

Statusrapport for Solcelleanlæg

Juli 1999

Ivan Katic

SolenergiCenter Danmark

1. Introduktion

Decentral elproduktion fra solcelleanlæg har i de senere år fået stor opmærksomhed, på trods af at solceller stadig er for dyre til at konkurrere direkte med netbunden elektricitet. En af grundene til dette er at solcelleanlæg på forholdsvis enkel vis lader sig montere eller integrere i byggeriet hvor det upåagtet kan producere elektricitet i 25-30 år. Ved en storstilet udnyttelse af de egnede tagflader på landets bygninger vil man kunne dække 15-20% af det nuværende elforbrug, og for den typiske enfamiliebolig vil der på årsbasis kunne opnås 100% dækning. Energimæssigt er den medgående energi til opførelse af et komplet solcelleanlæg tilbagebetalt på ca. 5 år med nutidens teknologi. Det er derfor relevant at se på mulighederne for at installere solceller i fremtidens nybyggeri.

Denne redegørelse beskriver de senere års tekniske udvikling på området, og giver et bud på ydelsen og økonomien i fremtidens solcelleanlæg.

2. Anlægs kategorier

Solceller i byggeriet kan tænkes udnyttet på tre principielt forskellige måder:

- Direkte drift af egnede applikationer (ventilatorer, pumper, køleanlæg) hvor der er et sammenfald mellem behovet og solintensiteten
- Opladning af akkumulatorer som herefter kan drive jævnstrømsapplikationer, eller ved hjælp af en vekselretter, 230 Vac udstyr. Batterierne kan evt. være lokaliseret i en elbil.
- Direkte indføddning af den producerede energi til elnettet med en vekselretter.

Direkte drift af DC udstyr er interessant i forbindelse med solvarme-cirkulationspumper eller ventilatorer, men der kan kun blive tale om at dække en meget beskedent del af det samlede elforbrug. Fordelen ligger mest på installationssiden, hvor man kan spare på styring og kabler. Det har også været foreslået at bruge solceller til at supplere apparater som PC'ere, fjernsyn, radio o.s.v. med jævnstrøm (som de er bygget til) og dermed spare tab i strømforsyningerne. Til gengæld skal der så sidde en central ensretter ved elnettets indgang til huset.

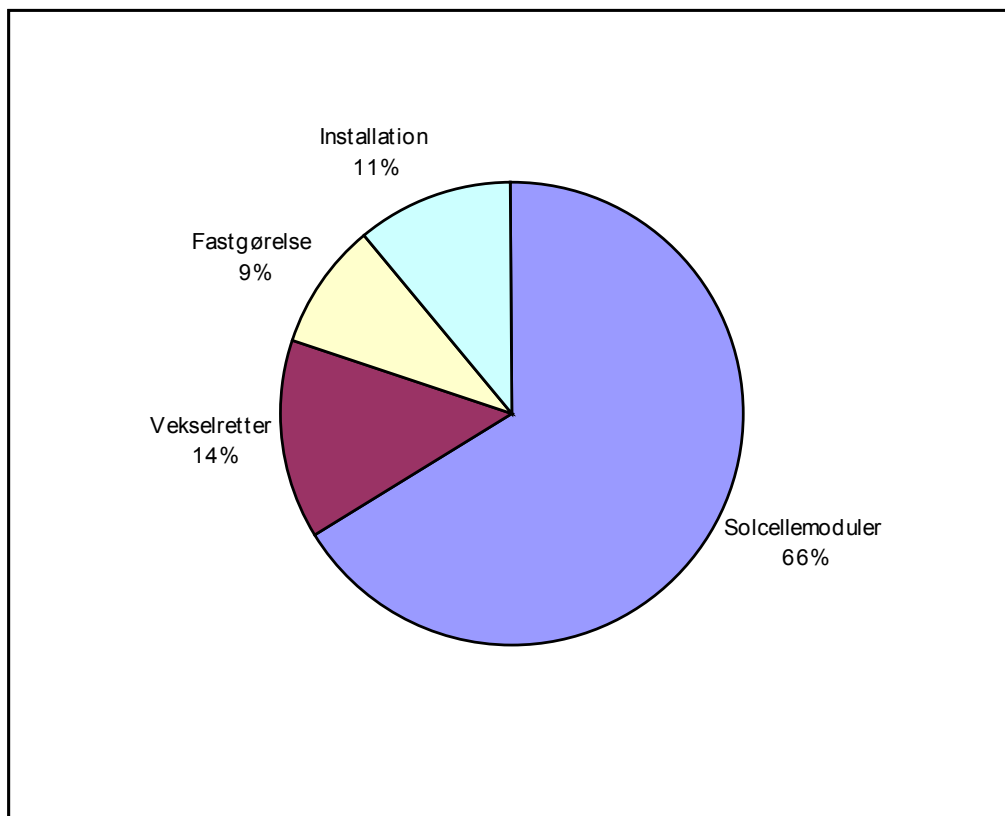
Anlæg med batterier som energilager er næppe af større interesse, idet batterier idag både er for dyre og dårlige til at konkurrere med elnettet som findes næsten overalt. For afsides beliggende boliger er det dog en reel mulighed, da det koster mange penge at lægge et kabel ud til en enkelt forbruger.

