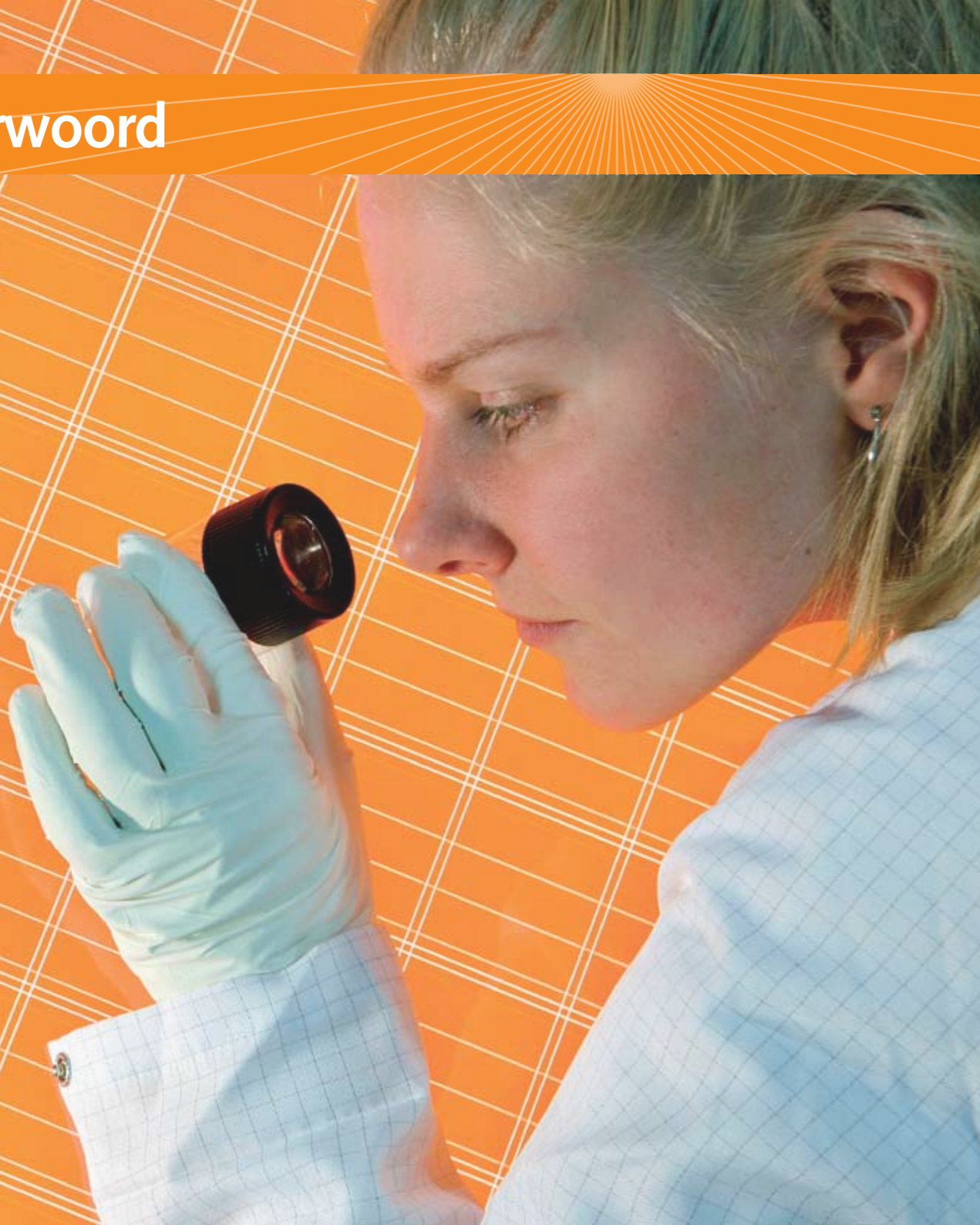




Roadmap Zon op Nederland

Een roadmap voor het solar ecosysteem van Nederland
naar een wereldwijd (uit)stralende topregio

Voorwoord



Roadmap 'Zon op Nederland'

Zonnestroom is *booming business* en ons land doet volop mee! Nederland beschikt over unieke technologie, succesvolle ondernemers en – het zal u wellicht verbazen – voldoende zon om zonnestroom op grote schaal en concurrerend toe te passen. De mondiale markt voor zonnestroom groeit al decennia met dubbele cijfers en de laatste tijd zelfs met meer dan vijftig procent per jaar. Bovendien is het einde van deze groei voorlopig nog niet in zicht want de bijdrage van zonnestroom aan de totale energiebehoefte is nog bescheiden, de kosten dalen snel en het gevoel van urgentie om duurzame energie in te zetten wordt steeds sterker. In de hele wereld ontdekt men de enorme potentie van zonnestroom voor de energievoorziening én voor de economie. Groene energie en groene banen, wat wil je nog meer.

Nederland heeft een pioniersrol gespeeld bij de toepassing van zonnestroom in de gebouwde omgeving en bereidt zich inmiddels voor op grootschalig gebruik zonder steuntjes in de rug in de vorm van subsidie of een terugleververgoeding. Nederland was er ook al heel vroeg bij op het gebied van technologieontwikkeling en productie van zonnecellen en -panelen en andere systeemonderdelen. In de afgelopen twintig jaar heeft ons land zich door inzet van velen en met steun van de overheid ontwikkeld tot een belangrijke speler op het gebied van zonnestroomtechnologie. Kortom, onze uitgangspositie om mee te profiteren van de verdere mondiale groei van de sector is uitstekend.

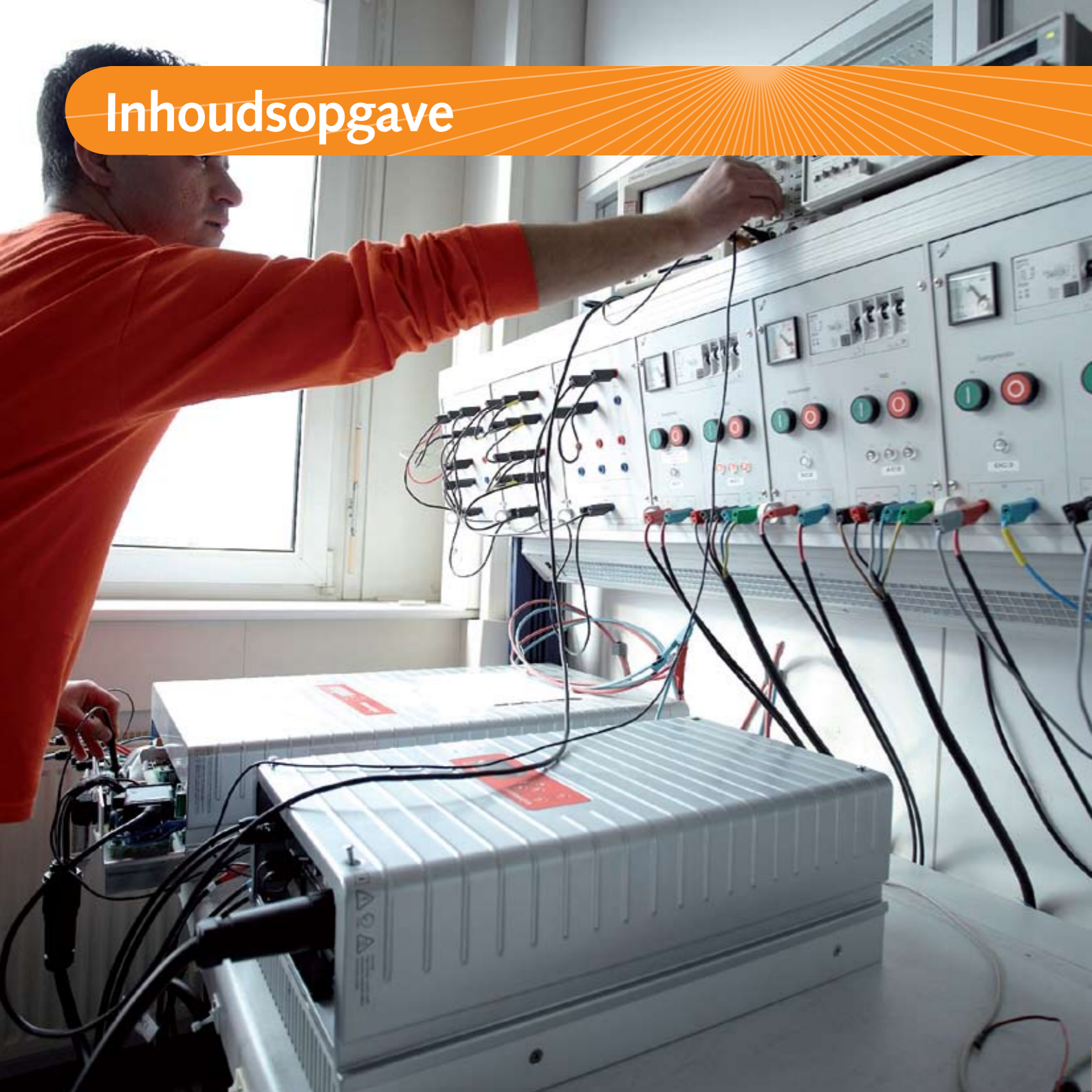
Het komende decennium staat in het teken van het bereiken van *'grid parity'* in grote delen van de wereld. De dalende opwekkosten van zonnestroom zullen de stijgende

consumentenprijzen van conventionele stroom kruisen en snel daarna zullen markten ontstaan die niet meer afhankelijk zijn van overheidsingrijpen. 'Het echte werk', volgens velen. De uitdaging en de kans is om onze uitgangspositie vast te houden en verder uit te bouwen nu steeds meer landen en bedrijven mee gaan doen en hun aandeel claimen. Niemand zal durven te beweren dat het makkelijk zal zijn, maar de belofte is zo enorm dat het alleszins de moeite waard is om er tegenaan te gaan. Wederom gesteund door de overheid, die zonnestroom heeft aangemerkt als belangrijk onderdeel van het 'Topgebied Energie'. De landelijke overheid heeft bovendien belangrijke steun gekregen van de provinciale en plaatselijke overheden die ook de kansen van de zonnestroomsector willen grijpen en de ontwikkeling steunen.

De zonnestroomsector is echter divers en complex. Individen, overheden en bedrijven raken makkelijk de weg kwijt. Wat zijn de winnende technologieën (of zijn die er niet), op welke onderdelen kan Nederland een rol van betekenis (blijven) spelen, wie en wat zijn onze concurrenten en/of partners en hoe moeten we ons 'ecosysteem' inrichten om de mondiale concurrentie het hoofd te bieden? Een wandelaar die de weg niet wil kwijtraken moet goed om zich kijken en heeft een kaart of gps-systeem op zak. De zonnestroomsector zal de mondiale ontwikkelingen nauwkeurig moeten volgen en kan daarnaast gebruik maken van de voor u liggende roadmap. Een roadmap die is gemaakt door de gebruikers zélf; zij deelden hun ervaringen en inzichten met elkaar. Het roadmap projectteam zorgde voor de compilatie en de analyse. Een behouden en succesvolle reis gewenst!

*Wim Sinke, namens het projectteam
Roadmap 'Zon op Nederland'*

Inhoudsopgave



| | | |
|--------------------|---|----|
| Hoofdstuk 1 | De roadmap | |
| 1.1 | Waarom een roadmap | 9 |
| 1.2 | Doelstelling en resultaat | 10 |
| Hoofdstuk 2 | Samenvattende situatieschets | |
| 2.1 | Samenvatting | 13 |
| 2.1.1 | <i>Hoofdlijnen Roadmap</i> | 14 |
| 2.1.2 | <i>Markttrends</i> | 14 |
| 2.1.3 | <i>Technologietrends</i> | 14 |
| 2.1.4 | <i>Ecosysteemtrends</i> | 15 |
| 2.1.5 | <i>Actierreinen</i> | 15 |
| 2.2 | Situatieschets | 16 |
| Hoofdstuk 3 | Technologieontwikkelingen | |
| 3.1 | Celtechnologie | 21 |
| 3.1.1 | <i>De verschillende celtechnologieën</i> | 21 |
| 3.1.2 | <i>Ontwikkeling celtechnologie in cijfers</i> | 24 |
| 3.2 | Materiaaltechnologie | 26 |
| 3.3 | Productietechnologie | 28 |
| 3.4 | Systeemtechnologie | 32 |
| Hoofdstuk 4 | Ecosystemen | |
| 4.1 | Het Nederlandse ecosysteem | 35 |
| 4.2 | Afzetmarkten | 35 |
| 4.3 | PV-technologie | 36 |
| 4.4 | Analyse internationale ecosystemen | 36 |
| 4.5 | Conclusie | 38 |
| Hoofdstuk 5 | Markten, marktkansen en focusgebieden | |
| 5.1 | Markten | 41 |
| 5.2 | Marktkansen | 43 |
| 5.3 | Focusgebieden | 46 |
| Hoofdstuk 6 | Afronding | |
| 6.1 | Afkortingen en woordenlijst | 53 |
| 6.2 | Literatuurlijst | 54 |
| 6.3 | Betrokkenen | 55 |

1. De roadmap



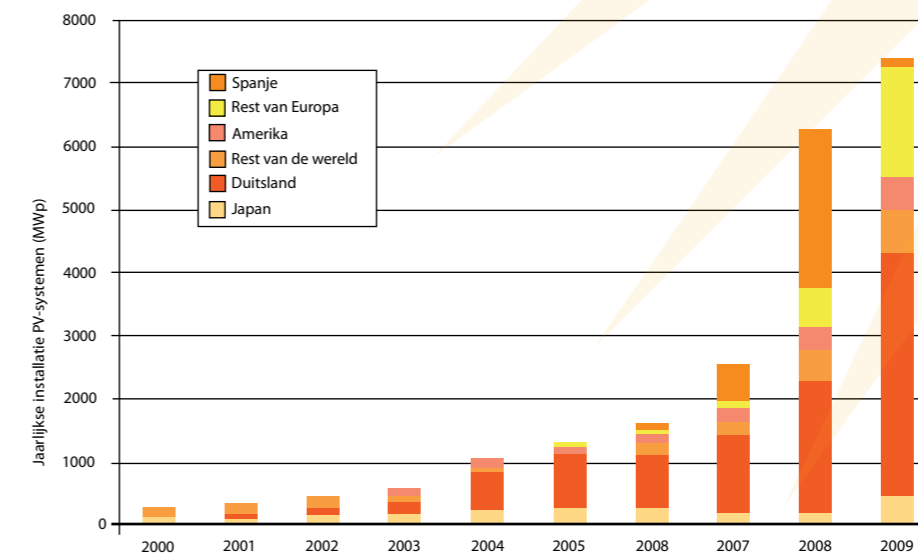
Het hoofdstuk 'De roadmap' is opgedeeld in twee paragrafen. In de eerste paragraaf wordt uitgelegd waarom deze roadmap is samengesteld. In paragraaf twee worden de doelstellingen en het beoogde resultaat toegelicht.

1.1 Waarom een roadmap

De markt voor producten en diensten met duurzame energie vertoont wereldwijd een forse groei. Zonne-energie – en vooral zonnestroom (verder solar PV genoemd) – neemt in het portfolio van duurzame energietechnologieën een bijzondere plaats in. Met solar PV wordt licht in één stap omgezet in elektriciteit. Zonnestroom kan daarmee overal ter wereld opgewekt en gebruikt worden. Bovendien is de diversiteit aan PV-toepassingen groot: van kleine autonome systemen voor consumenten en rurale elektrificatie, tot middelgrote netgekoppelde systemen geïntegreerd in gebouwen en grote netgekoppelde

centrales. Kortom, van milliwatts tot gigawatts met één bouwsteen: de zonnecel. Of nauwkeuriger gezegd: het zonnepaneel (de module).

De mondiale markt van solar PV-systemen kent al vele jaren een groei van dubbele cijfers (zie figuur 1). Dit is vooral het gevolg van marktstimuleringsprogramma's in diverse landen. De komende tien jaar ontstaan naar verwachting de eerste grote zelfdragende markten en in de periode daarna zal zonnestroom geleidelijk helemaal op eigen benen kunnen gaan staan, in vrijwel alle landen en toepassingen. De solar PV-markt blijft daarom de komende decennia sterk groeien en creëert een economische sector van zeer grote omvang. Anno 2010 bedroeg de markt ruim vijftien gigawattpiek (GWp), met een geschatte waarde van ruim vijftig miljard euro. Het aantal banen in de mondiale solar PV-sector bedraagt naar schatting drie- tot vierhonderdduizend. In 2020 zal dit vijftig tot honderd GWp zijn met een waarde van vijfen-



Figuur 1. Mondiale markt solar PV-systemen (bron: PV Status Report 2010).

zeventig tot honderdvijftig miljard euro. Daarmee biedt de markt grote kansen voor landen als Nederland met hoogwaardige technologie. Nederland kent een aantal sterke PV-spelers die mondiaal opereren. Het betreft daarbij niet alleen spelers uit de markt van solar PV-systemen, maar ook toeleveranciers van bedrijven die produceren ten bate van de solar PV-systeemmarkt. Om hen en nieuwe Nederlandse partijen mee te laten groeien met de wereldmarkt zijn krachtenbundeling rond kennis- en technologieontwikkeling en het maken van strategische keuzes rond de vele product-marktcombinaties (pmc's) noodzaak. Alleen zo wordt een sterk ecosysteem gebouwd waarmee succesvolle concurrentie met het buitenland mogelijk is. Het totaal aantal banen in de Nederlandse PV-sector bedraagt op dit moment ongeveer tweeduizend en kan in de loop van dit decennium verveelvoudigen. De omzet van het bijbehorende Nederlandse bedrijfsleven wordt in 2010 geschat op ongeveer één miljard euro en kan in de komende vijf jaar groeien naar twee à drie miljard euro.

Deze roadmap geeft een overzicht van Nederlandse, Europese en mondiale ontwikkelingen rond solar PV: in termen van technologie, spelers en internationale concurrentie, producten en marktsegmenten. Via een SWOT-analyse (*strengths, weaknesses, opportunities and threats*) van het Nederlandse ecosysteem zijn pmc's gedefinieerd die bedrijven goede kansen bieden. Daarbij wordt aangegeven hoe pmc's worden ontwikkeld om bij te dragen aan het ontstaan van meer en nieuwe bedrijvigheid. Bovendien wordt geschetst hoe dit kan bijdragen aan de overgang naar een duurzame energiehuishouding.

1.2 Doelstelling en resultaat

Met het roadmapproject willen alle betrokken partijen het Nederlandse ecosysteem kracht bijzetten. De gehele PV-keten vraagt om een integrale aanpak van alle Nederlandse belanghebbenden. Sterkten van Nederland zijn vooral

gelegen in een sterke en hoogwaardige technologische uitgangspositie met regionale en mondiale netwerken die legio kansen bieden om in de internationale voorhoede een prominente rol te spelen.

