Solceller

Dansk strategi for

forskning, udvikling, demonstration.

Del I - Baggrundsnotat

2016

i. Indhold

i. Indhold 2
ii. Forord 3
iii. Resumé 4
1. Indledning 5
2. Beskrivelse af teknologien 6
2.1. Introduktion 6
2.2. Solceller, moduler og anlæg - tendenser og anvendelser 8
2.2.1. Celler 8
2.2.2. Moduler 9
2.3.3. Andre hovedkomponenter – vekselretter og batteri 10
2.3.4. Anlæg og anvendelser 11
2.3.5. Andre forhold 12
3. Solceller internationalt 14
4. Solceller i Danmark 18
4.1. Ressourcen og det tekniske potentiale 18
4.2. Udviklingen af solceller i Danmark 20
4.3. Indpasning af solceller i det danske energisystem 22
4.4. Danske kompetencer, faciliteter og aktører 25
5. Referencer 28

ii. Forord

Danmark har som målsætning at nå en fossilfri energisektor i 2050. For at nå dette mål må det antages, at der bliver behov for en bred palette af VE-teknologier, herunder solceller.

Solcelleteknologi er en miljøvenlig VE-teknologi i høj vækst, som – med den forventede udvikling af dens økonomiske konkurrenceevne overfor alternativ elforsyning – må påregnes at få en afgørende betydning i fremtidens elforsyning. I Technology Road Map – Solar Photovoltaic Energy fra 2014 (ref.1) udtaler det Internationale Energi Agentur (IEA), at solcellerne globalt set kan blive én af de mest betydningsfulde, hvis ikke den mest betydningsfulde, el-producerende teknologi frem mod 2050.

Overordnet er målet, at den danske solcellestrategi skal medvirke til at understøtte dansk energipolitik og at sikre og udbygge danske kompetencer, som kan gøre sig gældende i forhold til udlandet, specielt EU.

Indsatsen inden for forskning, udvikling og demonstration af solcelleteknologi skal have til formål at øge solcellesystemers ydelse og levetid, samt reducere omkostninger ved fremstilling af komponenter og systemer samt installation af samme. Herved kan indsatsen bidrage til at forbedre solcelleanlægs konkurrenceevne i forhold til andre elproduktionsformer med henblik på, at installation af solcellesystemer kan blive samfundsøkonomisk og forbrugermæssig attraktiv, både i Danmark og internationalt.

Den danske indsats inden for forskning, udvikling og demonstration skal også understøtte de erhvervsmæssige potentialer, og virkemidlerne for forskning, udvikling, demonstration og udbredelse skal samordnes for at sikre et tilstrækkeligt og sammenhængende dansk aktivitetsniveau på området med sigte mod efterfølgende kommercialisering, herunder et rimeligt stabilt hjemmemarked for dansk industri. Nærværende strategi skal medvirke hertil.

Strategien og opfølgning heraf skal bidrage til at sikre, at de midler, der stilles til rådighed fra offentlig side til forskning, demonstration og udbredelse, anvendes effektivt og samordnet med industriens udviklingsindsats samt i tråd med de samfundsmæssige mål for energiområdet. Mål og perspektiver for indsatsen skal ses i sammenhæng med de danske F&U kompetencer og det industrielle engagement i solcelleteknologi.

Indsatsen inden for anvendelse og udbredelse skal have til formål at sikre et tilstrækkeligt og sammenhængende dansk aktivitetsniveau på området, således at den danske forsknings- og udviklingsindsats bliver et led i kæden der fører frem til kommercialisering og markedsdannelse.

iii. Resumé

Strategiens Del I, nærværende del, beskriver i tre hovedpunkter *teknologien* herunder hovedkomponenter, anvendelser samt udviklingstendenser, et *internationalt* overblik over solcelleteknologiens tekniske/økonomiske status og udviklingstendenser, et overblik over solcelleteknologiens *danske* potentiale, udvikling, indpasning i el- og energisystemet samt kompetencer og aktører.

Det fremgår, at solcelleteknologien i Danmark har et stort potentiale. Den lader sig let indpasse i et fremtidigt el- og energisystem. Desuden supplerer den vindenergi og bliver fortsat mere konkurrencedygtig. Teknologien kan understøtte og udbygge danske styrkepositioner inden for viden, energiforsyning, industri og beskæftigelse.

Økonomien og effektiviteten for solcelleanlæg bliver fortsat bedre og bedre, og denne tendens har en positiv effekt på pris/ydelsesforholdet.

Solcellernes bidrag til den globale el-forsyning var ved udgangen af 2014 ca. 1%, idet lande som Italien var oppe på 7-8%, Tyskland 6-7% og Danmark lidt over 1,5% (ref. 2).

Indsatsen inden for forskning, udvikling og demonstration af solcelleteknologi skal have til formål at øge solcellesystemers ydelse og levetid, samt reducere omkostninger ved fremstilling af komponenter og systemer samt installation af samme. Herved kan indsatsen bidrage til at forbedre solcelleanlægs konkurrenceevne i forhold til andre elproduktionsformer med henblik på, at installation af solcellesystemer kan blive samfundsøkonomisk og forbrugermæssig attraktiv, både i Danmark og internationalt.

1. Indledning

Danmark har udarbejdet strategier for en række energiteknologier, herunder solceller. Hensigten er at sikre en sammenhængende national indsats for forskning, udvikling, demonstration og udbredelse indenfor rammerne af samfundsmæssige og energipolitiske mål og at sikre en koordinering med den tilsvarende internationale indsats, specielt i EU sammenhæng.

I december 2002 blev der taget initiativ til udarbejdelse af et statusnotat for solcelleteknologi bl.a. til brug ved prioritering af PSO-F&U 2003-midler på solcelleområdet.
En første egentlig strategi på solcelleområde, Solcellestrategien, forelå primo 2005. P.g.a. teknologiens hurtige udvikling og p.g.a. ændringer i støttemuligheder og instrumenter blev der i august 2006 udarbejdet et tillæg til Solcellestrategien; tillægget fokuserede på et voksende behov for demonstration og udbredelse.

I efteråret 2008 besluttede Energistyrelsen og Energinet.dk, at der var behov for en mere gennemgribende revision af Solcellestrategien, og der blev indledt en dialog herom med den da nystartede brancheforening Dansk Solcelleforening.
Udkast til Strategien blev udsendt til høring i den danske solcelleressourcebase i sommeren 2009, og der blev modtaget mange relevante kommentarer, som blev indarbejdet i den endelige formulering af strategien.

I foråret 2015 besluttede EUDP Energistyrelsen, at der var behov for at udarbejde en ny Solcellestrategi p.g.a. teknologiens meget hurtige tekniske og økonomiske udvikling. Nærværende udkast til en ny Solcellestrategi er udarbejdet i et samarbejde mellem EUDP Energistyrelsen og Dansk Solcelleforening, idet konsulentfirmaet PA Energy har sammenfattet strategien.

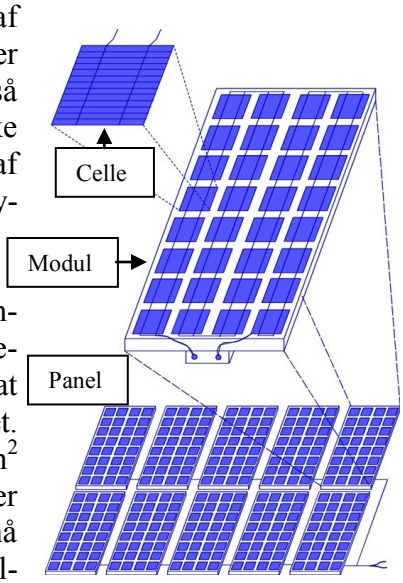
Strategien er opdelt i to dele. Den første del - nærværende dokument - beskriver forskellige baggrunds- og referencematerialer vedr. solcelleteknologi og dens udvikling, den anden del udgør selv strategien i form af mål og indsatsområder.

2. Beskrivelse af teknologien

2.1. Introduktion

Solceller (photovoltaic cells eller PV cells) omsætter direkte en del af lysets energi-indhold til elektricitet. Solcelleanlæg kan enten været tilsluttet el-nettet, hvilket omkring 99 % af den globalt installerede kapacitet ultimo 2014 på 180 GW (ref. 2) er, eller været designet til ø-drift (stand-alone). Hovedkomponenterne i et solcelleanlæg udgøres af solceller samlet i praktisk anvendelige solcellemoduler, mekanisk/elektrisk montagesystem, inverter og eventuelt batterier og batterilader.

Solcellerne er typisk firkantede med en størrelse på 12,5 cm, 15 cm eller 20 cm, og er enten bygget på en tynd (140 - 180 µ) skive (wafer) af mono-krystallinsk eller poly-krystallinsk silicium eller udført som en tyndfilms halvleder; der findes også andre opbygninger af solceller, se senere. Krystallinske silicium solceller udgjorde i 2014 mere end 90 % af verdensmarkedet med en fordeling 60 % poly-krystallinske og 40 % mono-krystallinske (ref. 2).



Solcellemodulerne udgør den mindste praktisk anvendelige byggeklods og består af et antal serie/parallelforbundne solceller samlet i et laminat for at opnå god vejrbestandighed og mekanisk stabilitet. Silicium moduler har typisk en størrelse på 1,5 – 2,5 m^2 og en effekttæthed på 100-220 W/m^2. Solcellemoduler kan sammensættes i solcellepaneler og man kan opnå effekter fra få W til hundrede af MW. Modulerne sælges med en produktgaranti på 2-5 (op til 10) år og en ydelsesgaranti på 20-25 år. Forventet levetid er +30 år.

De komponenter i et solcelleanlæg, som ikke er selve modulerne, benævnes ofte som ”balance-of-system” eller BOS, og omfatter mekaniske/elektrisk montage systemer, invertere og batterier med ladere. Endvidere indgår der i stigende omfang decentrale effektomsættere (DC/DC konvertere med MPPT funktion) og elektroniske styrings- og overvågningsenheder i konfigurationen af et solcellepanel.

Mekanisk montagesystem udgør den platform solcellemodulerne monteres på og kan være udformet som en stationær platform eller en solfølge platform (tracking). Der er udviklet og udvikles stadig højt specialiserede montagesystemer til både bygnings- og jordplacerede solcellepaneler idet der fokuseres på enkel og hurtig montage samt lav fremstillingspris.

Elektrisk montagesystem udgøres typisk af kabler og samlebokse samt jordings- og overspændingsfunktioner. I stigende omfang anvendes, specielt ved lidt større solcellepaneler, decentral effektelektronik til optimering af produktion, til sikkerhedsafbrydelse af dele af panelet og til overvågning. Der er en tendens mod stigende systemspænding i solcellepanelets udgangsspænding (DC) for at reducere omkostninger og tab i kabler og invertere.

