



Zonnestroom

1. Hoe werkt zonnestroom?

Soorten zonne-energie

Zonnestroom is een vorm van zonne-energie. Zij wordt ook aangeduid met de term fotonvoltaïsche zonne-energie of PV. Kenmerkend voor fotonvoltaïsche zonne-energie is dat zonlicht direct wordt omgezet in elektrische energie: een spanning en een stroom. Een andere, indirecte route is om eerst hogetemperatuurwarmte te maken en daarmee vervolgens stroom te produceren (Concentrating Solar Power, SCP). PV en CSP zijn complementaire technieken en kunnen elkaar daarom prima aanvullen op weg naar een duurzame energievoorziening.

Zonlicht wordt verder gebruikt om 'lage-temperatuur warmte' te maken, zoals in de welbekende zonneboiler of in grotere systemen. We spreken dan van zonnewarmte. Tot slot wordt in laboratoria wereldwijd gewerkt aan verschillende methoden om zonlicht te gebruiken voor de productie van brandstoffen, meestal aangeduid als solar fuels. In tegenstelling tot zonnestroom en zonnewarmte staan *solar fuels* nog volledig in de kinderschoenen.

Zonnecellen en -panelen

Om rechtstreeks elektriciteit uit zonlicht te winnen, zijn zonnecellen nodig. Voor praktisch gebruik worden zonnecellen gecombineerd tot een regulier zonnepaneel of gemonteerd in een concentratormodule. Zonnecellen zijn gemaakt van halfgeleiders. De meest gebruikte grondstof voor commerciële zonnecellen is silicium, in de vorm van een plak mono- of multikristallijn materiaal of een dunne film amorf of microkristallijn materiaal. [Klik hier](#) voor een uitgebreide beschrijving van de werking van een kristallijn-silicium zonnecel.

Nieuwe grondstoffen

Voor concentratorcellen, maar ook voor de ruimtevaart en voor zonneauto's worden meestal galliumarsenide (GaAs) en daarmee verwante halfgeleiders gekozen. Tegenwoordig zijn ook zonnepanelen op basis van dunne-film koper-indium/galliumdiselenide (CIGS) en cadmiumtelluride (CdTe) te koop. Zonnecellen en -panelen met nog weer andere materialen, zoals polymeren en kleurstoffen ('organische zonnecellen') verkeren in de laboratorium- en proefproductiefase. In aanvulling op deze hele serie bestaande technologieën wordt door onderzoekers gewerkt aan een groot aantal nieuwe concepten voor zonnecellen. Daarbij wordt onder meer gebruik gemaakt van nanotechnologie. De mogelijkheden zijn bijna eindeloos.



*Zonnescherm in
Barcelona. Bron: ECN.*



Rendement

Een belangrijke eigenschap van een zonnecel, zonnepaneel of zonnestroomsysteem is het (energieomzettings)rendement. Dat is de fractie van de energie in het opvallende zonlicht die in elektrische energie wordt omgezet. Behalve rendement zijn ook stabiliteit en levensduur van groot belang. Over rendement bestaat veel verwarring. Het is bijvoorbeeld belangrijk om scherp onderscheid te maken tussen het (maximum)rendement van kleine laboratoriumcellen, het (gemiddelde) rendement van grote commerciële zonnepanelen en concentratormodules en het (praktijk)rendement van complete systemen.

Rendementen die nu behaald worden zijn:

- kristallijn silicium
 - laboratoriumcellen tot 25%
 - commerciële panelen 12-20%
- dunne-film silicium
 - laboratoriumcellen tot 12%
 - commerciële panelen 6-8%
- CIGS
 - laboratoriumcellen tot 20%
 - commerciële panelen 10-12%
- CdTe
 - laboratoriumcellen tot 17%
 - commerciële panelen 9-11%
- polymere zonnecellen
 - laboratoriumcellen tot 8%
 - proefpanelen 2-4%

Het wereldrecord zonnecelrendement staat op 42%, voor een gestapelde cel onder geconcentreerd zonlicht.

