

Zonnestroom

WERKING, TECHNIEK EN STATUS VAN FOTOVOLTAÏSCHE ZONNE-ENERGIE

WAT IS FOTOVOLTAÏSCHE ZONNE-ENERGIE?

Fotovoltaïsche zonne-energie is de elektriciteit verkregen door directe omzetting van (zon)licht in elektriciteit. Deze omzetting vindt plaats in fotovoltaïsche installaties die in het jargon 'PV-systemen' heten, afgeleid van het Engelse *Photo-Voltaic*. De elektriciteit kan direct worden gebruikt, maar ook worden opgeslagen in accu's. Dan is er sprake van autonome PV-systemen. Wordt de stroom (al dan niet gedeeltelijk) aan het net geleverd, dan spreken we van netgekoppelde PV-systemen.

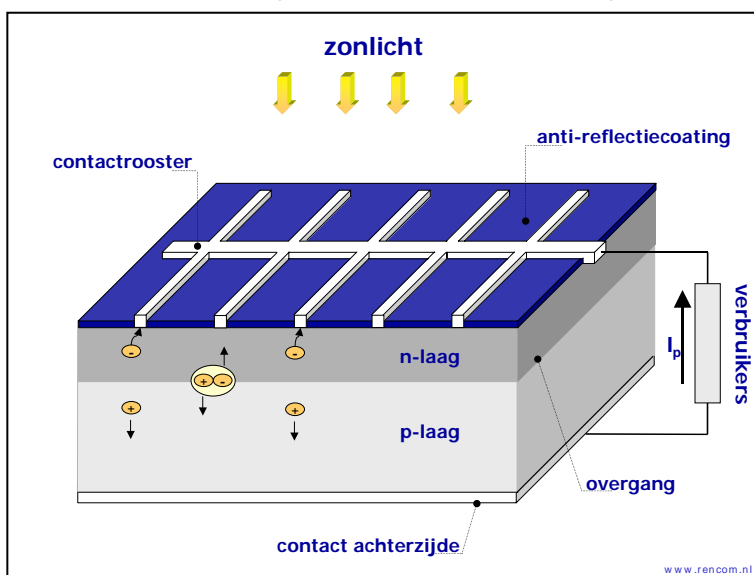
Een groot netgekoppeld PV-systeem bestaat uit: PV-panels, omvormers, kabels en leidingen, regel- en schakelapparatuur en de bevestigingsconstructie. De PV-panels zelf bestaan uit doorzichtige dragers, meestal glasplaten, waarachter een aantal in serie gekoppelde zonnecellen is geplaatst. Als er licht op valt wordt in de zonnecel gelijkstroom opgewekt.

Met behulp van omvormers ofwel inverters wordt deze stroom omgezet naar wisselstroom met dezelfde kenmerken als de stroom uit het openbare net. De beveiligings- en schakelapparatuur zorgt ervoor dat er geen ongewenste stromen en spanningen in het systeem ontstaan. Door middel van bevestigingsconstructies worden de zonnepanelen op een zonnige plek op een dak, gevel of in het open veld geplaatst. Vanwege de veiligheid worden de netgekoppelde PV-systemen automatisch uitgeschakeld wanneer de spanning in het openbare net wegvalt.



HOE WERKT PV?

Een zonnecel is gemaakt van een lichtabsorberend halfgeleidermateriaal, meestal silicium. Door invallend licht krijgen de siliciumelektronen extra energie, waardoor ze zich los kunnen maken van het atoom. Hierdoor ontstaat een concentratie aan 'onrustige' elektronen en door de elektronen achtergelaten 'gaatjes'. Een ingebouwd elektrisch veld voorkomt dat elektronen en gaatjes weer samenvallen. Wanneer de contacten aan de voor- en achterkant van de cel aan elkaar worden gekoppeld, begint de zonnestroom te lopen. Hoe meer licht een zonnecel absorbeert, des te meer zonnestroom wordt er geproduceerd. Het principe van de werking van een zonnecel is in figuur 1 weergegeven. Het fotovoltaïsche effect is voor het eerst in 1839 door de Franse natuurkundige Edmond Becquerel waargenomen.