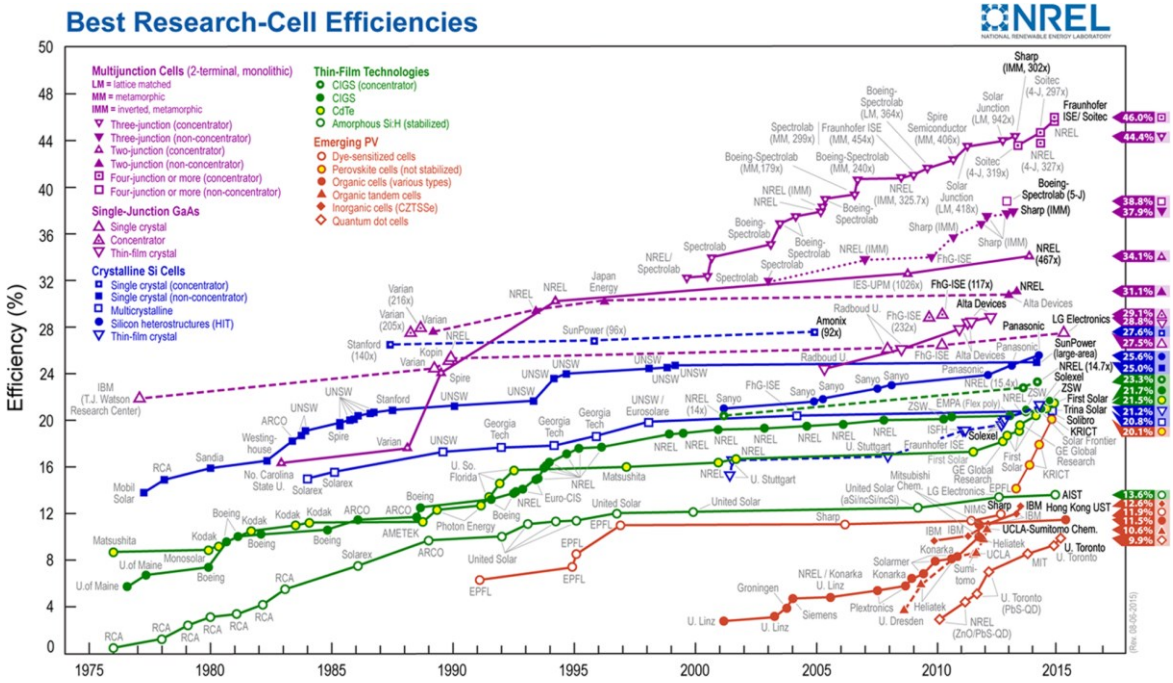
Invertere omsætter solcellepanelets jævnspænding (DC) til vekselspænding (AC); invertere kan forsyne brugsgenstande direkte og/eller udgøre bindeleddet til el-nettet, så den solcelleproducerede el kan leveres ind på el-nettet på forsvarlig vis. Invertere er højtudviklede elektroniske enheder med konverteringseffektivitet op til 99 % og med mange funktioner enten autonome eller fjernstyrbare. Inverteren har normalt én eller flere indgange med "maximum power point tracking" (MPPT) funktion, hvor der løbende søges impedanstilpasning mellem solcellepanel og inverter m.h.p. at optimere effektoverførsel. Invertere kræves i stigende omfang at kunne interagere aktivt med el-nettet. Invertere leveres med en produktgaranti på 2-5 år og med en forventet levetid på 10-20 år.

Batterier lagre strøm og finder anvendelse i både nettilsluttede solcelleanlæg og anlæg til ø-drift. I nettilsluttede anlæg kan batterier som lokalt lager øge den mængde solcelle-el, der forbruges lokalt, hvilket både kan forøge den privatøkonomiske rentabilitet og gavne netselskaber, og solcelleanlægget kan i visse tilfælde også forsyne med el selvom el-nettet svigter. Anvendelsen af batterier i nettilsluttede solcelleanlæg er voksende. I anlæg til ø-drift bevirker batterier at solcelleanlægget kan forsyne i perioder uden eller med utilstrækkeligt lys. Der findes mange forskellige batterityper på markedet; anvendt i solcelleanlæg ses typisk bly-syrer og lithium-ion batterier. Batterier leveres normalt med en produktgaranti på 2-5 år under velspecificerede driftsforhold. Det er vanskeligt at oplyse noget generelt om forventet batterilevetid, da denne afhænger af både batteritype og driftsform.

Batterilader styrer op- og afladning af batteriet og har til opgave at give batteriet den optimale driftsform m.h.p. både levetid og funktion. Ved nettilsluttede anlæg er ladefunktionen ofte integreret i inverteren. Garanti og levetid som for inverter.

2.2. Solceller, moduler og anlæg - tendenser og anvendelser

2.2.1. Celler



Udviklingen af effektivitet (laboratorie-celler) indenfor de mere gængse celleteknologier op til midt 2015 er skitseret herover. Det fremgår, at der er mange konkurrerende teknologier og at nye løbende kommer til; konverteringseffektiviteterne strækker sig fra knap 10 % til 46 % og det generelle billede er en relativ jævn stigning i effektiviteten. Flere af de højeffektive multi-junction teknologier er karakteriseret ved brug af sjældne og kostbare materialer og fremstillingsteknologi og vil næppe få større udbredelse bortset fra anvendelser i rumfart og lign. Det er en tommelfingerregel at der går 15 – 20 år fra en given solcelle er lovende på laboratorium niveau til industriel fremstilling kan forventes, idet mange designs aldrig når hertil.

Om de mere gængse typer kan følgende siges:

a. Krystallinske silicium typer udviser i dag effektivitet på op til 23 % for mono- og 21 % for polykrystallinske celler fremstillet industrielt. Krystallinske Si celler udgør mere end 90 % af det globale marked, og dette forventes at fortsætte. En kombination af øget effektivitet, reduceret materialeforbrug og ”economy of scale” i produktions leddet leder til forventning om stedse bedre pris/ydelsesforhold en rum tid fremover – uden egentlige teknologispring. På sigt er der forventninger til multi-junction celler med en Si celle som substrat, f.eks. Si – Perovskite celler. Materialerne her findes i overflod og der vil teoretisk kunne opnås effektivitet på 40-50 %.
b. Tyndfilms celler i industriel produktion er typisk bygget af amorft eller mikrokrystallinsk Si, af CdTe (Cadmium Telluride) eller CIGS (Copper Indium Gallium di-Selenide). De aktive lag deponeres typisk på en glasflade i et mikrometer tyndt lag med et meget ringe materialeforbrug; multijunction celler hvor man ”stakker” en eller flere typer på en anden kan opnå høj effektivitet og er ligeledes i industriel produktion, men med begrænset kommerciel succes p.g.a.

degraderingsfænomener, relativ kort levetid m.v. Teknologien ses dog stadig som lovende.

c. En speciel gruppe tyndfilms celler anvender stoffer fra gruppe III og V (i det periodiske system) så som Ga, As, In og P deponeret på et substrat af Ge. Også her findes multi-junction designs med meget høj effektivitet og med en meget høj pris, mest velegnet til rumfart og lign. Priserne kan næppe bringes ned til at muliggøre en større udbredelse på jorden.
d. Dye-sensitized celler (DCS) eller Graetzel celler og organiske polymerbaserede celler er under udvikling med lovende resultater specielt p.g.a. af en potentiel meget lav fremstillingspris. Industriel fremstilling findes endnu kun på pilot niveau og der må forventes en længere udviklingsperiode endnu, bl.a. for at opnå bedre effektivitet, bedre holdbarhed og konsistens i produktion.
e. Perovskite er en ny gruppe materialer, som siden 2010 har vist sig meget lovende i design af solceller. Igen er perspektivet meget billige solceller, materialet findes i overflod, men materialet er stærkt hydroskopisk og udviser i praksis ringe holdbarhed.

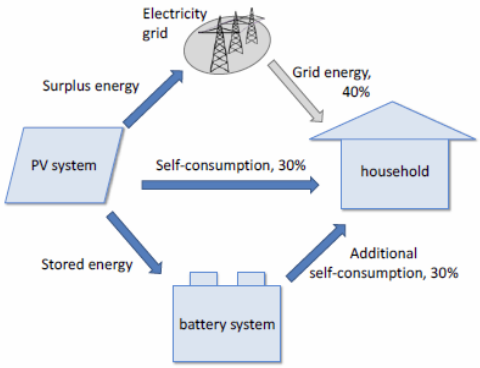
2.2.2. Moduler

Standard solcellemoduler med krystallinske Si celler og i et vist omfang CeTe baserede moduler er i dag et kendt industriprodukt. Som tidligere nævnte udgør Si moduler mere end 90 % af det globale marked og denne position forventes opretholdt det kommende årti, hvorfor det efterfølgende koncentrerer sig herom.
Der er indtil videre fremstillet godt 150 GW (ref. 2) Si moduler i en standard konfiguration bestående af et lag glas, solceller omgivet af EVA og en bagside af specielle robuste film, evt. også glas. Det hele lamineres under varme og vakuum og det resulterende laminat har vist sig at være overordentligt robust – hvis fremstillet omhyggeligt. Levetider på mere end 30 år opleves mere og mere ofte i takt med at anlæggene bliver ældre og ældre.
Moduler (ref. 4.) har typisk en effekt i området fra 50 W til 320 W (med 72 celler) og der findes meget store moduler beregnet for BIPV anvendelser.
Krystallinske Si moduler udviser en effektivitet på 15-21 %, moduler af amorft SI en effektivitet på ca. 7 % (langtidsstabil) og CdTe moduler 14-16 %.
Moduler testes og godkendes til internationale standarder afhængig af modultype, f.eks. IEC 61215 Ed. 2, IEC 61646 Ed. 2 og IEC 61730. En test/godkendelse procedure er relativ kostbar, ca. USD 125.000 per modul, og gennemføres som en èngangsproces omfattende et mindre antal tilfældigt udvalgte moduler. Det er efterfølgende fabrikantens ansvar at produktet vedblivende lever op til de godkendte modulers egenskaber.
Der arbejdes meget på at opbygge driftserfaringer med og monitorering & fejlanalyse af moduler og at udbygge ovennævnte IEC normer med mere omfattende og strengere krav. Dette arbejde drives i høj grad af pres fra investorer og banker, som tilstræber høj grad af pålidelighed i specielt store solcelleanlæg m.h.p. at nedbringe risiko for investeringen.
Der synes at være en tendens til at integrere mere og mere elektronik i modulerne. Dette kan ske i form af såkaldte ”power optimizers” der på modulniveau eller for en mindre gruppe moduler udfører MPPT funktionen, øger spændingsniveauet gennem en DC/DC konverter eller udfører en fuld konvertering til AC (fuld inverterfunktion).

Der opnås herved en række fordele: reduceret tab som følge af modul ”mismatch”, reduceret tab som følge af skyggedannelser og reduceret tab i kabling. Endvidere opnås også mulighed for detaljeret monitorering på modulniveau samt eventuelt mulighed for automatisk at frakoble moduler ved lysbuedannelse, brand eller andet.
Problemet med at flytte elektronikken ud i modulerne og eventuelt integrere elektronikken i modulerne er at der stilles store krav til samme elektroniks robusthed og levetid, jvnf. modulers typiske levetid på +30 år.
For at tilfredsstille krav fra bygherre, arkitekter og rådgivere til BIPV løsninger dækker markedet i stigende omfang moduler med forskellig farver, tekstur, refleksionsgrad og med mulighed for rammeløse moduler.

