakta och effektiva energiomvandlingslösningar resulterande i nollutsläpp. Utöver detta förväntas bränslecellssystem hybridiserade med värmepumpar och/eller solceller i framtiden bli en lovande försäljningsstrategi. Det sistnämnda kan speciellt komma av värde vid uppbyggande och användande av s.k. lokala elnät vilka tillåter integrering av olika energialternativ för en eller flera närliggande småhus/byggnader, där boende har möjlighet att flexibelt handla och konsumera elkraft och värme med varandra.

Referenser

- [1] Action plan for Energy Efficiency: Realising the Potential, Brussels, 19, 10.2006 COM (2006) 545 final
- [2] EEA Report, No. 9: Stem Review, Economics of Climate Change
- [3] <http://www.stockholm.se/norradjurgardsstaden>
- [4] http://www.malmo.se/download/18.af27481124e354c8f1800042796/SVE_Sege_park_kli_mat091130_skarm.pdf
- [5] <http://www.wikipedia.org/wiki/Stack>
- [6] <http://www.wikipedia.org/wiki/Katalysator>
- [7] <http://www.wikipedia.org/wiki/Reforming>
- [8] Directive 2004/8/EC of the European Parliament and of the Council of 11 Feb 2004 on the promotion of cogeneration based on useful heat demand in the internal energy market and amending Directive 92/42/EE. EU, Brussel, 2004.
- [9] M. Pehn, M. Cames, C. Fischer, B. Praetorius, L. Schneider, K. Schumacherand, J-P. Micro Generation Towards Decentralised Energy Systems, Springer, Nederländerna, 2006
- [10] Carbon Trust, Micro-CHP Accelerator, Interim Report. carbon Trust, London, 2007
- [11] A. Hawkes, I. Staffel, D. Brett, N. Brandon, Energy Environ. Sci., 2009, 2, 729-744
- [12] H. Ren, W. Gao, Energy and Buildings 42, 2010, 853-861
- [13] <http://www.homebuilding.co.uk/feature/combined-heat-power>
- [14] http://www.microchap.info/internal_combustion_engines.htm
- [15] Micro-CHP Systems for Residential Applications – Final Report, United Technologies, 2006
- [16] Presentation “Alternativa mikro-CHP teknologier”, Corfitz Nelsson, SGC AB, 30 mars 2011
- [17] <http://www.cleanenergyindustries.com/>
- [18] Micro-CHP systems:state-of-the-art, Austrian Energy Agency, 2006
- [19] http://www.microchap.info/stirling_engine.htm
- [20] <http://www.ripassoenergy.com>
- [21] http://www.skane.se/Public/Naringsliv/Dokument/program_invingning7juni.pdf
- [22] http://en.wikipedia.org/wiki/Carnot_cycle
- [23] http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell
- [24] Rapport “A portfolio of power-trains for Europe:a fact-based analysis- The role of Battery Electrical Vehicles, Plug –in Hybrids and Fuel Cell Electrical Vehicles”, sammanställd av McKinsey &Company i samarbete med biltillverkare, olja/gas-bolag, mfl, 2010
- [25] Fuel Cell Handbook, 7th edition, 2006, ch. 3
- [26] Rapport SGC 152 “Up-grading of reformat gas for different applications with focus on small-scale hydrogen purification”, A-K. Jannasch, F. Silversand, Catator AB, 2004
- [27] A. R. Korsgaard, R. Refshauge, M. P. Nielsen, M. Bang, S. K. Kær, J. Power Sources, 162, 2006, 239-245
- [28] Information given från BASF
- [29] T. J. Schmidt, J. Baurmeister, J. Power Sources, 176, 2008, p. 428-434
- [30] http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/mcfc_pafc_workshop_de_castro.pdf
- [31] http://www.fctec.com/fctec_types_afc.asp
- [32] I. Staffel, R. Green, K. Kendall, J. Power Sources, 181 (2008) 339-349
- [33] J.R. Rostrup-Nielsen, L.J. Christiansen, A. Catalysis A, 126, 1995, 381-390
- [34] J. R. Rostrup-Nielsen, J.B. Hansen, S. Helveig, N. Christansen, A-K. Jannasch, Appl. Phys. A85: Materials Science & Processing, 2006, 427-430

