

› WHITEPAPER

ZONPOSITIEF: ZONNE-ENERGIE OP WEG NAAR **IMPACT**

Maart 2021

TNO innovation
for life

› **TNO-auteurs**
Wim Sinke
Wiep Folkerts
Arthur Weeber

INHOUD

1. Voorwoord	3
1.1 Zonne-energie van noodzakelijk kwaad naar begerenswaardig goed	3
2. Klimaatverandering, energietransitie en de rol van zonne-energie	4
2.1 Parijs en het Nederlandse Klimaatakkoord	4
2.2 De rol van elektriciteit	5
3. Zonne-energie: waar komen we vandaan en waar staan we?	6
3.1 Verschillende soorten zonnecellen en -panelen	6
3.2 Van laboratorium naar productie	8
3.3 Technologie-evolutie en -revolutie?	9
4. Wat is nodig voor impact met zonne-energie?	11
4.1 Over terawatts en vierkante kilometers	11
4.2 Voorwaarden voor grootschaligheid	13
4.2.1 Energiesysteemintegratie	13
4.2.2 Verdere kostenverlaging	14
4.2.3 Veiligheid	15
4.2.4 Grondstoffen en circulariteit	16
4.2.5 Ruimte, integratie en functiecombinatie	17
5. Waar werken TNO en partners aan?	19
5.1 Kiezen om verschil te maken	19
5.2 Integratie en toepassingen	20
5.2.1 Geavanceerde zonneparken	20
5.2.2 Zonne-energie in de infrastructuur	22
5.2.3 Drijvende zonne-energiesystemen	23
5.2.4 Zonne-energie in gebouwen	24
5.2.5 Zonne-energie in mobiliteit en transport	26
5.2.6 Mass customization	28
5.3 Zonne-energie technologieën	29
5.3.1 Silicium: cellen	29
5.3.2 Silicium: panelen	30
5.3.3 Dunnefilm: perovskiet	32
5.3.4 Dunnefilm: panelen	33
5.3.5 Tandems	34
5.4 De zonne-energiesector terugbrengen naar Europa	36
6. De toekomst van zonne-energie	38

› 1 VOORWOORD

1.1 ZONNE-ENERGIE VAN NOODZAKELIJK KWAAD NAAR BEGERENSWAARDIG GOED

Zonne-energie (hier bedoeld: zonnestroom) is een onmisbare bouwsteen voor een duurzaam en klimaatneutraal energiesysteem; wereldwijd, in Europa en in Nederland. De **kosten** zijn **spectaculair gedaald** door een zeer succesvolle combinatie van onderzoek & innovatie en opschaling door marktontwikkeling. Dat is goed nieuws voor de noodzakelijke energietransitie, maar tegelijkertijd zijn er toenemende zorgen en vragen over de manier waarop de groei wordt gerealiseerd. Wat doet zonne-energie met ons landschap, wat zijn de gevolgen voor de natuur, hoe kunnen we onze beperkte beschikbare ruimte optimaal gebruiken, hoe duurzaam is zonne-energie werkelijk, om er maar een paar te noemen.

Standaardisatie in technologie en toepassingen ('one size fits all') was nodig om zonne-energie goedkoop te maken, maar daardoor is het beeld van zonne-energie dat sommige mensen nu hebben meer een karikatuur dan een illustratie van de mogelijkheden. Er is inmiddels **dringend behoefte aan flexibiliteit, maatwerk en integratie**, in combinatie met een **hoge productie- en uitrolsnelheid** om de klimaatdoelen te kunnen halen. Zonne-energie met niet alleen lage kosten, maar ook een hoge toegevoegde waarde voor mens, milieu en economie; Zonne-energie 2.0. Zonne-energie heeft in zich om dat mogelijk te maken en TNO werkt daaraan met een groot team van enthousiaste experts. Reden temeer voor ons om de ontwikkelingen op het gebied van zonne-energie in kaart te brengen en zoveel mogelijk mensen en organisaties te informeren en te inspireren over het enorme potentieel en de vele, vaak nog **onbekende mogelijkheden en gezichten van zonne-energie**. Als internationaal vooraanstaande speler op het gebied van innovatie van zonne-energie, met vele partners in binnen- en buitenland is TNO daarvoor uitstekend gepositioneerd. Deze whitepaper verschijnt als onderdeel van TNO's communicatiecampagne met het motto 'Zonpositief'.

Zonne-energie 2.0 draait niet alleen om lage kosten, maar ook om hoge toegevoegde waarde voor mens en milieu

2 KLIMAATVERANDERING, ENERGIETRANSITIE EN DE ROL VAN ZONNE-ENERGIE

2.1 PARIJS EN HET NEDERLANDSE KLIMAATAKKOORD

Ons grootschalige gebruik van fossiele brandstoffen en de bijbehorende uitstoot van het broeikasgas CO₂ is de belangrijkste, maar niet de enige, oorzaak van klimaatverandering¹, waarvan we de wereldwijde gevolgen steeds indringender ervaren. Daarom is in het Akkoord van Parijs² (2015) afgesproken om de emissies van broeikasgassen snel en drastisch te verminderen en daarmee de temperatuurstijging te beperken tot minder dan 2 graden en liefst niet meer dan 1,5 graad. Alle bijna 200 landen die het Akkoord hebben ondertekend en ook de EU hebben in de afgelopen jaren plannen gemaakt om de emissiereductie te realiseren. Nederland heeft in dat verband het Klimaatakkoord³ opgesteld. In de bijbehorende Integrale Kennis- en Innovatieagenda (IKIA) en de Meerjarige Missiegedreven Innovatieprogramma's (MMIP's)⁴ worden het daarvoor benodigde onderzoek en de gewenste innovaties beschreven. Deze IKIA en de MMIP's zijn voor TNO in belangrijke mate richtinggevend voor zijn energieonderzoekprogramma's (de TNO Roadmaps).

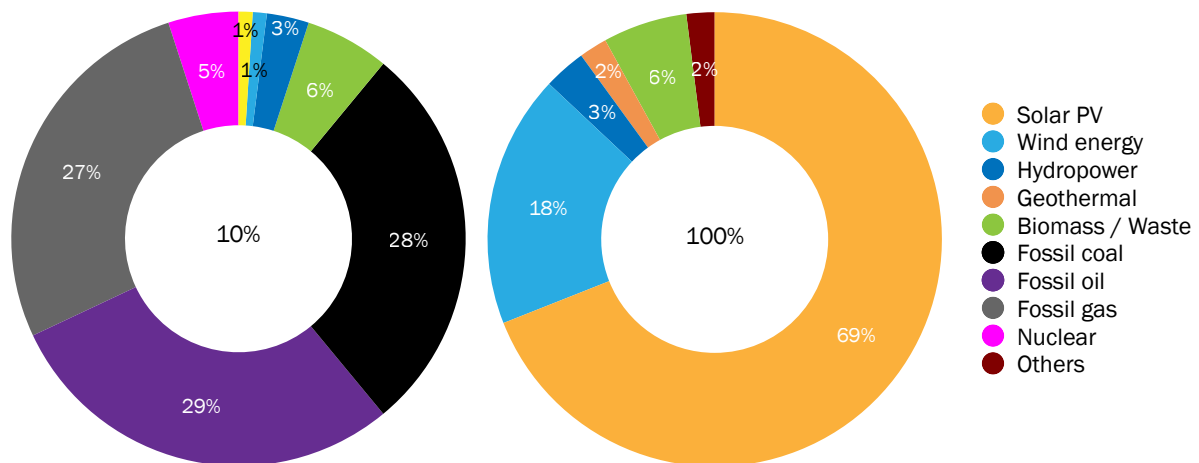


IN HET AKKOORD VAN PARIJS IS AFGESPROKEN DE TEMPERAATUURSTIJGING TE BEPERKEN TOT MINDER DAN 2 GRADEN.

1. [Wat is het broeikaseffect? | Milieu Centraal](#)
2. [Klimaatconferentie van Parijs 2015 - Wikipedia](#); [Akkoord van Parijs - Wikipedia](#); [Klimaatbeleid](#) | [Klimaatverandering](#) | [Rijksoverheid.nl](#)
3. [Klimaatakkoord](#) | [Klimaatakkoord](#)
4. <https://www.klimaatakkoord.nl/themas/kennis-en-innovatieagenda>

2.2 DE ROL VAN ELEKTRICITEIT

Het is de verwachting dat de rol van elektriciteit in het hele energiesysteem sterk zal toenemen, in sommige scenario's tot wel 90% van de totale primaire energie, zie Figuur 1⁵. Hernieuwbare elektriciteit, met name uit wind en zon, zal in feite de rol van fossiele energie uit kolen, olie en aardgas als universele 'primaire brandstof' overnemen. Er wordt dan gesproken van 'elektrificatie'. Elektriciteit zal in de toekomst naar verwachting worden gebruikt voor de toepassingen die we kennen zoals verlichten en ICT, maar ook voor zaken waarvoor we nu vooral direct fossiele brandstof gebruiken, zoals koken, verwarmen en auto rijden. Het precieze aandeel van elektriciteit en daarbinnen de rol van zonne-energie hangen af van veel factoren en aannamen en variëren dan ook per scenario^{6,7}, maar de geschetste trends van elektrificatie en het sterk toenemende belang van zon en wind worden breed onderkend. Dat sluit goed aan bij de Nederlandse doelstelling om het gebruik van aardgas versneld uit te faseren. Ook het bedrijfsleven zal steeds vaker elektriciteit gaan gebruiken, bijvoorbeeld voor het aandrijven van chemische processen. Wanneer een compacte brandstof toch nodig is, zoals in vliegtuigen of vrachtwagens die lange afstanden moeten overbruggen, of als grondstof voor de industrie, kan deze met behulp van elektriciteit worden geproduceerd in schoon een proces. Een bekend voorbeeld is de productie van waterstof uit water door middel van elektrolyse⁸.



FIGUUR 1. AANDELEN VAN HERNIEUWBARE ENERGIE IN DE TOTALE MONDIALE PRIMAIRE ENERGIEVOORZIENING IN 2015 (10%) EN 2050 (100%)⁵. FIGUUR OPNIEUW OPGEMAAKT DOOR TNO.

5. Ram M., Bogdanov D., Aghahosseini A., Gulagi A., Oyewo A.S., Child M., Caldera U., Sadovskaia K., Farfan J., Barbosa LSNS., Fasihi M., Khalili S., Dalheimer B., Gruber G., Traber T., De Caluwe F., Fell H.-J., Breyer C. Global Energy System based on 100% Renewable Energy – Power, Heat, Transport and Desalination Sectors. Study by Lappeenranta University of Technology and Energy Watch Group, Lappeenranta, Berlin, March 2019, zie <http://energywatchgroup.org/new-study-global-energy-system-based-100-renewable-energy>.
6. Global energy transformation: A roadmap to 2050 (IRENA, 2019), zie <https://www.irena.org/publications/2019/Apr/Global-energy-transformation-The-REmap-transition-pathway>.
7. World Energy Outlook 2020 (IEA, 2020), zie <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>.
8. Waterstof kan de energietransitie een boost geven: 7 kansen | TNO

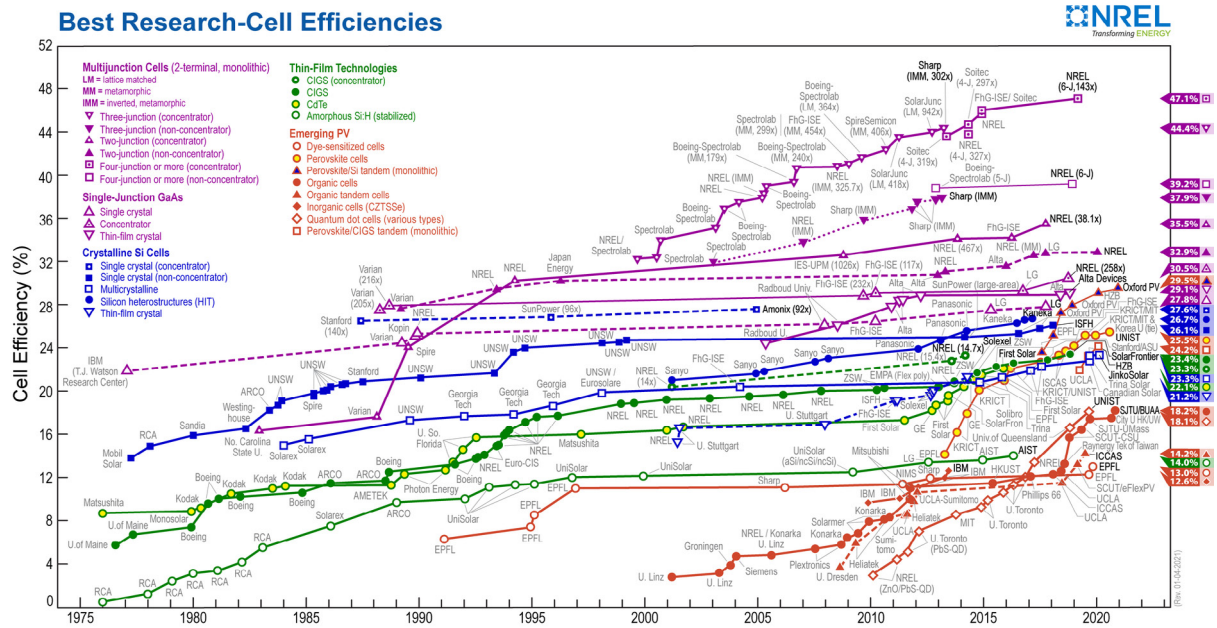
3 ZONNE-ENERGIE: WAAR KOMEN WE VANDAAN EN WAAR STAAN WE?