Kosten en prijzen

Voor grootschalig gebruik van zonnestroom is het belangrijk dat de opwekkosten voldoende laag zijn. De kosten per kilowattuur (kWh) worden bepaald door

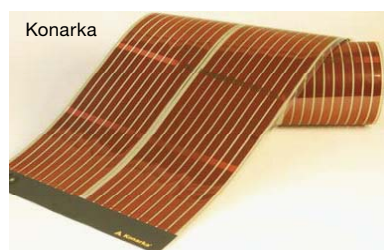
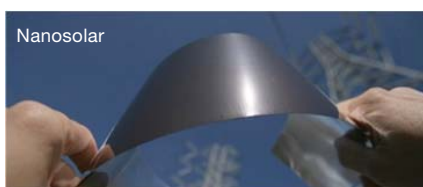
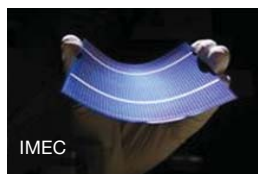
- de 'turn-key' systeemprijs (per watt-piek systeemvermogen)
- de specifieke elektriciteitsopbrengst (vooral bepaald door de hoeveelheid zonlicht ter plaatse)
- de kosten van onderhoud en beheer
- de kosten van kapitaal (rente over de lening, bijvoorbeeld)

De systeemprijs bestaat uit de prijs van de panelen en de prijs van de overige onderdelen, inclusief installatie (de zogenaamde Balance of System, BoS). Voor dezelfde opwekkosten mogen panelen met een hoog rendement wat duurder zijn dan panelen met een lager rendement omdat de BoS-kosten lager zijn (de installatie is 'compacter').

Van zon naar stopcontact

Zonnestroom kan rechtstreeks in het elektriciteitsnet worden gevoed, maar ook worden opgeslagen tot het nodig is. Dit laatste maakt zonnestroom heel geschikt voor afgelegen plaatsen, die niet op het elektriciteitsnetwerk zijn aangesloten.

Cel- en moduletechnologieën ('vlakke plaat').



Commercieel: wafer kristallijn silicium

- monokristallijn (sc-Si)
- multikristallijn (mc-Si)
- "ribbons"

(85% van de 2008 mondiale markt)

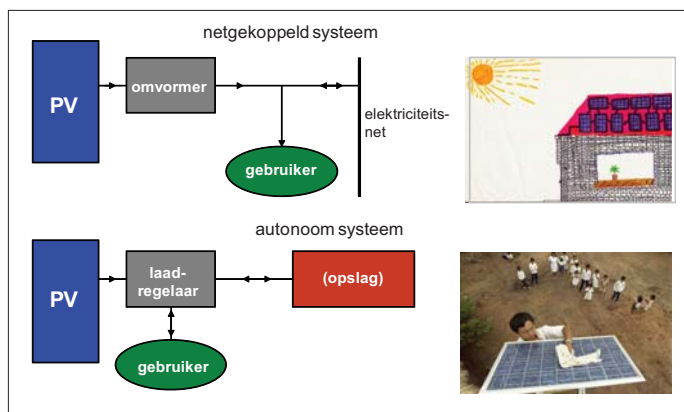
Commercieel: dunne films

- amorf/microkristallijn silicium
- koper-indium-diselenide (CIS)
- cadmiumtelluride (CdTe)

(15% van de 2008 mondiale markt)

Proefproductie en laboratorium: opkomende en nieuwe technologieën

- "organisch" (polymeer and kleurstof)
- gedrukt CIS, etc.
- super-hoog rendementsconcepten



Zonnestroomsystemen.

2. Hoe draagt zonnestroom bij aan het bestrijden van klimaatverandering?

Lange termijn

Zonnestroom is hernieuwbaar en duurzaam; bij de opwekking komen geen schadelijke stoffen vrij en de hoeveelheid energie die nodig is om systemen te maken en te installeren is heel gering in vergelijking met wat het systeem over zijn levensduur oplevert. De zogenaamde energierugverdiensduur bedraagt op dit moment één tot drie jaar op een levensduur van 25 jaar of meer en wordt nog steeds korter. Zonnestroom kan dus meer vervuilde vormen van energie vervangen. Zonlicht is de enige duurzame bron met een praktisch onbeperkt potentieel. In principe is er ruim genoeg zonlicht beschikbaar om de hele wereld van elektriciteit en zelfs van energie te voorzien.

