

# TIJD VOOR DUURZAME ZONNE-ENERGIE

ZONNESTROOM: VAN HERNIEUWBAAR  
NAAR DUURZAAM

**TNO** innovation  
for life

› Mirjam Theelen  
› Josco Kester  
› Mara Hauck  
› Martin Späth  
› Ando Kuypers  
› Wim Sinke

› december 2021

# INHOUD

|                                                                                             |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Woord vooraf: Het is tijd voor duurzame zonnestroom</b>                                  | <b>3</b>  |
| <b>Tijd voor duurzame zonnestroom: De kernpunten</b>                                        | <b>5</b>  |
| <b>1 Duurzaamheid: een belangrijk en rijk begrip</b>                                        | <b>8</b>  |
| 1.1 Duurzame ontwikkeling                                                                   | 8         |
| 1.2 Voetafdruk en circulariteit                                                             | 8         |
| 1.3 Energietransitie                                                                        | 9         |
| 1.4 Een uitdaging voor de hele keten                                                        | 10        |
| 1.5 De R-ladder voor circulariteit                                                          | 11        |
| 1.6 Duurzaamheid van zonne-energie volgens Europa                                           | 13        |
| <b>2 Ontwikkelingen en ambities op het gebied van zonnestroom</b>                           | <b>16</b> |
| 2.1 Verschillen in zonnestroomtechnologieën                                                 | 16        |
| 2.2 20 tot 100 maal zoveel zonnestroom in 2050                                              | 17        |
| <b>3 Werken aan duurzame zonnestroom</b>                                                    | <b>19</b> |
| 3.1 Gebruiks- en omgevingsaspecten                                                          | 20        |
| 3.1.1 Inpassing in de omgeving                                                              | 20        |
| 3.1.2 Combinatie van functies in het buitengebied                                           | 21        |
| 3.2 Energie- en CO <sub>2</sub> -balans                                                     | 22        |
| 3.2.1 Totale CO <sub>2</sub> -emissies door productie van zonne-energiesystemen             | 27        |
| 3.2.2 De volgende stappen                                                                   | 28        |
| 3.3 Grondstoffen en materialen                                                              | 29        |
| 3.3.1 Productie, gebruik en levenseinde van zonnepanelen                                    | 30        |
| 3.3.2 Beschikbaarheid van materialen                                                        | 30        |
| 3.3.3 Giftige en potentieel schadelijke stoffen                                             | 32        |
| 3.3.4 Recycling                                                                             | 33        |
| 3.3.5 Circulaire ontwerpoplossingen                                                         | 35        |
| 3.3.6 De volgende stappen                                                                   | 38        |
| <b>4 Zonnestroom voor de lange termijn: zo snel mogelijk van hernieuwbaar naar duurzaam</b> | <b>39</b> |
| <b>5 Appendix: CO<sub>2</sub>-terugverdientijd en de energierterugverdientijd</b>           | <b>40</b> |
| <b>6 Referenties</b>                                                                        | <b>41</b> |

## › WOORD VOORAF: HET IS TIJD VOOR DUURZAME ZONNESTROOM

Met het licht van de zon bereikt ons dagelijks een hoeveelheid energie die veel groter is dan we als mensheid nodig hebben. Toch gebruiken we nog heel veel energie uit fossiele brandstoffen. Door verbranding winnen we uit steenkool, olie en gas de zonne-energie die miljoenen jaren geleden in de bodem is vastgelegd. Maar daarbij verbranden we ook de opgeslagen koolstof tot CO<sub>2</sub> en wel in zo'n hoog tempo dat de klimaatklok ons nog maar weinig tijd laat om over te gaan van oude zonne-energie uit de aarde naar dagelijks hernieuwde zonne-energie uit de hemel.

Elektriciteit uit zonne-energie, ofwel zonnestroom (ook wel PV of zon-PV genoemd), en elektriciteit uit windenergie maken een explosieve groei door. Omdat er nog maar weinig CO<sub>2</sub> uitgestoten kan worden om klimaatverandering nog enigszins binnen de perken te houden, nemen de ambities voor hernieuwbare elektriciteitsopwekking snel toe. De kosten van zonnestroom zijn de afgelopen tijd spectaculair gedaald en de ambities zijn mede daarom inmiddels zo hoog, dat het de hoogste tijd is om verder dan het kostenplaatje te kijken. Wat is er nog meer nodig dan lage kosten om op een verantwoorde manier de gewenste enorme schaal te realiseren? Zonnestroom is weliswaar van zichzelf hernieuwbaar, maar voor grootschalige toepassing is het noodzakelijk dat zonnestroom ook echt duurzaam is, dat wil zeggen: houdbaar voor de aarde en de mens. De productie van zonnestroom-systemen vraagt bijvoorbeeld energie en materialen. In het begin van de energietransitie komt die energie nog voor een groot deel uit fossiele brandstoffen en dat veroorzaakt CO<sub>2</sub>-uitstoot, die we juist willen terugdringen. Daarnaast is de hoeveelheid beschikbare materialen beperkt en veel materialen zijn ook nodig voor andere toepassingen. Maar zo dicht bij het kantelpunt voor klimaatverandering is tijd misschien nog wel de meest beperkende factor. We hebben gloeiende haast om duurzame zonnestroom op grote schaal beschikbaar te maken.

Het doel van deze paper is om een aanzet te geven tot een onderzoeksagenda die zeer grootschalige toepassing van zonnestroom technologie duurzaam mogelijk maakt binnen de randvoorwaarden van mondiale beschikbaarheid van materialen én binnen het 1,5°C opwarmingsscenario te blijven. Hiertoe brengen we de duurzaamheidsuitdagingen in kaart en schetsen we niet-technologische, maar vooral technologische oplossingsrichtingen. Daarbij gaat het om concrete, stapsgewijze ontwikkelingen voor de korte termijn en om ingrijpendere innovaties voor de langere termijn. We kijken hierbij naar de productie, het gebruik en de afdankfase van zonnepanelen en complete systemen.

Wij bepleiten twee routelijnen in de nader uit te werken onderzoeksagenda. Een evolutielijn die zich er voor de huidige zonnestroomtechnologie op richt om niet alleen alle gebruikte materialen terug te winnen, maar daarbij bovendien zoveel mogelijk van de in de productie geïnvesteerde energie te behouden. En een revolutielijn die zich richt op zonnestroomtechnologie die zich nu nog in de ontwikkelfase bevindt en een sterk verminderd materiaal- en energiegebruik in de toekomst mogelijk moet gaan maken. Na decennia van optimalisatie van energie tegen steeds lagere kosten geldt nu een nieuw adagium: verdere optimalisatie van energie tegen een steeds kleinere ecologische voetafdruk.

Voor wie te weinig tijd heeft om deze hele paper te lezen volgt hierna eerst de kernboodschap. In de daaropvolgende paragrafen geven we een beschrijving en onderbouwing van wat er aan verduurzaming nodig is om hernieuwbare zonnestroom tot in lengte van tijden en op grote schaal te kunnen gebruiken.

## TIJD VOOR DUURZAME ZONNESTROOM: DE KERNPUNTEN

**Zonnestroom kan wereldwijd een van de belangrijkste hernieuwbare energiebronnen worden**

- Dit komt ten eerste doordat de **kostprijs** van zonnestroom (€/kWh) in de afgelopen decennia enorm is gedaald, waardoor het concurrerend is geworden met andere methoden van stroomopwekking. De opwekkosten voor sommige grote installaties in zonnige gebieden zijn minder dan 0,02 €/kWh. Zonnestroom is daarmee in een groeiend deel van de wereld goedkoper dan stroom die wordt opgewekt met fossiele brandstoffen en is (onder gunstige omstandigheden) zelfs de goedkoopste manier om stroom op te wekken. Deze kostendaling zal de komende decennia naar verwachting nog doorzetten.
- Het **potentieel** van zonne-energie is zeer groot; mondiaal, in Europa en in Nederland. Bovendien kunnen zonnestroomsystemen snel worden gebouwd, waardoor de totale capaciteit aan systemen snel kan worden uitgebreid. Dit is belangrijk vanwege de urgentie van klimaatmaatregelen. Deze urgentie, in combinatie met effectieve stimuleringsmaatregelen in verschillende landen, vertaalt zich al decennia in een sterke groei van de markt. Binnenkort wordt mondiaal de grens van 1 terawatt-piek (TWp) ( $\approx 3$  miljard zonnepanelen of 5000 km<sup>2</sup>) geïnstalleerd vermogen gepasseerd en voor de lange termijn worden getallen van enkele tientallen tot meer dan 100 TWp voorzien. In Nederland kan het vermogen toenemen van ruim 10 gigawatt-piek (GWp) nu naar 100 of zelfs 200 GWp.



**Figuur 1:** Stad van de Zon, Heerhugowaard. Bron: Gemeente Heerhugowaard (vanaf 1 januari 2022 samen met de Gemeente Langedijk onder de naam Gemeente Dijk en Waard).

