

Onderzoek en ontwikkeling van zonnecellen

Bloed, zweet & tranen of een doorbraak?

Het is een veelgehoorde uitspraak: "Op het gebied van zonnecellen hebben we een doorbraak nodig,". Het tweede deel van de zin kunt u zelf invullen: "voordat het ooit iets kan worden", "voordat we erin investeren", "voordat zonnestroom kan concurreren" en "voordat het rendement een acceptabele waarde kan bereiken" zijn maar een paar voorbeelden. Zulke oneliners doen echter geen recht aan de wijze waarop wetenschap en technologie van fotovoltaïsche (PV, *photovoltaic*) conversie van zonne-energie zich in de afgelopen decennia hebben ontwikkeld en ze helpen ons weinig op de weg naar de toekomst. Een goede benadering van onderzoek en ontwikkeling vraagt inzicht in de factoren die het succes van zonnestroom bepalen en enig historisch besef. Deze bijdrage geeft een korte inleiding in de PV-technologie en een samenvatting van de visie zoals die door het European PV Technology Platform is ontwikkeld. Wim C. Sinke



sinke@ecn.nl

Wim C. Sinke (1955) is sinds 1990 werkzaam bij het Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) in Petten, waar hij sinds 2004 Stafmedewerker Programma en Strategie Zonne-energie is. Hij is tevens voorzitter van de Werkgroep Science, Technology & Applications van het EU Photovoltaic Technology Platform en coördinator van het KP6 Integrated Project CrystalClear. Daarnaast is hij bijzonder hoogleraar aan de Universiteit Utrecht. Hij studeerde experimentele natuurkunde en deed van 1981-1985 promotieonderzoek bij het FOM-Instituut AMOLF in Amsterdam. Wim Sinke werkte vervolgens bij het Hitachi Central Research Laboratory in Tokyo, Japan en enkele jaren bij FOM-AMOLF. Voor zijn onderzoek aan silicium en aan zonnecellen en zijn bijdragen aan programma-ontwikkeling en toepassing van zonne-energie ontving hij in 1992 de Jacob Kistemakerprijs van de Stichting FOM, in 1998 de NOZ-PV-prijs van Novem en in 1999 de Koninklijke/Shell-prijs voor Duurzame Ontwikkeling en Energie.

ZONNE-ENERGIE

Zonne-energie wordt in energiescenario's wel gepositioneerd als het onmisbare hoofdrediënt van een duurzame energiehuishouding. Voor het dekken van de totale mondiale energiebehoefte in 2050 (gesteld op 1.000 EJ/jr; nu ~500 EJ) is bij een totaal rendement van 10% (opwekking, opslag, transport en gebruik) en een instraling van 2.000 kWh·m⁻²·jaar⁻¹ een oppervlak van 1.200 · 1.200 km² aan zonnepanelen nodig.

Zonne-energie is echter ook een typische langetermijnoptie, in de zin dat het zelfs in ambitieuze scenario's nog enkele tientallen jaren duurt voordat een significante (gedefinieerd als >>1%) bijdrage aan de totale mondiale energievoorziening mag worden verwacht. Dat is geen

gevolg van een gebrek aan vitaliteit en groei van de sector (de afgelopen 20 jaar werd een gemiddelde marktgroei gerealiseerd van 25% per jaar, de laatste 10 jaar zelfs 35% per jaar), maar een gevolg van het feit dat de bijdrage van zonne-energie op dit moment nog heel klein is. De belangrijkste barrière voor grootschalig gebruik van zonne-energie is de huidige prijs. Daarom wordt wereldwijd onderzoek gedaan aan goedkope zonnecellen met een hoog rendement.

Nederland speelt in Europa en mondiaal een aanzienlijke rol bij onderzoek en ontwikkeling van zonnecellen, panelen en systemen. Meer dan 100 onderzoekers houden zich daarmee bezig. Het onderzoek dekt een breed spectrum en loopt van toepassingen voor nu tot technologieën voor de zeer lange ter-

mijn. Het Joint Solar Program van FOM, Shell en NWO-CW is speciaal bedoeld voor de lange-termijnuitdagingen op het gebied van fotovoltaïsche conversie.

