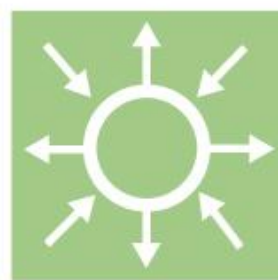
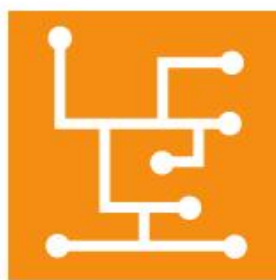


Inventering av framtidens el- och värmeproduktionstekniker

Delrapport Småskalig teknik

Elforsk rapport 08:82



Bengt Ridell Grontmij AB

December 2008

ELFORSK

Inventering av framtidens el- och värmeproduktionstekniker

Delrapport Småskalig teknik

Elforsk rapport 08:82

Förord

Fokus för hela projektet avseende inventering av framtidens produktionstekniker för el- och värmeproduktion har varit framtida möjlig utveckling av olika produktionstekniker för kraft- och värmeproduktion med bedömning av prestanda samt när en eventuell implementering och kommersialisering kan vara möjlig. Att kunna göra en sådan bedömning är av största vikt för att kunna planera inför kommande förändringar och investeringar och när dessa kan komma, men också för att kunna sätta in de FoU-resurser som erfordras.

Projektet har genomförts som olika deluppdrag inom de olika produktionsområdena med föreliggande rapport avseende delrapport Småskalig teknik. Bengt Ridell, Grontmij AB, har varit projektledare för delstudien. Alla övriga delrapporter inom projektet samt en syntesrapport återfinns för nedladdning på Elforsks hemsida www.elforsk.se.

Projektet har finansierats av AB Fortum Värme samägt med Stockholms stad, E.ON Värmekraft AB, Jämtkraft AB, Krafringen Produktion AB, Mälarenergi AB, Skellefteå Kraft AB, Umeå Energi AB, Vattenfall AB, Öresundskraft AB samt av Statens Energimyndighet.

Projektet har följts av en styrgrupp bestående av Björn Fredriksson Möller och Mikael Palmgren E.ON Värmekraft, Sten Grahn Fortum Värme, Anders Johansson och Svante Söderholm Statens Energimyndighet, Maria Jonsson och Leif Liinanki Vattenfall Research and Development, Ulf Lindqvist Jämtkraft, Magnus Stenvall Umeå Energi samt Lars Wrangensten Elforsk.

Elforsk tackar styrgruppen för värdefulla synpunkter och uppslag.

Lars Wrangensten
Elforsk AB
Programområde El- och Värmeproduktion
December 2008

1. Sammanfattning

I Elforskprojektet, Inventering av framtidens produktionstekniker för el och värmeproduktion, har följande tekniker för småskalig produktion valts ut för att studeras mer ingående,

- Bränsleceller
- Solceller
- ORC, Organic Rankine Cycle
- Vågkraft

Av de fyra utvalda teknikerna är bränsleceller, ORC och solceller lämpliga att använda för så kallad distributed generation, att användas nära en förbrukare och eventuellt även för produktion till elnätet. Vågkraft är mer likt vindkraft till sin karaktär och är förmodligen mer lämpad att användas av kraftbolag för direkt inmatning till transmissionsnätet.

Ingen av dessa tekniker är idag direkt konkurrenskraftiga mot att köpa el från det svenska elnätet. Det finns dock möjligheter för alla att genom massproduktion få ner tillverkningskostnaderna så att de skall kunna bli konkurrenskraftiga alternativ i framtiden. Det beror till stor del på den allmänna utvecklingen av elpris, skatter, leveranssäkerhet mm.

1.1 Teknikbeskrivning

Bränslecellens arbetsprincip är en elektrokemisk process där väte förs till en anod och syre till en katod via ett elektrokemiskt membran produceras el och värme och restprodukten är vatten.

Vätgasen kan framställas på många olika sätt, t.ex. från förnybara och fossila bränslen. Biobränslen kan rötas eller förgasas och användas som bränsle. Idag används ofta naturgas eller metanol. Vätgas kan även enkelt produceras via elektrolys. Då används elektricitet från till exempel sol, vind eller vattenkraft. Syrgasen tas med fördel direkt ur luften.

Typiska egenskaper för bränslecellen är

- Hög verkningsgrad jämfört med andra tekniker i samma storlek
- Bra miljöegenskaper – i princip inga miljöpåverkande emissioner
- Bränsleflexibilitet – såväl förnybar energi och bränslen som fossila bränslen kan användas
- Flexibilitet – bränslecellen kan användas för kraftvärme eftersom den producerar både el och värme
- Modularitet – bränslecellen har hög verkningsgrad även i små enheter och dessa kan byggas samman till större anläggningar

Det finns idag flera olika typer av bränsleceller med något olika egenskaper. De benämns efter elektrolytens sammansättning. De vanligaste typerna nämns här nedan,

Lågtemperaturbränsleceller som arbetar vid 80°C – 200°C

- PEFC, polymerelektrolyt bränsleceller

- PAFC, fosforsyra bränsleceller
- DMFC, direktmetanol bränsleceller

Högtemperaturbränsleceller som arbetar vid 600°C – 1000°C.

- SOFC, fastoxid bränsleceller
- MCFC, smältkarbonat bränsleceller

I **ORC-processen**, där ORC står för organisk Rankine-cykel, har ångcykelns normala arbetsmedium, vatten, ersatts av ett organiskt arbetsmedium. Genom att man använder ett organiskt medium, med lägre förångnings-temperatur än vatten, kan ångprocessen arbeta vid lägre temperatur utan att man riskerar att få fuktig ånga och risk för korrosion och erosion i turbin eller expander.

ORC-processen bygger på samma komponenter som en vanlig vatten-ångprocess. Det organiska arbetsmediet förångas in en förångare, får expandera i en turbin eller skruvexpander, kondenseras i en kondensor och pumpas tillbaka till förångaren.

I biobränsleeldade ORC-kraftvärmeverk har vattenångcykeln ersatts av en ORC-cykel. ORC-kretsen drivs av energin i rökgaserna från en biobränsleeldad ugn. Mellan rökgaserna och ORC-kretsens förångare finns en trycklös mellankrets i form av en hetoljepanna.

Solceller benämns ofta PV vilket betyder Photovoltaics. Det finns två huvudtyper av solceller kiselceller och tunnfilmsolceller.

En vanlig solcell består av ett halvledarmaterial som är uppdelat i två skikt. Ett skikt är p-dopat och det andra är n-dopat för att skapa en potentialskillnad. När solljus träffar solcellen exiteras (frigörs) elektroner och till följd av potentialskillnaden kommer elektronerna att röra sig mot det positiva n-skiktet. Med metallkontakter samlas elektronerna upp och ström kan erhållas i en yttre krets.

Kiselcellen är idag den vanligaste och mest utvecklade typen för stationär elproduktion. Tillförlitligheten är hög och den har en lång livslängd, mer än 25 år. Kostnaderna är dock för höga för att kiselceller skall kunna vara konkurrenskraftiga för produktion till elnätet gentemot konkurrerande energiomvandlingstekniker.

Tunnfilmssolceller kan delas in i tre huvudgrupper,

- Vanliga tunnfilmssolceller exempelvis a-Si (amorft-kisel), CIGS, CdTE, CIGS
- Tandem solceller som täcker breda spektra
- Dye/Organic solar cells

De har olika principiell uppbyggnad och funktion.

Den låga materialåtgången tillsammans med tillverkningsmetoderna gör att tunnfilmssolceller har stor potential att kunna tillverkas i stor skala till ett lågt pris.

Vågkraft alstras från vågornas energi som är en förnybar energikälla som alstras via solenergi. Solen värmer luften vilket orsakar vindar som alstrar vågrörelser på vattenytan. Av dessa förnybara energiformer sol, vind och vågenergi är vågenergin den jämnaste. Vågenergin varierar kraftigt över året och är som störst under hösten.

Vågkraftverk anses i regel vara småskaliga. Men de är knappast så kallad distribuerad produktion utan mer lika vattenkraft eller vindkraft till sin karaktär eftersom de måste placeras på ställen där det finns vågor och inte vid elförbrukarna. De finns planer på att tillverka stora vågkraftverk i multi-MW, upp till storleksordningen 100 MW planeras, men det är vid placeringar där dessa speciella förutsättningar finns.

Det finns flera olika metoder att utnyttja vågornas kraft för elproduktion. Enligt organisationen Wave-Energy finns det mer än 60 st olika tekniker under utveckling. De flesta har testats som prototypanläggningar.

De olika teknikerna kan delas in i olika huvudområden till exempel,

- OWEC, Ocean Wave Energy Converter, Bojkraftverk ex bojar med linjär bottenförankrad generator
- Slack-Moored Energy converter, upphöjda plattformar med central turbin
- OWC, Oscillating Water Columns, med luftturbin land eller havsbaserad
- Kilrännkraftverk

1.2 Kostnadsutveckling och prisbild

Det är svårt att uppskatta kostnadsutvecklingen för dessa småskaliga tekniker eftersom de kostnader som anges idag är i regel måltal som måste uppnås för att tekniken skall kunna vara konkurrenskraftig i framtiden.

Den framtida kostnadsutvecklingen för **bränsleceller** är optimistisk, flera olika internationella program arbetar intensivt för att minska kostnaderna att tillverka bränsleceller. I USA drivs av Department of Energy SECA-programmet som syftar till att ta fram en SOFC-modul i mindre storlek, 5-10 kW. Ett av programmets mål är att kunna tillverka en anläggning för 400 USD/kWe (2 600 SEK/kWe) vid en tillverkningsvolym om 50 000 enheter.

I Japan är ett av målen i det stora programmet för små stationära bränsleceller att priset för kompletta anläggningar för både el och värmeproduktion i småhus, inklusive installation, skall var ca 1 MYEN eller 10 000 USD (65 000 SEK) per kWe. Det förutsätter en tillverkningsvolym på 10 000 enheter per år vilket beräknas uppnås före år 2010. Detta pris skall senare kunna halveras till motsvarande 5 000 USD vid en kommersiell produktion av 100 000 kraftvärmeenheter per år.

Priset för en MCFC demonstrationsanläggning på 250 kWe är idag i storleksordningen 4 000 €/kWe (32 000 SEK/kWe). Dessa priser beräknas vid större volymer om några år komma ner till under 1 000 €/kWe eller cirka 10 000 SEK/kWe.

För bränslecellsstackar avsedda för bilindustrin prognostiseras kostnader ner mot 50 USD/kW.

Att de prognostiserade kostnaderna varierar kraftig beror på anläggningarnas storlek, teknikval och användningsområde.

Dagens **ORC**-moduler är tillverkas i storleksområdet från några 100 kW_e till 2 MW_e. Investeringen för en komplett ORC-modul på 2 MW_e är ca 20 Mkr, motsvarande en specifik investering på ca 10 000 kr/kW_e. För spillvärmekoppling används normalt mindre moduler. Den specifika investeringen för en modul på 0,5 MW_e är ca 15-25 000 kr/kW_e.

Investeringskostnaden för en hel bränslebaserad ORC-anläggning är för en 2 MWe anläggning i storleksordningen 40 000 SEK/kWe.

För **solceller** är idag kostnaden för att uppföra stationära demonstrationsanläggningar i Europa ca 5 000 €/kWp eller 50 000 SEK/kWp, kWp betyder kW peak dvs den effekt som en solcell kan ge vid optimal solinstrålning, i producerar en solcell ca 900 kWh per installerad kWp och år.

Det är samma pris i Sverige för anläggningar som är optimerade för elproduktion, en del nya anläggningar har tillkommande höga kostnader för byggnadsintegrering. Kostnaden för själva solcellsmodulerna är idag i storleksordningen 30 000 SEK/kWp. Kostnaderna för drift och underhåll av solcellsanläggningar är i regel mycket låga.

Enligt EU:s visionsrapport för solceller är ett uttalat mål att denna kostnad skall sänkas till en tiondel, eller 500 € /kWp (4700 SEK/kWp), senast år 2050.

För **vågkraft** i Elforsk rapporten "El från nya anläggningar" har följande kostnadsbilder redovisats.

Uppnådd produktion och således även elproduktionskostnad för vågkraftverk beror på läget och den på platsen specifika vågeffekten. Den angivna elproduktionskostnaden från olika leverantörer spannar över ett stort intervall, från 30 öre/kWh till 1,5-2 kr/kWh.

Dessa uppgifter visar att kostnaden för att producera vågkraft är starkt beroende av läget och teknikval men det viktigaste att det finns stora möjligheter för vågkraften att i rätt sammanhang i framtiden vara en konkurrenskraftig teknik.

Att kostnaden kommer att minska kraftigt från dagens investeringskostnader som är baserade i de flesta fall på demonstrationsanläggningar för de tekniker som lyckats med att bli kommersiella är uppenbart.

1.3 Bedömt FoU behov fram till kommersialisering

Eftersom de småskaliga teknikerna ännu inte är konkurrenskraftiga så behövs ett omfattande FoU arbete för att minska kostnader och för att öka effektiviteten. Det måste göras med produktutveckling, i flera fall genom minskade materialbehov och en effektivare industriell tillverkningsprocess.

För bränslecellerna är det i speciellt livstid, hållbarhet och minskat materielbehov. För ORC är det marknadsutveckling och solcellerna teknikutveckling för tunnfilm-solcellerna och industriell tillverkning. För vågkraft är det teknikutveckling. För alla teknikerna är det viktigt att kraftigt minska tillverkningskostnaderna. För det krävs bland annat större tillverkningsvolymmer

De specifika behoven för varje teknik och pågående FoU-verksamhet finns beskrivna mer i detalj i rapporten.

1.4 Möjlig utveckling

Det är de olika småskaliga teknikernas egenskaper och marknadsutveckling för energimarknaden, elpris, bränslepriser, skatter, miljöavgifter, subventioner som kommer att avgöra hur teknikernas konkurrenskraft kommer att utvecklas.

De tekniker som inte använder externt bränsle till exempelvis vågkraft och solceller är till stor delen beroende av fortsatt teknikutveckling och minskade tillverkningskostnader. Teknikutvecklingen är viktig både för att öka verkningsgraden och för att minska tillverkningskostnaderna. I princip är båda dessa faktorer lika viktiga för att få en låg produktionskostnad men verkningsgraden har i längden större betydelse eftersom investeringskostnaden är beroende av ränteläget. Det väsentliga är att produktionskostnaden kan konkurrera med elpriset.

Bränsleceller	Vågkraft
▪ Hög verkningsgrad ▪ Förnybara bränslen och vätgas ▪ Kompakta tysta anläggningar ▪ Litet platsbehov ▪ Idag demonstrationsfas ▪ 2020 förkommersiell fas ▪ 100 tals MW installerat globalt i Sverige ▪ 2030 vanlig teknik för kraftproduktion i Sverige används främst med biobaserade bränslen i större anläggningar	▪ Fritt bränsle, klimatneutralt ▪ Begränsade lokaliseringar ▪ Underhållskostnader osäkra ▪ Pilottester sker idag, val av kommersiella tekniker ej klart ▪ 2020 demonstrationer vanliga ▪ 2030 kommersiella anläggningar vid havsbaserade industriella installationer samt eventuellt i vågkraftparker

ORC	Solceller
▪ Mer ekonomiskt idag än konventionell ångteknik för biobränsle anläggningar < 2MWe ▪ I vissa fall klimatneutralt beroende på bränsleval ▪ I dag kommersiellt i länder med inmatningspriser på biobränslebaserad el ▪ Ökad användning även anläggningar i Sverige främst i spillvärmekoppling ▪ 2030 lägre kostnader används för nya applikationer,	▪ Fritt bränsle, klimatneutralt ▪ Lång livstid, litet underhåll ▪ Kräver stora ytor ▪ Idag demonstrationsfas eller förkommersiell ▪ Kraftiga subventioner idag ▪ 2020 kraftigt ökad användning fortfarande subventionerat ▪ 2030 nya tekniker är kommersiella och väsentligt billigare

För de tekniker som använder externt bränsle ORC och bränsleceller är verkningsgraden betydligt viktigare än för de andra. En hög verkningsgrad är väsentlig fördel vid höjningar av bränslepriser. Vid användning av spillvärme eller direkt förnybar energi som sol- och vindenergi så verkningsgraden viktig men investeringskostnaden är den dominerande faktorn.