Doorzetten

Tegenover dit enorme potentieel staat de bescheiden rol van zonnestroom tot nu toe. Die is het gevolg van het feit dat de kosten nog niet laag genoeg zijn en dat het maken en installeren van enorme aantallen kleine en grote systemen nu eenmaal tijd kost. Zelfs met de indrukwekkende groeipercentages van de afgelopen tijd duurt het een behoorlijk aantal jaren voordat zonnestroom een substantiële bijdrage levert. Wij gebruiken nu eenmaal onvoorstelbaar veel energie en zonnestroom is nog niet zo lang geleden bij 'nul' begonnen. Zonnestroom ontwikkelt zich echter heel voorspoedig. Het is daarom gewoon een kwestie van doorzetten om zonne-energie in de loop van de komende

decennia een prominente rol te laten spelen bij de opwekking van duurzame energie en bij de vermindering van de uitstoot van broeikasgassen.

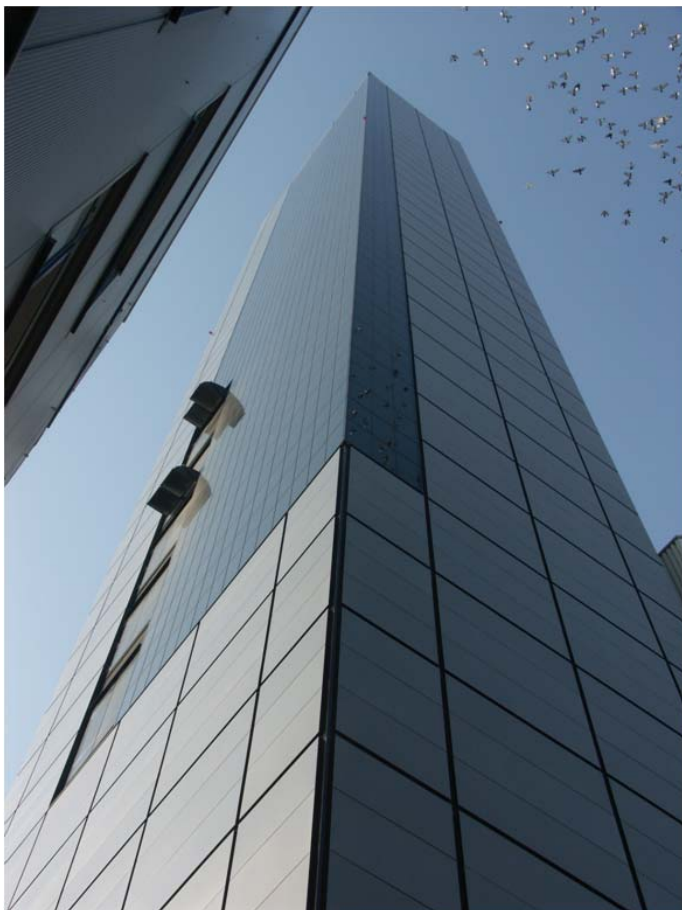
Korte termijn

Zonnestroom is niet alleen een belangrijke of zelfs onmisbare optie voor de langere termijn. Ook op de kortere termijn kan PV al een significante bijdrage leveren aan het realiseren van de Europese doelstellingen voor schone energie. Afhankelijk van de programma's voor marktontwikkeling in de EU-lidstaten en eventuele aanpassingen aan het elektriciteitsnet kan volgens de Europese branchevereniging EPIA reeds in 2020 4% tot maximaal 12% van het elektriciteitsverbruik worden gedekt met zonnestroom, tegen minder dan 1% op dit moment ([klik hier](#) voor een samenvatting SET for 2020).

3. Wat zijn de voordelen, nadelen en risico's van zonnestroom?

Voordelen en kansen

- zonne-energie is onuitputtelijk en overal op aarde in grote hoeveelheden beschikbaar; dit draagt bij aan de voorzieningszekerheid
- bij de opwekking van zonnestroom komt netto zeer weinig CO₂ vrij; dit draagt bij aan het bestrijden van klimaatverandering
- de kosten van zonnestroom dalen snel komen en binnen tien jaar bijna overal op het niveau van de consumentenprijzen van grijze stroom; op langere termijn kan zonnestroom concurreren met vrijwel alle andere stroom
- zonnestroomsystemen zijn efficiënt, stil en schoon en daarom toepasbaar in dichtbevolkte gebieden (meervoudig ruimtegebruik: zonnepanelen op daken, op geluidswallen, tegen dijken, boven spoorwegen etc.)
- zonnestroomsystemen zijn modulair en kunnen daardoor op allerlei manieren en schalen worden toegepast: van consumentenproducten en kleine autonome systemen, via middelgrote geïntegreerde systemen tot grote centrales
- ontwikkeling, fabricage en installatie van zonnestroomsystemen bieden enorme kansen voor het bedrijfsleven



Graansilo met zonnegevel, Duitsland. Bron: Würth Solar.