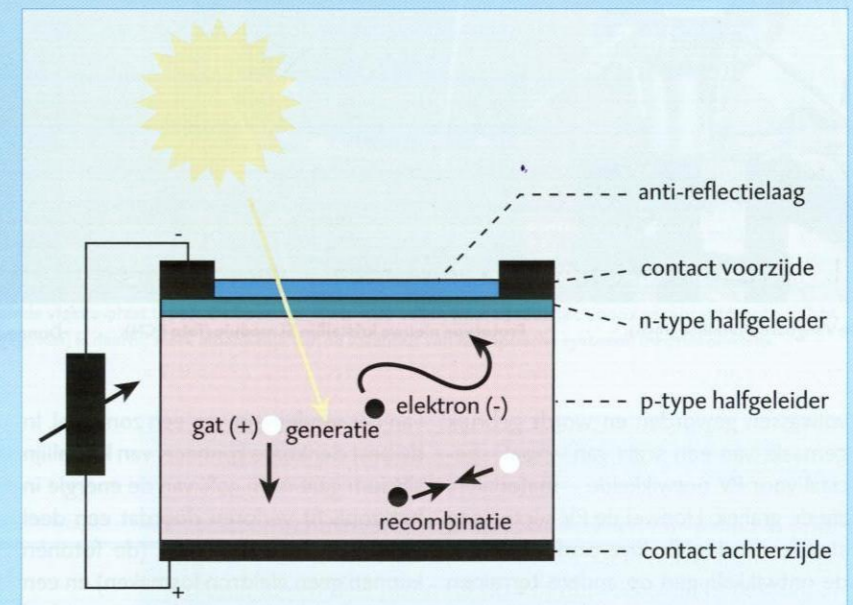
FOTOVOLTAÏSCHE CONVERSIE

Fotovoltaïsche conversie van zonne-energie, meestal PV of zonnestroom genoemd, is een verzamelterm voor een aantal verschillende manieren om fotonenergie in één stap om te zetten in elektrische energie. Hiermee onderscheidt PV zich bijvoorbeeld van Concentrated Solar Power (CSP), waarbij zonne-energie eerst wordt omgezet in hoge-temperatuur-warmte en daarna, via een conventionele stoomcyclus, in elektriciteit. De basisbouwsteen is de zonnecel (zie het kader *De werking van een zonnecel*). Het rendement van een

De werking van een zonnecel

Zonnecellen worden gemaakt van halfgeleiders. De bekendste (en de oudste) is de kristallijn-silicium zonnecel. Een kenmerk van halfgeleiders is dat ze in vergelijking met metalen maar weinig bewegelijke elektronen hebben. Het bijzondere is echter dat door de absorptie van licht (fotonen) elektronen worden vrijgemaakt, die zich vervolgens kunnen verplaatsen. Daarbij blijft een eveneens bewegelijke lege plaats over, een positief geladen gat. Zo'n elektron (of eigenlijk: het elektron-gat paar) draagt in feite de energie van het foton in zich en de kunst is om die energie uit de cel te krijgen. Daarvoor is het nodig het elektron en het gat van elkaar te scheiden voordat ze weer kunnen samengaan (recombineren). Door het elektron buiten de cel zijn energie te laten afgeven en daarna weer samen te brengen met het gat kan de cel nuttig werk doen.

Om de elektronen en gaten van elkaar te scheiden wordt in het silicium een scheidingslaag aangebracht. Die laag wordt gevormd op de overgang tussen twee soorten silicium: meestal één waaraan fosfor is toegevoegd (n-type) en één met borium toegevoegd (p-type). Wanneer fosfor wordt ingebouwd in het silicium is per fosfaatoom één (beweeglijk) elektron over, bij borium is één elektron tekort, ofwel



één gat over. Let wel: het materiaal als geheel blijft neutraal.