Tilslutning til elnettet er idag en gennemprøvet og enkel måde at udnytte solceller på. Et typisk anlæg til et enfamiliehus er på 2-5 kW solcelleeffekt med 20-50 m² solceller og er

tilkoblet elnettet med en eller flere vekselrettere. Det er nu i begrænset omfang tilladt at bruge nettet som gratis lager, idet måleren løber baglæns hvis produktionen overstiger forbruget. Produktionen af solcellestrøm er størst i sommerhalvåret, hvor der ikke er så stort behov for varmen fra kraft/varme anlæggene, og disse kan derfor drosles ned. Selv ved en massiv udbygning med solceller vil der derfor ikke være større problemer med regulering eller lagring. Da strømmen typisk produceres i decentrale enheder er der normalt heller ikke behov for netforstærkning.

Under danske forhold kan et nettilsluttet solcelleanlæg levere op til 0,9 kWh for hver watt installeret effekt, mens anlæg med batterilager vil yde mindre pga. større omsætningstab. De sidste årtier er prisen pr installeret watt blevet halveret for hver syvende år, men hvor længe denne reduktion kan fortsætte er svært at gætte. Større produktionsvolumen og udvikling af simple produktionsprocesser er den mest sandsynlige vej frem mod målet. En væsentlig begrænsende faktor på prisreduktionen er omkostningerne til glas, aluminium, kabler og følgedstyr som ikke kan forventes at falde så kraftigt i pris som selve cellerne.

Omkostningsfordelingen for typiske nettilsluttede anlæg er følgende:



Figur. Omkostninger for et 100 kW nettilsluttet anlæg. For mindre anlæg falder modulernes andel noget.

3. Solcelletyper

Følgende celletyper vurderes at være relevante i forbindelse med bygnings elforsyning i år 2010:

- Krystallinsk silicium
- Amorft silicium
- CdTe
- CIS og CIGS
- Elektrokemiske solceller
- Termofotovoltaiske celler

De solceller som findes på markedet i dag er næsten alle baseret på silicium i mono- eller polykrystallinsk eller amorf (ikke-krystallinsk) tilstand. Siliciumsolceller har en arbejds-spænding på ca. 0,5 V og en strøm på typisk 3-4 A.

Monokrystallinske solceller er som standard sorte eller grå med ensartet overflade, og er "født" cirkulære, men ønskes en særlig tæt pakning i det færdige modul kan de udskæres i kvadrater. De enkelte celler er påført et metalgitter som kontaktnet på oversiden og en massiv leder på bagsiden. Monokrystallinske celler har den bedste virkningsgrad (ydelse pr. kvadratmeter), men afhængig af hvor tæt cellerne er pakket vil den effektive modulvirkningsgrad være en del lavere.

De monokrystallinske celler fremstilles ved at trække én stor krystal i form af en cylinder op af et smeltebad med silicium. Cylinderen skæres herefter op i tynde skiver som gennemgår en lang række kemisk/fysiske processer som leder frem til den færdige celle. Denne celletype har været produceret i 30 år, og man har nu nået en grad af forfining, så prisfald fremover først og fremmest vil ske på grundlag af opskalering af produktionsapparatet.

Polykrystallinske siliciumceller findes ofte i blålige nuancer, og i kvadratisk form (efter støbeformen). De enkelte krystaller tilbagekaster lyset forskelligt efter deres orientering, hvad der giver en "levende" overflade. Virkningsgraden er lidt dårligere end for monokrystaller, men pakningen i modulet er gerne tæt, hvad der delvis kompenserer for dette forhold. Råmaterialet til de krystallinske celler består af en støbt siliciumblok med kvadratisk tværsnit. Man undgår altså den komplicerede trække-proces og får mindre materialespild end ved de runde mono-krystaller. Denne celletype er ligeså veldokumenteret og gennemprøvet som den foregående.