- [35] Corrosion of current collector materials in the molten carbonate fuel cell, Bahoua Zhu, doktorsavhandling 2000, Kungliga tekniska högskolan
- [36] http://en.wikipedia.org/wiki/Solid_oxide_fuel_cell
- [37] <http://www.xebecinc.com/home.php>
- [38] S. Farhad, F. Hamdullahpur, Y. Yoo, International J. of Hydrogen Energy 35, 2010, 3758-3768
- [39] Rapport SGC 139 "Fuel processor for small-scale production of hydrogen-Experimental study", F. Silversand, Catator AB, 2003
- [40] I. Wheeldon, C. Caners, K. Karan, B. Peppley, International J. of Green Energy, vol. 4, 2007, 221-231
- [41] http://www.topsoe.com/business_areas/ammonia/processes/~media/PDF%20files/Feed_purification/Topsoe_feed_purification_cat_htgl.ashx
- [42] www.catator.se/C.emission
- [43] <http://www.eon.se/templates/Eon2StartPage.aspx?id=48814&epslanguage=SV>
- [44] C. Nelsson, Rapport SGC 209 "Varierande gaskvalité-Litteraturstudie", 2009, s. 12
- [45] Information skickad från Corfitz Norén, SGC AB, dec 2010
- [46] A. Fuerte, R.X. Valenzuela, M.J. Escuderao, L. Daza, J. Power Sources, 192, 1, 2009, 170-174
- [47] SGC Rapport 223 "ComfortPower Design, construction and evaluation of a combined fuel-cell and heat pump system".F.Silversand, Catator AB, 2010
- [48] http://www.icaldaie.com/sidera/eng/sidera_12.htm
- [49] Bilder framtagna av icaldaie inom ramen för H2ome-projektet
- [50] M. Olsson, C. Wallmark, P. Alvfors, Proceedings of the 15th International Conference on Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, ECOS 2002, Volume II, Berlin, 2002
- [51] C. Wallmark, P. Alvfors, J. Power Sources, 106, 2002, 83-92
- [52] Personlig kommunikation med Mark Selby, Ceres Power, feb 2011
- [53] Personlig kommunikation med Alberto Zerbinato, ICI Caldaie S.p.A, dec 2010
- [54] Personlig kommunikation med en japansk mCHP-leverantör, feb 2011
- [55] Presentation "Residential PEFC Extensive Demonstration Project", New Energy Foundation, 2010
- [56] <http://www.igu.org/html/wgc2009/papers/docs/wgcFinal00801.pdf>
- [57] Delta Energy & Environment presentation, Juli 2010
- [58] Stationary Fuel Cell programme in Japan, IEA EGRD Workshop, April 2010
- [59] Rapport "2010 Survey of Korea", FuelCellToday
- [60] Rapport "Hydrogen and Fuel Cell Activities in Korea", T-H. Lee, National RD &D Organization for Hydrogen and Fuel cells, 2008
- [61] Presentation "Callux Field Test of Residential Fuel Cells, Background and Activities", 2010
- [62] <http://www.cerespower.com/>
- [63] Presentation "Alternative energy products for global markets, CHP demonstration, site visit and preliminary results for the year ended 30 June 2010, Ceres Power.
- [64] <http://www.intelligent-energy.com/>
- [65] Presentation "Det danska bränslecellsprogrammet", Mikael Näslund, DGC a/s, 30 mars, 2011
- [66] http://www.powergenworldwide.com/index/display/articledisplay/6333305363/articles/co-generation-and-on-site-power-production/volume-10/issue-6/features/fuel-cell-based_micro-chp.html
- [67] Presentation "Development of a Low Cost 3-10 kW Tubular SOFC Power System", Norman Bessett, Acumentrics Corp., 2010