Op de overgang tussen beide gebieden (pn-overgang) ontstaat een dun laagje waarin de elektronen en gaten elkaar permanent compenseren en waar het n-type-silicium positief en het p-type-silicium negatief geladen is. Dit komt omdat de ingebouwde fosforatomen hun overvloedige elektronen hebben afgestaan aan de dichtbij gelegen boriumatomen. De fosforatomen worden daardoor positief en de boriumatomen negatief geladen. In dat laagje heerst nu een elektrisch veld, dat op elektronen en gaten een tegengestelde kracht uitoefent. Dit veld is in staat om de

gewenste scheiding te verzorgen van elektronen en gaten die door absorptie van licht zijn gemaakt.

Zonder licht merken we aan de buitenkant van de zonnecel niets van de pn-overgang. Onder belichting zullen echter de vrijgemaakte elektronen door het elektrisch veld naar de voorzijde worden getrokken, terwijl de gaten aan de achterzijde blijven. Daardoor ontstaat een spanningsverschil. Wanneer we nu de voor- en achterzijde van de cel met elkaar verbinden, kan er een stroom gaan lopen en kan energie (vermogen) worden geleverd.

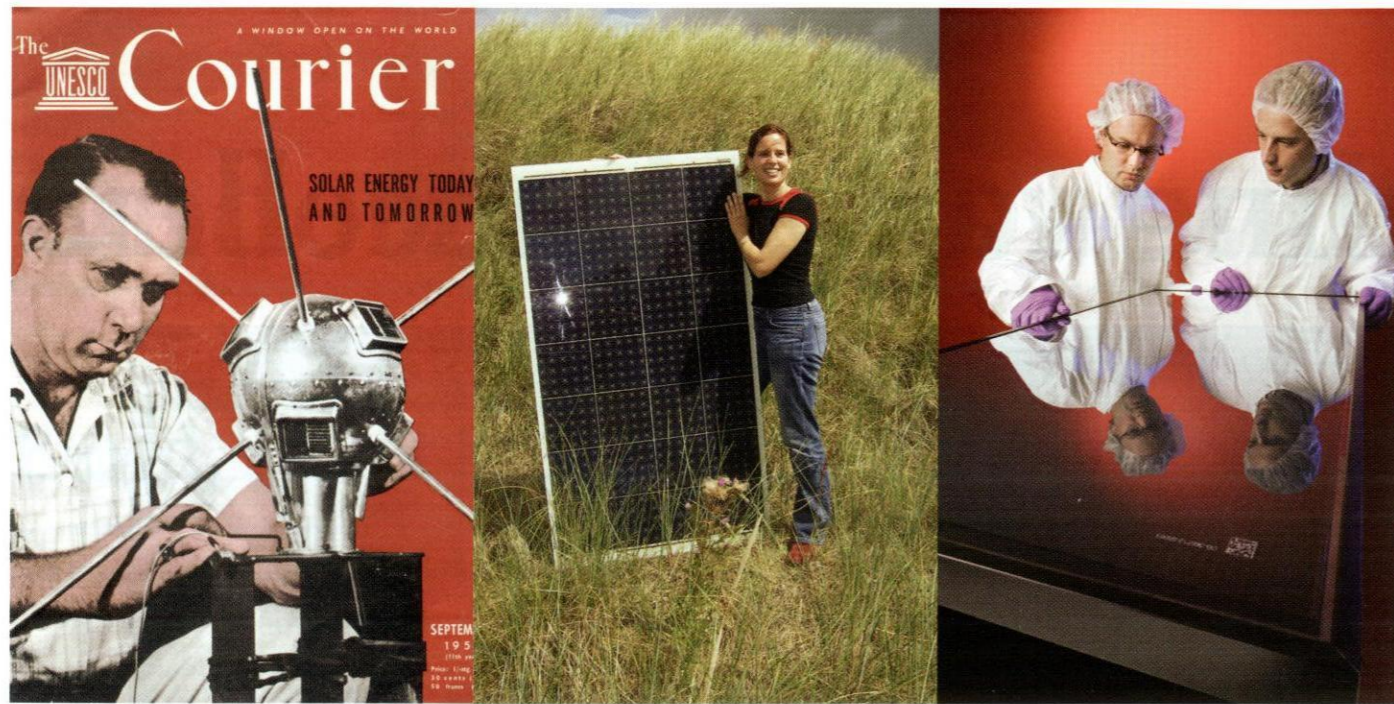
zonnecel is gedefinieerd als de verhouding tussen het maximaal geleverde elektrische vermogen en het vermogen aan invallend licht (alles onder nauwkeurig gedefinieerde omstandigheden gemeten). Het theoretische maximale rendement voor PV-conversie is ongeveer 85%. Rendementen voor kleine laboratoriumcellen liggen tussen minder dan 1% en ruim 40%. De lage waarden gelden voor nieuwe celtypen die nog aan het begin van hun ontwikkeling staan, de 40% is een recent behaald record voor