Nadelen en risico's

- de markt voor zonnestroomsystemen is nog niet zelfdragend; de komende jaren is nog marktstimulering nodig en daarmee is de ontwikkeling sterk afhankelijk van politiek en beleid
- het aanbod van zonlicht, en daarmee de opwekking van zonnestroom fluctueert; op langere termijn en voor grootschalig gebruik zijn aanpassingen aan het elektriciteitsnet en opslag nodig
- sommige materialen die voor zonnecellen worden gebruikt zijn relatief schaars of kunnen schadelijk zijn voor het milieu; daarvoor zijn alternatieven nodig om zonnestroom op zeer grote (terawatt) schaal en duurzaam te kunnen gebruiken

4. Wat is de publieke perceptie van zonnestroom?

Het maatschappelijk draagvlak voor zonnestroom is groot. Dat komt omdat de opwekking veilig, schoon, stil en betrouwbaar is en omdat zonnestroomsystemen kunnen worden geïntegreerd in gebouwen en andere constructies. Zonnecellen hebben bovendien (en terecht) een hightech imago.

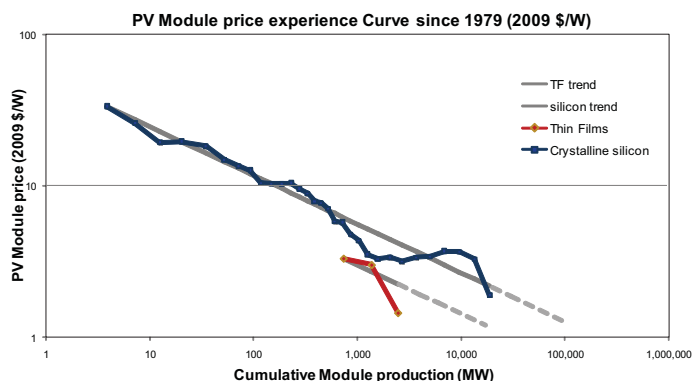
Om het draagvlak ook bij heel grootschalig gebruik te behouden, is het van groot belang om de kwaliteit in de brede zin van het woord te bewaken: technische kwaliteit, maar ook esthetische kwaliteit. Systemen moeten goed werken en er goed uitzien, ook wanneer ze heel goedkoop worden. Dit om een 'not on my roof'-syndroom te voorkomen.

5. Wat is het perspectief van zonnestroom?

Verwachte prijsdaling

Op dit moment is de prijs van zonnestroomsystemen nog te hoog. Zonder financiële steun is het voor gemiddelde consumenten en bedrijven nog niet aantrekkelijk om erin te investeren.

De prijzen (per watt-piek) dalen echter snel, als gevolg van technologieontwikkeling in combinatie met schaalvergroting bij productie en installatie. De rendementen nemen toe, waardoor installaties compacter worden en/of een dak met panelen meer vermogen kan leveren. In de afgelopen jaren daalde de prijs van panelen met ruim twintig procent bij iedere verdubbeling van de totale mondiale omzet. Voor complete systemen geldt ongeveer hetzelfde. Op langere termijn zullen de prijzen naar verwachting met minstens een factor vijf dalen.



Prijsontwikkeling zonnepanelen. Bron: European Photovoltaic Industry Association EPIA (2009).

Gigantisch, goedkoop en geaccepteerd

Tussen 2010 en 2020 komen de kosten van opwekking van zonnestroom in bijna heel Europa gelijk aan of onder de consumentenprijs van grijze stroom te liggen. We spreken dan van grid parity (netpariteit). Het precieze moment waarop grid parity optreedt varieert per land, omdat het afhankelijk is van het zoonaanbod en de stroomprijzen ter plekke. In de decennia daarna zal grid parity ook bereikt worden op het niveau van groothandelsprijzen of zelfs brandstofkosten. Zo zal zonne-energie in de verdere toekomst uitgroeien tot een gigantische, goedkope en geaccepteerde energiebron.