Eksempler på variationer af krystallinske siliciumceller er båndformede solceller, hvor solcellen formes direkte fra smeltebadet, så man slipper for efterfølgende at skære i skiver. Der er også udviklet celler hvor et tyndt lag mikrokrystallinsk silicium gror direkte ovenpå et billigt substrat. Disse og andre forbedringer er medvirkende til at mange stadig holder fast i den krystallinske siliciumteknologi, selv om nye typer som er mere velegnede til masseproduktion presser sig på.

Solceller baseret på *amorft silicium* er konstrueret helt anderledes end de ovennævnte typer. Her er de aktive lag dampet direkte på glasfladen, og herefter opdelt i enkelte cellestrimler mekanisk eller med laser. Der er ingen metalliske kontakter på forsiden, da lederen er en transparent oxid-film. De aktive lag er meget tynde, undertiden delvis transparente,

og materialeforbruget er meget beskedent. Disse såkaldte tyndfilmsceller kan også indkapsles i plast i stedet for glas, og kan da gøres fleksible. Virkningsgraden er typisk under det halve af de krystallinske cellers. Denne type solceller bruges især meget i lommeregner, ure og andre småapparater, men efterhånden også i større moduler. Farven er typisk rødbrun til sort. Tidligere har stabiliteten været et stort problem, men der fabrikeres nu standard moduler (med såkaldte triple-junction celler) med 10 års garanti.

Siliciumcelle, type	Laboratoriecelle	Bedste moduler	Typiske moduler
Monokrystallinsk	23,2	14,5	12
Polykrystallinsk	17,8	12,9	10
Amorft (tyndfilm)	13,5	9,1	5

Tabel 1: Maksimal virkningsgrad i %. Status for siliciumceller og moduler

Der forgår en intens forskning med henblik på at fremstille solceller af andre bedre eller billigere materialer end silicium, herunder gallium, arsen, indium og andre eksotiske grundstoffer. De vigtigste er gennemgået i det følgende.

Solceller af *Cadmium-Tellurid* har traditionelt været brugt til lommeregner o.l. men kan også fabrikeres i større enheder ved en relativt simpel proces. I praksis har det dog vist sig vanskeligt at opnå gode virkningsgrader ved større moduler, fordi der kræves en meget ensartet struktur som er svær at kontrollere over et større areal. Man har således opnået over 15% effektivitet på små celler, mens moduler snarere ligger på 6-8%. Cadmiumindholdet i denne celletype vækker en vis bekymring selvom der er tale om små mængder. Særligt i tilfælde af brand vil cadmium kunne spredes i omgivelserne.

Solceller af *CIS* (Copper-Indium-diSelenide) eller *CIGS* (Copper-Indium-Gallium-diSelenide) er nok den mest produktionsmodne tyndfilm celletype efter silicium. Siemens Solar fremstiller allerede små moduler på 10-20 W, og det er sandsynligt at størrelsen vil forøges i takt med de indhøstede produktionserfaringer. Fremstillingen er relativt kompliceret, til gengæld kan man opnå gode virkningstrader (18% for celler) og en god stabilitet.

Den elektrokemiske titan-dioxid/jod solcelle fra Schweiz er et eksempel på en fundamentalt anderledes solcelle, som viser at der endnu er store muligheder for at videreudvikle og billiggøre solceller de næste mange år.

Der er i laboratoriet fabrikeret celler med 10-11% effektivitet, det lyder måske ikke imponerende, men der er tale om en potentielt meget billig fremstillingsproces. Der mangler dog endnu en overbevisende dokumentation af holdbarhed og skalerbarhed til større moduler. SolEnergi Center Danmark er i gang med et projekt vedrørende elektrokemiske celler.

Termofotovoltaiske celler er beslægtede med egentlige solceller men er designet til at udnytte det infrarøde lysspektrum fra f.eks en gasflamme. De er oprindeligt udviklet som nødgeneratorer til militært brug, men finder nu også anvendelse i afsides beliggende boliger hvor man ønsker en samtidig produktion af el og varme med et enkelt og robust aggregat. Brændkammeret i en gasovn kan fores med disse celler, som herefter kan oplade et batteri eller f.eks forsyne en cirkulationspumpe i varmeanlægget. Den elektriske effekt fra kommercielt tilgængelige enheder ligger på et par hundrede watt. I Sverige forskes der i at udnytte biobrændsel til elproduktion ud fra dette princip.

