

El och värme från solen

EN FAKTARAPPORT INOM IVA-PROJEKTET ENERGIFRAMSYN SVERIGE I EUROPA

Utgivare Kungliga Ingenjörsvetenskapsakademien, IVA

Bearbetning Maria Holm

Grafisk form Stefan Lundström, Blue media AB

Grafik och layout Ann-Christin Reybekiel, Reybekiel Form AB

Tryck Multitryck i Eskilstuna AB, 2003

För tryckning och distribution ansvarar Statens energimyndighet

Rapporterna kan beställas från Energimyndigheten, Box 310, 631 04 Eskilstuna och via hemsidan www.stem.se

Innehåll

Sammanfattning	2
Nya teknologier för uråldrig energikälla	3
Solenergin är en enorm resurs...	3
...som är ojämnt fördelad i tid och rum...	4
...men tillgången passar ofta efterfrågan.. . . .	4
...och energin kan lagras och transporteras.	4
Olika vägar att omvandla solenergi.	5
Solfångare ger värme	6
För kranvatten, hus och utebad	6
Potentialen störst i kalla länder	6
Lönsamt vid rimlig ränta	7
Solceller ger el	8
El utan nätanslutning....	9
...batterier och transformatorer....	9
...och bränslen	9
Olika typer av solceller	10
Solceller som byggnadsmaterial	11
Gott om plats för stora solcellsält	12
Gott om såväl solenergi som solenergiforskning i Sverige	13
Stat och företag i samverkan	13
Biljardspel med atomer	14
Svensk modul- och absorbatortillverkning	15
Tillämpningar och försök	16
Höga kostnader på grund av liten användning – och vice versa	17
Regler och traditioner viktigare än bidrag	18
Anläggningskostnaderna minskar.	18
Delad nytta – delad kostnad	18
Ambitionerna påverkar tillväxttakten.	19
Bra miljöprestanda allt viktigare fördel	20
Solenergiteknik ur ett industriperspektiv	21
Lärdomar från Tyskland	21
Slutsatser	24

Sammanfattning

Inflödet av solenergi till jorden är cirka 10 000 gånger större än den energimängd som mänskligheten idag använder i form av fossila bränslen. Huvuddelen av den inkommande solenergin träffar döda ytor och omvandlas omedelbart till värme. Mänskligheten skulle alltså kunna få hela sin energiförsörjning från den solenergi som träffar en bråkdel av jordens yta, utan att behöva tränga undan andra levande arter.

I solenergianläggningar sker omvandlingen från solstrålning till el eller värme utan att det produceras ämnen som påverkar miljön. Vid mycket omfattande användning av solenergi kan det dock bli viktigt vilka material som används i de anläggningar som omvandlar solenergin. Det blir också viktigt ur både resurs- och miljösynpunkt hur dessa material återanvänds.

Teknisk utveckling gör att solenergi kan omvandlas till el och värme med allt högre verkningsgrad och till allt lägre kostnader. Användningen av solvärme med hjälp av solfångare och solet med hjälp av solceller och termiska solkraftverk växer därför i världen.

Solenergianvändningen kommer med stor säkerhet fortsätta att öka. Det finns fysiska, tekniska och ekonomiska förutsättningar för att solenergi skall bli en stor, kanske den största, källan till el och värme i världen. Var utvecklingen går snabbast beror dock på hur politiskt fastställda regler utformas och tillämpas. Stöd till teknikutveckling och demonstrationsanläggningar och högre kostnader för koldioxidutsläpp är viktiga men inte tillräckliga åtgärder. Storleken på och utformningen av riktade marknadsstödjande åtgärder kommer att vara en kritisk faktor för en utveckling mot större spridning och lägre kostnader för solenergi under det kommande decenniet.

På kort sikt har Sverige bättre ekonomiska och tekniska förutsättningar för solvärme än för solet. Solvärme har goda förutsättningar att vinna marknadsandelar i Sverige från både elvärme och bränslen. Svenskar kan använda mer solvärme och större solfångare än invånarna i mer solrika länder i världen.

För utvecklingen av det svenska energisystemet kommer solenergi dock inte att vara en betydande konkurrent till dagens elproduktion, men ett växande

komplement och en framtida ersättning. För Sverige är hanteringen av solcellsteknik i dag mer en industripolitisk fråga. Om en inhemsk solcellsmarknad skapas finns det förutsättningar för en svensk solcellsindustri.

Rapporten är framtagen för IVA-projektet Energi-framsyn av tekn dr Tomas Kåberger, Chalmers, tekn lic Maria Brogren, Uppsala universitet och tekn dr Björn Andersson, Chalmers. Tomas Kåberger är huvudansvarig för rapporten.

Tomas Kåberger är ledamot av IVA avd 3 och främst verksam vid Göteborgs miljövetenskapliga centrum inom Chalmers och Göteborgs universitet. Han doktorerade i fysisk resursteori och har i sin forskning behandlat energisystemfrågor och gränsområdet mellan termodynamik och ekonomi. Han har också varit verksam utanför den akademiska världen som styrelseledamot i miljöorganisationer, bl a Naturskyddsföreningen, medverkat i statliga utredningar samt haft olika uppdrag inom energiindustrin.

Björn Andersson är teknologie doktor i fysisk resursteori och verksam som forskarassistent vid Avdelningen för miljösystemanalys på Chalmers inom området teknikvärdering. Han har i sin forskning studerat långsiktiga miljö- och resursbegränsningar för solceller och andra nya energitekniker. Han studerar även innovationssystem kring nya tekniker, hur nya tekniker växer fram och hur valet av teknik går till. Inom området har han bland annat studerat solcellsindustrins framväxt i Tyskland.

Maria Brogren är teknologie licentiat och doktorand i fasta tillståndets fysik vid Uppsala universitet. Hon är i botten civilingenjör i teknisk fysik med energiteknikinriktning från samma universitet och började doktorera våren 1998 efter att ha genomfört sitt examensarbete om transmutation av använt kärnbränsle i Los Alamos i USA. Sedan 1999 deltar hon i det tvärvetenskapliga Program Energisystem. Hennes forskning handlar om optiska egenskaper hos komponenter (särskilt reflektormaterial) i solcellssystem samt om design och utvärdering av solet/solvärmehybridssystem.

Nya teknologier för uråldrig energikälla

Solen har lyst i mer än fyra miljarder år och beräknas lysa i minst sex miljarder år till. Den lilla andel av solens energi som når jordens yta är nästan 10 000 gånger större än den energimängd som mänskligheten i dag använder i form av fossila bränslen. Med hjälp av nya tekniker kan solstrålningen direktomvandlas till såväl el som värme utan att ta omvägen över biomassa, vindar eller vattenfall.

Det är solenergi och den naturliga växthuseffekten som ger jorden en temperatur som möjliggör levande organismer av den typ vi ser omkring oss. Det är solenergi som genom fotosyntes tillför den energi de flesta levande organismerna på jorden lever av. Detta gäller även för människan som alltid ätit lagrad solenergi och som sedan hundratusen år också använt lagrad solenergi i form av vedbränsle.

SOLENERGIN ÄR EN ENORM RESURS

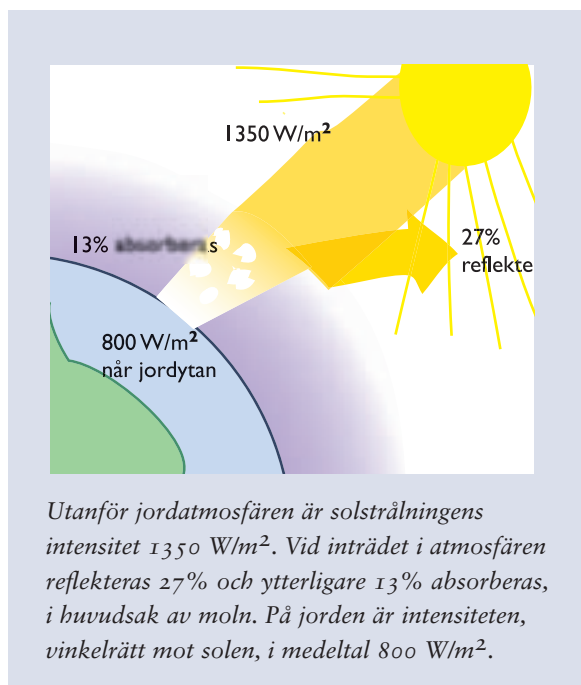
Solen utstrålar årligen cirka $3,5 \times 10^{18}$ TWh varav 750 000 000 TWh når jordytan. Av detta omvandlas knappt 0,06 procent i fotosyntesen och tas till vara av jordens växtlighet som energi i biomassa. Även den del av solenergin som omvandlas till vindar är mindre än en procent. Potentialen för direkt solenergianvändning är därför stor jämfört med dessa båda andra förnybara energikällor.

Världens kända och ekonomiskt utvinnbara tillgångar av olja och gas, liksom uranreserverna för dagens typ av kärnreaktorer, motsvarar den solinstrålning som når jordens yta under bara några dagar. Reserverna av kol motsvarar några veckors solinstrålning.

Utom räckhåll för energistatistiken utnyttjas solenergi sedan länge av arkitekter: Hus placeras och utformas för att solens strålning skall värma och lysa upp. Detta kallas för passivt utnyttjande av solenergi.

Det finns en rad nya tekniker där solenergin omvandlas direkt till kontrollerade flöden av värme- och elenergi:

- uppvärmning av inomhusluft och vatten kan åstadkommas med solfångare med låg temperatur;
- el kan fås via produktion av värme vid hög temperatur som får driva turbiner i termiska solkraftverk, eller genom
- elproduktion i solceller.



Solinstrålningen kan även omvandlas till kemiska energibärare som t ex vätgas. Den i dag vanligaste metoden att sönderdela vatten i syrgas och vätgas är elektrolys, som sker med hjälp av elektrisk spänning. Men vätgas kan också produceras med solvärme genom olika typer av termolys eller med fotolys som innebär direkt sönderdelning av vatten med hjälp av strålningsenergin från solen.

I denna rapport kommer vi dock främst ägna oss åt solfångare och solceller eftersom det är dessa tekniker som ligger närmast i tiden för användning i stor skala.

...SOM ÄR OJÄMNT FÖRDELAD I TID OCH RUM...

Jordens form, dess rotation och rotationsaxelns vinkel i förhållande till solen gör att olika delar av jordytan får olika mycket solenergi. Jordytans mönster och klimat ger också variationer i direkt och diffus solinstrålning.

I Sverige är instrålningen av solenergi cirka 1 MWh per kvadratmeter och år men i de mest solbestrålade delarna av världen är den två till tre gånger större.

Nära polerna varierar tillgången mycket över året medan tillgången vid ekvatorn är jämnt fördelad. I södra Sverige är instrålningen under juni månad omkring 20 gånger större än i december medan instrålningen vid ekvatorn endast varierar med några procent mellan årets månader.

...MEN TILLGÅNGEN PASSAR OFTA EFTERFRÅGAN...