De marktinventarisatie rond technologie- en productontwikkeling, toepassingen, productiemiddelen en dienstverlening geeft een beeld van de kansen en de gewenste ontwikkelingsrichting weer op de korte en middellange

Doelstellingen

Doelstelling van deze roadmap is het creëren van een Nederlands solar ecosysteem – waarbij de volledige *supply chain* betrokken is – dat zich richt op de juiste marktkansen. Daarvoor zijn de volgende ingrediënten benodigd die allen terugkomen in deze roadmap:

- ☀ **marktoverzicht:** Nederlandse, Europese en mondiale ontwikkelingen op het gebied van solar PV-producten en -diensten;
- ☀ **concurrentieoverzicht:** relatieve posities en sterkten van andere marktbedienende ecosystemen;
- ☀ **technologieoverzicht:** technologische ontwikkelingen op het gebied van materialen, processen, cellen, modules en andere componenten en systemen;
- ☀ **ecosysteem:** opbouwen van een samenhangende infrastructuur op het gebied van kennis-, technologie- en businessontwikkeling voor succesvolle internationale concurrentie;
- ☀ **zichtbaarheid:** bekendheid creëren van het Nederlandse ecosysteem en de individuele spelers;
- ☀ **borging:** bedrijfsstrategieën aanpassen en richten op belangrijke speerpunten om ook op langere termijn successen te behalen;
- ☀ **roadmap:** leidraad voor het benutten van kansen op het gebied van productiemiddelen, producten, toepassingen en kennis- en technologieontwikkeling gebaseerd op het voorgaande.

termijn. De sterkten van de Nederlandse partijen moeten hierbij aansluiten. Hoofddoel van deze roadmap is het verkrijgen van direct toepasbaar inzicht in kennis, competenties, netwerken en verbeteropties rond zonnetechnologie. Daarnaast wordt inzicht verkregen in de bijbehorende bedrijfsstrategieën. Dit moet uitmonden in diverse vervolprojecten om concreet stappen vooruit te maken. De primair uitvoerende partners en doelgroep in het roadmapproject zijn zowel bedrijven als kennisinstellingen. Een aantal hiervan zijn mkb'er zoals Beltech, Chematronics, CCM, Meco Equipment Engineers, Minase Consulting en Sioux Technologies. Een aantal zijn hightech bedrijven van groter formaat zoals OTB Solar, NTS Group, TMC, OM&T

en Solland Solar. Daarnaast nemen ook kennisinstellingen als TNO, Technische Universiteit Eindhoven (TU/e), en Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) en branchevereniging Holland Solar deel.

De partners zijn op diverse ketenposities actief. Het is nadrukkelijk de bedoeling om de solar gemeenschap uit te breiden met nieuwe spelers. Tijdens het roadmapproces hebben ook partijen die niet tot de bekende huidige groep behoren, meegedaan aan de workshops. Bij de vertaling naar vervolprojecten worden eveneens additionele bedrijven en kennisinstellingen (ook uit andere applicatiesectoren) nadrukkelijk ingeschakeld.

2. Samenvattende situatieschets



Het hoofdstuk 'Samenvattende situatieschets' is opgedeeld in twee paragrafen. In de eerste paragraaf wordt een korte en bondige samenvatting van de volledige roadmap gegeven. In paragraaf twee wordt de gehanteerde werkwijze om tot deze roadmap te komen en de indeling van deze roadmap gekenschetst.

2.1 Samenvatting

2.1.1 Hoofdpijnen Roadmap

De omzet van het Nederlandse PV-ecosysteem is in 2010 verdubbeld naar één miljard euro. De belangrijkste producten en diensten waarmee het Nederlandse ecosysteem omzet en winst maakt zijn:

- ☀ intellectueel eigendom als resultaat van kennis- en technologieontwikkeling;
- ☀ materialen voor PV-productie;
- ☀ (productie van) PV-cellen en -modules;
- ☀ overige PV-componenten zoals elektronica en constructie-elementen;
- ☀ PV-productieapparatuur;
- ☀ (engineering en installatie van) PV-systemen;
- ☀ projectontwikkeling en financiële dienstverlening.

De successen worden (nog te) vaak behaald op individuele basis. Om ook in de toekomst van succes verzekerd te zijn en het succes verder uit te bouwen, is een sterk Nederlands ecosysteem van groot belang. Door samenwerking kan business gegenereerd worden in zowel te ontwikkelen applicaties (zoals gebouwgebonden installaties), productiesystemen en nieuwe cel- en module ontwerpen. Door de gehele kennisketen in de thuismarkt te sluiten, kan iedere individuele speler in de markt profiteren van de nabije aanwezigheid van kennis en kunde.

Zo kan het Nederlandse ecosysteem zich ontwikkelen op een aantal sterke onderdelen zoals de technologische kennisbasis, het nationale machinebouwcluster en het overige deel van de hightech sector. Daarnaast kan Nederland profiteren van goed opgebouwde clusters zoals de kassenbouw en de automotive sector. Deze clusters gecombineerd met de solar industrie, kunnen tal van potentiële kansen opleveren.

Om kansrijke pmc's te ontwikkelen, zijn op drie hoofdgebieden acties nodig. Deze hoofdgebieden zijn weergegeven in onderstaande tabel.

| Roadmap | Wereldwijde trend | Actie voor Nederlands ecosysteem |
|--------------------|--|---|
| Applicaties | Grid parity op het niveau van consumentenprijzen wordt in de eerste landen binnen drie jaar bereikt Marktgroei is meer dan veertig procent per jaar Toenemende variëteit in toepassingen | PV-bouwelementen ontwikkelen en relatie leggen met intelligente netten Combinaties maken met kassen en automotive Autonome toepassingen |
| Technologie | Wafer silicium: mono- en multikristallijn Dunne-film technologieën Opkomende technologieën | Nieuwe productiemiddelen en productieprocessen ontwikkelen Nieuwe celtechnologieën en materialen ontwikkelen Modules en systemen integreren |
| Ecosystemen | Duitsland en Japan zijn bezig met strategische heroriëntatie China (en Taiwan) zijn sterk en groeiend Amerika en Korea komen eraan | Samenwerken met Duitsland, België en Amerika Actief zijn in China (India en Brazilië) Kennis en kunde verbinden in een Nederlandse pilot productieketen |

2.1.2 Markttrends

De afzetmarkt van solar PV-systemen laat jaarlijks een groei zien van ruim veertig procent. Logischerwijs groeit als direct gevolg de productiecapaciteit voor cellen, modules, componenten, materialen en productieapparatuur. Landen waar de massaproductie groeit (zoals China) kopen daarbij vaak productieapparatuur in Europa. Nederlandse machinebouwers als OTB Solar, Smit Ovens en Tempres Systems spelen daarbij een prominente rol.

De wereldwijde marktgroei en de sterke eigenschappen van de aanwezige industrie bieden Nederland kansen om aanvullende producten te ontwikkelen. Gebouwebonden installaties vormen een van die kansen. Voor deze specifieke toepassing, die gebruik maakt van modulaire bouwelementen (zoals gevels en daken en in de toekomst ramen) is nauwe samenwerking met de bouwsector nodig. Een andere kans is PV-toepassing door de sterke Nederlandse kassenbouw, waar PV-energieopwekking gecombineerd kan worden met selectieve belichting van gewassen. Daardoor kan een hoger groeiendement met een lager energieverbruik behaald worden. Verder kan via de Nederlandse automotive sector gewerkt worden aan PV-daken voor auto's en andere voertuigen. Dit kan bovendien verbreed worden naar de jachten- en botenbouw. De lokaal op het voer- of vaartuig opgewekte en gebruikte elektrische energie heeft een hogere waarde dan de elektrische energie in een huishouden, waardoor dergelijke systemen ook een hogere kostprijs mogen hebben. Kortom, PV-applicaties gaan zich verder uitbreiden naar andere sectoren zoals de bouw-, automotive en maritieme sector.

2.1.3 Technologietrends

Om PV-producten te kunnen realiseren zijn verschillende basiselementen nodig. Logischerwijs spelen de cellen, modules en halffabricaten en de productie daarvan een essentiële rol. Bij al deze zaken wordt gestreefd naar hogere rendementen, lagere kosten per eenheid van geproduceerd vermogen,

integratie in het eindproduct, grotere variëteit aan technologieën, (nog) langere levensduur, hogere betrouwbaarheid en integrale duurzaamheid.

Het huidige succes van de Nederlandse PV-industrie is sterk gebaseerd op de groei van de kristallijn siliciumtechnologie. Bijna alle onderdelen van de kristallijn siliciumwaardeketen zijn vertegenwoordigd in het Nederlandse PV-cluster. Bovendien leveren Nederlandse bedrijven essentiële bijdragen aan mondiale innovaties in deze keten. De waarde van individuele onderdelen wordt zeker bij die innovaties sterk bepaald door de onderlinge samenhang en door het geheel van de keten. Met andere woorden: vernieuwingen hebben meestal consequenties voor meerdere delen of zelfs voor het geheel van de keten. Dat geldt zowel technologisch als organisatorisch. Vertegenwoordiging van de hele keten, inclusief productie van materialen en het ontwikkelen en produceren van cellen en modules, maakt daarom de individuele onderdelen van de keten meer waard. Voor het toekomstige succes van Nederland is het belangrijk dat ook sterke posities worden opgebouwd op het gebied van dunne-film PV-technologieën.

Het Nederlandse cluster gaat zich in het verlengde hiervan richten op de volgende hoofdthema's:

- ☀ **platforms voor (proces)technologieontwikkeling:** geavanceerde processen voor de productie van cellen, modules en andere PV-toepassingsvormen en -materialen. Behalve productiviteit en prestaties spelen ook integrale duurzaamheid en veiligheid een belangrijke rol;
- ☀ **platforms voor apparatuurontwikkeling:** zowel voor wafergebaseerde cel- en moduletechnologie, als voor dunne-filmtechnologieën. Ook hier is niet alleen aandacht voor productiviteit en prestaties, maar ook voor standaardisatie, duurzaamheid en veiligheid nodig;
- ☀ **toepassing van solar PV-systemen:** het gaat hier onder meer om bouwelementen en andere uitvoeringsvormen voor integratie, inclusief werkwijzen en certificeringen.

2.1.4 Ecosysteemtrends

De vraag naar solar PV-systemen neemt de laatste jaren aanzienlijk toe. Als direct gevolg zijn wereldwijd een tiental grote ecosystemen ontstaan. Ieder ecosysteem kent een eigen karakteristieke samenstelling van competenties. Duitsland leidt de dans en beschikt over een compleet ecosysteem met zowel kennis, kunde als kassa en voldoende massa om in potentie lange tijd vooraanstaande producten en diensten te leveren. Niettemin moet ook Duitsland zich constant reorganiseren en vernieuwen om het hoofd te bieden aan de felle concurrentie uit onder meer Azië.

Ook Nederland kent een goede positie met uitstekende kansen om business te genereren. Nederland behoort op sommige onderdelen zelfs tot de mondiale kopgroep. Om de kansen te grijpen, zijn krachtenbundeling en acceleratie noodzakelijk. Het opbouwen van een goed functionerend ecosysteem is daartoe essentieel. Concreet betekent dit dat in de markt gekeken moet worden welke kansen er zijn voor pmc's, maar ook welke technologieën ontwikkeld moeten worden en hoe de Nederlandse concurrentiepositie verbeterd kan worden. Op R&D-gebied is Nederland een internationale speler van formaat. Toonaangevende R&D is een belangrijke randvoorwaarde om de Nederlandse industrie van toptechnologie te kunnen voorzien. Doel is de industrie laagdrempelig, snel, flexibel en efficiënt te kunnen bedienen. Kennis moet daartoe herkenbaar en toegankelijk worden gemaakt, zodat het voor bedrijven eenvoudig en aantrekkelijk is om de kennis te gebruiken. Het ideale plaatje is een kennisloket zonder wachtrij en met hulpvaardig en deskundig personeel achter de balie. Belangrijke aspecten daarbij zijn:

- ☀ effectieve innovatie met meerdere partijen en optimale benutting van expertises;
- ☀ open innovatie, flexibiliteit en samenwerking over disciplines en functies heen;
- ☀ concentratie rond *hot spots* (zoals Eindhoven) en uitbouw van het samenwerkingsverband Solliance;
- ☀ via de aanwezige kiemen vorming van een solar 'ASML/NXP' mogelijk maken.

In de komende jaren moet het Nederlandse ecosysteem gecompleteerd worden. Er is behoefte aan een volledig palet van kennis en kunde, zodat een breed scala aan nieuwe producten en processen snel kan worden ontwikkeld. Daarbij is het zoeken van samenwerking met bestaande en goed uitgeruste ecosystemen zoals het geografisch aantrekkelijk gelegen Duitsland belangrijk. Verder ligt samenwerking met België voor de hand, zeker als het gaat om de kennisontwikkeling bij Imec. Landen als Korea en Japan nodigen vooralsnog niet uit om mee samen te werken gezien hun zelfstandig ingerichte en relatief gesloten ecosystemen. Ondanks dat China zich opener opstelt en bijvoorbeeld interessant is voor samenwerking bij kennisontwikkeling en verkoop van productieapparatuur, dient deze samenwerking met de nodige voorzichtigheid te worden aangepakt. Er is immers geen sprake van een 'level playing field' tussen China en Europa.

2.1.5 Actieterreinen

Als Nederland het huidige ecosysteem wil laten groeien naar een ecosysteem van wereldformaat, moeten acties worden ondernomen op drie hoofdterreinen:

- ☀ applicaties;
- ☀ technologieën;
- ☀ organisatie (ontwikkeling van het ecosysteem zelf).

Om praktische invulling aan deze acties te kunnen geven, zijn deze terreinen onderverdeeld in thema's en focusgebieden. De uitvoering is een zaak van de sector als geheel: van Solliance en andere R&D-spelers tot de industrie en overheid. Elke partij heeft zijn eigen specifieke rol te spelen. Overkoepelende programmering en het definiëren van concrete projecten rondom focusgebieden zijn de concrete uitvoeringsvormen.

2.2 Situatieschets

De Nederlandse economie kan volop profiteren van de groeiende PV-markt als de voorgestelde route van deze roadmap gevolgd wordt. Motto van deze roadmap is dan ook overschakelen van het beeld 'de boot niet missen' naar 'onze kansen verzilveren'. Kansen zijn er namelijk legio en op zeer verschillende gebieden: van productieapparatuur via systeemintegratie in gebouwen en de infrastructuur tot kennisexport en dienstverlening.

Deze roadmap is bedoeld om richting te geven aan het grijpen van de kansen en zo de kans op succes te vergroten. Het Nederlandse PV-cluster moet zich internationaal sterk op de kaart te zetten en ontwikkelen tot een voorhoedespeler op een breder gebied dan nu het geval is. De succesfactoren voor innovatie resulteren in drie componenten voor een adequate roadmap:

- ☀️ uitbouwen wat sterk is en parels laten groeien;
- ☀️ strategische keuzes voor nieuwe Nederlandse sterktes, kiemen voor de toekomst;
- ☀️ economische kansen grijpen door samenwerking en synergie.

Een van de fundamenten van deze roadmap is de SWOT-analyse van het Nederlandse ecosysteem (zie figuur 2). Met de samenstelling van deze roadmap worden sterke eigenschappen die uit de SWOT-analyse naar voren komen, volledig benut door hoogwaardige technologie te ontwikkelen voor producten, processen en productiemiddelen. Daarbij worden 'externe sterkten' zoals de bouw, kassen en automotive aangeschakeld om versneld rendement te behalen. Tegelijkertijd worden de zwakten weggenomen door een systematische aanpak (zoals voorgesteld in deze roadmap) en door de massa te vergroten. Dit laatste gebeurt onder meer door de kracht van de hightech machinebouwsector volledig te benutten en door een hogere doorloopsnelheid van kennis-kunde-kassa te bereiken door completering van het ecosysteem.

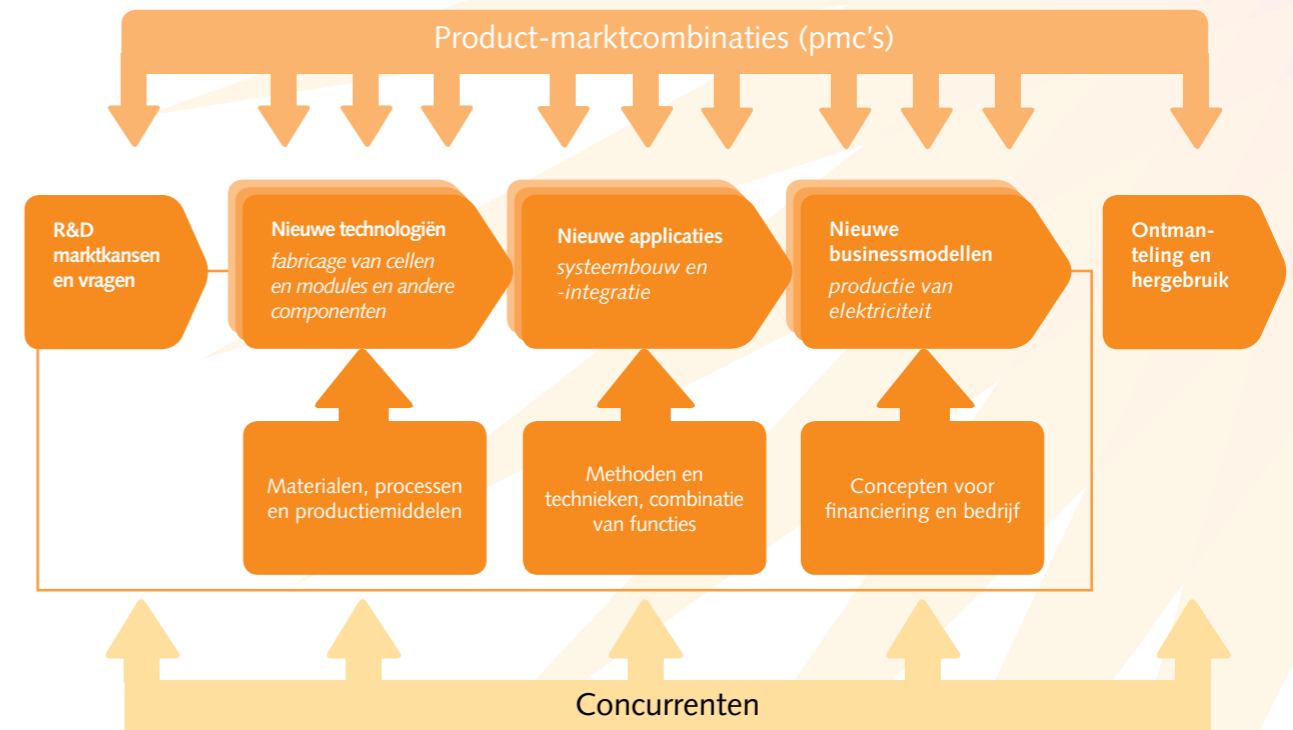
Samenwerking tussen bedrijfsleven, publieke (met name onderzoeks)organisaties, onderwijs en overheid maakt het mogelijk om sneller dan andere ecosystemen te accelereren en business te genereren. Samenwerking met onze krachtige en succesvolle bureaus geeft daarbij een extra positieve stimulans.