**Voor deze grootschalige toepassing moet de duurzaamheid van zonnestroom wel nog aanzienlijk verbeterd worden**

De **CO<sub>2</sub>-voetafdruk** van zonnestroom (in gram CO<sub>2</sub>-equivalent/kWh; gCO<sub>2</sub>-eq/kWh) moet nog flink omlaag. Deze CO<sub>2</sub>-voetafdruk hangt vooral samen met de *hoeveelheid* en de *bron* van de energie (uit kolen of waterkracht, bijvoorbeeld) die wordt gebruikt om de systemen te produceren, te transporteren en te installeren. In termen van de hoeveelheid energie zijn de afgelopen decennia grote verbeteringen gerealiseerd: de huidige zonnestroomsystemen leveren in Nederland ruim twintig keer zoveel energie tijdens hun levensduur als het kost om ze te maken. Daardoor is de CO<sub>2</sub>-voetafdruk van de huidige zonnestroom al veel lager dan die van fossiel opgewekte stroom. Snelle uitbouw van zonnestroomcapaciteit op basis van de huidige technologie en energiemix zou echter een significant beslag leggen op de totaal resterende toegestane emissies om de mondiale temperatuurstijging tot 1,5°C te beperken. De opbouw van deze benodigde capaciteit voor zonnestroomopwekking met de huidige technologie zou ook een aanzienlijk beslag leggen op beschikbare **materialen** en van sommige materialen zelfs meer vereisen dan er gewonnen kan worden of nu in totaal geproduceerd wordt. Bovendien gaat de winning en verwerking van deze materialen soms samen met negatieve sociale en milieueffecten elders.

**Daarvoor zijn technologische evolutie en revolutie en betere maatschappelijke inbedding nodig**

Om tijdens de energietransitie de vereiste mate van duurzaamheid op tijd te bereiken is het nodig de huidige technologieën substantieel verder te verbeteren (evolutie), tegelijkertijd te werken aan compleet nieuwe technologieën (revolutie) en de maatschappelijke inbedding van zonnestroom te versterken (Figuur 2).

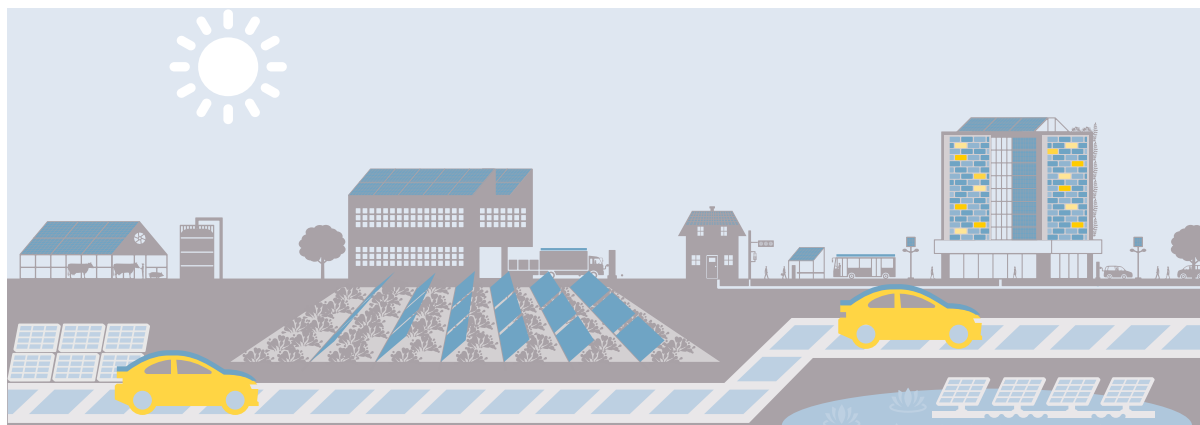
- 1. Technologische evolutie:** stapsgewijze verdere verbetering van de momenteel grootschalig toegepaste zonnestroomtechnologie (verhoogde energieopbrengst en levensduur, schonere productie, vermindering van materiaalgebruik, hergebruik van materialen, etc.).
- 2. Technologische revolutie:** ontwikkeling en introductie van nieuwe typen zonnestroomtechnologie die de CO<sub>2</sub>-voetafdruk van panelen en/of het gebruik van kritische en energie-intensieve materialen drastisch kunnen verminderen (perovskiet en andere nieuwe zonnecelmaterialen, overige dunnefilm materialen, alternatieve en betere materialen voor geleiding van stroom en licht, etc.). Combinaties van **evolutie** en **revolutie** zijn ook mogelijk, bijvoorbeeld perovskiet-silicium tandems en fundamentele vernieuwingen in siliciumtechnologie.
- 3. Maatschappelijke inbedding:** we hanteren deze term voor aspecten als het circulair maken van de keten van productie, gebruik en afdanking, inpassing in het energiesysteem, integratie van zonnestroom in landschap, leefomgeving en ecologie, maatschappelijk verantwoorde productie en eerlijke verdeling van kosten en baten. Hierbij is vaak ook een belangrijke rol voor de overheid weggelegd, bijvoorbeeld als regelgever of stimulator.

TNO stelt zich ten doel om op deze drie gebieden samen met partners in het bedrijfsleven, maatschappelijke organisaties en overheden richtinggevend bij te dragen aan en impact te hebben op de energietransitie, de economie en de samenleving in brede zin. Technologie en innovatie zijn daarbij essentieel en zijn de focus van deze paper, maar deze staan ten dienste van mens en milieu. Dit doel vatten we samen onder het motto: 'Zonne-energie: van hernieuwbaar naar duurzaam'.



**Figuur 2:** Aandachtsgebieden en prioriteiten voor het verbeteren van de duurzaamheid van zonne-energie.

# 1. DUURZAAMHEID: EEN BELANGRIJK EN RIJK BEGRIIP



## 1.1 DUURZAME ONTWIKKELING

Wanneer we spreken over duurzaamheid van zonnestroom is het natuurlijk belangrijk om duidelijk te maken wat we onder de term Duurzaamheid verstaan. Daarvoor gaan we terug in de geschiedenis. De term ‘*duurzame ontwikkeling*’ is in 1987 gedefinieerd door de World Commission on Environment and Development van de Verenigde Naties, ook bekend als de commissie Brundtland, in hun rapport *Our common future* [1]. Dit begrip ligt ook aan de basis van de 17 Duurzame Ontwikkelingsdoelen (Sustainable Development Goals, SDG) die de VN in 2015 heeft vastgesteld [2]. In deze paper hanteren we de volgende omschrijving: *duurzame ontwikkeling blijft binnen de draagkracht van de planeet en waarborgt rechtvaardigheid tussen (nu en later) en binnen (hier en elders) generaties* [3,4]. Deze ontwikkeling is ‘houdbaar’ omdat ze de bronnen die nodig zijn voor leven op aarde in stand houdt.

De wereldwijde bedreigingen voor deze draagkracht door klimaatverandering en verlies van biodiversiteit zijn nauw verbonden met duurzame ontwikkeling<sup>1</sup> en werden daarom ook al in 1992 geadresseerd in zusterconventies van de Rio Earth Summit [5].

## 1.2 VOETAFDRIJF EN CIRCULARITEIT

De ecologische- of milieuvoetafdruk, die bijvoorbeeld tot uitdrukking wordt gebracht in de jaarlijkse ‘Earth overshoot day’, is een maat voor de (niet-) duurzaamheid van productie en consumptie op verschillende niveaus. Manieren om deze voetafdruk te verminderen, zijn een overgang naar een ‘circulaire economie’ en het overschakelen van fossiele naar hernieuwbare energiebronnen, in feite ook een vorm van circulariteit. Zonne-energie in directe (zonnestroom, zonnewarmte) en indirecte vormen (windenergie, waterkracht, etc.) is met afstand de grootste hernieuwbare energiebron die de aarde tot zijn beschikking heeft [6]. De systemen die deze vormen van zonne-energie voor onze energievoorziening opvangen en beschikbaar maken zijn weliswaar van zichzelf hernieuwbaar, maar daardoor nog niet automatisch op alle aspecten duurzaam. Om klimaatverandering te beperken is het nodig om zonne-energie op zeer grote schaal toe te passen. Om deze toepassingsschaal te bereiken en vol te houden is duurzaamheid, in de zin van houdbaar voor de aarde en de mens, echter een voorwaarde<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Zie SDG 7 ‘Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all’ [2]

<sup>2</sup> Zie ook de definitie van ‘sustainable’ volgens de EU Taxonomy for Sustainable Financial Services zoals gegeven in [7].