De fyra olika teknikerna har olika utvecklingsfaser och krav som påverkar möjligheten till ett större kommersiella genombrott.

Dessa tekniker kommer förmodligen inte alla att få kommersiella genombrott i Sverige. Småskaliga tekniker kommer inom tidrymden fram till 2030 inte att kunna konkurrera i stor skala med de storskaliga tekniker som finns i dagens kraftnät.

I det längre perspektivet kan situationen bli annorlunda. Elnätet kan kanske minska i betydelse om de småskaliga teknikerna blir billiga pålitliga och lätta att använda. El kan då produceras lokalt direkt i samband med användarens behov.

Innehåll

1.1	Teknikbeskrivning	5
1.2	Kostnadsutveckling och prisbild	7
1.3	Bedömt FoU behov fram till kommersialisering.....	9
1.4	Möjlig utveckling	9
2	Inledning småskalig produktion	1
3	Stationära bränsleceller	3
3.1	Inledning	3
3.2	Teknikbeskrivning	4
3.3	Nuvarande status och utvecklingsläge	6
3.4	Bedömt FoU behov fram till kommersialisering.....	10
3.5	Prisbild och kostnadsutveckling	10
3.6	Pågående FoU verksamhet	11
3.7	Möjligt utvecklingsscenario	12
4	ORC Organic Rankine Cycle	14
4.1	Teknikbeskrivning	14
4.1.1	ORC i biobränsleeldade kraftvärmeverk	14
4.1.2	Prestanda	15
4.2	Miljöegenskaper.....	15
4.2.1	Möjlighet till klimatneutral produktion	16
4.3	Kostnader	16
4.3.1	Spillvärmekoppling	17
4.3.2	Biobränslekoppling.....	17
4.3.3	Sammanfattning ekonomi	18
4.4	Potential	18
4.4.1	Spillvärme i vatten.....	18
4.4.2	Spillvärme i avgaser.....	19
4.4.3	Biobränslebaserade ORC-kraftvärmeverk.....	19
4.5	Utvecklingsläge.....	19
4.6	FoU-behov fram till implementering.....	19
4.7	Pågående FoU-verksamhet	20
4.7.1	Sverige	20
4.8	Möjligt utvecklingsscenario (ORC)	22
4.8.1	Direktvärmeväxling mot rökgas.....	22
4.8.2	ORC-teknik i fjärrkylakopplingar	22
5	Solceller	23
5.1	Inledning	23
5.2	Teknikbeskrivning	23
5.3	Nuvarande status och utvecklingsläge	26
5.3.1	Kritiska komponenter	28
5.4	Solceller i Sverige	28
5.5	Bedömt FoU behov fram till kommersialisering.....	30
5.6	Möjligt utvecklingsscenario	32
5.7	Prisbild och kostnadsutveckling för solceller.....	33
6	Vågkraft	36
6.1	Inledning	36
6.2	Teknikbeskrivning	36
6.2.1	Bojkraftverk OWEC	37
6.2.2	OWC Oscillating Water Columns	38
6.2.3	Kilrännkraftverk	39

6.2.4	Slack-Moored Energy converter Plattform med turbin, Wave Dragon.....	40
6.3	Nuvarande status, utvecklingsläge och kostnadsbild	40
6.4	Bedömt FoU behov fram till kommersialisering.....	41
6.5	Pågående FoU verksamhet	41
6.6	Möjligt utvecklingsscenario	42
7	Jämförelse småskalig produktion	44
7.1	Kostnadsutveckling och prisbild	44

2 Inledning småskalig produktion

I detta Elforskprojekt, Inventering av framtidens produktionstekniker för el och värmeproduktion, har följande tekniker för småskalig produktion valts ut för att studeras mer ingående,

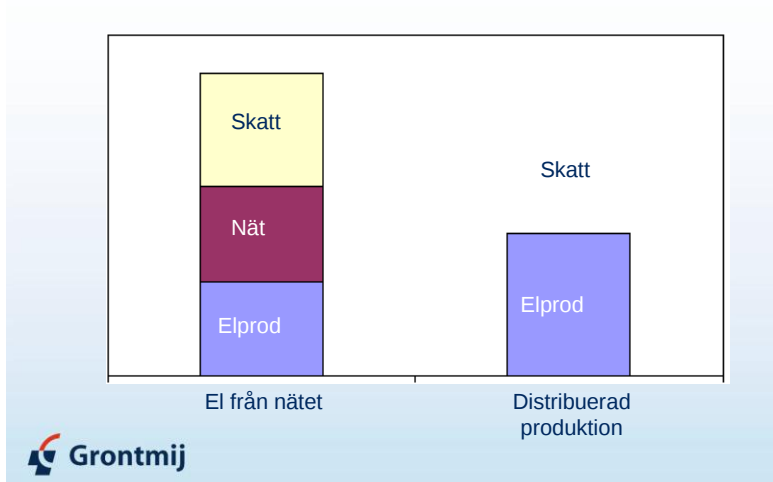
- Bränsleceller
- Solceller
- ORC, Organic Rankine Cycle
- Vågkraft

Av dessa tekniker är bränsleceller, ORC och solceller lämpliga att använda för så kallad distribuerad produktion, att användas nära en förbrukare och eventuellt även för produktion till elnätet. Vågkraft är mer likt vindkraft till sin karaktär och är förmodligen mer lämpad att användas av kraftbolag för direkt inmatning av el till transmissionsnätet.

Det finns naturligtvis flera andra tänkbara småskaliga tekniker, Stirling, gasmotorer, mikroturbiner, men de omfattas inte av denna studie.

Småskalig elproduktion har idag i Sverige som i de flesta andra industriländer svårt att vara konkurrenskraftigt gentemot det centrala elnätet. Det beror till största delen på att de är väsentligt dyrare att använda jämfört med att köpa el från det allmänna elnätet. Det kan dock inom en snar framtid finnas stora fördelar med en småskalig lokal teknik, nätkostnaderna undviks, oberoende av störningar i elnätet och fluktuerande elpriser, leveranssäkerheten ökas eller säkerställs, miljömässiga fördelar, skatter mm

Elkostnad småskalig teknik



Denna bild visar att produktionskostnaderna för småskalig teknik kan vara väsentligt högre än vad produktionskostnaderna är för konventionell baslastteknik och ändå vara konkurrenskraftiga beroende på att nät-kostnaderna undviks och skatterna blir med stor sannolikhet väsentligt lägre.

Andra utvecklingssteg som kan komma att förändra dagens förutsättningar kan vara användning av likström i byggnader. Flera småskaliga produktionstekniker producerar likström som idag oftast omvandlas till växelström till exempel solceller och bränsleceller. Andra faktorer som kan komma att påskynda införandet av distribuerad elproduktion kan vara svårigheter att öka kapaciteten i dagens elnät på grund av höga kostnader, tillståndsfrågor, miljöfrågor etc.

Genom produktutveckling och industriell masstillverkning så kan kostnaderna för småskalig teknik i framtiden bli direkt konkurrenskraftiga gentemot det allmänna elnätet.

3 Stationära bränsleceller

3.1 Inledning

Bränsleceller möjliggör omvandling av ett bränsle till el och värme med hög verkningsgrad och mycket låga emissioner. Bränslecellen har hög verkningsgrad även för mindre anläggningar och kan då med fördel användas för så kallad distribuerad produktion – mindre kraft- eller kraftvärmeverk som placeras nära kunden. Det kan t.ex. vara på känsliga platser ute i elnätet där leveranserna är mindre säkra eller hos industrier och kommuner som har tillgång till ett lämpligt bränsle. Bränsleceller använder i regel vätgas som bränsle. Vätgasen kan tillverkas på många olika sätt. Reformering av naturgas är idag det vanligaste sättet men även olika sorters avfall, rötslam och biomassa kan användas eller vätgas tillverkad med elektrolys med hjälp av förnybara bränslen såsom sol, vind eller vattenkraft.

Bränsleceller har funnits i laboratoriemiljö sedan 1839 då dess funktion visades av Sir William Grove. Den första egentliga praktiska tillämpningen var inte förrän rymdprogrammet startade. Då valdes bränslecellen som kraftkälla därför att den ansågs vara det mest effektiva och kompakta sättet att producera el, värme och vatten ombord en rymdfarkost. Tekniken med så kallade alkaliska bränsleceller AFC utvecklades. De är mycket tillförlitliga och relativt enkla att tillverka. De kräver dock både ren vätgas och rent syre. Det är inget direkt problem i rymden eftersom allt syre måste tas med ombord rymdfarkosten. Däremot på jorden så krävs det att luften behandlas, bland annat måste CO_2 tas bort vilket medför ökande kostnader och högre komplexitet varför den alkaliska bränslecellen inte anses kunna bli konkurrenskraftig mot andra tekniker.

Stationära bränsleceller har testas i olika demonstrationsanläggningar sedan tidigt 1980-tal. Då utvecklade UTC i USA och Fuji Electric i Japan fosforsyra bränsleceller PAFC som kunde använda luft i stället för ren syrgas. Dessa bränsleceller har demonstrerats i mer än 200 anläggningar i storlekar från 50 kWe upp till 200 kWe. Det kan nämnas att fyra av dessa har använts i Sverige. Livstiden och degraderingen av prestanda uppfyllde inte helt kraven för kommersiella anläggningar och försäljningen har avstannat. UTC utvecklar nu en ny generation som inom kort kommer att lanseras på marknaden förmodligen under 2009.

Idag koncentreras utveckling en av stationära bränsleceller på antingen högtemperaturbränsleceller i storlekar från 100 kWe upp till några MWe. De har väsentligt högre verkningsgrad än konkurrerande tekniker för elproduktion och de kan använda flera olika typer av förnybara bränslen.

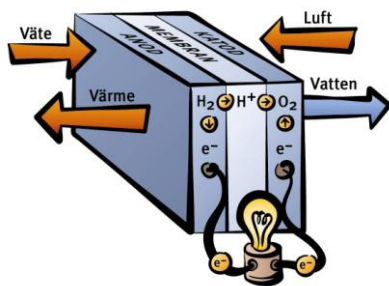
Det andra utvecklingsspåret är små stationära bränsleceller 1 – 10 kWe som används för kraftvärme i småhus och mindre byggnader. Det utvecklas både lågtemperatur bränsleceller PEFC och SOFC för dessa ändamål. Ett stort

demonstrationsprogram i Japan har placerat ut ca 3000 små stationära bränsleceller.



Bilden visar en av 3000 små bränslecellsanläggningar i Japan. Den lilla enheten innehåller bränslecellen och den stora en varmvattenenhet.

3.2 Teknikbeskrivning



Bränslecellens arbetsprincip är en elektrokemisk process där väte förs till en anod och syre till en katod. Via ett elektrokemiskt membran produceras el och värme och restprodukten är vatten.

Vätgasen kan tillverkas på många olika sätt, t.ex. från förnybara och fossila bränslen. Biobränslen kan rötas eller förgasas och användas som bränsle. Idag används ofta naturgas eller metanol. Vätgas kan även enkelt produceras via elektrolys. Då används elektricitet från till exempel sol, vind eller vattenkraft. Syrgasen tas med fördel direkt ur luften.

Typiska egenskaper för bränslecellen är

- Hög verkningsgrad jämfört med andra tekniker i samma storlek
- Bra miljöegenskaper – i princip inga miljöpåverkande emissioner

- Bränsleflexibilitet – såväl förnybar energi, biobränslen som fossila bränslen kan användas
- Flexibilitet – bränslecellen kan användas för kraftvärme eftersom den producerar både el och värme
- Modularitet – bränslecellen har hög verkningsgrad även i små enheter och dessa kan byggas samman till större anläggningar

Det finns idag flera olika typer av bränsleceller med något olika egenskaper. De benämns efter elektrolytens sammansättning. De vanligaste typerna nämns här nedan,

Lågtemperaturbränsleceller som arbetar vid 80°C – 200°C

- PEFC, polymerelektrolyt bränsleceller
- PAFC, fosforsyra bränsleceller
- DMFC, direktmetanol bränsleceller

Högtemperaturbränsleceller som arbetar vid 600°C – 1000°C.

- SOFC, fastoxid bränsleceller
- MCFC, smältkarbonat bränsleceller

Lågtemperaturbränslecellerna är i regel billigare att tillverka men har väsentligt lägre verkningsgrad max ca 35 % när högtemperaturbränslecellerna kan ha upp till 55 % verkningsgrad och för större anläggningar i MW-klass sammankopplade med en gasturbin över 60 %.

SOFC och MCFC är väsentligt mindre känsliga för föroreningar jämfört med PEFC och är därför lämpliga för biogastillämpningar. PEFC kräver mer avancerad reformering av bränslet, vätgasen får exempelvis endast innehålla enstaka ppm av CO, för SOFC är CO ett bra bränsle.

PEFC är mest lämpad för små bränsleceller som använder ren vätgas som bränsle exempelvis som APU (additional power unit). Bilindustrin är också inriktad på att använda PEFC eftersom de kan göras kompakta, ha kort starttid eftersom de inte kräver uppvärmning.

Bränsleceller kan användas inom många olika områden.

Transportområdet är det område som kan få mycket stor betydelse vid ett eventuellt kommersiellt genombrott för bränslecellen som alternativ till bilmotorn. De flesta stora biltillverkarna har demonstrationsbilar med bränsleceller. Ett stort hinder för ett snabbt genombrott på marknaden är att bränslecellerna kräver vätgas som bränsle och det behövs därför en infrastruktur för vätgas.

För det **stationära området** används oftast naturgas som bränsle men för att nå ett större genombrott inom kraftmarknaden krävs andra bränsle. Olika typer av biobränslen har testas och demonstrerats med gott resultat. Flera demonstrationsanläggningar i full skala använder rötgas som bränsle. För anläggningar avsedda för småhus och mindre byggnader är det fortfarande naturgas som är det dominerande bränslet.

Portabla små bränsleceller är oberoende av fast infrastruktur och används utanför elnätet som alternativ till batterier eller som batteriladdare. De

använder ofta metanol eller vätgas som bränsle. Dessa bränsleceller har väsentligt större kapacitet än dagens batterier

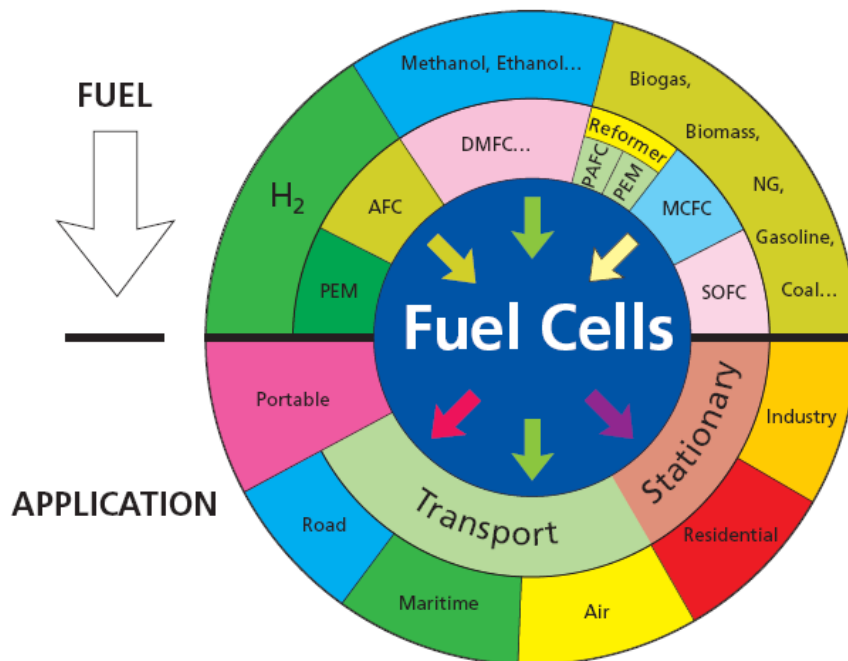


Bild European commission vision report Hydrogen and Fuel Cells 2003

Denna bild beskriver olika typer av bränslen och användningsområden för bränsleceller. Det finns många olika sorters bränsleceller som kan använda olika sorters bränsle och användas för inom en mängd olika områden.