In het laboratorium, waar men de ideale omstandigheden kan creëren, ligt het rendement van zonnecellen veel hoger dan in de praktijk. Door hoge temperaturen, lagere belichting, oneffenheden in het materiaal, beschaduwing en verliezen aan omvormers en kabels en leidingen is het systeemrendement altijd lager dan het celrendement.

Het elektrisch vermogen van een PV-systeem wordt uitgedrukt in wattpiek (Wp). Dat is het nominaal vermogen onder standaard testcondities (STC). Deze standaard testcondities zijn: een instralingssterkte van 1.000 W/m² op het horizontale vlak, een celtemperatuur van 25°C en een AM (airmass) van 1,5. AM betreft de belichting van de cel. Het wordt uitgerekend als $1/\cos\phi$, waarbij ϕ de hoek is tussen de lichtstraal en de loodrechte lijn. AM 1,5 staat voor een hoek van 48°.

Verschillende plaatsen op aarde krijgen verschillende hoeveelheden zonne-energie, instraling, per m². In Nederland gaat men uit van een instraling van 1000 kWh/m² per jaar. Dit is ongeveer de helft van wat de meest zonnrijke delen van de aarde, in de Sahara, per jaar krijgen.

Vuistregels

Nog steeds wordt ongeveer negentig procent van de zonnecellen van silicium gemaakt. Er zijn vier soorten silicium zonnecellen: amorf, monokristallijn, multikristallijn en microkristallijn.

Amorf silicium wordt door middel van chemische opdamming op het glas aangebracht waardoor de panelen een egale zwarte kleur hebben.

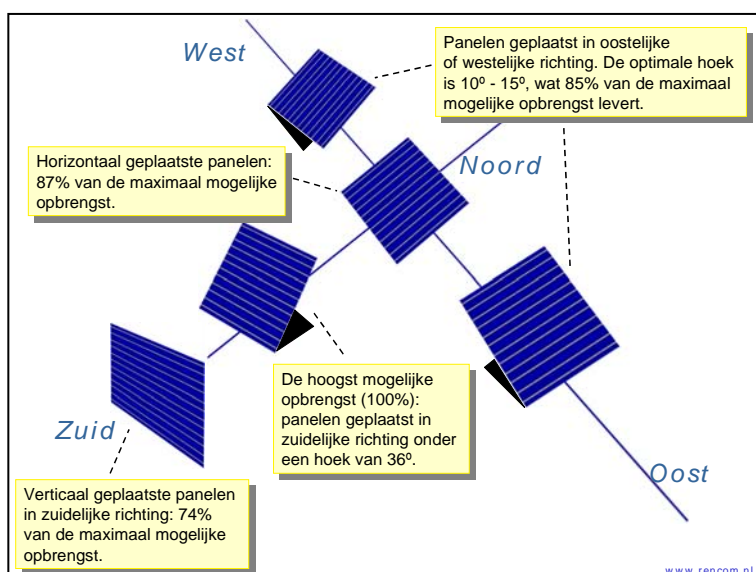
Monokristallijne en multikristallijne cellen worden als plakjes, de zogenaamde wafers, van ruw siliciummateriaal gezaagd. Na verwijdering van de zaagschade worden de wafers voorzien van de anti-reflectiecoating en contactpatroon. De anti-reflectiecoating geeft de cellen hun karakteristieke donkerblauwe kleur. Het rendement van amorfe panelen begint met ongeveer 6–10 procent, maar daalt in de loop der tijd door veroudering tot 4 procent. Kristallijne panelen zijn stabiel en hebben een rendement van 12–16 procent.