---

## Voor zeer grootschalige toepassing is duurzaamheid, in de zin van houdbaar voor de aarde en de mens, een voorwaarde.

In verband met duurzaamheid speelt het begrip *circulariteit* een belangrijke rol. Een circulaire economie kan kort samengevat worden gezien als een economie waarin het onttrekken van eindige grondstoffen en hulpbronnen en de productie van afval tot een minimum worden beperkt [8]. Naast het tegengaan van klimaatverandering en het verminderen van de milieuafdruk moet deze economie dus grondstoffen schaarste, leveringsonzekerheid, en een afvalberg voorkomen [9,10,11]. Daarvoor is het belangrijk om bedrijvigheid te stimuleren die dit doel dichterbij brengt. Het streven naar circulariteit is in een groot aantal overheids- en bedrijfsstrategieën in een stroomversnelling geraakt. De Nederlandse overheid streeft naar een volledig circulaire economie in 2050 [12].

### 1.3 ENERGIETRANSITIE

De overgang naar een robuuste en duurzame circulaire energievoorziening wordt ook wel aangeduid als een energie- en materialentransitie, maar in plaats van een transitie past het misschien beter om te spreken van een transformatie<sup>3</sup>; een proces op systeemniveau dat veel meer omvat dan bijvoorbeeld het overschakelen van een technologie naar een andere. Het tot stand komen van deze transformatie is afhankelijk van een groot aantal factoren en voorwaarden, zoals bijvoorbeeld de verdeling van baten en lasten van energieproductie en consumptie, de aanpassing van infrastructuur en functies, de inbedding in beleid en financiële systemen en het borgen van maatschappelijk draagvlak. Verdienmodellen en machtsverhoudingen van zowel burgers als bedrijven kunnen veranderen tijdens een dergelijke transformatie. Voor het gemak hanteren we in deze paper ook de gebruikelijke term energietransitie. Voor een succesvolle transitie zijn actoren [13] over de hele maatschappij van belang, zoals industrie, overheid, maatschappelijke organisaties en consumenten. De transitieagenda “Circulaire Maakindustrie”, bijvoorbeeld, geeft concrete mijlpalen die te bereiken zijn door overheid, bedrijfsleven en kennisinstellingen. Beleidsmakers hebben een belangrijke rol te spelen in het creëren van de juiste marktomstandigheden (bijvoorbeeld voor gerecyclede materialen), het creëren van vraag (bijvoorbeeld door duurzaam in te kopen) en het stellen van eisen en voorwaarden (bijvoorbeeld aan milieu-impact). Een nadere beschrijving van de mogelijke bijdrage van verschillende actoren ligt echter buiten de scope van deze paper.

---

<sup>3</sup> Met begrip ‘transformatie’ willen we tot uitdrukking brengen dat het gaat om een proces dat veel ingrijpender, veelomvattender en fundamenteeler is dan een transitie. Vergelijk het verkleuren van een blad (een transitie) met de transformatie van een rups in een vlinder.

Een belangrijke voorwaarde voor de realiseerbaarheid van een nieuwe, duurzame energievoorziening is ‘supply chain resilience’: de vraag of de toeleveringsketens tegen een stootje kunnen en ook op lange termijn in stand gehouden kunnen worden. Daarbij gaat het niet alleen om fundamentele beschikbaarheid van energie, materialen en productiemiddelen (‘Is er in principe genoeg?’), maar bijvoorbeeld ook over gevolgen van veranderende politieke of economische verhoudingen (‘Is het ook feitelijk beschikbaar?’). Dit is onder meer een belangrijk onderwerp in de nieuwe Europese Industriestrategie, onder andere te vinden in referenties [14] en [15].

Hoewel we volledig onderschrijven dat een transitie of transformatie niet alleen door technologische ontwikkelingen tot stand kan komen, ligt de focus van deze paper op aspecten die direct samenhangen met de technologie voor opwekking van zonnestroom met behulp van zonnepanelen (en daarbinnen met name op CO<sub>2</sub> en materialen) en, waar zinvol en mogelijk, op de direct daarmee samenhangende economische, ecologische en maatschappelijke factoren. Ook inbedding in het energiesysteem en maatschappelijke acceptatie worden hier niet nader behandeld, al erkennen we dat zonder deze voorwaarden een succesvolle transitie onhaalbaar lijkt. Maatschappelijke acceptatie kan beïnvloed worden door tal van factoren, zoals visuele impact, betaalbaarheid en verdeling van lasten en baten, waarvan enkele in deze paper worden aangestipt. Zonnestroom wordt overigens ook vaak aangeduid met zon-PV of PV, naar het Engelse ‘photovoltaic’. Daarbij beperken we ons tot technologieën die in Nederland op grote schaal toepasbaar zijn. Benutting van de warmte van de zon, hetzij passief in gebouwen hetzij door middel van zonnecollectoren<sup>4</sup>, laten we buiten beschouwing, net als zonnestroom in nichemarkten zoals de ruimtevaart, of in apparaten zoals rekenmachines en gadgets.

## 1.4 EEN UITDAGING VOOR DE HELE KETEN

### TRANSPARANTIE VAN DE WAARDEKETEN

De spelers in de keten die bij de energietransitie een rol moeten spelen betreffen onder meer fabricage, reparatie en her-fabricage, recycling, detailhandel en consumenten. Veel partijen in de zonne-energiesector en daarbuiten zijn het erover eens dat transparantie van de totale keten (‘traceerbaarheid’) van grondstoffen via opgewekte kilowattuur tot recycling belangrijk is.

### Transparantie van de totale keten is belangrijk om duurzaamheid te kunnen bereiken

Hiermee kan de ‘duurzaamheid’ bepaald en gekwantificeerd worden op het niveau van producten en diensten. Daarmee kunnen gewenste ontwikkelingen in gang gezet worden vanuit vraagsturing door o.a. eindgebruikers, door beleid en regelgeving en door onderzoek en ontwikkeling. De behoefte aan transparantie werd in de eerste helft van 2021 onderstreept door berichten dat er bij de productie van hoogzuiver silicium voor zonnecellen sprake kan zijn van dwangarbeid [16]. Het is echter veelal onduidelijk waar het silicium in een specifiek zonnepaneel vandaan komt en dus is

<sup>4</sup> Of door zogenaamde PV-thermische panelen, die zowel zonnewarmte als zonnestroom produceren.

het ook niet mogelijk om daarop als afnemer te sturen [17]. Eenzelfde probleem speelt bijvoorbeeld ook bij andere materialen en grondstoffen en ten aanzien van de voor productie gebruikte energiemix. In dit verband zou digitale technologie op termijn kunnen helpen om een eenduidige relatie te leggen tussen gebruikte bronnen als grondstof, energie en arbeid, de verwerking daarvan en het eindproduct of dienst.

## 1.5 DE R-LADDER VOOR CIRCULARITEIT

In de komende decennia van snelle groei zal het jaarlijks te installeren vermogen steeds veel groter zijn dan wat er terugkomt (na 25-30 jaar gebruik) en kan worden hergebruikt. Dat betekent dat recycling in de sector weliswaar heel belangrijk is, maar slechts een klein deel (typisch een paar procent) van de grondstoffen en materialen kan leveren die nodig zijn. Daarom is het belangrijk om te werken aan technologieën met een laag materiaal- en energiegebruik, een lange levensduur en een hoog rendement (ook wel efficiëntie genoemd). Niettemin vraagt optimalisatie van kosten, klimaat- en milieu-impact een zorgvuldige analyse van meerdere, samenhangende aspecten. Als het bereiken van een hoog rendement veel extra energie kost, bijvoorbeeld, is dat niet automatisch de beste route. Een ander voorbeeld is dat het onverstandig zou kunnen blijken te zijn om huidige technologieën, met een relatief hoog materiaal- en energiegebruik, te ontwerpen voor een heel lange levensduur, omdat die materialen gedurende de levensduur niet beschikbaar zijn voor nieuwe, materiaal- en energie-efficiëntere technologieën. Alles bij elkaar een lastige puzzel. Mede daarom omvat het begrip ‘circulariteit’ ook veel meer dan recycling.