3.3 Nuvarande status och utvecklingsläge

Forskningen inom bränslecellsområdet är kraftigt ökande och det investeras globalt ca 2000 MUSD per år för FoU och demonstration inom bränslecellsområdet. Bränsleceller är dock fortfarande långt ifrån kommersiella och konkurrenskraftiga. Utvecklingen har gått snabbt fram och flera olika koncept kan inom en snar framtid bli framgångsrika. De bränsleceller som först blir konkurrenskraftiga är de små portabla bränslecellerna som ersätter batterier i till exempel små datorer, för militära ändamål och andra batteritillämpningar. Små portabla bränsleceller kan också användas för batteriladdare för exempelvis mobiltelefoner.

Inom det stationära området har speciellt två olika användningsområden utvecklats. Något större bränsleceller från ca 100 kWe upptill multi-MW klass som är placerade nära användaren det kan till exempel vara bryggerier, sjukhus, industrier, kontor eller hotell. Dessa bränsleceller har hög verkningsgrad men är och kommer förmodligen att vara relativt dyra i inköp. Det betyder att anläggningarna bör ha lång drifttid per år. Dessa bränslen

använder med fördel lokalt producerade alternativa bränslen exempelvis biogas. Naturgas är dock fortfarande det vanligaste bränslet.

De stora fördelarna med att använda bränsleceller för denna typ av användning är att verkningsgraden är hög jämfört med konkurrerande tekniker. För användaren är det en möjlighet att säkerställa elleveransen vid strömavbrott. För en del industrier är det också en möjlighet att på ett effektivt sätt ta hand om avfall genom rötning av till exempel biologiskt avfall eller direkt användning av avfallsgaser från en kemisk industri.



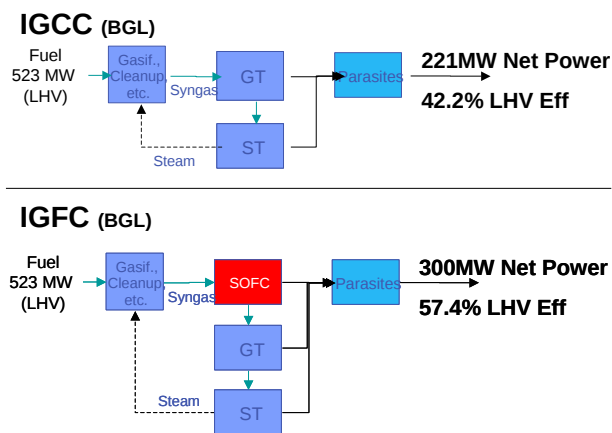
Bilden till vänster visar en 1 MWe MCFC (4*250 kWe) som är installerad vid ett Sheraton hotell i San Diego, Kalifornien, USA och den högra bilden visar en 300 kWe MCFC installerad vid Kirin bryggeriet i Japan som använder rötat biologiskt avfall från bryggeriet som bränsle. Det har installerats ca 400 bränsleceller ute på fältet för denna typ av användning.

MCFC tekniken har visat sig vara framgångsrik som demonstrationsanläggningar. Mer än 35 anläggningar i storlekar från 250 kWe upp till MW-klass finns i drift. De är många olika typer av användare sjukhus, bryggerier, militäranläggningar, hotell, kontor m.fl. MCFC används i regel som kraftvärmeanläggningar, flera använder olika typer av biobränslen som bränsle. De största tillverkarna är Fuel Cell Energy i USA, MTU i Tyskland, Ansaldo i Italien och IHI i Japan. Den elektriska verkningsgraden för dessa system med naturgas är i regel 47 % därtill kommer uttag av värme. För en hybridanläggning där en gasturbin användes i en bottencykel har verkningsgraden 56 % uppmätts.

I USA bedrivs forskning och utveckling av SOFC inom det av DOE finansierade SECA programmet. Huvudsyftet är att utveckla kommersiella SOFC system i storlekar upp till 10 kWe som senast år 2012 vid stora volymer skall kunna tillverkas för 400 USD/kWe. Ett senare mål är att utveckla SOFC

system i storlekar upp till 100 MWe som skall användas i Future-Gen kraftverk i USA, se nedanstående Figur. De första leveranserna av enheter större än 5 MWe beräknas ske kring år 2015. Future-Gen är ett så kallat clean-coal kraftverk som kommer att ha hög verkningsgrad. Tekniken bygger på IGCC kolförgasning med en integrerad bränslecell- och gaskombicycle. Verkningsgraden för ett 300 MWe kraftverk beräknas till 57,4 % (LHV). Future-Gen projektet har nyligen stoppats och kommer att omarbetas men utvecklingen av stora SOFC-enheter fortsätter enligt de tidigare planerna.

Coal Fueled SOFC



Power output improved by ~35% over IGCC...
Potential for 10% improvement in CoE

Based on GE Study

Processen beskriver användning av SOFC i stor skala. Utvecklingen av den här typen av bränsleceller har mycket stor betydelse för utveckling av mindre enheter

Den andra typen av stationära bränsleceller som utvecklas målinriktat är små bränsleceller som används som kraftvärmeanläggningar i småhus och mindre byggnader. De görs i storlekar från enstaka kWe upptill storleksordningen 25 kWe.

Det kan vara svårt att med dagens energipriser se vilka drivkrafter som finns för att installera bränsleceller i småhus eftersom utnyttjningstiden i regel är relativt kort och laständringarna kan vara stora. Ett sätt att kringgå dessa problem är att använda sig av så kallade "virtual utility". Bränslecellerna är då installerade i småhus men de kan styras centralt från ett kraftbolag.

I Europa finns i storleksordningen 100 små stationära bränsleceller i drift i småhus och mindre byggnader, det är både SOFC och PEFC. De flesta finns i Tyskland men även Nederländerna, Schweiz, Österrike och Frankrike har ett antal anläggningar för demonstration. Det är främst tillverkarna Vaillant (PEFC), Hexis (SOFC), Ceres Power(SOFC) och CFCL (SOFC) som är har större program.

I USA är det till största delen elproduktion som är intressant. Företaget Plug Power (PEFC) är marknadsledande. De tillverkar idag främst mindre PEFC anläggningar men håller nu på att utveckla högtemperatur PEFC främst för användning på den Europeiska marknaden där kraftvärme är ett krav.

Idag är det flera företag som utvecklar så kallade HT-PEFC, högtemperatur PEM, de arbetar vid något högre temperaturer 120°C – 200°C. De lämpar sig

bra för kraftvärme och är väsentligt mindre känsliga för föroreningar i vätgasen jämfört med vanliga PEFC.

3.4 Bedömt FoU behov fram till kommersialisering

Tekniken med stationära bränsleceller har demonstrerats i flera tusen anläggningar. Det har visat att tekniken fungerar det behövs dock ytterligare FoU insatser innan bränsleceller är kommersiella och konkurrenskraftiga. Det gäller främst

- Livslängdsfrågor, degradering av prestanda
- Lägre tillverkningskostnader genom kompaktare stackar, billigare material och effektiv industriell tillverkning
- Utveckling av kringutrustning speciellt reformers och växelriktare
- Utveckling av nya typer av bränsleceller som kan bli billigare och effektivare än dagens exempelvis HT-PEFC som ännu inte har demonstrerats ordentligt ute på fältet.
- Integrering av bränsleceller med gasturbiner antingen som ersättning för brännkammare eller i bottencykler
- Utveckling av trycksatta högtemperaturstackar
- Även en fortsatt utveckling av standards och säkerhetsfrågor behövs

Det kan nämnas att reformera bränslen ombord en bil till exempel metanol, bensin eller naturgas har visat sig vara så svårt att bidrag till FoU för ombordreformering har stoppats i USA. Nu är det trycksatt vätgas som är huvudlinjen som framtida fordonsbränsle för bränslecellsfordon.

3.5 Prisbild och kostnadsutveckling

Den framtida kostnadsutvecklingen för **bränsleceller** är optimistisk. I USA finns SECA-programmet som finansieras av Department of Energy, det syftar till att ta fram en SOFC-modul i mindre storlek, 5-10 kW. Ett av målen är att nå en kostnad på 400 USD/kWe (2 600 SEK/kWe) vid en tillverkningsvolym om 50 000 enheter.

I Japan är ett av målen för det stora programmet för små stationära bränsleceller att priset för kompletta anläggningar, inklusive installation, skall var ca 1 MYEN eller 10 000 USD (65 000 SEK) per kWe. Det förutsätter en tillverkningsvolym på 10 000 enheter per år vilket beräknas uppnås före år 2010. Detta pris skall senare kunna halveras till motsvarande 5 000 USD vid en kommersiell produktion av 100 000 enheter per år.

Idag kostar en MCFC demonstrationsanläggning på 250 kWe i storleksordningen 5 000 €/kWe (47 000 SEK/kWe). Dessa priser beräknas vid större volymer komma ner till under 1 000 €/kWe eller cirka 10 000 SEK/kWe.

För bränslecellsstackar avsedda för bilindustrin prognostiseras tillverkningskostnader ner mot 50 USD/kW. Dessa bränsleceller har dock helt andra prestanda krav än stationära bränsleceller.

Att de prognostiserade kostnaderna varierar kraftigt beror på anläggningarnas storlek, teknikval och användningsområde.

3.6 Pågående FoU verksamhet

Det finns flera skäl till att många länder har stora FoU program för bränsleceller. Det kan vara för att,

- Minska beroendet av importerade fossila bränslen
- Bygga upp en exportindustri för att möta en stor internationell efterfrågan
- Militär användning, personlig utrustning, APU i fält
- Vara långt framme i forskningsfronten för att kunna påverka och bedöma teknikutvecklingen och den framtida marknaden
- Utnyttja lokalt producerade förnybara bränslen på ett effektivt sätt, ex rötgasanläggningar
- Minska utsläpp av växthusgaser
- Förbättra leveranssäkerhet av el, förstärka svaga nät, användning som APU (additional power units)

Det pågår sedan många år en betydande global FoU verksamhet inom bränslecellsområdet. De länder som visar störst intresse för bränsleceller är USA, Kanada, Japan och Tyskland. Europa ligger industriellt något efter Nordamerika och Japan men är i flera fall ledande inom grundforskning. Tillverkning av bränsleceller görs i första hand i Nordamerika och Japan med några få undantag. Utvecklingen sker parallellt inom bilindustrin och för det stationära området.

Intresset för bränsleceller har på senare år ökat markant även i Sveriges närområde. Danmark, Finland och Norge har alla kraftigt ökande aktiviteter och inom området och har redan speciella forskningsprogram eller utbredda planer för sådana. Exempel på andra länder som nyligen har formaliserat sin forskningsverksamhet och även i många fall startat samarbetsorganisationer mellan näringslivet och finansärer är Storbritannien, Frankrike, Italien och Österrike.

EU har kraftigt ökat insatserna för forskning, utveckling och demonstrationer inom området vätgas och bränsleceller. European Commission har initierat en Hydrogen and Fuel Cells Technology Platform där EU tillsammans med industrin och forskarvärlden planerar den framtida verksamheten. Under 2008 lanseras ett stort demonstrations- och utvecklingsprogram av European Commission och en industrigrupp. Programmet är 940 M€ och skall pågå under 6 år. Det är ett så kallat public-private partnership, JTI Joint Technology Initiative. Det kommer att ersätta forskningsprogrammet inom det sjunde ramprogrammet.

Det offentliga stödet i olika länder för FoU och demonstration av bränsleceller och vätgas som energibärare uppskattas år 2008 till,

▪ USA	330 (400) MUSD
▪ Japan	310 MUSD
▪ Tyskland	170 MUSD (135 MEUR)
▪ EU	100 MUSD (67 MEUR)
▪ Danmark	11 MUSD (55 MDKK)
▪ Finland	12 MUSD (8,5 MEUR)

Det totala kapitalet som globalt används för utveckling av bränsleceller offentligt stöd och privat kapital kan uppskattas till i storleksordningen 2000 MUSD motsvarande 13 miljarder SEK

3.7 Möjligt utvecklingsscenario

Många tillverkare och politiker är mycket positiva till marknaden för bränsleceller. Det har dock varit ett bränslecellsindustrin stora problem att tekniken har marknadsförts kraftigt före det att den är kommersiellt konkurrenskraftig och tillgänglig. Det har lett till en del bakslag när överoptimistiska prognoser inte har uppfyllts.

Nedanstående tabell visar den bild som har publicerats av EUs Technology Platform, Implementation panel.

	Portable FCs for handheld electronic devices	Portable Generators & Early Markets	Stationary FCs Combined Heat and Power (CHP)	Road Transport
EU H ₂ / FC units sold per year projection 2020	~ 250 million	~ 100,000 per year (~ 1 GW _e)	100,000 to 200,000 per year (2-4 GW _e)	0.4 million to 1.8 million
EU cumulative sales projections until 2020	n.a.	~ 600,000 (~ 6 GW _e)	400,000 to 800,000 (8-16 GW _e)	1-5 million
EU Expected 2020 Market Status	Established	Established	Growth	Mass market roll-out
Average power FC system	15 W	10 kW	<100 kW (Micro HP) >100 kW (industrial CHP)	80 kW
FC system cost target	1-2 €/ W	500 €/kW	2.000 €/kW (Micro) 1.000-1.500 €/kW (industrial CHP)	< 100 €/kW (for 150.000 units per year)

Den bilden är mycket optimistisk för att detta skall vara möjligt så krävs enligt rapporten investeringar i storleksordningen 7,4 miljarder € under åren 2007 – 2015, motsvarande 70 miljarder SEK.

Det är ett tekniskt möjligt scenario men knappast realistiskt. Det är svårt att se att drivkrafterna skulle bli så starka inom en denna korta tidsrymd. Det gäller både de stationära bränslecellerna och transportsidan.

En mer realistisk bedömning skulle kunna vara att det år 2020 finns kommersiella bränsleceller på en något subventionerad marknad förmodligen i storleksordningen flera 100 MWe globalt. I Sverige finns då uppskattningsvis ett par MWe installerade som använder biobränslen från rötgasanläggningar för lokal el- och värmeproduktion.

År 2030 är betydligt längre fram och tills dess kan ett väsentligt större genombrott på marknaden ha skett. Bränsleceller är då förmodligen en ganska vanlig produkt med många konkurrerande tillverkare. För svenska förhållanden finns det förmodligen då även bränsleceller i många byggnader som back-up exempelvis sjukhus, kontor, stormarknader mm och även i flera olika typer av industrier. Ett större genombrott på småhusmarknaden i Sverige är dock svårt att se. I USA utvecklas i programmet SECA Coal Based Systems stora bränsleceller för användning som komponenter i fullskaliga kolkraftverk. Dessa bränsleceller kan komma att vara i storleksordningen flera 10-tals MW och om projekten lyckas vara i kommersiell drift kring år 2030.

4 ORC Organic Rankine Cycle

Detta avsnitt om ORC har författats av Barbara Goldschmidt, Grontmij AB

Från att tidigare huvudsakligen ha använts i geoterm tillämpningar, har ORC-tekniken under 2000-talet utvecklats till ett konkurrenskraftigt alternativ för elproduktion i mindre biobränsleeldade kraftvärmeverk. Idag finns ett sjuttiofem biobränslebaserade ORC-kraftvärmeverk i Europa. Anläggningarna är i storleksområdet 0,5-2 MW_e.