Toekomstige bijdrage aan de energievoorziening

Zo breed als de overeenstemming is over de verwachte prijsdaling van zonnestroom, zo divers zijn de verwachtingen ten aanzien van de toekomstige bijdrage aan de elektriciteitsvoorziening of de energievoorziening. Schattingen over de mogelijke bijdrage van zonne-energie (PV, al dan niet in combinatie met CSP) aan de elektriciteitsvoorziening op langere termijn variëren van 10% tot veel meer dan de helft. Wanneer zonnestroom op lange termijn ook wordt omgezet in warmte en brandstof, kan zelfs het leeuwendeel van de totale mondiale energiebehoefte worden gedekt. Ondanks de grote verschillen in de verwachtingen zijn er geen gezaghebbende studies waarin zonnestroom ontbreekt of zelfs een marginale rol speelt. Sterker nog, de afgelopen jaren hebben internationale organisaties hun verwachtingen systematisch naar boven bijgesteld, daartoe gestimuleerd door (voor sommigen onverwacht) snelle technologische ontwikkelingen en prijsdalingen. Het is daarom veilig om te stellen dat de ontwikkeling van zonne-energie belangrijk en misschien zelfs doorslaggevend is voor het duurzaam maken van de toekomstige mondiale energiehuishouding.

<i>Indicatieve, afgeronde getallen</i>	1980	2009	2020	2030	Lange-termijn potentieel
Typische turn-key systeem prijs (2009 €/Wp)	>30	4 (range 2.5-5)	2 (range 1.5-3)	1	0.5
Typische opwekkosten zonnestroom Noordwest / Zuid Europa (2009 €/kWh)	>3 / >2	0.40 / 0.25 (ondergrens 0.15)	0.20 / 0.12 (ondergrens 0.08)	0.10 / 0.06	0.05 / 0.03
Typisch rendement commerciële vlakke-plaatmodules	tot 8%	tot 15%	tot 20%	tot 25%	tot 40%
Typisch rendement commerciële concentratormodules	(~10%)	tot 25%	tot 30%	tot 40%	tot 60%
Typische energierugverdiëntijd systemen Noordwest / Zuid Europa (jaar)	>20	<3 / <2	<1.5 / <1	<1	<0.5

Historische en verwachte toekomstige ontwikkeling van zonnestroom. Bron: European Photovoltaic Technology Platform (2009).



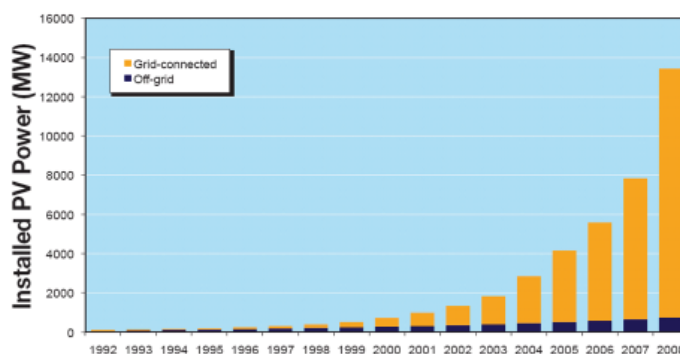
Economische impact

De mondiale zonnestroomsector groeit al decennia met dubbele cijfers; de afgelopen jaren zelfs met ruim 40% per jaar. Als gevolg daarvan zijn in sommige landen vele tienduizenden nieuwe banen ontstaan. Duitsland heeft hierbij het lichtende voorbeeld voor de rest van de wereld gegeven. Nederland is een pionier op het gebied van zonnestroom in de gebouwde omgeving. Ons land heeft verder – mede dankzij de bijdrage van ECN – internationaal een sterke positie voor wat betreft kennis en technologie. In het verlengde daarvan zijn er verschillende internationaal opererende Nederlandse hightech bedrijven die zonnecellen, modules, systeemcomponenten, fabricageapparatuur etc. produceren. Wanneer Nederland deze sterke positie in de toekomst weet uit te bouwen, biedt dit grote economische kansen.