I de delar av världen som nu uppvisar den snabbast accelererande ekonomiska tillväxten är värme ett större problem än kyla. När man även där efterfrågar ett behagligt inomhusklimat med temperaturer kring 20°C kommer efterfrågan på energi att vara som störst under de timmar då solinstrålningen är som mest intensiv. I dessa delar av världen kommer alltså soldrivna system som kan leverera kyla att bli högt värderade.

Även i Sverige används solenergi i tillämpningar där tillgången sammanfaller tidsmässigt med behovet. Detta gäller t ex uppvärmning av simbassänger och leverans av solvärme till campingplatser samt för produktion av varmvatten och el för användning i sommarhus.

...OCH ENERGIN KAN LAGRAS OCH TRANSPORTERAS

Men belysning vill vi ha även på nätterna och värme vill vi främst ha på vintern. För att klara sådana pro-

blem måste energin från solen lagras eller transporteras.

I dagens solenergisystem finns ofta energiackumulato- rer. El lagras i uppladdningsbara batterier medan värme ofta lagras som uppvärmt vatten eller i saltsmältor.

När nätanslutna solcellsanläggningar blir vanliga kommer det att finnas starka motiv till stora investeringar i elnätet – dels för att föra el från områden där solen skiner till områden där det är natt, dels för att överföra el från områden med mycket sol och låga markvärden till tätbefolkade områden.

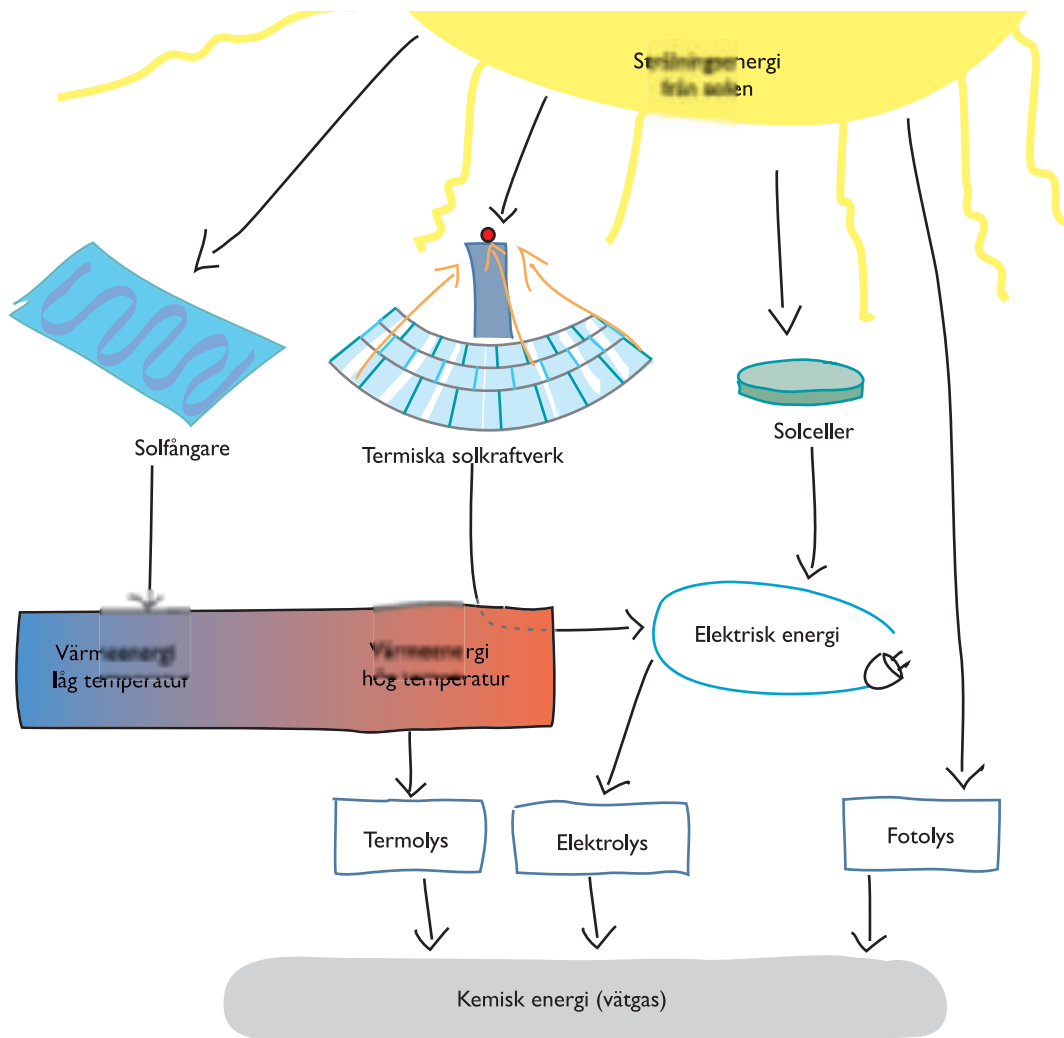
Å andra sidan kan en ökad användning av solenergi komma att minska behovet av investeringar i distributionssystem. Det blir ett resultat när den elektriska energin billigare kan produceras och användas lokalt i ett distribuerat energisystem.

Alternativ till nätöverföring av elektrisk energi är att omvandla den till kemiska energibärare såsom vätgas eller metanol, som sedan kan transporteras eller lagras.

Solvärme driver turbiner i solkraftverk

Med solkraftverk menar man ofta anläggningar där man genererar elektricitet med en termisk process. Oftast är det en ångturbinprocess men stirlingmotorer används också. Koncentrerande solfångare eller stora solföljande speglar (heliostater) används för att ge en hög temperatur på en liten absorberaryta. Med sådan teknik kan man producera ånga vid högt tryck och hög temperatur, driva kemiska processer eller smälta metaller i processindustrier. Redan i dag används denna typ av system som komplement till gasförbränning i värmekraftverk för elproduktion. Tekniken är framför allt användbar i områden med lite moln och stor andel direkt solstrålning. Merparten av kapaciteten i världen finns i södra Kalifornien där nio stora termiska solkraftverk med en sammanlagd effekt på 350 MW byggdes på 1980-talet.

Solkraftverk är av flera skäl mindre intressanta i Sverige. Heliostater och högttemperatursystem som under soldagar kan ersätta bränslen i processindustrier är dock av intresse.



Olika vägar att omvandla solenergi till värme, el och vätgas.

Vätgas via solenergi

Vätgas är ett flexibelt bränsle, som inte bara kan lagras och transporteras utan därtill användas för alla slags energiändamål. Vid förbränning bildas ren vattenånga.

Den vanligaste metoden att sönderdela vatten i syrgas och vätgas är via elektrolys. Om den el som då behövs producerats med hjälp av solceller, blir vätgasen ett bränsle med utmärkta miljöprestanda.

Men vattnet kan också sönderdelas via termolys, dvs med hjälp av höggradig värme. Även ter-

molysen kan göras soldriven via speciella solvärmeanläggningar.

Fotolys innebär direkt sönderdelning av vatten med hjälp av solens strålningsenergi.

Inom en forskningsgren försöker man att sammanföra solcellens och elektrolysörens funktion i ett steg – fotoelektrolys. Inom en annan tillverkar man komplexa molekyler som kan katalysera sönderdelningen av vatten – katalytisk fotolys. Och inom en tredje försöker man att "lura" bakterier och alger att producera vätgas – biofotolys.

Solfångare ger värme

I många länder med stor solinstrålning är solvärme i dag ett vanligt alternativ för varmvattenberedning. I kallare länder kan solvärme dessutom användas för att värma byggnader. Inom några decennier kan därför solvärmeproduktionen, räknat per invånare, vara större i länder med kallt klimat.

Solfångare omvandlar solljus till termisk energi, dvs värme. Det finns tre olika typer av solfångare på marknaden i dag:

- plana, glasade solfångare som har ett lågt kvadratmeterpris, hög driftsäkerhet och är lätta att installera;
- solfångare med vakuumbor som ger hög verkningsgrad men också högt pris eftersom tillverkningen är relativt komplicerad och
- så kallade pool-solfångare som ofta är enkla, oisolerade och billiga och används för produktion av värme med låg temperatur.

FÖR KRANVATTEN, HUS OCH UTEBAD

Totalt fanns i världen år 2000 drygt 50 miljoner kvadratmeter solfångare av vilka knappt hälften är enkla solfångare som till stor del används för att värma simbassänger. För inglasade solfångare är det några få länder som i dag står för huvuddelen av utbyggnaden: Tyskland, Turkiet, Japan, Österrike, Israel och Grekland. Utbyggnaden av solvärme kan i dessa områden snabbt komma att växa till en eller två kvadratmeter solfångare per invånare och därmed tillfredsställa ländernas behov av varmvatten.

POTENTIALEN STÖRST I KALLA LÄNDER

Men även i kallare länder med lägre årlig solinstrålning kommer solvärmeanläggningar att vara lönsamma och byggas ut under de närmaste decennierna. I kallare länder kan solvärme tas till vara inte bara för att värma varmvatten utan också för att värma byggnader. Därför kan utbyggnaden av solvärmeanläggningar i kallare

länder fortsätta så att man om några decennier når en större solvärmeproduktion per invånare i t ex Sverige än i de solrika länderna kring Medelhavet.

I de länder som är medlemmar i OECDs energiorgan IEA beräknades solfångarna år 2000 leverera cirka

Plana, glasade solfångare

En vanlig, plan solfångare består av en absorbatör som omvandlar solstrålningen till värme.

Absorbatören har en selektiv yta som ger hög absorption av solstrålning men låg emittans av värmestrålning. Över absorbatören finns ett täckglas för att minska konvektionsförlusterna och skydda absorbatörens yta mot slitage.

Värmeenergin förs bort av ett medium som kan vara luft eller vatten med tillsats av glykol. Luft är lämpligt när man har direkt användning av varmluften eller kan lagra värmen i till exempel byggnadskonstruktionen. Är huvudsyftet att värma vatten eller om man vill lagra värmen i vatten är det lämpligare att använda en vätskefylld solfångare.



Denna takintegrerade solfångare levererade när bilden togs 50-gradigt vatten vid en utetemperatur strax under noll grader. Foto: Tomas Kåberger

25 TWh värme, vilket gör att energiutvinningen via solvärme är av samma storleksordning som elproduktionen i vindkraftverk och tio till hundra gånger större än elproduktionen från sol.

På den europeiska marknaden, som höll sig ganska konstant fram till 1990-talet, är ökningen i dag 15 till 20 procent per år. År 2000 byggdes här över en miljon kvadratmeter solfångare, varav cirka 20 000 kvadratmeter (två procent) i Sverige. Den svenska marknaden har dock gått mycket upp och ner till följd av bristande kontinuitet i bidragssystemen.



I "radhusen utan värmesystem" i Lindås utanför Göteborg svarar solfångarna, som mest liknar takfönster, för ungefär hälften av det årliga behovet av varmvatten.
Foto: Tobias Boström.