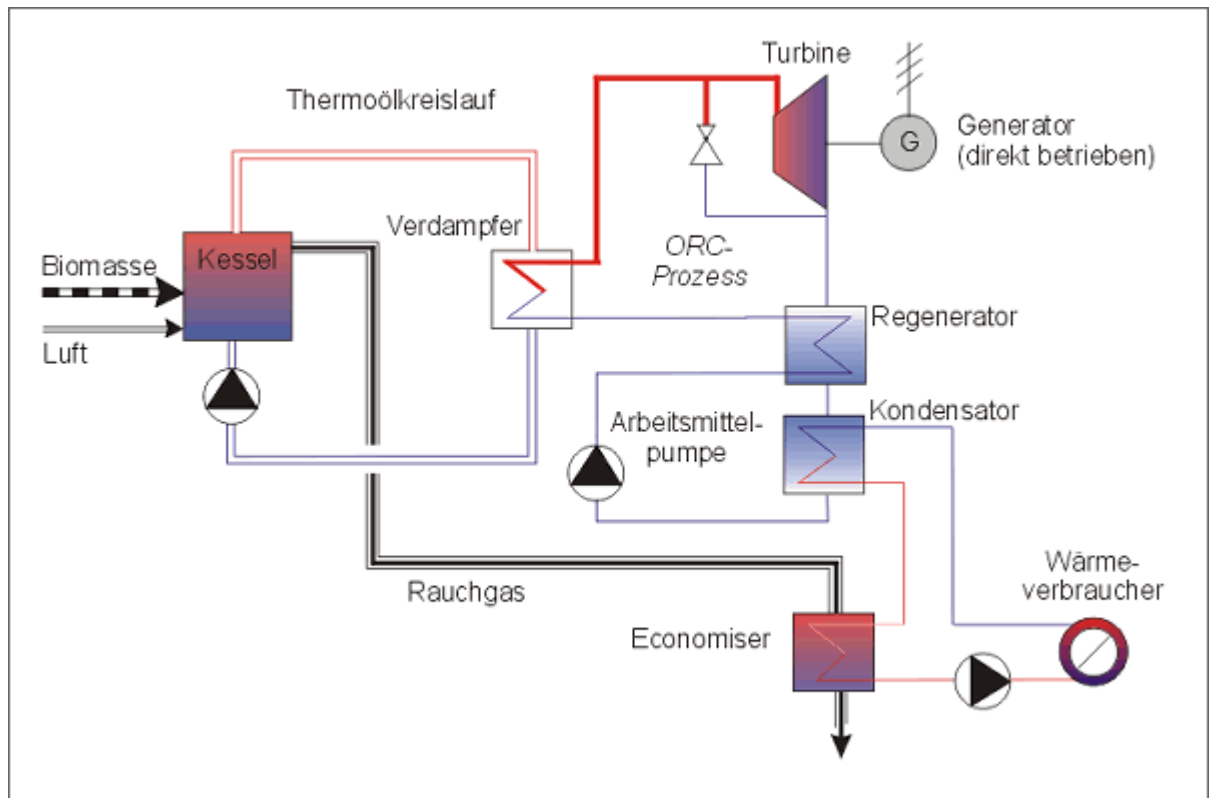
4.1 Teknikbeskrivning

I ORC-processen, där ORC står för organisk Rankine-cykel, har ångcykelns normala arbetsmedium, vatten, ersatts av ett organiskt arbetsmedium. Genom att man använder ett organiskt medium, med lägre förångningstemperatur än vatten, kan ångprocessen arbeta vid lägre temperatur utan att man riskerar att få fuktig ånga och risk för korrosion och erosion i turbin eller expander.

ORC-processen bygger på samma komponenter som en vanlig (vatten)ångprocess. Det organiska arbetsmediet förångas i en förångare, får expandera i en turbin eller skruvexpander, kondenseras i en kondensor och pumpas tillbaka till förångaren.

4.1.1 ORC i biobränsleeldade kraftvärmeverk

ORC-kretsen drivs av energin i rökgaserna från en biobränsleeldad ugn. Mellan rökgaserna och ORC-kretsens förångare finns en trycklös mellankrets i form av en hetoljepanna.



Figur: Biobränsleeldat ORC-kraftvärmeverk med hetoljepanna

4.1.2 Prestanda

Liksom för den vanliga ångprocessen, Rankine-cykeln, beror den teoretiskt maximala verkningsgraden för ORC-processen på temperaturen, enligt Carnot-verkningsgraden

$$\eta = 1 - T_2/T_1$$

Eftersom ORC-processen används i låga temperaturområden, från spillvärmtemperaturer kring 50-100°C och upp till maximalt 200-300°C, blir processens verkningsgrad inte lika hög som verkningsgraden för en konventionell ångprocess som arbetar vid högre temperatur. Verkningsgraden blir jämförbar med verkningsgraden i en konventionell ångprocess som arbetar vid samma låga temperaturnivå.

Elverkningsgraden i en ORC-process ligger normalt i området 5-20%, beroende på valt temperaturområde. I spillvärmekoppling, med spillvatten, ligger verkningsgraden kring 5-10%, beroende på spillvattentemperatur. I biobränsleeldade ORC-kraftvärmeverk, som har ett arbetstemperaturområde upp till 300-320°C, har ORC-kretsen en verkningsgrad på närmare 20% netto. Elverkningsgraden baserat på insatt biobränsle är ca 16%.

4.2 Miljöegenskaper

Traditionellt har vanliga köldmedier, dvs samma arbetsmedier som i värmepumpar, använts i ORC-sammanhang. Precis som för värmepumpar,

har man övergått från de först använda CFC-föreningarna, som hade en stark ozonpåverkan, till mindre ozonpåverkande HCFC-föreningar eller också till ickehalogenerade kolväten.

I ORC-tillämpningar, där fjärrvärme används som kylmedium, används ickehalogenerade kolväten, eftersom de halogenerade HCFC-föreningarna har för låga kokpunkter för att de skall kunna kondenseras.

I de nya biobränsleeldade ORC-anläggningarna, som har byggts i Europa under senare år, används silikonbaserade arbetsmedier med kokpunkter som ligger på en lagom nivå för ORC-processens arbetstemperaturområde i dessa tillämpningar. Silikonoljan har ingen ozonnerbrytande effekt (ODP-värde, Ozon Depleting Potential = 0). Oljan är inte heller giftig eller explosiv, men däremot brandfarlig.

ORC-anläggningar monteras normalt som kompletta tättslutande moduler, precis som värmepumpanläggningar. Liksom värmepumpanläggningarna, förses de med läckageövervakning.

4.2.1 Möjlighet till klimatneutral produktion

När ORC-tekniken utvecklades på 1960-talet, var det främst för elproduktion på otillgängliga platser. ORC-tekniken valdes här på grund av sin driftsäkerhet och robusthet. ORC-anläggningarna drevs med fossila bränslen, som t ex gasol.

Därefter började ORC-tekniken introduceras i lågtemperaturtillämpningar, såsom i geotermianläggningar eller i spillvärmekopplingar. Geotermi-tillämpningarna är i princip helt klimatneutrala. De använder geotermisk värme som värmekälla. El behövs bara som hjälpkraft för att driva pumpar och annan kringutrustning.

Spillvärmertilämpningarna har aldrig lyckats slå igenom riktigt, troligen beroende på att spillvärmen med högst temperaturnivå har utnyttjats på annat sätt medan den riktigt lågvärdiga spillvärmen har gett för låg elverkningsgrad för att investering i ORC-teknik skulle vara lönsam. Klimatneutraliteten hos ORC-tillämpningar i spillvärmekoppling är inte helt lätt att bedöma, eftersom värderingen av spillvärme i klimattermer inte är helt enkel. Utnyttjandet av spillvärme för elproduktion med ORC-teknik är snarare en fråga om resurshushållning än om klimatneutralitet. Frågan om den utnyttjade spillvärmen härstammar från fossila eller förnybara energikällor är kanske mindre relevant i sammanhanget. Det relevanta är att outnyttjad spillvärme tas tillvara, och därigenom bidrar till att minska behovet av andra energikällor, fossila eller förnybara.

4.3 Kostnader

Dagens ORC-moduler är ofta i storleksområdet från några 100 kW_e till 2 MW_e. Investeringen för en komplett ORC-modul på 2 MW_e är ca 20 Mkr, motsvarande en specifik investering på ca 10 000 kr/kW_e. För spillvärmekoppling används normalt mindre moduler. Den specifika investeringen för en modul på 0,5 MW_e är ca 15-25 000 kr/kW_e.

Investeringskostnaden för en hel anläggning, inklusive bränslehantering, biobränsleugn, ORC-modul, ställverk och byggnad, är för en 2 MWe anläggning i storleksordningen 40 000 SEK/kWe.

4.3.1 Spillvärmekoppling

Om ORC-modulen kopplas in på ett spillvärmenät, beror elproduktionskostnaden huvudsakligen på investeringen för ORC-modulen. Dessutom tillkommer kostnader för värmeväxlare mot spillvärmenätet samt mot kylvattennät. Ifall ingen frikyla finns tillgänglig, tillkommer kostnader för kyltorn. Elproduktionskostnaden blir mycket beroende av utnyttjandegraden under året. Om spillvärme finns tillgänglig hela året, hamnar elproduktionskostnaden i området 20-40 öre/kW_e¹. Om spillvärme bara finns tillgänglig under en del av året, ökar kostnaden.

I de fall där spillvärmen har ett värde, t ex motsvarande fjärrvärmepriset, kommer elproduktionskostnaden att öka i motsvarande grad, och hamna på närmare 35-55 öre/kWh_e².

4.3.2 Biobränslekoppling

Dagens biobränsleeldade anläggningar med ORC-koppling byggs oftast som kraftvärmeverk, där elproduktionen innebär en minskad fjärrvärme- och/eller processvärmeproduktion. I de fallen måste hänsyn tas till en förlorad intäkt för fjärrvärmeförsäljning.

I Österrike och Tyskland, där huvuddelen av de biobränsleeldade ORC-kraftvärmeverken finns idag, är det dock inte ovanligt att ORC-anläggningarna körs i kondensdrift, mot kyltorn, när inget fjärrvärmeunderlag finns tillgängligt. Systemen med inmatningspriser på biobränslebaserad elproduktion, som gäller i dessa länder, gör att detta betalar sig för befintliga anläggningar.

I de biobränsleeldade ORC-anläggningarna tas energin till elproduktion i ORC-kretsen ut från rökgasen, precis som i en vanlig (vatten)ångpanna. Hittills har ingen anläggning av denna typ byggts med direktvärmeväxling mellan rökgas och ORC-krets, utan alla anläggningarna har en trycklös mellankrets för värmeöverföring mellan rökgas och ORC-arbetsmedium. Vid beräkning av specifik elproduktionskostnad för denna typ av anläggning måste hänsyn också tas till investeringen för hetoljepannan som används som mellankrets. Den tillkommande kostnaden för hetoljepannan uppskattas till ca 60% av kostnaden för ORC-modulen. För en anläggning på 2 MW_e ger detta en specifik investering på 16 000 kr/kW_e.

Den specifika elproduktionskostnaden beror på den årliga drifttiden, precis som vid spillvärmekoppling. Eftersom biobränslebaserad kondensdrift inte är aktuell i Sverige, kommer ORC-anläggningen bara att vara i drift under fjärrvärmesäsongen (eller möjligen hela året om anläggningen är till för att producera processånga). Om anläggningen är i drift ungefär halva året blir

¹ Investering 15-25 000 kr/kW_e, annuitet 0,1, årsdrifttid 8 000 h

² Investering 15-25 000 kr/kW_e, annuitet 0,1, årsdrifttid 8 000 h, kostnad för minskad intäkt från fjärrvärmeförsäljning 15 öre/kWh_e (minskad intäkt under 5000 av 8000 h/år ger $25 \cdot (5000/8000) = 15$)

den specifika elproduktionskostnaden närmare 60 öre/kWh_e³ för den större ORC-modulen på 2 MW_e. Mindre ORC-moduler medför en högre kostnad.

4.3.3 Sammanfattning ekonomi

	Årlig drifttid	Specifik investering ORC-modulen	Specifik el-produktionskostnad	Inkl förlorad fjärrvärmeintäkt
Spillvärme 500 kW _e	8 000 h	15000 - 25000 kr/kW _e	20-40 öre/kWh _e	35-55 öre/kWh _e
Kraftvärme 2 MW _e	5 000 h	16 000 kr/kW _e	-	60 öre/kWh _e

4.4 Potential

För Sverige, som inte har stora geotermittillgångar, är ORC intressant främst i spillvärmekopplingar och biobränslekopplingar. I ORC-sammanhang diskuteras oftast spillvärme i form av vatten. Också spillvärme i varma avgaser, från t ex industriella processer eller motorer, kan dock utnyttjas för ORC-baserad elproduktion.

4.4.1 Spillvärme i vatten

Den outnyttjade spillvärmepotentialen i Sverige är fortfarande stor, även om den minskar i takt med att industrin sluter sina processer. Enligt rapporten "Industriell spillvärme"⁴ uppskattades den teoretiskt tillgängliga spillvärmepotentialen i Sverige 2002 till 9,5 TWh/år, vilket motsvarade drygt två gånger det faktiska spillvärmeutnyttjandet på knappt 4 TWh/år. Eftersom ofta inte mer än 40% av tillgänglig industriell spillvärme kan utnyttjas på årsbasis, beroende på begränsat fjärrvärmeunderlag under sommarhalvåret, och med tanke på att fjärrvärmeunderlaget sällan matchar spillvärmeunderlaget geografiskt, borde det finnas flera TWh tillgänglig spillvärme som skulle kunna utnyttjas för elproduktion.

Temperaturen på spillvärmen är avgörande för vilken elverkningsgrad som kan fås med ORC-teknik. Om man utgår ifrån att spillvärmemetemperaturerna ligger under eller i nivå med fjärrvärmens arbetstemperaturområde, kommer elverkningsgraden i ORC-koppling troligen inte att ligga över 5%. 5% av ca 5 TWh/år outnyttjad spillvärme motsvarar en elproduktionspotential på 250 GWh/år. Om mer spillvärme används för fjärrvärmeproduktion, kommer potentialen för ORC-el att minska, eftersom fjärrvärmen är en konkurrent om den varmaste spillvärmen, som är den spillvärme som ger högst elverkningsgrad.

Eftersom spillvärmen finns tillgänglig hela året, och eftersom den lämpligast används i ORC-kopplingar med frikyle- eller kyltornskylning, kommer utnyttjandetiden också att sträcka sig över hela året. Den producerade elen kan användas lokalt eller anslutas till elnätet.

³ Specifik investering 16 000 kr/kW_e, annuitet 0,1, årsdrifttid 5 000 h, kostnad för minskad intäkt från fjärrvärmeförsäljning 25 öre/kWh_e

⁴ Svensk Fjärrvärme, rapport FVF 02 11 49

4.4.2 Spillvärme i avgaser

Inga uppgifter har funnits tillgängliga på outnyttjad spillvärme i avgaser från industriella processer. Potentialen bör dock vara betydande. Vid en eventuell utbyggnad av lokal bibränslebaserad elproduktion med t ex biogas- eller biodieselmotorer, skulle också utnyttjande av restvärme i avgaserna med ORC-teknik kunna bli intressant.

Eftersom avgaserna oftast håller en mycket högre temperatur än industriellt spillvatten, kommer också ORC-elverkningsgraderna att bli högre. Elverkningsgrader i nivå med elverkningsgraden hos bibränslekopplade anläggningar, dvs 15-20%, verkar inte orimliga.

Utnyttjandetiden och möjligheten till anslutning till elnät kommer att vara minst lika bra som för ORC-anläggningar i spillvattenkoppling. Om motorerna går som baslast med jämn last, kommer också ORC-anläggningarna att ha en jämn elproduktion hela året.

4.4.3 Bibränslebaserade ORC-kraftvärmeverk

Dessa anläggningar är ett alternativ till mindre bibränsleeldade kraftvärmeverk med ångpanna och ångturbin. Elverkningsgraden hos ORC-kraftvärmeverken är jämförbar med elverkningsgraden hos enkla små ångturbiner som används i mindre bibränsleeldade kraftvärmeverk på 5-10 MW_{termiskt}. Potentialen för bibränslebaserad ORC är därför jämförbar med potentialen för mindre bibränsleeldade kraftvärmeverk totalt.

4.5 Utvecklingsläge

Utvecklingen på ORC-området har pågått i perioder. Under oljekrisen på 1970-talet blev ORC-tekniken intressant som ett alternativ för elproduktion ur jordvärme eller spillvärme, och ett antal anläggningar byggdes. Under 1980-talet avtog intresset för tekniken och tidigare verksamma leverantörer slutade satsa vara aktiva på området. En bidragande orsak var att CFC-köldmedierna, som användes som arbetsmedier i första ORC-anläggningarna, började fasas ut på grund av sin ozonpåverkan.⁵

Under 2000-talet har förnyat intresse uppstått för ORC-tekniken i Europa. Intresset är idag dock främst riktat mot ORC-teknik kopplad till bibränsleeldade anläggningar. Efter att den första anläggningen, som byggdes med EU-stöd, togs i drift i Österrike 1999, har ett sjuttital bibränslebaserade ORC-kraftvärmeverk tagits i drift i Europa och ytterligare ett trettiotal håller på att levereras. Anläggningarna är i storleksområdet 0,5-2 MW_e. De flesta anläggningarna finns i Österrike och Tyskland, där det finns system med inmatningspriser på förnybar elproduktion.