Figuur 2. Opgestelde SWOT-analyse van het Nederlandse ecosysteem.

Werkwijze en ketenanalyse

Kansen voor de Nederlandse spelers in het ecosysteem kunnen gevonden worden in alle onderdelen van de waardeketen, zoals te zien in figuur 3 en beschreven in deze roadmap. Een kans is altijd een combinatie van een product of dienst en een markt, oftewel een product-marktcombinatie. Twee voorbeelden ter illustratie zijn het assembleren van procesapparatuur voor zonnecel-fabrikanten en het leveren van nieuwe technologie door onderzoeksinstituten aan PV-fabrikanten.



Figuur 3. PV-waardeketen bestaande uit de fasen van idee en grondstof tot en met bedrijf en hergebruik, inclusief de verschillende mogelijkheden en kansen voor het definiëren van pmc's.

In aanvulling op figuur 3 is het belangrijk om een duidelijk onderscheid te maken tussen de volgende in dit document gebruikte termen:

- ☀️ **technologie:** uitvoeringsvorm van zonnecellen, modules en andere systeemcomponenten (inclusief bijbehorende benodigde materialen, productiemachines, et cetera);
- ☀️ **applicatie:** toepassingsvorm van PV-elementen (al dan niet direct verbonden met de uitvoeringsvorm);
- ☀️ **businessmodel:** methode om de investering in de applicatie terug te verdienen en winst te maken;

- ☀️ **product-marktcombinatie (pmc):** combinatie van een product of dienst en afnemers daarvan.

In deze roadmap ligt de nadruk op de kansen die samenhangen met de onderdelen 'technologieën' en 'applicaties'. Om succesvol te kunnen opereren op de internationale markt is het voor partijen in het Nederlandse ecosysteem nodig om geavanceerde, concurrerende producten te kunnen leveren. Daarvoor zijn onderzoek en technologieontwikkeling essentieel. Deze zijn onderverdeeld in thema's en ontwikkelingsaspecten, zoals weergegeven in de tabel op de volgende pagina.

Roadmap: wegwijzers voor de periode 2011-2015

Richtingen

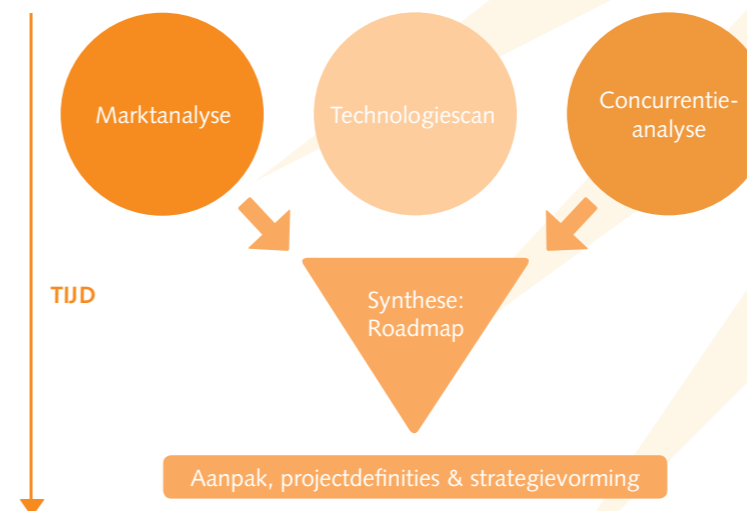
| Hoofdgebieden | Marktkansen | Ontwikkelingsaspecten |
|---|--|---|
| Applicaties (hoofdstuk 5) | Gebouwde omgeving en infrastructuur: geïntegreerde PV-systemen | PV-bouwelementen en esthetica Intelligentie en functies op elementniveau |
| | Tuinbouwsector: PV in kassen | Integratie en combinatie van functies (optimale belichting) |
| | Vervoersector: solar vehicles | Integratie in ontwerp Combinatie met elektrische auto |
| Product- en productietechnologie (hoofdstuk 3 en 5) | Materialen | Kosten en levensduur Duurzame alternatieven |
| | Processen | Hoge doorvoersnelheden en opbrengst (inclusief <i>roll-to-roll</i>) In-line inspectie en kwaliteitsbeheersing |
| | Cellen | Hoge rendementen Architecturen: wafergebaseerd en dunne-films |
| | Modules | Levensduur Architecturen: glasgebaseerd en folie |
| | Integrale duurzaamheid | Reductie van materiaal- en energiegebruik <i>Design for recycling</i> en hergebruik |

Randvoorwaarden

| | | |
|-------------------------------------|-----------------------------|--|
| Ecosystemen (hoofdstuk 4) | Nationale samenwerking | Nationaal kennisinstituut: Solliance Groei- en actieplan industrie ('Topgebied PV') |
| | Internationale samenwerking | Europa: onder meer Duitsland en België; Wereld: Amerika en onder voorwaarden met China en India |
| | Financiering | Innovatieve modellen, met commerciële partijen Conditie, met overheden |

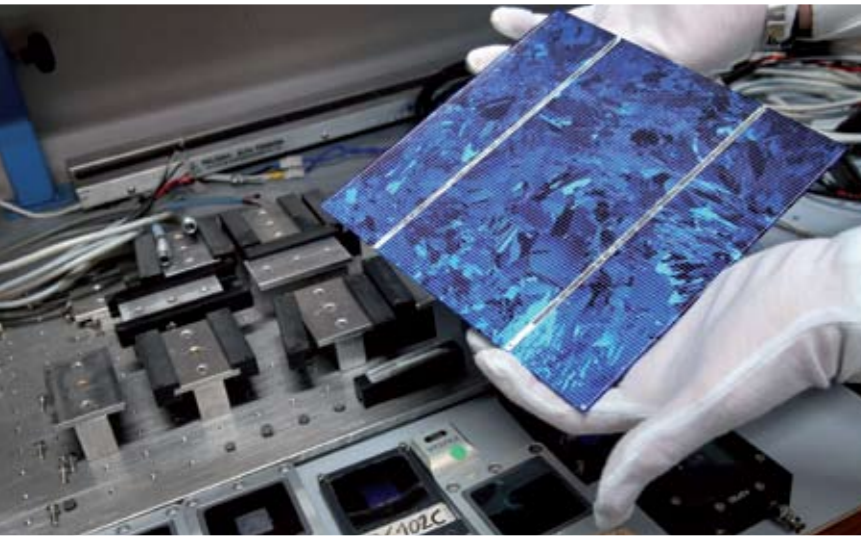
In de technologieanalyse (hoofdstuk 3) wordt een overzicht gegeven van de opties die geschikt of nodig zijn om de diverse pmc's te realiseren. In hoofdstuk 4 worden de wereldwijd concurrerende ecosystemen in kaart gebracht en gekarakteriseerd. Deze ecosystemen bevatten alle onderdelen die een PV-keten nodig heeft. Dit betekent dat zowel kennis, kunde als kassa aanwezig zijn. In hoofdstuk 5 worden marktkansen en pmc's voor het Nederlandse ecosysteem benoemd. Dit betreft zowel de huidige pmc's als de pmc's waarop het Nederlandse ecosysteem zich in de toekomst kan richten, gebaseerd op de sterke competenties van en de kansen voor

het Nederlandse ecosysteem ten opzichte van andere ecosystemen. Aanvullend op de pmc's worden in hoofdstuk 5 de focusgebieden voor onderzoek en ontwikkeling beschreven die essentieel zijn om de pmc's te kunnen realiseren. In deze roadmap worden marktgegevens, technologieanalyses en karakteristieken van concurrerende ecosystemen gecombineerd om de route voor het Nederlandse ecosysteem uit te stippelen (zie figuur 4). De nadruk ligt daarbij voor de industrie op de eerste vijf jaar, maar voor de onderzoekinstellingen is er ook een doorkijk naar 2020 en daarna, zodat de concurrentiepositie ook op langere termijn bewaard kan worden.



Figuur 4. Ontwikkeling van de roadmap voor het Nederlandse ecosysteem.

3. Technologieontwikkelingen



In dit hoofdstuk wordt een analyse gemaakt van de technologieontwikkelingen. Daarbij is een onderscheid gemaakt tussen vier technologieaspecten die in de vier volgende paragrafen behandeld worden, te weten:

1. Celtechnologie (inclusief de bouw van modules)
2. Materiaaltechnologie
3. Productietechnologie
4. Systeemtechnologie

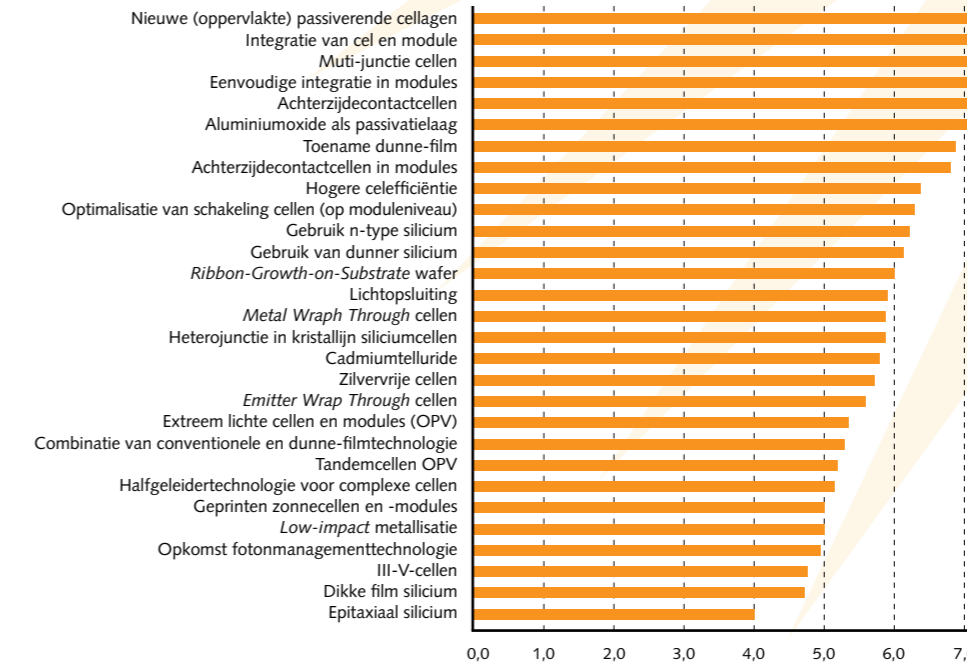
Vanwege het grote belang van de verschillende celtechnologieën (PV-modules en -systemen onderscheiden zich immers vooral vanwege de gekozen celtechnologie) is in de paragraaf over celtechnologie een subparagraaf opgenomen met gedetailleerde gegevens en cijfers over ontwikkelingen rond celtechnologie.

3.1 Celtechnologie

3.1.1 De verschillende celtechnologieën

De celtechnologieën zijn in drie categorieën onder te verdelen, sommige van deze categorieën kennen weer subcategorieën:

1. wafer-type siliciumzonnecellen;
2. dunne-filmzonnecellen, onderverdeeld in de celsoorten:
 - a. dunne-filmsilicium;
 - b. CIGS (koper-indium/gallium-diselenide/sulfide);
 - c. CdTe (cadmiumtelluride);
 - d. organische PV (OPV);
 - e. kleurstofzonnecellen (dye-sensitised PV)
3. 'III-IV'-cellen (inclusief concentrator PV: 'III-V' zijn materialen uit de gallium-arsenide familie en worden ook gebruikt in LEDs, lasers, et cetera;



Figuur 5. Ranking van belangrijke ontwikkelingen rond celtechnologie volgens het Nederlandse PV-cluster, gepolst en benoemd tijdens boardroomsessies.

Uit de ranking blijkt onder meer een grote belangstelling voor technologie ten behoeve van hoog-rendement silicium waferzonnecellen (oppervlaktepassivering). Daarnaast gaat veel aandacht uit naar cel/module-integratie en naar mogelijkheden met betrekking tot achterzijdecontact- en meerlaags (multi-junctie) cellen.

Wafer-type siliciumzonnecellen

Wafer-type siliciumcellen en -modules zijn dominant in de mondiale markt. Sterkte is het hoge rendement en de mogelijkheden voor verdere verhoging (tot meer dan twintig à vijftig procent voor modules). Uitdaging is de verlaging van de materiaal- en productiekosten. Tijdens de boardroomsessies zijn voor wafer-type siliciumzonnecellen meerdere trends en aanknopingspunten voor de verdere ontwikkeling van de technologie benoemd. Enkele van deze trends en aanknopingspunten zijn:

- ☀ achterzijde cel- en moduletechnologie;
- ☀ n-type siliciumwafers;
- ☀ open-achterzijde cellen;
- ☀ heterojuncties;
- ☀ nieuwe (zilvervrije) celarchitecturen;
- ☀ hoge rendementen;
- ☀ dunnere wafers;
- ☀ ketenintegratie;
- ☀ productie *yield* verbetering.

Dunne-filmzonnecellen

Voor dunne-filmzonnecellen – in dit document onderverdeeld in vijf typen – is rendementsverhoging de grootste technologische uitdaging, zij het nauw verbonden met productiesnelheid. Rendementsverhoging werkt als hefboom om kosten te verlagen. Proces- en materiaalkosten zijn ruwweg evenredig met het oppervlak en bij een hoger rendement wordt per oppervlakte-eenheid meer elektriciteit geproduceerd. Daarnaast is een hoog rendement van belang om bij beperkte ruimte (daken, gevels, et cetera) toch een substantiële hoeveelheid elektriciteit te kunnen opwekken. Tijdens de boardroomsessies zijn diverse

ontwikkelingen benoemd die voor alle soorten dunne-filmzonnecellen van toepassing zijn, te weten:

- ☀ hoge productievolumes en –snelheden;
- ☀ hoge (cel- en) modulerendementen;
- ☀ kostenreductie;
- ☀ integratie van cellen tot modules;
- ☀ groene processen en recycling.

Naast algemene ontwikkelingen, zijn per type dunne-filmzonnecel tijdens de boardroomsessies trends benoemd. Een overzicht van de soorten cellen en bijbehorende specifieke ontwikkelingen:

- ☀ *dunne-filmsilicium*: dit is een verzamelnaam van een aantal technologieën, waarbij amorf silicium (aSi), microkristallijn silicium (μcSi), en tandems van die twee de belangrijkste vormen zijn. Het relatief lage rendement vormt een belangrijk verbeterpunt. Aandachtspunten kunnen worden samengevat als:
 - ☀ ontwikkeling tandemdevices voor hoger rendement;
 - ☀ stap naar *roll-to-roll* productie;
 - ☀ productintegratie;
- ☀ *CIGS*: kenmerkend voor CIGS is de diversiteit aan materialen en productietechnologieën. Standaardapparatuur is daardoor voor de industrie beperkt beschikbaar. Op laboratoriumschaal ligt het rendementsrecord net boven de twintig procent, maar dit is moeilijk te vertalen naar kosteneffectieve massaproductie. Glas wordt veelal als substraat gebruikt, maar ook flexibele folies (staal, koper, titaan, kunststof) worden industrieel geïmplementeerd. De volgende belangrijkste aandachtspunten zijn uit de boardroomsessies naar voren gekomen:
 - ☀ reproduceerbaarheid en uniformiteit;
 - ☀ *roll-to-roll* productie;
 - ☀ opschaling van productie;
 - ☀ procescontrole en standaardisatie;
 - ☀ vervanging van vacuümprocesstappen;
 - ☀ volledig geprinte cellen;

- ☀ *cadmiumtelluride*: deze technologie kent momenteel één sterke industriële speler die de markt voor dunne-filmmodules domineert (het Amerikaanse First Solar). Het bedrijf boekt met CdTe met name succes vanwege de lage kosten. Die zijn op hun beurt het gevolg van het eenvoudige productieproces, waarbij opschaling plaatsvindt door het bijplaatsen van exacte kopieën van productielijnen (standaardisatie). Ondanks de (huidige) kostenvoordelen van CdTe, zijn soortgelijke voordelen ook te behalen bij CIGS:
 - ☀ stap naar *roll-to-roll* productie;
 - ☀ opschaling van productie;
 - ☀ procescontrole en standaardisatie;
 - ☀ vervanging van de gasfase- en vacuümprocesstappen;
 - ☀ volledig geprinte cellen (zie ook vorige punt);

- ☀ *organische PV*: bij OPV is *roll-to-roll* productie op plastic folies de doelstelling. Deze technologie is mede aantrekkelijk vanwege de mogelijkheden voor zeer milieuvriendelijke productie en producten. De belangrijkste uitdagingen zijn rendementsverhoging en stabiliteitsverbetering. Op beide fronten is in de afgelopen jaren grote vooruitgang geboekt (voor laboratorium *devices*), maar rendement en stabiliteit blijven nog significant achter bij andere PV-technologieën. Desondanks brengt onder meer Konarka de eerste OPV-producten voor consumententoepassingen op de markt. Gebruik in grootschalige elektriciteitsproductie is echter nog niet mogelijk. Belangrijkste aandachtspunten zijn:
 - ☀ *roll-to-roll* processing;
 - ☀ extreem lichte cellen/modules;
 - ☀ ultra-dunne cellen (lichtopsluiting);
 - ☀ levensduurverbetering;
 - ☀ verminderde afhankelijkheid van indium-tinnoxide (ITO) als transparant geleidend oxide (TCO);
 - ☀ volledig geprinte cellen;

- ☀ *dye-sensitized PV (DSC)*: DSC-zonneceltechnologie bevindt zich qua ontwikkeling op de overgang van de laboratoriumfase naar commerciële productie. Het *unique selling point* van DSC is de vrijheid in vormgeving ten aanzien van kleur en design. Er worden producten ontwikkeld op glas, maar er zijn ook flexibele, lichtgewicht producten voor de consumentenmarkt (als opstap naar grootschalige productie). De volgende specifieke aandachtspunten zijn uit de boardroomsessies naar voren gekomen:
 - ☀ opschaling;
 - ☀ levensduur
 - ☀ stabiliteit;
 - ☀ flexibele substraten;
 - ☀ ontwikkeling niet-vacuümprocessen.