LÖNSAMT VID RIMLIG RÄNTA

I dag ligger kostnaden för ett solvärmesystem normalt i intervallet 1 000–5 000 kr per kvadratmeter solfångare beroende på anläggningens storlek och prestanda. Solvärmesystem är lönsamma om man har en långsiktig finansiering (kanske på 20 år med fem procents ränta). Till skillnad från andra energislag med varierande energipris, såsom el och olja, vet man den totala kostnaden redan från början. I Sverige används solvärme framför allt i:

- **Varmvattensystem** där solfångarna kopplas till en varmvattenberedare med inbyggd solvärmeslinga. Varmvattensystemet passar speciellt bra i hus med direktverkande elvärme. Det finns standardsystem med 4 till 6 m² solfångaryta och en varmvattenberedare på 250 till 300 liter med inbyggd solvärmeslinga.
- **Kombisystem** där solvärme kan kombineras med andra energislag, ofta med en pellets- eller vedpanna. Värmen lagras i en ackumulatortank. Dessa flexibla system är i dag de vanligaste i småhus med solvärme.

Sverige ledande på stora anläggningar

Det finns nästan 10 000 solvärmeinstallationer i Sverige som tillsammans beräknas leverera 65 GWh per år. Trots att det ännu finns lite solvärme i Sverige jämfört med de mest ambitiösa länderna i världen är Sverige ledande på större solfångaranläggningar för värmeproduktion. Det finns 21 anläggningar med mer än 500 m² i landet. Den största är solfångarfältet i Kungälv med 10 000 m² solfångare som årligen levererar 4 miljoner kWh värme till fjärrvärmennätet.



Solceller ger el

En solcell omvandlar solens energi till elektrisk energi. Den innehåller inga rörliga delar, den förbrukar inget material under drift och den kräver inget annat bränsle än gratis ljus från solen.

Solcells-el är sedan länge ett lönsamt alternativ på platser som saknar utbyggt elnät. Inom det befintliga elnätet söker man i dag tillämpningar som gör att cellerna kan installeras till en låg extra kostnad, till exempel som tak- eller fasadmateriäl.

Solceller fungerar genom växelverkan mellan solstrålningens minsta energienheter, fotonerna, och enskilda elektroner i solcellen. Den vanligaste typen av solcell är en komponent av halvledarmateriäl, till exempel kisel. I en halvledare kan elektronerna inte röra sig fritt och det kan därför finnas skillnader i elektrisk spänning mellan elektronerna.

En modul är den minsta praktiskt användbara solcells-enheten vid byggande av en anläggning. Modulen består av ett antal seriekopplade celler inkaplade i ett laminat. Framsidan av laminatet är av ett transparent materiäl, vanligen glas. För baksidan finns en större frihet vad gäller val av materiäl. Typisk topp-effekt för en modul är 100 W, vilket innebär en yta på mellan 0,6 och 1,5 m², beroende på vilken typ av solcell som ingår.

Förutom moduler ingår även batterier och laddningsregulatorer alternativt växelriktare i ett solcellssystem. Växelriktaren är en nödvändig komponent då solcellsel används i växelspanningsnät eller matas ut på elnätet. En nätansluten solcellsanläggnings systemverkningsgrad beror på växelriktarens verkningsgrad, celltemperatur, förekomst av smuts och snö på modulerna samt skuggningsförluster.

När kostnader och storleken på produktionen av solceller anges används ofta enheten *watt topp-effekt*. Topp-effekten är den maximala elektriska effekt solcellerna kan lämna ifrån sig vid en instrålning på 1000 W/m².

Kostnaden för solcellsmoduler låg år 2001 omkring 30 kr per watt topp-effekt. Kostnaden för övriga sys-

temkomponenter är ungefär lika stor. Beroende på system, solinstrålning, ränta och avbetalningstid blir kostnaden för den producerade elen 3–10 kr/kWh.

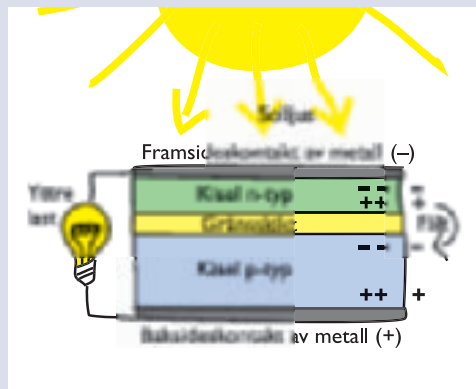
Av den solenergi som träffar en solcell blir bara en mindre del, cirka 15 procent, el. Det mesta av energin blir värme och verkningsgraden minskar då solcellerna blir heta. Genom att kyla solcellerna, till exempel genom att låta vatten cirkulera i rör på baksidan av cellerna, kan man förbättra elverkningsgraden samtidigt som man utvinner värme. I ett sådant hybridssystem tar man tillvara mer av solenergin och minskar därmed ytbehovet för att producera en given mängd el och värme.

Koncentration av solljuset kan användas för att öka utbytet hos solceller eller solfångare. Vanligen sker detta med speglar eller linser som följer solen. Denna komplexitet har inneburit att koncentrerande teknik inte har någon stor användning i Sverige i dag. I ett samarbete mellan Vattenfall Utveckling AB, avdelningen för Fasta tillståndets fysik vid Uppsala universitet och avdelningen för Energi och Byggnadsdesign vid Lunds tekniska högskola utvecklar man stillastående,



Hybridsystem med reflektorer av aluminiumplåt som koncentrerar solljuset fyra gånger. Systemet finns hos Vattenfall Utveckling AB i Älvkarleby och har producerat el och värme sedan sommaren 1999. Foto: Maria Brogren.

Så fungerar en solcell



Solstrålningens minsta energienheter, fotonerna, kan om de har rätt mängd energi få atomernas elektroner att lämna sina banor. I halvledarmaterial har man med hjälp av så kallade stör-atomer ordnat kristallerna så att elektronerna bara kan vandra åt det ena hållet, och den delen av halvledaren blir negativt laddad.

Halvledarens andra del blir i brist på elektroner positivt laddad, och så snart en yttre krets binder samman de båda delarna genereras en elektrisk ström som är proportionell mot solstrålningen.

Spänningen, däremot, är i princip konstant (cirka 0,5 V per cell för kiselceller) förutsatt att cellen inte blir alltför varm.

koncentrerande system. Dessa kan användas för såväl solfångare och solceller som ljusinsläpp. Elementen kan utformas så att de kan användas på både väggar och tak. En utmaning är att integrera dessa system i byggnader på ett estetiskt tilltalande sätt.

EL UTAN NÄTANSLUTNING...

Solceller användes redan i slutet på 1950-talet för elförsörjning av satelliter trots den då mycket höga kostnaden för elen. Skälet var att det var ännu dyrare att medföra alternativ som kemiska batterier, något bränsle eller en anordning för att utvinna kärnenergi. Av samma skäl fick solet under 1970- och 1980-talen en marknad på jorden för att försörja fyrar i haven och nödtelefoner i fjällvärlden eller långa motorvägar. Alternativet att dra fram och underhålla ledningar var dyrare än de fortfarande höga kostnaderna för solcellsystem. Vad elen i ledningarna kostade per kilowatt-timme spelade liten roll.

...BATTERIER OCH TRANSFORMATORER...

Under 1980-talet skapades ytterligare en kommersiell marknad för solceller när japanska företag lät solceller ersätta batterier i konsumentelektronik.

Det finns i dag tusentals olika produkter som försörjs med el från solceller i stället för med ledningar eller batterier. Klockor, miniräknare, parkeringsautomater, trafikskyltar, övervakningskameror, mätutrust-

ningar och trafikljus är några exempel. Konkurrenskraften för solet har i dessa sammanhang mycket lite med elpriset att göra. Det är ofta lågspänd likström för att driva elektronik man behöver. Kostnaderna för solceller och ackumulatorer som lagrar energin visar sig då ofta lägre än kostnaderna för inköp av engångsbatterier eller för att dra elledningar och köpa transformatorer och likriktare.

...OCH BRÄNSLEN

I utvecklingsländer använder omkring 400 000 familjer, som inte har tillgång till elnät, solceller för att få el till en mängd ändamål. Solcellerna driver vattenpumpar, tv- och radioapparater. De ger belysning för läxläsning och hantverk och de försörjer skolor och sjukhus med el för belysning och kylning av vacciner. Alternativet till solceller är ofta fotogenlampor eller dieselmoto-



Solceller på en medicinsk klinik i Mozambique.

Foto: Jonas Sandgren.

Olika typer av solceller

Solcellerna brukar delas in efter vilket slags material som används för att absorbera ljuset. Oftast används ett halvledarmaterial. En klassisk solcell är gjord av en halv millimeter tjock skiva av enkristallint kisel, och har en verkningsgrad mellan 12 och 16 procent. Det finns även celler av flerkristallint kisel vilka är billigare att framställa men har någon eller några procentenheter lägre verkningsgrad. För dessa finns även alternativa tillverkningsprocesser som möjliggör mindre materialåtgång.

Andra halvledarmaterial som används i solceller är galliumarsenid, koppar-indium-gallium-diselenid (CIGS), kadmiumtellurid och amorft kisel. Celler av galliumarsenid har mycket hög verkningsgrad men även hög kostnad och användningen är därför liten. De övriga materialen används i tunnfilmssolceller i lager som bara är någon eller några tusendels millimeter tjocka. De tunna filmerna av halvledare och ledande kontakt-

material läggs på ett substrat (oftast en glasskiva). Seriekopplingen av celler görs med tekniker som lasermönstring eller fotolitografi.

I tunnfilmssolceller används mindre material än i de traditionella kiselcellerna och man kan utnyttja produktionstekniker som på andra områden (till exempel i fönsterindustrin) visat sig användbara i stor skala. Därför hoppas man att tunnfilmssolceller ska kunna göras väsentligt billigare än traditionella solceller.

Grätzelceller (nanokristallina, färgämnessensitiserade solceller) är exempel på solceller där ljuset inte absorberas av ett halvledarmaterial. Här är det i stället ett färgämne som absorberar ljuset. I en Grätzelcell är färgämnet fäst på en nanokristallin halvledare med en mycket stor yta som är i kontakt med en flytande elektrolyt. Man kan likna en Grätzelcell vid ett konstgjort löv där färgämnet motsvarar växternas klorofyll.

Försäljning av olika typer av solceller 1984-2001 i MW topp effekt per år

	1984	1987	1990	1993	1996	1998	2001
<i>Kristallint kisel</i>							
Plan modul*	15	18	32	46	74	135	355
Koncentrerande modul	3,1	0,05	0,03	0,02	0,7	0,3	0,4
<i>Tunnsfilm</i>							
Amorft kisel	7	11	15	13	12	21	34
Kadmiumtellurid	–	–	–	1,0	1,6	2,2	1,5
Koppar-indiumdiselenid	–	–	–	–	–	0,2	0,7
TOTALT	25	29	46	60	89	157	391

* Här ingår flera typer av en- och flerkristallint kisel och i siffran för 2001 även en kombination av kristallint och amorft kisel. Källor: PV News, PV Insiders Report

Solceller baserade på olika typer av kristallint kisel har dominerat sedan den första moderna solcellen producerades 1954. År 2000 svarade kristallint kisel för 89 procent av världsproduktionen.