In de praktijk gebruikt men in Nederland enkele vuistregels waarmee snel de opbrengsten en eigenschappen van PV-systemen kunnen worden ingeschat. Zo wordt bijvoorbeeld voor de netgekoppelde PV-systemen met kristallijne panelen uitgegaan van:

- een gemiddelde paneeloppervlakte van 1 m²
- een vermogen van 100 Wp/m²
- elektriciteitsopbrengsten bij zuidelijke oriëntatie 75–80 kWh/m²/jaar
- en een gewicht van ongeveer 10 kg/m².

De elektriciteitsopbrengsten van autonome systemen zijn ongeveer 40 kWh/m². De opbrengsten zijn lager dan bij netgekoppelde systemen, doordat de panelen geen stroom meer leveren wanneer de accu vol is en doordat er verliezen optreden bij de omzetting in de accu.

De elektriciteitsopbrengsten van zonnepanelen zijn afhankelijk van de oriëntatie en de hellingshoek



waaronder ze worden geplaatst. De ideale verhouding voor Nederland is een zuidelijke oriëntatie onder een hellingshoek van 36°. In figuur 2. zijn de opbrengsten van een zonnepaneel onder verschillende hellingshoeken en oriëntaties weergegeven als percentages van de maximaal mogelijke opbrengsten.

WAAROM IS PV BELANGRIJK?

Bij de fotonvoltaïsche omzetting komen, in tegenstelling tot conventionele opwekking, geen schadelijke stoffen vrij zoals kooldioxide (CO₂) dat het broeikaseffect veroorzaakt, en zwaveldioxide (SO₂) en stikstofoxides (NO_x) die samen zure regen veroorzaken.

De 'brandstof', zonlicht, is overal op aarde aanwezig. Dat betekent dat PV overal kan worden toegepast.

Met PV-systemen kan de elektriciteit worden opgewekt op de plek en in de mate waarin dat nodig is. De modulaire opbouw maakt het mogelijk om systemen te bouwen met een vermogen van enkele W tot GW (giga Watt = 10⁹ W).

PV-panels zijn geschikt als bouwelement. Daardoor kunnen ze gemakkelijk als dak- en gevelbekleding in gebouwen worden geïntegreerd.

Door toepassing van PV is men niet afhankelijk van (geïmporteerde) fossiele brandstoffen en blijven de bestaande voorraden van fossiele brandstoffen behouden voor toekomstige generaties.

In ontwikkelingslanden waar vooral individuele autonome PV-systemen worden toegepast, de zogenaamde *solar home systems*, draagt PV bij aan de algemene ontwikkeling. Dankzij elektriciteit krijgen de bewoners toegang tot informatie via radio en TV en kunnen ze hun huis of werkplaats verlichten. Zo kan ook 's avonds gewerkt worden of huiswerk worden gemaakt zonder brandgevaar en zonder dat verbrandingsgassen van olielampen het binnenklimaat vervuilen. Er zijn geen draaiende onderdelen in PV-systemen, dus maken ze geen lawaai en zijn ze onderhoudsarm.

TOEPASSINGEN

Autonome PV-systemen worden in Nederland toegepast op plaatsen waar geen mogelijkheid bestaat voor aansluiting op het openbare net. Dat zijn bijvoorbeeld: lichtboeien op zee, caravans en vakantiehuisjes, drinkbak opstellingen voor vee, verlichting van afgelegen paden, verkeerstellers, wegmarkeerders en informatieborden langs snelwegen, parkeerautomaten, (zeil)boten, en stuwen en pompen in automatische waterbeheersystemen.



Netgekoppelde PV-systemen worden overal in de gebouwde omgeving toegepast. De grootschalige systemen, met een opwekkingscapaciteit van meer dan 100 kWp, worden meestal in de projectmatige nieuwbouw geplaatst, als dakvullende systemen.