6. Hoe staat het nu met de toepassing van zonnestroom?

Actuele toepassing op wereldschaal

Het totaal opgestelde vermogen aan zonnestroomsystemen is op dit moment meer dan 15 gigawatt-piek (GWp), ofwel ruim 150 km². Verreweg de meeste systemen zijn tot nu toe geplaatst in slechts enkele landen, met name in Duitsland en Spanje. Maar gelukkig groeit het aantal landen met ambitieuze programma's voor marktontwikkeling snel. Reden voor de grote verschillen tussen landen zijn de verschillen in de aard en de omvang van de marktstimulering. Het Duitse systeem van terugleververgoedingen is tot nu toe het meest succesvolle en duurzame en vindt navolging in vele andere landen. De huidige bijdrage van zonnestroom aan de mondiale elektriciteitsvoorziening is nog heel bescheiden, hoewel de bijdrage in Duitsland inmiddels ongeveer 1% bedraagt. Wanneer de groei van de afgelopen jaren doorzet, zal het beeld heel snel veranderen en wordt zonnestroom letterlijk en figuurlijk zichtbaar.



Mondiaal geïnstalleerd vermogen in landen die rapporteren aan IEA-PVPS. Bron: Trends in photovoltaic applications 1992-2008, Report IEA-PVPS T1-18: 2009.

Actuele toepassing in Nederland

Een dak vol zonnepanelen zoals ze nu te koop zijn levert zelfs voor een woning in het Nederlandse klimaat voldoende om het hele huishouden gemiddeld over een jaar van stroom te voorzien. Nederland speelde een pioniersrol bij de toepassing van PV in de gebouwde omgeving, maar had in de periode 2004-2007 geen effectieve marktstimuleringsregeling. Daardoor is Nederland achterop geraakt. In 2008 is de draad gelukkig weer opgepakt, zij het op bescheiden schaal in vergelijking met andere landen.

Het opgestelde vermogen in Nederland is op dit moment ruim 60 megawatt-piek. Dat is weliswaar goed voor het gebruik van 15.000 huishoudens, maar slechts een bijdrage van minder dan 0,1% aan het totale elektriciteitsgebruik. Er is dus nog een lange weg te gaan. Gelukkig lonkt het perspectief van een grote bijdrage: mogelijk tot enkele tientallen procenten van het totale elektriciteitsgebruik op de lange termijn.

Ondanks de zeer bescheiden omvang van de markt, heeft Nederland wel meerdere projecten van internationale faam. Zo werd in september 2009 in de gemeente Heerhugowaard de 'Stad van de Zon' officieel geopend; het grootste project ter wereld voor toepassing van vele zonnestroomsystemen in één stedelijk gebied.



De 'Stad van de Zon' in Heerhugowaard.

Bron: Gemeente Heerhugowaard.

7. Wat zijn de uitdagingen op dit moment?

Op de weg naar een zonnige toekomst voor zonnestroom zijn er grofweg twee soorten uitdagingen: technologische en sociaal-economische.

Landen en markten

Bedreigend voor een optimale groei en toepassing van zonnestroom in Europa is dat de markt voor PV per land sterk verschilt. Duitsland heeft al vele jaren een grote en stabiel groeiende markt, dankzij het eerder genoemde systeem van terugleververgoedingen. Spanje maakte in 2008 een helaas niet houdbaar gebleken groeispurt. Italië, Frankrijk, Griekenland, Portugal, België en enkele andere landen zijn in opkomst. Een laatste groep landen - waaronder Nederland - heeft een heel bescheiden markt of doet helemaal niets.

Kwetsbare beginfase

In deze kwetsbare beginfase ontbreekt dus een gezamenlijke aanpak en een stabiele Europese markt. Abrupte politieke beslissingen op nationaal niveau kunnen daardoor de continuïteit van de vraag en dus de groei van een gezonde bedrijfstak in gevaar brengen. Voortvarende Europese samenwerking is hier noodzakelijk.

Dat is het doel van het Solar Europe Initiative en 'SET for 2020'

plannen voor gezamenlijke technologieontwikkeling en markt-introductie in de periode tot 2020 (en daarna), opgesteld door de European Photovoltaic Industry Association EPIA en het European Photovoltaic Technology Platform, in het kader van de Europese "20 20 20" doelstellingen voor 2020.