een meerlaagszonnecel onder geconcentreerd zonlicht. Meerdere zonnecellen die elektrisch in serie (en eventueel parallel) geschakeld en ingepakt ('geëncapsuleerd') zijn, vormen een zonnepaneel of module. Het rendement van commercieel verkrijgbare panelen ligt ruwweg tussen 6% en 19%, voor respectievelijk sommige dunne films en het beste verkrijgbare kristallijn silicium.

GESCHIEDENIS

Het fotovoltaïsch effect werd voor

het eerst beschreven in 1839, door de Fransman Edmond Becquerel. In de jaren veertig van de twintigste eeuw namen onderzoekers bij Bell Labs in de Verenigde Staten het effect waar in silicium en pas toen kwam de ontwikkeling van de moderne zonnecel op gang. In de jaren vijftig is die ontwikkeling technologisch gezien in een stroomversnelling geraakt, omdat de zonnecel in die beginjaren kon profiteren van de kennis en de processen uit de halfgeleiderindustrie. Inmiddels is de PV-sector



Zonnecellen op de Vanguard I satelliet (1958).

Prototype nieuwe kristallijn Si module (foto ECN).

Dunne-film CIS module (foto Würth Solar).

volwassen geworden en wordt gebruik gemaakt van een scala van – vaak speciaal voor PV ontwikkelde – materialen, zie de grafiek. Hoewel de PV-sector nog steeds aanzienlijk kan profiteren van de ontwikkelingen op andere terreinen (zoals micro- en nano-elektronica en platte beeldschermen) bestaat er een groeiende behoefte aan onderzoek naar oplossingen voor vragen die specifiek zijn voor zonnecellen, zonnepanelen en de overige systeemcomponenten.

RENDEMENTSBEPALENDE FACTOREN

De basiswerking van zonnecellen berust op de absorptie van een foton in een geschikt materiaal (een halfgeleider, maar het kan bijvoorbeeld ook een kleurstofmolecuul zijn) in een geschikte structuur (vaak gebaseerd op een zogenaamde p-n-overgang of varianten daarop, maar soms bijvoorbeeld ook op een grensvlak tussen een kleurstof en een halfgeleider). Zie kader *De werking van een zonnecel* voor een gedetailleerde uitleg.

De absorptie-eigenschappen (kleur-gevoeligheid) van het materiaal worden bepaald door de elektronische structuur en in het bijzonder de bandafstand in het geval van een halfgeleider. Daarnaast speelt uiteraard het optische ontwerp van de zonnecel een rol.