Woningcorporaties zijn

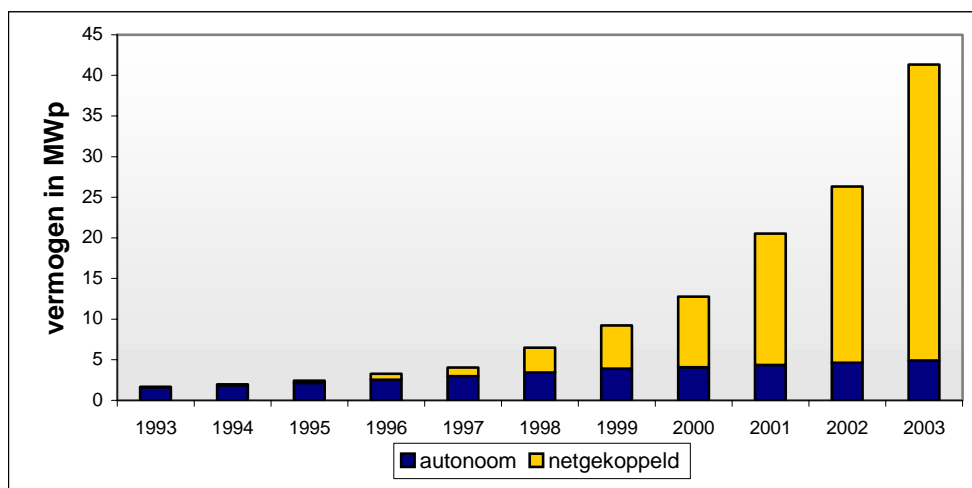
de laatste jaren begonnen met het plaatsen van grotere PV-systemen op platte daken van bestaande flatgebouwen. Individuele huiseigenaren voorzien hun bestaande woningen meestal van kleine systemen tot 600 Wp. Een belangrijke functie van PV op en bij kantoorgebouwen is het zichtbaar maken van een groen imago. Daarom wordt bij deze objecten PV vaak op een opvallende manier gebruikt in de vorm van PV-luifels en -masten.

Leveranciers spelen steeds beter in op de behoefte van de markt, waardoor panelen zijn ontstaan in vele soorten en maten. Zoals de zogenaamde AC-modules: panelen met aan de achterkant een ingebouwde inverter die met een stekker op het stopcontact kan worden aangesloten. De PV-dakpannen zijn qua vorm en maatvoering aangepast aan diverse soorten dakpannen. Behalve in het karakteristieke donkerblauw, zijn zonnepanelen ook leverbaar in andere kleuren en in transparante of semi-transparante uitvoering.

STATUS VAN PV IN NEDERLAND

In 1995 heeft de Nederlandse overheid de PV doelstellingen gesteld op 10 PJ (peta Joules = 10^{15} J) voor 2020. Dit komt overeen met een geïnstalleerd vermogen van 1500 MWp (mega Watt = 10^6 W). Achteraf zijn de specifieke doelstellingen per techniek komen te vervallen. De actuele doelstelling luidt: 10% duurzame energie in 2020.

FIGUUR 3. OPGESTELD PV VERMOGEN IN NEDERLAND (BRON: CBS)



Tot 1998 werden in Nederland vooral autonome opstellingen toegepast. Met de introductie van subsidiemaatregelen voor netgekoppelde PV-systemen kreeg de toepassing op gebouwen veel meer ruimte. In 2003 is er circa 15 MWp bijgeplaatst. Dat is een toename van ruim vijftig procent! In figuur 3 is de groei van het opgesteld vermogen in Nederland sinds 1993 weergegeven.

TABEL 1. PRODUCTIE VAN ZONNESTROOM IN NEDERLAND EN DE BIJBEHORENDE BESPARING VAN PRIMAIRE ENERGIE

Berekende elektriciteitsproductie in GWh/jaar													
	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
netgekoppeld	0.02	0.02	0.03	0.08	0.19	0.51	0.74	2.14	3.72	6.08	11.33	15.19	25.49
autonoom	0.40	0.50	0.64	0.74	0.85	1.01	1.19	1.37	1.55	1.63	1.73	1.85	1.96
totaal	0.42	0.52	0.67	0.82	1.04	1.52	1.93	3.51	5.27	7.71	13.06	17.04	27.46
Vermeden primaire energie (fossiele brandstoffen)*													
	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
TJ/jaar**	4	4	6	7	9	13	17	30	45	67	113	146	233

*DOORDAT ZONNESTROOM WORDT OPGEWEKT, HOEFT MINDER ELEKTRICITEIT TE WORDEN OPGEWEKT MET BEHULP VAN CONVENTIONELE ELEKTRICITEITSCENTRALES. HIERDOOR WORDEN FOSSIELE BRANDSTOFFEN BESPAARD.