P-automat som drivs med solceller.
Foto: Maria Brogren

rer och generatorer som kräver såväl bränsle som kontinuerlig service. Det framstår ofta som billigare att använda solceller i kombination med ett batteri och lågenergilampor än att köpa den veckovisa ransonen fotogen. Men man saknar investeringstradition och kapital för att investera i en solcellsanläggning som kanske har fem eller tio års återbetalningstid. De flesta större solcellsprojekt i utvecklingsländer genomförs därför av internationella organisationer och aktörer såsom Världsbanken.

SOLCELLER SOM BYGGNADSMATERIAL

I ett europeiskt perspektiv är det främst nätanslutna solcellsanläggningar som demonstreras i större skala. I dag går det inte att motivera hela kostnaden för solcellen med elens marknadsvärde. Därför söker man tillämpningar där man kan installera solcellerna till en låg extra kostnad, till exempel som fasadmaterial eller solskydd på söderfasader.

Byggnadsintegrerade solceller innebär inte bara ekonomisk effektivitet genom att solcellerna ersätter andra fasadmaterial. Genom att elproduktionen sprids ut i den byggnadsstruktur där elen används minskar ledningsförlusterna. Samtidigt får man möjlighet att öka försörjningssäkerheten genom att de soldrivna systemen kan mata in el direkt till avbrottsäkrade elsystem för t ex datorer. När kostnaderna för distribution och



Solceller i fönsterglas som ger skugga och hindrar insyn
Foto Stefan Nowak.

administration av distributionssystemen tydliggörs i samband med att konkurrens införs på elmarknadern kan solesystem också få en ekonomisk fördel av att inte behöva finansiera distributionssystemet.

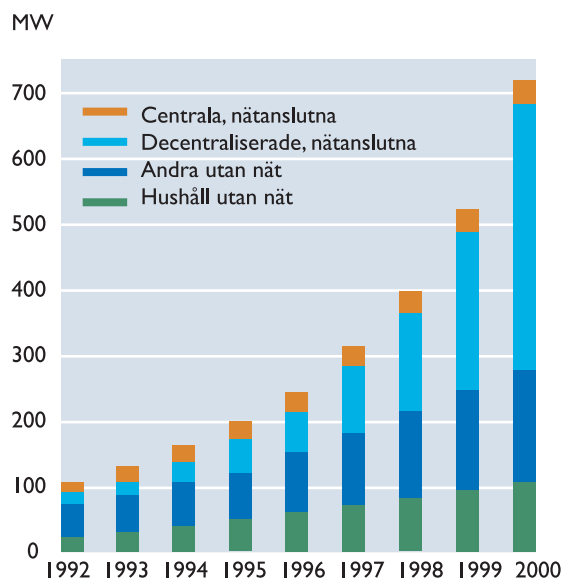
Genom att använda solpaneler som byggnadsmaterial åstadkommer man också el och värmeproduktion utan att ta någon som helst mark i anspråk.

Tak, väggar och fönster kan användas för elproduktion. Bilden nedan till vänster visar en byggnad där fönster har integrerade solceller som släpper igenom ljus men som skärmar mot insyn och starkt solljus.

Den del av byggnaderna som enklast görs solfångande är taket. Ett flertal företag har utvecklat solfångande takkonstruktioner som producerar el eller värme.

Byggnadsintegrerade nätanslutna solceller är det marknadssegment som ökar snabbast på grund av marknadsstöd i framför allt Japan och Tyskland (se vidare sid 20).

Användningsområden för solceller olika år



I början av 1990-talet dominerade de fristående systemen och de hade år 1994 en marknadsandel på över 85 procent. Under åren 1994–2000 ökade marknadsandelen för byggnadsintegrerade solceller från 10 till 55 procent. Ökningen i absoluta tal var naturligtvis ännu större då den totala marknaden fyrdubblades under samma period. Diagrammet visar utvecklingen i flertalet industriländer.

Källa: IEA 2001



Vänstra bilden visar solceller som hängts på en fasad i efterhand, den högra vill illustrera den potential som finns för integration i byggnader.

Paneler med solceller kan ges ett utseende som gör dem mycket attraktiva som fasadmateriel för moderna byggnader. Bilden ovan visar en solcellsklädd fasad där solpanelen – till stor extra kostnad – hängts på i efterhand. Bilden bredvid illustrerar potentialen för att integrera solceller i hus där man i dag har fasader som liknar solceller och som kostar ungefär lika mycket.

En genomgång av internationella studier visar att det finns lämpliga ytor av i storleksordningen 10 m² per person tillgängligt i dagens byggnadsbestånd. Med dagens verkningsgrader skulle dessa ytor, täckta med solfångare och solceller, kunna leverera varmvatten och hushållsel. Men när husen formges för att använda solmaterial kan både solbelyst yta och energiutbyte ökas.



GOTT OM PLATS FÖR STORA SOLCELLSFÄLT

I dag svarar konventionella system såsom vattenkraftverk, bioenergianläggningar och vindkraftverk för tiotals procent av olika länders energiförsörjning. När man når sådan skala också i användningen av direkt solenergi kommer man inte bara att ha byggnadsintegrerade system. Då behövs också stora solfångarfält som i första hand är byggda för att just ta tillvara solenergi. Sådana anläggningar kan placeras där instrålningen är intensiv och där marken samtidigt är billig.

För sådana anläggningar kommer man att behöva nya system för elöverföring eller överföring av energin i form av vätgas. Till skillnad från de första fristående eller byggnadsintegrerade systemen kommer nätan slutna solcellsfält belastas med kostnader för överföring. Fördelen ligger i låg markkostnad, låga kostnader för montering och högt kapacitetsutnyttjande.

Anläggningar som motsvarade en kvadrat med 50 mils sida i Sahara skulle teoretiskt kunna försörja världsbefolkningen med all den energi vi i dag efterfrågar. Stora områden med riklig solinstrålning och döda ytor utan konkurrerande användning finns i alla världsdelar.

Hur mycket solceller behövs?

Elförbrukningen i världen i dag är ungefär 10¹³ kWh/år. Om vi antar en systemverkningsgrad på 10 procent och att solcellerna placeras så att instrålningen är 1500 kWh per m² och år i genomsnitt, vilket är lågt räknat globalt sett, behövs ca 70 000 km² solceller för att försörja hela världen med el. Detta motsvarar mindre än en procent av Saharas yta eller 12 m² per person.

I Sverige är den totala elförbrukningen per person hög. Hela landets elanvändning, inklusive den industriella, är ungefär 150 TWh per år, vilket innebär att 1250 km² solceller behövs för att täcka Sveriges elbehov. Det motsvarar 0,3 procent av Sveriges yta dvs halva Gotland eller 150 m² per person.

Gott om såväl solenergi som solenergiforskning i Sverige

Sveriges landyta tar emot 360 000 TWh solenergi per år, vilket är cirka tusen gånger mer än landets totala energianvändning. Men det är inte bara tillgången på solenergi som är god i Sverige. En rad forsknings- och utvecklingsprojekt pågår kring såväl solet som solvärme och i Gällivare finns Skandinaviens största solcellsmodultillverkare.

Solinstrålningen på horisontella ytor i Sverige varierar från 800 kWh/m² och år i nordligaste Norrland till 1000 kWh/m² och år i Skåne. En solfångare som är lutad mellan 30° och 45° mot horisontalplanet träffas av cirka 30 procent mer än ovan angivna värden.

Instrålningen på hustaken i sydsverige uppgår till 25 TWh/år. Genom att belägga enbart hustaken i sydsverige med solceller går det att producera fyra TWh el per år.

STAT OCH FÖRETAG I SAMVERKAN

Solenergiforskning och solenergiförsök liksom solvärme- och solcellstillverkning finns över hela landet:

- **Solvärmeprogrammet** finansieras av Energimyndigheten tillsammans med bland andra Vattenfall AB, Birka AB, Sydkraft AB och Svenska byggbranschens utvecklingsfond (SBUF). Målet är att göra solvärmen till ett konkurrenskraftigt uppvärmningsalternativ, i första hand för småhus och gruppcentraler. Strategin är att skapa samverkan mellan forskare, tillverkare och köpare av solvärme så att forskning och tillverkning anpassas till efterfrågan. Programmet, som startade 1996, är nu inne i sin andra fas som ska pågå under åren 2001-2003. Budgeten är nio miljoner kronor per år.

- **Solet** administreras av Elforsk AB. Det är ett tillämpat program som skall öka andelen solet i det svenska energisystemet genom att öka kunskapen om solceller som energikälla och som byggnadskomponent. Man skall också samla kunskap om vad som sker internationellt inom solet-området.

I programmet görs sammanställningar och redovisningar av praktiska erfarenheter från anläggningar i drift. Programmet inkluderar internationellt samarbete via Photovoltaic Power Systems Programme (PVPS) som är ett samarbete inom IEA med medverkan från 21 länder. Solelprogrammet är i slutfasen av sin andra etapp. Programmet omsatte cirka tio miljoner kronor.

- **Forskning om material** som kan utnyttja solenergi bättre bedrivs vid Ångström Solar Center vid Uppsala universitet.

Med *tunnfilmsceller* finns goda utsikter att ta fram billiga solcellsmoduler. Målet med forskningen är att bygga en grund för ny svensk industri på den snabbt växande marknaden. Verksamheten sträcker sig från grundforskning kring materialen till processoptimering och verifiering av att de olika tillverkningsstegen har de tekniska egenskaper som krävs för storskalig produktion.

Grätzel-cellerna är fotoelektrokemiska solceller: de innehåller en redoxelektrolyt i flytande form. Ljus absorberas av färgämnesmolekyler som är fästa vid nanokristaller av titandioxid som packats till en film på ett genomskinligt ledande substrat. Elektrolyten fyller porerna i filmen, och en motelektrod placeras nära den infärgade titandioxidelektroden.

De färgämnen som används i dagens Grätzel-celler är vattenkänsliga och relativt dyra och därför utvecklas och testas nya färgämnen.

Exakt hur Grätzel-cellerna fungerar diskuteras fortfarande. En bättre förståelse är nödvändig för framtida utveckling och ökad effektivitet.

Smarta fönster kan variera sin genomskinlighet med hjälp av elektriska fält, som läggs över fönstret. Glaset kan vid behov bli mörkt som i ett par solglasögon, vilket minskar kylbehovet i t ex kontorslokaler. Grundläggande forskning pågår om de tunna skikt av olika material som behövs för att de optiska egenskaperna hos ett smart fönster skall kunna styras.

Biljardspel med atomer

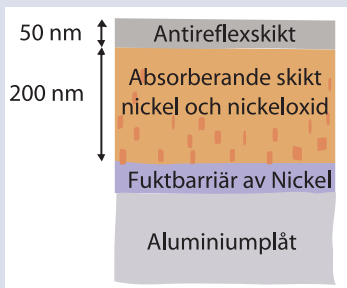
En solfångarabsorbators verkningsgrad beror på två egenskaper:

- **Solabsorptansen**, som är ett mått på hur stor del av den inkommande solenergin som tas upp av absorbatorn.
- **Termisk emittans**, som beskriver hur stor andel av den absorberade värmen som strålar från absorbatorn ut till omgivningen.

En perfekt absorbator har hundra procent solabsorptans och noll procent i termisk emittans. En svensk kommersiellt tillgänglig absorbator typ har för tillfället nittiofyra procent i solabsorptans och tolv procent i termisk emittans. Målet för pågående forskning på Ångströmlaboratoriet är att förbättra dessa egenskaper.