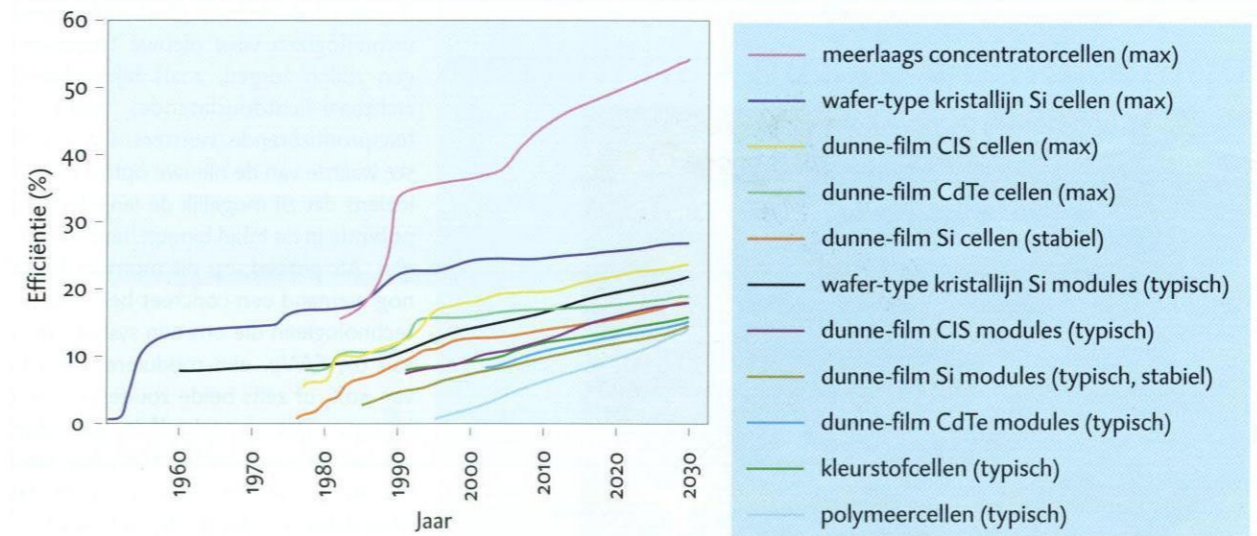
Het verschil tussen het zonnenspectrum en de kleurvoeligheidscurve van het absorberende materiaal en recombinatie (het omgekeerde proces van generatie) zijn de twee belangrijkste factoren die de fundamentele limieten bepalen

van het rendement van een zonnecel. In de best denkbare zonnecel van kristallijn silicium gaat ruim 50% van de energie in het zonlicht verloren doordat een deel van het licht 'te rood' is (de fotonen kunnen geen elektron losmaken) en een ander deel 'te blauw' (slechts een deel van de fotonenergie kan worden benut). Van het resterende deel van de energie gaat ongeveer 20% verloren door onvermijdbare recombinatie, zodat iets minder dan 30% resteert: het maximum rendement voor een siliciumzonnecel. Eigenlijk is er maar één kleur die optimaal bij silicium past en die komt overeen met de bandafstand van silicium: 1,1 elektronvolt (eV), ofwel 1,1 micron (nabij infrarood). Andere materialen dan silicium, met een grotere of kleinere bandafstand, geven een wat andere combinatie van verliezen, maar het maximaal haalbare rendement is nooit hoger dan 30%, en voor sommige materialen aanzienlijk lager. Verder zijn er in de beperkingen die samenhangen met de in de praktijk gebruikte materialen en processen, die immers nooit perfect zijn, en met de noodzakelijke *trade-off* tussen kosten en prestatie, zie tabel. Een zeer effectieve methode om de absorptie van licht te verbeteren is het stapelen van meerdere materialen met verschillende kleurvoeligheden tot tandemzonnecellen. Een methode om de relatieve invloed van recombinatie te verminderen is het gebruik van geconcentreerd zonlicht. Beide methoden worden al decennialang met succes toegepast, vaak ook in combinatie. Zo'n

combinatie heeft eind 2006 gezorgd voor een recordrendement van 40,7%.