**TJ STAAT VOOR TERAJoules = 10^{12} J

De 41,33 MWp in december 2003 komt overeen met ongeveer 413.000 m² zonnepanelen. Een deel van deze panelen is geplaatst in het kader van een relatief klein aantal zeer grote projecten zoals het 1 MWp project in de woningbouw in Amersfoort, 's werelds grootste PV-dak van 2,3 MWp op de Floriade en het HAL-project waar in 2005 in totaal 5 MWp aan PV zal staan. Verreweg het grootste aantal PV-installaties staat bij particulieren in de vorm van kleine installaties ter grootte van twee tot zes panelen. Het totaal aantal installaties in Nederland in december 2003 wordt geschat op ruim 25.000.

KOSTEN

Productie en investering

De productiekosten per kilowattuur zonnestroom bedragen op dit moment circa € 0,60/kWh. Daarmee is zonnestroom ongeveer twintig keer duurder dan elektriciteit uit een conventionele energiecentrale.

De investeringskosten voor PV-systemen zijn afhankelijk van de installatiegrootte, de leverancier, de garanties en de accessoires die meegeleverd worden. In tabel 2. zijn de actuele prijzen van een aantal categorieën PV-systemen weergegeven.

TABEL 2. KOSTEN PV-SYSTEMEN PER CATEGORIE IN 2002

BRON: 'NATIONAL SURVEY REPORT THE NETHERLANDS 2002', BECO GROUP BV

soort	categorie	Euro/Wp
autonoom	tot 1 kWp	5.7
	> 1 kWp	5.0
netgekoppeld	< 600 Wp (DHZ)	6.0
	> 600 en < 10 kWp	6.2
	> 10 kWp	5.7

Een specifiek geval zijn kleine systemen van 400 – 600 Wp die door een groot aantal leveranciers onder klinkende namen zoals: SunPower, NuZon, Sunkit, en EasySolar op de markt zijn gebracht. De wet staat toe dat systemen onder de 600 Wp door de gebruiker zelf worden aangebracht. Vandaar dat ze vaak als doe-het-zelf pakket worden verkocht. Hiermee wordt aan particulieren de mogelijkheid geboden om de duurzaamheidsdoelstelling van 10 procent op een eenvoudige manier zelf te bewerkstellingen.