2.3.3. Andre hovedkomponenter – vekselretter og batteri

Vekselretteren (ref. 4.) er en nøglekomponent i et solcelleanlæg, der skal levere vekselspænding både som nettilsluttet anlæg eller som anlæg til ø-drift. Vekselretterfunktionen i et solcelleanlæg kan være konfigureret som en eller flere centrale vekselrettere typisk i store enheder > 50 kVA, som streng-vekselretter typisk i mellemstore enheder fra 5 – 50 kVA eller som vekselretter på modulniveau typisk i enheder af 100-300 VA.
Konverteringseffektiviteten (ref.4.) i moderne vekselrettere er høj, typisk > 95 % og visse kommercielle enheder når op i nærheden af 99 % grundet brug af høj switch frekvens og avancerede SiC halvledere. Der findes flere vægtede effektivitetsmål afhængig af indstrålingsforholdene. Effektiviteten er generelt højst på de store vekselretter, og disse udnytter da også tendensen mod højere og højere PV panel spænding – fra 600 V_{DC} over 1000 V_{DC} til 1500 V_{DC}; spændingsniveau på op til 2000 V_{DC} omtales som mulig i nær fremtid.
Oktober 2015 var prisen (ref.4.) – der kan være store udsving i priserne - på centrale vekselrettere typisk €c 10-15/VA, for strengvekselrettere €c 18-30/VA og for modul vekselretter omkring €c 25-50/VA. Der forventes fortsatte prisfald på vekselrettere, men i stedse reduceret omfang.
Med den stigende penetration af vekselrettere i elnettet øges kravene til samme. Kravene udtrykkes normalt i tilslutningsbetingelserne (grid codes) og omfatter typisk krav om variabel – enten fjernstyret eller styret af ”set-points” i selve vekselretteren – effektafgivelse (curtailment), afgivelse af reaktiv effekt for spændingskontrol og ”fault-ride-through capability”, dvs. understøtning af elnettet ved svigt i nettet. EU Kommissionen fremmer udviklingen af et europæisk elnet og –marked, og der arbejdes på nye fælles tekniske og markedsrelaterede ”grid codes” i bl.a. ENTSO-e regi.



Batterier (ref. 7) indgår stedse mere hyppigt i nettilsluttede solcelleanlæg, og solcellerne kan siges at være blevet en af de væsentligste drivere af nettilsluttede batterianlæg. Batterier kan som illustreret til højre typisk fordoble graden af egetforbrug og dermed den privatøkonomiske rentabilitet af hele anlægget. Samtidig kan batterier i solcelleinstallationer understøtte elnettet både på distributions- og transmissionsniveau, og der ses en tendens mod at udvikle nye forretningsmodeller til gavn for både anlægsejer og netselskaber.

Ved aggregering af mange solcelleanlæg med batterier kan man etablere virtuelle ”kraftværker”, som kan sælge diverse hjælpeydelser til netselskaberne.

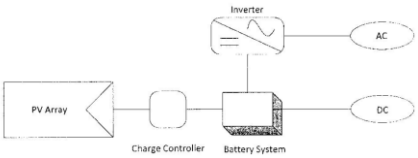
	Valve-Regulated Lead-Acid	Advanced lead-acid	Lithium-ion	Sodium-sulphur	Flow batteries
Power Range (MW)	1 – 50	1 – 50	< 100	5 – 100	1 – 100
Storage Duration	2 – 4h	1 min – 8h	1 min – 8h	1 min – 8h	1 – 5h
Cycles	1,000 – 5,000	4,500 – 10,000	1,000 – 10,000+	2,500 – 4,500	>10,000
Operating Life (years)	3 – 15	5 – 15	5 – 15	5 – 15	15 – 20
Efficiency (%)	70 – 90	90 – 94	85 – 98	70 – 90	65 – 85
Response Time	< secs	< secs	< secs	< secs	< secs

*Table 7 is for comparative purposes only. Battery storage technologies are improving rapidly and these figures may not be totally reflective of all current applications or future markets. Figures have been sourced from various literature reviews and may not be completely accurate or comprehensive.

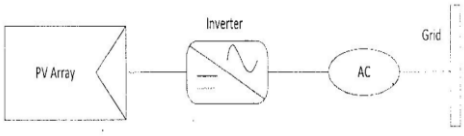
Som illustreret herover (ref. 6)findes der en række batteriteknologier med vidt forskellige egenskaber og vidt forskellige priser. Som nævnt ovenfor er solcellerne nu en af de mest væsentlige drivkræfter i udbredelsen af nettilsluttede batterier, og der forventes en udvikling på batteriområdet som tidligere for solcellerne: voldsom vækst og prisreduktion.

2.3.4. Anlæg og anvendelser

Der var ved udgangen af 2014 globalt installeret en solcellekapacitet på omkring 180 GW, hvoraf ca. 99 % er nettilsluttede anlæg. Selvom om ø-anlæg udfylder væsentlige funktioner og udviser et stigende antal anvendelser fylder de p.g.a. deres beskedne størrelse lidt i statistikken over installeret kapacitet.



Ø-anlæg består af et solcellepanel, en laderegulator, et batteri og eventuelt en vekselretter såfremt der er behov for forsyne AC; der kan suppleres med en motor-drevet generator. Ø-anlæg har en lang række anvendelser, bl.a. telekommunikation, telemetri, navigationsanlæg, katodisk beskyttelse, el til fjerntliggende hjem & sundhedsklinikker & skoler m.v., el til by-møbler (p-automater, informationstavler, signalering m.v.). Der er således to hoveddrivkræfter for ø-anlæg: hvor der teknisk ikke er alternativer til el-forsyning eller hvor alternativer er for dyre, f.eks. som følge af opgravning i byområder for tilslutning af by-møbler med ringe elforbrug. Anvendelsen af ø-anlæg er ofte ren kommerciel, men kan også være drevet af sociale hensyn (fjerntliggende hjem, skoler, sundhedsklinikker m.v. i landområder med ringe infrastruktur).



Nettilsluttede anlæg arbejder sammen med et givet el-net og kan enten erstatte el fra nettet til lokalt egetforbrug, levere el ind på nettet eller begge dele. Traditionelt har hovedanvendelsen været små og mellemstore anlæg opsat på eller ved boliger og erhvervsbygninger, men indenfor det seneste årti er stor-skala jordplacerede solcelleanlæg vundet frem i form af egentlige solkraftværker. Det kan nævnes

at det p.t. største anlæg (Solar Star i Kalifornien) er på 579 MW og fylder 1279 ha; anlæg større end 1 GW rapporteres under udvikling bl.a. i Kina og Indien (ref. 4). Oprindeligt anvendte nettilsluttede anlæg el-nettet til at styre inverteren (tvangskommutering) og som et "uendelig" stort lager for eller aftager af solcelle-el. I dag stilles der i stigende omfang krav til inverterne om aktivt at kunne understøtte el-nettet enten autonomt eller fjernstyret f.eks. ved at reducere aktiv effekt, ved at levere reaktiv effekt til spændingskontrol, ved at have "fault-ride-through" egenskaber eller ved at yde frekvens understøttelse. Disse krav, som foreligger i nettilslutningsbestemmelser ("grid codes"), følger af den stigende mængde variable VE produktion tilsluttet el-nettet, og der arbejdes på EU niveau på at udbygge og harmonisere samme krav (ENTSO-e arbejdsgrupper) omfattende både tekniske og markedsmæssige krav.

2.3.5. Andre forhold

Økonomien for solcelleanlæg meget vanskelig at generalisere da den er afhængig af en lang række parametre som varierer med tid og lokation, herunder bl.a.: solindstråling, anlægsstørrelse og -opbygning, anlægspris, kapitalomkostninger, "regulatory framework", eventuelle støtteordninger og afsætningsforhold for solcelle-el.

Eksempelvis er her vist indikative modulpriser fra 2014 med IEA PVPS som kilde (ref. 2).

COUNTRY	CURRENCY	LOCAL CURRENCY/W	USD/W
AUSTRALIA	AUD	0,8	0,7
AUSTRIA	EUR	0,6 - 0,67	0,8 - 0,9
CANADA	CAD	0,85	0,8
CHINA	CNY	3,75	0,61
DENMARK	DKK	4 - 9	0,7 - 1,6
FRANCE	EUR	0,55 - 0,65	0,7 - 0,9
GERMANY	EUR	0,59	0,8
ITALY	EUR	0,52 - 0,8	0,7 - 1,1
JAPAN	JPY	197	1,9
MALAYSIA	MYR	3	0,9
NORWAY	NOK	10,8	1,7
SPAIN	EUR	1,05	1,4
SWEDEN	SEK	8,15	1,2
SWITZERLAND	CHF	0,95	1
THAILAND	THB	39 TO 53	1,1 - 1,5
USA	USD	0,76	0,76

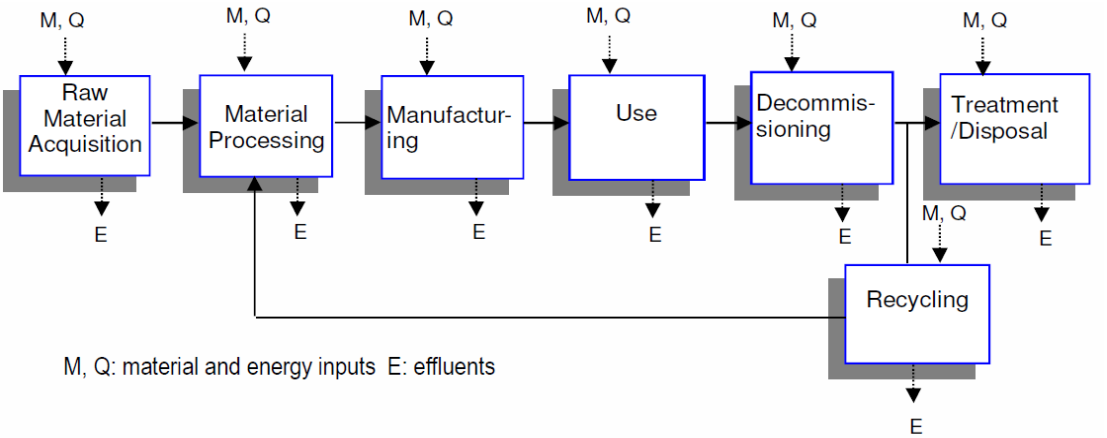
NOTE:
1 GREEN = LOWEST PRICE. RED = HIGHEST PRICE.

Det ses at prisen for et solcellemodul, som grundlæggende må betragtes som et globalt ensartet industriprodukt, varierer fra USD 0,61 til 1, 9/W – mere end en faktor 3.

For nettilsluttede solcelleanlæg varierede anlægsprisen for samme gruppe lande ligeledes i 2014 fra USD 1,20 – 5,33 for private "roof-top" anlæg, fra USD 0,80 til 3,58 for anlæg på erhvervsbyggeri og fra USD 0,60 til 2,37 for større jordplacerede anlæg.

Generelt forventes prisen på såvel moduler som komplette anlægge fortsat at falde og at følge teknologiens nuværende lærekurve i hvert fald frem til 2025; senere må der forventes en reduceret lærekurve udvikling som for andre teknologier der opnår en vis grad af modenhed.

Livscyklusanalyser (LCA) af solcellemoduler og solcelleanlæg er et område i hastig vækst. Forløbet i en solcelle livscyklusanalyse kan se ud som skitseret herunder (ref. 7).