Infrastructuur

Om zonnestroom straks op zeer grote schaal te kunnen opwekken en in te voeren in het elektriciteitsnet, zijn aanpassingen nodig in de infrastructuur. Zulke aanpassingen zijn overigens ook nodig voor andere ontwikkelingen, zoals elektrisch vervoer. Een risico is dat deze aanpassingen te laat of in onvoldoende mate plaatsvinden, zodat goedkope zonnestroom wel beschikbaar is, maar om praktische redenen niet geleverd of afgenomen kan worden. Bij stedenbouwkundige planning en ontwerp van woningen en bedrijven zou rekening moeten worden gehouden met toepassing van zonnestroom: zonvriendelijke verkaveling, een geschikte (intelligente) infrastructuur en een passend ontwerp. Ook als nu nog geen panelen worden neergelegd, moet het in ieder geval mogelijk worden gemaakt om dat in de toekomst welte doen.

Technologische uitdagingen

Onderzoekers en ontwikkelaars staan voor vier (niet helemaal onafhankelijke) opgaven om volledige expansie van zonnestroom mogelijk te maken:

- verlaging van de kosten van opwekking
- verhoging van het omzettingrendement van zonlicht naar elektriciteit
- behoud en/of verdere verbetering van de betrouwbaarheid en de levensduur van alle systeemonderdelen
- geleidelijke toepassing van uitsluitend ruim beschikbare en milieuvriendelijke materialen en grondstoffen, met het oog op zeer grootschalig gebruik



8. Wat doet ECN?

Het onderzoekprogramma van ECN Zonne-energie.

Zonnestroom is een van de focusgebieden van ECN. Wij zetten ons in om zeer grootschalige toepassing van PV in en buiten Nederland zo spoedig mogelijk binnen bereik te brengen.

Tot onze diensten en producten behoren:

- werken aan opkomende en nieuwe technologieën en aan nieuwe toepassingsmogelijkheden - ECN is één van de weinige instituten ter wereld die de hele waardeketen van silicium grondstof tot en met compleet paneel onderzoekt
- versnellen van de implementatie van PV-technologieën door ondersteuning te leveren aan PV-bedrijven
- fungeren als kennisplatform door samen te werken met universiteiten, onderzoeksinstituten en bedrijven binnen en buiten Europa
- meedenken over de toekomst van zonnestroom en de beleidsmaatregelen die hiervoor nodig zijn

Wereldrecord rendement

In november 2009 wist ECN het wereldrecord voor het meest efficiënte zonnepaneel op basis van multikristallijn silicium (mondiaal het meestgebruikte materiaal) op zijn naam te zetten. Het paneel zet 17% van het zonlicht om in elektriciteit. Het vorige wereldrecord betrof een paneel met een rendement van 15,5%. Voor het maken van dit paneel werden verschillende innovaties gecombineerd: een nieuw celontwerp met alleen contacten aan de achterzijde, een nieuwe manier om de cellen onderling te verbinden door middel van een folie waarin stroomgeleidende banen zijn aangebracht en geleidende lijm, een supersnelle en toch uiterst zachtzinnige manier om ultradunne cellen op hun plaats te leggen en een 'single shot' laatste stap om het paneel af te ronden. De ontwikkelingen waren het resultaat van een nauwe samenwerking van ECN met de Nederlandse bedrijven Eurotron en Solland en partners van het Europese CrystalClear onderzoeksconsortium. Het hoge rendement in combinatie met het verminderde materiaalgebruik zorgen ervoor dat de zonnepanelen goedkoop kunnen worden gemaakt. [Lees meer.](#)



Zonnepaneel met record-rendement. Bron: ECN.

Andere programmaonderdelen

Behalve aan cellen en panelen op basis van kristallijn silicium werkt ECN met partners onder meer ook aan flexibele dunne-filmpanelen op basis van amorf en microkristallijn silicium en aan polymere en kleurstofzonnecellen. Daarmee dekt het programma technologieën voor de korte, middellange en langere termijn.



Dunne-filmpanelen op basis van polymeren.

Bron: Holst Centre.