- [68] <http://www.bloomenergy.com/>
- [69] <http://www.cfcl.com.au/>
- [70] Personlig kommunikation med Matthew Harrington, Ceres Power, jan 2011
- [71] Presentation ” EU program för bränsleceller FCH JTI”, Elforsk Seminarium 2009, Bengt Ridell
- [72] http://cordis.europa.eu/fp7/home_en.html
- [73] http://www.h2susbuild.ntua.gr/Files/H2SUSBUILD_poster.pdf
- [74] http://cordis.europa.eu/fetch?CALLER=FP7_PROJ_EN&ACTION=D&DOC=2&CAT=PROJ&QUERY=0125d74fd5ea:9973:7e18379c&RCN=92226
- [75] <http://www.h2susbuild.ntua.gr/Files/Editorial.pdf>
- [76] <http://powerservices.lakho.com/2010/06/14/completes-first-phase-testing-of-its-fc20-solid-oxide-fuel-cell-power-generating-unit-that-runs-on-landfill-gas/>
- [77] L. Hedström, C. Wallmark, P. Alvfors, M. Rissanen, B. Stridh, J. Ekman, J. Power Sources, 131, 2004, 340-350
- [78] Presentation ”Fortums erfarenheter från demonstration av bränslecellssystem i Glashusett”, 30 mars 2011, Eva-Katrin Lindman, Fortum.
- [79] Presentation ”Experiences and results from the SOFC system in GlasHusEtt”, L. Hedström, N. Holmström, M. Saxe, M. Rissanen, G. Lindbergh, B. Ridell, 2008.
- [80] <http://www.energy.eu/>
- [81] <http://www.eon.se>, hämtat feb 2011
- [82] I. Staffel, R.J. Green, International J. of Hydrogen Energy, Vol. 34, Issue 14, 2009, 5617-5628
- [83] <http://en.wikipedia.org/wiki/Micro-combined-heat-and-power>
- [84] Presentation ”The six ingredients for micro-CHP fuel cell heaven”, Delta Energy & Environment, 2009
- [85] Communication from the commission to the council and the European Parliament, Establishment of the working plan for 2009-2011 under the EcoDesign Directive (2005/32/EC)
- [86] Rapport ”Life-Cycle Analysis of Criteria Pollutant Emissions from Stationary Fuel Cell Systems”, M.Q. Wang, A. Elgowainy, J. Han, 2010 DOE Annual Merit Review Proceedings

Appendix 1

Sammanfattande lista på leverantörer av olika m-CHP enheter

Produktnamn	Teknologi	Effektklass	Leverantör
Dachs	Förbränningsmotor	5,5 kW _e /12,5 kW _{th}	Baxi- SenerTec
Ecowill	Förbränningsmotor	1,2 kW _e /3,46 kW _{th}	Honda
EcoPOWER 1.0	Förbränningsmotor	1 kW _e /2,5 kW _{th}	Vaillant (= Honda Ecowill för EU)
EcoPOWER 3.0	Förbränningsmotor	3 kW _e /-	Vaillant
EcoPOWER 4.7	Förbränningsmotor	4,7 kW _e /12,5 kW _{th}	Vaillant
VitoBloc 200	Förbränningsmotor	18 kW _e /36 kW _{th}	Viessman
XRGI 15	Förbränningsmotor	15 kW _e /30 kW _{th}	EC-Power
WhisperGen	Stirlingmotor	1,3 kW _e /12 kW _{th}	WhisperTech Eon
EcoGen 24/1.0	Stirlingmotor	1 kW _e /7,7 kW _{th}	Baxi
CleanErgy CHP 161	Stirlingmotor	9 kW _e /26 kW _{th}	CleanErgy
Concentrated Solar Power unit (CSP)	Stirlingmotor	30 kW _e / -	Ripasso Energy
C30 mikroturbin	Gasturbin	30 kW _e /55 kW _{th}	Capstone
ENE-FARM	Bränsleceller (LT-PEMFC, SOFC)	0.7 kW _e /2 kW _{th}	Panasonic, Toshiba FCS, ENEOS Celltech
Residential CHP	Bränsleceller (LT-SOFC)	0.8 kW _e /1,2 kW _{th}	Ceres Power
Galileo 1000 N	Bränsleceller (HT-SOFC)	1 kW _e /2 kW _{th}	Hexis
Innotech Gamma 1	Bränsleceller (LT-PEMFC)	1 kW _e /1,7 kW _{th}	Baxi
BlueGen	Bränsleceller (HT-SOFC)	2 kW _e /1 kW _{th}	Ceramic Fuel Cell Limited
SIDERA 30	Bränsleceller (LT-PEMFC)	28 kW _e /48 kW _{th}	ICI Caldaie
ES-5000 Energy Server	Bränsleceller (HT-SOFC)	100 kW _e /-	BloomEnergy
WFC20, WFC50	Bränsleceller (HT-SOFC)	20, 50 kW _e /-	Wärtsilä



Scheelegatan 3, 212 28 Malmö • Tel 040-680 07 60 • Fax 040-680 07 69
www.sgc.se • info@sgc.se