III-V-zonnecellen

III-V-zonnecellen zijn sterk in opkomst voor concentrator-toepassingen. Concentrator PV (CPV) onderscheidt zich door het gebruik van een optisch systeem voor bundeling van licht op een cel met een oppervlak dat veel kleiner (tot een factor 1000) is dan het lichttoegestende oppervlak. GaAs en InP zijn belangrijke voorbeelden van III-V-materialen. Van alle PV-technologieën zijn de rendementen met III-V het hoogst, wat onderzoekers, ontwerpers en uitvinders uitnodigt en uitdaagt tot ontwikkeling van nieuwe toepassingen. De praktijk is vooralsnog weerbarstig. Door hoge kosten komen op dit moment alleen toepassingen in de ruimtevaart en de concentratormarkt in aanmerking. De laatste categorie vereist directe instraling van zonlicht en de noodzaak de zon vrij nauwkeurig te volgen. Voor de optische, PV- en tracker-componenten moet productieapparatuur ontwikkeld worden. Als de producten en de productie-methoden volwassen worden, belooft de III-V-technologie onder meer een belangrijke kandidaat te worden voor plannen om zonne-energie uit woestijnen te halen.

3.1.2 Ontwikkeling celtechnologieën in cijfers

Onder de verschillende celtechnologieën die toegepast worden door de PV-industrie is er nog geen enkele die zich definitief onderscheidt op basis van de laagste kostprijs per opgewekte hoeveelheid energie. Hoewel CdTe momenteel de laagste productiecosten claimt hebben alle andere hiervoor genoemde technologieën ook nog grote mogelijkheden voor kostenverlaging. De race is daarom nog niet voorbij of gewonnen. In alle gevallen draait het om een combinatie van technologieverbetering en

volume(schaal)vergroting. De in de vorige subparagraaf benoemde technologische ontwikkelingen moeten mede bijdragen aan de realisatie van internationaal gestelde doelstellingen voor PV zoals onder meer recent gedefinieerd in de IEA PV Roadmap 2010. Deze doelstellingen zijn uitgedrukt in termen van energierendementen en in termen van materiaalverbruik en -verwerking in productieprocessen. De doelstellingen en ontwikkeltrajecten zijn in de drie onderstaande tabellen zowel voor kristallijn silicium- als voor dunne-film en de overige technologieën weergegeven.

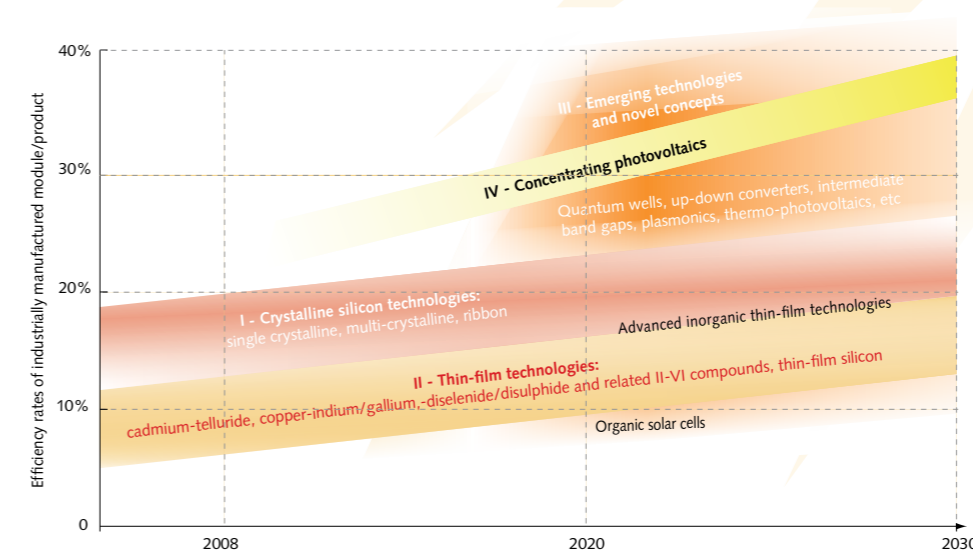
| Kristallijn silicium | 2010-2015 | 2015-2020 | 2020-2030/2050 |
|---|--|--|---|
| Rendementdoelen (commerciële modules) | Monokristallijn Si : 21% Multikristallijn Si: 17% | Monokristallijn Si : 23% Multikristallijn Si: 19% | Monokristallijn Si : 25% Multikristallijn Si: 21% |
| Aspecten van industriële maakprocessen | Si consumptie < 5 g/W | Si consumptie < 3 g/W | Si consumptie < 2 g/W |
| Geselecteerde R&D-thema's | Nieuwe siliciummaterialen en -processen Celcontacten, <i>emitters</i> , interconnectie, passivering | Verbeterde cel- en modulestructuren Productiviteitsverbetering en kostenoptimalisatie in productieprocessen | Wafer-equivalent technologieën Nieuwe celstructuren met nieuwe concepten |

| Dunne films | 2010-2015 | 2015-2020 | 2020-2030 |
|--|---|---|--|
| Rendementdoelen (commerciële modules) | Dunne-film Si: 10% CIGS: 14% CdTe: 12% | Dunne-film Si: 12% CIGS: 15% CdTe: 14% | Dunne-film Si: 15% CIGS: 18% CdTe: 15% |
| Status en potentieel | Hoge-snelheid depositie <i>Roll-to-roll</i> productieprocessen Encapsulatie | Vereenvoudiging van productieprocessen Goedkope encapsulatie Management van toxische materialen | Grote hoog-rendement productiesystemen Beschikbaarheid van de te gebruiken materialen Recycling van PV-modules |
| Geselecteerde R&D-thema's | Depositieprocessen voor grote oppervlakken Verbeterde substraten en transparante geleidende oxides (TCO's) | Verbeterde celstructuren Verbeterde depositietechnieken | Geavanceerde materialen en concepten |

| Overige technologieën | Concentrator PV | Opkomende technologieën | Nieuwe PV-concepten |
|--------------------------------------|--|--|---|
| Celtype | Hoge kosten, superhoge rendementen | Lage kosten, redelijke rendementen | Zeer hoge rendementen mogelijk Volledige benutting zonnenspectrum |
| Status en potentieel | 23% systeemrendement is reeds gedemonstreerd Meer dan 30% rendement is haalbaar op middellange termijn | Nu op demonstratieniveau (bijvoorbeeld OPV, geprint CIGS, <i>dye-sensitized</i> PV) Eerste toepassingen in nichemarkten | Grote variëteit aan omzettingprincipes en celconcepten in laboratorium Potentiële 'doorbraak-technologieën' |
| Geselecteerde R&D-thema's | Bereik superhoge rendementen van meer dan 45% Goedkope en kwalitatief goede oplossingen voor optische concentratie en tracking (zonzvolgen) | Verbetering van rendement en stabiliteit voor eerste commerciële toepassingen Encapsulatie van organische concepten | Proof-of-principle van nieuwe omzettingconcepten fabricage, karakterisering en modellering van (in bijzonder) nanogestructureerde materialen en cellen |

Naast het vastleggen van de technologische doelen in tabellen, heeft de IEA de mogelijke, respectievelijk verwachte ontwikkeling van modulerendementen (let op: niet

te verwarren met celrendementen) per technologiefamilie vastgelegd. Deze verwachtingen zijn weergegeven in onderstaande figuur.



Figuur 6. Mogelijke, respectievelijk verwachte ontwikkeling modulerendementen (bron: IEA PV Roadmap, 2010).

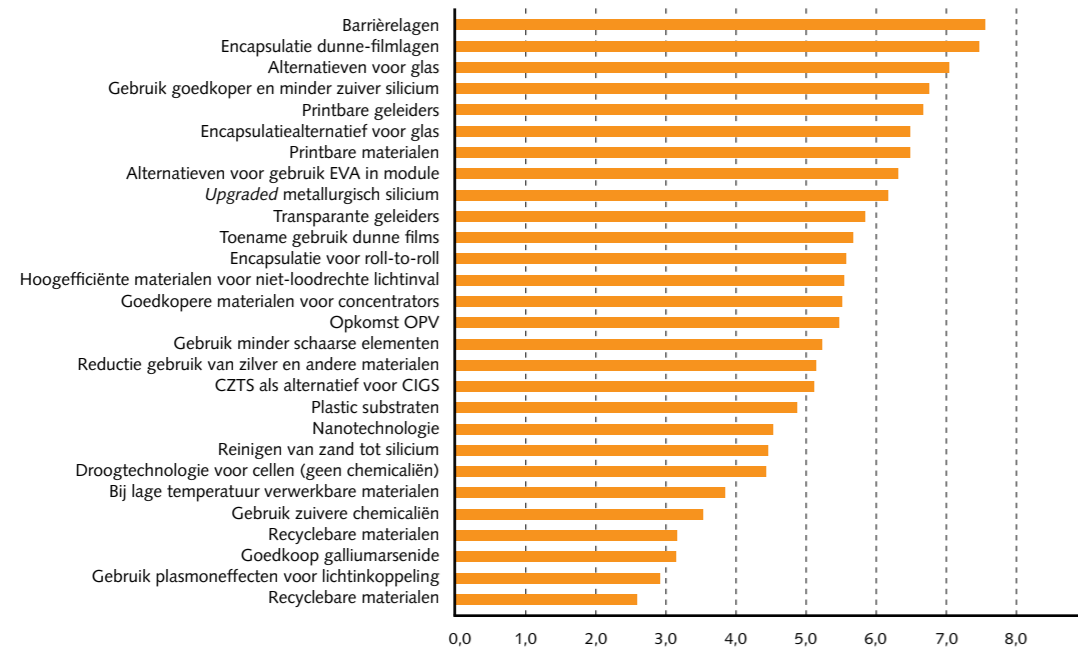
3.2 Materiaaltechnologie

Stuwende factoren voor ontwikkeling van materiaaltechnologie zijn kostenreductie en rendementsverhoging. Daarnaast ontstaat een steeds sterkere discussie rond duurzaamheid, schaarste en recycling. In deze paragraaf is een onderverdeling gemaakt in vijf categorieën waarop industrieel gewenste en benodigde materiaalontwikkelingen betrekking hebben:

1. siliciumwafer;
2. dunne lagen voor zonnecellen;
3. substraatmateriaal;
4. modules;
5. duurzaamheid.

De interesse van het Nederlandse PV-ecosysteem voor deze verschillende (aspecten van) materiaaltechnologieën is tijdens boardroomsessies gepolst en benoemd. Het resultaat is weergegeven in onderstaande ranking.

Uit de *ranking* blijkt de sterke interesse voor encapsulatie en bescherming van de PV-cel, oftewel het vinden van goede barrièrelagen en alternatieven voor glas. Daarnaast is er veel aandacht voor werken met minder zuiver silicium en voor het ontwikkelen van printbare materialen.



Figuur 7. Ranking van belangrijke ontwikkelingen rond materiaaltechnologie volgens het Nederlandse PV-cluster.

Siliciumwafer

Door het grote marktaandeel van PV-technologie op basis van siliciumwafers wordt hier veel onderzoek naar verricht. De siliciumwafer zelf is een grote kostenpost en een deel van de R&D focusteert zich hier op. Enkele onderzoeksvoorbeelden:

- ☀ gebruik van lagere kwaliteit silicium, zoals *upgraded* metallurgisch silicium (UMG);
- ☀ gebruik van zeer zuiver silicium voor zeer hoge rendementen;
- ☀ reduceren van waferdikte tot uiteindelijk twintig à vijftig micrometer;
- ☀ vervaardigen silicium uit zuivere zand- en koolstofbronnen;
- ☀ ontwikkeling siliciummateriaal geschikt voor *direct casting* (maken van *ingots* en verzagen wordt dan overbodig);
- ☀ ontwikkeling n-type silicium als vervanger voor p-type.

Dunne-filmzonnecellen

Onderzoek en ontwikkeling naar de dunne lagen waaruit dit type PV-cellen en -modules is opgebouwd, focust zich op onderwerpen als rendementsverhoging, materiaalverbruik, kostenreductie, nieuwe materialen en vervanging van schaarse materialen. De materiaaltechnologiegerelateerde aandacht vestigt zich daarbij op verschillende lagen waaruit een dunne-filmzonnepaneel is opgebouwd:

- ☀ *de actieve laag*: zoals CIGS, (amorf en microkristallijn) silicium, organische halfgeleiders (OPV) of III-V materialen. De toename in interesse voor III-V halfgeleiders komt door de opkomst van CPV. CZTS (koper-zink-tin-selenide/sulfide) wordt bestudeerd als mogelijke opvolger van CIGS, met name om het gebruik van indium te vermijden. Voor OPV wordt gekeken naar synthese van alternatieve moleculen waarmee hogere rendementen behaald worden. Voor dunne-film silicium is belangstelling om materialen te ontwikkelen voor tandem- en *triple-junction*cellen;
- ☀ *de barrièrelagen*: deze zitten aan de zon- en achterzijde van de cel ter bescherming van de gevoelige actieve

laag tegen zuurstof, vocht en onzuiverheden uit het dragermateriaal of, via de encapsulatie, uit de omgeving. De barrièrelagen moeten *pinhole*-vrij en (aan de zonzijde) transparant zijn. Veel gebruikte barrièrematerialen zijn siliciumnitrides en -oxides, maar ook andere (an)organische verbindingen genieten belangstelling;

- ☀ *de topelektrode*: dit zijn materialen of laagcombinaties die transparant en geleidend zijn (TCO's). Ontwikkelingen vinden plaats op verschillende gebieden van optimalisatie en atmosferische depositie van TCO tot combinatie van TCO met metalen elektrodepatronen;
- ☀ *de lichtmanagementlagen*: dit zijn antireflectiecoatings, reflecterende grensvlakken of andere structuren voor lichtopsluiting. Deze zijn vaak (nano)gestructureerd of samengesteld uit materiaalcombinaties met geoptimaliseerde brekingsindex.

Substraatmateriaal

Het gekozen substraatmateriaal voor dunne-filmzonnecellen is veelal glas. Aanvullend glasgerelateerd onderzoek houdt zich bezig met versterking en *tempering* van glas, aanbrenging van coatings voor extra functionaliteiten (barrière, geleiding, antireflectie) en alternatieven voor het veel gebruikte *soda-lime* glas (zoals het transparantere *low-iron* glas). Ter vervanging van rigide glas wordt sinds jaar en dag gezocht naar alternatieven zoals plastic of metaalfolies en flexibel glas. Deze opties hebben enkele specifieke voordelen zoals mogelijkheden voor bouw- en applicatie-integratie en vanuit productietechnologie opent het de deur naar gebruik van *roll-to-roll* apparatuur en goedkopere processen. Bovendien kunnen metaalfolies in principe de functionaliteit van de drager combineren met die van de elektrode.

Modules

Een aanzienlijk deel van de productiekosten van uiteindelijke PV-modules wordt gemaakt na de celproductie.

Contacteren en serieschakelen van individuele cellen en encapsuleren en afwerken van uiteindelijke modules, zorgen voor belangrijke kosten. Gedeeltelijk zijn die te herleiden op gebruikte productietechnologieën, het merendeel op gebruikte materialen. Voor contactering is bij wafer silicium behoefte aan vervanging van zilver zeefdrukken en solderen van individuele cellen. Bovendien wordt het gebruik van goedkopere metalen (zoals koper en aluminium) en andere productietechnieken (zoals printen en lijmen) onderzocht. Voor moduleproductie wordt gezocht naar materialen met goede encapsulatie-eigenschappen die kunnen dienen als goedkopere vervangers voor de nu gebruikte materialen (zoals glas en EVA). Glas is door zijn weersbestendigheid, UV-tolerantie en mechanische sterkte een kwalitatief uitstekend en veel gebruikt modulemateriaal. Vanwege zijn gewicht en inflexibiliteit wordt echter gezocht naar alternatieven.

Duurzaamheid

Duurzaamheidsaspecten van PV-technologie zijn een steeds belangrijker onderdeel van R&D-activiteiten, met name focuserend op beschikbaarheid (tegen lage kosten) van materialen en recycling. Een aantal veelgebruikte en bijzonder nuttige PV-materialen zoals indium, gallium, cadmium, tellurium en zilver is schaars of wordt uitsluitend als bijproduct gewonnen. Dit levert een prijsrisico en kan op termijn de groei van de PV-productie belemmeren. Alternatieve 'earth abundant' materialen staan daarom sterk in de belangstelling. Daarnaast is er een internationale discussie over de wenselijkheid van het gebruik van giftige stoffen in PV. Los van de conclusies is duidelijk dat niet-toxische alternatieven, mits ze goed presteren en voldoende goedkoop zijn, altijd de voorkeur verdienen. Het sluiten van de materiaalkringlopen (recycling en *cradle-to-cradle* benaderingen) is in alle gevallen van groot belang om PV als integraal duurzame technologie te kunnen profileren.

Voorbeelden van materiaalalternatieven zijn (zie ook hiervoor): indiumvrije transparante geleiders in plaats van indium-tinoxide (ITO), CZTS in plaats van CIGS, koper en

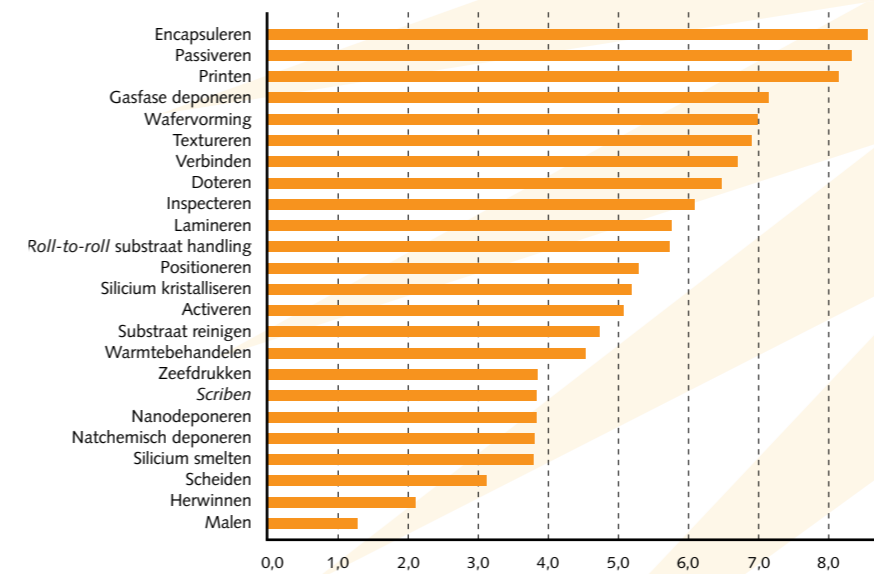
aluminium of geleidende koolstofverbindingen als vervanging van zilver. Vanwege de lange levensduur van PV-modules lijkt *end-of-life* recycling nu nog niet heel urgent; de eerste grote aantallen modules komen immers pas over vele jaren retour. Niettemin is enkele jaren geleden de internationale PV CYCLE Associatie opgericht. PV CYCLE garandeert dat modules te zijner tijd zullen worden gerecycled, zelfs als de producent niet meer zou bestaan. De technologieën van recycling staan voor een belangrijk deel nog in de kinderschoenen en moeten de komende jaren verder worden ontwikkeld. Daarnaast is het van belang om *design-for-recycling* of *design-for-disassembly* te gaan toepassen. Daarbij gaat het om eenvoudig recyclebare materialen en productconcepten.