Vid Ångströmlaboratoriet i Uppsala pågår forskning för att med materialbesparande s.k. sputterteknik förbättra dessa egenskaper.

Joner inne i en kammare med mycket lågt tryck slungas med hjälp av stark spänning i hög hastighet mot en nickelpatta placerad i taket av kammaren. När jonerna kolliderar med plattan slås nickelatomer loss som biljardbollar i ett biljardspel. Atomerna faller ner mot underlaget som ska beläggas. På detta sätt kan lager för lager av atomer bilda mycket tunna filmer.



Solfångarabsorbator
i genomskärning.

Stommen till solfångarabsorbatorn är en aluminiumplåt. Denna plåt beläggs med sputterteknik med tre tunna skikt. Överst ligger ett 50 nanometer (0.00005 mm) tunt skikt antireflexsikt, och under detta det absorberande skiktet som består av en cirka 200 nanometer tjock, mycket porös film av nickelpartiklar i nickeloxid. Aluminiumplåten är känslig för luftföroreningar och fukt, och plåten beläggs därför med ett tunt skikt av nickel som fuktbarriär.

Solfångarabsorbatorn, hjärtat i en solfångare, har till uppgift att genomföra den viktiga energiomvandlingen av strålningsenergi från solen till värme i vatten. Grundidén är att så mycket av solenergin som möjligt ska absorberas samtidigt som den infångade värmen inte ska strålas ut till omgivningen igen.

• **Konsortiet för Artificiell fotosyntes** bedriver forskning i Lund, Uppsala och Stockholm. Forskarna försöker framställa komplex av molekyler som kan absorbera energi från ljus och utnyttja denna för att producera vätgas av vatten. Inom fem år hoppas man kunna införliva komplexen i tekniskt användbara system. Då kommer nya frågor i fokus om t ex produktionsteknik, hållbarhet och säkerhet.

Den svenska forskningen om artificiell fotosyntes är i världsklass. Produktion av betydelse för energisystemet uppskattas dock ligga 20 till 25 år framåt i tiden.

Förutom dessa projekt pågår ett antal solenergianknutna projekt av grundforskningskaraktär samt forskningen kring industriell dynamik och teknikimplemen-

Solceller kan ha fler funktioner än enbart elproduktion. På Sickla Udde ger de fastigheterna ett karaktäristiskt utseende eftersom de utgör en del av glastaket. Solcellerna klarar att producera cirka 15 procent av fastighetsel, dvs cirka 8600 kWh per år. Foto: Mats Andersson

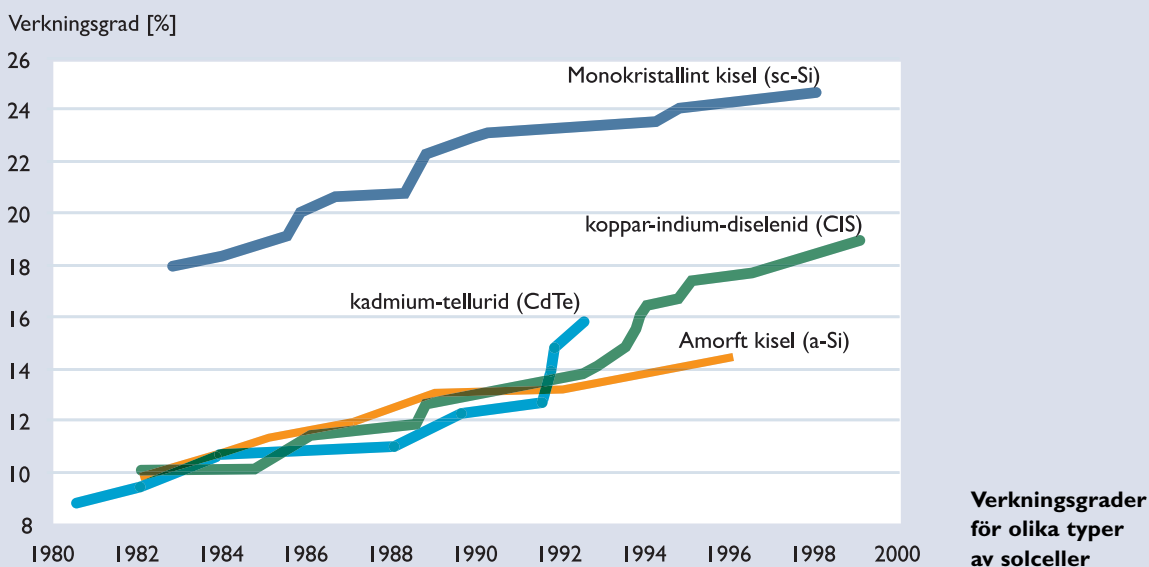


Allt högre verkningsgrader

En bra solcell omvandlar en stor del av energin i det infallande ljuset till elektrisk energi, det vill säga den har en hög verkningsgrad. Verkningsgraden definieras som kvoten mellan den elektriska effekt solcellen producerar och effekten i det infallande ljuset. Verkningsgraden hos en solcell varierar med solinstrålningnivå, solspektrum och celltemperatur och mäts vid standardförhållanden

som ställer krav på dessa parametrar.

Diagrammet visar hur verkningsgraden för olika typer av solceller i laboratorieskala har utvecklats de senaste decennierna. En bra solcell har i dag en verkningsgrad på 10–25 procent, beroende på celltyp. För att solceller ska vara konkurrenskraftiga måste de också vara billiga, det vill säga de skall ge många kWh per investerad krona.



Verkningsgrader för olika typer av solceller

tering vid Chalmers och högskolorna i Borlänge och Linköping. Forskning på solel- och solvärmsystem finns även på avdelningen för Energi och Byggnadsdesign i Lund.

I Hammarby Sjöstad i Stockholm satsar svensk byggindustri på utveckling av alternativa energikällor. Solceller som en arkitektonisk integrerad del av byggnaden för att ge elenergi till de boende används här för första gången i nybyggnation. I Sverige har det tidigare funnits försök med solceller som i efterhand monterats på befintliga fastigheter. Ännu finns ingen ekonomisk lönsamhet för solceller i Sverige men ett syfte med Hammarby Sjöstads-projektet är att stimulera den byggtekniska utvecklingen.

SVENSK MODUL- OCH ABSORBATORTILLVERKNING

- I Gällivare finns i dag en svensk solindustri som sysselsätter cirka 100 personer. Arctic Solar AB och Gällivare Photovoltaic AB (GPV) sätter ihop kisel-solceller till moduler som sedan i huvudsak exporteras. GPV är den första och största solcellsmodulproducenten i Skandinavien och är i dag helägt av SolarWorld AG. Företaget planerar att fördubbla sin årliga tillverkningskapacitet till 20 MW i slutet av år 2002.

- Sunstrip-absorbatoren utvecklades av Gränges Aluminium i slutet av 1970-talet och med TeknoTerms vidareutveckling har den i dag en ledande position på Europa-marknaden. Den består av ett kopparrör som valsats in

mellan två aluminiumplåtar som sedan behandlats med ett selektivt ytskikt som skall ge hög absorption av solstrålning och låg emittans av värmestrålning.

• **Arnes Plåtslageri i Örebro** är verksamt både inom traditionellt byggplåtslageri och solvärmesystem. I början av 1990-talet började företaget utveckla solfångare och man har sedan fortsatt till totalentreprenad av hela solvärmeanläggningar. Företaget har utvecklat en solfångare, Aquasol, där absorbatoren har ett heldraget kopparrör vilket ger bättre flöde och mindre risk för läckage. Utvecklingen har gått vidare till hela takmoduler med en yta på upp till över 13 m², vilka finns att tillgå som byggsats för villor, flerfamiljshus och industrifastigheter.

TILLÄMPNINGAR OCH FÖRSÖK

En skicklig aktör under de senaste 20 åren har varit Eksta bostadsstiftelse i Kungsbäcka som med goda tekniska och ekonomiska resultat byggt solvärmeanläggningar i sina nya bostadsområden. I detta företag är solvärme ett självklart alternativ när man ritat nya bostadsområden och man har lärt sig att bygga solvärme effektivt.

Solceller på en busshållplats kan användas till belysning av området intill stolpen och att belysa busskyl-



Solceller ger ljus på busshållplats

skymningsrelä. När givaren indikerar närvaro av människor tänds belysningen på stolpen. Det medför att busschauffören och andra trafikanter uppmärksammas på de väntande passagerarna samt att komfortbelysning erhålls kring stolpen. Skymningsreläet gör att inte belysningen slår till under goda ljusförhållanden då belysningen ändå inte ger något tillskott av ljus. Systemet utvärderas av Energibanken i Jättendal AB tillsammans med Nordanstigs kommun, Vägverket Region Mitt och X-trafik.

Det finns andra tillämpningar i vilka denna teknik kan vara intressant. Våldsbrott och inbrott minskar med ökad belysning och med ett enkelt system som detta så är möjligheterna stora att till rimlig kostnad öka säkerheten och minska risken för olyckor på platser dit det varit orimligt dyrt att leda el från elnätet.



Några svenska system med solceller. I slutet av sommaren 1997 togs Sveriges största solcellsanläggning i drift hos IKEA i Älmhult. Solcellsmoduler med en sammanlagd toppeffekt på 60 kW täcker söderfasaden (450 moduler) och större delen av taket (312 moduler) på IKANO-bankens kontorsbyggnad. Den producerade elenergin matas in i byggnaden och förväntas täcka cirka tio procent av det årliga elbehovet. Foto: Mats Andersson.