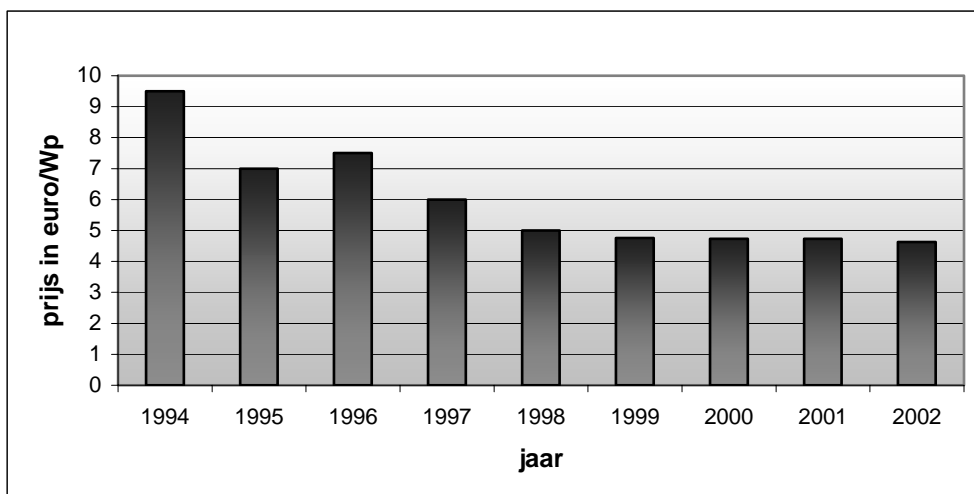
Productieproces en prijsontwikkeling

De prijs van PV-systemen bestaat uit de paneelkosten en de BOS (Balance of System) kosten voor de overige systeemcomponenten. De prijs van PV-panels is erg afhankelijk van de chipindustrie omdat het basismateriaal voor de productie van zonnecellen uit deze industrie afkomstig is. Er zijn maar twee chipfabrieken in de wereld. Omdat de prijs van zonnecellen een groot aandeel heeft in de totale prijs, is deze bepalend voor de prijsontwikkeling van PV-systemen. De trend tot nu toe was een halvering van de prijs elke tien jaar. In figuur 4 is de prijsontwikkeling voor PV-panels weergegeven.

De sprong in de prijs in 1996 is te wijten aan de introductie van de aantrekkelijke financieringsmaatregelen voor PV in Duitsland waardoor de vraag explosief steeg en een tekort in het aanbod ontstond.

FIGUUR 4. ONTWIKKELING PANEELPRIJS

BRON: 'NATIONAL SURVEY REPORT THE NETHERLANDS 2002', BECO GROUP B.V



Financiering

Investeringsubsidies

In oktober 2003 heeft de Nederlandse overheid aangekondigd de bestaande financieringsregelingen voor PV te zullen wijzigen. Zoals het er nu naar uitziet zullen de mogelijkheden beperkt blijven tot de EPR-subsidie, EIA en Groenfinanciering. De EPR-subsidie (Energiepremie) die de laatste twee jaar de motor is geweest achter de massale toepassing van PV door individuele woningbezitters, zal alleen nog voor grote projecten beschikbaar zijn.

Bedrijven die investeren in PV-installaties kunnen gebruik maken van de EIA-regeling (Energie InvesteringsAftrek). Deze fiscale regeling stimuleert investeringen in energiebesparende bedrijfsmiddelen en duurzame energie. Ondernemingen in Nederland die een energie-investering doen, kunnen een deel van de investeringskosten aftrekken van de fiscale winst.

Verder kunnen particulieren die een minimumbedrag in duurzame maatregelen steken, gebruik maken van gunstiger financieringsvoorwaarden in het kader van Groenfinanciering.

Meer informatie hierover is te vinden in het informatieblad 'Financiële stimuleringsregelingen'.

Terugleververgoedingen

Particuliere eigenaren van PV-systemen kunnen bij een aantal energiebedrijven aankloppen om afspraken te maken over de zogenaamde terugleververgoeding. Dat is de vergoeding voor de zonnestroom die in het openbare net wordt geleverd. De vergoedingen en de manier waarop ze tot stand komen variëren per bedrijf. Op dit moment hebben Nuon, Essent en Echte Energie ieder een eigen regeling voor de terugleververgoeding.

Eigenaren van grotere PV-systemen kunnen gebruikmaken van de vergoeding binnen de MEP-regeling (Milieukwaliteit ElektriciteitsProductie). Per 1 januari 2004 levert deze regeling een vergoeding op van € 0,067/kWh, maar deze stijgt tot € 0,097/kWh in januari 2005. De MEP-vergoeding geldt voor tien jaar.

WERKGELEGENHEID

De stimuleringsmaatregelen hebben een positieve uitwerking gehad voor de ontwikkeling van de Nederlandse PV-industrie. Het aantal werknemers in de PV-branche is in 2002 tot 670 gestegen. De werkgelegenheid is vooral gestegen in de advies- en de installatiebranche. Verder zijn er sterke ontwikkelingen op het gebied van onderzoek en ontwikkeling.