3.1 VERSCHILLENDE SOORTEN ZONNECELLEN EN -PANELEN

Zonnecellen kunnen worden gemaakt van allerlei (halfgeleider)materialen, elk met specifieke voor- en nadelen. Ruim een halve eeuw onderzoek en ontwikkeling heeft een rijkge vulde gereedschapskist opgeleverd: vele soorten zonnecellen, in zeer verschillende stadia van ontwikkeling. Daarbij gaat het om silicium en enkele andere materialen in de vorm van dunne zelfdragende plakken, dunne films op een drager en combinaties (stapelingen). Figuur 2⁹ geeft een overzicht van de ontwikkeling van het rendement van bijna alle bekende soorten zonnecellen. Het zijn officieel bevestigde record-rendementen van laboratoriumcellen met een klein oppervlak, meestal een paar mm² of een paar cm². Kosten zijn daarbij van weinig of geen belang. In dit overzicht vallen verschillende dingen op.

- Vrijwel alle soorten zonnecellen laten een geleidelijke, maar wel robuuste toename van het rendement met de tijd zien, met af en toe een grotere stap. Die toename is het resultaat van een continue stroom van verbeteringen en innovaties in honderden publieke en private laboratoria: heel veel bloed, zweet en tranen en soms echte verrassingen en doorbraken.
- Het wereldrecordrendement voor een zonnecel is 47% (situatie begin 2021). Dat is een indrukwekkend wetenschappelijk en technologisch hoogstandje bereikt door het National Renewable Energy Laboratory (NREL) in de VS. Dit betreft geen gewone zonnecel, maar een stapeling van maar liefst 6 verschillende cellen, respectievelijk materialen in een zogenaamde multi-junctiecel. Verder is de cel niet belicht met normaal zonlicht ('1 zon'), maar met 143 zonnen (143x geconcentreerd licht). Dit type cellen is niet geschikt of bedoeld voor Nederland en onze daken, maar laat vooral zien wat mogelijk is met zonne-energie. Min of meer vergelijkbare cellen worden wel gebruikt in concentratorsystemen voor zeer zonnige klimaten en in de ruimtevaart.
- Silicium- en dunnefilmcellen (blauw en groen), de huidige marktspelers, zijn al decennia in ontwikkeling en boekten aanvankelijk snelle vooruitgang. Ze worden nu verder geperfectioneerd en de rendementen komen in het laboratorium steeds dichterbij hun limieten, die voor de verschillende soorten naar schatting tussen 25 en 29% liggen. Inmiddels is veel onderzoek, ook bij TNO, er daarom op gericht om zulke hoge rendementen ook in grootschalige productie van panelen en tegen steeds lagere kosten mogelijk te maken. Niet direct zichtbaar in deze figuur, maar wel heel belangrijk.

Het wereldrecordrendement voor een zonnecel is 47% (situatie begin 2021)



FIGUUR 2. ONTWIKKELING VAN HET RENDEMENT VAN DE BESTE LABORATORIUMCELLEN⁹.

- Kleurstof-gesensibiliseerde zonnecellen (open rode cirkels), soms ook wat onnauwkeurig onder de ‘organische zonnecellen’ geschaard, waren de ontdekking en de hoop van de jaren ’90, maar het enthousiasme en de onderzoeksinspanningen zijn in de loop van de jaren verlegd naar andere nieuwe soorten, met een grotere potentie voor grootschalige toepassing.
- Organische zonnecellen (rode bolletjes en driehoekjes) zijn een vrij nieuwe loot aan de zonne-energie-boom en hebben door veel onderzoek een rendement van ruim 17% bereikt. Inmiddels is een belangrijk deel van de bijbehorende onderzoeksinspanning (ook bij TNO) echter verlegd naar een nieuwe, veelbelovende optie.
- Perovskieten (rood/gele bolletjes) zijn een nieuwe familie van materialen die in de wereld van zonne-energie voor grote opwinding hebben gezorgd. Het is met afstand het snelst groeiende onderzoeksgebied. Perovskieten worden als dunne films toegepast en dat is op zichzelf niet nieuw, maar hun eigenschappen zijn heel bijzonder. Ze kunnen met snelle en in principe goedkope processen worden gedeponeerd op plastic, metaal of glas en in korte tijd hebben perovskietcellen in het laboratorium een rendement van ruim 25% gehaald. Behalve voor ‘standaard’ panelen of folies zijn perovskieten ook geschikt voor tandems (volgende punt) en om gedeeltelijk lichtdoorlatende (semitransparante) panelen te maken, wat nieuwe toepassingen in zicht brengt.

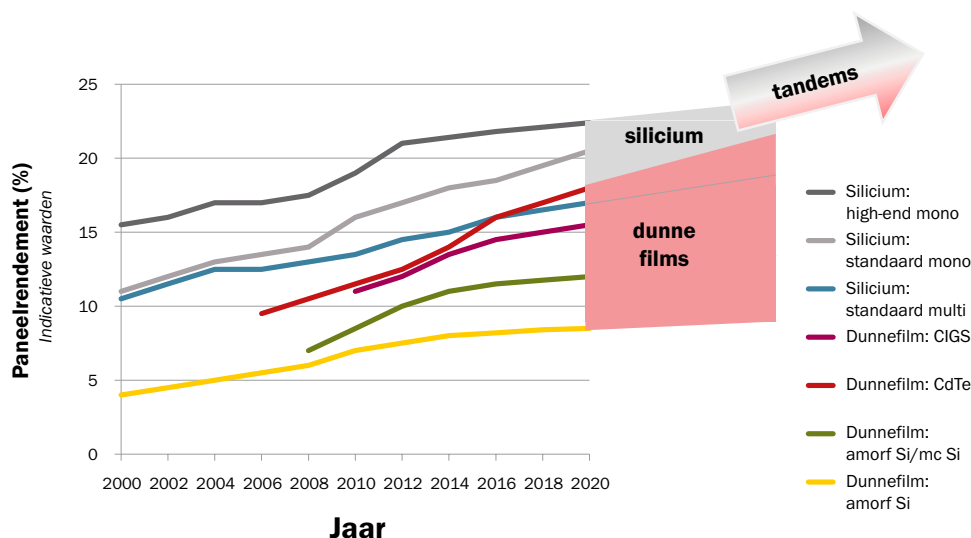
Perovskieten zijn een nieuwe familie van materialen die in de wereld van zonne-energie voor grote opwinding hebben gezorgd

- Tandems en multi-junctiezonnecellen zijn stapelingen van materialen waarmee een hoger rendement kan worden bereikt dan wat mogelijk is met één enkel zonnecelmateriaal zoals silicium. De grootste doorbraak die de hiervoor genoemde perovskieten zouden kunnen brengen ligt misschien wel in de mogelijkheid om ze te combineren met een ander zonnecelmateriaal om zo een tandem te bouwen (rood/blauwe driehoekjes en open rode vierkantjes). Tandems en multi-junctiecellen bestaan al lang, maar toe nu toe waren er geen materiaalcombinaties beschikbaar om ze goedkoop aan de vierkante meter te maken. Perovskieten kunnen worden gebruikt in combinatie met silicium of dunnefilm-CIGS of met zichzelf: de optische eigenschappen kunnen per laagje worden gevarieerd zodat een stapeling van twee soorten perovskiet mogelijk is. Een perovskiet-silicium tandemcel heeft in het laboratorium al een rendement 29,5% gehaald (zie figuur). Perovskieten komen daarom prachtig op tijd om de trend van steeds toenemende rendementen te kunnen voortzetten, zelfs wanneer de huidige commerciële technologieën hun grens hebben bereikt.

3.2 VAN LABORATORIUM NAAR PRODUCTIE

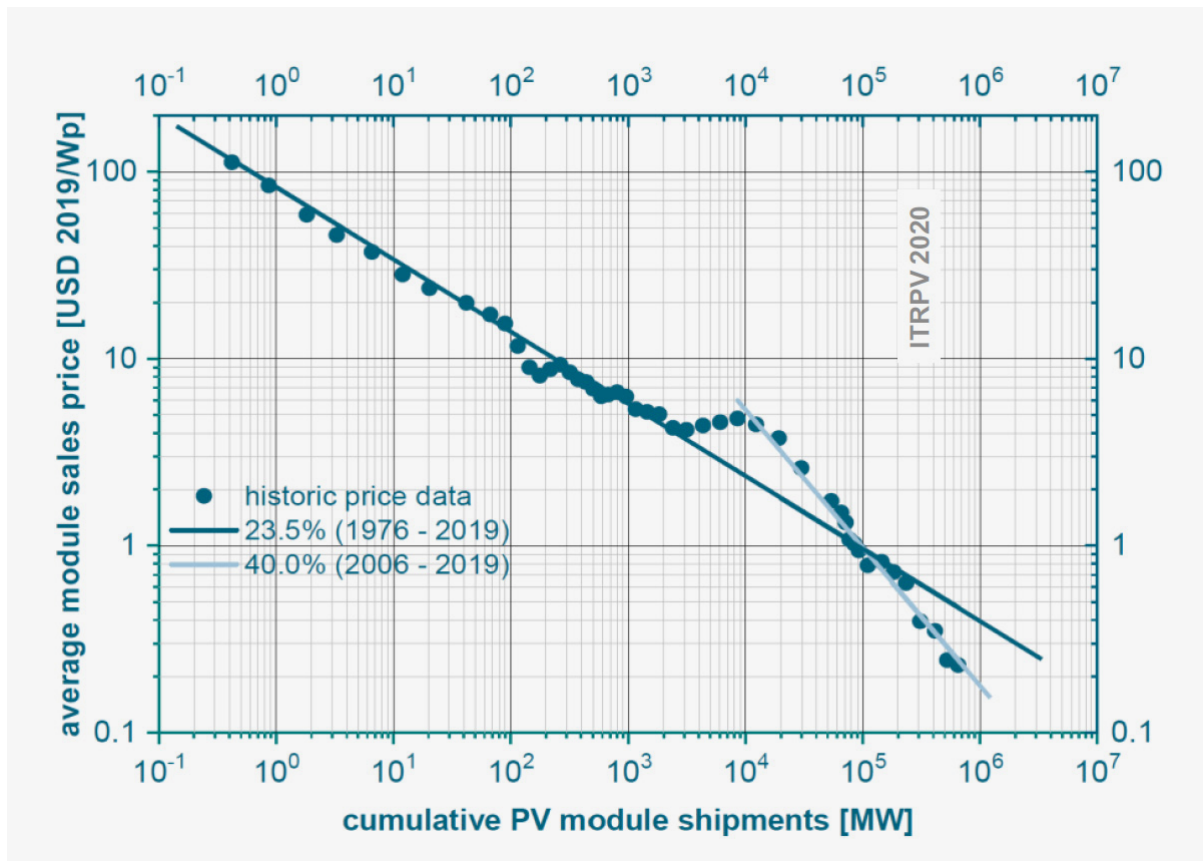
De record celrendementen in Figuur 2 zijn hoger dan de gemiddelde rendementen van vergelijkbare industrieel geproduceerde cellen en panelen met een groot oppervlak, voor materiaalsoorten waar die nu al beschikbaar zijn. Bij industriële panelen gaat het niet zozeer om het maximale rendement, maar om de optimale kosten/rendementsverhouding. De gebruikte materialen en processen moeten goedkoop en toch betrouwbaar zijn, de productiesnelheid hoog en het zonnecel- en paneelontwerp zo eenvoudig mogelijk.

De rendementontwikkeling van commerciële zonnepanelen is weergegeven in Figuur 3. Silicium heeft momenteel een marktaandeel van 95%, de verschillende dunne films zorgen voor de resterende 5%. Hoewel de absolute rendementen lager zijn dan die in Figuur 2, is dezelfde trend van een geleidelijke, maar robuuste stijging duidelijk zichtbaar. De figuur laat ook zien hoe tandems, en met name hybride tandems waarin silicium wordt gecombineerd met perovskiet, het mogelijk kunnen maken om de trend van toenemende rendementen nog lange tijd voort te zetten.



FIGUUR 3. ONTWIKKELING VAN HET RENDEMENT VAN INDUSTRIEEL VERVAARDIGDE ZONNEPANELEN.

3.3 TECHNOLOGIE-EVOLUTIE EN -REVOLUTIE



FIGUUR 4. LEERCURVE VAN SILICIUM ZONNEPANELEN: HET GECOMBINEERDE EFFECT VAN VOLUME EN INNOVATIE OP DE VERKOOPPRIJS¹¹.

Velen hebben zich afgevraagd waarom het marktaandeel van dunnefilmtechnologieën na bijna een halve eeuw ontwikkeling nog niet groter is dan 5%. Dat is natuurlijk ook een vraag die TNO zichzelf heeft gesteld en die van groot belang is bij het bepalen van de onderzoeksprioriteiten¹⁰. De oorspronkelijke drijfveer voor de wereldwijde ontwikkeling van dunnefilmtechnologieën was om een goedkoper alternatief voor silicium beschikbaar te maken. Wat we in de afgelopen decennia hebben geleerd is dat dunnefilmpanelen niet automatisch goedkoop zijn en dat siliciumpanelen niet inherent duur zijn. Door een combinatie van enorme opschaling en verbetering van processen in de totale productieketen van siliciummateriaal tot en met panelen en door prachtige technologische innovaties zijn de kosten van siliciumpanelen dramatisch gedaald. De daling is sneller en verder gegaan dan men lang voor mogelijk heeft gehouden en het einde is nog niet bereikt. Dat wordt het beste zichtbaar in de beroemde 'leercurve' van siliciumpanelen, die het verband tussen verkoopprijzen en het totale cumulatief geproduceerde volume weergeeft: het gecombineerde effect van schaal en innovatie, zie Figuur 4¹¹. Voor elke verdubbeling van het totaal geproduceerde volume aan panelen uitgedrukt in watt-piek (Wp) zijn de prijzen gedaald met meer dan 20% en de laatste 15 jaar zelfs met 40%. Dat laatste wordt deels verklaard door het feit dat niet

10. Development of photovoltaic technologies for global impact, Wim C. Sinke, Renewable Energy 138 (2019) 911-914, zie: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148119301740>

11. International Technology Roadmap for Photovoltaics (ITRPV, 2020), zie Photovoltaic Roadmap (ITRPV): Eleventh Edition Online - VDMA.

alleen de mondiale schaal van productie sterk is toegenomen, maar ook de hele waardeketen van basismateriaal tot en met paneel steeds efficiënter is georganiseerd. Sommige bedrijven zijn zelfs volledig ‘verticaal geïntegreerd’: ze omvatten zelf de hele waardeketen. Ook dunnefilmpanelen hebben een leercurve¹². Die laat zien dat het schaaleffect sterker is dan bij silicium (en met de introductie van nieuwe, snelle productiemethoden misschien nog sterker kan worden), maar omdat de cumulatieve productie nog aanzienlijk kleiner is ligt het prijsniveau nog hoger.