ONDERZOEK AAN GOEDE EN GOEDKOPE ZONNECELLEN

Onderzoek op het gebied van fotonische conversie kan ruwweg in de volgende twee categorieën worden ingedeeld. Ten eerste het verkleinen van het verschil tussen het geschatte maximaal haalbare rendement en het praktische rendement van de verschillende soorten cellen en panelen. Vaak gaat het dan ook, of zelfs vooral om verlaging van de materiaal- en fabricagekosten van de cellen en de bijbehorende module. Het is belangrijk om te weten dat die kosten worden uitgedrukt in euro's per eenheid van modulevermogen, dus per watt-piek. Een module met een hoger rendement mag daarom per vierkante meter meer kosten. Deze categorie omvat onder meer het onderzoek aan wafer-type kristallijn-Si, dunne-film Si en dunne-film CIS. De tweede categorie van onderzoek is gericht op het introduceren van nieuwe concepten en conversieprincipes die op termijn zeer hoge rendementen, zeer lage kosten, of nieuwe toepassingen mogelijk maken. Deze categorie omvat onderzoek aan organische zonnecellen (als optie met potentieel zeer lage kosten), maar ook bijvoorbeeld aan het aanpassen van het spectrum aan de kleurvoeligheid van de cel, benutting van het verschil in energie tussen foton- en bandenergie van de halfgeleider ('heteladingsdragers') en aan halfgeleiders met een onconven-



Een overzicht van de historische en verwachte rendementsontwikkeling van de belangrijkste soorten laboratoriumcellen en commerciële modules, zie ook het kader *Soorten zonnecellen*. Voor kleine laboratoriumcellen ($\sim 1 \text{ cm}^2$) zijn maximum waarden aangegeven en voor grote commerciële modules ($\sim 1 \text{ m}^2$) typische waarden. De getoonde rendementen van kleurstofcellen en polymeercellen zijn initiële waarden en nog niet stabiel over lange periodes; alle andere waarden verwijzen naar het stabiele rendement. Alle lijnen met uitzondering van de bovenste hebben betrekking op cellen en panelen bedoeld voor gebruik onder natuurlijk zonlicht, de zogenaamde vlakke-plaat typen. De bovenste lijn is voor cellen waarbij 100x tot 1.000x geconcentreerd zonlicht wordt gebruikt. Het module-rendement (niet aangegeven) is daarbij sterk afhankelijk van de kwaliteit van het optische systeem, meestal een lens.

tionele elektronische bandenstructuur (in het bijzonder met een 'tussenband', waardoor ook generatie in twee stappen mogelijk wordt).

KOSTEN EN MILIEUASPECTEN

De kosten van opwekking zijn nu de belangrijkste barrière voor grootschalig gebruik van zonnestroom. Anno 2007 liggen die kosten tussen 0,25 en 0,65 €/kWh, afhankelijk van de locatie in Europa. In Nederland zijn de kosten ongeveer 0,50 €/kWh. Verwacht wordt dat de prijs op lange termijn tien keer lager kan worden, bij gelijke of zelfs verbeterde betrouwbaarheid en levensduur [7].

Behalve de kosten van elektriciteitsopwekking is ook de integrale milieukwaliteit van PV-systemen van groot belang. Immers, PV is van nature hernieuwbaar, maar niet automatisch duurzaam. De duurzaamheid van PV-systemen wordt onder meer bepaald door de energie en materialen die benodigd zijn voor fabricage en installatie. De energieregverdiertijd van de huidige generatie systemen bedraagt in Nederland ongeveer drie jaar en kan op korte termijn dalen tot ongeveer anderhalf jaar, op een levensduur van ongeveer 30 jaar.

Behalve een korte energieregverdiertijd is het belangrijk dat de toekomstige PV-systemen, die in zeer grote hoeveelheden zullen worden geproduceerd, zijn gebaseerd op ruim beschikbare elementen, zoals silicium, koolstof, ijzer en aluminium. Als dat onmogelijk blijkt, is efficiënt terugwinnen en hergebruiken

van schaarse elementen een absolute voorwaarde.