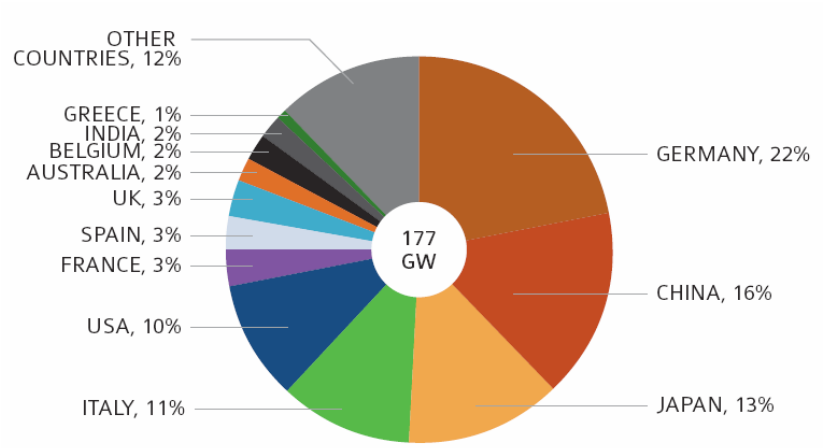


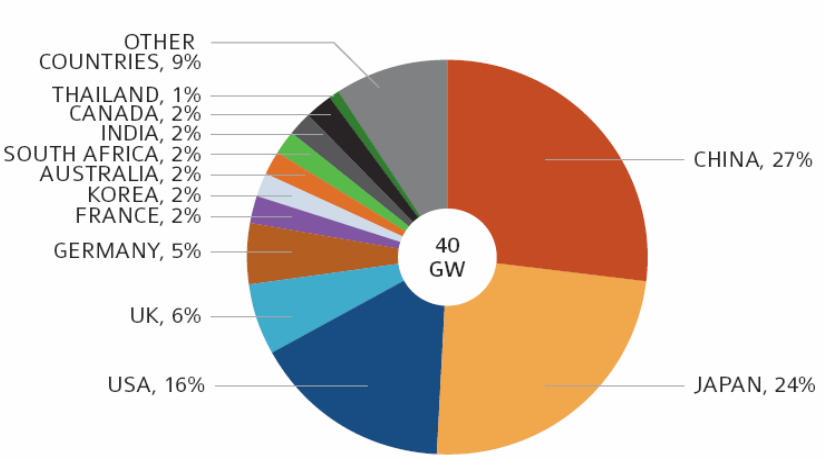
De resulterende LCA indikatorer et typisk energitilbagebetalingstid, GHG emissioner, SO_2 & NOX emissioner og tungmetal udslip. Der kan også være tale om rådighed af ressource og toksitets indikatorer.
Eksempelvis har nettilsluttede solcelleanlæg typisk en energitilbagebetalings tid på 1,0-2,5 år afhængig af konfiguration og lokalitet, d.s.v. anlægget kan producere den mængde energi, der er medgået til fremstilling af anlægget på få år set i relation til en forventet levetid på +30 år. Ø-anlæg udviser normalt en noget højere energitilbagebetalingstid p.g.a. batterierne; batterier kan have vidt forskellig størrelse og opbygning, og det er vanskeligt at generalisere her.

3. Solceller internationalt

Visionen internationalt for solceller kommer til udtryk bl.a. i IEA's Technology Roadmap – Solar Photovoltaic Energy fra 2014 (ref. 1). Med udgangspunkt i ønsket om at begrænse den globale temperaturstigning til 2 ºC har IEA udarbejdet scenarier for solcellernes mulige udbredelse og dermed bidrag til at nå klimamålet. Kort fortalt skitserer IEA en vækst i udbredelsen af solceller globalt svarende 14-16 % mellem 2040 og 2050. Dette svarer til en samlet kapacitet på knap 4.700 GW og en årlig produktion på ca. 6.000 TWh. Samtidig har IEA foretaget fremskrivninger af prisudviklingen for anlæg, og disse globale fremskrivninger er allerede ved at blive nået visse steder, bl.a. Kalifornien, hvor "power purchase agreements" (PPA) for store anlæg (100 MW eller større) midt 2015 rapporteres ned til mindre end USc 4/kWh; i Europa findes tilsvarende PPA priser på €c 8-11/kWh.
Det amerikanske Department of Energy har oplyst (ref. 3), at mere end 50 lande har integreret solceller i deres nationale energiplaner og at målene for disse planer svarer til mere end 350 GW i 2020; fra de midt 2015 skønnede godt 200 GW vil det kun kræve ca. 30 GW/år de næste 5 år. I 2013 og i 2014 blev der installeret omkring 40 GW begge år; industriens produktionskapacitet skønnes i 2015 at være ca. 60 GW/år, så det er formodentlig realistisk at se en årlig markedsvækst frem mod 2020 på gennemsnitligt 50 GW/år.

Den samlede globale installerede *solcellekapacitet* fordelte sig ultimo 2014 som skitseret til højre (ref. 2).
De traditionelt store markeder som Tyskland, Italien og Japan har stadig en væsentlig del af den samlede kapacitet, men Europa's andel er hurtigt faldende.
Dette fremgår klart af fordelingen af den installerede kapacitet for året 2014, igen til højre.
De nuværende tre hovedmarkeder er Kina, Japan og USA med England som det eneste EU land med et voksende marked. I det hele taget er der en meget klar tendens





vær fra et marked med kun få betydningsfulde lande til et langt mere spredt verdensmarked.
Selvom det Europæiske solcellemarked for tiden er vigende er F&U indenfor solcelleteknologi og relateret produktionsteknologi stadig styrkepositioner.

Aktørerne på solcelleområdet internationalt omfatter (ref. 8):

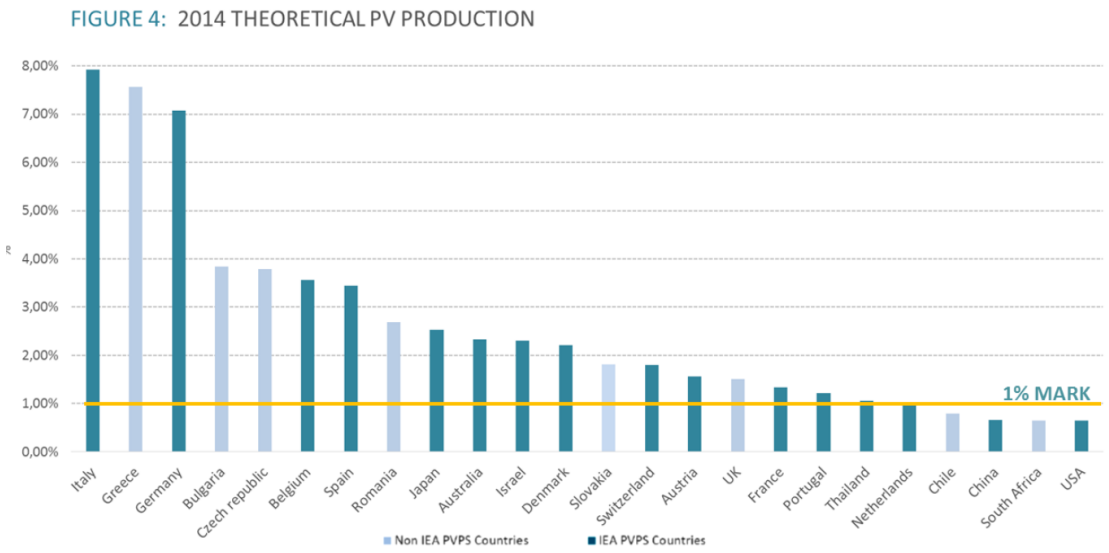
- Internationale organisationer med visioner (IEA, IRENA, NGO'er m.fl.)
- Internationale organisationer indenfor standarder og markeder (IEC, WTO, m.fl)
- Regionale organisationer med langsigtede mål og F&U (EC, ASEAN, m.fl.)
- Regionale organisationer omkring elektrificering og nettilslutningsforhold (ENTSO-e, FERC, m.fl.)
- Regeringer med klima- og energimål og –planer samt F&U
- Lokal regeringer og kommuner med lokale klima- og energimål og –planer samt F&U
- Solcelleindustrien og dens internationale, regionale og nationale brancheorganisationer med industriel udvikling, produktion og lobby virksomhed (PV-SEMI, JPEA, SolarPower Europe (før EPIA), SEIA, m.fl.)
- Projektudviklere og investorer
- Professionelle rådgivere som ingeniører, arkitekter, byplanlæggere, m.fl.
- Elforbrugere i bred forstand (industri, erhverv, institutioner og private)

Støtteprogrammer på solcelleområdet (ref. 8) omfatter bl.a. nedenstående hovedformer samt kombinationer her af. Derudover findes en mængde støtteformer anvendt i enkelt-lande:

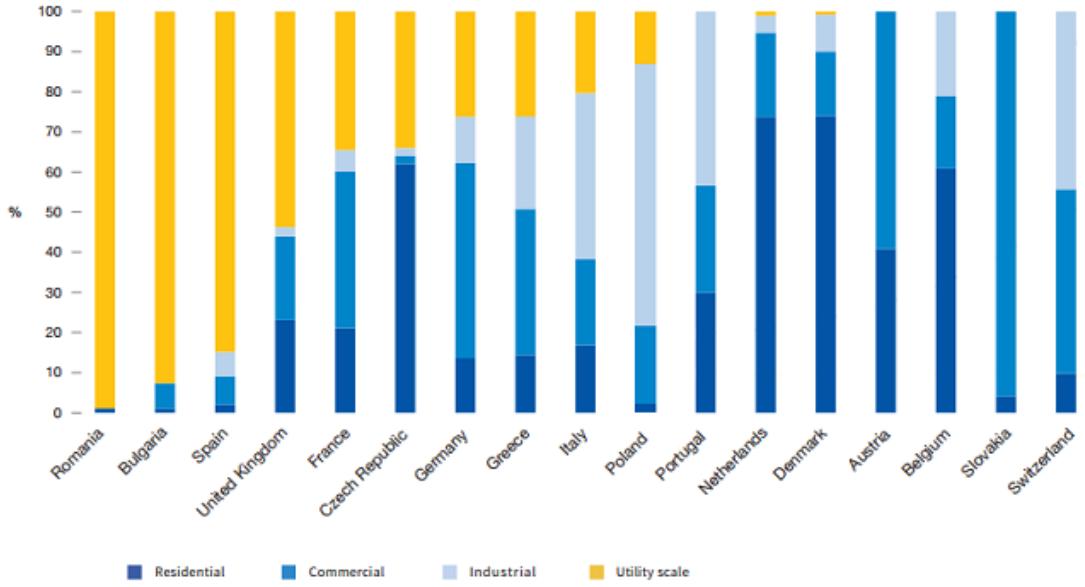
- Anlægstilskud, som reducerer investeringen i et anlæg. Fordelene er at anlægstilskud har en stor tilskyndelsesvirkning for kunderne og hurtigt kan tilpasses prisudvikling; ulemperne er at tilskuddet ikke tilskynder til forbedring af kvalitet og ydeevne (tilskuddet er ikke relateret til produktion) og ofte medvirker til at opretholde en relativ høj anlægspris
- Feed-in tarif (FIT) garanterer over en årrække salgsprisen for el leveret ind på el-nettet; typisk har FIT været garanteret over 20 år. FIT har i mange lande være meget succesrig i at starte et solcellemarked med Tyskland som det mest prominente eksempel. Fordelen er at tilskuddet relatere sig til anlæggets produktion og dermed fremmer både ydeevne og kvalitet; ulemperne er at ved hurtige prisfald på anlæg bliver FIT satserne for gunstige og det er vanskeligt at tilpasse FIT satserne på en effektiv og transparent måde.
- Netto-målingsordninger (net-metering) tillader ejeren af et solcelleanlæg at "parkere" el som ikke umiddelbart kan bruges i egen installation på el-nettet og senere tage samme mængde el tilbage fra el-nettet uden eller med begrænsede pris eller afgiftsmæssige konsekvenser idet der kan anvendes forskellige tidsvinduer fra minutter til år. Ordningen er meget udbredt i mange lande, særligt i USA. Fordelen er ingen eller yderst begrænset administration; ulemperne er at ordningen bliver mere attraktiv ved stigende el-priser og at udgifterne forbundet med den service der ligger i at benytte el-nettet betales af samtlige el-forbrugere – ikke kun solcelle-ejerne; endvidere mister el-distributøren indkomst i form af reduceret salg af el.