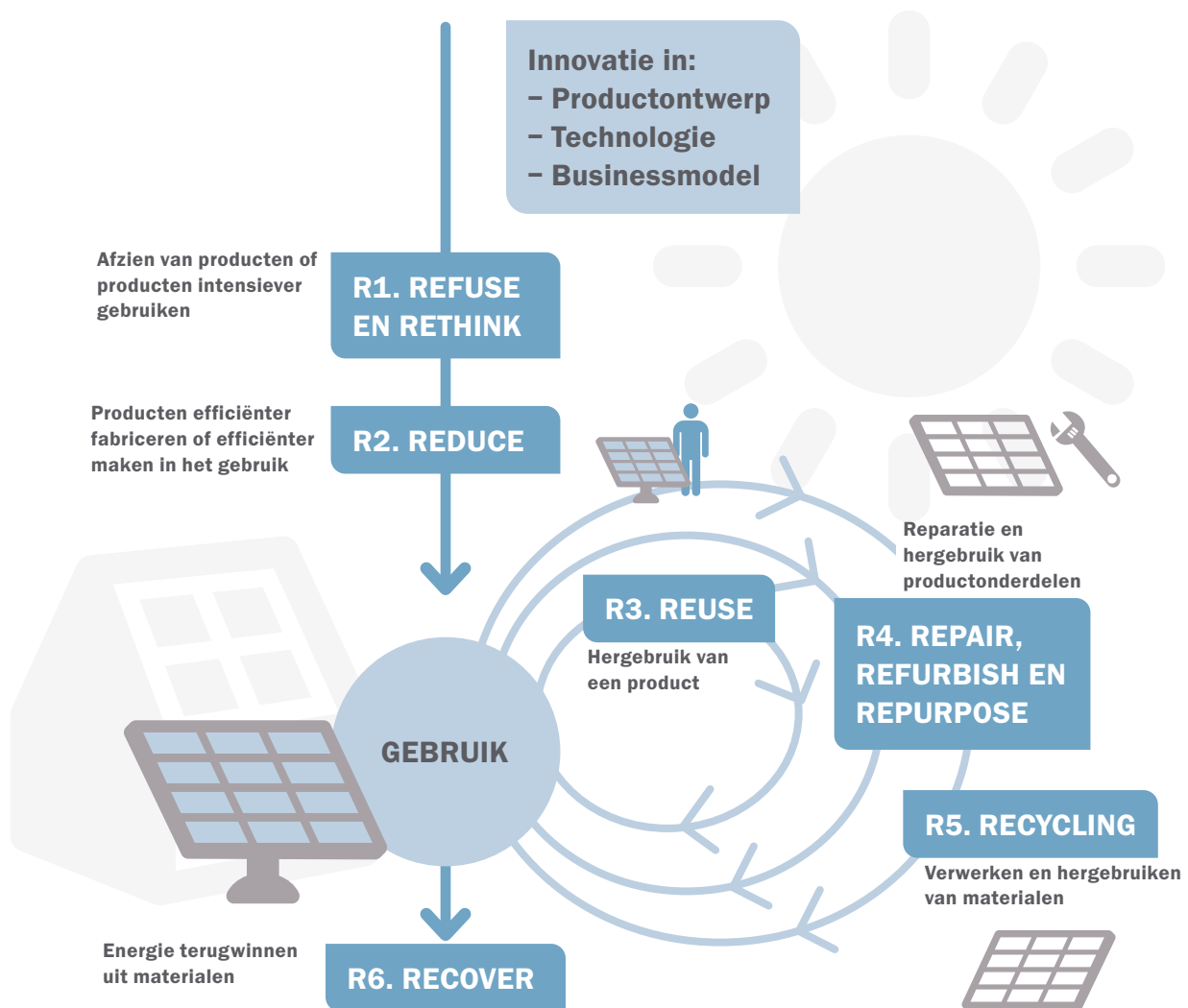
### CIRCULAIR MATERIAALGEBRUIK

Het verbeteren van de circulariteit van zonnepanelen is een manier om het beslag op grondstoffen en de productie van afval te verminderen. In potentie leidt dit ook tot een kleinere CO<sub>2</sub>-voetafdruk. Het op die manier benutten van waardevolle

hulpbronnen en deze zo lang mogelijk in de keten houden sluit direct aan bij de zogenaamde R-ladder-strategie (Figuur 3) [18]. Het programma *Circulaire Economie* pleit voor efficiënter gebruik van grondstoffen door begrensde inzet van grondstoffen tijdens de productie en het gebruik van producten. Mogelijke strategieën voor een meer circulaire productcyclus kunnen grofweg worden ingedeeld in (in afnemende mate van circulariteit) [19]:

- A:** Het *vermijden en slimmer maken* van productie en gebruik (R1, R2);
- B:** Het *verlengen van de levensduur* van producten en onderdelen (R3, R4);
- C:** Het *nuttig toepassen* van materialen en energie uit de producten (R5, R6).

Ook al is de gedachte dat met een meer circulaire strategie het materiaalgebruik en de milieuschade afnemen, is er altijd een afhankelijkheid van het specifieke product en de situatie (bijvoorbeeld het omliggende energiesysteem en alternatieven). Hierna gaan we in op manieren waarop deze drie strategieën toegepast kunnen worden in de productieketen van zonnestroom.



Figuur 3: R-ladder met strategieën voor circulariteit [20].

### A: Het vermijden en slimmer maken van productie en gebruik (R1, R2)

- LANGERE LEVENSDUUR
- MINDER MATERIAALGEBRUIK

De eerste stap in de inrichting van een duurzaam energiesysteem is het verminderen van het energiegebruik. Daarmee wordt de vraag naar (zonne-)energie direct beperkt. De volgende stap is om de productie van zonne-energie zo

efficiënt mogelijk in te richten, door vermindering van verbruik van energie en kostbare/schaarse materialen. In principe kan dit door minder of andere materialen te gebruiken, de levensduur te verlengen, of het omzettingsrendement te verhogen. In alle gevallen zal de opbrengst per hoeveelheid gebruikt materiaal en/of gebruikte energie toenemen. Welke optie tot de laagste impact leidt hangt ook af van het type materiaal (hoe schaars, hoe energie-intensief, hoe goed te recycelen), het gebruik in absolute zin en de energiebronnen die eraan te pas komen [21].

### B: Het verlengen van de levensduur van producten en onderdelen (R3, R4)

- MEER HERGEBRUIK

Reparatie, onderhoud, opknappen en moderniseren van oude zonnepanelen en zonnestroomsystemen volgt deze strategie. Verlenging van de levensduur speelt een essentiële rol door behoud van de energie die geïnvesteerd wordt tijdens het

winnen van de materialen en het productieproces. Een langere technische levensduur leidt alleen tot milieuwinst als de panelen ook langer worden gebruikt. Zonnepanelen zo lang mogelijk in de waardeketen houden kan worden bevorderd door tweedehands-markten te creëren en door de mogelijkheid om te reviseren en te 'retrofitten'.

De toepassing van vervangbare elektronica op paneelniveau (Module Level Power Electronics, MLPE) en vervangbare bypassdiodes in de panelen vereenvoudigt het uitwisselen en opwaarderen van de elektronicaonderdelen. Dit komt ten goede aan een verbeterde vermogens- en/of energieopbrengst tijdens de gebruiksfase van het paneel. Zoals hierboven vermeld is het niet altijd op voorhand te zeggen welke strategie de grootste milieuwinst met zich meebrengt.

### **C: Het nuttig toepassen van materialen en energie uit de producten (R5, R6)**

- NIEUWE RECYCLE-TECHNIEKEN
- ONTWERP VOOR CIRCULARITEIT



End-of-life scenario's, zoals het recyclen van zonnepanelen staan beschreven in hoofdstuk 3.3.4. Hierbij is het goed om op te merken dat er soms verschil wordt gemaakt tussen laagwaardig (downcycling: materiaal is alleen nog te gebruiken in

'laagwaardige' functies) en hoogwaardig recyclen (upcycling: met gebruik in dezelfde of een als gelijkwaardig geziene functie). Met het nuttig toepassen van energie uit de producten wordt meestal verbranden van de producten met energierterugwinning bedoeld. Deze wordt als laatste oplossing gezien en in deze paper niet nader op ingegaan.

## **1.6 DUURZAAMHEID VAN ZONNE-ENERGIE VOLGENS EUROPA**

Om de duurzaamheid van zonne-energie te bevorderen neemt de Europese Commissie (EC) diverse initiatieven. Figuur 4 toont een aantal elkaar aanvullende beleidsinstrumenten, die op het moment van publicatie van deze paper voorbereid worden. De Europese Commissie zoekt naar een samenhangend pakket van maatregelen dat effectief is, zo min mogelijk negatieve neveneffecten heeft (zoals marktverstoring of extra administratieve lasten) en waar binnen Europa voldoende draagvlak voor is.

---

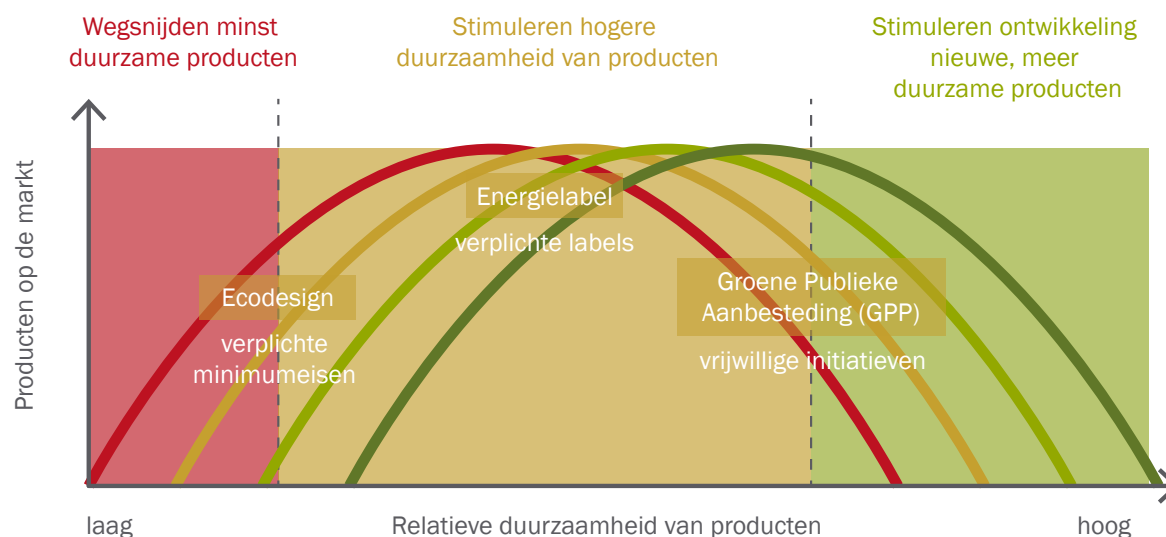
Eco-ontwerp, Energielabeling  
en Groene Publieke Aanbesteding  
zijn belangrijke Europese instrumenten  
om duurzaamheid te bevorderen.