DE ZONNECELLEN VAN DE TOEKOMST

De werkgroep Science, Technology and Applications van het EU PV Technology Platform heeft een analyse gemaakt van de mogelijkheden voor verlaging van de materiaal- en fabricagekosten van de bestaande PV-technologieën en varianten daarop. De conclusie is dat het potentieel van alle technologieën tot 2020 of zelfs daarna ongeveer gelijk is, mits de rendementsdoelen (zie grafiek) worden gehaald en schaalvoordelen kunnen worden benut. Die conclusie is wellicht minder verrassend dan men zou denken, omdat de kostenopbouw bij verlaging van de totale kosten in toenemende mate wordt bepaald door proceskosten (die niet extreem van

Soorten zonnecellen

Er bestaan verschillende soorten zonnecellen en -panelen. Sommige zijn al ver ontwikkeld en commercieel verkrijgbaar, andere verkeren in een heel pril stadium van ontwikkeling of bestaan alleen nog maar als idee. Men onderscheidt grofweg vier hoofdcategoryen: (1) zonnecellen van kristallijn silicium in de vorm van plakken, (2) dunne-film zonnecellen op basis van silicium (amorf of microkristallijn), koper-indium-diselenide of -sulfide (CIS) en varianten daarop, of cadmiumtelluride, (3) gestapelde zonnecellen op basis van 'III-V'-halfgeleiders (de familie rondom galliumarsenide) en (4) nieuwe, nog niet commercieel verkrijgbare typen zoals 'organische' zonnecellen op basis van polymeren of een kleurstof in combinatie met een transparante halfgeleider (bijvoorbeeld titaanoxide).

elkaar verschillen) en de materiaalkosten (waarin de paneelkosten uiteindelijk een belangrijke rol spelen). Er zijn dan ook voor alle systemen dezelfde kostendoelstellingen geformuleerd, zie de tabel op de volgende pagina en de Strategic Research Agenda in [7].

Laten we terugkomen op de oorspronkelijke vraag of het succes van PV een doorbraak vergt of een kwestie is van bloed, zweet en tranen. Als we ons beperken tot vlakke-plaat PV voor toepassing in gematigde streken (het Nederlandse licht laat zich slecht concentreren) dan is duidelijk dat de huidige technologieën en voor de hand liggende varianten daarvan ons heel ver kunnen brengen in termen van kostenverlaging, een en ander bij gematigd stijgende rendementen. Die ontwikkeling zal niet eenvoudig zijn (met andere woorden:

Zonnepanelen op daken van huizen



foto gemeente Heerhugowaard

Een aantal zonnepanelen in serie en/of parallel geschakeld vormt het hart van een PV-systeem. Een compleet PV-systeem omvat behalve de panelen en de bijbehorende draag- of bevestigingsconstructie ook bekabeling, elektronica (met name omvormer of laadregelaar), eventueel accu's, gebruikersinterfaces, etc. Alle onderdelen samen, behalve de panelen, worden de *Balance-of-System (BoS)* genoemd. Het is gebruikelijk om cel-, module- of systeemvermogen aan te geven in watt-piek (Wp), dat is het vermogen dat wordt geleverd bij volle zon, oftewel 1.000 watt/m² aan zonlicht. Omdat de zon niet altijd schijnt en de maximale intensiteit meestal niet wordt gehaald ligt het over een jaar gemiddelde vermogen aanzienlijk lager dan het piekvermogen. De verhouding tussen gemiddeld vermogen van een compleet systeem en de optelsom van de piekvermogens van de panelen wordt uitgedrukt in de capaciteitsfactor, die ruwweg ligt tussen 0,07 en 0,20 voor de gebieden tussen Noord-Europa en de Sahara.

bloed, zweet en tranen vragen), maar daar staat tegenover dat hij voortbouwt op bewezen concepten. Of die technologieën ons verder dan de doelen voor 2030 (of beter de periode 2020-2040) kunnen brengen is onduidelijk. De opties die zich nu in het laboratorium bevinden (de doorbraakkandidaten)

kunnen de kans van slagen van de totale PV-ontwikkeling tot 2030 verhogen of die ontwikkeling versnellen. Verder zouden ze de nu voorziene rendementen voor modules in die periode kunnen verbeteren, al lijkt de kans daarop niet heel groot gezien het prille stadium van ontwikkeling waarin de opties verkeren.