4.6 FoU-behov fram till implementering

ORC-tekniken är idag beprövad både i geotermi-tillämpningar och i tillämpningar med bibränsleeldade kraftvärmeverk. ORC i spillvattenkoppling har inte slagit igenom ännu, trots att just denna tillämpning har diskuterats

⁵ "Studie av ORC-tekniken för konvertering av bibränsleeldade hetvattencentraler till kraftproduktion", Värmeforskrapport 507 (1994)

under ett antal år. Skälet är dock inte bristande teknikutveckling, utan dålig lönsamhet. Vid ändrade ekonomiska förutsättningar, skulle dagens geotermiska ORC-anläggningar kunna användas i spillvärmekoppling utan vidare.

4.7 Pågående FoU-verksamhet

På grund av den starka utvecklingen på området biobränsleeldade kraftvärmeverk i Europa under senare år, finns det idag ett antal europeiska leverantörer som har referenser på området⁶.

På ORC-marknaden, som länge dominerades av Ormat som är den ledande tillverkaren av ORC-anläggningar för geotermistillämpningar och som fortfarande levererar anläggningar både för geotermi och spillvärme, finns numera god konkurrens och ett antal alternativa leverantörer. Flera av dessa åtar sig att leverera rök-gaskopplade ORC-anläggningar som totalentreprenad. Andra fungerar huvudsakligen som underleverantörer av biobränsle-anläggningar eller hetoljepannor till ORC-anläggningar.

Leverantörer med referenser på biobränsleeldade ORC-anläggningar

Tillverkare av biobränsleugnar	Kohlbach Gruppe Mawera Holzfeuerungsanlagen GmbH Polytechnik Luft- und Feuerungstechnik GmbH
Tillverkare av hetoljepannor	Maxxtec AG Kohlbach Gruppe Mawera Holzfeuerungsanlagen GmbH HTT Energy Systems GmbH
Tillverkare av turbiner och ORC-enheter	Turboden S. r. l. Adoratec GmbH Dresser-Rand Nadrowski Turbinen GmbH GMK Gesellschaft für Motoren und Kraftanlagen AG Kühnle, Kopp & Kausch (Siemens)
Entreprenörer och ingenjörsföretag	Bios Bioenergiesysteme Adoratec GmbH Aldavia BioEnergy GmbH

GMK ovan har också referenser på ORC-teknik för geotermi och spillvärme.

4.7.1 Sverige

I Sverige finns två aktörer på ORC-området idag.

Opcon satsar på ORC för spillvärmestillämpningar. ORC-anläggningarna baseras på skruvexpandrar från dotterbolaget SRM (Svenska Rotor Maskiner). Man har driftsatt en första ORC-modul, kopplad till spillvärme från kraftvärmeverket i Eskilstuna, under hösten 2007. Dessutom har det nyligen tecknats ett avtal om att installera en ORC-anläggning på Stora Ensos massabruk i Skutskär.⁷

⁶ "ORC för elproduktion i värmeverk", Värmeforskrapport 1021 (2007)

⁷ www.opcon.se



Figur: Opcons ORC-modul

Entrans har patent på ett system för ORC-baserad elproduktion i värmepumpar med fjärrkylaproduktion. Genom att sätta in en skruvexpander i värmepump/kylmaskinskretsens expansionssteg kan man öka värmeunderlaget när detta inte räcker till för maximal kylproduktion. När inget värme- eller kylbehov finns körs värmepumpkretsen baklänges, via en extrainsatt pump, för att producera el i ORC-expandern.

Också Entrans håller för närvarande på att leverera sitt första ORC-aggregat.⁸



Figur: Entrans ORC-aggregat

⁸ www.entrans.se

4.8 Möjligt utvecklingsscenario (ORC)

I takt med att elpriserna stiger, och om styrmedel införs för att främja el från förnybara energikällor och spillvärme, kommer ORC-tekniken att bli mer konkurrenskraftig än den är idag. Tekniken är färdigutvecklad för installation i spillvattentillämpningar, och skulle kunna bidra med flera hundra GWh spillvattenbaserad el bara i Sverige.

Tekniken med en ORC-anläggning kopplad till rökgas via en hetoljemellankrets har hittills huvudsakligen tillämpats på biobränsleeldade kraftvärmeverk i Europa. I storlekssegmentet upp till 2 MW_e är tekniken ekonomiskt konkurrenskraftig jämfört med dagens konventionella biobränsleeldade kraftvärmeverk. Vid ett eventuellt framtida främjande av småskalig biobränslebaserad elproduktion är ORC-tekniken ett klart alternativ.

Dessutom finns en okänd potential med spillvärme i avgaser från industriella processer som, tillsammans med avgaser från framtida lokal biobränslebaserad elproduktion med t ex biogas- eller biodieselmotorer, skulle kunna utnyttjas för elproduktion med ORC-teknik.

4.8.1 Direktvärmeväxling mot rökgas

I dagens biobränsleeldade ORC-kraftvärmeverk har man använt beprövad teknik, med värmeöverföring via hetolja från rökgasen till ORC-kretsen. ORC-cykeln arbetsområde begränsas därför av hetoljans stabilitet. Utvecklingen hittills har begränsat sig till att man har övergått från att använda traditionella mineraloljor till syntetiska oljor i hetoljepannorna. Därigenom har hetoljans högsta temperatur kunnat ökas från 300°C till 320°C, och elverkningsgraden i anläggningen har kunnat ökas med någon %-enhet. Ytterligare någon %-enhets ökning skulle vara möjlig vid direktvärmeväxling mot rökgasen, genom att verkningsgradsförlusten förbigås vid värmeöverföringen via hetoljepannan.

4.8.2 ORC-teknik i fjärrkylakopplingar

I Sverige, som har en tradition med central produktion av fjärrvärme, och numera också fjärrkyla, skulle alternativet med ORC-baserad elproduktion i värmepumpar med fjärrkylaproduktion, enligt Entrans koncept, eventuellt kunna bli intressant, förutsatt att utbyggnaden av fjärrkylanät fortsätter.

5 Solceller

5.1 Inledning

Att utnyttja solenergi för uppvärmning har varit självklart långt före industrialismen men att utnyttja solenergi direkt för att producera el är en mer avancerad teknik.

Att använda solceller för att använda solinstrålningen för elproduktion är ett av flera olika sätt att producera elenergi med hjälp av solen. Andra sätt kan vara termisk sol-el att genom att koncentrera solinstrålningen för att kunna uppnå så höga temperaturer att värmen kan användas i en ångturbin, stirlingmotor, en ORC-cykel eller som förvärmning i Rankine-cykler.

I Sverige är tyvärr situationen sådan att när solinstrålningen är som störst så är elbehovet litet och på vintern när elbehovet är som störst så är solinstrålningen liten. För att solenergin skall kunna användas i ett storskaligt sammanhang så krävs därför någon form av långtidslagring av från solen producerade el. Det kan göras på flera sätt genom ett samspel med till exempel snabbreglerad vattenkraft eller export till dem som behöver el för tillfället. För mindre lokala elbehov kan däremot solenergin med fördel utnyttjas direkt. Att lagra solenergi från dagen till användning under dygnets mörka timmar kan göras enkelt med vanliga ackumulatorer.

5.2 Teknikbeskrivning

Solceller benämns ofta PV vilket betyder Photovoltaics. Det finns två huvudtyper av solceller kiselceller och tunnfilmsolceller.

En solcell eller en fotovoltaisk cell är en anordning bestående av halvledare (ofta kisel) som fungerar som dioder. När solljuset träffar solcellen frigörs elektroner i halvledarmaterialet. En spänning mellan cellens fram- och baksida driver elektronerna genom en elektrisk krets

Tabell 10: Verkningsgradsrekord (verifierade vid certifierad mätplats) för olika solcells-typer. Forskargrupp/företag anges inom parentes. Källa: Ångström Solar Center.

	Mono-kristallint kisel	Fler-kristallint kisel	Amorft kisel	Tunn-films-kisel	GaAs	CIGS	CdTe	DSC
Cell	24,7 % (UNSW)	20,3 % (FhG-ISE)	10,1 % (Kaneka)		25,1 % (Kopin)	19,5 % (NREL)	16,5 % (NREL)	11,0 % (EPFL)
Modul liten	22,7 % (UNSW)	15,3 % (Sandia)	11,7 % (Kaneka)	8,2 % (Pacific Solar)		16,6 (ÅSC)		4,7 % (INAP)
Modul stor							10,7 % (BP Solar)	

Tabellen visar uppnådda verkningsgrader för olika typer av solceller.

Den **kristallina kiselcellen** är idag den vanligaste och mest utvecklade typen för stationär elproduktion. Tillförlitligheten är hög och den har en lång livslängd, mer än 25 år. Kostnaderna är dock för höga för att kiselceller skall kunna vara konkurrenskraftiga för produktion till elnätet gentemot konkurrerande energiomvandlingstekniker.

Tillverkningsprocessen är högt utvecklad men med de idag kraftigt ökande volymerna så beräknas produktionskostnaden fortsatt minska. Kiselcellerna tillverkas idag i stor utsträckning med avfall från elektronikindustrin, eftersom solceller tillåter högre föroreningsgrad än halvledarelektronik. Efterfrågan på elektronikavfall är idag större än tillgången. Därför byggs idag anläggningar som direkt skall producera kisel avsett för tillverkning av solceller. Industrin har varit tveksam till detta beroende på marknadens osäkerhet men nu förefaller det som om att det inte längre skall vara ett problem. Den minskade tillgången på rent kisel från elektronikindustrin på grund av den kraftigt ökade efterfrågan från solcellsindustrin har bidragit till att hålla priserna på solcellsmoduler uppe.

Kiseltekniken har en del viktiga fördelar, råvaran finns tillgänglig i stora mängder och är relativt ofarlig och kopplingen till mikroelektronikindustrin gör att utveckling av tillverkningsprocessen kommer fortsatt att vara stark.

Verkningsgraden för kommersiella kiselceller är upp till 14%. Cell-temperaturen vid extremt höga temperaturer försämrar verkningsgraden.

Kiselceller tillverkas både som multi- och monokristallina solceller. Den främsta skillnaden är utseendet. Monokristallina har något högre verkningsgrad.

Tunnsfilmssolceller kan delas in i tre huvudgrupper,

- Vanliga tunnsfilmssolceller exempelvis a-Si (amorft-kisel), CIGS, CdTE, CIGS

- Tandem solceller som täcker breda spektra
- Dye/Organic solar cells

De har olika principiell uppbyggnad och funktion.

Den låga materialåtgången tillsammans med tillverkningsmetoderna gör att tunnfilmssolceller har stor potential att i framtiden kunna tillverkas i stor skala till ett lågt pris.

a-Si, Amorft kisel

Dessa tunnfilmssolceller är mycket tunna, mindre än 1 mm i tjocklek. Materialåtgången är därför relativt liten. Tunnfilmssolcellerna kan göras i denna tjocklek eftersom materialen i cellerna har egenskapen att kunna absorbera ljuset på en mycket kort sträcka, materialet har en hög absorptionskoefficient. De kan tillverkas i böjliga material och formas efter underlaget.

Tunnfilmssolceller av amorft kisel är billiga att tillverka och inga sällsynta ämnen är nödvändiga för att tillverka dem. Verkningsgraden är relativt låg 5-7% främst beroende på att endast det blåa ljuset kan omvandlas till elektricitet. Idag består en väsentlig del av världsproduktionen av solceller av typen amorft kisel. De används främst för konsumentprodukter typ klockor, miniräknare, kameror etc.

CIS, CIGS, CdTe

Dessa tunnfilmssolceller innehåller flera tunna skikt som appliceras på en glasskiva med hjälp av t.ex. vakuumförångning, sputtring (katodförstoftning) eller våtkemiska processer. Tillverkning kan ske snabbt. En hög renhet är mycket viktig, även små föroreningar påverkar cellens prestanda.

I laboratorieskala har CIGS-celler med verkningsgrader kring 17% uppmätts. För större moduler är verkningsgraden fortfarande väsentligt lägre, under 10%.

CIS och CIGS celler är uppbyggda av skikt av koppar, indium och för CIGS även Gallium. Ett tunt skikt av kadmiumsulfid höjer verkningsgraden märkbart. Indium och selen är relativt sällsynta ämnen i klass med silver. De mängder som kan komma att krävas för en storskalig solcellsproduktion torde dock inte vara något problem att producera. Det största problemet är kadmiumskiktet eftersom kadmium räknas som ett starkt toxiskt material. Utveckling pågår för att minimera och eventuellt ersätta skiktet av kadmiumsulfid.

Den sammanlagda tjockleken av de aktiva skikten är i storleksordning 5µm. Tillsammans med glasskivorna, som skyddar cellen, är solcellen ca 4 mm tjock.

CdTe, solcellen är uppbyggd av Kadmiumtelleruid som är ett polykristallint material. Den har idag en verkningsgrad kring 10%, för större moduler ca.7%, fördelarna med CdTe solcellen är att den är relativt billig att tillverka. Den stora nackdelen är det inte går att undvika kadmium som en huvudbeståndsdel.

Användning av kadmium i solceller är en ständig diskussion. Många tycker att kadmium skall undvikas eftersom det finns andra alternativ och kadmium är ett högttoxiskt ämne. Andra säger att solceller är ett utmärkt säkert förvar av kadmium. För att kadmium skall accepteras som material vid storskalig tillverkning av solceller kommer det förmodligen att krävas välutvecklade system för återvinning och säker hantering vid tillverkning. Men det är förmodligen bäst att undvika kadmium så mycket som möjligt eftersom det finns alternativa tekniker.

Det finns flera andra typer av tunnfilmsolceller utvecklade i laboratoriemiljö. Ett exempel är Gallium-arsenid solcellen som har ett mycket stort ljusupptagningsområde. Verkningsgrader på 22% har uppmätts. Både Gallium och Arsenik är dock mycket giftiga vilket väsentligt försvårar en introduktion av denna typ av solceller i stor skala.

Dye/Organic Solar cells

Graetzelcellen kallas även våt solcell eftersom den innehåller en elektrolyt. Arbetsprincipen bygger på fotokemiska processer, ljusabsorption och elektron-excitation i ett färgämne och laddningsseparation i en halvledare på vilken färgämnet är adsorberat. Denna typ av solcell kallas därför färgämnessensiterade solceller, på engelska dye sensitised solarcells, och förkortas DSC. Graetzelcellen omvandlar mer än 90% av det gröna ljuset till elektricitet. Verkningsgraden är ca.11% i laboratoriemiljö och väsentligt lägre i större enheter på fältet. Graetzel har väsentligt högre verkningsgrad i molnigt väder och under vintern jämfört med andra typer av solceller.

Utvecklingen av Graetzelcellen är koncentrerad på tillverkningsmetoder för att få ner kostnaderna vid storskalig tillverkning samt utveckling av elektrolyt-material och färgämnen för att på så sätt höja verkningsgraden och samtidigt undvika stabilitetsproblem.

Ett annat utvecklingsspår är så kallade multi-junction solceller, tunnfilms-solceller som består av många skikt som tillsammans täcker stora delar av solspektrat. Dessa solceller kan uppnå extremt höga verkningsgrader, ca 45 % har uppmätts i labbskala. Kostnaderna är mycket höga och idag är rymdindustrin en viktig målgrupp. Multi-Junction solceller används också i högkoncentrerande system då solinstrålningen koncentreras till en liten yta med hjälp av optiska linser.