Bij de ontwikkeling en marktgroei van dunnefilm-zonne-energie wordt nu de nadruk gelegd op de toegevoegde waarde en—althans initieel—minder op prijsconcurrentie. Dunnefilm-zonne-energie heeft immers een paar troeven in handen, met name met de komst van perovskieten. Zo bieden dunne films de unieke mogelijkheid om flexibele zonnefolies te maken. Ook de mogelijkheid om lichtdoorlatende panelen te maken door middel van microscopisch kleine gaatjes of strepen in de dunne film aan te brengen, of op termijn misschien door de dunne film zelf (neutraal) lichtdoorlatend te maken, spreekt tot de verbeelding en geeft vele nieuwe toepassingen. Een derde troef is om niet te concurreren met silicium, maar er samen mee op te trekken in een tandem. Door siliciumtechnologie letterlijk en figuurlijk als solide basis voor een nieuwe generatie zonne-energie met zeer hoog rendement te gebruiken.

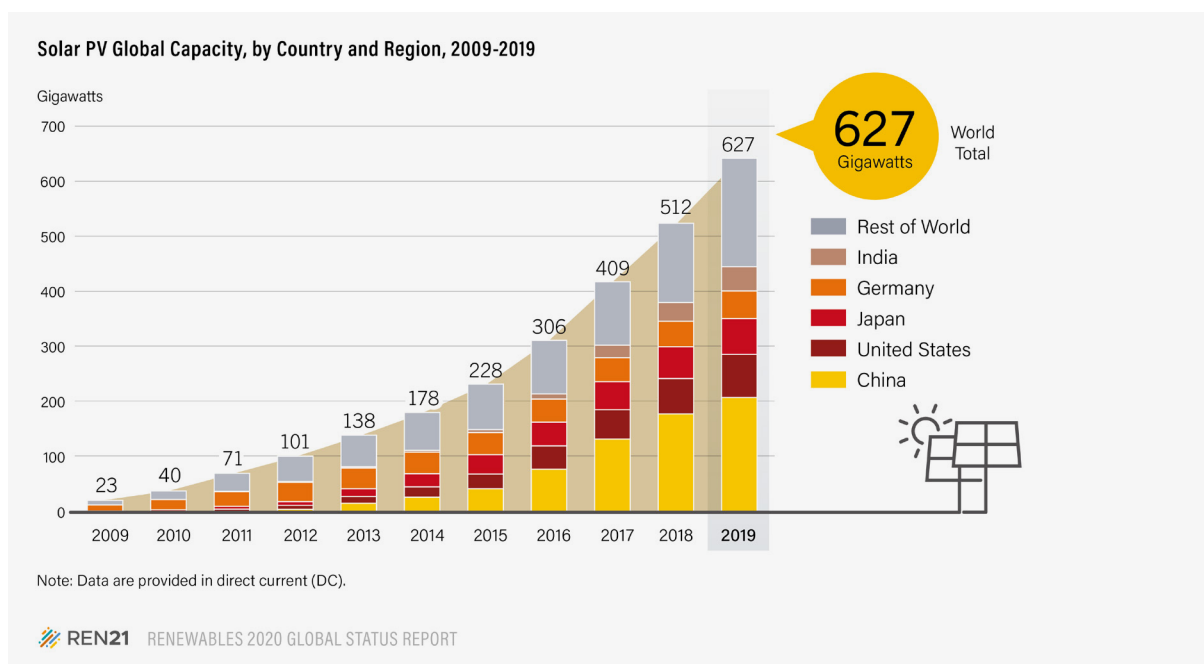
12. Photovoltaics Report, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (2020), zie [Photovoltaics Report \(fraunhofer.de\)](https://www.fraunhofer.de).

4 WAT IS NODIG VOOR IMPACT MET ZONNE-ENERGIE?

4.1 OVER TERAWATTS EN VIERKANTE KILOMETERS

De ambitie van TNO en alle andere partijen die betrokken zijn bij de ontwikkeling en toepassing van zonnestroom is om verschil te maken, om impact te hebben.

Tegenwoordig wordt 'impact' vooral gemeten aan de bijdragen aan het verminderen van CO₂-emissies en van klimaatverandering en in iets mindere mate aan het verkleinen van de afhankelijkheid van energie-importen. Als eerder opgemerkt verschillen energiescenario's sterk wat betreft de getallen voor de verschillende energieopties, daarom kiezen we er een ter illustratie: het '100% hernieuwbare-energiescenario' van de LUT-onderzoeksgroep in Finland⁵.



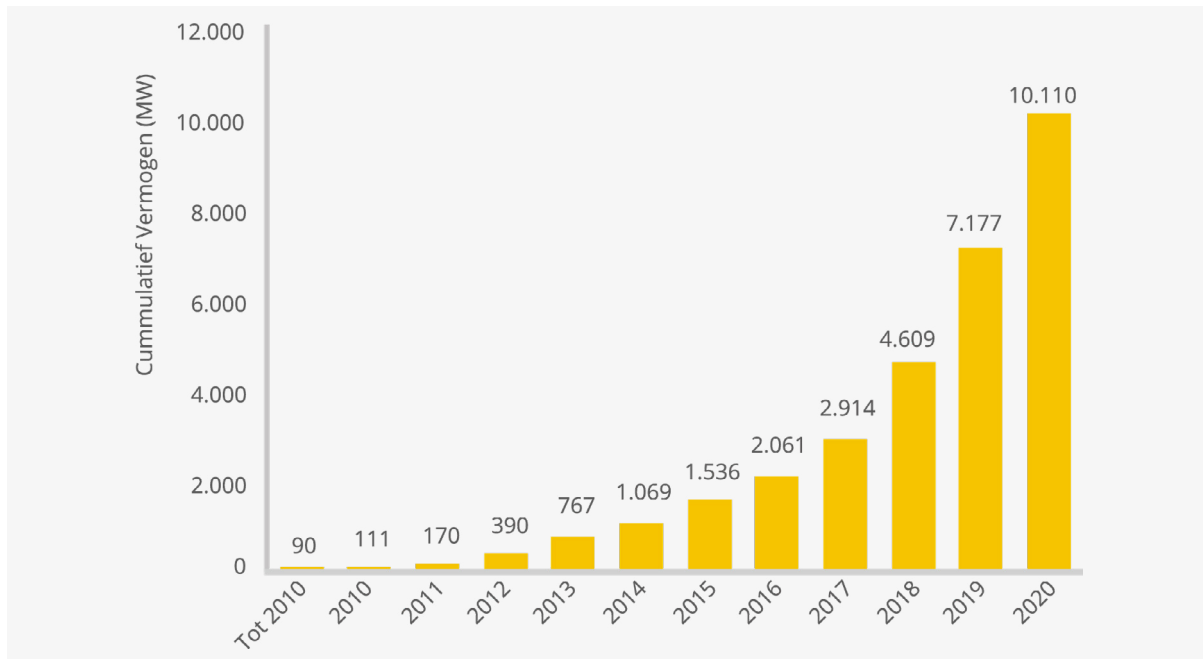
FIGUUR 5. GROEI VAN HET MONDIAAL OPGESTELDE VERMOGEN AAN ZONNESTROOMSYSTEMEN¹³.

Onder de aannames en randvoorwaarden van dat scenario staat in 2050 wereldwijd ruim 60 terawatt-piek (TWp) ofwel 60.000 gigawatt-piek (GWp) aan zonnestroomvermogen opgesteld. Dat zijn ongeveer 180 miljard standaard siliciumpanelen van vandaag de dag en is bijna 100x zoveel als de ruim 600 GWp die er eind 2019 stond (en waarmee zo'n 4% van de huidige mondiale elektriciteitsvraag werd gedekt), zie Figuur 5¹³. Andere scenario's komen op andere waarden, ruwweg tussen 10 en 70 TWp. Het gemiddelde van de scenario's ligt op bijna 30 TWp¹⁴. Deze sterke groei is een weerspiegeling van de twee eerdergenoemde ontwikkelingen: het toenemende aandeel van zonne-energie in de mondiale elektriciteitsopwekking én het toenemende aandeel van elektriciteit in de totale energiemix door elektrificatie in alle

13. Renewables 2020: Global Status Report, REN21 (2020), zie <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>.

14. Impact of weighted average cost of capital, capital expenditure, and other parameters on future utility-scale PV levelised cost of electricity, Eero Vartiainen, Gaëtan Masson, Christian Breyer, David Moser, and Eduardo Román M, Progress in Photovoltaics (2019) en de referenties daarin voor de geanalyseerde scenario's zie <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/pip.3189>.

sectoren. Uitgaande van een gemiddeld paneelrendement van 20 tot 30% over de looptijd van de groei komt 60 TWp overeen met 200.000 tot 300.000 km² aan paneeloppervlak en ruwweg het dubbele aan systeemoppervlak, afgerond een half miljoen km². Natuurlijk is een groei met een factor 50 tot 100 tot het jaar 2050, ofwel gemiddeld 1 tot 2 TWp per jaar enorm, maar dat komt overeen met een jaarlijks groeipercentage van 14 tot 17% en is aanzienlijk lager dan de bijna 40% die in het afgelopen decennium is gerealiseerd. Daar komt bij dat geavanceerde, ultrasnelle productiemethoden naar verwachting minstens 10 GWp per lijn zullen leveren, zodat 100 tot 200 lijnen verdeeld over de hele wereld genoeg panelen en folies zullen kunnen produceren. Productietechnisch lijkt deze groei dus zeker mogelijk.



FIGUUR 6. GROEI VAN HET OPGESTELDE VERMOGEN AAN ZONNESTROOMSYSTEMEN IN NEDERLAND¹⁷.

Ook voor Nederland zijn scenario's en ambities ontwikkeld voor de toepassing van zonne-energie. In recente TNO-scenario's¹⁵ staat in 2050 iets minder dan 90 GWp opgesteld, in de Roadmap PV Systemen en Toepassingen¹⁶ wordt een ambitie van 200 GWp beschreven. Eind 2020 stond in Nederland 10 GWp aan zon-pv opgesteld¹⁷, goed voor ongeveer 7% van de huidige totale elektriciteitsproductie, dus de mogelijke groei tot 2050 is een factor 10 tot 20. Dat is minder dan de gemiddelde mondiale groei, maar in overeenstemming met het beeld dat zonne-energie mondiaal de grootste bijdrage kan gaan leveren terwijl in onze streken (offshore) windenergie de grootste bijdrage levert, met zonne-energie als goede tweede. Het totaal benodigde oppervlak in 2050 zou bij 20–30% gemiddeld rendement 300 tot 1000 km² bedragen. Als een aanzienlijk deel van dit oppervlak in de vorm van geïntegreerde systemen kan worden gerealiseerd, wordt optimaal gebruikt gemaakt van de in ons land beschikbare ruimte.

15. Scenario's voor klimaatneutraal energiesysteem; slimme combinaties van energie-opties leiden tot duurzame en betaalbare energiehuishouding, TNO (2020), zie <https://www.tno.nl/nl/tno-insights/artikelen/energievoorziening-2050-twee-scenario-s-een-conclusie/>

16. Roadmap PV Systemen en Toepassingen, SEAC, ECN part of TNO, Universiteit Utrecht en TKI Urban Energy (2017), zie <https://zonopwater.nl/nieuws/i36/roadmap-pv-systemen-en-toepassingen>.

17. Nationaal Solar Trendrapport, Solar Solutions International (2021), zie <https://www.solarsolutions.nl/trendrapport/>.

4.2 VOORWAARDEN VOOR GROOTSCHALIGHEID

Voldoende productiecapaciteit van panelen en folies is natuurlijk maar een van de voorwaarden waaraan voldaan moet worden voor grootschalige toepassing van zonne-energie en misschien niet de meest uitdagende. Andere factoren zijn: zijn de kosten laag genoeg (niet alleen de kosten van opwekking, maar van het hele plaatje, inclusief transport, opslag en conversie in warmte en brandstoffen, waar van toepassing), zijn er voldoende grondstoffen, hebben we genoeg oppervlak, kunnen we de milieueffecten goed beheersen, is er politiek en publiek draagvlak, etc.