**TRANSPARANTIE  
IN DE WAARDEKETEN**

Deze beleidsinstrumenten zijn:

- **Eco-ontwerp** (Ecodesign): Verplichte minimumeisen waaraan elk zonnepaneel dat in Europa verkocht wordt, moet voldoen. Deze richtlijn betreft in potentie een groot aantal aspecten en strekt zich uit tot diep in de productieketen. Daarbij gaat het onder meer om levensduur en degradatie, CO<sub>2</sub>-voetafdruk, kwaliteitsborging van de productieprocessen, repareerbaarheid, recyclebaarheid, en ‘smart readiness’. Hiermee kunnen de slechtst presenterende producten van de markt worden geweerd.
- **Energielabeling** (Energy Labelling): Dit gaat om verplichte informatieverstrekking over de energie-efficiëntie van zonnepanelen door middel van een energielabel met vast omschreven klassen van energie-efficiëntie (A-G). In het geval van zonnepanelen wordt overwogen om dit label aan te vullen met verplichte informatie over andere aspecten van duurzaamheid zoals recyclebaarheid en het gebruik van bepaalde giftige stoffen. Hiermee worden afnemers in staat gesteld om de energieopbrengst en duurzaamheid van producten mee te wegen bij hun aankoopbeslissing.
- **Groene Publieke Aanbesteding** (Green Public Procurement, GPP): Dit gaat om gestandaardiseerde, vrijwillige criteria voor zeer duurzame producten die overheden kunnen gebruiken in hun aanbesteding. Hoewel deze criteria bedoeld zijn voor overheden en het gebruik hiervan vrijwillig is, wordt verwacht dat ook andere afnemers, zoals bedrijven en pensioenfondsen, deze eisen gaan gebruiken bij hun inkoop. Het doel van dit instrument is om de ontwikkeling en marktintroductie van nieuwe, zeer duurzame producten te stimuleren door het creëren van een markt met afnemers die voorop willen lopen.

Er wordt momenteel gewerkt aan een eerste versie van de voorwaarden voor Ecodesign, Energy Labelling en Groene Publieke Aanbesteding. Deze versie zal naar verwachting nog niet ver gaan, maar niettemin een belangrijke stap vooruit kunnen betekenen omdat het kan helpen met het maken van bewuste keuzes bij aankoop en recycling. Zo zou een duidelijke beschrijving van alle gebruikte materialen en geadviseerde verwerkingsmethoden bij recycling van allerlei verschillende producten al een groot verschil maken ten opzichte van de situatie waarin die producten een ‘black box’ zijn.



**Figuur 4:** Overzicht van de diverse beleidsinstrumenten van de EU voor het stimuleren van de duurzaamheid van zonnepanelen.



## REGULERING EN STIMULATIE

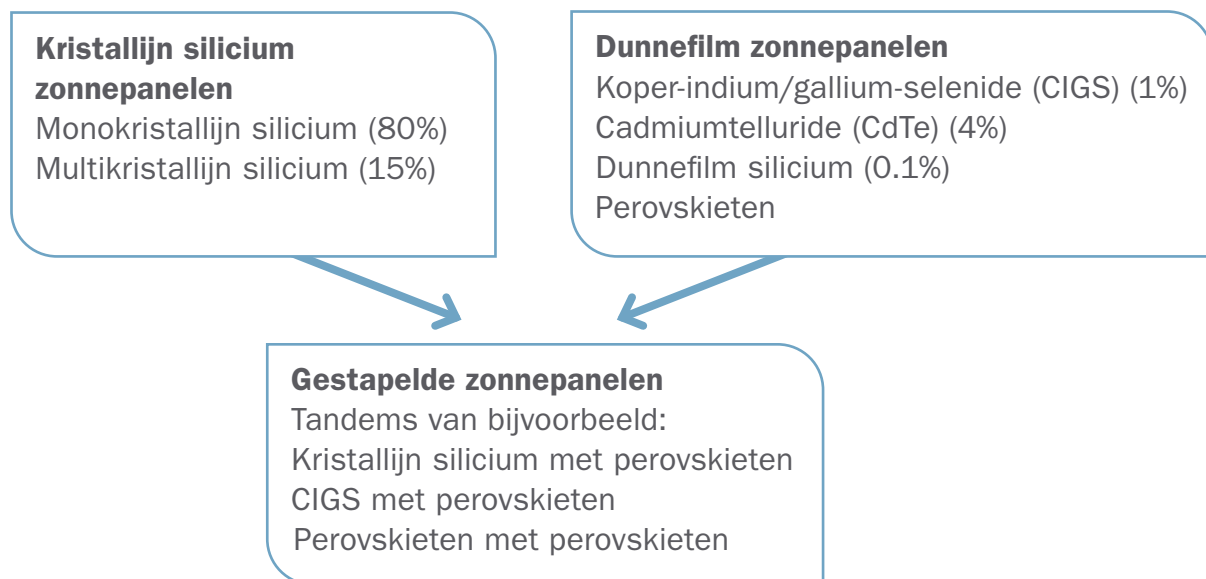
Naast de bovengenoemde beleidsinstrumenten heeft de Europese Commissie in 2021 de voorwaarden geformuleerd waaraan zonne-energiesystemen moeten voldoen om in Europa 'duurzaam' genoemd te mogen worden. Dit is gedaan door middel van een *Gedelegeerde Verordening*<sup>5</sup> bij de Europese Taxonomie voor Duurzame Financiële Diensten. De Europese Commissie heeft hierbij het advies om nadere eisen te stellen aan de CO<sub>2</sub>-voetafdruk van zonne-energie niet overgenomen<sup>6</sup>. Momenteel stelt de Europese Commissie daarom dat installaties voor zonne-energie per definitie duurzaam zijn, mits ze aan enkele eenvoudig te vervullen voorwaarden voldoen.

EU-lidstaten kunnen overigens op eigen initiatief aanzienlijk verder gaan in hun eisen om specifieke product- en toepassingscategorieën gericht bevorderen, voor zover dat het vrije handelsverkeer binnen de Europese Unie niet belemmert.

<sup>5</sup> Gedelegeerde Verordening C/2021/2800

<sup>6</sup> Het advies van de *Technical Expert Group on sustainable finance (TEG)* was om voor deze CO<sub>2</sub>-voetafdruk in 2022 een grens in te stellen van 100 gram CO<sub>2</sub>-eq/kWh die tot 2050 in stappen daalt naar 0 gram CO<sub>2</sub>-eq/kWh. Vanuit diverse lidstaten was er echter weerstand tegen, zelfs tegen een zeer hoge grens van 100 gram CO<sub>2</sub>-eq/kWh.

## 2. ONTWIKKELINGEN EN AMBITIES OP HET GEBIED VAN ZONNESTROOM



Figuur 5: Selectie van de verschillende technologieën met marktaandeelen in 2020 [22].

### 2.1 VERSCHILLEN IN ZONNESTROOM-TECHNOLOGIEËN

#### – NIEUWE TYPEN ZONNEPANELEN – NIEUWE MATERIALEN

Er zijn momenteel twee hoofdsoorten zonnepanelen waarmee zonnestroom kan worden opgewekt (Figuur 5). Enerzijds zijn er de blauwe of zwarte kristallijn silicium (x-Si) panelen met daarin vierkante of rechthoekige zonnecellen gemaakt van

mono- of multikristallijn silicium, die op dit moment 95% marktaandeel hebben.

Anderzijds zijn er verschillende typen dunnefilm zonnepanelen (samen 5% marktaandeel). Deze zonnepanelen bevatten heel dunne zonnecellen, waarbij het materiaalgebruik laag is, en er ook de mogelijkheid is om flexibele panelen (zonnefolies) te produceren. Die typen onderscheiden zich door het werkzame materiaal dat zij bevatten: een verbinding van koper, indium, gallium en seleen (CIGS-panelen); van cadmium en tellurium (CdTe-panelen) of amorf, respectievelijk microkristallijn silicium (dunnefilm Si-panelen). Daarnaast kunnen onder meer perovskietverbindingen worden gebruikt. Perovskieten zijn een nieuwe familie van (dunnefilm)materiaal voor opwekking van zonnestroom. Zonnepanelen of -folies op basis van perovskieten zijn nog niet op de markt, maar ze zorgen in de wereld van zonne-energie-innovatie voor groot enthousiasme. Perovskietcellen hebben in korte tijd in het laboratorium een rendement van ruim 25% weten te bereiken.