3.3 Productietechnologie

Naast inspanningen gericht op doorontwikkeling van bestaande technologieën en kostenreductie, is er bij productietechnologie veel aandacht voor innovatieve processen, effectievere en verdere opschaling van productieconcepten, procesbeheersing en automatisering. De aandacht gaat daarbij uit naar de volgende deelgebieden van productietechnologieën (wafergebaseerd en dunne films):

- ☀ siliciumwafer;
- ☀ texturering;
- ☀ substraatreiniging;
- ☀ doteren;
- ☀ passiveren;
- ☀ depositie, onderverdeeld in:
 - ☀ gasfase depositie;
 - ☀ chemische depositie;
 - ☀ printen;
- ☀ modulevorming.

De interesse van het Nederlandse PV-ecosysteem voor de verschillende onderdelen van productietechnologieën is tijdens boardroomsessies gepolst en benoemd. Het resultaat is weergegeven in de *ranking* op de volgende pagina.



Figuur 8. Ranking van belangrijke ontwikkelingen rond productietechnologie volgens het Nederlandse PV-cluster.

Drie onderdelen van productietechnologie springen er in het bijzonder uit: encapsuleren, passiveren en printen. Daarnaast is er veel aandacht voor gasfase deponeren, wafervorming en textureren. De uitkomst is niet verrassend omdat op deze onderwerpen in Nederland op dit moment al veel ontwikkelingsinspanning plaatsvinden.

Siliciumwafer

Silicium geniet vanuit het oogpunt van productietechnologie veel interesse. De volgende thema's zijn relevant:

- ☀ *silicium feedstock*: bij productie van het wafer-type siliciumzonnecellen wordt momenteel een zeer hoge kwaliteit silicium gebruikt. Vanwege de hoge kostprijs wordt onderzoek gedaan naar het verwerken van lagere kwaliteit (zoals *upgraded* metallurgisch silicium) en siliciumproductie vanuit zuivere grondstoffen (zodat er minder onzuiverheden verwijderd hoeven te worden);
- ☀ *waferproductie*: dit vindt momenteel plaats via ver-

zaging van *ingots*. Deze worden geproduceerd door gesmolten silicium gecontroleerd te laten kristalliseren. Nadelen zijn de lage productiesnelheden en het grote materiaalverlies. Ontwikkelingen die benoemd kunnen worden hebben onder betrekking op:

- ☀ direct gieten in juiste dikte van siliciumwafers op een al dan niet tijdelijke ondergrond;
- ☀ continue productie in plaats van batchproductie;
- ☀ productie van grotere (>300 mm) en dunnere wafers (<100 μm);
- ☀ gebruik van lagere kwaliteit silicium;
- ☀ gebruik van diamantgeladen draden voor het zagen (in plaats van een zaagvloeistof met carbideeeltjes);
- ☀ *wafer handling*: om de breuk van wafers tijdens PV-productie sterk te verminderen wordt veel aandacht besteed aan het scheiden van dunne wafers van een stack;
- ☀ *manipulatie van wafers* bij hoge temperatuur en onder vacuümcondities en terugbrengen van aantal handelingen.

Texturering

Voor rendementsverhoging kan texturering van oppervlakken voor één of meerdere PV-lagen uitgevoerd worden. Op deze manier kunnen ook functionaliteiten toegevoegd worden. Naast textuur wordt ook vaak gebruik gemaakt van antireflectiecoatings. Deze kunnen binnen, maar ook buiten op de module geplaatst worden. Andere ontwikkelingen zijn:

- ☀️ vervanging van natte door droge etsprocessen;
- ☀️ nieuwe technologieën (zoals nano-imprint en plasmabehandeling);
- ☀️ texturering van samengestelde laagstructuren via lasers;
- ☀️ schaalvergroting van de productie voor snelle behandeling van grote oppervlakken;
- ☀️ schaalverkleining van te produceren structuren (tot nanometerschaal).

Substraatreiniging

Voor reiniging en preparatie van substraten worden veelal technieken gebruikt die zijn ontwikkeld voor toepassingen in de glasindustrie en de halfgeleiderindustrie. Nieuwe technologieontwikkelingen gebeuren veelal rond:

- ☀️ reiniging van nieuwe substraatmaterialen en substraten waarop al een coating is aangebracht;
- ☀️ combineren van reinigings- en structureringstechnieken;
- ☀️ contactloze methoden om substraatbreuk te voorkomen;
- ☀️ *roll-to-roll* reinigingstechnologie.

Doteren

Silicium moet gedoteerd worden om een PV-functie te realiseren. Normaal gesproken gebeurt dit tijdens de ingot-productie door het chemische element borium aan de smelt toe te voegen en zo p-type geleiding te bewerkstelligen. Na het zagen van wafers en structurering van het oppervlak, wordt de halfgeleiderjunctie gemaakt door een n-type dotering te introduceren. Door de sector worden onder meer de volgende ontwikkelgebieden benoemd:

- ☀️ overstap van p-type dotering naar n-type dotering van wafers;

- ☀️ vervanging van het diffusieproces voor het aanbrengen van het junctiedoteringselement door een ander proces;
- ☀️ heterojunctievorming (een lage temperatuurproces en hoge rendementen).

Passiveren

De functie van een passiveringslaag (op het oppervlak van silicium zonnecellen) is vermindering van oppervlaktereleerde verliezen bij de omzetting van licht in elektriciteit. Behalve oppervlakteplassivering wordt ook vaak bulk(volume)passivering toegepast, door waterstofatomen de wafer in te laten diffunderen. Naast algemene thema's zoals die hierna bij depositie besproken worden richten de ontwikkelingen zich op:

- ☀️ andere (met name niet-vacuüm) depositiemethoden en/of andere (effectievere) passiveringsmaterialen, zoals *Atomic Layer Deposition* (ALD) en aluminiumoxide (Al_2O_3) in plaats van plasmadepositie en siliciumnitride;
- ☀️ depositietechnieken voor aanbrengen van silicium-oxi-carbides en -nitrides (SiC_xO_y en SiO_xN_y);
- ☀️ lage-temperatuur bulkpassivering;
- ☀️ heterojunctie-zonnecellen (heterojuncties worden gevormd op een soortgelijke manier als passiveringslagen).

Depositie

Met depositie wordt in deze context zowel het deponeren van verschillende lagen als van elektrisch geleidende structuren bedoeld. Lagen die aangebracht dienen te worden zijn divers, van geleiders tot actieve lagen, transparante elektroden en barrièrelagen. Om een complete zonnecel te maken zijn meestal meerdere depositietechnieken nodig. Algemene ontwikkelrends binnen dit thema hebben betrekking op:

- ☀️ depositietechnologie voor verschillende materialen;
- ☀️ depositie op vlakke en op 3D-structuren, zowel rigide als flexibel;
- ☀️ depositie op verschillende substraatmaterialen;
- ☀️ gepatroneerde depositie;
- ☀️ depositie van dunne (<1 μm) uniforme lagen;
- ☀️ milieuvriendelijke depositietechnologie.

Naast algemene ontwikkelrends is een aantal technologieën te benoemen die in de huidige PV-productie van belang zijn, of waarvan men verwacht dat ze aan belang zullen winnen, te weten:

☀️ *gasfase depositie:*

- ☀️ ALD, waarbij lagen epitaxiaal (laag voor laag) groeien; aandachtspunt is verhoging van de depositiesnelheid;
- ☀️ *Chemical Vapor Deposition* (CVD) is een hoge-temperatuurtechnologie waarbij het substraat wordt blootgesteld aan een chemische damp van precursors, depositie is het resultaat van een chemische reactie aan het oppervlak;
- ☀️ *Physical Vapor Deposition* (PVD) is een vacuüm-technologie waarbij het substraat wordt blootgesteld aan een damp van het te vormen materiaal. In tegenstelling tot CVD is depositie hier het gevolg van fysische processen (bijvoorbeeld verdamping en condensatie). Bekende PVD-technologieën zijn sputteren, gepulste laserdepositie en verdamping;

☀️ *chemische depositie:*

- ☀️ elektrochemie - depositie van materialen onder invloed van elektrische stroom;
- ☀️ natchemische technologie - depositie door dompeling van materialen in een vloeistof;
- ☀️ bij chemische depositie is er brede interesse voor kwesties gerelateerd aan opschaling, zorgvuldig en zuinig chemicaliëngebruik, minimalisering van gevaarlijke stoffen en on-site recycling;

☀️ *printen:*

met het oog op opschaling en productievergroting is het nodig om printtechnologie door te ontwikkelen. Ideaal beeld is een compleet *roll-to-roll* productieproces. Zo goed als alle bekende print- en druktechnologieën worden onderzocht op hun toepasbaarheid voor zonnecel-productie. Ontwikkelingen hebben betrekking op:

- ☀️ printtechnologie voor verschillende actieve zonnecelmaterialen;
- ☀️ printtechnologie gecombineerd met sintertechnologie om eigenschappen van geprinte lagen te optimaliseren;
- ☀️ technologieontwikkeling om koper of aluminium te printen;
- ☀️ vervanging van zeefdrukken;
- ☀️ opschaling en uniformiteit.

Modulefabricage

Onder modulefabricage wordt zowel het elektrisch contacteren en onderling verbinden van cellen als het verder verwerken van cellen tot modules (encapsuleren) verstaan. Voor beide zaken vinden technologische ontwikkelingen plaats:

- ☀️ *contacteren* is het maken van elektrische aansluitingen. Voor dunne-filmzonnecellen gebeurt dit bijvoorbeeld via het *scriben* (elektrisch scheiden) van verschillende lagen, het aanbrengen van geleiders door zeefdrukken of een ander proces, het maken van een verbinding met aansluitpunten naar de buitenwereld met ultrasoon lassen en het aansluiten van een *junction box*. Voor siliciumwaferzonnecellen gebeurt het contacteren veelal door het zeefdrukken van elektrische geleiders op de cel, gevolgd door het onderling verbinden van cellen met geleidend gelijmde of gesoldeerde metaalstrips. Voor verdere verbetering wordt gezocht naar alternatieven voor deze methoden, te weten:
 - ☀️ vervanging van mechanisch *scriben* door *laser scriben* (betere patroondefinitie);
 - ☀️ nieuwe contacteertechnieken gebaseerd op gebruik van andere materialen (vervanging van zilver door aluminium en koper);
 - ☀️ nieuwe celontwerpen met andere connectieschema's, zoals achterzijdecontactcellen;
 - ☀️ metaaldepositietechnologie;
- ☀️ *encapsuleren* is het beschermen van cellen tegen negatieve chemische en fysische invloeden van de buitenwereld. Voor de meeste zonnecellen betekent dit dat ze tussen twee barrièrematerialen (glas of kunststof, al dan niet gecombineerd met metaal) worden gelamineerd.

Meestal worden de barrièrematerialen gecombineerd met een polymeerlaag die zorg moet dragen voor een goede afsluiting en optische koppeling (de module moet aan de rand dicht zijn en mag geen 'lucht' bevatten). De benoemde ontwikkelingen hebben betrekking op:

- ☀️ encapsuleren van flexibele zonnecellen, geschikt voor *roll-to-roll*;
- ☀️ techniek om folies of rechtstreeks aangebrachte barrièrelagen als encapsulatiemateriaal te gebruiken;
- ☀️ ingieten van cellen in een geschikte hars zodat het beschreven encapsulatieprincipe niet gevolgd hoeft te worden.

3.4 Systeemtechnologie

Het verwerken van individuele cellen en modules in complete PV-systemen is een belangrijke schakel in de totale PV-markt. Systeemtechnologie is daarmee van groot belang, zonder complete en goed functionerende PV-systemen is het daadwerkelijk op grote schaal implementeren van PV onmogelijk.

Integratie

Zonnecelsystemen moeten een plaats vinden in de bestaande samenleving. Zeker als gedacht wordt aan grootschalige energieopwekking betekent dit dat grote oppervlakten bedekt worden. Dit heeft een significante impact op het straatbeeld. Door systemen op een slimme manier te ontwerpen kan gezorgd worden voor een adequate integratie.

Voor grootschalige energieopwekking kan grofweg gedacht worden aan drie implementatiegebieden: geïntegreerde systemen in de bebouwde omgeving (huizen, kantoren, hallen en andere gebouwen) en de infrastructuur (dijken, wegen, spoorlijnen, et cetera) en zonnecentrales (laagwaardige of ongebruikte gronden, woestijnen en andere oppervlakten). Indien integratie serieus wordt aangepakt moet het mogelijk zijn om alleen al in Neder-

land honderden vierkante kilometers aan PV-systemen te plaatsen zonder dat dit als storend of belemmerend wordt ervaren.

Elektriciteitsnet

PV moet niet alleen fysiek geïntegreerd worden, maar ook in het elektriciteitsnetwerk. De elektrische link tussen het PV-systeem en het netwerk wordt gevormd door de omvormer. Op dit gebied is nog aanzienlijke winst te behalen qua kostprijs, betrouwbaarheid en levensduur, maar ook qua functionaliteit. Een andere belangrijke uitdaging en kans, zowel voor netgekoppelde als autonome systemen, is tijdelijke opslag van energie. Bij netgekoppelde systemen kan opslag worden gebruikt om een optimale afstemming tussen opwekking en vraag (lokaal of vanuit het net) te bewerkstelligen en zo de waarde van zonnestroom te verhogen, bij autonome systemen is opslag een onmisbaar onderdeel van het systeem. Verschillende opslagmogelijkheden met bijbehorende regelingen worden hiervoor onderzocht: efficiënte en milieuvriendelijke accu's, chemische conversie, conversie in potentiële energie, et cetera. Netgekoppelde systemen, al dan niet met opslag, kunnen ook een belangrijke component in intelligente netten gaan vormen.

Van module naar systeem

In de totale kosten van een PV-systeem spelen de zogenaamde *Balance-of-System* kosten (BoS-kosten: materialen, elektronica, montage- en installatiearbeid, et cetera) een belangrijke rol. Meestal gaat het om dertig tot zestig procent van het totaal. Dit komt onder meer door het gebrek aan standaardisatie en de moeilijkheid om systeembouw te automatiseren. Door slimme integratie- en assemblagetechnieken te ontwikkelen en door standaardisatie en schaalvergroting moet het echter mogelijk zijn de installatiekosten significant te verlagen. Deze reductie is vereist voor het succes van de PV-industrie.

Technologie

Voldoende technische issues moeten nog aangepakt worden om systeemtechnologie tot volwassenheid te brengen.

De door de industrie benoemde aandachtsgebieden zijn:

- ☀️ ontwikkeling van semitransparante PV-systemen om bouwintegratie ondersteunen;
- ☀️ flexibele systemen voor eenvoudige installatie en vergroting van de integratiemogelijkheden;
- ☀️ modules en subsystemen met geïntegreerde elektronica om de negatieve effecten van (onder meer) partiële beschaduwning te minimaliseren;
- ☀️ systemen geschikt voor glastuinbouw;
- ☀️ ontwikkeling van eenvoudig recyclebare (en/of 'wegwerp') PV;
- ☀️ slimme assemblagemethoden waardoor snelle plaatsing mogelijk is;
- ☀️ slimme ideeën voor schoonmaak en onderhoud.

4. Ecosystemen



Het afgelopen decennium is de solar industrie gestart met massaproductie. Gedreven door een toenemend economisch perspectief en sterkere aandacht voor duurzaamheid, is een grote internationale vraag naar PV-systemen ontstaan. Als direct gevolg van die vraag zijn wereldwijd verscheidene ecosystemen ontstaan die een prominente rol spelen in de internationale PV-industrie. Elk ecosysteem kent een eigen karakteristieke samenstelling. Duitsland leidt de internationale dans met een ecosysteem dat zowel kennis, kunde als kassa bevat, evenals voldoende massa om in potentie lange tijd vooraanstaande producten en diensten te kunnen leveren. Desondanks komt Duitsland in toenemende mate in een felle concurrentiestrijd terecht met onder meer Azië.

Dit hoofdstuk geeft in vijf paragrafen een globaal overzicht van de internationale concurrentiepositie van het Nederlandse PV-ecosysteem. Daarbij is gebruikt gemaakt van bestaande roadmaps, conference proceedings, industrie-interviews, het TWA-netwerk en informatie van partners om alle relevante informatie boven tafel te krijgen. Daarnaast zijn workshops (boardroomsessies) georganiseerd met telkens twintig experts uit de sector. Dit heeft een scherp en gedifferentieerd beeld opgeleverd van onderlinge verhoudingen van ecosystemen. Vanwege het grote belang van de verschillende celtechnologieën (PV-modules en -systemen onderscheiden zich immers vooral vanwege de gekozen celtechnologie) is in de paragraaf over celtechnologie een subparagraaf opgenomen met gedetailleerde gegevens en cijfers over ontwikkelingen rond celtechnologie.

4.1 Het Nederlandse ecosysteem

Het Nederlandse PV-ecosysteem begint meer en meer vorm te krijgen en wordt steeds sterker. Het afgelopen kalenderjaar heeft het fundament van dit ecosysteem een flinke impuls gekregen met de oprichting van Solliance. In deze organisatie hebben vier Nederlandse kennisinstellingen de krachten gebundeld om een organisatie van wereldniveau te vormen rond

kennisonwikkeling voor PV-technologieën. In Solliance werken ECN, TNO, het Holst Centre en de TU/e samen en wordt de benodigde focus en massa bereikt. Solliance moet het Nederlandse ecosysteem in samenwerking met het bedrijfsleven versterken. Dit moet leiden tot kortere ontwikkeltijden en snellere terugkoppeling vanuit gebruikers, wat weer essentiële factoren voor succesvolle innovatie zijn. Via vorming van een zogenaamde *pilot chain* – waarbij de kennisketen wordt gekoppeld aan onderzoeksfaciliteiten zoals een flexibele pilot-productielijn en een testcentrum – kan het ecosysteem snel, op maat en effectief functioneren. Daarbij is programmering met en voor de industrie noodzakelijk, gebaseerd op gezamenlijk geïnitieerde businessontwikkelingsactiviteiten.