	Krystallinsk Si		Amorft Si		CdTe		CIS	
	Nu	Fremtid	Nu	Fremtid	Nu	Fremtid	Nu	Fremtid
Energi tilbagebetaling år	3-4	1-2	4-5	1-2	1-2	0-1	2-3	0-1
Ressourcer	+/-	+	++	++	+	+	-	-
Emissioner	+	+	++	++	-	+/-	+/-	+
Sikkerhed/sundhed	+	+	+/-	+/-	+	+	+/-	+/-
Genanvendelse	-	+/-	++	++	-	-	-	-

Tabel. Miljøvurdering af solcellemoduler med fire forskellige produktionsteknologier (Kilde: Utrecht Universitet)

4. Billiggørelse

Nye processer. Indenfor de kendte solcelletyper arbejdes der med nye processer for at forbedre pris/ydelsesforholdet. Bl.a. er der på DtU udviklet en højeffektiv solcelle uden de sædvanlige forsidekontakter, som normalt skygger for en del af det aktive areal. Indenfor tyndfilm-solceller arbejdes der med at forbedre virkningsgraden ved hjælp af flerlags-konstruktioner som udnytter hver sit bølglængde-område. Tyndfilmsolceller vil i fremtiden kunne købes i folieform, og derfor let påføres alle slags produkter som biler, el-værktøj, vinduer med solafskærmning etc. En anden lovende udvikling består i produktionsmetoder som kan nyttiggøre urent silicium, som kan købes meget billigere end den nuværende råvare.

Grænsen for den mulige virkningsgrad for solceller angives normalt til ca. 40%, men det kan ikke udelukkes at opdagelse af nye mekanismer kan bryde denne foreløbige teoretiske grænse.

Billigere installation. Udbygning med nettilsluttede solcelleanlæg forventes først og fremmest at kunne ske ved decentral udnyttelse af tag- og facadearealer på eksisterende bygninger samt nybyggeri, da det er oplagt at forbedre økonomien i solcelleanlæg ved at lade solcellerne erstatte andre byggematerialer. Enkelte fabrikker i Japan og USA har allerede de første versioner af tagplader med indbyggede tyndfilmsmoduler klar til produktion. Dette er et eksempel på hvordan installationen kan foregå billigt og rationelt, nemlig i forbindelse med nybyggeri eller tagrenovering. Solceller er allerede i dag konkurrencedygtige med visse eksklusive typer facadebeklædning. Ny kabel- og stik systemer begynder også at komme frem, og muliggør derfor en forenklet og sikker montage sammenlignet med traditionelle metoder. Ved montage uden på eksisterende tagflader findes der i dag forskellige standard skinner-systemer, men det er ofte tidskrævende og vanskeligt at rette skinnerne op på en ujævn tagflade.

Der vil ved bygningsintegration kunne opstå en vis konkurrence med solvarme om udnyttelse af samme arealer, og det er derfor oplagt at søge en sammenkobling af de to teknologier. Der er gjort adskillige forsøg på at udnytte spildvarmen fra solceller i form af varm luft eller vand, men ingen overbevisende løsning er fundet. Det skyldes bl.a. den fundamentale kendsgerning at varmeproduktion ved en nyttig temperatur til brugsvand eller rumopvarmning vil øge solcellernes temperatur, hvorved de producerer mindre el, eller i værste fald tager skade.

Billigere/bedre vekselrettere. Vekselrettere er nødvendige ved nettilslutning af solcelleanlæg, og findes allerede i mange størrelser og versioner. Virkningsgrader over 90% er nu en realitet, og det er derfor snarere prisen end teknikken som er et problem. Tendensen går i retning af mange decentrale enheder, hvilket åbner op for en vis masseproduktion med prisfald til følge. Den ultimative decentralisering ses i den modulintegrerede vekselretter, som er indbygget i solcellemodulets klemkasse. Her kan modulet i princippet tænkes forhandlet som ethvert andet husholdningsapparat, idet det blot skal sættes i stikkontakten for at fungere. Moderne vekselrettere er normalt udstyret med kommunikationssoftware som er med til at diagnosticere eventuelle anlægsfejl. Spændingskvaliteten er fuldt på højde med elselskabernes krav.