Höga kostnader på grund av liten användning – och vice versa

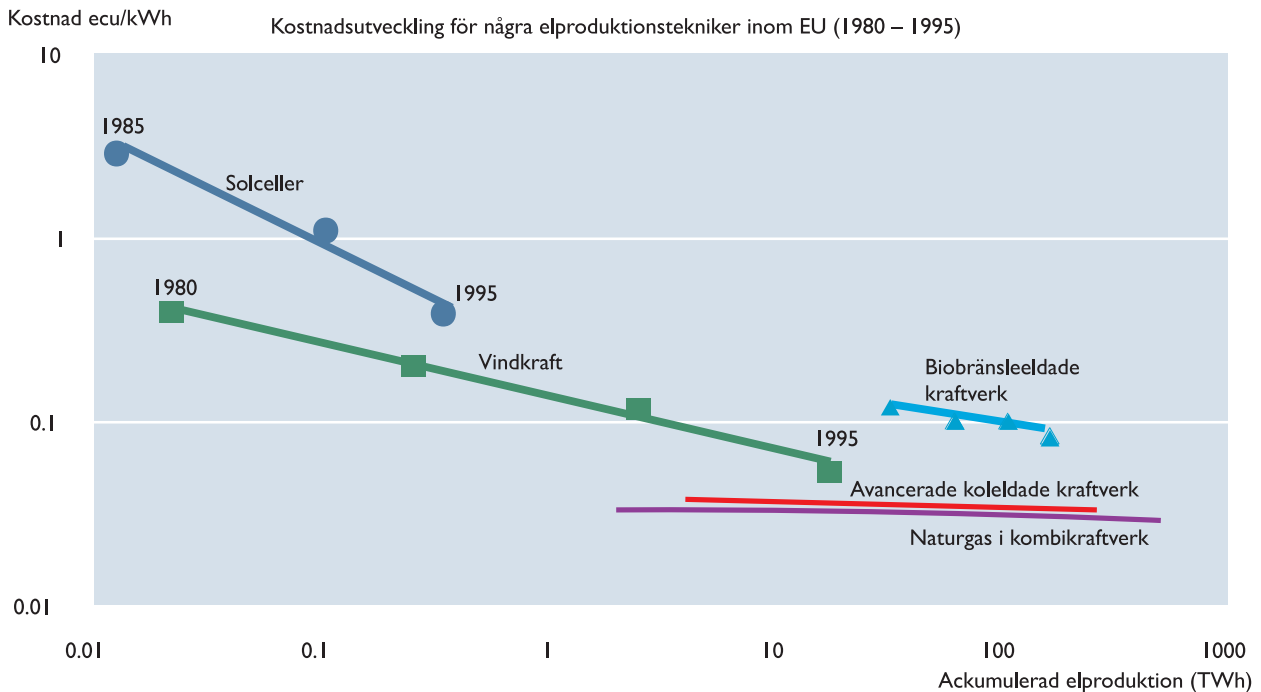
Anledningen till att solenergi ännu används i så liten skala är att kostnaden är hög. Anledningen till att kostnaden fortfarande är hög är att solenergi ännu används i så liten skala! För att ta sig ur detta moment 22 krävs smarta marknadsstödjande åtgärder som ser till att dra nytta av kopplingen mellan kostnad och spridning och skapar goda cirklar. Ökad användning ger lägre kostnader, lägre kostnader ger ökad användning.

Det är inte bara den höga styckkostnaden i små serier som hindrar introduktion av nya tekniker. För småskalig solenergi kan bristen på erfarenhet hos arkitekter, byggare, elektriker, VVS-tekniker och konsumenter ha större betydelse. Dessutom är regelsystem och tillståndsförfaranden sällan anpassade till nya teknikers behov utan utgör ytterligare hinder. Dessa barriärer

måste minskas om mer solenergi skall kunna användas. Om en nischmarknad skapas med någon form av marknadsstöd kan detta sätta igång lärprocesser i hela kedjan från tillverkning till design, installation, tillståndsförfarande och användning.

Men så länge energipriserna inte innefattar samtliga miljökostnader är potentialen för solvärmesystem i Sverige på kort sikt måttlig – åtminstone utan långsiktiga marknadsstöd. Med stabil miljöpolitik som ger ekonomiska incitament inom energisektorn kan solvärmesystem dock komma att svara för en betydande del av vår värmeförsörjning.

Globalt sett har solceller en enorm potential och marknaden ökar nu snabbt tack vare stödprogram i Japan och Tyskland. Utvecklingstakten är dock känslig för politiska förändringar i dessa två länder. För att före-



Diagrammet visar hur tillverkningskostnaderna (i 1990 års penningvärde) utvecklats för några olika elproduktionstekniker. Efter Wene: Lärkurvor

tag i Sverige skall kunna medverka i den framtida utbyggnaden av solcellssystem är det viktigt att tidigt skapa en inhemsk marknad. En sådan lokal marknad ger tillfälle till lärande genom effektiv återföring av erfarenheter från användare till tillverkare och konstruktörer.

REGLER OCH TRADITIONER VIKTIGARE ÄN BIDRAG

När det gäller solvärme är regelverken och traditionerna i dag avgörande. I länder där solvärme är etablerad i byggnadstraditionen ritas solenergianläggningar spontant in av arkitekter redan i de första skisserna. I andra länder krävs fortfarande speciella beslut och särskilda ansträngningar.

Det förekommer att regler för bygglov eller bostadskrediter uppmuntrar eller kräver solvärmeanläggningar men på andra håll krävs i stället extra dyra och krångliga bygglovsprocedurer för att få sätta upp solfångare. Det förekommer till och med att man kan förbjudas att placera solfångare på tak därför att de ser fula ut från flygplan.

Även om solvärme i nybyggnation är viktigt, är möjligheterna att utnyttja solvärme i existerande bostäder avgörande för att en betydande solvärmeanvändning i Sverige skall åstadkommas inom de närmaste decennierna. Nybyggnationen är nämligen liten jämfört med solenergipotentialen. Med den nuvarande förnysetakten av bebyggelsen kommer 75 procent av dagens svenska byggnadsbestånd fortfarande vara i bruk år 2050.

Variande eller oförutsägbara regler kan vara lika fördande som förbjudande regler. Decentraliserade solenergianläggningar, var och en för sig, innebär en liten investering med en liten lönsamhet. Besvärliga regler kan därför stoppa ett mycket stort antal små och lönsamma projekt. Därmed kan en stor potentiell samhällsnytta blockeras. I Sverige kan kostnaderna för bygglovsprocessen för en solfångare vara större än de statliga investeringsbidragen som i sin tur varit 20 procent av hela investeringskostnaden.

ANLÄGGNINGSKOSTNADERNA MINSKAR

Kostnaden för nätanslutna solcellssystem är fortfarande avskräckande hög i de flesta länder, även om Japan

med sina höga elpriser, låga räntor och relativt goda solförhållanden är ett möjligt undantag. En kritisk fråga är därför hur långt kostnaderna kan sänkas och vad som krävs för att nå låga kostnader.

Kostnaden för solel består ungefär till hälften av kostnaden för själva modulerna medan resten är övriga systemkostnader. Dessa kan delas upp i en ytberoende och en effektberoende del:

- **Den ytberoende delen** består framför allt av kostnader för mark, stativ, ledningar samt monteringsarbete. Takintegration minskar kostnaderna för mark och stativ. Kostnaden per energienhet för de ytberoende delarna minskar när verkningsgraden ökar.

- **De effektberoende systemkomponenterna** utgörs främst av lastanpassare, växelriktare och transformatorer. Tekniken är väl känd men har utvecklats för ny högspänningselektronisk teknik. Standardisering och serieproduktion av komponenter för lågspänningssystem kan reducera kostnaderna för solel betydligt.

Det råder delade meningar om den i dag dominerande tekniken som baseras på kristallint kisel kan bli tillräckligt billig. Mindre materialåtgång och möjligheter till billigare produktion ger argument för att man kommer att gå över till andra typer av solcellsmoduler, exempelvis moduler baserade på tunnfilmsteknik.

DELAD NYTTA – DELAD KOSTNAD

Som beskrivits tidigare kan solfångande byggnadsmaterial ge el och värme till en kostnad som är liten – eller rent av negativ genom att man undviker kostnader för andra fasadmateriell. Potentialen för energileveranser



Solceller som bullerskydd vid järnväg.

från solenergianläggningar på byggnader i Sverige har uppskattats till några tiotal TWh per år. Men även när denna potential är utnyttjad finns möjlighet att bygga solenergianläggningar som också fyller andra funktioner som kan bära en del av kostnaden för solfångarna eller solcellerna. Solceller installeras i vissa länder som bullerplank längs vägar och järnvägar. Solenergianläggningar kan användas som regn- och snöskydd över entréer, gångvägar och parkeringsplatser.

När den byggda miljön är fylld av solfångare och solceller kommer tekniken att ha blivit billigare och utbyggnaden att fortsätta. Globalt finns öknar med billig mark men med långa avstånd till energikunderna. I Sverige kommer vi kanske att välja mellan att odla energiskog och bygga ut solenergi. Direkt solfångande har högre verkningsgrad än energiodlingar och detta kan vara viktigt där marken kostar mest, det vill säga närmast de platser där elen eller värmen efterfrågas.

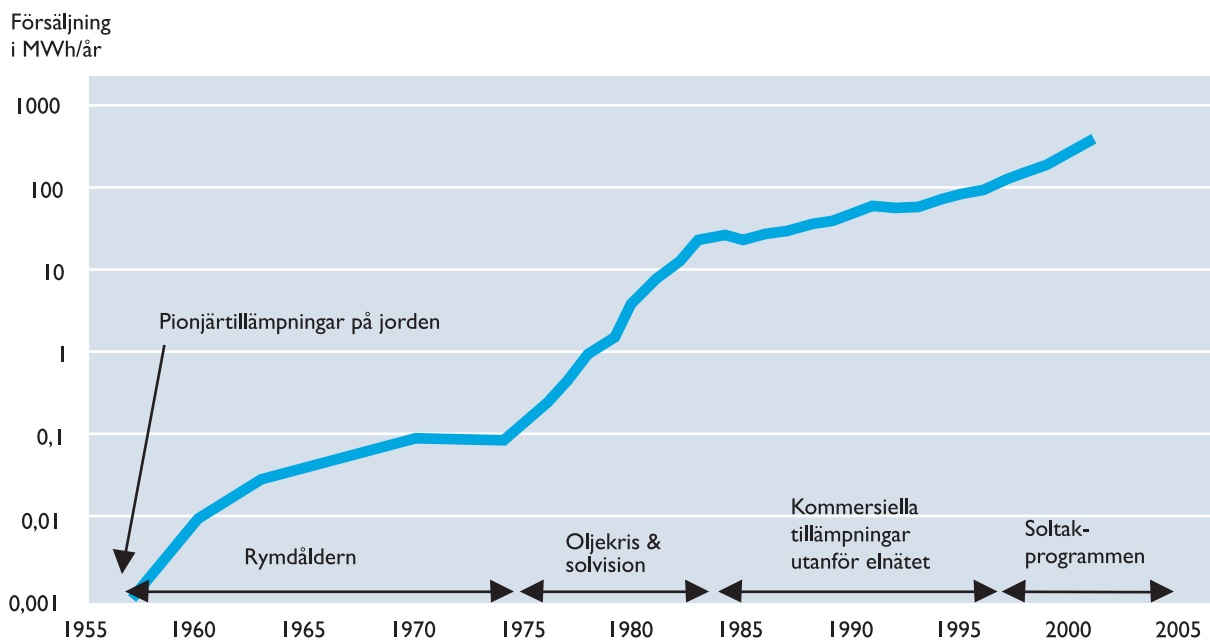
AMBITIONERNA PÅVERKAR TILLVÄXTAKTEN

Tillverkningen av solceller för elproduktion har ökat snabbt under de senaste decennierna. Trots den imponerande accelerationen i tillverkningstakten är den

totala nivån ännu liten. De dryga 1000 MW elektrisk effekt som alla installerade solceller maximalt kan producera är bara en tjugondel av motsvarande mått för världens samtliga installerade vindkraftverk.

Om utvecklingen beskrivs i en logaritmisk skala, som i diagrammet nedan, framträder bilden av olika skeden som präglas av varierande ambitioner. Under 1960-talet skedde en utbyggnad för rymdindustrins behov. Under 1970-talet började satsningar som såg solen som ett rimligt alternativ för samhällelig energiförsörjning och solcellstillverkningen ökade med över 80 procent per år. I mitten på 1980-talet var oljan billig och intresset för hållbar energiförsörjning lågt. Solcellstillverkarna var hänvisade till en utbyggnad baserad på de tillämpningar som redan var kommersiella, dvs sådana system där solelen ersatte dyr elöverföring.