4.2 Afzetmarkten

Slechts een beperkt aantal landen is verantwoordelijk voor het leeuwendeel van de huidige afname van PV-producten. Doordat de opwekkosten van zonnestroom momenteel nog hoger zijn dan de kosten van grijze elektriciteit, wordt de afname van PV-producten gestimuleerd door overheidsbeleid. De landen met het krachtigste en vooral meest effectieve en houdbare stimuleringsbeleid zijn op dit moment de grootste afnemers van de producten. Daarnaast is in het afgelopen decennium een tiental belangrijke ecosystemen ontstaan, al dan niet geflankeerd en gestimuleerd door een marktontwikkelingsprogramma. Wereldwijd is Duitsland tot nu toe leidend door de terugleververgoeding (*Feed-in-Tariff*; FiT) die de overheid wettelijk heeft geregeld en die wordt betaald uit een opslag op de elektriciteitsprijzen. Duitsland heeft, in belangrijke mate daardoor, het grootste en meest complete ecosysteem. Onze oosterburen bezitten zowel een grote thuismarkt voor het toepassen van systemen als leveranciers van cellen, modules, productieapparatuur, elektronica, kennis, diensten en vrijwel alle andere PV-gerelateerde zaken. Het geïnstalleerde PV-vermogen voorziet inmiddels al voor twee procent in de totale Duitse elektriciteitsbehoefte. Het land staat daarmee mondiaal op eenzame hoogte.

4.3 PV-technologie

Een fors aantal internationaal toonaangevende PV-bedrijven is (in)direct voortgekomen uit (of nog steeds onderdeel van) de micro-elektronica en de vlakke-beeldschermindustrie. Dit geldt voor productie van cellen en modules, maar ook voor bouw van productieapparatuur. Landen met een sterke geschiedenis in deze twee sectoren zijn daardoor in productietechnologie voor solar PV sterk vertegenwoordigd. Dit zijn landen als Duitsland, Amerika, Korea, Japan, Zwitserland en Nederland. Onderzoeksinstituten spelen voor deze bedrijven een belangrijke rol. Wanneer gegevens van de productietechnologiesector worden gecombineerd met overzichten van onderzoeksinstituten, blijkt dat hoogwaardige PV-technologie in minder dan vijftien landen aanwezig is. Dit blijkt ook uit de onderstaande tabel. Uit de tabel blijkt de goede positie die Nederland inneemt. Meerdere toonaangevende spelers op het gebied van productieapparatuur zijn hier gevestigd, zoals Tempres Systems, OTB Solar en Smit Ovens.

Daarnaast ontwikkelen bedrijven als Solland Solar, Scheuten Solar en Nuon Helianthos nieuwe cel- en moduletechnologieën. Verder zijn succesvolle ondernemingen rond materialen (zoals Avantor, het voormalige Mallinckrodt Baker) en componenten en systemen (zoals Mastervolt) aanwezig. Tenslotte zijn toonaangevende kennisinstituten zoals ECN, TNO en TU/e hier actief.

4.4 Analyse internationale ecosystemen

Voor deze roadmap zijn tijdens een aantal uitgebreide boardroomsessies met industrie-experts de internationale ecosystemen in beeld gebracht. In de twee tabellen op de volgende twee pagina's zijn de uitkomsten van deze sessies weergegeven. In de eerste tabel zijn de globale karakteristieken van de internationale ecosystemen weergegeven en in de tweede tabel de kansen die uit deze karakteristieken voortkomen.

| | Kristallijn silicium apparatuur | | | Dunne film apparatuur | Leidende kennisinstelling |
|-------------|---------------------------------|-----|--------|-----------------------|---------------------------|
| | Silicium | Cel | Module | | |
| Australië | | | | | ✓ |
| België | | | | | ✓ |
| China | | ✓ | ✓ | | ✓ |
| Frankrijk | | | | | ✓ |
| Duitsland | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| India | | | | | |
| Japan | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Korea | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Nederland | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Singapore | | | | | ✓ |
| Spanje | | | ✓ | | |
| Zwitserland | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ |
| Taiwan | | ✓ | | | |
| Amerika | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

Figuur 9. Overzicht van de internationale concentratie van kennis over PV-technologie.

| Ecosysteem | Karakteristiek van het ecosysteem |
|--------------------|---|
| Italië | Kennisniveau relatief laag Grote potentiële eindmarkt |
| Midden-Oosten | Veel geld beschikbaar, geen ervaring in de sector Volledige inkoop als alternatief voor olieproductie |
| Amerika | Kennisniveau hoog en nog stijgend; focusgebied van de overheid Lage kwaliteit maakindustrie, wel Applied Materials Venture capitalists en kapitaalcrachtige thuismarkt |
| Taiwan | Goede kennis economie (halfgeleiderindustrie) Uitstekende maakindustrie, leidende celmakers en agressieve investeerders |
| Zwitserland | Goede kennisinstituten (onder meer Neuchâtel en Lausanne) Sterke maakindustrie en apparatenbouw |
| Spanje | Beperkte maakindustrie Veel kennis en kunde buitenlandse leveranciers Subsidies gestopt |
| Singapore | Snel stijgend kennisniveau, maar dure omgeving Sterke maakindustrie (halfgeleiderindustrie) |
| Rest van de wereld | Nog startend, uiteindelijk grote eindmarkt Groot potentieel voor netgekoppelde én autonome systemen |
| Korea | Krachtige kennis economie met productie Goed en sterk groeiend ecosysteem |
| Japan | Uitstekend kennisniveau, grote partijen stappen in solar Grote gesloten eindmarkt |
| India | Grote achterstand en gebrek aan middelen Geen focus en programma, wel potentieel zeer grote eindmarkt |
| Duitsland | Gehele keten afgedekt: topbedrijven en -instituten Sterke maar afnemende overheidssteuning Concurrentiepositie (met name celproductie) ten opzichte van Azië onder druk |
| Frankrijk | Kennisniveau stijgt snel en industriële groei Relatief gesloten en sterk overheidsgestuurd |
| China | Ambitieuze en groeiende kennisniveau Koploper in massaproductie, potentieel zeer grote eindmarkt |
| België | Hoog kennisniveau (vooral Imec) en sterke materialensector Relatief grote eindmarkt |

| Ecosysteem | Kansen Nederland per ecosysteem |
|--------------------|---|
| Italië | Leveren kennis Leveren productiemiddelen Leveren systemen |
| Midden-Oosten | Leveren kennis Leveren productiemiddelen |
| Amerika | Leveren kennis Leveren productiemiddelen (beperkt) |
| Taiwan | Leveren kennis Leveren productiemiddelen |
| Zwitserland | Geringe kansen samenwerking over gehele keten |
| Spanje | Leveren productiemiddelen |
| Singapore | Geringe kansen samenwerking over gehele keten |
| Rest van de wereld | Leveren kennis Leveren productiemiddelen |
| Korea | Eerder grote concurrent |
| Japan | Geringe kansen samenwerking over gehele keten |
| India | Leveren kennis Leveren productiemiddelen |
| Duitsland | Samenwerking over gehele keten Samenwerking in kennisontwikkeling Leveren systemen Meeliften |
| Frankrijk | Geringe kansen samenwerking over gehele keten Leveren systemen |
| China | Leveren kennis en productiemiddelen Aankomend concurrent |
| België | Samenwerking in kennisontwikkeling Leveren systemen |

4.5 Conclusie

De analyse van concurrerende ecosystemen en de boardroomsessies met een panel van industrie-experts heeft een aantal belangrijke conclusies opgeleverd. Een overzicht van die conclusies:

- Een zestal ecosystemen gaat hun concurrentiepositie de komende vijf jaar sterk verbeteren.*

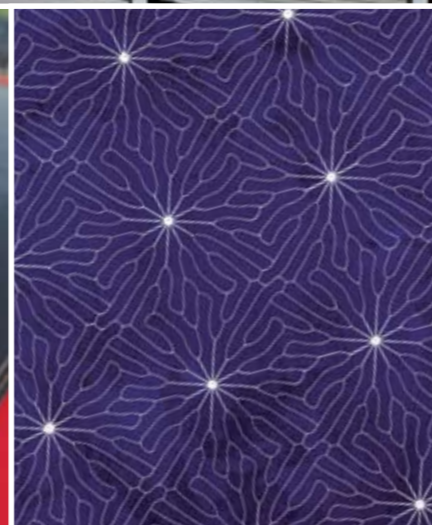
De wereldwijde PV-activiteiten zijn de afgelopen jaren met meer dan vijftig procent per jaar gegroeid. De kennis, kunde en kassa zijn daarbij in een beperkt aantal landen (ongeveer vijftien stuks) geconcentreerd en de verwachting is dat hier weinig nieuwe ecosystemen bijkomen. Een beperkt aantal ecosystemen gaat zichzelf naar verwachting sterk verbeteren en de leiding nemen. Daarbij horen in ieder geval Amerika, China, Taiwan, Korea, Duitsland en Nederland. Daarnaast hebben onder meer Frankrijk en Japan hoge ambities.
- Het Nederlandse ecosysteem bevindt zich qua sterkte in de middenmoot van belangrijkste ecosystemen ter wereld.*

Sterkten zijn de diepe technologische kennis en algemene innovatieve durf. Bovendien beschikt Nederland over een hoog opgeleid arbeidspotentieel met relevante expertise en over toonaangevende industrie met een sterke achtergrond in hightech systemen en apparatuur. Daarbij is Nederland sterk aanwezig in het marktleidende technologiedomein kristallijn silicium. Nederland neemt momenteel qua pmc's alleen in de hightechsector een sterke positie in. De huidige ketenbezetting is dan ook geconcentreerd rondom processen/machines en productiecentra. In andere delen van de keten (met name richting applicaties) kan en moet Nederland echter ook een positie opbouwen, daarbij steunend op de sterke positie van gerelateerde sectoren en op ervaringen met geavanceerde PV-systeembouw uit het verleden.

- Nederland moet ter versterking van de concurrentiepositie gaan samenwerken met Duitsland en België.*

Ter versterking van haar positie is het voor Nederland goed om op onderdelen samen te werken met andere ecosystemen, zoals die in Duitsland en België. Daarnaast kunnen aan een aantal ecosystemen producten en diensten verkocht worden. Met andere ecosystemen is samenwerking alleen wenselijk als dat voor Nederland duidelijke voordelen oplevert; anders is terughoudendheid geboden (zoals Korea en Japan). Dit onderscheid in aanpak levert uiteindelijk de meeste winst op.

5. Markten, marktkansen en focusgebieden



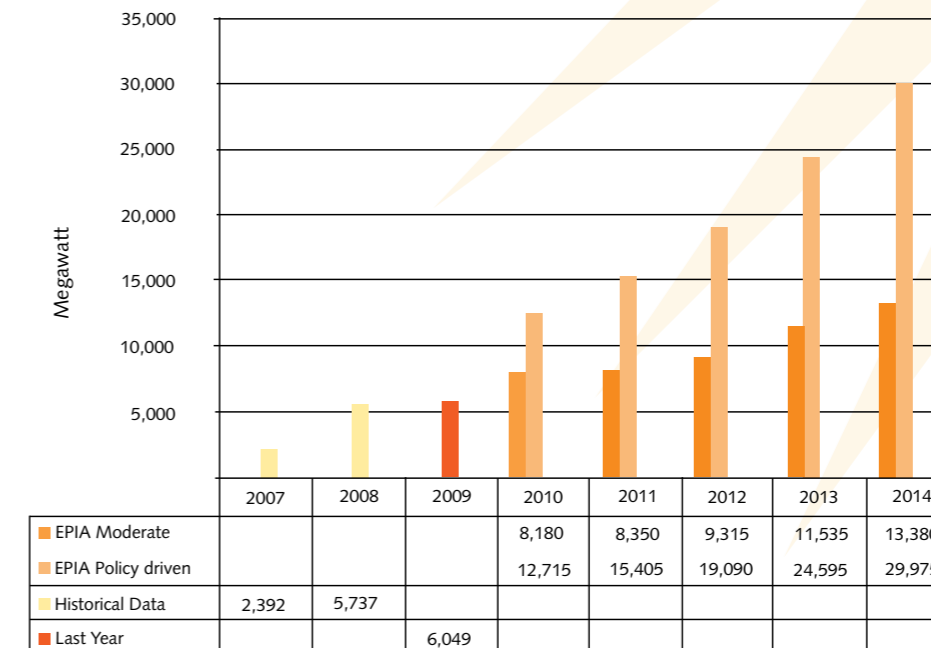
Het hoofdstuk 'Markten, marktkansen en focusgebieden' is opgedeeld in drie paragrafen. In de eerste paragraaf wordt een marktanalyse gemaakt van de wereldwijde en nationale PV-markten. In paragraaf 2 worden vervolgens marktkansen (te benutten door het creëren van pmc's) voor het Nederlandse PV-cluster benoemd, waarna focusgebieden aan bod komen waaraan het Nederlandse cluster extra aandacht moet geven om de pmc's succesvol te kunnen creëren.

5.1 Markten

De introductie van het eerste *Feed-in Tariff* geeft in 1991 het startsein voor wereldwijde groei van de PV-markt. Door stimuleringsinstrumenten is de marktomvang de afgelopen jaren flink gestegen met een gemiddelde groei van ongeveer vijftig procent per jaar. Eind 2010 bedroeg

de cumulatieve wereldwijde PV-capaciteit zo'n veertig gigawatt, voornamelijk gerealiseerd in Europa (vijfenzeventig procent) met Duitsland, Italië en Frankrijk als de huidige grootste afzetmarkten. Belangrijke groeilanden buiten Europa zijn onder meer de Verenigde Staten en Japan. Algemeen wordt echter verwacht dat ook China binnen afzienbare tijd een grote markt voor PV-systemen zal krijgen.

De Europese PV-brancheorganisatie EPIA heeft verschillende groeiverwachtingen opgesteld voor de komende vijf jaar. De eerste groeiverwachting (moderate) gaat uit van 'business as usual', dat wil zeggen zonder nieuwe maatregelen ten aanzien van marktstimulering en regelgeving. Een alternatieve groeiverwachting (*policy driven*) is gebaseerd op een marktsituatie waarbinnen beleidsmakers barrières en knelpunten oplossen. Beide scenario's zijn in de onderstaande figuur weergegeven.

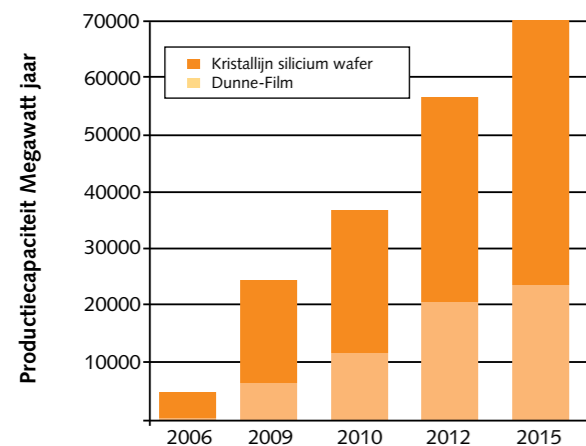


Figuur 10. Groeiverwachting PV-markt (bijgeplaatst vermogen per jaar) uitgedrukt in twee scenario's (bron: EPIA).

Uitgaande van de hoge groeiverwachting neemt de PV-markt met ongeveer vijf GWp per jaar toe (dit lijkt een realistische schatting, want de feitelijke groei in 2010 was al hoger). Wanneer de productiecapaciteit daarmee gelijke tred houdt betekent dit een omzet aan productieapparatuur van circa vijf miljard euro per jaar. Met de plaatsing van tien GWp PV-systemen (als voorbeeld) was anno 2010 een omzet gemoeid van ongeveer dertig miljard euro. Omdat systeemprijzen snel dalen zal eenzelfde volume in 2015 twintig tot vijfentwintig miljard euro vertegenwoordigen en in 2020 vijftien tot twintig miljard euro.

Kwantificering

Silicium zonnepanelen kennen momenteel een marktaandeel van tachtig procent. Dunne films nemen de overige twintig procent voor hun rekening. Deze marktverhouding gaat in de komende jaren naar verwachting licht verschuiven naar vijfenzeventig versus vijfentwintig procent. Een versterkte prijsdaling van dunne films in combinatie met voldoende productiecapaciteit kan deze verschuiving eventueel versnellen. Onderstaande figuur geeft een indicatief overzicht van de geplande uitbreiding van de productiecapaciteiten.



Figuur 11. Actuele en geplande productiecapaciteit wafer silicium- en dunne-filmcellen en -modules (bron: PV Status Report 2010).

Bij het begrip 'markt' is het zinvol om onderscheid te maken tussen de (directe) omzet die samenhangt met PV-productie van cellen, modules en installatie van *turn-key* systemen, en de (afgeleide) omzet in de vorm van onder meer productieapparatuur. Afschrijving van de productieapparatuur is daarbij een component in de kostenopbouw van *turn-key* systemen.

De feitelijke kostenopbouw kan sterk variëren per land, systeemtype en -omvang, fabrikant, et cetera. *Turn-key* systeemprijzen liggen in 2010 tussen de 2,5 en 5 euro per wattpiek (Wp) systeemvermogen (indicatieve range). In Nederland geldt grofweg de volgende prijsopbouw van complete PV-systemen:

| | 1-15 kWp | 15-100 kWp |
|-------------------------------|----------|------------|
| Modules | 60% | 68% |
| Omvormer | 13% | 9% |
| Materialen (kabels, frames) | 7% | 6% |
| Installatiekosten | 18% | 16% |
| Overige (transport et cetera) | 2% | 1% |
| PV-systeem totaal | 100% | 100% |

Behalve de relatief kleine systemen (van enkele kWp tot enkele honderden kWp) die veelal in de gebouwde omgeving worden toegepast is er een sterk groeiende markt voor PV-centrales met een omvang van enkele MWp tot (in de nabije toekomst) enkele GWp. Die laatste staan op de tekentafels in onder meer China. Zulke zeer grote centrales kunnen eventueel geleidelijk worden opgebouwd vanuit nabijgelegen productiecentra.

De groei van de PV-markt brengt een groot aantal marktkansen met zich mee, deze marktkansen (vertaald naar pmc's) worden in de volgende paragraaf beschreven.

5.2 Marktkansen

De marktkansen die ontstaan door de wereldwijde groei van de PV-markt zijn onder te verdelen in twee hoofdgebieden, deze zijn weer als volgt verder onder te verdelen:

1. Applicaties, onderverdeeld in:

- gebouwde omgeving en infrastructuur: geïntegreerde PV-systemen;* een van de belangrijkste marktkansen voor gebruiktoepassingen zijn gebouwgebonden PV-systemen. PV-systemen worden vooralsnog vooral als toevoeging op bestaande daken geplaatst. *Building Integrated PV (BIPV)* gaat een stap verder door de PV-functie te integreren in het dak, de gevel, of een ander onderdeel van het gebouw. PV-systemen kunnen ook worden geïntegreerd in, op of boven de fysieke infrastructuur (dijken, wegen, spoorlijnen, et cetera) of als grondgeïnstalleerde installatie (centrales) worden toegepast. Die laatste toepassingsvorm moet zeker in dichtbevolkte landen met weinig vrije ruimte en een kwetsbaar landschap met grote zorg worden omgeven, want het publieke draagvlak voor PV kan snel verdwijnen, zo leert de ervaring in bijvoorbeeld Tsjechië. Bij alle toepassingsvormen zijn veel mogelijkheden om kosten te besparen. Doordat de prijs van panelen relatief snel daalt, moeten de overige systeemkosten extra aandacht krijgen om deze dalende trend ook voor complete systemen te kunnen realiseren (zie ook de tabel in paragraaf 1).