4.2.1 Energiesysteemintegratie

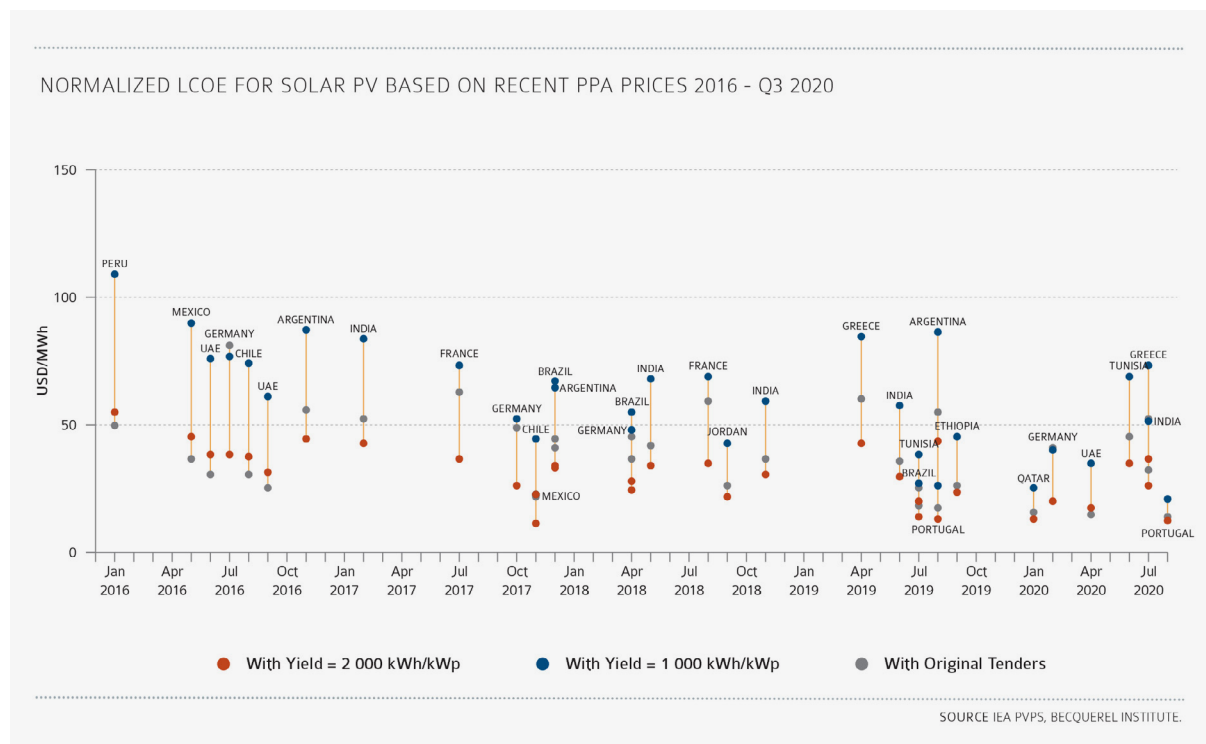
Het opwekken van grote hoeveelheden hernieuwbare elektriciteit is essentieel om ons energieverbruik te kunnen verduurzamen, maar niet voldoende. De opgewekte elektriciteit moet ook worden *geïntegreerd* in het energiesysteem, zodat zonne-energie samen met alle andere bouwstenen een schoon, betaalbaar, betrouwbaar en veilig totaal kan vormen. Opwekking, transport, opslag, omzetting in andere energiedragers en eindverbruik moeten op elk moment op elkaar worden afgestemd en dat is een complexe puzzel die in samenhang tussen lokaal, regionaal, nationaal en internationaal niveau moet worden opgelost, rekening houdend met technische, economische en maatschappelijk factoren en randvoorwaarden. Omdat er niet één oplossing is, maar meerdere of zelfs vele, wezenlijk van elkaar verschillende oplossingen is systeemintegratie ook een zoektocht en een verkenning.

Systeemintegratie van zonne-energie vraagt een combinatie van maatregelen in en bij de systemen zelf en maatregelen die op andere plaatsen en niveaus in het energiesysteem worden genomen, meestal met een bredere functie. Een sleutelbegrip bij systeemintegratie is 'flexibiliteit', waarmee onder meer wordt bedoeld op de mogelijkheid om vraag en/of aanbod te kunnen regelen of sturen. Voor zonne-energie kan dit betekenen dat het vermogen dat een systeem levert en dat normaal gesproken het zonaanbod volgt kan worden 'teruggedraaid', of dat de elektriciteit eerst wordt opgeslagen en pas wordt geleverd als er vraag is, respectievelijk als de waarde het hoogst is. Opslag kan plaatsvinden op het niveau van de panelen of het systeem of elders, denk aan de accu van de elektrische auto voor de deur. Omzetting van zonnestroom in warmte, al dan niet met (seizoens)opslag, of in een brandstof zijn andere mogelijkheden om flexibiliteit en waarde te creëren. In alle gevallen spelen geavanceerde regelingen en 'intelligentie' een essentiële rol, waarbij bijvoorbeeld meteorologische data en gegevens over (verwachte) patronen van opwekking en verbruik kunnen worden benut.

Systeemintegratie van zonne-energie vraagt lage opwekkosten. Opslag, conversie en regeling brengen immers extra kosten met zich mee en de waarde van de zonnestroom in het energiesysteem moet opwegen tegen de totale kosten van opwekking en integratie. Daarom is nog verdere kostenverlaging nodig.

4.2.2 Verdere kostenverlaging

Elektriciteit uit zonne-energie is de laatste jaren enorm in kosten gedaald en kan in steeds meer landen en marktsegmenten concurreren met andere vormen van opwekking. Opwekking met grote systemen in zonnige landen kan resulteren in de laagste kosten (Levelised Cost of Electricity, ofwel LCoE¹⁸): 0,02 tot 0,03 euro/kWh in Zuid-Europa). Kleine(re) systemen in gematigde streken leveren zonnestroom voor 0,04 tot 0,08 euro/kWh¹⁹. Daarmee is zonne-energie in grote delen van de wereld nu al de goedkoopste optie voor opwekking van elektriciteit. Dat is natuurlijk heel goed nieuws, maar nog niet genoeg voor de multi-terawatt toepassing van zonne-energie in verschillende toepassingsvormen en in alle delen van de wereld die beide noodzakelijk zijn voor de gewenste impact. Gelukkig is er perspectief op verdere kostenverlaging, tot 1 eurocent per kWh voor grote systemen in zonnige gebieden²⁰ en 2 tot 3 cent per kWh voor kleine(re) systemen in gematigde streken²¹. Een recente studie laat zien dat zonnestroom dankzij de steeds lagere opwekkosten ook inclusief de extra kosten van opslag zal kunnen concurreren in de elektriciteitsmarkt¹⁴.



FIGUUR 7. ONTWIKKELING VAN OPWEKKOSTEN (LCOE) VAN GROTE ZONNESTROOMSYSTEMEN ZOALS AFGELEID UIT DE ORIGINELE PROJECTGEGEVENS EN NA HERBEREKENING NAAR EEN FICTIEVE OPBRENGST VAN 1000 KWH/KWP (RUWWEG DE NEDERLANDSE SITUATIE) EN 2000 KWH/KWP²².

18. LCoE is een standaardmethode om opwekkosten te berekenen waarin alle belangrijke kostenfactoren worden meegenomen: investeringskosten, onderhouds- en beheerskosten, etc. Belangrijke parameters zijn onder meer het rentepercentage en de afschrijvingstermijn, zie de referentie in noot 14 voor uitleg.

19. Factsheets about Photovoltaics: PV the cheapest electricity source almost everywhere, ETIP PV (2020), zie [Fact sheets about Photovoltaics - ETIP PV \(etip-pv.eu\)](https://www.etip-pv.eu).

20. <https://www.pv-magazine.com/2020/05/19/sunny-regions-could-see-one-cent-solar-within-a-decade/>

21. Hernieuwbare elektriciteitsopwekking op land en de gebouwde omgeving (MMIP 2), TKI Urban Energy (2019), zie https://www.topsectorenergie.nl/sites/default/files/uploads/MMIP/MMIP_2_-_Hernieuwbare_elektriciteitsopwekking_op_land_en_de_gebouwde_omgeving.pdf

22. Trends in Photovoltaic Applications 2020, IEA PVPS (2020), zie https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/11/IEA_PVPS_Trends_Report_2020-1.pdf.

Met dergelijke lage opwekkosten ontstaat de noodzakelijke ruimte om te investeren in aanvullende maatregelen die nodig zijn voor een betere integratie in het energiesysteem (in het bijzonder opslag en omzetting in andere energiedragers) en kunnen zonodig extra kosten worden gemaakt om zonne-energie aantrekkelijk te integreren in gebouwen en andere objecten of om zonnestroomsystemen te optimaliseren voor meervoudig ruimtegebruik. Zulke lage opwekkosten maken ook de weg vrij voor grootschalige productie van waterstof en daarvan afgeleide brand- en grondstoffen in de ‘sunbelt’ van de wereld. Deze zonne-energie in gasvormige of vloeibare vorm kan over grote afstanden worden getransporteerd en overal worden gebruikt in aanvulling op de lokaal opgewekte hernieuwbare energie. Omdat de opwekkosten (LCoE) worden bepaald door verschillende factoren zijn er meerdere knoppen waaraan gedraaid moet worden om de opwekkosten verder te verlagen. Daarom richten onderzoekers en bedrijven zich op een aantal verschillende, maar grotendeels toch samenhangende onderdelen en aspecten. Een paar belangrijke zijn:

- Productiekosten van panelen en folies (in euro/Wp en euro/m²), met daarbinnen onder meer proceskosten en materiaalkosten;
- Energieopbrengst van panelen en systemen;
- Verhoging van de betrouwbaarheid en verlenging van de levensduur van panelen, folies en andere systeemcomponenten;
- Installatie- en integratiekosten.

Indirect spelen de schaal van productie en installatie, kwaliteitscontrole, overheadkosten en andere zaken een belangrijke rol. TNO benadrukt het belang van ultralage opwekkosten en draagt met zijn innovatieprogramma en internationale netwerk actief bij aan de realisering van deze mondiale ambitie.

4.2.3 Veiligheid

Lage kosten op zichzelf zijn niet voldoende voor het succes van zonne-energie. In de praktijk van grootschalige toepassing is veiligheid van systemen een belangrijke randvoorwaarde. Mensen moeten zich veilig voelen onder hun zonnedak en verzekeraars moeten bereid zijn om een verzekering af te sluiten voor een systeem op het dak van een huis, een kantoor of een bedrijfsgebouw. ‘Vertrouwen komt te voet en gaat te paard’, is een bekend spreekwoord en dat geldt ook voor zonne-energie. Brandincidenten hebben tot onrust in de markt geleid²³ en TNO heeft de mogelijke oorzaken in kaart gebracht, zodat de sector daarop maatregelen kon nemen. De incidenten laten eens te meer zien dat lage kosten belangrijk, maar op zichzelf onvoldoende zijn voor duurzame marktgroei. Kwaliteit, veiligheid en duurzaamheid zijn belangrijke randvoorwaarden voor blijvend succes.

Kwaliteit, veiligheid en duurzaamheid zijn belangrijke randvoorwaarden voor blijvend succes

23. Brandincidenten met fotovoltaïsche (PV) systemen in Nederland; een inventarisatie. TNO (2019), zie <https://www.tno.nl/nl/over-tno/nieuws/2019/4/tno-brengt-brandincidenten-met-zonnestroomsystemen-in-kaart/>.

4.2.4 Grondstoffen en circulariteit

Zonne-energie is van zichzelf hernieuwbaar, maar niet automatisch volledig duurzaam en circulair. Wanneer zonne-energie op zeer grote schaal gaat worden toegepast is het belangrijk om ervoor te zorgen dat er geen afvalberg ontstaat en dat de gebruikte materialen opnieuw kunnen worden gebruikt; bij voorkeur weer voor zonne-energie of een andere hoogwaardige toepassing. Met andere woorden: om materialen te recyclen. Weliswaar wordt het leeuwendeel van de zonnepanelen en andere componenten en materialen nu al hergebruikt²⁴ maar nog niet alles en voor een deel ook in producten van lagere waarde ('downcycling')²⁵. Zo kan nog niet alle zilver uit de zonnecelcontacten worden teruggewonnen en wordt het silicium van zonnecellen niet opnieuw voor zonnecellen gebruikt²⁶.

Daarnaast is het belangrijk om het gebruik van schaarse of schadelijke materialen te minimaliseren en liefst helemaal te vermijden. Silicium, het materiaal waarvan tot nu toe verreweg de meeste zonnecellen zijn gemaakt, is een van de meest voorkomende elementen op aarde en levert dus geen beperkingen op. Dat geldt niet voor enkele elementen die in andere soorten zonnecellen nodig zijn, zoals indium.

Behalve materialen is er ook energie nodig om zonnestroomsystemen te produceren en te installeren. Die energie moet worden 'terugverdiend' voordat een systeem netto hernieuwbare energie kan gaan leveren. De 'energieterugverdientijd' moet liefst zo kort mogelijk zijn en het 'energiierendement op investering' (energy return on energy investment) zo hoog mogelijk. Op dit moment is de energierterugverdientijd van complete systemen in ons klimaat enkele jaren op een levensduur van 25 tot 30 jaar²⁷. Het is de verwachting dat de energierterugverdientijd de komende tijd naar minder dan 1 jaar of zelfs naar een half jaar zal worden verkort door verbetering van bestaande technologieën en door de introductie van nieuwe technologieën zoals zonnefolies. Met het toenemen van het aandeel hernieuwbare energie in de totale energiemix wordt het aandeel in productie van zonne-energie automatisch ook groter.

Waar de zonne-energiesector zich decennialang en met veel succes sterk op kostenverlaging en prestatieverhoging heeft gericht, levert de noodzaak van duurzaamheid nu een belangrijke en uitdagende aanvullende innovatieopgave. Een opgave die moet worden aangepakt in samenhang met, en met behoud van de verworvenheden lage kosten, hoog rendement en lange levensduur.

24. Zie <http://www.pvcycle.org/netherlands/> en <https://www.stichtingzrn.nl/nl>.

25. Integrale Circulaire Economie Rapportage 2021, PBL (2021), zie <https://www.pbl.nl/publicaties/integrale-circulaire-economie-rapportage-2021> Zie Research and development priorities for silicon photovoltaic module recycling to support a circular economy | Nature Energy

26. Zie Research and development priorities for silicon photovoltaic module recycling to support a circular economy | Nature Energy

27. PV Quality and Economy, ETIP PV (2018), zie hoofdstuk 1.2 in <https://etip-pv.eu/publications/etip-pv-publications/download/pv-quality-and-economy-september-2018>

Het is niet eenvoudig om de materiaaleigenschappen die nodig zijn voor een hoog rendement en een lange levensduur te realiseren en tegelijkertijd te voldoen aan grootschalige beschikbaarheid ('earth abundance'), milieuvriendelijkheid en andere wensen op ons lijstje. In de afgelopen decennia lag de nadruk in de ontwikkeling van zonne-energie om begrijpelijke redenen op het bereiken van een prestatieniveau dat nodig zijn om zonnestroom überhaupt commercieel te kunnen toepassen, met kosten, levensduur en rendement als belangrijkste. Nu op die gebieden enorme vooruitgang is geboekt en zonne-energie een solide reputatie heeft opgebouwd met een bewezen lange levensduur en een continu stijgend marktaandeel, is het belangrijk om terug naar de tekentafel te gaan en zonne-energie op onderdelen te (her)ontwerpen voor duurzaamheid en circulariteit.