- Eget-forbrugs modeller tillader ejeren af et solcelleanlæg at dække en vis del af sit el-forbrug med solcelle-el. Værdien af el fra solcellerne svarer til prisen på el fra nettet; eventuel ”overskuds-el” leveres ind på el-nettet under en FIT ordning, som normalt indebærer en pris lavere end prisen på el købet fra el-nettet. Solcelleanlæggene designes følgelig m.h.p. et så stort egetforbrug som muligt, under europæiske forhold typisk omkring 30 % for husstande og ca. 40 % for virksomheder. Tilføjes batterier til solcelleanlægget kan eget-forbruget øges betragteligt og i yderste konsekvens kan man med 100 % dækning af eget-forbruget have et nødstrømsanlæg som i tilfælde af netsvigt periodevis kan forsyne forbruget eller helt nedlægge forbindelsen til el-nettet (”grid defection”). Med faldende priser på batterier ses der en tendens mod flere og flere solcelle/batterianlæg bl.a. andet i Tyskland, Spanien, Italien og USA. Fordelene er at man som anlægsejer garderer sig mod stigende el-priser, man får en følelse af uafhængighed og at man ikke lider under eventuelle netsvigt; ulemperne er for anlægsejeren en merinvestering i batterianskaffelse, vedligehold og evt. periodisk nyt batteri for elnetselskabet reduceret salg af el eventuelt en mistet kunde.
- Skattebegunstigelsesregler tillader ejeren af et solcelleanlæg at fradrage investeringen eller dele heraf i skattebetaling eller opnå en reduktion i skattebetaling som følge af mængden af produceret el – sidstnævnte ordning findes bl.a. i USA under navnene ”production tax credit” (PTC) og ”investment tax credit” (ITC). Fordelene er at staten dækker omkostningerne ved ordningen samt at denne kan kombineres med andre mere lokale støtteordninger og at ordningen let lader sig tilpasse prisudviklingen for solcelleanlæg; der synes ikke at være ulemper forbundet med ordningen bortset fra at staten mister indkomst.
- ”Renewable energy certificates” (REC) og ”Solar renewable energy certificates (SREC) som tildeles efter produktionsvolumen og som markedsføres.
- Auktioner for leverance af solcellestrøm og eller energileverancer/solcellekapacitet som i stigende omfang gennemføres, bl.a. i Tyskland, Australien og Brasilien.

Baseret på oplysninger fra IEA PVPS samarbejdet kan nedenstående ”snapshot” af solcellernes bidrag til elforbruget i en række lande ved udgangen af 2014 vises; globalt skønnes solcellerne at bidrage med godt 1 % af elforbruget. Det ses at solcellerne i Danmark teoretisk bidrager med 1-2 % af vores elforbrug.



Fordelingen af solcelle anlægstyper varierer ekstremt meget over Europa som illustreret herunder (midt 2015), idet de respektive landes politik på området har afgørende indflydelse.



4. Solceller i Danmark

Visionen for solcelleteknologi er, at Danmark – gennem internationalt samarbejde og ved at satse på udvalgte områder med særlige danske styrker og potentialer – udvikler og udbygger F&U og erhvervskompetencer på området, således at Danmark i takt med teknologiens udvikling til enhver tid kan drage fuld nytte heraf, såvel i det danske energisystem som ved eksport og bidrag til den internationale udvikling.

4.1. Ressourcen og det tekniske potentiale

Den årlige solindstråling (ref. 9) i Danmark varierer normalt ikke mere end 10 % fra et gennemsnitstal (referenceåret), og udgør ca. 1000 kWh/m^2/år for en vandret flade. Orienteres fladen mod syd med en hældning på 42° fås godt 1200 kWh. På grund af Danmarks placering omkring 56E nordlig bredde er årstids-variationen stor, mere end en faktor 10 fra bedste (juni) til ringeste (december) måned, se også illustration på næste side. Dansk Meteorologisk Institut (DMI) registrerer solindfald på 16 målestationer fordelt over landet og har gjort dette i mange år; der foreligger således pålidelige måledata for det meste af landet. Afvigelsen fra sted til sted i Danmark er godt 10 % med det østlige Danmark som det højeste og Midtjylland som det laveste.
Omkring halvdelen af et solcelleanlægs el-produktion i Danmark hidrører fra direkte sollys og den anden halvdel fra diffust lys. I praksis betyder det, at man for nettilsluttede solcelleanlæg kan anvende verdenshjørneorientering mellem øst over syd til vest og hældninger mellem 20° og 60° uden at miste mere end højst 20 % i ydeevne i forhold til den optimale orientering. Der er således generelt store frihedsgrader for orienteringen af solcellepaneler under danske forhold som også illustreret herunder som transpositions faktorer (ref. 5).

	Orientation of solar panels												
	West		South-West			South			South-East				East
Tilt angle	90°	75°	60°	45°	30°	15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
0°	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5°	1,00	1,01	1,02	1,03	1,03	1,04	1,04	1,04	1,03	1,03	1,02	1,01	1,00
10°	0,99	1,01	1,03	1,05	1,05	1,07	1,07	1,07	1,06	1,05	1,03	1,01	0,99
15°	0,98	1,01	1,04	1,07	1,08	1,09	1,10	1,10	1,08	1,06	1,04	1,01	0,98
20°	0,97	1,01	1,05	1,08	1,10	1,12	1,12	1,12	1,10	1,08	1,05	1,01	0,97
25°	0,96	1,01	1,06	1,09	1,12	1,13	1,14	1,13	1,12	1,09	1,05	1,01	0,96
30°	0,95	1,01	1,06	1,10	1,12	1,14	1,15	1,14	1,13	1,09	1,05	1,01	0,95
35°	0,94	1,00	1,05	1,10	1,13	1,15	1,15	1,15	1,13	1,09	1,05	1,00	0,94
40°	0,92	0,99	1,04	1,09	1,12	1,14	1,15	1,14	1,13	1,09	1,04	0,99	0,92
45°	0,91	0,98	1,03	1,08	1,12	1,14	1,14	1,14	1,12	1,08	1,03	0,97	0,90
50°	0,89	0,96	1,02	1,07	1,10	1,12	1,13	1,12	1,10	1,07	1,02	0,95	0,88
55°	0,87	0,94	1,00	1,05	1,09	1,10	1,11	1,10	1,08	1,05	1,00	0,93	0,86
60°	0,84	0,92	0,98	1,03	1,06	1,08	1,09	1,08	1,06	1,02	0,97	0,91	0,84
65°	0,82	0,89	0,95	1,00	1,03	1,05	1,06	1,05	1,03	1,00	0,95	0,88	0,81
70°	0,79	0,86	0,92	0,97	1,00	1,02	1,02	1,01	1,00	0,96	0,92	0,86	0,79
75°	0,76	0,83	0,89	0,93	0,96	0,97	0,98	0,97	0,96	0,93	0,88	0,83	0,76
80°	0,73	0,79	0,85	0,89	0,92	0,93	0,93	0,93	0,91	0,89	0,85	0,79	0,73
85°	0,70	0,76	0,81	0,85	0,87	0,88	0,88	0,88	0,87	0,84	0,81	0,75	0,69
90°	0,66	0,72	0,77	0,80	0,82	0,83	0,83	0,83	0,82	0,80	0,77	0,72	0,66

Solcelleteknologien har også vist sig at have bred folkelig appel og at fremme el-besparelse gennem øget bevidsthed om el, ref. tidligere Sol-300 og Sol-1000 projekter.
For med dagens solcelleteknologi teoretisk at kunne producere Danmarks elforbrug på omkring 34 TWh/år kræves et areal på godt 330 km^2 – svarende omtrentligt til Langlands areal.
Bygningsplacerede (Building Applied Photovoltaics, BAPV) og bygningsintegrerede (Building Integrated Photovoltaics, BIPV) – og nettilsluttede – solcelleanlæg anses p.t. for at udgøre det største anvendelsesmæssige potentiale i Danmark. Strømmen produceres hvor den anvendes, installationen er billig, der er ikke behov for nyt areal, solcellerne kan få multifunktion i huse f. eks. indgå i klimaskærmen og det signal af grøn energi og høj teknologi som solcellerne udsender, vurderes højt af mange. Det bebyggede areal i Danmark anslås til godt 600 km og selv om kun en del heraf i praksis findes velegnet til placering af solceller, anses potentialet for at bygningsplacere solceller for væsentligt, anvendes eksempelvis en fjerdedel af det bebyggede areal til dagens solcelleteknologi, vil det teoretisk tekniske potentiale svare til 16-17 TWh/år eller omkring halvdelen af Danmarks nuværende årlige el-forbrug eller i anlægskapacitet omkring 18-20 GW.

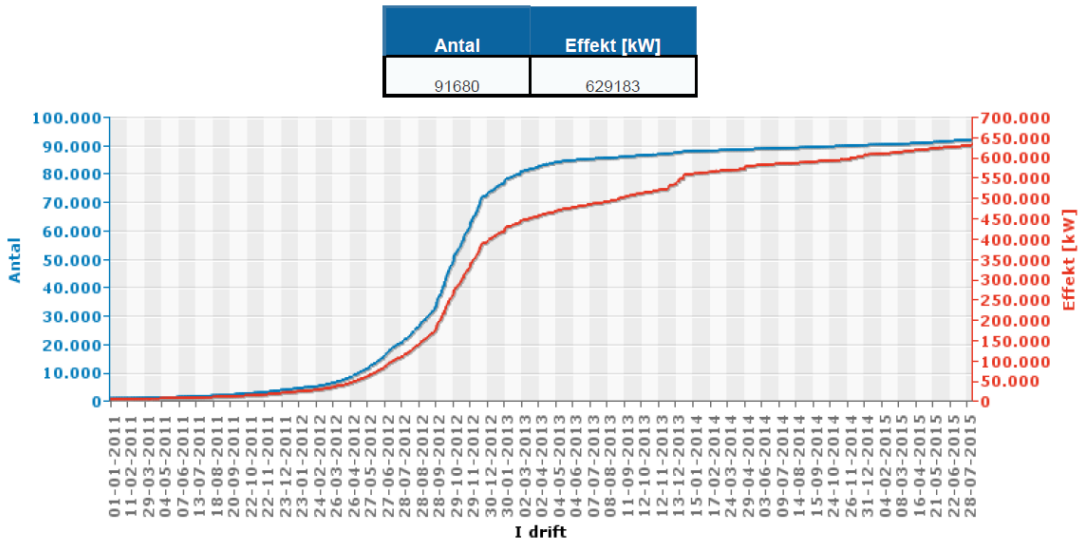
Udover de bygningsplacerede solcelleanlæg finder teknologien stigende anvendelse, hvor der er tale om mindre behov for el:

- informationstavler og signaler i bymiljø (såkaldte bymøbler) og på land; solceller er ofte billigere end at etablere nettilslutning
- telemetri og navigationsudstyr
- kolonihavehuse og andre mindre huse uden nettilslutning; lystbåde og camping

Endelig har der i de sidste år været en stigende interesse for større jordplacerede solcelleanlæg – anlæg på 50-60 MW rapporteres idriftsat ultimo 2015 og anlæg op til 100 MW kapacitet har været annonceret (ref. 8). Potentialet for store solcelleanlæg er blevet belyst i det EUDP støttede projekt ”Store Solcelleanlæg – også i Danmark” fra 2011 (ref. 10).