Het recordrendement is daarmee bijna zo hoog als dat van de beste kristallijn silicium zonnecellen (zo'n 27%), waaraan al ruim een halve eeuw wordt gewerkt en die de 'stip op de horizon' zijn voor de vele miljarden industrieel geproduceerde cellen. De verklaring voor dit kleine verschil is dat beide recordrendementen slechts een paar procent onder het theoretisch haalbare maximum liggen voor zonnecellen gemaakt van één materiaal. Met andere woorden: veel hoger kan sowieso niet en beide soorten cellen zijn -in het laboratorium, qua rendement en voor kleine oppervlakken- dus nagenoeg perfect. De kunst is om die perfectie ook te benaderen in grootschalige productie, en voor complete, goedkope zonnepanelen of -folies die

bovendien lang meegaan. Voor silicium, CIGS en CdTe lukt dat al (heel) goed en er zijn al kristallijn siliciumpanelen met een rendement van meer dan 22% op de markt<sup>7</sup>, maar ook perovskieten zijn zeer veelbelovend. Ze kunnen met snelle en in principe goedkope processen worden gedeponeerd op plastic, metaal of glas en gebruiken geen schaarse materialen. Wereldwijd werken vele wetenschappers en technologen eraan en ook TNO heeft een zeer succesvol onderzoeksprogramma op dit gebied.

#### GESTAPELDE ZONNECELLEN (TANDEMS)

Om rendementen te bereiken die hoger zijn dan wat mogelijk is met zonnecellen van één materiaal zoals silicium of perovskiet, kunnen twee (of meer) zonnecellen gestapeld worden tot zogenaamde tandems. Tandemcellen of -panelen kunnen een groter deel van het zonlichtspectrum benutten en kunnen dat daarom efficiënter omzetten in elektriciteit<sup>8</sup>. Ze kunnen bestaan uit een combinatie van kristallijn silicium en een dunnefilm materiaal of een combinatie van meerdere typen dunnefilm materialen. Ook hiervoor staan perovskieten in de belangstelling, als bovenste cel gestapeld op silicium of CIGS, of voor een stapeling van twee verschillende soorten perovskiet.

**Tandempanelen zullen zonlicht efficiënter kunnen omzetten in elektriciteit dan de huidige panelen.**

## 2.2 20 TOT 100 MAAL ZOVEEL ZONNESTROOM IN 2050

Energiescenario's verschillen sterk wat betreft de getallen voor de schaal waarop verschillende energieopties, en dus ook zonne-energie, zullen worden toegepast. Een studie die de mogelijkheid van zeer grootschalige toepassing van zonne-energie laat zien is het '100% hernieuwbare-energiescenario' van de LUT-onderzoeksgroep in Finland [23]. Daarin wordt getoond dat door grootschalige elektrificatie ook het gebruik van fossiele brandstoffen voor toepassingen zoals verwarming, transport en procesindustrie vérgaand kan worden teruggedrongen of zelfs helemaal vermeden. 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. Andere scenario's met zeer verschillende aannames en randvoorwaarden komen op andere waarden, ruwweg tussen 10 en 80 TWp [24,25] (zie Figuur 6 voor enkele voorbeelden). 2050 markeert overigens niet het einde van de groei, want het zonnestroomvermogen kan daarna doorgroeien tot zo'n 170 TWp in 2100 [24].

<sup>7</sup> Dit is het hoogste van de commercieel verkrijgbare panelen en bevat cellen met een rendement van zo'n 24%. Gemiddelde rendementen van moderne siliciumpanelen liggen anno 2021 rond de 20%. CIGS- en CdTe-panelen halen 17 tot 19%.

<sup>8</sup> De verwachting is dat tandempanelen een rendement van 25 tot 30% kunnen halen. Op de lange termijn zouden stapelingen van drie of meer materialen paneelrendementen van 35 tot 40% mogelijk kunnen maken.

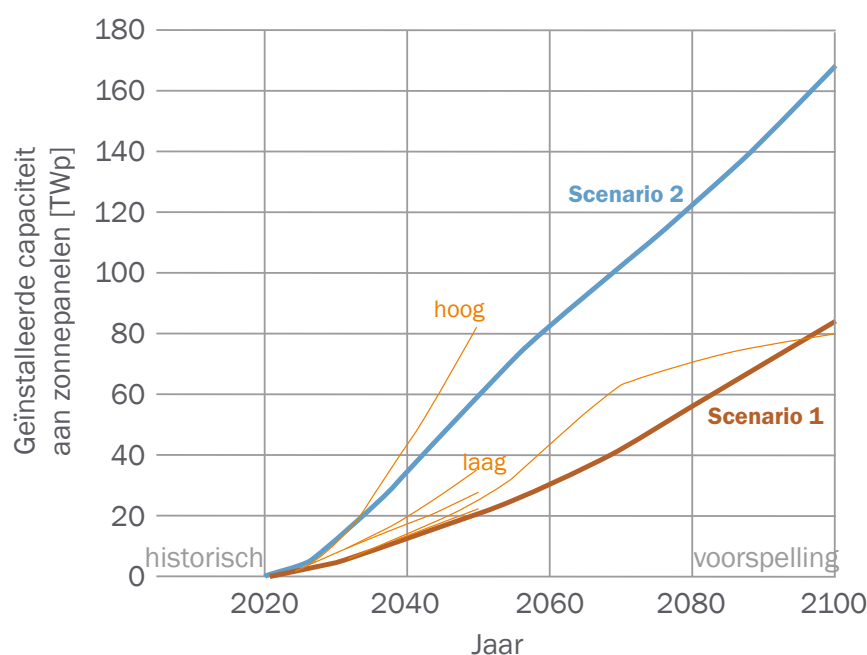


## HOGERE OPBRENGST

60 TWp zijn ongeveer 180 miljard standaard siliciumpanelen van vandaag de dag en dat is bijna 100x zoveel als de 700 GWp die er eind 2020 stond (en waarmee ruim 4% van de huidige mondiale elektriciteitsvraag werd gedekt). Gelukkig

zal het ruimtebeslag van panelen per geproduceerde kWh afnemen door een stijging van het rendement van zonnepanelen. Door een verwachte toename van het rendement van rond de 20% gemiddeld nu naar 25 tot 30% gemiddeld<sup>9</sup> binnen enkele decennia. Daarnaast zal door allerlei innovaties ook het materiaalgebruik per kWh sterk afnemen. Er zal echter nog steeds een gigantische hoeveelheid materialen en energie nodig zijn. Daarom worden duurzaamheid en circulariteit van zonnestroomssystemen steeds belangrijker.

Het jaartal 2050 is niet alleen een mijlpaal in de wereldwijde klimaatdoelstellingen, ook hebben de zonnepanelen die op dit moment geproduceerd worden dan hun verwachte levensduur van ongeveer 30 jaar bereikt. Het gaat dus de komende decennia vooral om opbouw van nieuw zonnestroomvermogen in een tempo van ruwweg 1 tot 2 TWp per jaar, terwijl vervanging en recycling pas in de loop van die 30 jaar een grotere rol zullen gaan spelen.



**Figuur 6:** Verschillende scenario's voor de mondiale groei van de zonnestroom. De data is afkomstig uit referentie [24] en de bronnen hierin.

<sup>9</sup> Sommige soorten panelen kunnen misschien wel 40% halen, hoewel dat waarschijnlijk per Wp paneelvermogen niet de goedkoopste zullen zijn. Wanneer oppervlak beperkt of kostbaar is kunnen zulke ultrahoog-rendementpanelen toch aantrekkelijk zijn.