4.2.5 Ruimte, integratie en functiecombinatie

Voor grootschalig opwekken van zonne-energie is ruimte nodig. De energietransitie is daarom ook een ruimtelijke uitdaging. En dat in een tijd dat er ook voor geplande natuurontwikkeling, voor de transitie naar extensievere kringlooplandbouw en voor woningbouw grote aanspraken worden gemaakt op de beperkte beschikbare ruimte. Bijna iedere vierkante meter in Nederland is in gebruik en dat maakt dat we heel zorgvuldig met onze ruimte moeten omgaan. Dit is de reden dat de meerderheid van de politieke partijen nu pleit voor een sterkere centrale regie (vanuit het rijk) op onze langetermijn ruimtelijke planning. Het is belangrijk dat de ruimtelijke aspecten van de energietransitie in die regie stevig verankerd zijn^{28,29,30}.



ZONNECELLEN IN HET WEGDEK (SOLAROAD).

Het verduurzamen van onze energievoorziening is ontzettend belangrijk, maar niet het

28. De energietransitie: een nieuwe dimensie in ons landschap, ECN en WUR (2017), zie <https://edepot.wur.nl/419840>

29. Zie bijvoorbeeld 'Nationale Omgevingsvisie: duurzaam perspectief voor onze leefomgeving' (2020), en vele andere documenten over dit onderwerp.

30. De toekomst van Nederland; de kunst van richting te veranderen, Floris Alkemade, Rijksbouwmeester (2020)

enige om rekening mee te houden. Juist daarom echter is zonne-energie een aantrekkelijke hernieuwbare energieoptie, ook voor Nederland. Zonne-energie is bij uitstek geschikt om te integreren en te combineren, zodat ruimte dubbel of meervoudig kan worden gebruikt. De huidige systemen zijn meestal 'toegevoegd' aan een gebouw of vervangen een andere functionaliteit, in plaats van geïntegreerd of gecombineerd met een ander gebruik. Denk aan zonnepanelen bovenop het dak van een huis of een akker waar zonnestroom wordt geoogst in plaats van aardappelen. Dat is de 'prijs die we betalen' voor de overigens zeer succesvolle 'one size fits all' benadering die er mede voor heeft gezorgd dat zonne-energie zo goedkoop is geworden. Nu zonne-energie zo sterk in kosten is gedaald, kunnen en moeten we ons echter permitteren om rekening te houden met andere belangrijke maatschappelijke wensen. Dat betekent dat we systemen optimaal moeten gaan toepassen en de mogelijkheden die de technologie biedt moeten gaan gebruiken. Zonne-energiesystemen geïntegreerd in daken, gevels, wegen en vele andere objecten. Zonne-energie gecombineerd met natuurbeheer, landbouw, waterbeheer en vele andere functies. De mogelijkheden zijn eindeloos. De uitdaging is daarbij om per toepassing en situatie maatwerk te leveren zonder dat de kosten onaanvaardbaar hoog worden, zoals nu vaak het geval is. De oplossing voor dat dilemma ligt in een aanpak die we 'mass customization' hebben genoemd. Het komt erop neer dat de voordelen van massaproductie en -installatie worden gecombineerd met flexibiliteit en maatwerk in toepassing. Het maakt de weg vrij naar industrieel geautomatiseerd, snel en veilig integreren van zonne-energie in bijvoorbeeld bouwelementen en biedt ongekennde kansen voor de Europese industrie. Daarover meer in het volgende hoofdstuk.

Zonne-energie is bij uitstek geschikt om te integreren en te combineren, zodat ruimte dubbel of meervoudig kan worden gebruikt

› 5 WAAR WERKEN TNO EN PARTNERS AAN?

5.1 KIEZEN OM VERSCHIL TE MAKEN

Zoals blijkt uit de voorgaande hoofdstukken zijn er enorm veel kansen en uitdagingen rondom zonne-energie. Nederland speelt al lange tijd een actieve en internationaal gewaardeerde rol op het gebied van zonne-energie³¹. ECN startte in 1989 met onderzoek aan zonne-energiesystemen en kort daarna met onderzoek aan zonnecellen en -panelen. Bij TNO wordt sinds het begin van deze eeuw zonne-energieonderzoek gedaan en werkte daarbij nauw samen met ECN. Na de samenvoeging van het onderzoek van ECN en TNO in 2018 wordt het totale zonne-energieonderzoek uitgevoerd binnen de TNO Roadmap Zonne-energie, met als motto ‘Naar een overvloed aan zonnestroom’.

Binnen de Roadmap worden de onderzoeksprioriteiten bepaald met als belangrijke criteria:

1. Impact op de energietransitie, met name in het kader van het Nationale Klimaatakkoord met daarboven Europese en mondiale doelstellingen. Hier komen hoge ambitie en sterke urgentie samen: de doelstellingen voor emissiereductie in Europees verband zijn recent nog verder zijn aangescherpt van 49% naar 55% in 2030;
2. Bijdrage aan de economie, door samenwerking met en ondersteuning van het innovatieve bedrijfsleven op het gebied van zonne-energietechnologie en -toepassingen.

Met de komst van het Klimaatakkoord en de introductie van de missiegedreven onderzoekprogramma's (zie ook de paragraaf 'Parijs en het Nederlandse Klimaatakkoord') is ook het TNO-onderzoek missiegedreven ingericht, dat wil zeggen dat de maatschappelijke uitdaging om een klimaatneutraal energiesysteem te realiseren als uitgangspunt wordt genomen en wordt 'terugvertaald' naar onderzoeksvragen. Omdat impact op de energietransitie wordt bereikt door snelle en grootschalige toepassing van zonne-energie is ontwikkeling van nieuwe en verbeterde toepassingen een belangrijk overkoepelend thema (programma) in de Roadmap Zonne-energie. TNO hanteert voor zijn programma een hoge ambitie: het mogelijk maken van een groei van de bijdrage van zonne-energie met een factor vijf tot 2030 (van 10 GWp in 2020 naar 50 GWp) en een factor twintig tot 2050 (naar 200 GWp). Betaalbaarheid, maatschappelijk draagvlak, integratie, functiecombinatie, veiligheid, circulariteit, ecologie en biodiversiteit en inpassing in het energiesysteem staan daarbij centraal. Om ontwikkeling en gebruik van deze nieuwe toepassingsvormen te versnellen heeft TNO een actieve rol gespeeld bij de totstandkoming van Nationale Consortia, waarin tientallen publieke en private partijen samenwerken³², waaronder overheden, bedrijven, universiteiten, hogescholen en branche-, natuur- en milieuorganisaties.

31. Zie <https://docplayer.net/4582865-Fifty-years-of-solar-pv-in-the-netherlands-erik-lysen-utrecht-centre-for-energy-research-uce.html>

32. Zie <https://zoninlandschap.nl/home>, <https://zonopwater.nl/home>, <https://zonopinfra.nl/home> en <https://www.bipvnederland.nl/>



Het TNO-programma omvat alle belangrijke toepassingsvormen voor Nederland, alsmede ‘mass customization’. Het tweede overkoepelende thema is ‘zonne-energie-technologieën’, waarbij die technologieën worden ontwikkeld om innovaties op het gebied van zonne-energiesystemen, toepassingen en integratie in de leefomgeving mogelijk te maken, met maximale elektriciteitsopbrengst en minimale kosten en milieubelasting. TNO focusteert zich wat betreft de zonnecelmaterialen en de bijbehorende celfabricageprocessen op silicium en perovskieten en hun combinaties in tandems. Op gebied van technologieën wordt nauw samengewerkt met nationale en internationale kennisinstellingen, fabrikanten van cellen en panelen, apparaatbouwers en toeleveranciers van materialen.

5.2 INTEGRATIE EN TOEPASSINGEN

5.2.1 Geavanceerde zonneparken

Zonne-energie op akkers, weilanden of andere terreinen in het buitengebied; het is een schrikbeeld voor veel mensen. Tegelijkertijd is het de goedkoopste vorm van zonnestroom en ligt daar een groot potentieel. Het is ook een marktsegment waar relatief snel grote stappen kunnen worden gezet. Om de klimaatdoelen voor 2030 en 2050 te halen is snelheid heel belangrijk en daarom kunnen we ons niet permitteren om belangrijke mogelijkheden vooraf helemaal af te schrijven. TNO is zich bewust van deze dilemma's en begrijpt de bezwaren en zorgen. Op sommige locaties kunnen we beter helemaal geen zonne-energie installeren, bijvoorbeeld in kwetsbare natuurgebieden of plaatsen met grote landschappelijke of cultuurhistorische waarde. Op andere plaatsen is zorgvuldigheid altijd geboden, maar is er over het algemeen veel meer mogelijk dan men misschien denkt of dan er in eerste instantie wordt voorgesteld. Soms is een standaard zonnepark een prima oplossing, maar meestal moeten verschillende belangen en waarden worden afgewogen. TNO werkt daarom met zijn partners aan geavanceerde toepassingen, waarbij landschappelijke inpassing, combinaties met land- en tuinbouw, ecologisch landbeheer en circulariteit centraal staan. Technologische innovaties geven hier nieuwe mogelijkheden. Een sprekend voorbeeld zijn tweezijdig werkende panelen in een verticale opstelling, waardoor tussen de panelen bijvoorbeeld gewasteelt mogelijk is. Bovendien is de elektriciteitsopbrengst daarbij vrijwel onafhankelijk van de oriëntatie (oost-west, noord-zuid en alles daartussen).



MULTIFUNCTIONEEL ZONNEPARK DE KWEKERIJ (HENGELO, GLD.).

Een positieve business case is een belangrijke randvoorwaarde, want anders wordt er niet geïnvesteerd en komt er helemaal geen zonne-energie. Het is daarom belangrijk dat niet-financiële waarden (zoals landschappelijke inpassing, circulariteit en ecologie) in de businesscase terechtkomen. Dat kan bijvoorbeeld via finetuning van stimuleringsregelingen en vergunningsvoorwaarden. Ook is het noodzakelijk om de integratie in het energiesysteem in de plannen mee te nemen, want een opgewekte kilowattuur die niemand kan gebruiken heeft geen waarde. Elektriciteit kan direct in het net worden gevoed, maar het park- en systeemontwerp bepalen bijvoorbeeld hoe het leveringsprofiel over de dag er precies uitziet. Door zonne-energie te combineren met windenergie kan de beschikbare netcapaciteit beter worden benut. Indien gewenst kan er ook elektriciteitsopslag in de vorm van batterijen worden toegevoegd of op termijn zelfs omzetting in waterstof of een andere brandstof. Voor grootschalige toepassing uiteraard weer onder de voorwaarde van een positieve business case.

Het onderzoekthema ‘Geavanceerde zonneparken’ gaat daarom over integratie van zonne-energie in de brede zin van het woord: landschappelijk, ecologisch, economisch en ook als onderdeel van het energiesysteem en de circulariteitsketen

5.2.2 Zonne-energie in de infrastructuur

In het dichtbevolkte en hoogontwikkelde Nederland is een groot oppervlak in gebruik voor infrastructuur, dat wil zeggen: wegen, straten, fietspaden, bermen, parkeerplaatsen, spoorlijnen, dijken, enzovoorts. Alles bij elkaar gaat het om duizenden vierkante kilometers³³.



TWEEZIJDIG WERKENDE ZONNECELLEN IN EEN GELUIDSSCHERM (SOLAR HIGHWAYS) LANGS DE A50 BIJ UDEN.

Omdat die oppervlakken per definitie al in gebruik zijn (voor transport en mobiliteit, bescherming tegen het water en andere zaken) is de infrastructuur een plaats bij uitstek voor het gewenste meervoudige ruimtegebruik en functiecombinatie bij de toepassing van zonne-energie. Daarbij is het belangrijk te realiseren dat zonne-energie daar ‘te gast’ is, met andere woorden: de primaire functie is altijd leidend en de toevoeging en/of integratie van zonne-energie mag bijvoorbeeld nooit de veiligheid in gevaar brengen. Daarom richt TNO zich in dit programmaonderdeel met zijn partners op de ontwikkeling van nieuwe toepassingen die enerzijds een groot potentieel hebben en anderzijds de primaire functie van de betreffende infrastructuurobjecten volledig in tact laten en mogelijk zelfs nog versterken. Daarnaast wordt rekening gehouden met aspecten die ook bij andere toepassingen gelden, waaronder esthetiek, omgevingskwaliteit, ecologie en energiesysteemintegratie.

33. Ruimtelijk potentieel van zonnestroom in Nederland, TKI Urban Energy en Generation Energy (te publiceren in 2021).

5.2.3 Drijvende zonne-energiesystemen

Een van de eerste toepassingen van zonnestroom waarmee Nederland zich tientallen jaren geleden onderscheidde waren drijvende systemen in de vorm van lichtboeien met een zonnepaneel. Dat was een toepassing waar de toen nog erg dure zonnestroom een hoge toegevoegde waarde had. De lichtboei kon daarmee lange tijd vrijwel zonder onderhoud werken. Inmiddels is zonnestroom veel goedkoper geworden en komen drijvende systemen opnieuw in belangstelling. Nederlandse binnenwateren hebben een gezamenlijk oppervlak van ruim 5000 km², buitenwateren nog eens 3500 km² en het Nederlandse deel van de Noordzee (de zogenaamde exclusieve Nederlandse zone) is 58.000 km² groot³³.



DRIJVENDE ZONNE-ENERGIESYSTEMEN OP DE TESTLOCATIE OOSTVOORNSE MEER.

Wanneer zelfs maar een klein deel daarvan zou kunnen worden gebruikt voor de opwekking van zonnestroom met drijvende systemen zou dat een enorm extra oppervlak geven. Het toepassen van zonne-energie op water is echter een grote technologische, economische, ecologische en landschappelijke uitdaging.