Under förra seklets sista decennium fick solcellsbranschen åter stimulans av statliga satsningar. I främst Japan och Tyskland startade byggandet av ett stort antal solcellsanläggningar på hustak som kopplades till elnätet. Dessa stödprogram har minskat kostnaden för installation och kringutrustning. Tack vare satsningarna byggs nu större solcellsfabriker och produktionen



Solcellstillverkningens utveckling. Obs att skalan är logaritmisk.

växer med cirka 35 procent per år. Detta skapar utrymme för skalekonomi och minskade modulkostnader.

BRA MILJÖPRESTANDA ALLT VIKTIGARE FÖRDEL

Konvertering av solstrålning till el och värme i solceller respektive solfångare innebär inga kemiska omvandlingar och medför inga utsläpp som skadar miljön. Byggandet av solceller och solvärmepaneler, liksom återvinningen av dem när de tjänat ut, kan dock orsaka miljöskador vilket om det inte beaktas på sikt kan begränsa solenergens spridning.

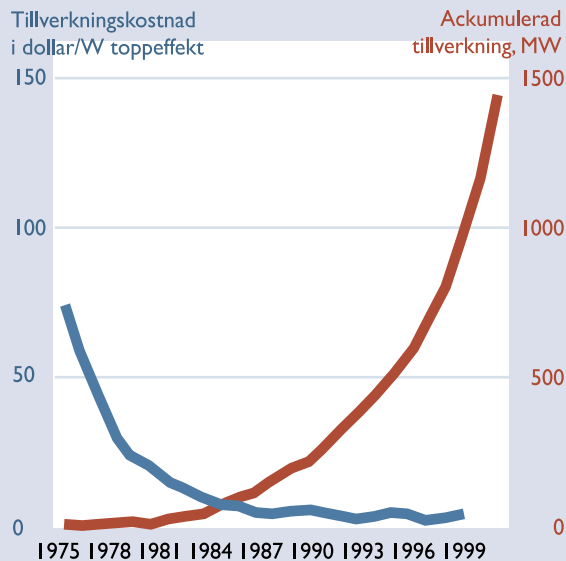
Storleken på dessa problem är liten jämfört med andra energialternativ. Energi- och materialanvändningen vid cell- och absorbatortillverkning har minskat och förväntas minska ytterligare i förhållande till den mängd elektrisk respektive termisk energi systemen senare levererar. Världens solceller består i dag till största delen av kisel som är jordskorpan vanligaste grundämne och som inte förknippas med några resurs- eller miljöproblem.

Tunnsfilmer ger utrymme för minskad energianvändning i produktionen. Vissa typer av tunnsolceller baseras dock på ovanliga metaller som indium och tellur. Tillgången på dessa metaller är tillräcklig för att försörja en stor industri men förmodligen för liten för att just dessa tekniker skall kunna svara för större delen av världens energiförsörjning. Storskalig användning av vissa solceller kan alltså begränsas av resursbrist eller ge upphov till miljöproblem förknippade med metallutvinning. Materialbegränsningar är således en faktor som inte hindrar solenergiutvecklingen i sig men som bör påverka de teknikval som kommer att göras de närmaste åren.

Massproduktion pressar priset

En stor fördel med solceller (liksom med solfångare) är att de till skillnad från stora kraftverk går att massproducera. Storleken på varje tillverkningsenhet är av avgörande betydelse för produktionskostnaden. I en fabrik som årligen tillverkar solceller med en sammanlagd topp-effekt på 500 MW skulle man enligt en EU-studie kunna få ner modulpriset till 10 kronor per W topp-effekt. I kombination med billigare systemkomponenter kan sådana moduler producera el till en kostnad i nivå med dagens konsumentpriser i många länder i världen.

Det kostar 10 miljarder kronor att bygga en sådan anläggning. Jämför detta med de årliga skatterna på energi i Sverige på cirka 50 miljarder kronor eller med den brittiska regeringens subvention till kärnkraftbolagen för hantering av kärnavfall på mellan 100 och 500 miljarder kronor.



För varje fördubbling av produktionsvolymen minskar tillverkningskostnaderna med cirka 20 procent.

Solenergiteknik ur ett industriperspektiv

För solenergi finns det ingen motsättning mellan energi- och industripolitiska målsättningar. Det är i stället tvärt om. För industriell utveckling krävs en marknad och skapandet av marknader underlättas om det finns en kompetent och inflytelserik produktionsindustri.

För svenskt vidkommande bör solceller ännu betraktas ur ett industripolitiskt perspektiv. För solfångare som har en större kortsiktig spridningspotential är de energi- och industripolitiska perspektiven mer likvärdiga.

LÄRDOMAR FRÅN TYSKLAND

Att solcellsmarknadens utveckling är starkt kopplad till solcellsindustrins utveckling visar exemplet Tyskland där det år 1997 såg riktigt mörkt ut för solcellsutvecklingen. Året innan hade den inhemska produktionen i stort sett upphört och nya satsningar på federal nivå lät vänta på sig. Avkastningen på två decenniers satsningar på forskning höll på att rinna ut i sanden och de två tyska solcellstillverkarna ASE och Siemens expanderade i stället i USA.

Samtidigt lobbade de stora elbolagen för ett avskaffande av ”inmatningslagen”, som hade funnits sedan 1991 och som sade att producenter av förnybar el var berättigade till 90 procent av marknadspriset, dvs cirka 17 pfennig per kWh.

Till en början hade de stora elföretagen inte tagit notis om lagen men eftersom den möjliggjort en kraftig expansion av vindkraft började den bli kostsam. En parlamentarisk kommitté med 15 delegater utsågs att avgöra frågan, och lagen kom att behållas med åtta röster mot sju. Denna knappa majoritet blev avgörande inte bara för vindkraften utan även för den tyska solcellsindustrins explosionsartade utveckling.

17 pfennig/kWh var dock i sig långt ifrån tillräckligt för att öka efterfrågan på solceller. Efter hot om att flytta all verksamhet till USA fick ASE ett löfte om framtida tyska satsningar och startade en ny fabrik med kapacitet

på 20 MW topp effekt per år. Efter dialog med politiker valde även Shell att lokalisera sin första solcellsfabrik till Tyskland.

I januari 1999 sjösatte så den nya röd-gröna koalitionsregeringen ett program som genom investeringsstöd och låga räntor syftade till att täcka 100 000 tak med solceller till år 2010.

Programmets effekt blev inte så stor som man hade hoppats men inspirerade av lokala stödprogram lyckades de gröna få med sig socialdemokraterna (SPD) på en ändring av inmatningslagen i mars 2000. Ersättningen för produktion av förnybar el frikopplades från elpriset och kopplades i stället till produktionskostnaden, så kallad kostnadstäckande prissättning. Elen från solcellsanläggningar installerade år 2000 skulle ersättas med 99 pfennig/kWh i 20 år. Ersättningen för nya anläggningar skulle sedan trappas ner med fem procent per år för att pressa tillverkningskostnaderna och systempriserna. Som ett resultat av de två stödprogrammen mer än femdubblades marknaden i Tyskland på tre år, från 12 MW 1998 till 65 MW 2001.

Den växande marknaden medförde ökad specialisering. Nya aktörer dök upp och gamla utökade sin verksamhet. ”Nedströms”, det vill säga tillämpningsnära, utvecklade glastillverkare som Flabeg (tidigare Pilkington) och taktillverkare som Lafarge fasad- och takintegrerade solcellsmoduler. Deras verksamhet ledde till utbildning av arkitekter och elektriker i byggande med solceller. ”Uppströms” dök nya solcellstillverkare upp, av vilka en del baserade sin verksamhet på nya tunnfilmmaterial som koppar-indium-diselenid (CIS) och kadmium-tellurid (CdTe). I april 2001 beslöt ASE att expandera sin produktionskapacitet i Alzenau från 20 till 80 MW/år.

Tyskland var nu, jämsides med Japan, motorn i solcellsindustrins utveckling. Den beskrivna vändningen sprang dock inte fram ur intet, utan möjliggjordes av en process som påbörjats minst ett par decennier tidigare.

För att förstå denna process och för att kunna dra generella lärdomar av fallet kan man anlägga ett teoretiskt perspektiv kallat ”teknologiska system”, innovations-system centrerade kring en teknik. Ett teknologiskt system är uppbyggt av aktörer och deras kompetens, nätverk och institutioner (inklusive normer och regleringar). För att ett teknologiskt system, exempelvis solceller i Tyskland, skall kunna växa måste systemet uppvisa ett antal funktioner. Systemet solceller i Tyskland analyseras här utifrån fem olika funktioner:

- Skapande av ny kunskap.
- Styrning av i vilken riktning aktörer söker ny kunskap och teknik.
- Tillförsel av resurser såsom kompetens, kapital och råvaror.
- Skapande av positiva externa effekter, dvs enskilda aktörers kostnader och osäkerhet minskas genom att aktörer i ett nätverk delar information, kostnader och risker.
- Skapandet av marknader.

Om dessa funktioner samverkar bildas goda cirklar och systemet skapar sina egna förutsättningar för tillväxt. Utifrån hur väl de olika funktionerna har tillgodosetts kan utvecklingen av det teknologiska systemet för solceller i Tyskland indelas i två perioder:

En förberedande period sträckte sig fram till år 1989.

Under 1960-talet började Siemens och Telefunken att tillverka solceller för satellittillämpningar. Som ett svar på oljekrisen och den gröna rörelsen startades federala forskningsprogram i slutet på 1970-talet. Under 1980-talet finansierades forskning och utveckling på inte mindre än 18 universitet, 39 företag och 12 forskningsinstitut. Ett fåtal demonstrationsanläggningar byggdes. Under perioden sågs även ett organiserat stöd för förnybar energi växa fram:

- För det första klassiska miljöorganisationer med medlemmar ur den miljöintresserade allmänheten (tex Förderverein Solarenergie).
- För det andra branschorganisationer för solenergiföretag.
- För det tredje Eurosolar; en organisation av politiker från flera olika partier som vill verka för förnybar

energi. Under perioden började nätverk skapas men det är främst funktionerna tillförsel av resurser, skapande av kunskap och guidning av industrins intresse som tillgodoses under perioden. Det teknologiska systemet haltar och de goda cirkelarna syns ännu inte.

Under 1990-talet breddades kunskapsbasen. Vid sidan om teknik för att använda kristallint kisel understöddes ett antal tunnfilmstekniker. I det politiska efterspelet till Tjenobyl-olyckan inleddes 1990 det sk 1000-taksprogrammet som resulterade i 2200 nätanslutna, takmonterade solcellssystem. Programmet ledde till en stor kunskapsuppbyggnad vad gäller kringutrustning och installation men det var för litet för att motivera en expanderad solcellsproduktion.

1991 antogs den ”kostnadstäckande inmatningslag” som Förderverein Solarenergie och Eurosolar lanserat 1989 och som garanterade producenterna av förnybar el en ersättning med 90 procent av marknadspriset. Ytterligare ett genombrott gjordes 1994 då staden Aachen införde kostnadstäckande prissättning för solel med en ersättningsnivå på två DEM/kWh, vilket spreds till över 40 andra städer.