De grootschalige commerciële productie van PV-panelen vindt op dit moment vooral buiten Nederland plaats. De panelen vinden hun weg naar de markt via distributeurs van de grote paneelleveranciers en via installateurs.

Nederland heeft wel een aantal sterke ontwikkelaars en producenten van omvormers met vermogens kleiner dan 1 kW. Inverters met grotere vermogens komen vooral uit het buitenland.

ENERGIE EN MILIEUEFFECTEN

Door de toepassing van PV-systemen worden emissies van schadelijke stoffen uit conventionele centrales vermeden. In tabel 3. zijn de vermeden CO₂-emissies per jaar weergegeven.

TABEL 3. VERMEDEN CO₂ EMISSIES DOOR PV-SYSTEMEN IN NEDERLAND IN KTON PER JAAR

1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
0.24	0.29	0.38	0.46	0.59	0.86	1.09	1.99	2.98	4.36	7.39	9.65	15.54

Aan de andere kant brengt de productie van PV-systemen milieubelasting met zich mee. De life cycle analyse (LCA) door de Universiteit Utrecht laat zien dat het energieverbruik voor de productie van PV-panelen een grote bijdrage levert aan de milieubelasting door PV. De energierugverdiertijd van de huidige PV-systemen ligt in Nederland op vijf tot zes jaar, in de Sahara is dat de helft.

PV-panelen hebben een levensduur van twintig jaar of meer.

Maatregelen zoals: een betere benutting van basismaterialen, betere efficiëntie, sneller productieproces, grotere productiecapaciteit, verlenging van de levensduur van omvormers en de toepassing van frame-loze PV-panelen, kunnen de energierugverdiertijd doen verkorten naar ongeveer één jaar.

NIEUWE ONTWIKKELINGEN

Theoretisch is het mogelijk om een omzettingsrendement in zonnecellen van 85 procent te halen. De beste laboratoriumcellen hebben op dit moment een rendement van 35 procent. De beste commercieel verkrijgbare silicium zonnecellen hebben een omzettingsrendement van 16 procent.

De Nederlandse industrie is, in samenwerking met onderzoeksinstituten, bezig met een aantal ontwikkelingstrajecten met als doel het verhogen van het celrendement en het verlagen van de productiekosten van PV. Daartoe worden onderzoeks- en ontwikkelingsinspanningen geleverd die zich richten op het ontwikkelen van nieuwe celmaterialen, nieuwe celproductieprocessen, nieuwe dragers en nieuwe paneelconcepten.

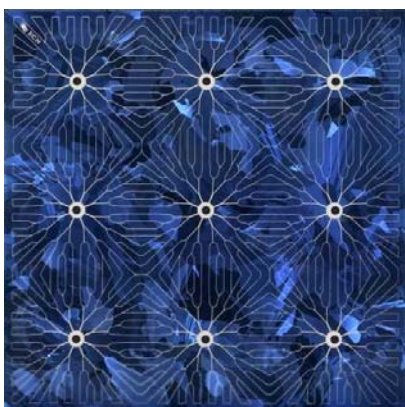
RGS cellen

Op het gebied van multikristallijne cellen zijn de Nederlandse partijen bezig met het ontwikkelen van de zogenaamde RGS (ribbon-growth on substrate) cellen die door middel van giettechniek (in plaats van zagen) met grote snelheid kunnen worden gemaakt. De verwachting is dat op deze manier de prijs van wafers in 2010 met een factor twee zal zijn verlaagd. Daarnaast wordt aan een nieuwe manier voor de grootschalige productie van zonnepanelen gewerkt waarmee een paneelprijs van 1,5 €/Wp in 2010 moet worden bereikt. Dit is ongeveer drie maal goedkoper dan de huidige prijs.