Technologisch, omdat de systemen bestand moeten zijn tegen zware storm en soms zeer hoge golven, omdat zeker zout water erg corrosief is en omdat vervuiling door vogels een groot probleem kan zijn. Economisch, omdat de systemen tegen soms extreme omstandigheden moeten kunnen en toch goedkoop genoeg moeten zijn om een bijdrage te kunnen leveren aan de energietransitie. Daarbij helpt het dat de opbrengst van drijvende systemen kan worden verhoogd door ze de zon te laten volgen (met de zon te laten meedraaien). De ecologische uitdaging is onder meer om effecten op het waterleven en de waterkwaliteit van de onvermijdelijke schaduwwerking van drijvende systemen te beperken en zo mogelijk een positief effect te bereiken. De landschappelijke uitdaging is om de locatie van drijvende systemen zorgvuldig te kiezen en ze zoveel mogelijk te laten passen in de omgeving. TNO werkt met zijn partners aan al deze aspecten, waarbij toepassingen op binnen- en buitenwateren ook

waardevolle ervaring en kennis opleveren voor de zeer uitdagende echte offshore toepassingen, die we zien als 'high risk, high potential'. Inmiddels zijn in Nederland sinds 2016 de eerste ervaringen opgedaan met drijvende zonneparken, meestal nog relatief kleinschalig, op binnenwateren zoals zandwinningsplassen. In totaal gaat het anno 2020 om een kleine 50 MWp.

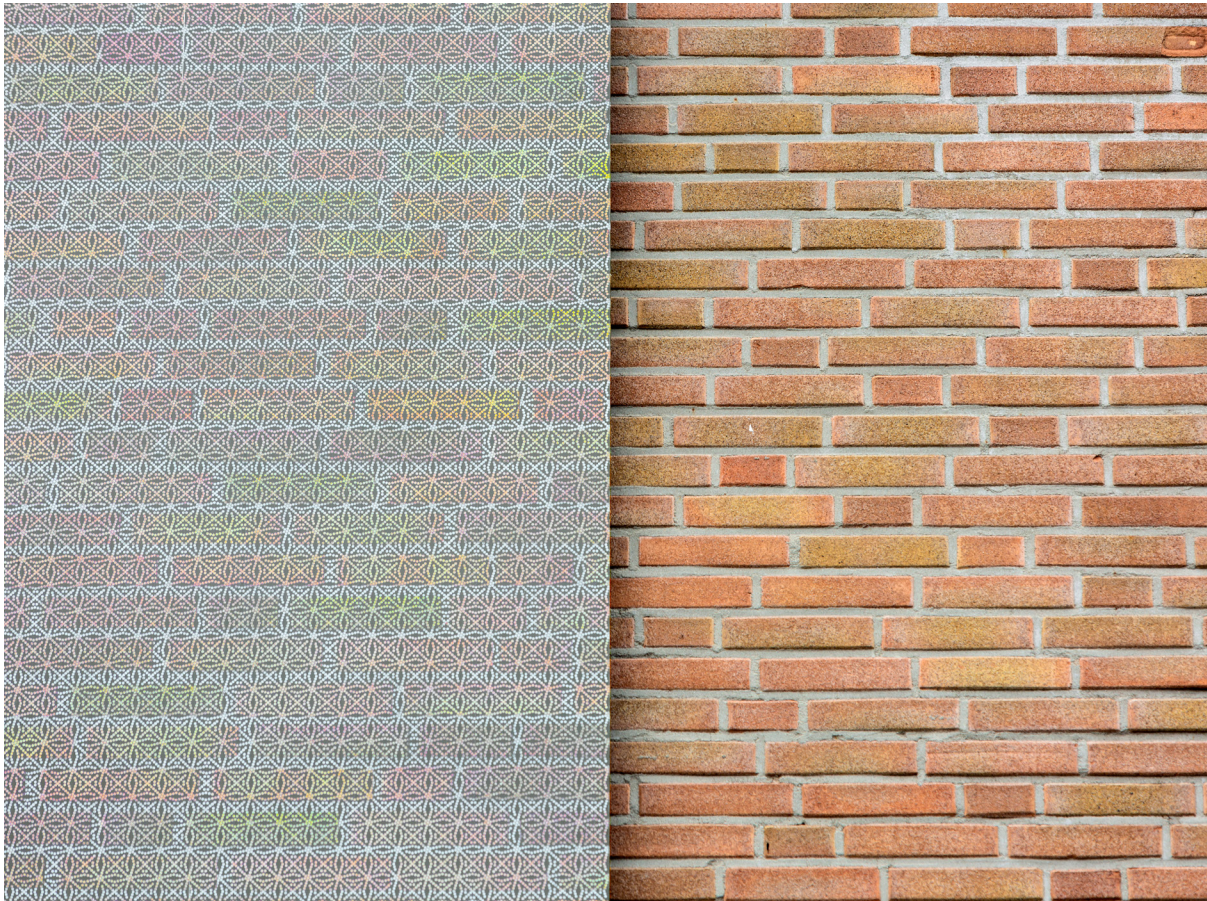
5.2.4 Zonne-energie in gebouwen

Gebouwen zijn de plaats bij uitstek voor de toepassing van zonne-energie: er is een groot oppervlak beschikbaar en opwekking en gebruik van elektriciteit kunnen daar bij elkaar komen. Het bruto oppervlak van daken en gevels wordt geschat op enkele duizenden vierkante kilometers³³. Het daarvan voor zonne-energie bruikbare deel is mede afhankelijk van de technische oplossingen die beschikbaar zijn en nog gaan komen.



DAKGËINTEGREERD ZONNE-ENERGIESYSTEEM (FOTO: EXASUN).

Vrijwel iedereen vindt dan ook dat we sterk moeten inzetten op gebouwen. TNO vindt dat ook en zonne-energie op en in gebouwen is daarom een belangrijk thema in het onderzoeksprogramma. Specifieke uitdagingen voor dit toepassingsgebied zijn het beperkte draagvermogen van veel grote daken en de esthetische, architectonische en bouwtechnische aspecten van de toepassing van zonne-energie op en in gebouwen. Gebouwen met een groot dakoppervlak zoals distributiecentra en agrarische bijgebouwen (schuren en stallen) zijn vaak niet ontworpen om het extra gewicht van een normaal zonne-energiesysteem te kunnen dragen. TNO werkt daarom samen met partners aan alternatieve lichtgewichtoplossingen. Daarin zijn glas en aluminium vervangen door kunststoffen. Deze oplossingen kunnen zowel als stijve modules als in de vorm van flexibele producten verder ontwikkeld worden. Een overkoepelende uitdaging is de maximalisering van de elektriciteitsopbrengst op het beschikbare oppervlak door toepassing van hoogrendement cellen en door uitgekiende paneelontwerpen om optimaal met gedeeltelijke beschaduwing om te gaan. Ook hier bieden innovaties in technologie nieuwe mogelijkheden, zoals achterzijdecontactontwerpen van cellen en panelen (zie het hoofdstuk ‘Zonne-energietechnologieën’) om een hoge opbrengst te combineren met flexibiliteit bij integratie.



DETAIL VAN EEN GEVELSYSTEEM MET DESIGN-PANELEN (FOTO: BAM EN SOLAR VISUALS).

Iedereen kent de toepassing waarbij zonnepanelen eenvoudig op het dak van een woning worden gemonteerd; een vorm van building-applied pv (bapv). Iets minder bekend zijn de toepassingen waarbij zonnepanelen of -folies in het dak of de gevel worden geïntegreerd: building-integrated pv (bipv).

Systemen op kantoren en bedrijfsgebouwen kunnen zowel op platte en hellende daken als in gevels worden toegepast. Soms zijn ze onzichtbaar, soms een duidelijk herkenbare en fraaie toevoeging aan het gebouw.

Hoewel zonne-energie op gebouwen een bestaande toepassing is, zijn er veel technologische en organisatorische uitdagingen om dit marktsegment tot volledige wasdom te brengen en een grote bijdragen te leveren aan de energietransitie. Juist in de gebouwde omgeving 'does one size not fit all'. Ieder gebouw is anders, er is een veelheid aan vormen en obstakels en de kunst is om niet alleen de nieuwbouw, maar ook de veel grotere bestaande bouw optimaal te bedienen. Vaak zien we maar een paar panelen op een veel groter dak, omdat het ontbreekt aan panelen in meerdere vormen en maten om het dakoppervlak beter te vullen of omdat de eigenaar niet meer wil opwekken dan het eigen verbruik. Daardoor blijft veel bruikbaar oppervlak onbenut en dat is zonde van de vierkante meters. Hoewel over smaak niet te twisten valt, zijn veel zonne-energiesystemen in de ogen van velen esthetisch niet optimaal (of zelfs lelijk). Door zonne-energie te integreren en keuze te geven in uitvoering en kleur en door complete en aantrekkelijke zonnestroomproducerende bouwelementen te ontwikkelen kan dat verbeteren. De kunst is om die keuze beschikbaar te maken tegen slechts geringe of helemaal geen meerkosten. Daarbij is het belangrijk om de systemen zeer brandveilig te houden. Dat vraagt hoogwaardige componenten en materialen, maar ook zorgvuldige en deskundige installatie.

5.2.5 Zonne-energie in mobiliteit en transport

Wie een tijdje geleden sprak over de mogelijke toepassing van zonnecellen in auto's voor dagelijks gebruik werd meestal niet serieus genomen. Zonnecellen zouden misschien een ventilator kunnen aandrijven om de auto koel te houden wanneer hij in de zon geparkeerd staat, maar geen significante bijdrage kunnen leveren aan de energie die nodig is om te rijden. Met de opkomst van superefficiënte elektrische auto's én zonnecellen is het beeld echter gekanteld.



ZONNECELLEN GEÏNTEGREERD IN DE CARROSSERIE VAN DE LIGHTYEAR ONE (FOTO: LIGHTYEAR).

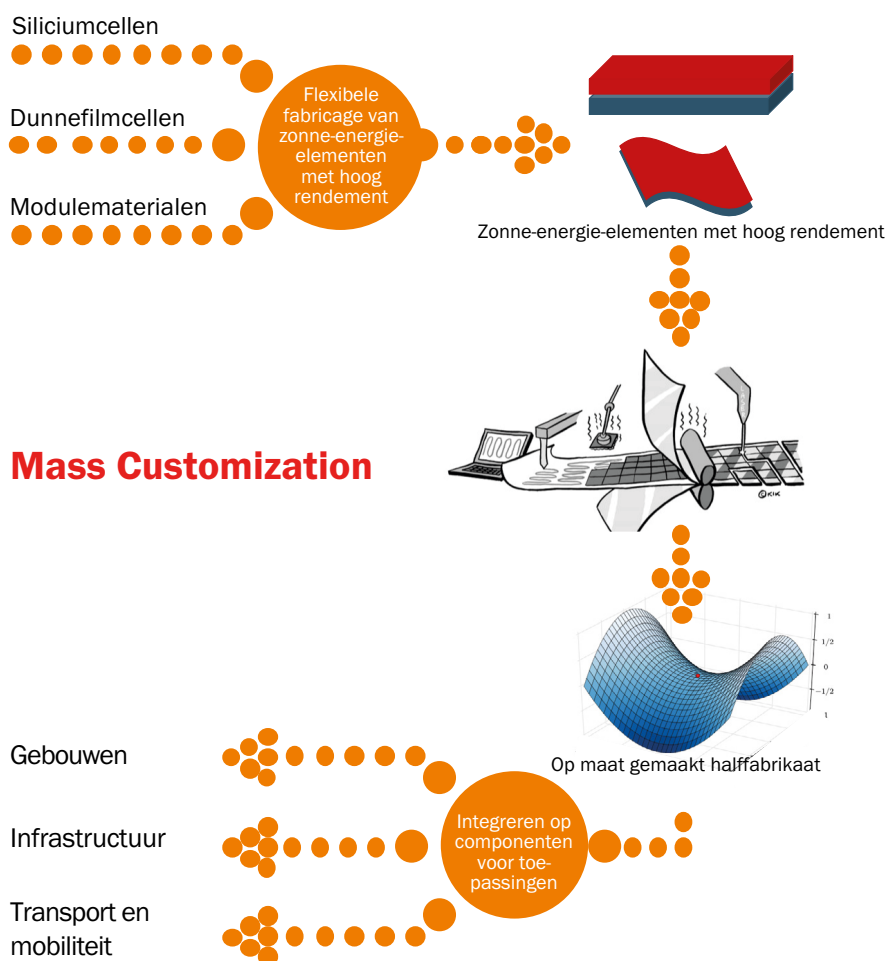
Zonnecellen geïntegreerd in de carrosserie van een elektrische auto of ander voertuig kunnen wel degelijk een aanzienlijke bijdrage leveren aan het elektriciteitsverbruik, zodat minder vaak via de laadpaal geladen moet worden, wat gebruiksvoordelen oplevert voor de eigenaar. Ter indicatie: zonnecellen op nu beschikbare elektrische auto's zouden onder de Nederlandse omstandigheden ongeveer een kwart van de totaal benodigde elektriciteit kunnen leveren. Daardoor zou de gebruiker minder vaak een laadpunt hoeven te gebruiken. Om zonnecellen te kunnen toepassen in auto's moet echter aan veel voorwaarden en aan uitdagende eisen worden voldaan. Veiligheid en esthetische kwaliteit zijn maar een paar voorbeelden. Toch heeft TNO die uitdaging met beide handen aangegrepen. Samen met het bedrijf Lightyear dat is ontstaan uit een team van TU/e-studenten dat met veel succes een auto op zonne-energie voor een langeafstandsrace in Australië bouwde³⁴ heeft TNO een fraai, 3-dimensionaal gebogen en onder alle omstandigheden optimaal efficiënt zonnedak voor de Lightyear One ontwikkeld. Ook hier kwamen innovaties in cellen en panelen en een nieuwe toepassing bij elkaar. Andere autofabrikanten kijken met veel belangstelling naar deze ontwikkeling en zonnecellen kunnen zich ontwikkelen tot een standaardonderdeel van de elektrische auto van de toekomst.