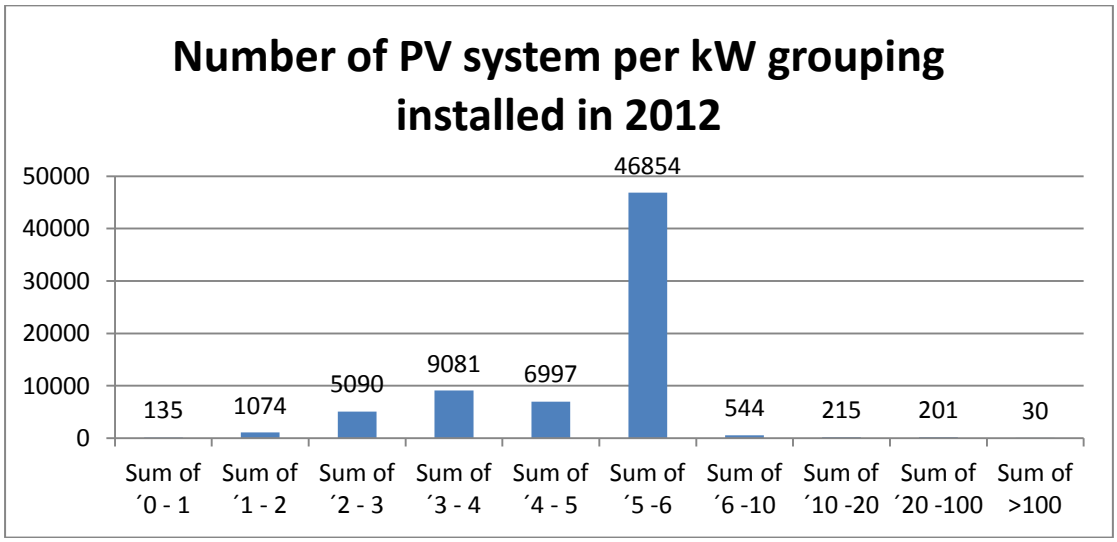
4.2. Udviklingen af solceller i Danmark

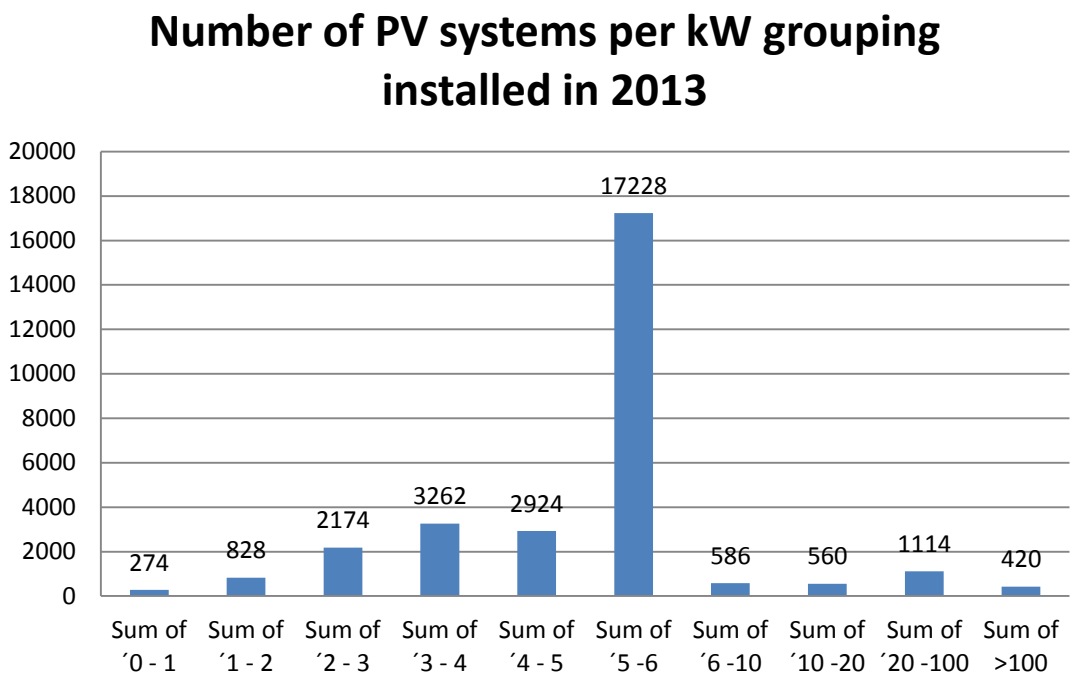
Udviklingen i det det danske solcellemarked for nettilsluttede anlæg fra 2011 og frem til midt 2015 er vist herunder baseret på Energinet.dk's database. (ref. 11)

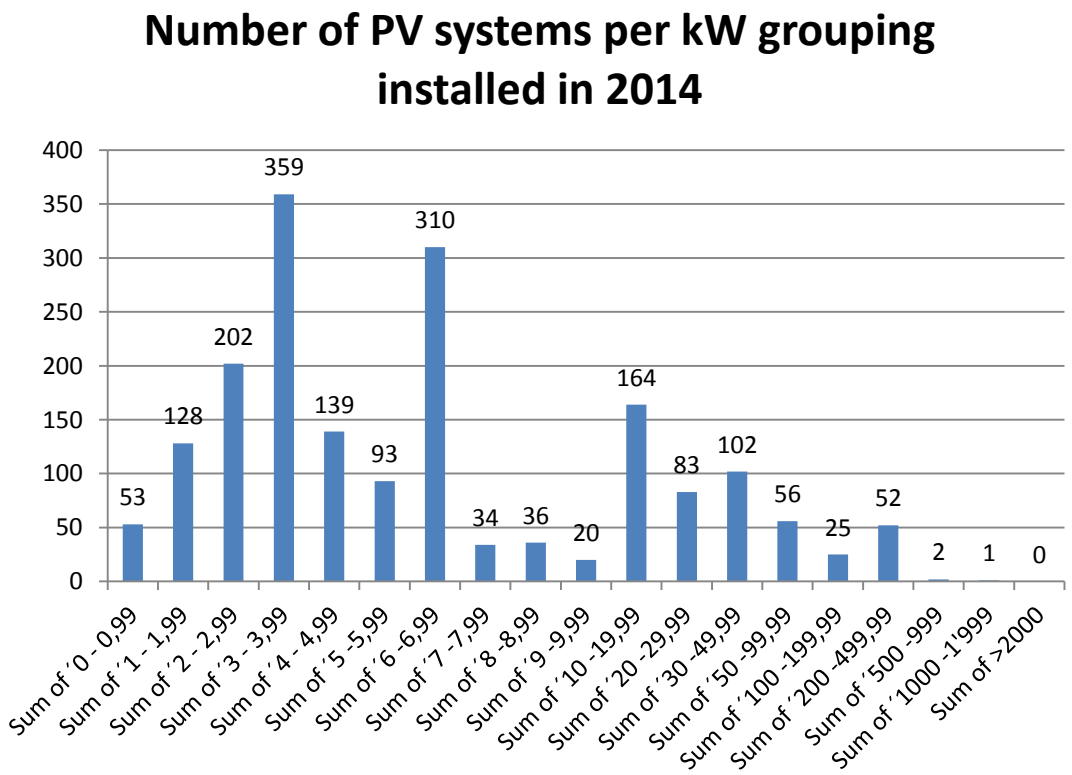


Frem mod 2012 voksede markedet langsomt drevet af den netto-målingsordning (årligt tidsvindue), som efter en fireårig pilotfase blev lovfæstet i 1993.

Udviklingen (ref. 8) i fordelingen på anlægsstørrelse i årene 2012, 2013 og 2014 fremgår af de tre nedenstående figurer.

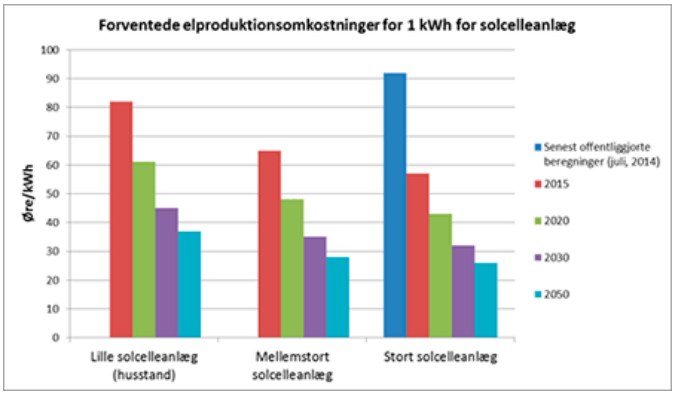






I 2012 (ref. 12) blev der installeret godt 70.000 anlæg svarende til knap 407 MW, i 2013 godt 29.000 anlæg svarende til godt 155 MW og i 2014 1.860 anlæg svarende til 42 MW. Det voldsomme fald i markedet skyldes dels ændring i nettomålingsordningen sidst i 2012 fra et tidsvindue på ét år til én time, dels en serie overgangsordninger i gennem 2013 og endelig usikkerheden om den Europæiske Kommissions godkendelse af de danske statsstøtteregler (PSO) ordningen og nye europæiske statsstøtteregler per 1/7 2014.

De danske støtteregler har også haft stor indflydelse på størrelsen af de installerede anlæg. I 2012 og 2013 (ref. 8) ses en koncentration af anlæg på ca. 6 kW, hvilket som bekendt er max grænsen for anlægsstørrelse (målt som vekselretterens nominelle kapacitet), såfremt man ønsker at kunne kvalificere sig til forhøjet afregning. I 2014 forsvandt denne tendens til fordel for både mindre og større anlæg. Denne udvikling kan tolkes som en tendens mod at designe anlæg til størst mulig dækning af egetforbrug (solcellestrøm får samme værdi som prisen på den el, den fortrænger), således at man er mindre afhængig af afregningsregler for salg af solcellestrøm til elnettet. For private vil det typisk give anledning til en anlægsstørrelse på 2-3 kW, for virksomheder anlægsstørrelser på 10-200 kW afhængig af virksomhedens elforbrug. Tendensen mod dækning af egetforbrug som udslagsgivende faktor i design af solcelleanlæg findes i mange EU lande og internationalt; det er samme tendens som driver et hurtigt voksende marked for mindre batterianlæg tilsluttet elnettet bag ved elmåleren, idet selv et mindre batterianlæg kan øge graden af egetforbrug betragteligt. Endelig ses over de tre år en generel tendens mod større solcelleanlæg i MW-klassen.