Flexibele zonnecel

Dunne film technologie met amorf silicium op flexibele dragers, de zogenaamde roll-to-roll technologie, zal naar verwachting tussen 2005 en 2010 in Nederland in productie gaan. Deze technologie zou een paneelprijs moeten opleveren van minder dan 1 €/Wp. Hiermee zou een zonnestroom prijs van 0,10 - 0,20 €/kWh kunnen worden bereikt, drie keer lager dan de huidige prijs.

Pin-up module



Er zijn enkele ontwikkelingen die gericht zijn op een rendementsverhoging op basis van bestaande, zogeheten eerste generatie, celmaterialen. Recentelijk werd door ECN de pin-up module (PUM) gelanceerd, waarbij de stroom door kleine gaatjes in de zonnecel wordt afgevoerd.

Op deze manier is het mogelijk om met grotere en dunnere cellen te werken waardoor de kosten lager uitvallen, terwijl het rendement circa drie procent is gegroeid. Daarnaast wordt het mogelijk om de productie van de panelen volledig te mechaniseren.

Grotere cellen

De trends in de conventionele PV-industrie gaan in de richting van steeds groter wordende cellen: van 100x100 mm naar 125x125 mm naar 150x150 mm, en grotere panelen: van (ongeveer) 80 Wp naar 120 Wp naar 160 Wp.

Dunne film

Nieuwe technieken maken het mogelijk om zonnecellen steeds dunner, dus met minder materiaal, en met andere materialen te produceren. De meest bekende, reeds leverbare cellen van andere materialen zijn de zogenaamde CIS (koper indium diselenide) en CIGS (koper indium galium diselenide) cellen. De tweede generatie PV (dunne film) is dankzij nieuwe ontwikkelingen nu ook in andere materialen dan silicium leverbaar, zoals bijvoorbeeld CdTe (cadmium teluride) en CuInSe₂ (koper indium diselenide, 'CIS cellen').

PV Wirefree

PV-wirefree is een nieuw concept PV-systeem waarin de elektrische en mechanische functies van verschillende componenten worden gecombineerd.

Het doel van deze ontwikkeling is om de BOS-kosten met 50 procent, en die van de opgewekte elektriciteit met 25 procent, te verlagen en de energie terugverdiertijd te minimaliseren.

Heel grootschalig

Parallel aan onderzoek en ontwikkeling op het gebied van componenten en materialen, is op internationaal niveau onderzoek uitgevoerd naar de haalbaarheid van heel grote PV-systemen, het VLS-PV concept (Very Large-Scale PhotoVoltaic power generation). Dit concept behelst het plaatsen van PV-systemen met een capaciteit van 10 MWp tot enkele GWp (0,1 – 20 km²) in woestijngebieden. Wanneer de helft van de woestijngebieden met PV bedekt zou worden, dan zou achttien maal zoveel elektriciteit opgewerkt worden als de hele wereld in 1995 verbruikte.

MEER INFORMATIE

Informatiecentrum Duurzame Energie heeft nog veel meer informatie beschikbaar over fotovoltaïsche zonne-energie. Ook voor andere vormen van duurzame energie kunt u er terecht.

Overige informatie over zonnestroom

Zonnestroom op maat voor huishoudens

Praktisch informatieblad: stap voor stap stroom van de zon

Zonnestroom op maat voor architecten

Praktische informatie

Zonnestroom in de vrije tijd

Praktische informatie over zonnestroom voor caravans, boten, etc.

Adreslijsten

Van leveranciers en zonnestroom-verenigingen

Andere duurzame energiebronnen

Aardwarmte

Bio-energie

Energie-opslag

Warmtepompen

Waterkracht

Windenergie

Zonnboilers (Warmte uit zonlicht)

© Projectbureau Duurzame Energie, februari 2004

Tekst: RenCom in opdracht van PDE. Foto's: Hans Pattist/Novem, ECN. Overname door derden van (delen van) dit informatieblad is slechts toegestaan na schriftelijke toestemming van PDE. Dit informatieblad is met de grootste zorg samengesteld. Aan de inhoud kunnen echter geen rechten worden ontleend. Bestelcode: PV-001/10022004