Elektrische auto's zijn niet alleen gebruikers van elektriciteit, maar hun accu's en de zonnecellen in de carrosserie kunnen ook elektriciteit aan het net leveren wanneer de auto niet wordt gebruikt (en dat is verreweg de meeste tijd). De totale opslagcapaciteit van drie miljoen elektrische auto's benadert het totale dagelijkse elektriciteitsgebruik in Nederland. De opslagcapaciteit in al die accu's kan daarom een interessante bijdrage leveren aan de gewenste flexibiliteit van het elektriciteitssysteem: de autoaccu's kunnen op afstand gestuurd en volgens een protocol dat de gebruiker zelf kan instellen worden geladen of ontladen voor teruglevering aan het net.

34. <https://solarteameindhoven.nl/solar-car-tu-eindhoven-wins-world-solar-challenge-for-the-fourth-time-in-a-row>

5.2.6 Mass customization

De enorme prijsdaling van zonnestroom over de laatste 20 jaar is mede een gevolg van standaardisatie en grootschalige productie van zonnecellen en -panelen. Klantspecifieke producten (customization) zijn ook mogelijk maar resulteren doorgaans in een factor 2 tot 3 hogere kosten. De standaardisatieaanpak heeft ons veel goeds gebracht, want zonder de kostendaling was zonne-energie nog steeds een nicheproduct en totaal oninteressant voor de energietransitie. Inmiddels beginnen we echter de nadelen en beperkingen van ‘one size fits all’ te voelen en ontstaat er behoefte aan meer flexibiliteit, keuze en maatwerk, zonder dat de kosten de pan uit rijzen. Gelukkig kunnen we ons door de enorme kostendaling nu permitteren om na te denken over de volgende stap in de ontwikkeling van zonne-energie. Daarbij willen we de kostenvoordelen van standaardisering en schaal in productie combineren met de gewenste flexibiliteit en diversiteit in toepassing. We noemen dat ‘mass customization’ (MC); een concept waarbij kosteneffectieve, gestandaardiseerde basiselementen zoals achterzijdecontact zonnecellen of zonnefolies flexibel worden bewerkt tot laminaten (halffabricaten) geschikt voor integratie in bijvoorbeeld bouwcomponenten of andere eindproducten voor praktisch gebruik. Daarvoor is het van belang dat de zonne-energiesector de handen ineenslaat met andere sectoren zoals de bouwsector. Om de ontwikkeling van MC te versnellen heeft TNO met steun van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat geïnvesteerd in nieuwe onderzoeksfaciliteiten. Daarmee willen we samen met bedrijven helpen om een nieuwe generatie zonne-energie beschikbaar te maken voor de markt.

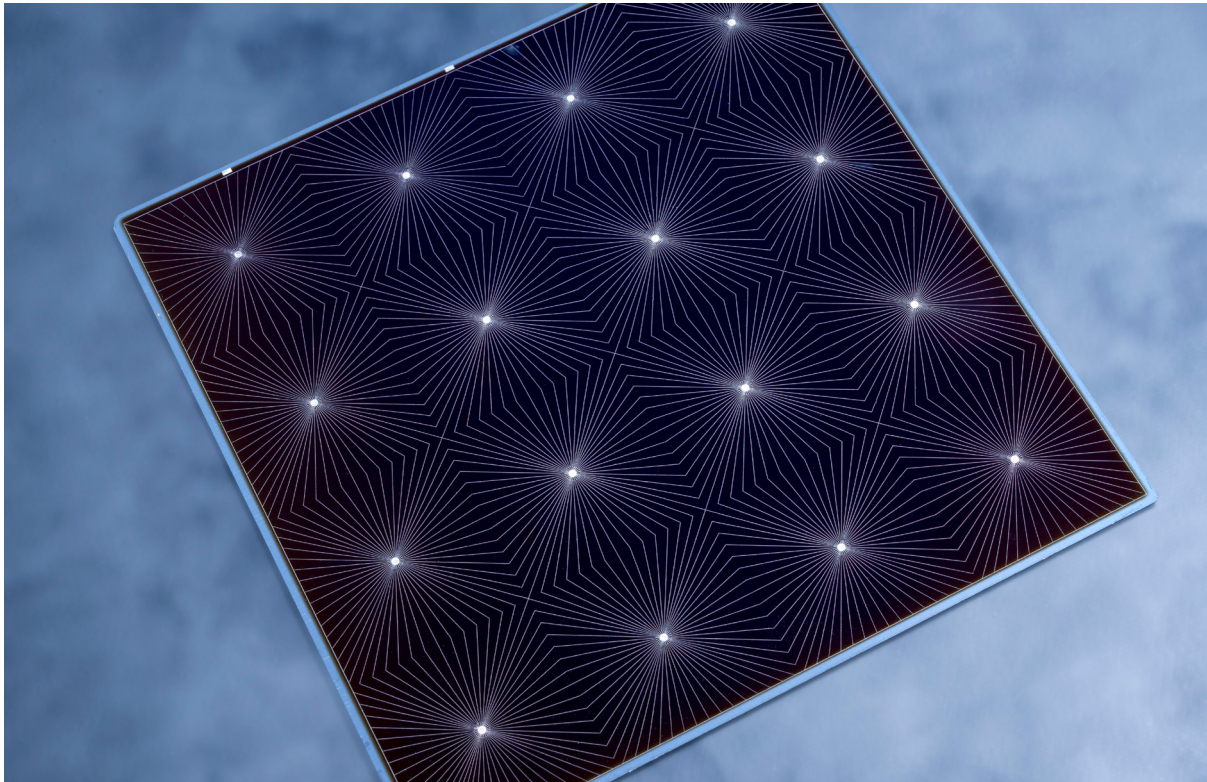


FIGUUR 8. SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN HET CONCEPT MASS CUSTOMIZATION (ZIE TEKST).

5.3 ZONNE-ENERGIETECHNOLOGIEËN

5.3.1 Silicium: cellen

Silicium was het eerste materiaal dat voor productie van zonnecellen werd gebruikt (zie de paragraaf 'Verschillende soorten zonnecellen en -panelen') en is met een marktaandeel van 95% nog steeds met afstand het meest gebruikte materiaal. Het einde van de siliciumtechnologie is al vaak voorspeld (voor het eerst zo'n 40 jaar geleden), maar steeds weer bleken er mogelijkheden te zijn voor verdere kostenverlaging, rendementsverhoging en nieuwe toepassingen.



SILICIUM ACHTERZIJDECONTACT (METAL WRAP-THROUGH) CEL.

Siliciumtechnologie speelt dan ook nog steeds een belangrijke rol in het TNO-onderzoekprogramma. De aard van het onderzoek is in de afgelopen 30 jaar dat ECN en daarna TNO eraan hebben gewerkt echter wel sterk veranderd. TNO heeft meebewogen met de veranderde innovatiebehoefte van bedrijven in de sterk groeiende mondiale zonne-energie-industrie. De focus ligt nu op een beperkt aantal innovatieve materialen, processtappen en celontwerpen waarin we samen met onze partners verschil kunnen maken in plaats van op de ontwikkeling van complete 'technologieplatforms' met alle stappen van startmateriaal tot en met complete zonnecel, waarmee we onze mondiale reputatie en ervaring hebben opgebouwd.

Rendementsverhoging is een belangrijk thema. Siliciumzonnecellen bereiken in het laboratorium inmiddels rendementen die steeds dichterbij de fundamentele limiet van ongeveer 29% komen en het is de kunst om zulke hoge waarden in productie zo dicht mogelijk te benaderen. Omdat veel laaghangend verbeteringsfruit in de afgelopen decennia al is geplukt, komt de nadruk steeds meer te liggen op het aanpakken van de laatste grote resterende verliespost: de oppervlakken en grensvlakken en met name de contacten. Daarvoor worden geavanceerde ultradunne lagen ontwikkeld die het mogelijk maken om aan soms schijnbaar tegenstrijdige eisen te voldoen. Verder (mede op basis van de deze ultradunne lagen) werkt TNO aan celontwerpen die nieuwe toepassingen met hoge opbrengst mogelijk maken: tweezijdig werkende cellen, achterzijdecontactcellen en bodemcellen voor tandems, zie de volgende paragrafen.

5.3.2 Silicium: panelen



PROTOTYPE VAN EEN WIT ZONNEPANEEL. RENDEMENT IS ONGEVEER DE HELFT VAN EEN ZWART PANEEL.



TWEEZIJDIG WERKENDE ZONNEPANELEN IN DE TEST.

In zijn meest bekende vorm is een siliciumzonnepaneel een glasplaat met daarachter bijvoorbeeld 60 of 72 in serie geschakelde zonnecellen en een aluminium frame. Het uiterlijk kan egaal zwart zijn, of met duidelijk zichtbare donkerblauwe of grijs-zwarte cellen. Zulke panelen zijn uitstekend geschikt voor de standaardtoepassingen die we kennen, maar niet of niet optimaal voor nieuwe, geïntegreerde toepassingen en sommige vormen van gecombineerd ruimtegebruik. TNO specialiseert zich daarom samen met bedrijven op panelen, of breder: zonne-energie-elementen met nieuwe uitvoeringsvormen en materialen, gebaseerd op siliciumzonnecellen. Een paar voorbeelden: tweezijdig werkende panelen voor een hogere energieopbrengst of verticale opstelling in combinatie met land- of tuinbouw of in geluidsschermen, achterzijdecontactpanelen met vormen en maten naar keuze, waarin de cellen zodanig kunnen worden geschakeld dat ze optimaal omgaan met inhomogene belichting en gedeeltelijke beschaduwning (zoals bijvoorbeeld op het dak van een auto), lichtgewicht panelen en panelen met andere kleuren of patronen dan we gewend zijn. Die laatste hebben bekendheid gekregen als ‘Dutch Solar Design’-panelen³⁵. De ontwikkeling van innovatieve siliciumpanelen is dus nauw verbonden met alle onderdelen van het programma ‘Integratie en toepassingen’.

35. Zie Solar Visuals, <https://www.solarvisuals.nl/>.

5.3.3 Dunnefilm: perovskiet

Perovskiet is een 'new kid on the block' en een grote sensatie en belofte in onderzoek en ontwikkeling van zonne-energie van de afgelopen 10 jaar. Perovskietpanelen hebben de potentie om heel goedkoop, met hoge snelheid geproduceerd te worden en een rendement te halen dat vergelijkbaar is met de huidige paneeltypen. TNO en zijn partners in het samenwerkingsverband Solliance zijn dan ook overtuigd van het belang van deze nieuwe familie van materialen en hebben een omvangrijk en succesvol onderzoekprogramma opgebouwd. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen niet-buigbare cellen op glas en flexibele cellen op folie en tussen semitransparante (tweezijdig werkende) en niet-transparante (opake) cellen. Daarmee kan een veelheid aan bestaande, maar vooral ook nieuwe toepassingen worden bediend. Onderzoek is gericht op het maken van efficiënte cellen, maar ook op inpakking, stabiliteit en duurzaamheid. Belangrijke voorbeelden van toepassingen waaraan wordt gewerkt zijn stroomproducerende ramen, waarbij lichtdoorlatende perovskietcellen worden geïntegreerd in isolerende beglazing en perovskietcellen die fungeren als bovenste cel in een stapeling met een siliciumcel of een andere dunnefilmcel (zie paragraaf 'tandems'. Verder wordt perovskiettechnologie in combinatie met nieuwe toepassingen als een kans-bij-uitstek voor het Europese bedrijfsleven gezien (zie ook volgende hoofdstuk), omdat de kennispositie van Europa op het gebied van perovskieten wereldtop is en Europa beschikt over zeer geavanceerde productietechnologie.



PROTOTYPE VAN EEN LICHTDOORLATENDE PEROVSKIET ZONNEFOLIE.

5.3.4 Dunnefilm: panelen

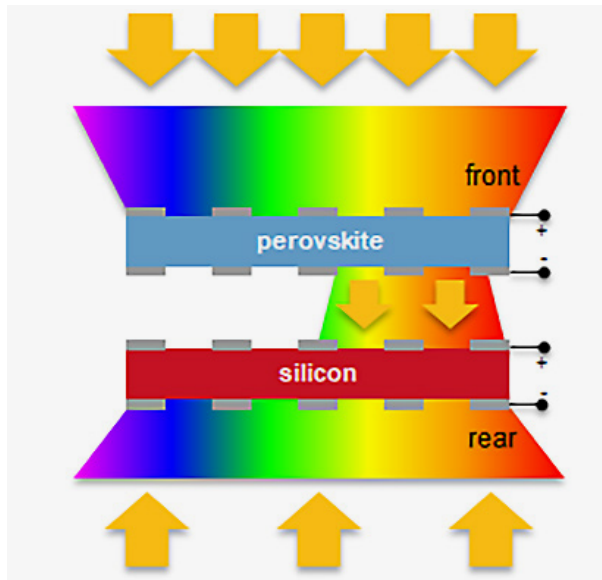
Dunnefilms bieden unieke, andere mogelijkheden dan silicium. De meest tot de verbeelding sprekende en ook heel belangrijke is om efficiënte lichtgewicht zonnefolies met hoge snelheid aan de rol (roll-to-roll; R2R) te maken en die vervolgens op maat te brengen voor allerlei gebruik. Makkelijk gezegd maar helaas niet zo makkelijk gedaan, maar heel belangrijk om aan te werken en in zeker opzicht de heilige graal van de mondiale zonne-energieontwikkeling. In dit programmaonderdeel werkt TNO samen met onder meer de partners in Solliance aan een nieuwe manier om dunnefilmcellen onderling elektrisch te verbinden. Dit biedt het voordeel van meer flexibiliteit in vorm, maat en uitgangsspanning van het 'paneel' respectievelijk de folie of het zonnestroomelement. TNO en partners werken ook aan doorzichtige dunnefilmpanelen. Bij deze paneelontwikkelingen wordt vooralsnog vaak gebruik gemaakt van CIGS als bewezen en beschikbare technologie. Daarnaast zijn inpakking (encapsulatie) en barrièrelagen een focusgebied. De inpakking bepaalt in belangrijke mate de betrouwbaarheid en de levensduur van folies en panelen, zeker bij materialen die erg vochtgevoelig zijn zoals perovskieten.