Omkostningerne ved at producere én kWh med solcelleanlæg i Danmark er faldet væsentligt de seneste år og denne udvikling forventes at fortsætte. Energistyrelsen (ref. 5) har i marts 2015 illustreret omkostningerne ved solcelle-el og deres forventede udvikling frem mod 2050 som vist til højre, d.v.s. i 2015 0,60-0,80 kr kWh afhængig af anlægsstørrelsen. Store solcelleanlæg er således nu konkurrencedygtige med havvind og kraft-varme anlæg fyret med naturgas eller kul.

Danmark har siden 1993 (ref. 8) været repræsenteret i IEA's "Implementing Agreement" (projekt) vedr. solceller (www.iea-pvps.org), og deltagelse i dette unikke, globale solcellenetværk har været af stor betydning for international videnudveksling på solcelleområdet. Medio 2015 deltager Danmark i følgende aktiviteter: videnudveksling og strategisk udvikling (Task 1), formidling til nye markeder (Task 9), ydelse og pålidelighed (Task 13), indvirkning på elnet (Task 14) og BIPV (Task 15); herudover deltager Danmark i IEA PVPS Executive Committee, som leder og koordinerer PVPS aktiviteterne.
Danmark har endvidere været repræsenteret i EU Kommissionens "PV Technology Platform", som rådgiver Kommissionen om solcelleteknologi i relation til F&U og til industriudvikling.
Endvidere har der været dansk deltagelse i en række EU støttede F&U&D projekter på solcelleområdet, men der er ikke noget overblik over antallet og omfanget af denne projektvirksomhed.

4.3. Indpasning af solceller i det danske energisystem

Energistyrelsen har ultimo 2015 i en ny baggrundsrapport til den såkaldte basisfremskrivning offentliggjort tidligt 2016 anført, at man nu forventer, at solcellerne kan

bidrage med 5 % af det danske el-forbrug i 2020 og 8% i 2025; dette svarer til en installeret kapacitet på 1,75 GW henholdsvis godt 3 GW. For 2020 svarer dette ca. til en fordobling i forhold til basisfremskrivningen fra 2014. Denne markante opskrivning af den forventede solcelleudbygning i Danmark begrundes med meget konkurrencedygtige elproduktionspriser estimeret at nå ned på 45 øre/kWh for små anlæg og 32 øre/kWh for store anlæg i 2030. Det fremhæves, at disse estimater er hæftet med betydelig usikkerhed.

Det teoretiske tekniske potentiale for solceller i Danmark er omtalt i afsnit 4.1. Det danske elsystem og energisystem undergår en konstant udvikling og tilpasning som følge dels af de respektive energiteknologiers teknisk/øknomiske udvikling dels udviklingen mod et fossilt brændsels frit el- og energisystem som målsat i dansk klima- og energipolitik. I denne proces indgår overvejelser om brændselsforsyningssikkerhed henholdsvis elforsyningssikkerhed, d.v.s. importerede brændsler (biomasse) kan øge elforsyningssikkerheden og udpræget brug af hjemlige VE kilder som sol og vind kan øge brændselsforsyningssikkerheden.
Der pågår i og udenfor Danmark en omfattende og bred vifte af F&U&D projekter på dette meget komplicerede el- og energiområde omfattende såvel teknik, økonomi og markedsforhold, og Danmark bliver i stigende omfang afhængig af vores nabolande og EU som helhed.
Det findes at falde udenfor rammerne af en national dansk solcellestrategi at behandle hele dette omfattende og stedse foranderlige el- og energisystem kompleks, men der forsøges i det følgende listet nogle solcellerelaterede spørgsmål og snitflader i relation til indpasning i elnettet nu og fremover.

Økonomi. Omkostningerne ved el (LCOE) fra solcelleanlæg i Danmark skønnes midt 2015 at være omkring 0,70 kr/kWh +/- 0,10 kr, og denne omkostning forventes reduceret fremover som illustreret af Energistyrelsen, se side 23. Dette betyder umiddelbart, at solcellestrøm er billigere end strøm fra havvind - som også anført af Energistyrelsen og den daværende energiminister i april 2015 - og snart på niveau med strøm fra on-shore vind. Solcellerne har traditionelt udvist en ”learning rate” på omkring 20 %, d.v.s. for hver fordobling af mængden af producerede solcellemoduler falder prisen med 20 %; vind udviser en ”learning rate” på omkring 10 % og LCOE fra solcelleanlæg forventes at blive billigere end fra landbaserede vindmøller indenfor få år.

Produktion, kapacitetsfaktor og egetforbrug. Traditionelt har man i Danmark forsøgt at optimere den årlige produktion fra et solcelleanlæg ved at orientere solcellepanelet mod syd og med en hældning på omkring 40 grader. Herved fås den kendte produktionsprofil med et udpræget maksimum midt på dagen og en kapacitetsfaktor på ca. 12 % (~ 1.000 full load hours). Ligeledes traditionelt har man for et typisk dansk solcelleanlæg på 6 kW_{AC} set et forhold solcellekapacitet/inverterkapacitet på 1,1. Med stedse faldende pris på solcellemoduler ses en stigende tendens til at orienterer solcellepanelet øst-vest og med en hældning på 10-15° eller mindre især på flade tage. Herved opnås en fladere produktionsprofil med mere produktion i formiddags- og eftermiddagstimerne; samtidig øges solcellekapacitet/inverterkapacitets forholdet til 1,2 eller 1,25. Med de faldende tariffer for salg af solcelle-el til elnettet ses et stigende ønske om produktion til eget-forbrug, hvilket også fremmer ovennævnte udvikling i anlægskonfiguration.

Hot-spots i distributionsnettet. Ved en høj koncentration af solcelleanlæg på samme net-radial eller mere ekstremt for enden af en net-radial kan der opstå uacceptable spændingsstigninger som følge af "reverse flow" af el typisk om sommeren, midt på dagen hvor solcelleanlæggene producerer maksimalt og hvor forbruget er lavt. spændingsstigningen kan dels medføre ødelæggelse af forbrugsgenstande, dels frakobling af invertere. Imødegåelse af disse spændingsstigninger gennem netforstærkning er kostbart, og det undersøges om indførelse af batterier bag ved elmåleren i elinstallationer med solcelleanlæg kan være en løsning for såvel netselskaber som elforbruger (fælles forretningsmodel), ligesom en ligelig fordeling på faserne vil hjælpe.

Effektproblem. Solcelleanlæg og i stigende omfang også vindmøller tilsluttes elnettet via effektelektronik, som kun i begrænset omfang kan hjælpe nettet med (virtuel – "fault-ride-through") inerti og dermed kortslutningseffekt. Samtidig med mængden af sol og vind i elnettet stiger nedlægges flere og flere konventionelle kraftværker som hidtil har leveret den fornødne inerti. Manglende kortslutningseffekt betyder både reduceret evne til at behandle transiente lastændringer samt effekt til at udløse beskyttelseselementer (sikringer m.v.) i selve elnettet. Dette problem må antages at blive værre og værre med stigende udbygning af sol- og vindenergi.

Overløbsproblem. Vi har i Danmark med ca. 40 % af elforbruget dækket af vind periodevis overproduktion af vindmølle-el eller eloverløb. For at bevare stabiliteten (undgå frekvensstigning) i elsystemet giver dette giver anledning til indgriben i form at negative elpriser, udkobling af vindmøllekapacitet, eksport af el til meget lave priser m.v. Som det fremgår af Energistyrelsens Energiscenarier og af studier fra AU vil en kombination sol og vind i nogen grad kunne imødegå dette p.g.a. forskellen i produktionsprofil. Andetsteds i Solcellestrategien omtales et mål om 6 GW solceller i 2035. Groft sagt vil 6 GW solceller kortvarigt og under optimale omstændigheder kunne producerer op til 5,5 GWh (ref. 8). Udtræk af Energinet.dk's statistik over landets elforbrug viser, at forbruget i perioden april-maj-juni, hvor solcellerne må forventes at have maksimal produktion i tidsrummet kl. 10-14, et mindste forbrug i weekenden (typisk søndag) på omkring 3,3 GWh. Ved en installeret solcellekapacitet på omkring 4 GW eller mere vil solcellerne således kortvarigt kunne give anledning til et begrænset eloverløb. For Danmark gælder det, at el-dækningsgraden på en solskinstime i en god sommerdag vil være ca. 10 gange så stor som den årlige sol-el-dækningsgrad. Det hænger sammen med, at solen kun skinner ca. en tredjedel af døgnets timer, og kun på ca. en tredjedel af årets dage. Med en årsdækningsgrad på fx 15 % af Danmarks elforbrug, kan det derfor forudses, at der på solrige sommerdage vil være 10x15= 150% dækningsgrad. Dvs. et sommer-el-overløb, som kan sammenlignes med det kendte vinter-vind-el-overløb. I sig selv ikke alarmerende, da vindudbygningen i forvejen på længere sigt kræver udlignings/lagrings-løsninger på dette, og solcelle-sommer-el-overløb evt. kan indgå som medfinansierende på en fælles løsning. Men et videregående systemsamarbejde er under alle omstændigheder påkrævet.

Vind- og solenergi – optimal kombination. Den optimale kombination af vind- og solenergi i det danske elsystem nu og frem mod 2050 har kun været belyst sporadisk (ref. 13). Aarhus Universitet har belyst emnet med fokus på el-overløb, og anser en kombination af 80% vind og 20 % sol som optimal ved en variable VE penetration i elnettet på 75%. DTU har ligeledes belyst problemet og fundet, at der ikke findes en

udpræget optimal kombination, men at der er tale om et relativ bredt område af anvendelige kombinationer. Det må anbefales, at dette emne – kombination af energikilder til elnaettet nu og fremover - belyses nærmere ud fra såvel tekniske, økonomiske, markedsmæssige, afgiftsmæssige og forsyningssikkerhedsmæssige forhold.

4.4. Danske kompetencer, faciliteter og aktører

Solcelleteknologi er en miljøvenlig VE teknologi, som må påregnes at få en væsentlig betydning i fremtidens elforsyning, – som følge af den løbende forbedring af solcellernes pris/ydelsesforhold der resulterer i stigende konkurrencedygtighed overfor alternativ elforsyning. Samtidig med at indsatsen i forskning, udvikling og demonstration internationalt og i Danmark fører til en fortsat billiggørelse, må danske virksomheder søge at udbygge kompetencer indenfor know-how, produkter og systemer med både et dansk og et internationalt marked for øje. Den danske indsats i forskning, udvikling og demonstration skal understøtte de erhvervsmæssige potentialer, og det har i de senere år vist sig, at danske industrier og forskningsinstitutioner har kunnet spille en meget vigtig rolle på udvalgte områder.