	1980	Nu	2015	2030	Potentie op lange termijn
Prijs voor compleet systeem (2006 €/Wp, excl. BTW)	>30	5	2,5	1	0,5
Productiekosten van elektriciteit voor NL (2006 €/kWh)	>3	0,50	0,25	0,10	0,05
Typische rendementen van commerciële modules (%)	tot 8%	tot 15%	tot 20%	tot 25%	tot 40%
Typische energierugverdiendtijd van een compleet systeem (jaar)	>10	3	1,5	<1	<0,5

De kans is echter wél groot dat nieuwe technologieën voor nieuwe toepassingen zullen zorgen, zoals bijvoorbeeld zichtbaar-lichtdoorlatende, elektriciteitsproducerende vensters. De grootste waarde van de nieuwe opties is mijn inziens dat zij mogelijk de langetermijn potentie in de tabel binnen bereik brengen. Als gezegd, op dit moment heeft nog niemand een concreet beeld bij de technologieën die ons een systeemprijs van 0,5 €/Wp, een modulerendement van 40%, of zelfs beide zouden kunnen brengen. Dat op zichzelf is meer dan voldoende reden om hard te werken aan nieuwe zonnecellen, ook al zullen die onze daken voorlopig nog niet sieren.

REFERENTIES

- 1 Zie *A Vision for Photovoltaic Technology*, www.eupvplatform.org
- 2 Zie bijvoorbeeld *Welt im Wandel: Energie-wende zur Nachhaltigkeit*, Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung, Globale Umweltveränderungen (Springer-Verlag, Berlin, 2003), ISBN 3-540-40160-1; zie ook www.wbgu.de/wbgu_jg2003.pdf en *Energy revolution: A Sustainable world outlook*, European Renewable Energy Council and Greenpeace, 2007, zie <http://www.greenpeace.nl/raw/content/reports/energy-revolution-a-sustainable-2.pdf>
- 3 Martin A. Green, *Third generation photovoltaics; advanced solar energy conversion* (Springer-Verlag, Berlijn, 2003).
- 4 Zie <http://www.spectrolab.com/com/news/news-detail.asp?id=172>
- 5 Zie jaarlijks overzicht van commercieel verkrijgbare modules in *Photon*, *Das Solarstrom Magazine*, februari 2007.
- 6 De capaciteitsfactor beschrijft het (triviale) effect van de jaargemiddelde instraling in vergelijking met de maximale instraling, maar ook andere effecten, zoals die ten gevolge van afwijkende temperaturen, licht dat 'scheurend' binnenvalt, andere kleur-samenstelling van het licht, verliezen ten gevolge van de omzetting van gelijk- naar wisselspanning, enzovoorts.
- 7 Zie de *Strategic Research Agenda* van het EU PV Technology Platform, www.eupvplatform.org.
- 8 Door geconcentreerd licht te gebruiken wordt de balans tussen generatie en recombinatie verschoven, wat de negatieve invloed van recombinatie vermindert. Omdat het een *logaritmisch effect* betreft zijn hoge concentratiefactoren nodig (en een aangepast celontwerp) om een significant voordeel te bereiken. Concentratie is tot op heden alleen goed mogelijk voor direct (i.t.t. diffuus) zonlicht en daardoor minder geschikt voor toepassing in gematigde streken.
- 9 Alsema, De Wild-Scholten and Fthenakis, *Proc. 21st European PV Solar Energy Conference* (2006), zie www.ipcrystalclear.info.