MONTAGE VAN ZONNEFOLIES (FOTO: HYET SOLAR/VOPAK)

5.3.5 Tandems

Last, but not least, richten TNO en zijn partners binnen en buiten Solliance zich op de ontwikkeling van hoogefficiënte tandems: hybride tandems bestaande uit een silicium bodemcel en een dunnefilm perovskiet topcel of dunnefilmtandems bestaande uit een perovskiet- of CIGS-bodemcel en een perovskiet topcel.



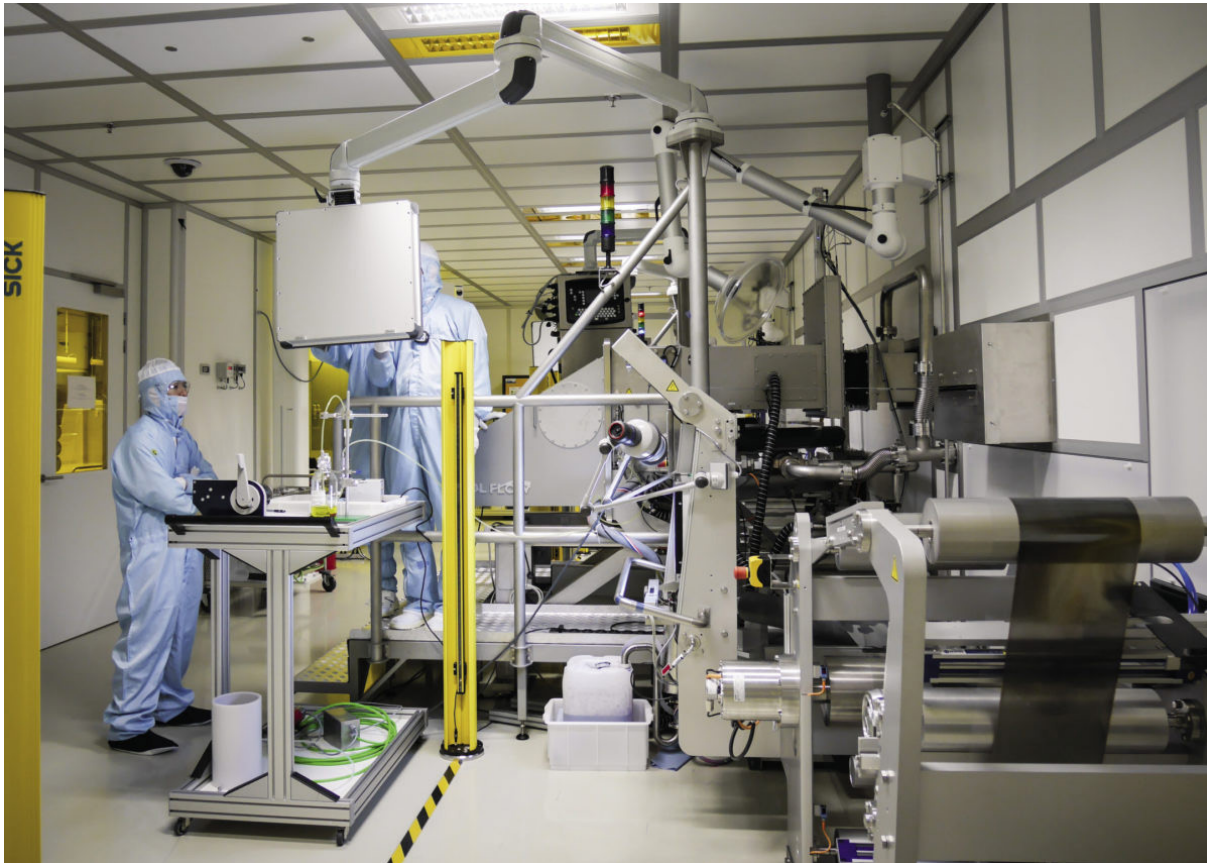
FIGUUR 9. SCHEMATISCHE DOORSNEDE VAN EEN PEROVSKIET-SILICIUM TANDEMCEL.

Uiteraard wordt daarbij optimaal gebruik gemaakt van de ontwikkelingen in de deelprogramma's Siliciumcellen en -panelen, Perovskiet en Dunnefilmpanelen, maar het samenvoegen van twee technologieën in één nieuwe, tandemtechnologie brengt een scala aan specifieke uitdagingen met zich mee die het hart van dit programmaonderdeel vormen. Twee belangrijke: het elektrisch en optisch verbinden van cellen tot tandemconfiguraties en vervolgens tot een tandempaneel dat ingepakt moet worden. Voor de verbinding van cellen bestaan twee wezenlijk verschillende concepten, elk met voor- en nadelen. Het is mogelijk om (simpel gezegd) een complete semitransparante perovskietzonnecel te stapelen op een compleet, aangepast siliciumpaneel. Het resulterende tandempaneel heeft $2 \times 2 = 4$ elektrische aansluitingen: een 4-terminal tandem. De tweede optie is om een perovskietcel aan te brengen bovenop iedere siliciumcel zodanig dat de stapeling twee contacten heeft (een met het perovskiet en een met het silicium; de twee cellen zijn dan seriegeschakeld doordat de onderkant van de perovskietcel contact maakt met de bovenkant van de siliciumcel). Die tandemcellen worden dan op hun beurt ook weer in serie geschakeld om een paneel te maken dat dan net als een gewoon paneel twee aansluitingen heeft: een 2-terminal tandem.

TNO's onderzoek richt zich in het bijzonder op optimalisatie van de siliciumbodemcel, verbeteren van de transparantie van de perovskiettopcel, moduleontwerp, stabiliteit, tweezijdig werking en uitvoerige binnen- en buitentests. In het laboratorium is met een kleine perovskiet-siliciumtandem door Oxford PV inmiddels een rendement van 29,5% gehaald en naar verwachting wordt de 30%-grens binnenkort gepasseerd. Daarmee ligt de weg open om op termijn ook met tandempanelen die felbegeerde waarde te behalen.



TANDEM MINIMODULES IN DE BUITENTEST.



ROLL-TO-ROLL PROEFFABRICAGE VAN ZONNEFOLIES (FOTO: TNO/SOLLIANCE).

5.4 DE ZONNE-ENERGIESECTOR TERUGBRENGEN NAAR EUROPA

Europa heeft een doorslaggevende rol gespeeld bij de opbouw van de mondiale zonne-energiesector in het laatste decennium van de 20ste en het eerste van de 21ste eeuw en speelt nog steeds een belangrijke rol op het gebied van geavanceerde productietechnologie (apparatuur en processen). De positie van Europa is in belangrijke mate te danken aan Duitsland, dat met ambitieuze marktontwikkeling de vicieuze cirkel van een kleine markt en kleinschalige productie en installatie aan de ene kant en hoge prijzen aan de andere kant wist te doorbreken. Na aanvankelijke opbouw en succes van de Europese maakindustrie van cellen en panelen namen Aziatische en met name Chinese bedrijven de leiding in de verdere schaalvergroting. Gestimuleerd door een ambitieuze overheidsstrategie en gesteund door de bijbehorende faciliteiten werd in korte tijd een complete zonne-energie-industriesector opgebouwd. De combinatie van onder meer enorme schaal, een efficiënt werkende toeleveringsketen en snelle innovatie zorgde ervoor dat de Chinese producten tegen lage prijzen op de wereldmarkt kwamen en Europese en Amerikaanse bedrijven uit de markt drukten.

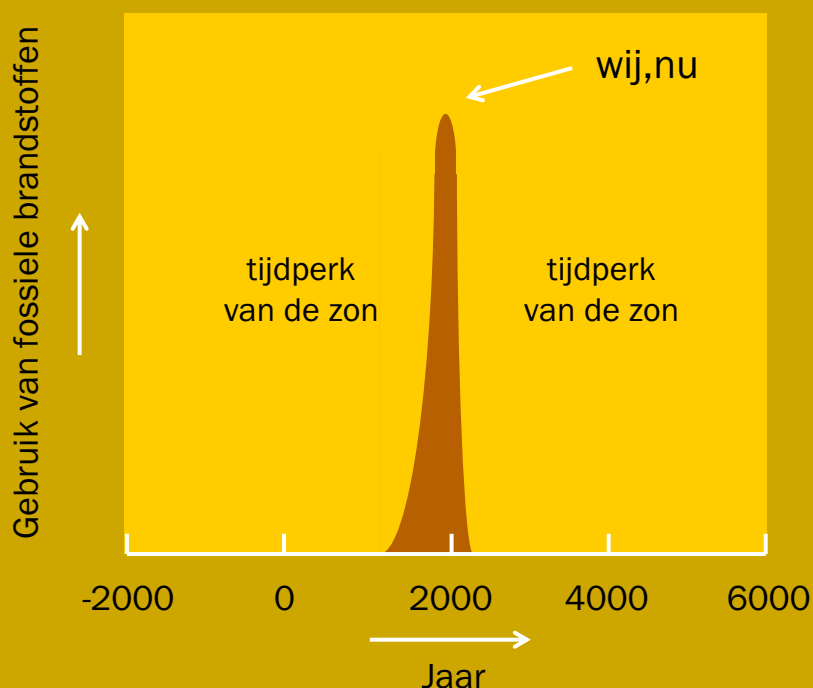
In 2019 kwam bijna tweederde van alle panelen in de wereld uit China en meer dan 90% uit Azië. Hoewel deze verschuiving van productie er mede voor heeft gezorgd dat zonnestroom heel snel heel goedkoop is geworden, realiseren steeds meer overheden, bedrijven, burgers en andere belanghebbenden zich dat er ook nadelen aan de ontstane situatie zijn verbonden. In de eerste plaats missen we in Europa een deel van de economische kansen die met de snelle groei van zonne-energie samenhangen. Kansen over de hele waardeketen van materialen tot en met onderhoud, beheer en recycling van systemen. Daarnaast is de totale afhankelijkheid van import van een belangrijke bouwsteen voor de toekomstige energievoorziening in de ogen van sommigen ongewenst. Men pleit voor het behouden en/of (her)opbouwen van de strategische waardeketens (industriesectoren) van duurzame energie inclusief zonne-energie. Tot slot zal het moeilijk, zo niet onmogelijk zijn om onze tot nu toe uitstekende kennispositie op het gebied van zonne-energie-technologie te behouden als er geen maakindustrie is om die kennis te gebruiken. Daarmee zou Europa deze sector geheel kunnen verliezen.

Met deze argumenten in gedachten zijn er recent initiatieven ontwikkeld om geavanceerde zonne-energiemaakindustrie naar Europa terug te brengen, of liever (weer) op te bouwen. Dat we daarbij niet direct moeten willen of kunnen concurreren met de Aziatische reuzen, met name wat betreft standaardtechnologie waarbij lage kosten volledig doorslaggevend zijn is duidelijk. Daarom richten initiatieven zich op high-end versies van de huidige siliciumtechnologie, op volledig nieuwe technologieën zoals perovskieten en tandems, op geïntegreerde systeemoplossingen, etc. Zulke initiatieven zijn gebundeld in de Solar Manufacturing Accelerator (SoMA) die de Europese branchevereniging SolarPower Europe (SPE) heeft gevormd in samenwerking met het European Technology and Innovation Platform for Photovoltaics (ETIP PV), de European Solar Manufacturing Council (ESMC), de Duitse Mechanical Engineering Industry Association VDMA en het Franse onderzoekverband IPVF. Recent is daar het door de Europese Commissie gesteunde European Solar Initiative bijgekomen³⁶. TNO steunt de SoMA-ambitie en neemt deel in enkele van de initiatieven. Dit past bij uitstek bij het eerdergenoemde criterium voor onderzoek 'Bijdrage aan de economie, door samenwerking met en ondersteuning van het innovatieve bedrijfsleven op het gebied van zonne-energie-technologie en -toepassingen'.

Uiteraard is en blijft zonne-energie een mondiale sector. Samenwerking over grenzen van landen en werelddelen heen heeft ons gebracht waar we zijn en dat is heel ver. De ambitie is daarom dat Europa weer een 'fair share' in de industriesector opbouwt, in overeenstemming met onze topositie in kennis en technologie, niet om Europa los te weken van de rest van de wereld. Een mondiale context past ook bij de verwachting dat zonne-energie opgewekt en omgezet in brand- en grondstoffen in zeer zonnige gebieden op termijn een bijdrage kan leveren aan de verduurzaming van de energiehuishouding in Europa.

36. <https://www.solarpowereurope.org/campaigns/manufacturing-accelerator/> en <https://europeansolarinitiative.eu/>, ruwweg vergelijkbaar met de al langer bestaande European Battery Alliance.

6 DE TOEKOMST VAN ZONNE-ENERGIE



Zonne-energie heeft zich in de afgelopen decennia enorm ontwikkeld en is nu een efficiënte en betaalbare optie met vele toepassingsmogelijkheden. In steeds meer gebieden van de wereld en markten is zonne-energie nu al de goedkoopste bron van hernieuwbare elektriciteit en de kostendaling gaat nog door. Daardoor wordt zonnestroom nu door velen gezien als een belangrijke bouwsteen of zelfs de hoeksteen van het mondiale duurzame en klimaatneutrale energiesysteem van de toekomst. Om de volledige potentie van zonne-energie te realiseren zijn echter nog aanzienlijk lagere kosten en hogere rendementen nodig, alsmede integratie in de leefomgeving, in het energiesysteem en in een circulaire grondstoffenketen. In het onderzoekprogramma Zonne-energie richt TNO zich samen met partners uit het bedrijfsleven, de Europese onderzoeksinstituten en universiteiten en de overheden op deze uitdagingen en kansen. Daarmee wil TNO bijdragen aan het realiseren van Nederlandse, Europese en mondiale klimaatdoelen en daarbij het bedrijfsleven en de samenleving als geheel ondersteunen bij het grijpen van de enorme economische kansen die de energietransitie biedt.

In de toekomst kan de wereld net als in het verleden weer grotendeels draaien op zonne-energie in zijn verschillende directe en indirecte vormen (waaronder zonnestroom, windenergie, waterkracht en biomassa)

CONTACT

prof. dr. Wim Sinke

hoofdonderzoeker Zonne-energie

✉ wim.sinke@tno.nl

TNO innovation
for life

TNO.NL/ZON