Solcelleteknologien kan kort karakteriseres ved:

- principielt ingen barrierer for produktionsomfang – kan anvendes globalt
- ingen miljøpåvirkning i driftsfasen; begrænset og kontrollerbar påvirkning i fremstillings- henholdsvis demonteringsfasen
- stort prisreduktionspotentiale – på sigt forventes fuld konkurrencedygtighed i forhold til elforsyning baseret på fossile brændsler
- fuld modularitet i installeret kapacitet - fra milliwatt til gigawatt i anlægsstørrelse
- enkel indpasning i el-systemet både som decentral og central produktion
- synergi med andre VE kilder og anden decentral el-produktion
- gode muligheder for indpasning i bymiljøer, på bygninger og ved anvendelse på marginaljorde eller arealer med ringe alternative anvendelsesmuligheder som f. eks. gamle lossepladser, nedlagte landingsbaner m.v.
- stor folkelig interesse
- højteknologisk og indebærer store design muligheder – særdeles velegnet til danske styrkepositioner

Støtteprogrammer: Der er en række tilskudsordninger, der er rettet mod forskning, udvikling og demonstration på energiområdet. Regler og ansøgningsskemaer findes på de respektive ordningers hjemmesider. Oplysning om alle de nævnte tilskudsordninger kan endvidere findes på www.ens.dk og www.energinet.dk., hvorfor der henvises hertil. Resultatet af de politiske forhandlinger omkring finansloven og deres udmøntning i støtteprogrammer kendes ikke i skrivende stund, men følgende hovedprogrammer forventes at kunne støtte F&U&D aktiviteter indenfor solcelleteknologi.

1. EUDP (Energiteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram), afløste fra 2008 det hidtidige Energiforskningsprogram (EFP). EUDP administreres af en uaf-

hængig bestyrelse med sekretariat i Energistyrelsen. Programmet er oprettet ved lov af 6. juni 2007. EUDP yder tilskud til udvikling og demonstration af nye energiteknologier bredt. Endvidere ydes tilskud til samarbejde mellem offentlige og private aktører samt til internationalt samarbejde. EUDP programmet rapporteres at blive ca. halveret i 2016 i forhold til knap 400 mio kr i 2015 for derefter gradvis at blive forøget from mod 2020.

2. ForskEL-programmet der støtter miljøvenlige elproduktionsteknologier (p.t. ca. 130 mio. kr. om året) administreres af Energinet.dk. Ordningen yder tilskud til forskning, udvikling og demonstration vedrørende miljøvenlige elproduktionsteknologier. Ordningen finansieres via PSO midlerne og det kan bemærkes at EU Kommissionen i 2014 fandt det danske PSO system værende i strid med statsstøttereglerne, revideret per 01.17.14. Inden udgangen af 2016 forventes et revideret PSO system udviklet og godkendt af Kommissionen.

3. PSO-ordningen for effektiv elanvendelse (ELFORSK, 25 mio. kr. pr. år) administreres af Dansk Energi. Ordningen yder tilskud til forskning, udvikling og demonstration vedrørende effektiv anvendelse af el.

Herudover forventes bl.a. Innovationsfonden, Markedsmodningsfonden og Vækstfonden at kunne støtte relevante solcelleprojekter.

Danske aktører og kompetencer. Igangværende F&U aktiviteter på solcelleområdet bekræfter, at Danmark har relevante **forskningsmiljøer** på området, herunder bl.a. Teknologisk Institut, RUC, SDU, AU, AAU og DTU.

Dansk industri udviser en stigende interesse for solcelleteknologi og dens anvendelse indenfor flere felter i teknologiens værdikæde, herunder bl.a. fremstilling af silicum til solcelleproduktion, solcellemoduler, bygningskomponenter med solceller, vekselrettere til solcelleanlæg og montagesystemer for solcelleanlæg. Danske virksomheder har primo 2009 etableret en brancheorganisation, Dansk Solcelleforening (DSF), som med ca. 70 medlemmer nu udgør solcellebranchens talerør. DSF har stået for flere arrangementer, senest Solcellekonferencen i Landstingssalen d. 29.10.15, og har udarbejdet en række publikationer, herunder mål og udbredelsesstrategier for solceller; DSF er en central partner i udarbejdelsen af nærværende strategi. Specielt koblingen mellem solceller og bygninger kan indebære, at traditionelle danske styrkepositioner som design og systemudformning vil kunne skabe synergier ved udvikling af fremtidige bygningskomponenter og -systemer.

Den danske el-sektor udviser voksende interesse for solcelleområdet og flere undersøgelser viser, at solceller passer fint i det danske el-system både nu og fremover. I det løbende IEA PVPS samarbejde (www.iea-pvps.org) findes den danske el-sektors engagement i solceller som en national styrke sammenlignet med mange andre lande.

En række projekter og undersøgelser påviser endvidere, at solcelleteknologien har stor interesse hos de **danske elforbrugere**. Der har – hos danske parcelhusejere med solcelleanlæg – gennem nogle år kunnet påvises en elbesparelse på omkring 10 % p.g.a. af adfærdsændringer, som kan henføres til solcelleanlægget.

De danske **hovedaktører** på solcelleområdet er:

- Energistyrelsen som udarbejder rammer og bestemmelser for solcelleanlæg, og som koordinerer og støtter internationalt samarbejde på området;
- Dansk Solcelleforening som med sine ca. 70 medlemmer danner en dansk brancheforening på solcelleområdet; DSF er medlem af SolarPower Europe (det tidligere European Photovoltaic Industry Association – EPIA);
- el-selskaber, som har gennemført adskillige små og store projekter omfattende både F&U og demonstrationer og som har inddraget solcelleanlæg som et egentligt forretningsområde; brancheforeningen Dansk Energi arbejder også med solcelleområdet;
- Energinet.dk, som har identificeret en række potentialer og forhold som fortjener nærmere analyser omkring systemmæssige fordele ved solceller; Energinet.dk er ansvarlig for administration omkring og registrering af nettilsluttede solcelleanlæg;
- læreanstalter og institutter, som varetager et bredt spektrum af F&U aktiviteter, og som har gennemført F&U projekter omfattende både konventionel solcelleteknologi og avancerede teknologier som PEC celler, polymere celler, celler baseret på nano-rørstrukturer, indpasning af solceller i el- og energisystemet, m.v.;
- rådgiverbranchen (ingeniører, arkitekter m.fl.), som har ”katalyseret” en bred vifte af solcelleprojekter primært i byggeriet;
- industrien (leverandører af solcelleanlæg, leverandører af komponenter til solcelleanlæg, byggeriet, solcelleintegrerede eller – forberedte komponenter til byggeriet, systemintegratorer og ”developers”; flere nicher forventes at opstå drevet af den globale udvikling); brancheforeningen Dansk Industri har gennemført flere konferencer/informationsmøder om solcelleteknologi;
- NGO’er, som har gennemført informations- og oplysningsvirksomhed;
- el-forbrugerne, som har vist både interesse for og vilje til at investere i solceller

Styrkepositioner indenfor solceller kan findes på følgende områder:

- Dansk deltagelse i internationale solcellefora, primært IEA PVPS samarbejdet, hvor dansk deltagelse værdsættes højt og har været det siden 1993;
- P.g.a. den høje penetration af vind- og solenergi i det danske el-net har Danmark opbygget og udbygger stadig en høj internationalt anerkendt ekspertise i ”smart grid” løsninger, balancering af el-nettet og indpasning af bl.a. solceller i el-nettet; der kan nævnes fyrtårnsprojekter som EU Eco-Grid, PV-Net, PVIB, PowerLabDK Platform og PowerLab Nordhavn; indpasning af VE, herunder solceller, i el- og energisystemet er således en klar dansk styrkeposition;
- krystallinske Si-solceller anses med en markedsandel på +90% for industriens arbejdshest endnu i mindst 10 år fremover; grundmaterialet (feedstock) krystallinsk Si produceres (overvejende polykrystallinsk) i dag direkte til solcellefremstilling af 5-6 store multinationale virksomheder plus en række mindre virksomheder; industrien leverer produktionsudstyr til mono-krystallinsk floatzone Si bl.a. til højeffektive solceller; endvidere pågår der udviklingsprojekter omkring, hvorfor Si fremstilling må anses for en dansk styrkeposition;

- vekselrettere til solcelleanlæg udviklet og fremstillet af Danfoss Solar Inverters (DSI) har været en industriel styrkeposition; dog har DSI nu indgået samarbejde med den tyske virksomhed SMA, som formodes at være verdens største producent af solcellevekselrettere; samarbejdet indebærer at alt salg og service varetages af SMA, idet DSI stadig har en del produktion af vekselrettere, hvorfor dette område også betragtes som en dansk styrkeposition;
- integration af lagring (batterier) i forbindelse med solcelleanlæg er et hastigt voksende nyt forretningsområde, hvor der er opbygget og fortsat udbygges dansk ekspertise, industri og erfaring, hvorfor området må anses for en ny men hastigt voksende styrkeposition;
- udvikling af bygningsintegrerede og bygningstilpassede solcelleløsninger og komponenter hertil har gennem mange år været en dansk styrkeposition understøttet af diverse tilskudsprogrammer, senest EUDP særprogrammet for BIPV; området passer godt ind i generelle danske styrkepositioner indenfor højteknologi og design; de i denne forbindelse udviklede løsninger og erfaringer danner en solid platform for fortsat dansk kapacitetsopbygning på området med såvel et nationalt marked – delvist drevet af bygningsreglementets stedse stigende energikrav – og et eksport potentiale;
- integrerede ”pakkeløsninger”, hvor solcellesystemet leveres som et integreret element i en bestemt funktion og hvori indgår højteknologi og design, ses ligeledes som en styrkeposition med gode eksportmuligheder, f. eks. Grundfos solcelle-pumper samt en række nye produkter fra mindre virksomheder.
- danske forskningsmiljøer anses for velegnede til ”niche forskning” indenfor nye solcelletyper, f.eks. polymertyper (Risø), højeffektive Si celler (AU) og nano-struktur typer (DTU), hvor en rettidig F&U&D indsats kan forventes at føre til resultater, der på sigt kan udnyttes kommercielt; det samme gælder solcellerelateret effektelektronik (AAU og DTU).

5. Referencer

1. Technology Road Map – Solar Photovoltaic Energy. 2014, IEA.
2. Trends in Photovoltaic Power Systems, 2015, IEA-PVPS.

3. www.energy.gov
4. www.photon.info
5. Teknologikatalog, Energistyrelsen, 2015
6. Energy Storage Study, Australian Energy Agency, 2015.
7. www.iea-pvps.org
8. PA Energy Ltd., m.fl.
9. PV-OPT projektet, PA Energy Ltd. m.fl., 2008
10. Store solcelleanlæg – også i Danmark, PA Energy Ltd. m.fl., 2011.
11. http://www.energinet.dk/DA/El/Engrosmarked/Udtraek-af-markedsdata/Sider/Statistik.aspx
12. National PV Survey Report Denmark 2015, PA Energy Ltd., 2015
13. AU (Gorm Andresen), DTU (Poul Erik Morthorst), 2015.

Generelt kan henvises til:

a. www.iea.org
b. www.iea-pvps.org
c. www.irena.org
d. www.nrel.gov
e. www.europeansolar.org