5.3 Nuvarande status och utvecklingsläge

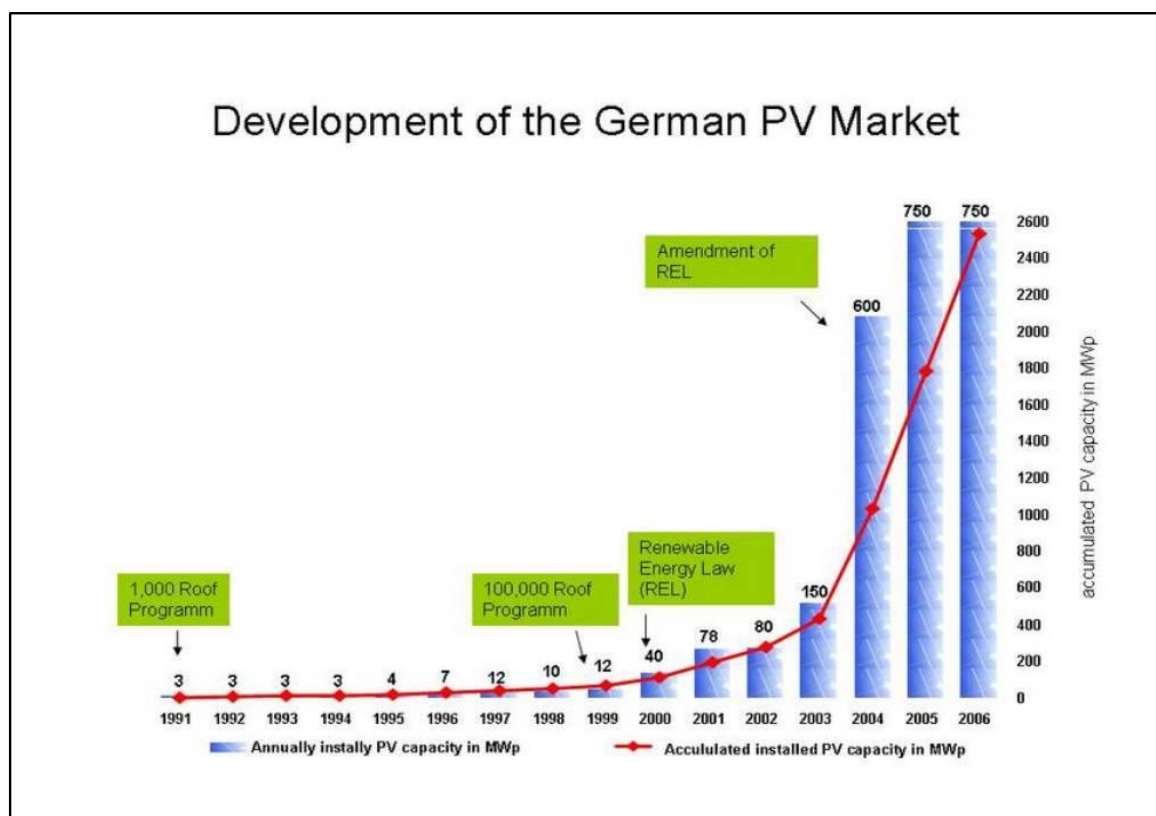
Solcellsmarknaden idag kan beskrivas som väldigt dynamisk, optimistisk och subventionerad.

- Den globala marknaden är mycket snabbt växande,
- Den totala marknaden är mer 100 miljarder SEK per år
- Subventionerad marknad i många länder, feed-in tariffer i storleksordningen 4 SEK/kWh är vanliga
- De kraftiga subventioneringarna i Tyskland med feed-in tariffer utan tak har haft ett enormt genomslag
- Bristen på renad kisel lämplig för solcellstillverkning har tillfälligt dämpat marknaden och försvårat kostnadssänkningar
- Nya effektiva billiga tekniker är under utveckling, stora investeringar görs för att utveckla olika typer av tunnfilmsolceller

- Sverige har fortfarande få installationer, bidrag för offentliga byggnader har ökat antalet installationer markant
- Kostnaderna kommer att minska kraftigt på lång sikt, idag hålls priserna uppe av subventionssystemen och stor efterfrågan vilket minskar incitamenten för att reducera kostnaderna

Idag domineras marknaden fortfarande av kristallina kiselceller. Under 2005 märktes för första gången en negativ påverkan på priset på grund av vikande tillgång på rent kisel som utgångsmaterial till kristalltillverkningen. Flaskhalsen bedöms vara bortbyggd inom 3-4 år efter det att investeringar i produktion av solar-grade kisel har startats.

I världen är det framförallt fyra länder som utmärker sig när det gäller installerad effekt; Tyskland, Japan, USA och Spanien. Japan hade länge den största solcellsmarknad tack vare det omfattande stödsystemet för solcellsinstallationer i privata hem. Detta stöd har avvecklats successivt för och togs bort helt under 2005, vilket har lett till att marknadens tillväxt har avstannat.



Diagrammet ovan visar den starka ökningen av antalet installerade solceller i Tyskland de senaste åren. Större delen av ökningen är beroende på subventioner genom så kallade feed-in tariffer. Taket för dessa subventioner togs bort år 2004. Det är främst i Tyskland som den kraftiga globala expansionen har skett.

Den snabba utvecklingen av marknaden har fört med sig en lika snabb ut-

veckling av industrin som idag har över 100 000 anställda. De största solcellstillverkarna är Sharp i Japan och Q-Cells i Tyskland, följt av japanska Kyocera, Sanyo och Mitsubishi. Trots att Q-Cells har växt mycket kraftig och därmed brutit den japanska dominansen i toppen produceras runt 36% av alla solceller i Japan (920MW av totalt ca 2 500MW under 2006). I Kina finns också en kraftigt expanderande solcellsindustri.

På systemsidan är en stark trend att använda så kallade byggnadsintegrerade solceller. Dessa solceller har fler funktioner än elproduktion, t.ex. solskydd eller en del av takets klimatskal. På så sätt kan kostnaderna fördelas på flera nyttigheter samtidigt som arkitekturen kan vara tilltalade.

En annan trend är att utveckla lämplig teknik för gigantiska anläggningar som skall placeras i öknar. Det sker idag i USA, Kina, Mellan Östern och Australien. Det finns även planer på att uppföra mycket stora anläggningar i Algeriet.

Ett område som tidigare var högprioriterat var att elektrifiera landsbygden i U-länder. Enstaka lampor kan betyda mycket för utvecklingen i en by. Denna verksamhet expanderar inte lika starkt längre, främst beroende på de höga subventionerna för sol-el i vissa industriländer som gör ulandsinvesteringarna mindre lönsamma.

5.3.1 Kritiska komponenter

Den mest kritiska komponenten är kisel av en kvalité lämplig för solcellstillverkning, solar grade. Tidigare har denna kisel tagits från kisel som inte uppnått kvalitén för halvledartillverkning. Nu har solcellsmarkanden växt så kraftigt att det inte finns tillräckligt mycket att tillgå från halvledartillverkningen. Det gör att priserna för solceller stigit och utbyggnaden av tillverkningskapacitet har inte hängtt med så leveranstider har försämrats.

Kisel i sig är ingen bristvara, utan det är tillverkningskapaciteten för kiselkvaliteter lämpliga för solcellstillverkning som idag är för låg för att försörja världsmarknaden. Det finns nu flera större kemiföretag som har planer på att öppna nya tillverkningsanläggningar avsedda främst för solcellstillverkning. Det finns dock en viss tvekan eftersom hela marknaden är kraftigt subventionerad och andra icke-kislbaserade tekniker förmodligen kommer att expandera kraftigt.

Det kan nämnas att livslängden för solcellsmodulerna är mycket lång, moduler som är 30 år gamla fungerar i många fall problemfritt. Det är oftast kringutrustningen som utgör felkällor.

I vissa typer av tunnfilmssolceller används små mängder kadmium. Det är i jämförelse med andra kadmiumanvändare en mycket liten kvantitet som behövs, men det stör trots allt solcellernas miljöprofil. Problemet uppmärksammas allt mer i forskarvärlden och det finns alternativa tekniker att tillgå.

5.4 Solceller i Sverige

Den sammanlagda mängden solceller som installerats i Sverige uppgick vid

slutet av 2007 till ca 7 MWp, vilket är lågt i jämförelse med de länder som leder utvecklingen. Mängden nätanslutna anläggningar har dock ökat kraftigt tack vare stödet till anläggningar på offentliga byggnader.

Forskning och utveckling

Solcellsforskningen i Sverige har främst inriktats på cellteknik, med en större satsning genom Ångström Solar Center under åren 1996 – 2004 vid Uppsala universitet. Idag finns det en grupp vid Uppsala universitet som arbetar med tunnfilmsteknik, och forskningen kring Grätzelsolceller i Sverige bedrivs vid Uppsala universitet, KTH och Swerea IVF. Dessutom finns det ett antal grupper som delvis arbetar med solceller, t.ex. i Linköping, Lund och vid Chalmers. Även om Solibro AB är sålt till Q-Cells i Tyskland så finns fortfarande Solibro Research AB kvar i Sverige för utveckling av tunnfilmssolceller.

Svensk solcellsforskning finansieras främst genom Energimyndigheten. Mer användarnära utvecklingsarbete utförs i Elforsks SolEI program som samfinansieras av Energimyndigheten och ett antal andra aktörer.

Svensk solcellsindustri

Den tillverkande solcellsindustrin i Sverige har växt mycket kraftigt de senaste åren, parallellt med den starka utvecklingen på världsmarknaden. Främst gäller det tillverkning av moduler, d.v.s. montering av importerade solceller till moduler färdiga för användning. Här återfinns även majoriteten av de anställda inom solcellsnäringen, 350 av ca 400 stycken. Den stora merparten av produktionen exporteras, främst till Tyskland och Sydeuropa. Det finns fem företag som tillverkar moduler i Sverige: GPV, ArcticSolar, REC ScanModule, PV Enterprise samt n67 Solar. Totalt producerades 55 MWp i Sverige under 2006, ca 2% av världsproduktionen.

Det finns även två företag i Sverige som arbetar med att kommersialisera tunnfilmsteknik som baseras på Cu(In,Ga)Se_2 . Det ena, som tidigare hette Solibro, är ett spinn-off företag från Uppsala universitet som under 2006 köptes upp av tyska Q-cells. Q-Cells är ett av de ledande företagen i solcellsområdet i världen. Företaget siktar på produktionsstart i Tyskland under 2008. Det andra företaget, Midsummer, använder en något annorlunda teknik och siktar på att starta tillverkning under 2008.

Exempel på solceller i Sverige.



Tunnfilmsolceller på taket till Johanneshovs isstadion, tunnfilmssolceller valdes främst på grund av de hade väsentligt lägre vikt än kristallina kisel-solcellsmoduler. Tunnfilmssolcellerna är integrerade i gummimattor som enkelt rullas ut på taket.



Den vänstra bilden visar semitransparenta solceller som är monterade solskydd i en korridor på KTH. De solcellerna har då en dubbel funktion de producerar el och är samtidigt ett solskydd. Den högra bilden är från en skola i Älvsjö. Den installationen ingår i ett större program med solceller på skolorna i Älvsjö. Att ha solceller på skolor har flera syften det är både elever, föräldrar och personal som kommer i kontakt med solcellerna och kan då öka intresset för solenergi.

5.5 Bedömt FoU behov fram till kommersialisering

Eftersom marknaden redan är mycket stor men kraftigt subventionerad så är det i vissa fall svårt för tillverkarna att prioritera FoU eftersom marknaden köper allt de kan tillverka till ett bra pris. Detta är dock förmodligen ett tillfälligt förhållande och verkningsgraderna måste öka och kostnaderna minskas om marknaden skall kunna överleva på dagens och högre nivåer i en mer konkurrensutsatt marknad.

En del av utvecklingsbehovet fram till en kommersialisering är,

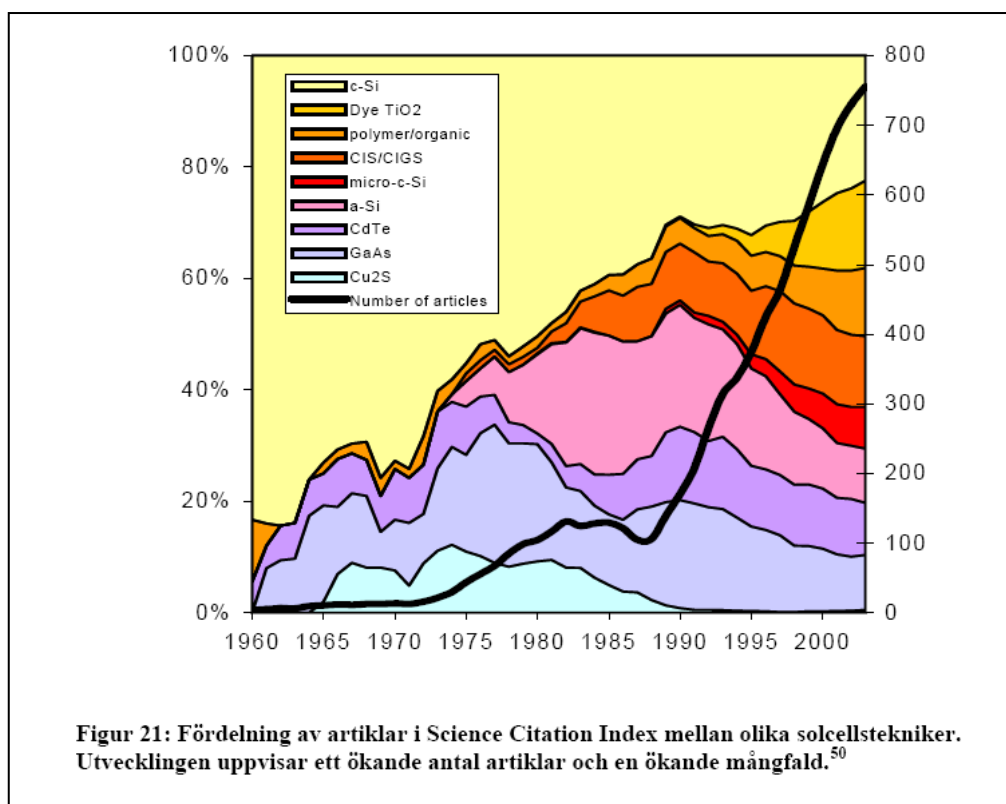
- Utveckling av system för billiga och enkla montage
- Byggnadsintegrering av solceller måste utvecklas till att bli mer kostnadseffektivt.
- Verkningsgraderna för olika typer av solceller behöver och kommer att ökas
- Materialbehovet för kristallina solceller måste sänkas eftersom tillgången på kristallint kisel för solcellstillverkning är en flaskhals

- Kostnader för tunnfilmssolceller måste sänkas kraftigt samtidigt som verkningsgraden bör öka. Det är kanske den allra viktigaste punkten för det längre perspektivet.
- Metoder och design för Industriell masstillverkning
- Lagringsmetoder för sol-el

En stor del av forskningen kring solceller idag är att utveckla tekniken för att öka verkningsgraden och sänka kostnaderna. Det är viktigt att industriella tillverkningsmetoder utvecklas så att tillverkningskostnaderna kan minskas. Detta görs idag för speciellt kristallina solceller.

För tunnfilmstekniken är det viktigt att höja verkningsgraderna samt att utveckla metoder för masstillverkning. Det finns en potential för tunnfilmssolceller som tillverkas på tunna substrat typ folier som gör att de kan komma att masstillverkas till en väsentligt lägre kostnad än dagens. Tunnfilmssolceller tillverkas redan idag på gummimattor som enkelt kan rullas ut på till exempel plana tak.

Ett område som studeras speciellt i Sverige är att samtidigt producera el och värme från solcellsanläggningar. Sverige ligger relativt långt framme inom detta område med ett företag som har börjat marknadsföra en produkt avsedd för denna applikation, se www.pvtnytt.se.



Bilden ovan visar att FoU kring olika typer av solceller ökar kraftigt och att vid forskningsfronten dominerar tunnfilmssolceller. Antalet publicerade artiklar har mångdubblats de senaste 15 åren samtidigt som antalet olika tekniker har

ökat. Det visar bland annat att teknikvalet för de kommersiella solcellerna ännu inte är utkristalliserat.

5.6 Möjligt utvecklingsscenario

- Nätanslutna solceller i Europa kommer att vara kraftigt subventionerade under lång tid framöver
- Billiga tunnfilmssolceller kan komma att ta en betydande marknadsandel
- Marknaden för småhus och avlägsna områden kan bli stor
- Kristallina solceller är mycket robusta och kommer att ha säkra nischmarknader under lång tid framöver.
- Användning av solceller utanför elnätet kommer att öka kraftigt
- Solcellsfall tveksamt i Sverige, kanske i en längre tidsperiod

I det närmaste skedet kommer verkningsgraderna för de kristallina solcellerna att ökas, bättre moduler kommer att utvecklas. De blir enklare att montera och får högre verkningsgrad på grund av mindre randförluster mm.