6. Solcelleanlægget år 2010

På baggrund af den nuværende internationale F&U indsats, kan der realistisk i år 2010 tænkes ydelser for standardanlæg på 150 W/m² mod de nuværende 80-100 kWh/m², alene ved gradvise forbedringer af den nuværende teknologi. Ydelsen pr installeret effektenhed kan næppe forøges markant, da dette typisk vil kræve dyre reflektor- og solfølge-anordninger. Ydelsen kan dog på vore breddegrader med fordel øges ved aktiv køling med luft, som alligevel skal opvarmes i forbindelse med bygningsventilation. En ydelse på 900-1100 kWh el pr kW installeret effekt kan påregnes, hvortil kommer den nyttiggjorte del af varmen fra køleluften.

Prisen pr effektenhed er naturligvis behæftet med meget stor usikkerhed, men flere steder i udlandet er der planer om at producere solcellestrøm i direkte konkurrence med traditionelle kraftværker, ganske vist under gunstigere indstrålingsbetingelser. Den afgørende faktor for billiggørelse er masseproduktion, som først kan blive en realitet ved stor efterspørgsel, altså et hønen-og-ægget problem. De store forsknings- og udviklingsprogrammer i Japan, USA og Europa viser dog at man har tiltro til at solceller vil kunne levere konkurrencedygtig el i fremtiden.

Nødvendige forudsætninger for afsætning af nettilsluttede solcelleanlæg til private:

- Anlæggene kan købes som små enheder, så man ikke skal låne for mange penge på en gang
- Der appelleres til andre forhold end økonomi, f.eks. High-Tech, grøn el, smart arkitektur m.v.
- Elselskabet garanterer en passende afregning for den leverede strøm over 10-20 år

Pris (ex. moms) og årlig ydelse		Status 1999	2010 Naturlig	2010 Mulig
<i>Moduler</i>	<i>Kr/Wp</i>	30-50	10-25	8-15
	<i>Kr/m²</i>	3000-6000	1500-4000	1200-3500
<i>Samlet, små anlæg</i>	<i>Kr/Wp</i>	60-100	25-50	15-25
	<i>Kr/m²</i>	6000-10000	3000-8000	2500-5000
<i>Samlet, store anlæg</i>	<i>Kr/Wp</i>	40-60	15-25	12-20
	<i>Kr/m²</i>	4000-6000	2500-5000	2000-4000
<i>System udbytte</i>	<i>kWh/kWp</i>	800	900	1000
	<i>KWh/m²</i>	40-100	80-150	100-200

Estimeret udvikling ved naturlig og forceret udvikling. (Wp =peak- eller spidseffekt). De laveste ydelser pr. arealenhed gælder for de billigste anlæg pr. arealenhed og omvendt.

Prisudviklingen er stærkt afhængig af markedsprisen på silicium, herunder hvornår der opføres nye store siliciumfabrikker. Gennembrud for alternative materialer (specielt tyndfilm) vil mindske denne sårbarhed overfor en enkelt råvare.

6. Hvor skal der satses?

Solcellemoduler er veludviklede med en dokumenteret holdbarhed på 20-40 år, men der mangler endnu en del udvikling af rationelle montage-metoder og af vekselrettere, som er billige, driftssikre og effektive.

Der er desuden behov for at udvikle fleksible byggelementer med indbyggede solceller, som er tilpasset dansk byggeskik og arkitektur, herunder eventuelt elementer til kombineret el- og varmeudnyttelse.

Der bør lægges vægt på arkitektonisk gode løsninger, som præsenterer state-of-the-art på området, så det store spektrum af muligheder bliver præsenteret for potentielle brugere. Særligt tagløsninger er relevante, da det er her de store ubrudte og solåbne flader findes.

Referencer:

- | | |
|--|---|
| [1] Forschungsverbund Sonnenenergie, Köln: | Photovoltaik 2. Systemtechnik und Anwendungen |
| [2] VDI-Gesellschaft Energietechnik: | Photovoltaik |
| [3] DEFU | Solceller i dansk elforsyning, 1998 |
| [4] Cenergia Aps: | Integration af solceller i bygninger |
| [5] Ken Zweibel, NREL. | Progress in Photovoltaics |
| [6] Bent Sørensen | Fotovoltaisk Statusnotat, 1993 |
| [7] Ivan Kati m.fl. | Installation af Solceller, 1998 |
| [8] BPS centret | Solceller i tag og façade, 1999 |