### 3. WERKEN AAN DUURZAME ZONNESTROOM

Bij het bepalen van de huidige en de in de toekomst mogelijke mate van duurzaamheid van zonnestroom moet de gehele productlevenscyclus in beschouwing worden genomen. Daarbij worden vaak drie fasen onderscheiden: de productiefase, de gebruiksfase en de afdankfase (inclusief hergebruik en recycling); zie Figuur 7. In elk van deze fasen definiëren wij drie duurzaamheidsaspecten die een rol van wisselend belang spelen: de gebruiks- en omgevingsaspecten, de energie- en CO<sub>2</sub>-balans, en de materiaalbalans (zowel in hoeveelheid als in tijdsduur) [26]: Belangrijke grootheden en aandachtsgebieden hierbij zijn:

**Gebruiks- en omgevingsaspecten:**

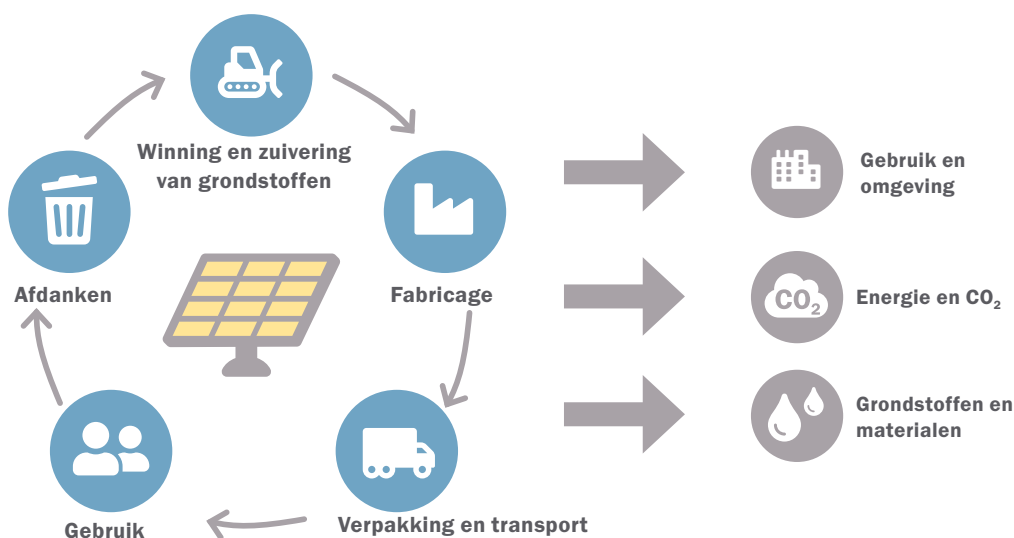
- Ruimtegebruik en (visuele) inpassing in de omgeving;
- Verdringing van andere activiteiten en functies zoals landbouw en natuur;
- Invloed op lokale ecologie.

**Energie- en CO<sub>2</sub>-balans:**

- Energieverbruik;
- Energieterugverdientijd en energierendement op geïnvesteerde energie;
- CO<sub>2</sub>-voetafdruk en CO<sub>2</sub>-terugverdientijd.

**Grondstoffen en materialen:**

- Verbruik en verlies van schaarse en andere hoogwaardige grondstoffen en materialen;
- Verbruik en emissies van giftige en andere potentieel schadelijke stoffen en materialen;
- Levensloop- en einde-levensduuraspecten.



**Figuur 7:** De verschillende stappen in productie-, gebruik- en afdankfase van een zonnepaneel, en de drie duurzaamheidsaspecten die daarbij een rol spelen. Deze cyclus geldt ook voor de andere onderdelen van een zonne-energiesysteem [27].

Deze drie duurzaamheidsaspecten en hun relatieve belang over de levensfasen van zonnestroomsystemen worden in de volgende paragrafen nader besproken. Daaruit wordt duidelijk wat er concreet gedaan kan worden om zonnestroom duurzamer te maken. Omdat de drie aspecten niet op zichzelf staan maar met elkaar verweven zijn (een lager materiaalgebruik kan bijvoorbeeld minder energie kosten) moeten deze verbeterpunten ook in hun samenhang beschouwd worden. Dit gebeurt door analyses te maken die de drie aspecten over de gehele levenscyclus meewegen (Life Cycle Analyses, ofwel LCA, en andere methoden).

## 3.1 GEBRUIKS- EN OMGEVINGSASPECTEN

### 3.1.1 Inpassing in de omgeving

#### GEÏNTEGREERDE OPLOSSINGEN

Een bijzonder soort impact van zonne-energie is het *ruimtegebruik* dat nodig is voor het plaatsen van zonnepanelen. Het eerdergenoemde scenario van 60 TWp aan zonnestroomvermogen in 2050 komt overeen met een paneeloppervlak van ruwweg 200.000-300.000 km<sup>2</sup> (voor Nederland: 0,2 TWp en 700-1000 km<sup>2</sup>). Een dergelijk groot oppervlak kan alleen duurzaam, dichtbij de gebruiker en met behoud van maatschappelijk draagvlak gerealiseerd worden als daarvan zoveel mogelijk gecombineerd wordt met andere functies en soorten gebruik, in het bijzonder in de gebouwde omgeving en de infrastructuur. De meeste mensen zijn bijvoorbeeld enthousiast over zonne-energie op daken en gevels, zeker als het resultaat er nog fraai uitziet ook. Als het om voldoende snelheid en volume te bereiken (om klimaatdoelen te halen) toch nodig is om daarnaast systemen in het buitengebied te plaatsen is het belangrijk ook daarbij integratie en functiecombinatie toe te passen (zie ook paragraaf 3.1.2).



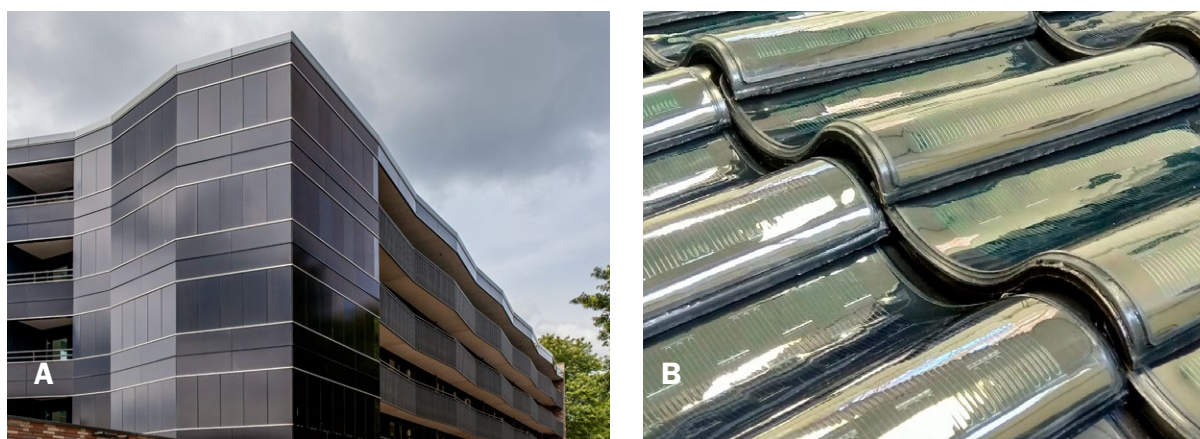
#### INPASSING IN LEEFOMGEVING EN MILIEU, GECOMBINEERD RUIMTEGEBRUIK

Voor duurzame grootschalige toepassing van zonnestroom is het dus belangrijk om systemen zoveel mogelijk te integreren in gebouwen, infrastructuur, mobiliteit en het landschap (rekening houdend met natuur en ecologie, zie sectie 3.1.2). Daarbij moet de oorspronkelijke functionaliteit geheel (bijvoorbeeld waterdichtheid, geluidswering of veiligheid) of in sommige gevallen gedeeltelijk (denk aan combinaties van zonne-energie en land- of tuinbouw) worden behouden en moet er aandacht zijn voor esthetiek, ecologische en cultuurhistorische aspecten. Bij geïntegreerde toepassingen en functiecombinatie is zonne-energie ‘te gast’ en dient zich als zodanig te gedragen zodat het een welkome gast is en blijft. Natuurlijk moet de gecombineerde toepassing wel een business case mogelijk maken door in te spelen op de meer algemene duurzaamheidsvoorwaarden die in de markt voor de gastomgeving worden gesteld, zoals in de bouw bijvoorbeeld het Bouwbesluit, de MilieuPrestatie Gebouwen, en de MilieuKostenIndicator. Binnen deze randvoorwaarden moeten dan het ontwerp, de energieopbrengst en de levensduur geoptimaliseerd worden, met circulariteit als uitgangspunt. Hierbij kan de zonnestroomfunctie direct worden geïntegreerd in bouw- en constructie-elementen, bijvoorbeeld door deze functie in de vorm van een laminaat of een coating aan te brengen. Het is ook mogelijk om het zonnepaneel zélf als bouw- en constructie-element uit te voeren. Bovendien kan zo in principe het totale materiaalgebruik aanzienlijk worden verminderd omdat er geen extra draag- of bevestigingsconstructies nodig zijn om de zonnestroomfunctie te realiseren.

---

Voor duurzame grootschalige toepassing van zonnestroom is het belangrijk om systemen zoveel mogelijk te integreren.