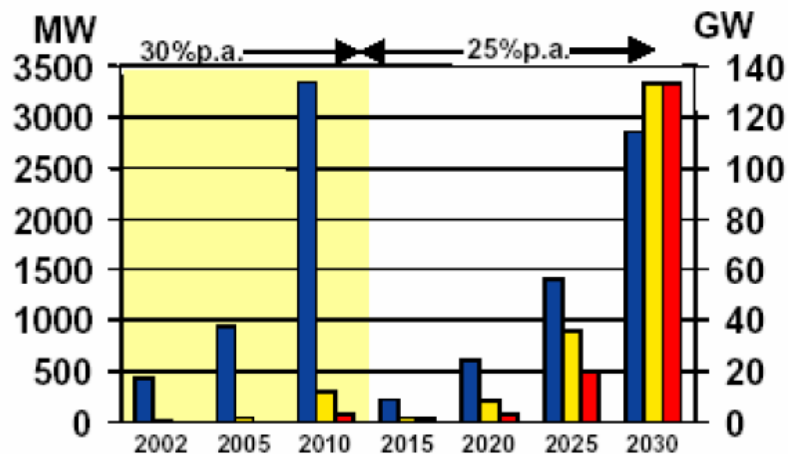
Det som gör att utvecklingen är svårbedömd är att marknaden har växt kraftigt och fort. Den globala marknaden är nu i storleksordningen 100 miljarder SEK. Detta har skett till stor del på grund av mycket stora subventioner för nätanslutna sol-el. Den icke nätanslutna marknaden stand-alone system, små system i avlägsna områden, u-landsmarknaden, fritidshus mm har växt men i betydligt lugnare takt. Marknaden för icke-nätanslutna system är idag i princip helt kommersiell och konkurrenskraftig.

Det utvecklingsscenario som kan tänkas komma i det kortare perspektivet fram till år **2020** är att de kristallina solcellerna fortfarande dominerar och att många länder fortfarande har kraftiga subventioner för solcellsinstallationer. Solceller är en förnybar och klimatneutral teknik och kommer därför att utvecklas. Med minskade kostnader och högre elpriser så kommer denna typ av tekniker att gynnas. Internationellt så kommer installationerna att öka i USA och Japan. I Europa med EUs nya teknikplattform för solceller och att liknande subventioner som i Tyskland kommer att införas mer och mer i flera länder gör att expansionen kommer att fortsätta.

Solcellerna är dock små och dyra vilket gör det svårt att för tekniken att bli en baslastproduktion av el speciellt i Sverige. Trenden blir förmodligen att solceller kommer att användas i allt större utsträckningen för dem som har relativt höga nätkostnader exempelvis fritidshus tillfälliga arbetsplatser där det är svårt att dra ut kablar etc. Marknaden för nätanslutna solceller kommer under den närmaste tiden till stor del att styras av olika subventionsformer.

I det något längre perspektivet fram till år 2030 är bilden ganska osäker. En möjlighet är att investeringskostnaderna har minskat så kraftigt att solcellerna kommer att vara i det närmaste konkurrenskraftiga i länder med höga elpriser. Tunnfilmsteknikerna bör vara ganska långt utvecklade och har väsentligt bidragit till att sänka kostnaderna för solcellsgenererad el. Statusen för solceller år 2030 beror även till stor del på hur elnäten har utvecklats

transmissionskostnader mm. Det finnas pessimistiska scenarier i Europa för hur elnäten kan komma att få stora problem med flaskhalsar investeringsovilja mm. Politikernas vilja och handlingskraft kommer att avgöra. Att tekniken har möjlighet att utvecklas med låga kostnader och industriell masstillverkning är nog ganska säkert det gäller bara att marknadens drivkrafter är tillräckligt stora.



Figur 25: Modulproduktion fördelad per solcellstyp och år enligt European PV Industry Association (EPIA)⁵⁶. Blått representerar kristallint kisel, gult tunnfilmsteknik och rött nya koncept. Observera att det gulmarkerade fältet har sin skala till vänster, övriga till höger. Tillväxttakten är markerad överst i figuren (inledningsvis 30 %, därefter 25 %).

I denna figur visar branschen en prognos med en möjlig utveckling. Enligt det scenariot så skulle tunnfilmstekniken vara en dominerande år 2030 men de kristallina solcellerna är fortfarande stora. Diagrammet förutspår väldigt stora volymer kring år 2030 i storleksordningen 130 GWp per år.

5.7 Prisbild och kostnadsutveckling för solceller

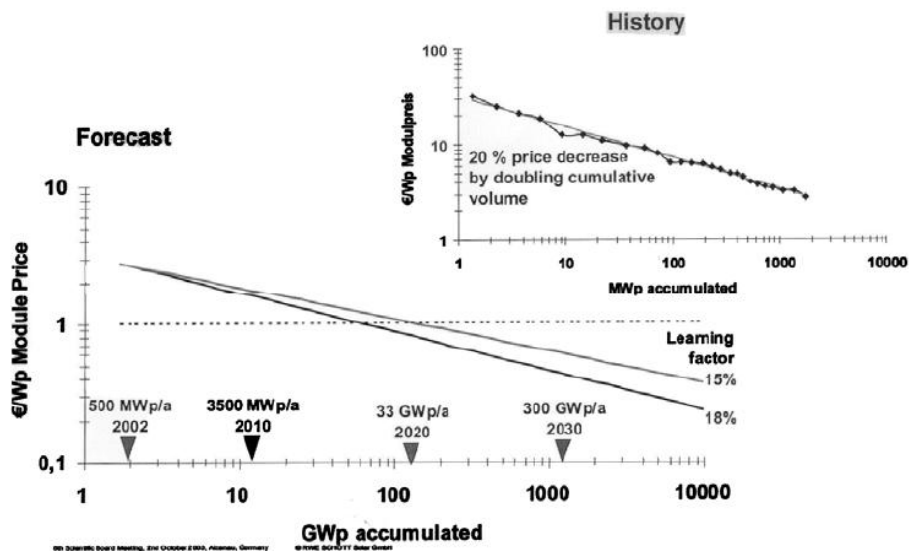
Kostnaderna för att installera solcellssystem idag varierar kraftigt. I Sverige ligger priserna för solcellsanläggningar som hittills beviljats stöd inom ramen för det så kallade OFFROT programmet för energiåtgärder i offentliga byggnader generellt på 50 000 SEK/kWp och uppåt. Kostnaden inkluderar allt som behövs för att anläggningen skall kunna tas i drift.

Större stationära demonstrationsanläggningar i Europa uppvisar i regel kostnader i samma storleksordning, dvs ca 5 000 €/kWp. Enligt EU:s visionsrapport för solceller är ett uttalat mål att denna kostnad skall sänkas till en tiondel, eller 500 €/kWp (4700 SEK/kWp), senast år 2050. Kostnaden för själva solcellsmodulerna är idag i storleksordningen 30 000 SEK/kWp. Kostnaderna för drift och underhåll av solcellsanläggningar är i regel mycket låga.

Solceller har idag en etablerad nisch inom elproduktion på platser där det är för dyrt att ansluta sig till elnätet. I dagsläget är dock solcellstekniken för dyr för konventionell kraftproduktion.

Kostnadsreduktionen för solcellssystem är ca 4 procent årligen. Med denna reduktionstakt är tidshorisonten fortfarande mer än 30 år innan solcells-system är konkurrenskraftiga gentemot etablerade typer av kraftproduktion.

I nedanstående figur visas en prognos över prisutvecklingen för solceller. Den förutsätter att volymerna ökar kraftigt. Det kan vara osäkert eftersom dagens kraftiga ökningstakt helt bygger på stora subventioner.



Kostnadsreduktion för solcellsmoduler, historik och prognoser. Källa: RWE Schott Solar genom "Statusrapport 2005 om teknik- och marknadsutvecklingen på solcellsområdet"

Referenser

1. Olle Nyström mfl, Grontmij AB, El från nya anläggningar, Elforsk, 2008
2. Ulf Malm, Uppsala Universitet; Solceller i Sverige och världen 2007, IEA PVPS
3. Energibanken information, www.energibanken.se
4. Lars Stolt, Solibro AB, Statusrapport teknikutveckling solcellsområdet PV-SEC 2005,
5. Bengt Ridell, Sydkraft Konsult, Sydkraft-Vision 2050, 2000
6. Mats Rydehell, Kanenergi, Maria Hall m.fl. , Statens Energimyndighet, Solceller, Teknik, marknad och svensk forskning, 2007
7. www.solcell.nu
8. www.iea-pvps.org

6 Vågkraft

6.1 Inledning

Idéerna att utnyttja vågenergi för kraftproduktion är gamla de första kända konstruktionerna är från slutet av 1700-talet. Flera projekt startades runt om i världen i oljekrisens spår på 70-talet. De flesta av dessa lades ner under början av 80-talet. Tekniken att utnyttja vågornas energi för kraftproduktion är helt mekanisk och förnybar energi jämförbar med vattenkraft och vindkraft.

6.2 Teknikbeskrivning

Att utnyttja vågornas kraft för elproduktion är ett av flera olika sätt att producera elenergi med hjälp av havet. Andra metoder kan vara att utnyttja saltgradienter, temperaturskillnader, havsströmmar och tidvatten.

Vågkraft från vågenergi är en förnybar energikälla som alstras via solenergi. Solen värmer luften vilket orsakar vindar som alstrar vågrörelser på vattenytan. Av dessa förnybara energiformer sol, vind och vågenergi är vågenergin den jämnaste. Vågenergin varierar kraftigt över året och är som störst under hösten.

Det bästa tillgången på vågenergi är ute i de stora världshaven bra område är t.ex. Nordatlanten och Nordsjön. I vårt närområde är de bästa platserna för att utnyttja vågenergi utanför Norges västkust, Bohuslän och vissa områden i södra Östersjön

Vågkraften har en stor effektpotential jämfört med andra intermittenta förnybara energikällor.

- 120 kW/m vågfront i de stora oceanerna,
- Storbritannien 80 kW/m,
- Norges västkust 20-40 kW/m,
- Sverige (på västkusten och utanför Blekinge) 10-25 kW/m.

Trots relativt "dåliga" vågor längs Sveriges kuster har potentialen uppskattats till 10 TWh/år.

Effekten är ungefär dubbelt så stor på höst och vinter jämfört med sommaren. En yta på 4 km² utanför Irlands kust kan ha en effekt på 120 MWe. Motsvarande yta vid kusten skulle för vindkraftverk ha en effekt på ca 20 MWe.

De stora kraftfulla vågorna finns ute i oceanerna speciellt i Nordatlanten utanför Storbritannien och vid Australiens sydkust. För att utnyttja kraften i dessa vågor krävs mycket kraftiga anläggningar men då kan också ganska betydande mängder el produceras. En annan stor potential för vågkraft finns i väsentligt lugnare vatten där stora mängder mindre vågkraftverk kan placeras.

Vågkraftverk anses i regel vara småskaliga. Men de är knappast så kallad distribuerad produktion utan mer lika vattenkraft eftersom de måste placeras på ställen där det finns vågor och inte vid elförbrukarna. De finns planer på att tillverka stora vågkraftverk i multi-MW, upp till storleksordningen 100 MW planeras, men det är vid placeringar där dessa speciella förutsättningar finns.

Det finns flera olika metoder att utnyttja vågornas kraft för elproduktion. Enligt organisationen Wave-Energy finns det mer än 60 st olika tekniker under utveckling. De flesta har testats som prototypanläggningar.

De olika teknikerna kan delas in i olika huvudområden till exempel,

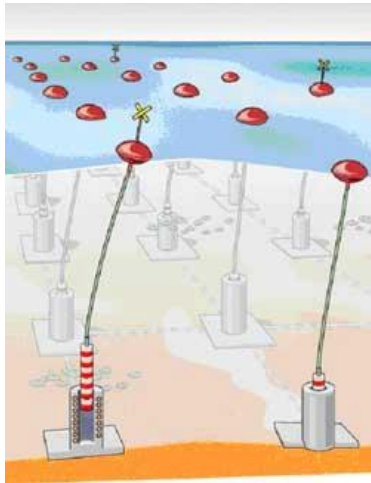
- OWEC, Ocean Wave Energy Converter, Bojkraftverk ex bojar med linjär bottenförankrad generator
- Slack-Moored Energy converter, upphöjda plattformar med central turbin
- OWC, Oscillating Water Columns, med luftturbin land eller havsbaserad
- Kilrännkraftverk

Det finns flera olika tekniker för att utnyttja vågenergi för kraftproduktion. Dock finns ännu ingen entydig information om vilka typer av tekniker som kan nå kommersiell status i större skala. Sannolikt kommer tekniken snarare att behöva anpassas efter lokala förhållanden, dvs. det bör finnas utrymme för flera varianter. Vilken typ av kraftverk som väljs beror till stor del på förhållanden vid platsen samt naturligtvis kostnader och teknikstatus mm.

6.2.1 Bojkraftverk OWEC

Oavsett typ brukar bojar inordnas under beteckningen OWEC (Ocean Wave Energy Converter). En eller flera bojar kopplas samman till en gemensam generator, som i sin tur kopplas till större system. Flera varianter finns. En av dem är den vid Uppsala universitet och av Mats Leijon utvecklade typen där vågrörelsen överförs till en linjärgenerator förankrad på botten. En anläggning som totalt kommer att omfatta 10 bojar med en total effekt på 100 kWe uppförs utanför Lysekil. Energimyndigheten, Vattenfall och andra elbolag investerar 50 MSEK.

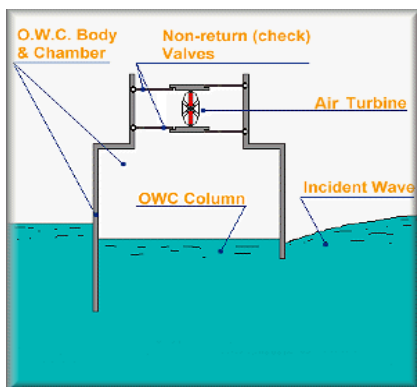
En annan tidigare utvecklad variant är den likaledes svenska IPS-bojen där bojens rörelse överförs via en stång till en slangpump eller kolv pump som kombineras med en Peltonturbin. Andra liknande konstruktioner är den danska DWP-principen där bojens rörelser via en lina överförs till en konstruktion som sitter fast i botten där en kolvkonstruktion via hydraulik drar vatten fram och tillbaka förbi en turbinkonstruktion.



Park av bojkraft enligt skiss från Uppsala Universitet

6.2.2 OWC Oscillating Water Columns

Principen för OWC, Oscillating Water Columns bygger på att vattnet från vågorna pressas in under vattenytan i ett stående rör. Då vattnet i röret stiger pressas luften i vattenpelaren ut genom en luftturbין som genererar el. Luftturbinen kan arbeta i båda riktningar så att energin generas både på utblås- och insugsfas. Denna typ av kraftverk byggs i regel nära kusten så att de kan förankras fast på botten eller vid helt enkelt på land i kustlinjen.



Bilden visar principen för ett mindre flytande OWC kraftverk.

Denna typ av arbetsprincip används för de kommersiella lysbojar som finns idag. Dessa har typiskt en effekt på 60 W.

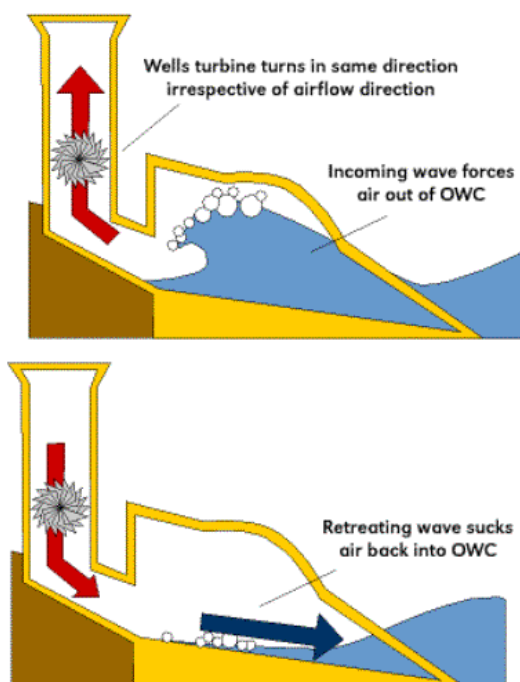


SPERBOY™ ett OWC kraftverk med luftturbiner som testas utanför Englands västkust.

Företaget räknar med att i de förhållande som finns i Nordsjön och Nordatlanten skall en fullskaleanläggning, ca 50m hög och 30m diameter, kunna ha en medeleffekt på 450 kWe.

Ett landbaserat OWC kraftverk arbetar enligt nedanstående princip

d.