- Tuinbouwsector: PV in kassen;* Nederland heeft een sterke reputatie rond kasbouw en de kas als energiebron. Kasontwikkelingen waarmee de glastuinbouw inmiddels een begin heeft gemaakt, richten zich op benutting van PV op de 'normale' glazen kas. Daarnaast zijn er mogelijkheden om PV-energieopwekking te combineren met

selectieve belichting van gewassen waardoor er een hoger groeirendement ontstaat en minder energie wordt verbruikt, hetgeen aansluit bij de 'groene kas', die minder of helemaal geen fossiele energie gebruikt of zelfs energie produceert. Op termijn kunnen wellicht zelfs PV-modules worden toegepast die het voor planten onbruikbare deel van het zonlicht omzetten in elektriciteit en de rest doorlaten. Nederland moet in staat zijn synergie te bereiken door twee bestaande sterkten (kassen en PV) te combineren.

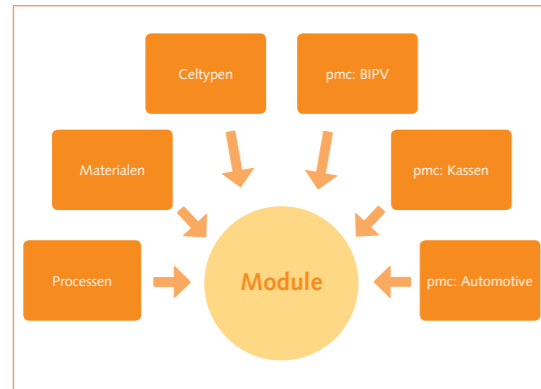
- Vervoersector: solar voertuigen;* een (letterlijk) waardevolle vorm van elektrische energievoorziening zien we bij toepassingen in voertuigen. De huidige kosten van uit brandstof opgewekte elektrische energie in een auto zijn een factor tien hoger dan de prijs van elektrische energie uit het stopcontact. De kostprijs van een PV-autodak mag daarom (per Wp) substantieel hoger zijn die van een zonnedak op een huis. De prijs van PV-autodaken ligt momenteel rond de duizend euro per vierkante meter. PV-integratie in autodaken kan bijvoorbeeld comfort en kostenbesparing opleveren door bij een stilstaande motor toch het gebruik van elektrische functies mogelijk te maken. Verder is PV-integratie geschikt voor maritieme toepassingen in jachten- en botenbouw waar grotere oppervlakken beschikbaar zijn. Zowel bij maritiem als automotive beschikt Nederland over een sterke positie. Kruisbestuiving tussen deze toepassingsgebieden en de solar PV-industrie biedt veel potentie.

2. Product- en productietechnologie, onderverdeeld in:

- Modules;* met name op het niveau van modules speelt integratie een belangrijke rol in het ontwikkeltraject. Bij de module komen alle elementen samen: de celtypen, de gebruikte materialen en de maakprocessen. Deze

elementen, in hun onderlinge samenhang, moeten passen bij de specifieke eisen die worden gesteld vanuit de verschillende applicaties zoals kassen, automotive daken en gebouwgebonden installaties. De veelheid van factoren en hun onderlinge samenhang maakt het ontwikkeltraject voor de module vaak complex.

Concreet spelen bijvoorbeeld interconnectie van cellen en encapsulatie tot halffabricaat (geschikt voor verdere verwerking tot bijvoorbeeld bouwelement) of eindproduct een belangrijke rol bij de integratie op moduleniveau. De verschillende applicaties zoals gebouwgebonden systemen, *stand alone* consumentensystemen, automotive systemen en satelliettoepassingen stellen hun eigen eisen ten aanzien van deze processen. Het (verder) integreren van onderdelen en functies in een module kan de maakkosten verlagen en de levensduur evenals de betrouwbaarheid doen toenemen.



Figuur 12. Moduleontwikkeling in perspectief: technologische aspecten en randvoorwaarden vanuit de applicatie(s).

b. *Cellen*;
de meeste openbare roadmaps zijn gericht op het ontwikkeltraject van de celtechnologieën zoals in onderstaand overzicht is aangegeven. Het voornaamste basisonderscheid in technologieën wordt gemaakt door de classificatie van enerzijds wafergebaseerde technologieën en anderzijds dunne films. De onderscheiden PV-technologieën zijn volgens de IEA PV Technology Roadmap:

Commerciële technologieën

Kristallijn silicium (c-Si) modules zijn momenteel goed voor ruim tachtig procent van de van de totale wereldwijde markt, waarbij de c-Si modules kunnen worden onderverdeeld in twee subcategorieën namelijk: i) monokristallijn (*single crystalline*: sc-Si) en ii) multikristallijn (*multicrystalline* mc-Si). *Dunne films* hebben op dit moment een totaal marktaandeel van iets minder dan twintig procent van de wereldwijde verkopen aan PV-modules. Dunne films zijn onderverdeeld in drie families: i) amorf silicium (a-Si) en microkristallijn silicium (μ -Si), ii) cadmiumtelluride (CdTe), iii) CIGS waarbij de C staat voor koper, de I voor indium, de G voor galium (optioneel) en de S voor zwavel of seleen, of een combinatie daarvan.

Opkomende technologieën en nieuwe concepten

Opkomende technologieën (emerging technologies). In deze categorie vallen onder meer nieuwe (niet-vacuüm, lage-kosten) varianten van de bestaande dunne-filmtechnologieën en organische cellen. De technologieën bevinden zich in het stadium van proefproductie of kleinschalige commerciële productie. *Nieuwe concepten* waarbij ultra-hoog-efficiënte cellen (en later: modules) worden ontwikkeld die gebruik maken van geavanceerde materialen en productieprocessen. Deze celtechnologieën bevinden zich in het laboratoriumstadium.

Concentratortechnologieën

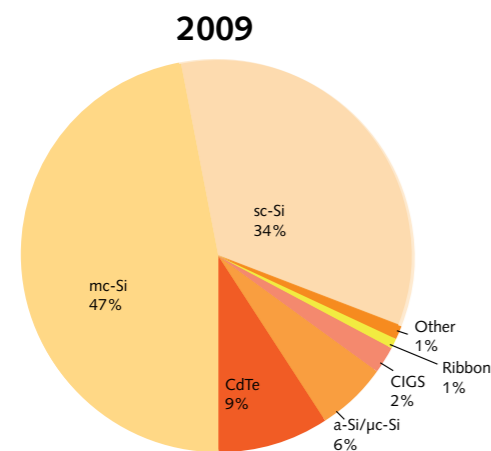
Concentrator PV (CPV) onderscheidt zich van de zogenaamde vlakke-plaattechnologieën (de reguliere uitvoeringsvorm van PV-modules) door het gebruik van een optisch systeem voor bundeling van licht op een cel met een oppervlak dat veel kleiner (tot een factor 1000) is dan het lichttoogstende oppervlak). In feite is ook CPV een *opkomende technologie* en verder zullen sommige *nieuwe concepten* hun weg vinden in CPV in plaats van vlakke-plaatmodules.

Rendementen en kosten per watt-piek zijn de belangrijkste parameters voor PV-modules om onderling een goede vergelijking te kunnen maken (wanneer de levensduren gelijk zijn). Wanneer ook de kosten voor het bouwen van een compleet systeem worden meegeteld wordt het mogelijk om opwekkosten te berekenen en een vergelijking te maken met conventioneel opgewekte elektriciteit. Het veelgehanteerde begrip *grid parity* is in die vergelijking het punt waarbij de opwekkosten van zonnestroom gelijk zijn aan de consumentenprijzen (of welk ander prijsniveau als referentie wordt gekozen) van reguliere elektriciteit. Vanaf dat punt kan een PV-installatie zichzelf terugverdienen over de gehanteerde economische levensduur (afschrijvingsperiode) onder de voorwaarde dat netto bemetering (saldering) mag worden toegepast. Dat laatste betekent dat de vergoeding voor aan het net teruggeleverde stroom gelijk is aan de prijs die wordt betaald voor ingekochte stroom.

c. *Processen*;
een sterke sector in Nederland is de hightechsector die zich bezig houdt met de ontwikkeling van hoogwaardige productieapparatuur voor de halfgeleiderindustrie, de procesindustrie en in aanverwante sectoren. Het ontwikkelen van nieuwe processen en productiemiddelen voor het produceren van PV-cellen en -mo-

dules is een sterke troef in Nederlandse handen. De combinatie van ervaren hightechbedrijven die gericht zijn op machinebouw en hoogwaardige ondersteunende kennisinstellingen levert een groot voordeel op bij de ontwikkeling van nieuwe machines. Indien de kennis- en kundeketen in de thuismarkt compleet is zal dat nog een extra gezamenlijk voordeel opleveren zoals een kortere *time-to-market*, kostprijsverlaging van het eindproduct en optimalisatie van de maakprocessen. Nederland zal sterk kunnen inzetten op productieprocessen waarvoor reeds een uitstekende kennisbasis is gelegd, printing, depositie en *roll-to-roll* handling, maar ook bij de ontwikkeling van apparatuur voor kwaliteitsanalyses en *in-line* inspectie.

d. *Materialen*;
materialen vormen de fysieke en functionele basis van iedere technologie. Om goedkopere en efficiëntere PV-cellen en -modules te kunnen maken is daarom hoogwaardig materiaalonderzoek noodzakelijk. Op basis van materiaalonderzoek kunnen bestaande technologieën worden verbeterd en geheel nieuwe worden ontwikkeld. Ook zijn materialen in belangrijke mate bepalend voor het duurzaamheidsprofiel van PV-technologieën. Bij PV spelen zowel actieve als passieve materialen een belangrijke rol. De actieve materialen (vooral lichtabsorptie en stroomgeleiding) zijn doorslaggevend voor het rendement, de passieve materialen (met name voor encapsulatie, inclusief barrièrelagen) bepalen in hoge mate de levensduur en de betrouwbaarheid. Beide materiaalsoorten samen vertegenwoordigen een aanzienlijk deel (vaak zelfs het grootste deel) van de fabricagekosten. Verdeeld naar het materiaal dat wordt gebruikt voor de kernfunctie van elk zonnepaneel, licht absorberen en omzetten in elektriciteit, zijn de marktaandelen van de commerciële PV-technologieën als aangegeven in figuur 12.



Figuur 14. Onderverdeling marktaandeel per technologie, 2009 (bron: Photon International).

- e. **Duurzaamheid;** integrale duurzaamheid is cruciaal voor een PV-sector die snel naar de terawattschaal groeit (1 terawatt = 1000 gigawatt ≈ 10.000 km² aan PV-systemen). De duurzaamheid van PV wordt bepaald door een aantal verschillende elementen: energiegebruik bij productie en installatie, gebruik van schaarse en/of giftige en gevaarlijke materialen bij productie en in het eindproduct, mogelijkheden voor recycling, et cetera. Waar het (nog) verder verbeteren van het duurzaamheidsprofiel van PV aanvankelijk vooral communicatiedoelen diende, zal het in de toekomst een economische noodzaak worden. Het reduceren van materiaalverbruik, het recyclebaar maken van de producten en het verminderen van energieverbruik tijdens het maakproces levert niet alleen direct kostenvoordeel op maar wordt uiteindelijk ook vereist door overheden en bedrijfsleven, waarbij het *cradle-to-cradle* principe in toenemende mate leidend zal zijn. Dit biedt kansen voor de hightechsector in Nederland, die dit principe op andere gebieden al

grotendeels en met succes heeft toegepast, soms als pionier. Deze kennis en kunde kunnen opnieuw toegepast worden en gecombineerd worden met specifieke ontwikkelingen gericht op bijvoorbeeld nieuwe materialen, energiearme processen en *design-for-recycling*.

5.3 Focusgebieden

In deze paragraaf worden zestien focusgebieden – onderverdeeld in vier categorieën – voor Nederland belicht. Deze focusgebieden sluiten aan bij de hiervoor benoemde pmc's. Per focusgebied wordt een definitie gegeven en worden mogelijkheden voor creatie van bedrijvigheid en Nederlandse spelers benoemd.

Toepassingen van PV

Focusgebied 1 Zonnecelgebouw

Focusgebied 2 Zonnecelkas

PV-technologieën

Focusgebied 3 Dunne-film PV

Focusgebied 4&5 Geavanceerde wafergebaseerde PV (nieuwe architecturen en dunne wafers)

Technologieën voor PV

Focusgebied 6 *Roll-to-roll processing*

Focusgebied 7 Printtechnologie

Focusgebied 8 Depositietechnologie

Focusgebied 9&10 Geavanceerde encapsulatie (barrièrelagen en nieuwe materialen)

Focusgebied 11&12 *In-line* inspectie en kwaliteitsbeheersing

Focusgebied 13 *Green processing*

Focusgebied 14 Materialen

Productiemiddelen

Focusgebied 15 Productieapparatuur dunne-film PV

Focusgebied 16 Productieapparatuur wafergebaseerde PV

Focusgebied 1 – Zonnecelgebouw

Het focusgebied zonnecelgebouw beslaat onderzoek en ontwikkeling van nieuwe en verbeterde systemen en bijbehorende producten voor toepassing van PV-technologie in gebouwen (in de brede zin van het woord). Technische doelstellingen zijn vérgaande (fysieke en functionele) integratie van PV-technologie in bouwelementen en klimaatsystemen, intelligente koppeling met het elektriciteitsnetwerk en hoogwaardige combinaties met elektrisch vervoer. Los van het realiseren van de technische doelstellingen wordt gestreefd naar het creëren van een sterkere bewustwording bij architecten en andere betrokkenen over PV-toepassingen. Voor Nederland zijn op dit focusgebied onder meer kansen rondom productontwikkeling, -demonstratie en -installatie. Daarnaast zijn kansen aanwezig voor levering van diensten door en ter ondersteuning van architecten en productontwerpers.

Focusgebied 2 – Zonnecelkas

Het focusgebied PV-kassen sluit goed aan bij de sterkten van Nederland. Nederland telt ruim 10.000 hectare kassen en tachtig procent van alle glazen kassen die buiten Europa in gebruik zijn, is afkomstig uit Nederland. Daarnaast behoren twee door de Universiteit Wageningen ontwikkelde concepten voor PV-toepassing in glastuinbouw (ELKAS en Fresnel-kas) tot de wereldwijde top. De ontwerpen bewijzen dat het zonder negatieve invloed op het kasgewas mogelijk is elektriciteit op te wekken. Beide concepten zijn binnen drie tot vijf jaar gereed voor marktintroductie. Op te lossen knelpunten door het Nederlandse PV-cluster die leiden tot kostenreductie en rendementsverhoging zijn verbetering van Nabije Infrarode (NIR) stralingreflecterende folie in de ELKAS; opvoering van de concentratiefactor, verbetering van het modulerendement en productie van speciale panelen voor een hoge elektriciteitsopbrengst. Op de langere termijn zijn er mogelijkheden voor het toepassen van panelen die het voor planten bruikbare deel van het licht doorlaten en andere delen omzetten in elektriciteit.

Gezien de beschikbare kennis bij de Universiteit Wageningen, de ervaring van ECN met optimalisatie en levensduurtesten en aanwezigheid van verschillende moduleproducenten en producenten van testapparatuur, moet het Nederlandse PV-cluster in staat zijn op dit focusgebied een sterke positie in te nemen en nieuwe business te genereren.

Focusgebied 3 – Dunne-film PV

Het marktaandeel van dunne-filmzonnecellen zal naar verwachting de komende jaren sterk groeien. Dunne-film zonnecellen zijn van belang omdat er weinig materiaal wordt gebruikt in de actieve lagen en omdat de fabricageprocessen snel en efficiënt kunnen zijn. Als het aanbrengen van die dunne lagen heel goedkoop kan plaatsvinden en het rendement voldoende hoog is kunnen de modulefabricagekosten sterk worden verlaagd ten opzichte van de huidige PV-technologieën. Belangrijke technologische uitdagingen zijn volledige lichtabsorptie in ultra-dunne lagen (door middel van lichtmanagement), het snel en goedkoop aanbrengen van lichtabsorberende lagen met een hoge kwaliteit en het minimaliseren van de verliezen die samenhangen met de stap van zonnecel naar zonnepaneel (serieschakeling van cellen, encapsulatie, et cetera). Nederland heeft op deze terreinen veel hoogwaardige expertise te bieden en kan daarom belangrijke nieuwe business ontwikkelen.

Focusgebied 4 & Focusgebied 5 – Geavanceerde wafergebaseerde PV

Kristallijn silicium is op dit moment de dominante technologie. Sterkten zijn een hoog rendement en een uitgebreide *track record* op het gebied van levensduur en betrouwbaarheid. De belangrijkste uitdagingen zijn een verdere integratie van cellen moduleontwerp en (mede als gevolg daarvan) kostenverlaging. Dit focusgebied is daarom gericht op vermindering van materiaalgebruik en/of verlaging van de materiaalkosten, verdere verhoging van het rendement en verlaging van de kosten op modulenniveau, door ontwikkeling en toepassing van nieuwe concepten gebaseerd op zeer dunne wafers en geavanceerde (met name achterzijdecontact) architecturen

voor cellen en modules (*Metal Wrap Through, Interdigitated Back Contact, Heterojunction* en *Crystalline Silicon Interconnected Strips*). Bij alle concepten gaat het daarbij om cellen op p- en n-type materiaal en op monokristallijn en multikristallijn silicium. Voor Nederland biedt dit focusgebied kansen om nieuwe business te creëren via ontwikkeling en daadwerkelijke productie van geavanceerde cellen en modules en (in het bijzonder) de bijbehorende productieapparatuur. De huidige Nederlandse kennispositie op dit gebied is uitstekend en er is bovendien veel bedrijvigheid aanwezig. Beoogde doelen zijn een omzetvergroting en het genereren van nieuwe bedrijvigheid (*start-ups*).

Focusgebied 6 – Roll-to-roll processing

De huidige productieprocessen van dunne-filmzonnecellen en -panelen kenmerken zich veelal door het gebruik van glas als substraat. Glas is een rigide waardoor productieprocessen over het algemeen batchgewijs zijn georganiseerd. Om de productiekosten verder te verlagen kan de overstap naar *roll-to-roll* productieprocessen gemaakt worden. Daarmee kunnen de verschillende processtappen (al dan niet in vacuüm) direct achter elkaar worden uitgevoerd en kan de doorvoersnelheid worden verhoogd. Om de overstap naar het dynamische *roll-to-roll* productieproces te maken moeten de verschillende onderdelen van het proces zeer goed worden beheerst en op elkaar zijn afgestemd. Daarbij is kwaliteitscontrole van het productieproces van groot belang en zijn sensing, processturing en zeer nauwkeurige mechatronica zeer belangrijk.