Dessa lokala program upprätthöll marknaden men någon större expansion skedde inte och såväl ASE som Siemens övervägde att koncentrera tillverkningen till USA. Avkastningen på två decenniers satsningar såg ut att rinna ut ur Tyskland.

Vändningen är möjlig tack vare två decenniers uppbyggande av en mängd aktörer med intressen och kunskap kring solcellstillverkning och om tillämpningen. Dessutom hade en mängd kompletterande nätverk växt fram. Det är nätverk mellan företag, mellan företag och politiker, mellan fristående organisationer och politiker och mellan politiker från olika läger. Dessutom banade institutionella experiment på lokal nivå (Aachen-modellen) väg för en lag om kostnadstäckande pris på federal nivå. När funktionen ”skapa marknader” trädde in på allvar i slutet på 1990-talet styrdes industrins intresse mot solceller. Nya resurser fördes in genom växande privat finansiering och ny kunskap tillfördes från nya aktörer såsom taktillverkare och arkitekter. Med tillväxten blir påtryckningsgrupper starkare och får större möjlighet att slå vakt om den gynn samma lagstiftningen.

Under perioden från 1990 och framåt ser vi således hur ett mer balanserat teknologiskt system växer fram. Självförstärkande processer, eller goda cirklar, börjar skönjas. Men ännu är utvecklingen av den tyska, och därmed den europeiska, solcellsindustrin helt beroende av det institutionella ramverket, vilket i sin tur är känsligt för politiska strömningar och maktförskjutningar.

En viktig lärdom är den nyckelroll olika påtryckningsgrupper haft för att legitimera solceller och förändra det institutionella ramverket. En utmaning för det politiska systemet är att möjliggöra för grupper med ny teknik att komma till tals utan att de blockeras av starka aktörer med intressen i det bestående.

En andra viktig observation är längden på läroperioden. Att skapa nya industrier som kan konkurrera med etablerade tar flera decennier. Således måste politiken skapa utrymme för lärande genom långsiktig satsning på forskningsmiljöer och, vilket är minst lika viktigt, genom att skapa långsiktigt stabila och växande marknader.

En tredje observation är att det ännu råder stor osäkerhet om vilken teknik som är mest lovande. Satsningen på flera tekniker minskar risken att man satsar på fel häst, men även till att utvecklingen mot standardisering och specialisering och därmed lägre kostnader för produktionsteknik går långsammare. Underlaget för en bärkraftig industri som tillverkar maskiner med vilka man kan tillverka solceller och moduler är fortfarande svagt. Den svåra utmaningen för policy och företagsstrategi består här i att balansera volym och snabb kostnadsreduktion mot bibehållen mångfald.

En fjärde observation är den betydelse som lokala initiativ och lokala eldistributörer (Stadtwerken) haft för den tyska utvecklingen.

Solcellsklädd fasad i Tyskland.

Foto: Michael Rosenfeld/Pressens Bild



Slutsatser

Potentialen för solenergi är enorm. Ett antal olika tekniker för dess användning finns i dag kommersiellt tillgängliga och ny teknik utvecklas i världens laboratorier för framtida användning. Såväl solvärme som solel har i dag små men växande kommersiella marknader. Tillverkningskostnaderna sjunker vilket gör att efterfrågan ökar. När tillverkningstakten växer sjunker kostnaderna.

Solenergiteknikernas kostnader sjunker betydligt snabbare än kostnaderna för etablerade energitekniker. Solenergiindustrin kommer att växa och den ur industriellt perspektiv obegränsade solenergitillgången gör att den kan bli mycket stor. Hur snabbt detta sker beror dock på om etableringshinder undanröjs och stabila marknadsstödjande åtgärder införs i fler länder.

SOLENERGIINDUSTRIN VIKTIGARE ÄN SOLENERGIN

Direkt el och värmeproduktion från solstrålning kommer inte att räknas till de större energikällorna under de kommande två decennierna. I dag är det bara system för att göra el från vindenergi och bioenergi som kan byggas ut i samma takt som kärnkraftverk eller fossilbaserade el- och värmeanläggningar.

Men redan innan solenergin blir en stor energikälla kommer solenergiindustrin bli en stor del av energindustrin. En stor del av den energitekniska utveckling-

en kommer också att bedrivas inom solenergiindustrin.

Redan i dag är solceller viktiga komponenter i andra elektroniska produkter. Solenergin kan bli så stor att dess egenskaper präglar energisystemets struktur. Utvecklingen av byggtekniska komponenter och bärbara elektroniska apparater kan också inkludera solenergiteknik. Därför kan kompetens inom solenergiindustrin också stödja annan industriell verksamhet.

Såväl nationer som stora företag, främst oljebolag, elproducenter och elektronikföretag, satsar på att behärska denna växande industri. Det sker genom att man investerar i forskning, utveckling och demonstrationsanläggningar. Länder som vill ha denna kompetens inom landet utvecklar regler och subventioner som skapar nischmarknader som drar till sig aktörer som bygger upp kunskap och erfarenheter.

SVENSK SPETSKOMPETENS

I Sverige finns det spetskompetens inom vissa teknikområden för solenergiomvandling. Om satsningar på forskning och utveckling balanseras med åtgärder som skapar stabila och växande marknader för solvärme och solel i Sverige kan en industri växa upp kring denna kompetens. Kostnaden för ett sådant program skulle vara måttlig och vinsten potentiellt mycket stor. En svensk satsning skulle även ge ett tydligt bidrag inom ett område av största betydelse för en strävan att globalt åstadkomma hållbar industriell utveckling.

Referenser

Aquasol: <http://www.aquasol.nu/>

Andersson, B. A. (2001). *Material constraints on technology evolution: the case of scarce metals and emerging energy technologies*. Department of Physical Resource Theory. Chalmers University of Technology and Göteborg University. Göteborg, Sweden

Andersson, B.A. *Konsten att bygga en solcellsindustri: Lärdomar från Tyskland*, Miljösystemanalys, Chalmers tekniska högskola, 2002

Andrén, L. *Solenergi – Praktiska tillämpningar i bebyggelse*, AB Svensk Byggtjänst 2001 ISBN: 91-7332-967-3

Bernhoff, H., *Review of electric energy storage*, STEM, 2002.

Brogren, M., *Low-concentrating photovoltaic systems with parabolic reflectors*, licentiatavhandling i fasta tillståndets fysik, Uppsala universitet, 2001, ISSN 0346-8887

Bruton, T. M., *Multi-Megawatt Upscaling of Silicon and Thin Film Solar Cell and module manufacturing*, 1996

Dalenbäck, J. O., *Energy in Sweden. Leading the way to a sustainable future?*, Refocus September/October 2002. Energifakta, AB Svensk Energiförsörjning

Elforsk AB: http://www.elforsk.se/varme/varm-sol_2000.html

Elforsk AB, Solel 00-02. Tillämpat program för solcellssystem, Årsrapport 2001, Elforsk rapport 02:02

Energibanken: <http://www.energibanken.se>

Energimyndigheten: <http://www6.stem.se>

GPV: <http://www.gpv-solar.com>

Green, M., *Solceller. Från ljus till elektricitet*. Svensk bearbetning av Andersson, M. och Hedström, J., Svensk byggtjänst, 2002

IEA (2001), *International Energy Agency. Trends in Photovoltaic applications in selected IEA countries between 1992 and 2000*.

Jacobsson, S., Andersson, B.A. och Bångens, L., *Transforming the energy system – the evolution of the German technological system for solar cells*, under tryckning i *Technology Analysis & Strategic Management*, 2002

Kellner, J. och Levin, P., *Kan styrmedel utformas för att påskynda energihushållning i byggande, renovering och ombyggnad?* ur *Effektivare energi i bostäder. En antologi om framtidens styrmedel*, Boverket, Energimyndigheten, Naturvårdsverket, 2002

Kjellsson, E., 1999: *Potential for Building Integrated Photovoltaics Study for Sweden. Report 1*. Area of building Envelopes. Report TVBH-7211 Byggnadsfysik, LTH, Lund

KPMG, *Solar Energy: from perennial promise to competitive alternative*, 1999

Maycock, P.D (1996): *Photovoltaic technology, performance, cost and market*, *Photovoltaic Energy Systems*, Catlett, VA, USA

Pohl, H., *Solceller i Tyskland och Holland*, Sveriges Tekniska Attachéer, Berlin, 2000

SEAS: <http://www.hvac.chalmers.se/seas>

Solgruppen: <http://www.solgruppen.se>

Weiss, W. och Faninger G. *Solar Thermal Collector Market in IEA Member Countries*, 2002

Ångström Solar Center: <http://www.asc.angstrom.uu.se>

El och värme från solen

Denna faktagrapport behandlar utveckling av tekniker för direkt omvandling av solenergi till el och värme.

Den solenergi som träffar döda ytor på jorden är många gånger större än mänsklighetens energianvändning. Det finns material för att bygga solfångare och solceller som skulle klara hela samhällets energiförsörjning utan att förgifta eller tränga undan natur.

Teknisk utveckling ger allt högre verkningsgrader och lägre kostnader. Mängden el-producerande solceller växer i accelererande takt från en ännu låg nivå. Solvärme är redan en betydande källa till varmvatten i många länder. Var i världen marknaden och tillverkningsindustri utvecklas beror på politiskt fastställda regler.

När solfångarna byggts ut maximalt för varmvatten kan vi i Sverige fortsätta öka solfångarytorna för att värma byggnader. Solvärmeindustrin har därför en viktig roll för Sverige. Solceller står inför en global expansion och är en viktig industripolitisk fråga. För att forskningsresultat skall användas för att bygga en konkurrenskraftig svensk solcellsindustri behövs en lokal solcellsmarknad med krävande kunder.

Energiframsyn Sverige i Europa

Kungliga Ingenjörsvetenskapsakademien, IVA, är en oberoende arena för kunskapsutbyte.

Genom att initiera och stimulera kontakter mellan olika kompetensområden och över nationsgränser fungerar akademien som gränsöverskridande brobyggare mellan näringsliv, forskning, förvaltning och olika intressegrupper.

IVA-projektet »Energiframsyn Sverige i Europa« belyser det svenska energisystemet ur framför allt ett europeiskt men även ett globalt perspektiv. Det europeiska är viktigt mot bakgrund av pågående avregleringar och genom att el- och gasnät knyts samman i allt större regioner. Klimatfrågan motiverar ett globalt perspektiv.

Genom att blicka framåt i tiden vill IVA stimulera till intressanta och balanserade diskussioner genom att ge nya insikter och tankeväckande men trovärdiga och realistiska framtidsbilder av det svenska energisystemet som en del av Europas.

Energiframsyn vänder sig till beslutsfattare inom förvaltning, näringsliv och forskning men också till en vidare krets av personer, som arbetar med eller intresserar sig för energifrågor. I detta arbete har en skriftserie om ett antal populärt hållna rapporter med dagens fakta och med en bedömning av utvecklingen i ett 20-årsperspektiv tagits fram för att ge underlag till Energiframsyns framtidsbilder. Denna skrift ingår i serien Energiframsyns Faktagrapporter.