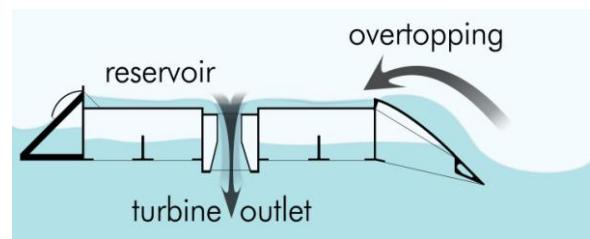
Det landbaserade OWC kraftverket Wavegen LIMPET 0,5 MW power plant installerad på ön Islay i Scotland

6.2.3 Kilrännkraftverk

Kilrännkraftverk har framförallt utvecklats i Norge av Norwave A/S. Principen är att vågorna leds in i en så kallad kilränna i t.ex. en bergsformation vid kusten. Kilrännan leder vattnet upp till en artificiell damm/sjö för att sedan släppas tillbaka till havet via en vattenturbin. Kilrännkraftverk har hög

verkningsgrad och är driftsäkra. Det största problemet är att det är svårt att finna lämpliga platser. Ett av de större norska kilrännkraftverken finns utanför Bergen i Toftestallen. Det har en effekt på 350 kWe. Ett annat större kilrännkraftverk har uppförts av norska företag på Java i Indonesien med en effekt på ca 1,5 MWe.

6.2.4 Slack-Moored Energy converter Plattform med turbin, Wave Dragon



Det danska företaget Wave Dragon Har utvecklat ett robust vågkraftverk som är avsett att användas i hav med stora vågor.

Vågorna och vattnet leds via "fångstarmar" upp över en ramp och in i en flytande löst förtöjd bassäng varifrån vattnet leds till en Kaplan-turbin. Anläggningen konstrueras för 1-4 m fallhöjd varvid ca 10-12 % av vågenergin kan utnyttjas. Flera enheter kan kopplas samman till en "park". För närvarande uppförs i en demonstrationsfas en vågkraftspark av denna typ utanför Wales kust. Uppfångningsområdet blir 300 m och 16 turbiner och generatorer på vardera 440 kW ger effekten 7 MW. Investeringskostanden uppges till 230 MSEK, dvs ca 33 000 kr/kW. I kommande etapper avser man bygga ut till 70 MW.

6.3 Nuvarande status, utvecklingläge och kostnadsbild

Vågkraft har fått ett kraftigt ökat intresse tekniken befinner sig under utveckling och val av lämplig teknik är fortfarande mycket osäkert. Trenden idag är att flera olika tekniker utvecklas parallellt. De olika teknikerna kan vara optimala under olika förutsättningar det kan vara skillnader i tillgänglig vågenergi, våghöjd, havsdjup, närhet till användare etc som avgör val av teknik. Det finns vissa likheter med vindkraftens tidiga utveckling då flera olika tekniker testades och demonstrerades.

Sedan 1991 har EU lämnat bidrag för utveckling av vågenergi och uppförande av demonstrationsanläggningar.

För Wave-Dragon 7 MWe kraftverket anges investeringskostanden till 230 MSEK, dvs ca 33 000 kr/kW. I kommande etapper avser man bygga ut till 70 MW. Då kommer priset per kW att minska kraftigt.

Uppnådd produktion och således även elproduktionskostnad för vågkraftverk beror på läget och den på platsen specifika vågeffekten. Den uppgivna elproduktionskostnaden spänner över ett stort intervall, från 30 öre/kWh till 1,5-2 kr/kWh.

6.4 Bedömt FoU behov fram till kommersialisering

Det återstår mycket utveckling innan vågkraften slår igenom som kommersiellt accepterad elproduktionsteknik i större skala. Även om anläggningarna är baserade på konventionell och robust teknik, vilket bl.a. uttrycks som en ledstjärna för Wave Dragon: "The basic idea of the Wave Dragon wave energy converter is to use well-known and well-proven principles from traditional hydropower plants in an offshore floating platform", så kan vägen vara lång.

Erfarenheterna från havsbaserad vindkraft kan visa vägen. Tidigare erfarenhet från vågkraftverk placerade där vågenergin är stor har visat att de stora krafter som uppstår vid extrema stormar är svåra att bemästra. Till exempel det utanför Skottland sjunkna Osprey-verket ett havsförankrat OWC-kraftverk som sjönk i större storm Nordatlanten. Kvaerner Energi har liknande erfarenhet från en demonstrationsanläggning av OWC-typ vid Norges västkust som fungerade bra men tyvärr slogs sönder under en kraftig storm. Utgående från dessa erfarenheter går det inte att peka på någon specifik kritisk komponent. Allt måste sannolikt dimensioneras baserat på "off-shore"-teknik t.ex. utgående från den standard som krävs vid oljeutvinning till havs och havsbaserad vindkraft.

De största problemen som måste lösas är i dag kostnader och livstid. De flesta demonstrationsanläggningarna har haft väsentligt kortare livstid än förväntat. De har havererat under kraftiga stormar. När väl bra fungerande tekniker har utvecklats så kan med stor sannolikhet även kostnaderna minskas genom förfinad produktutveckling och effektiv industriell produktion.

6.5 Pågående FoU verksamhet

Det finns flera internationella organisationer som arbetar med FoU och information om vågenergi

- **IEA Ocean Energy Systems**, www.iea-oceans.org . detta så kallade Implementing Agreement har 26 medlemsländer, vilket är högt för IEA. Representanter för Sverige är Energimyndigheten och Uppsala universitet.
- **European Ocean Energy Association**, www.eu-oea.com finansieras till stor del av EU och är en organisation som skall samla intresset för havsbaserad kraftproduktion i Europa. Det skall vara ett nätverk och en gemensam plattform som skall planera finansiering, forskning,

standards, lagar kunskapsspridning mm. Workshops och andra typer av möten planeras löpande.

- **Coordinated Action on Ocean Energy**, EU-finansierat nätverk, se www.ca-oe.org
CA-OE består av 41 europeiska företag eller organisationer samt ytterligare ett 30-tal associerade medlemsföretag. Från Sverige deltagar Uppsala universitet. Koordinator för nätverket är Ramböll, Danmark. Syftet är i första hand att sprida kunskap om vågkraft och annan havsbaserad energi, att planera forskning och demonstrationsprojekt.
- **Wave Energy Centre**, en organisation baserad i Portugal som har som avsikt att samla kunskap om tekniken och skapa internationella samarbeten.
- **The Ocean Renewable Energy Coalition** (OREC) är en national trade association för förnybar marin energi i USA. OREC bildades i april 2005 och har idag mer än 40 medlemsföretag, se www.oceanrenewable.com

6.6 Möjligt utvecklingsscenario

Vågkraft är en helt förnybar energiform. Vågenergin är helt fri. De rörliga kostnaderna är likartade som vattenkraft och vindkraft. Kostnaderna för vågkraften är till största delen investeringskostnaden. Ett visst underhåll kommer också att behövas med en erfarenhet och produktutveckling borde underhållskostnaderna kunna minimeras.

Problemen med vågkraft är även dessa likartade. Det kan bli svårt att få tillstånd att bygga kraftverken vid lämpliga lokaler. Det är med hänsyn till natur och miljö och fartygsleder och annan båttrafik. Långsiktigt torde vågkraften vara mycket miljövänlig eftersom de ganska enkelt kan vid behov monteras ner och naturen kan på så sätt återställas.

Vågkraften har en stor energipotential och kan förmodligen även till viss del användas för effekthöjning i nät på grund av den. Det kommer med stor sannolikhet att byggas vågkraftverk på många olika typer av platser, exempel,

- Avlägsna kustområden till exempel öar där det idag är dieselkraftverk som är den dominerande kraftkällan. En nackdel är att det krävs någon form energilagring eller back-up eftersom vågkraften inte är kontinuerlig och kan variera kraftigt vid olika årstider.
- Kustnära områden som inte är intressanta för sjöfart
- I samband med offshoreverksamhet, plattformar, vindkraftparker
- För fiskenergi till fiskodlingar
- Elektrifiering av fyrar och andra havsbaserade elbehov

År **2020** kommer vågkraft att demonstreras i många olika utförande på flera platser. Internationellt kommer det att finnas flera större anläggningar i multi-MW klass en del i samband med havsbaserade vindkraftsanläggningar och vid fasta offshore anläggningar. I Sverige kommer det att finnas flera mindre anläggningar i drift med olika tekniker. Tekniken kommer inte att vara fullt ut kommersialiserad.

Eventuellt kommer det att finnas konkurrenskraftiga installationer utanför det stora elnätet, vid öar, fyrar, lysbojar och andra flytande installationer.

År **2030** vid denna tid har det förmodligen utvecklats ett antal tekniker som är helt kommersiella och konkurrenskraftiga i likhet med vindkraft och vattenkraft. Driftssäkerheten är stabil, lång livslängd och minimalt underhåll. Vågkraften kommer att finnas vid de ställen som mest lämpliga med bra effektpotential, ej störande för sjöfart och möjlighet att mata in på elnätet.

Referenser

1. Olle Nyström mfl, Grontmij AB, El från nya anläggningar, Elforsk, 2008
2. Ridell, Bengt, Carl Bro Energi, Sydkraft Vision2050, Vågenergi 2000 internrapport
3. www.nyteknik.se, flera artiklar:
2008-03-06, 2007-12-19, 2006-03-22,

7 Jämförelse småskalig produktion

De tekniker som beskrivits här har alla olika egenskaper och olika förutsättningar för att kunna få ett kommersiellt genombrott i Sverige och i övriga världen. De kan få betydelse på olika energimarknader beroende på utveckling av energipriser och möjliga teknikgenombrott.

De viktigaste faktorerna för att en småskalig teknik skall kunna bli ett viktigt val för en elkund,

- Investeringskostnaden
- Verkningsgrad
- Livslängd
- Platsbehov
- Aktuella kostnader för att köpa el dvs el-, nät- och skattekostnader
- Vikten av oberoende från nätet
- Miljöfaktor

7.1 Kostnadsutveckling och prisbild

Det är svårt att uppskatta kostnadsutvecklingen för dessa småskaliga tekniker eftersom de kostnader som anges idag är i regel måttal som måste uppnås för att tekniken skall kunna vara konkurrenskraftig i framtiden.

Den framtida kostnadsbilden för **bränsleceller** är optimistisk I USA drivs av Department of Energy SECA-programmet som syftar till att ta fram en SOFC-modul i mindre storlek, 5-10 kW. Ett av målen är att nå en kostnad på 400 USD/kWe (2 600 SEK/kWe) vid en tillverkningsvolym om 50 000 enheter.

I Japan är ett av målen i det stora programmet för små stationära bränsleceller att priset för kompletta anläggningar, inklusive installation, skall var ca 1 MYEN eller 10 000 USD (65 000 SEK) per kWe. Det förutsätter en tillverkningsvolym på 10 000 enheter per år vilket beräknas uppnås före år 2010. Detta pris skall senare kunna halveras till motsvarande 5 000 USD vid en kommersiell produktion av 100 000 enheter per år.

Idag kostar en MCFC demonstrationsanläggning på 250 kWe i storleksordningen 5 000 €/kWe (47 000 SEK/kWe). Dessa priser beräknas vid större volymer komma ner till under 1 000 €/kWe eller cirka 10 000 SEK/kWe.

För bränslecellsstackar avsedda för bilindustrin prognostiseras kostnader ner mot 50 USD/kW.

Dagens **ORC**-moduler är ofta i storleksområdet från några 100 kW_e till 2 MW_e. Investeringen för en komplett ORC-modul på 2 MW_e är ca 20 Mkr, motsvarande en specifik investering på ca 10 000 kr/kW_e. För

spillvärmekoppling används normalt mindre moduler. Den specifika investeringen för en modul på 0,5 MW_e är ca 15-25 000 kr/kW_e.

Investeringskostnaden för en hel bränslebaserad ORC-anläggning är för en 2 MWe anläggning i storleksordningen 40 000 SEK/kWe.

För **solceller** är idag kostnaden för att uppföra stationära demonstrationsanläggningar i Europa ca 5 000 €/kWp eller 50 000 SEK/kWe. Det är samma pris i Sverige för anläggningar som är optimerade elproduktion. Kostnaden för själva solcellsmodulerna är idag i storleksordningen 30 000 SEK/kWp. Kostnaderna för drift och underhåll av solcellsanläggningar är i regel mycket låga.

Enligt EU:s visionsrapport för solceller är ett uttalat mål att denna kostnad skall sänkas till en tiondel, eller 500 € /kWp (4700 SEK/kWp), senast år 2050.

För **vågkraft** i Elforsk rapporten "El från nya anläggningar" har följande kostnadsbilder redovisats.

Uppnådd produktion och således även elproduktionskostnad för vågkraftverk beror på läget och den på platsen specifika vågeffekten. Uppgiften elproduktionskostnad från olika leverantörer spänner över ett stort intervall, från 30 öre/kWh till 1,5-2 kr/kWh.

Dessa uppgifter visar att kostnaden för att producera vågkraft är starkt beroende av läget och teknikval men det viktigaste är att det finns stora möjligheter för vågkraften att i framtiden vara ett konkurrenskraftigt i rätt sammanhang.

Att kostnaden kommer att minska kraftigt för småskalig produktion från dagens investeringskostnader som är baserade i de flesta fall på demonstrationsanläggningar är uppenbart för de tekniker som lyckats med att bli kommersiella.

De är de olika småskaliga teknikernas egenskaper och marknadsutveckling för energimarknaden, elpris, bränslepriser, skatter, miljöavgifter, subventioneringar som kommer att avgöra hur teknikernas konkurrenskraft kommer att utvecklas.

De tekniker som inte använder externt bränsle till exempelvis vågkraft och solceller är till största delen beroende av teknikutveckling och låga tillverkningskostnader. Teknikutvecklingen är viktig både för att öka verkningsgraden och för att minska tillverkningskostnaderna. I princip är båda dessa faktorer lika viktiga för att få en låg produktionskostnad men verkningsgraden har i längden större betydelse eftersom kostnaden för investeringen är beroende av ränteläget. Det väsentliga är att produktionskostnaden kan konkurrera med kostnaderna för att köpa el.

För de tekniker som använder externt bränsle ORC och bränsleceller är verkningsgraden betydligt viktigare än för de andra. En hög verkningsgrad är väsentlig fördel vid höjningar av bränslepriser. Vid användning av spillvärme eller direkt förnybar energi som sol- och vindenergi så är i första hand investeringskostnaden är den dominerande faktorn.

Bränsleceller ▪ Hög verkningsgrad ▪ Förnybara bränslen och vätgas ▪ Kompakta tysta anläggningar ▪ Litet platsbehov ▪ Idag demonstrationsfas ▪ 2020 förkommersiell fas 100 tals MW installerat globalt i Sverige enstaka MW ▪ 2030 vanlig teknik för kraftproduktion i Sverige används främst med biobaserade bränslen i större anläggningar	Vågkraft ▪ Fritt bränsle, klimatneutralt ▪ Begränsade lokaliseringar ▪ Underhållskostnader osökra ▪ Pilottester sker idag, val av kommersiella tekniker ej klart ▪ 2020 demonstrationer vanliga ▪ 2030 kommersiella anläggningar vid havsbaserade industriella installationer samt eventuellt i vågkraftparker
ORC ▪ Ekonomiskt idag för biobränsle anläggningar < 2MWe ▪ I vissa fall klimatneutralt beroende på bränsleval ▪ I dag en förkommersiell demonstrationsfas ▪ 2020 kraftigt ökad användning även anläggningar i Sverige ▪ 2030 lägre kostnader används för nya applikationer, kommersiell teknik	Solceller ▪ Fritt bränsle, klimatneutralt ▪ Lång livstid, litet underhåll ▪ Kräver stora ytor ▪ Idag demonstrationsfas, förkommersiell ▪ Kraftiga subventioner idag ▪ 2020 kraftigt ökad användning fortfarande subventionerat ▪ 2030 nya tekniker är kommersiella och väsentligt billigare

De fyra olika teknikerna har olika utvecklingsfaser och krav som påverkar deras möjlighet till ett större kommersiella genombrott.

Dessa tekniker kommer förmodligen inte alla att få kommersiella genombrott i Sverige. Småskaliga tekniker kommer inom tidrymden fram till 2030 inte att kunna konkurrera i stor skala med de storskaliga tekniker som finns i dagens kraftnät.

I det längre perspektivet kan situationen bli annorlunda. Elnätet kan kanske minska i betydelse om de småskaliga blir billiga pålitliga och lätta att använda. El kan då produceras lokalt direkt i samband med användarens behov.