Het focusgebied '*roll-to-roll* processing' biedt Nederland grote kansen; voor partijen actief rond ontwikkeling van dunne-filmzonnecellen en bijbehorende productieapparatuur en voor degenen die de zonnepanelen integreren in bijvoorbeeld bouwelementen. Mede vanwege het grote belang is *roll-to-roll* fabricage een integraal onderdeel van het Solliance-programma. In het programmadocument van Solliance is beschreven hoe generieke *roll-to-roll* productie-expertises (depositie, printen, laserbewerking, et cetera) voor verschillende zonneceltechnologieën kan worden ingezet.

Een intensief vierjarig programma leidt tot een stevige Nederlandse expertisebasis voor dynamische fabricageprocessen.

Focusgebied 7 – Printtechnologie

De solar-industrie maakt gebruik van meerdere depositie-technologieën om de verschillende lagen van een PV-cel te maken. Om celproductiekosten te reduceren is het nodig dure en langzame depositieprocessen te vervangen door goedkope, kwalitatief hoogwaardige en snelle technologieën. Printtechnologie is een van de belangrijkste alternatieven. Droomscenario is het printen van de volledige PV-module waarmee grootschalige *roll-to-roll*-productie mogelijk wordt.

Nederland kan op het focusgebied 'Printtechnologie' een belangrijke rol spelen rond te ontwikkelen apparatuur, materialen (inkten en oplosmiddelen) en processen (recepten, instellingen en condities). De groep van partijen die belang hebben bij ontwikkeling van printtechnologie – en daarmee bij innovaties op deze terreinen – is uitgebreid en divers. Dit wordt mede veroorzaakt door de verwachte impact en het grote marktvolume. Geschikte partijen om een initiatief rond printtechnologie te trekken zijn bijvoorbeeld het Holst Centre en Océ. Innovatieprojecten kunnen daarbij de huidige Nederlandse kennispositie versterken, doorbraken forceren en helpen om nieuwe technologieën versneld te introduceren.

Focusgebied 8 – Depositietechnologie

Het focusgebied depositie behandelt onderzoek en ontwikkeling van nieuwe en verbeterde depositieprocessen en bijbehorende machines. Depositieapparaten dienen om een grote verscheidenheid aan lagen aan te brengen voor diverse type wafer-type en dunne-film (organische en anorganische) zonnecellen. Onderzoek naar verbeterde en nieuwe processen vindt plaats rond onder meer *atomic layer deposition*, plasmadepositie en depositie op nieuwe substrattypen. Op dit focusgebied is intensieve interactie met ontwikkelingen rondom materialen, zonnecelconcepten en productieapparatuur een vereiste. Met name voor organi-

sche zonnecellen is samenwerking met printtechnologie en *roll-to-roll* technologie belangrijk.

Nederland kan op dit focusgebied vooral nieuwe business creëren door verkoop van machines die een betere prijs/kwaliteitverhouding hebben en het rendement van het product verhogen. Gecombineerd met de ontwikkeling van nieuwe materialen en zonnecelconcepten is het bovendien mogelijk intellectueel eigendom op te bouwen waarvoor licenties verleend kunnen worden.

Focusgebied 9 & 10 – Geavanceerde encapsulatie (barrièrelagen en nieuwe materialen)

Encapsulatie ('inpakking') van (wafer en dunne-film) zonnecellen tot een module is in belangrijke mate bepalend voor de levensduur van het product. Encapsulatie draagt bovendien substantieel bij aan de totale kosten. De encapsulatie fungeert als barrière voor de indringing van zuurstof en vocht vanuit de omgeving, die de werking van de zonnecellen nadelig zou kunnen beïnvloeden of zelfs tot volledig falen zouden kunnen leiden. Encapsulatie van cellen kan bijvoorbeeld bestaan uit een combinatie van een glasplaat aan de ene zijde en een hermetisch afsluitende folie aan de andere zijde, met daartussen een transparante folie ('lijm'). Daarnaast kunnen barrièrelagen worden ingevoegd, bijvoorbeeld om te voorkomen dat ongewenste stoffen vanuit het glas in het actieve celmateriaal dringen. Voor flexibele dunne-film zonnecellen is glas geen optie en daarom is het van belang om goedkope, maar uitstekend werkende andere materialen of combinaties van materialen (inclusief dunne barrièrelagen) beschikbaar te hebben. Zulke materialen moeten ook op ruwe (respectievelijk getextureerde) of niet-homogene ondergronden kunnen worden gebruikt. Hoewel zulke opties bestaan zijn ze zeer kostbaar en daarom ongeschikt voor toekomstige grootschalige productie tegen zeer lage kosten. Het focusgebied 'Geavanceerde encapsulatie' biedt ruimte voor ontwikkeling van materialen, processen en apparatuur. Het domein kent daarmee aanzienlijke kansen voor Nederland. Het Nederlandse ecosysteem kan op korte termijn verbeteringen

in de huidige technologieën bewerkstelligen en op langere termijn volledig nieuwe materialen en concepten leveren.

Focusgebied 11 & 12 – In-line inspectie en kwaliteitsbeheersing

Ook op het focusgebied 'Kwaliteitsbeheersing' is voor de PV-industrie nog veel te winnen. Via kwaliteitscontrole wordt inzicht verkregen in kwaliteit van ingangsmaterialen, tussenproducten en uitgevoerde processtappen. Dit wordt belangrijker naarmate de fabricageprocessen sneller worden en de toleranties voor procesparameters en productspecificaties nauwer. Bij *roll-to-roll* productie is ultrasnelle, nauwkeurige *in-line* inspectie zelfs een absolute noodzaak.

De ontwikkeling van *in-line* inspectietools kan opgesplitst worden in een korte termijn en een langere termijn ontwikkeling. Op korte termijn is ontwikkeling van *in-line* inspectietools voor wafer-silicium productielijnen nodig. Deze ontwikkeling loopt momenteel al als onderdeel van bestaande projecten. Op langere termijn is het ontwikkelen van *in-line* inspectietools voor (*roll-to-roll*) dunne-film productieprocessen een belangrijk thema.

Het focusgebied biedt daarmee op de korte termijn kansen voor Nederland via ontwikkeling van inspectietools voor kristallijn silicium PV-productietechnologie. Zo kunnen Nederlandse machinebouwers applicaties geïntegreerd in cel- en modulelijnen verkopen of kunnen specifieke technologische bedrijven losse applicaties verkopen. Op langere termijn kan ontwikkeling van dunne-filminspectietools bijdragen aan het versterken van het Nederlandse PV-cluster.

Focusgebied 13 – Green processing

Het focusgebied *green processing* heeft betrekking op het inventariseren, analyseren en minimaliseren van materiaalgebruik, energieverbruik, afvalproductie en milieu-impact bij de productie van PV-systemen. De gehele levenscyclus moet in beschouwing worden genomen: van grondstoffenwinning tot materiaalverwerking, cel- en moduleproductie, transport, plaatsing en verwerking of recycling na eindgebruik. Op deze manier moet een kwantitatief overzicht van de milieu-

impact tijdens de levenscyclus van een PV-systeem gegeneerd worden, inclusief suggesties om deze terug te dringen. Nederlandse bedrijven hebben op dit focusgebied kansen om productieprocessen te ontwikkelen die bijvoorbeeld minder (schaarse of schadelijke) grondstoffen en energie gebruiken. Voor de uitwerking van initiatieven op dit focusgebied zijn partners nodig die expertise hebben op het gebied van levenscyclusanalyses, productieapparatuur en cel- en moduleproductie. De conclusies van een dergelijk traject kunnen na afloop direct in de praktijk gebracht worden door de industriële partners.

Focusgebied 14 – Materialen

Het focusgebied materialen is in twee domeinen op te delen: reeds industrieel toegepaste materialen en nieuwe materialen met betere of geheel nieuwe functionaliteiten. Bij reeds toegepaste materialen is behoefte aan verbeterde beheersing van materiaalproductie en -verwerking (reproduceerbaarheid, homogeniteit en uniformiteit) en fundamentele begripsvorming van materiaaleigenschappen (zoals afhankelijkheid materiaaleigenschappen van het gekozen productieproces). Voor het tweede domein geldt dat de PV-industrie behoefte heeft aan (nieuwe) materialen die bijvoorbeeld hogere celrendementen of langere levensduren opleveren en/of goedkoper, respectievelijk minder schaars zijn. Nederland kan op dit focusgebied een rol van betekenis spelen bij het vinden van nieuwe en verbeterde materialen. Ook bij materialenonderzoek is de groep van partijen die belang heeft bij innovaties groot. Materialen vormen immers het hart van de PV-technologie en de gehele PV-industrie is daarom gebaat bij gedegen materiaalonderzoek. Een initiatief rond materiaaltechnologie kan het beste getrokken worden door een van de kennisinstellingen vanwege het benodigde fundamentele begrip en de systematische aanpak.

Focusgebied 15 – Productieapparatuur voor dunne-film PV

Op dit focusgebied is nog veel te winnen omdat productietechnologie voor dunne-filmcellen en modules zich in zijn totaliteit nog in een relatief pril stadium van ontwikkeling verkeert (ondanks het feit dat enkele individuele fabrikanten een geavanceerd proces en product hebben). Dat uit zich onder meer door het gebrek aan standaardisatie en het grote aantal in gebruik zijnde processen. Kwaliteitscontrole en -verbetering, kostenreductie, opschaling en vermindering van de *down-time* zijn thema's waarop nog veel vooruitgang geboekt kan (en moet) worden. Daarnaast is nog een breed scala aan volledig nieuwe materialen en celconcepten in ontwikkeling, die te zijner tijd hun eigen productietechnologie en -apparatuur zullen vragen. Centrale partijen bij deze ontwikkeling zijn niet alleen de apparatuurbouwers zelf, maar ook hun toeleveranciers en onderzoeksinstellingen. Gezamenlijk moeten zij daarbij ook in staat zijn intellectueel eigendom op te bouwen en dit te vermarkten.

Focusgebied 16 – Productieapparatuur voor wafergebaseerde PV

Dit focusgebied behandelt de ontwikkeling van nieuwe en verbeterde machines en *in-line* systemen voor silicium cel- en moduleproductie. Belangrijke onderzoeksaspecten zijn daarbij onder meer machine- en procesintegratie, wafer *handling* tussen procesmodules, besturingsconcepten voor procesbeheersing en reductie van de gevraagde faciliteiten. Voor Nederland biedt dit focusgebied kansen om bedrijvigheid te genereren via machineverkoop, bestaande uit proces- en *handling*modules en geïntegreerde lijnen. Daarnaast zorgt de levering van service en reserveonderdelen en productieondersteunende software voor business. Kennisinstellingen, oem's en toeleveranciers moeten daartoe de handen ineen slaan en gezamenlijk de benodigde kennis en toepassingen genereren.

6. Afrondingen

6.1 Afkortingen

| | |
|-------|--|
| GW(p) | gigawatt(piek) – eenheid van vermogen |
| MW(p) | megawatt(piek) – eenheid van vermogen |
| kW(p) | kilowatt(piek) – eenheid van vermogen |
| W(p) | watt(piek) – eenheid van vermogen |
| kWh | kilowattuur – eenheid van energie |
| TU/e | Technische Universiteit Eindhoven |
| ECN | Energieonderzoek Centrum Nederland |
| R&D | onderzoek en ontwikkeling |
| CdTe | cadmiumtelluride |
| CIGS | koper-indium/gallium-diselenide/sulfide |
| CZTS | koper-zink-tin-selenide/sulfide |
| OPV | organische PV |
| a-Si | amorf silicium |
| μc-Si | microkristallijn silicium |
| mc-Si | multikristallijn silicium |
| sc-Si | monokristallijn (<i>single crystal</i>) silicium |
| UMG | <i>upgraded metallurgical silicon</i> (gezuiverd metallurgisch silicium) |
| III-V | familie van halfgeleidermaterialen opgebouwd uit elementen uit de groepen III en V van periodiek systeem |
| ITO | indium-tinoxide (een transparante geleider) |
| TCO | transparant geleidend oxide |
| DSC | kleurstof (<i>dye-sensitized</i>) zonnecel |
| CPV | concentrator PV |
| ALD | <i>Atomic Layer Deposition</i> |
| CVD | <i>Chemical Vapor Deposition</i> |
| PVD | <i>Physical Vapor Deposition</i> |
| NIR | Nabij InfraRood |
| LED | <i>Light-Emitting Diode</i> |
| μm | micrometer (0,001 mm) |
| pmc | product-marktcombinatie |
| BIPV | <i>Building Integrated PV</i> |
| FiT | <i>Feed-in Tariff</i> (terugleververgoeding) |

6.2 Literatuur

Technology Roadmap Solar Photovoltaic Energy

International Energy Agency (IEA) (2010), Paris, France
www.iea.org/papers/2010/pv_roadmap.pdf

Jaeger-Waldau, A., PV Status Report 2010

Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, EUR 24344 EN, ISBN 978-92-79-15657-1
<http://re.jrc.ec.europa.eu/refsys/pdf/PV%20reports/PV%20Report%202010.pdf>

Trends in photovoltaic applications 1992-2009

Report IEA-PVPS T1-19:2010
www.iea-pvps.org/products/download/Trends-in-Photovoltaic_2010.pdf

Solar Generation 6

Greenpeace and EPIA (2011)
www.epia.org/publications/epia-publications.html

Green, M.A., K. Emery, Y. Hishikawa and W. Warta

Solar Cell Efficiency Tables (Version 37)

Prog. Photovolt.: Res. Appl. 19 (2011) 84-92

Compilation of best research solar cell efficiencies (revision Sept. 2010)

Data verzameld door L. Kazmerski, National Renewable Energy Laboratory (NREL)
 Beschikbaar via [http://en.wikipedia.org/wiki/File:PVeff\(rev100921\).jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:PVeff(rev100921).jpg)

Renewables 2010: global status report (rev. Sept. 2010)

Renewable Energy Policy Network for the 21st Century
www.ren21.net/Portals/97/documents/GSR/REN21_GSR_2010_full_revised%20Sept2010.pdf

A Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology

European Photovoltaic Technology Platform (2007), Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, ISBN 978-92-79-05523-2
www.eupvplatform.org

Today's actions for tomorrow's PV technology An Implementation Plan for the Strategic Research Agenda of the European Photovoltaic Technology Platform

European Photovoltaic Technology Platform (2009), Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, ISBN 978-92-79-12391-7
www.eupvplatform.org

SET for 2020 (Executive summary)

European Photovoltaic Industry Association (2009)
www.setfor2020.eu/en/executive-summary

Accelerated and Extended Japanese PV Technology Roadmap PV2030+

NEDO, Japan (2009).
www.pvgroup.org/cms/groups/public/documents/web_content/ctr_030885.pdf

Energiekonzept 2050: Eine Vision für ein nachhaltiges Energiekonzept auf Basis von Energieeffizienz und 100% erneuerbaren Energien (in het Duits)

Vertaalde titel: Energieconcept 2050: Een Visie voor een Duurzaam Energieconcept gebaseerd op Efficiënt Energiegebruik en Hernieuwbare Energie
 ForschungsVerbund Erneuerbare Energien (FVEE), 2010.
www.fvee.de/fileadmin/politik/10.06.vision_fuer_nachhaltiges_energiekonzept.pdf

6.3 Betrokkenen

Partners

Aan de totstandkoming van deze roadmap hebben zestien bedrijven en kennisinstellingen meegewerkt. In totaal waren namens deze organisaties veertig personen betrokken. Een overzicht:

| Bedrijf/instelling | Plaats | Bedrijfstak |
|--------------------|-----------|--------------------|
| ECN | Petten | Kennisinstelling |
| Beltech | Eindhoven | Machinebouw |
| CCM | Nuenen | Machinebouw |
| Chematronics | Eindhoven | Ondersteuning |
| Holland Solar | Utrecht | Branchevereniging |
| Meco | Drunen | Machinebouw |
| Minase | Tilburg | Ondersteuning |
| NTS-Group | Eindhoven | Machinebouw |
| N.V. BOM | Tilburg | Ondersteuning |
| OM&T | Eindhoven | Kennisbedrijf |
| OTB Solar | Eindhoven | Machinebouw |
| Sioux Technologies | Eindhoven | Machinebouw |
| Solland Solar | Heerlen | Productleverancier |
| TNO | Eindhoven | Kennisinstelling |
| TMC | Eindhoven | Kennisbedrijf |
| TU/e | Eindhoven | Kennisinstelling |

Externen

Aan de totstandkoming van deze roadmap hebben verder twintig 'externe' bedrijven en kennisinstellingen meegewerkt. In totaal waren namens deze organisatie veertig personen betrokken. Een overzicht:

| Bedrijf | Plaats | Bedrijfstak |
|--------------------|------------|---------------------------------|
| AAE | Helmond | Machinebouw |
| DHV | Eindhoven | Ondersteuning |
| Holland Innovative | Eindhoven | Ondersteuning |
| KEMA | Utrecht | Ondersteuning |
| Fuji Film | Tilburg | Productleverancier |
| Air Liquide | Eindhoven | Machinebouw |
| Levitech | Almere | Machinebouw |
| Philips | Eindhoven | Productleverancier, machinebouw |
| Delta | Middelburg | Productleverancier |
| Sunergy | Middelburg | Producttoepasser |
| Tendens | Breda | Productleverancier |
| Technobis | Uitgeest | Machinebouw |
| Scheuten Solar | Venlo | Productleverancier |
| NXP | Eindhoven | Productleverancier |
| Peer+ | Eindhoven | Productleverancier |
| Tempress | Vaassen | Machinebouw |
| Smit Ovens | Eindhoven | Machinebouw |
| M2i | Delft | Ondersteuning |
| EZ | Den Haag | Overheid |

Colofon
Roadmap Zon op Nederland

Roadmapping, kernteam en redactie
Berenschot, N.V. BOM, ECN, EG Media
Holland Solar, OTB Solar en TNO

Concept en grafisch ontwerp
EG Media

Foto's:
Helianthos, Solland Solar, OTB Solar,
Smit Ovens en Universiteit Wageningen

Druk en oplage
Roto Smeets, 2.000 exemplaren

Rechten
De uitgever kan op geen enkele wijze aansprakelijk
gesteld worden voor enige eventueel geleden
schade door foutieve melding in deze roadmap.

Dit project wordt mogelijk gemaakt met financiële steun van
het ministerie van Economische Zaken, Landbouw & Innovatie,
provincies Noord-Brabant en Limburg, SRE en N.V. BOM.

*© Copyright, maart 2011. Niets uit deze uitgave mag
worden overgenomen in welke vorm dan ook
zonder nadrukkelijke toestemming van de uitgever.*