Daarnaast zijn meer esthetische opties nodig, naast de standaard blauwe of zwarte panelen met een vast formaat. Hiervoor zijn verdere ontwikkelingen van zonnestroomproducten met vrijheid van vorm, maat, kleur en textuur vereist. Recente technologische ontwikkelingen hebben al geleid tot de beschikbaarheid van visueel aantrekkelijke zonnepanelen. Dit gaat van homogeen zwarte of terracottakleurige panelen voor op daken, tot design-panelen met daarop een afbeelding naar keuze, met name bedoeld voor gevels. Een voorbeeld staat in Figuur 8a. Verder bieden flexibele en lichtgewicht zonnefolies populaire mogelijkheden. Zogenaamde 'indaksystemen' maken het mogelijk dat zonnepanelen niet langer op het dak liggen, maar zelf de dakbedekking vormen, bijvoorbeeld als dakelement of als onderdeel van een dakpan (Figuur 8b)<sup>10</sup>, indien gewenst zelfs zonder dat dit zichtbaar is. Andere voorbeelden van het combineren van de opwekking van zonne-energie met andere functies zijn zonnecellen geïntegreerd in geluidsschermen [28], in het wegdek [29], in ramen [30] van gebouwen en op auto's [31]. Dit integreren gaat dus veel verder dan het 'toevoegen' van standaard zonnepanelen aan een gebouw of object. Er is nog veel technologieontwikkeling nodig om dit duurzaam en betaalbaar te maken, zoals beschreven in het TNO whitepaper 'Zonpositief: zonne-energie op weg naar impact' [32].



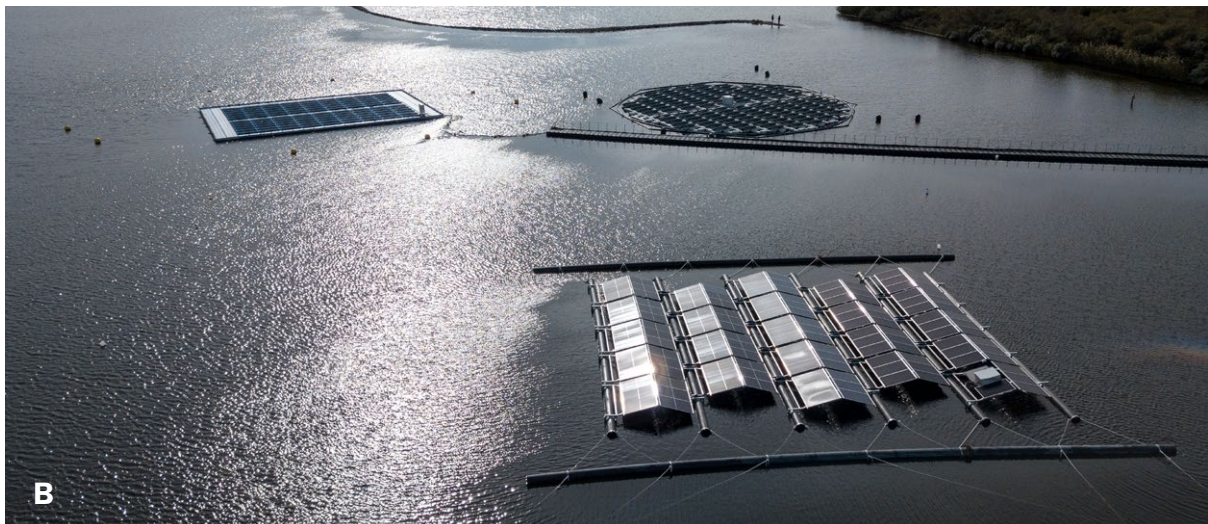
**Figuur 8** (a) Integratie van zonnepanelen in een façade. Bron: [NBA Architecten](#)  
(b) Integratie van flexibele zonnepanelen in dakpannen. Bron: [Solliance Solar Research](#)

### 3.1.2 Combinatie van functies in het buitengebied

Naast de genoemde geïntegreerde toepassingen is er ook in Nederland steeds meer sprake van grootschalige zonneparken op akkers, weilanden of andere terreinen in het buitengebied. Hierdoor ontstaat het risico van verdringing van andere activiteiten of aantasting van natuur, ecologie (biodiversiteit, bodemkwaliteit, etc.) of landschap. Om dit effect tegen te gaan wordt op diverse plaatsen geëxperimenteerd met zonneparken die energieopwekking combineren met andere functies zoals akkerbouw, tuinbouw of veeteelt (zogenaamde 'agri-voltaics'), recreatie of natuurontwikkeling (Figuur 9a) [33]. In dit verband is energielandschapsarchitectuur een belangrijk, relatief nieuw vakgebied [34,3]. Behalve op land, kunnen systemen ook drijvend op water worden geplaatst [36], zowel op binnenwateren als op zee. Dat geeft vele nieuwe mogelijkheden en een enorm extra potentieel (Figuur 9b), maar brengt zeker ook uitdagingen met zich mee op het gebied van duurzaamheid (ecologie), landschapskwaliteit en technologie. Voor duurzame benutting van het potentieel is het nodig om de impact op de (water)ecologie goed te begrijpen, in

<sup>10</sup> De vakterm voor zonnepanelen die onderdeel zijn van de gebouwschil is 'BIPV' (Building Integrated PhotoVoltaics). Er bestaan BIPV-zonnedaken, BIPV-zonnegevels en BIPV-zonneglas. Meer informatie en aanbieders zijn te vinden op de website van branchevereniging BIPV Nederland: <https://www.bipvnederland.nl>

relatie met onder meer systeemontwerp, materiaalkeuzes en onderhoudsschema's. Meerdere studies op dit gebied zijn inmiddels gestart of gaan de komende jaren van start.



**Figuur 9** (a) Zonnepark 'De kwekerij' in Hengelo (Gelderland) Bron: [De Kwekerij, Solarpark de kwekerij - Hengelo](#)

(b) Testopstellingen van zonnepanelen op water op het Oostvoornse Meer. Bron: TNO, [Unique research into floating solar panels launched](#)

## 3.2 ENERGIE- EN CO<sub>2</sub>-BALANS

In het begrip 'duurzaamheid' van zonne-energie, maar ook in de maatschappelijke en wetenschappelijke discussies, spelen uiteraard de benodigde energie-investering en de bijbehorende CO<sub>2</sub>-emissies een belangrijke rol. Het gaat bij zonne-energie immers om het opwekken van energie en het verminderen van CO<sub>2</sub>-emissies. Voor een goed begrip geeft Tabel 1 eerst een overzicht van veelgebruikte termen en hun definities.

| Begrip                                                                                    | Definitie                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Eenheid                                                                                                |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Energiegebruik                                                                            | De hoeveelheid energie die is gebruikt bij productie, installatie en in bedrijf, bijvoorbeeld per eenheid van systeemvermogen. Op dit moment is het leeuwendeel daarvan de bij productie 'ingebouwde' energie ( <i>embedded energy</i> ). Om goed te kunnen vergelijken tussen technologieën en landen en om de hiermee samenhangende emissies te kunnen bepalen is het belangrijk niet alleen de hoeveelheid, maar ook de aard van de energie te kennen (elektriciteit of warmte, waterkracht of kolen, etc.). Het is daarbij gebruikelijk om terug te rekenen naar equivalente primaire energie [37]. | J of kWh [per watt-piek (Wp)]                                                                          |
| Energieterug-verdientijd (energy pay-back time; EPBT)                                     | Het aantal jaren dat een systeem in bedrijf moet zijn om evenveel te produceren (of beter: om inzet van primaire energie in het elektriciteitssysteem te verminderen) als nodig was voor zijn productie en installatie, ofwel het aantal jaar voordat het systeem een netto energieproducent wordt. <sup>11</sup> Deze EPBT is regioafhankelijk omdat zowel de opbrengst van een zonne-energiesysteem van regio tot regio varieert, als de 'efficiëntie' van de opwekkers die erdoor uit het elektriciteitssysteem worden verdrongen.                                                                   | Jaar                                                                                                   |
| Energierendement op geïnvesteerde energie (energy return on energy invested; ERol/ ERoEI) | De verhouding tussen de totale hoeveelheid door het systeem gedurende de levensduur geproduceerde energie en de totale hoeveelheid energie die gedurende die levensduur is geïnvesteerd. Ook deze is regioafhankelijk.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | -                                                                                                      |
| CO <sub>2</sub> -voetafdruk                                                               | Uitstoot van broeikasgassen bij productie, installatie en bedrijf. Om dit te kunnen bepalen is het belangrijk te weten welk soort energie is gebruikt, zoals kolen of waterkracht.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | kg CO <sub>2</sub> -equivalent per watt-piek (Wp) systeemvermogen of per kWh geproduceerde zonnestroom |
| CO <sub>2</sub> -terugverdientijd (CO <sub>2</sub> pay-back time; CPBT)                   | Het aantal jaren dat een systeem zonnestroom moet produceren en daarmee andere vormen van opwekking met CO <sub>2</sub> -emissies vervangen/ verdringen om de CO <sub>2</sub> die is geproduceerd bij fabricage (en installatie en bedrijf) te compenseren, ofwel het aantal jaar voordat het systeem netto de CO <sub>2</sub> -uitstoot vermindert. Ook deze indicator is regioafhankelijk (zie EPBT).                                                                                                                                                                                                 | Jaar                                                                                                   |

**Tabel 1:** Overzicht van veelgebruikte termen die worden gebruikt om de duurzaamheid van zonnestroom en zonnepanelen te kwantificeren.

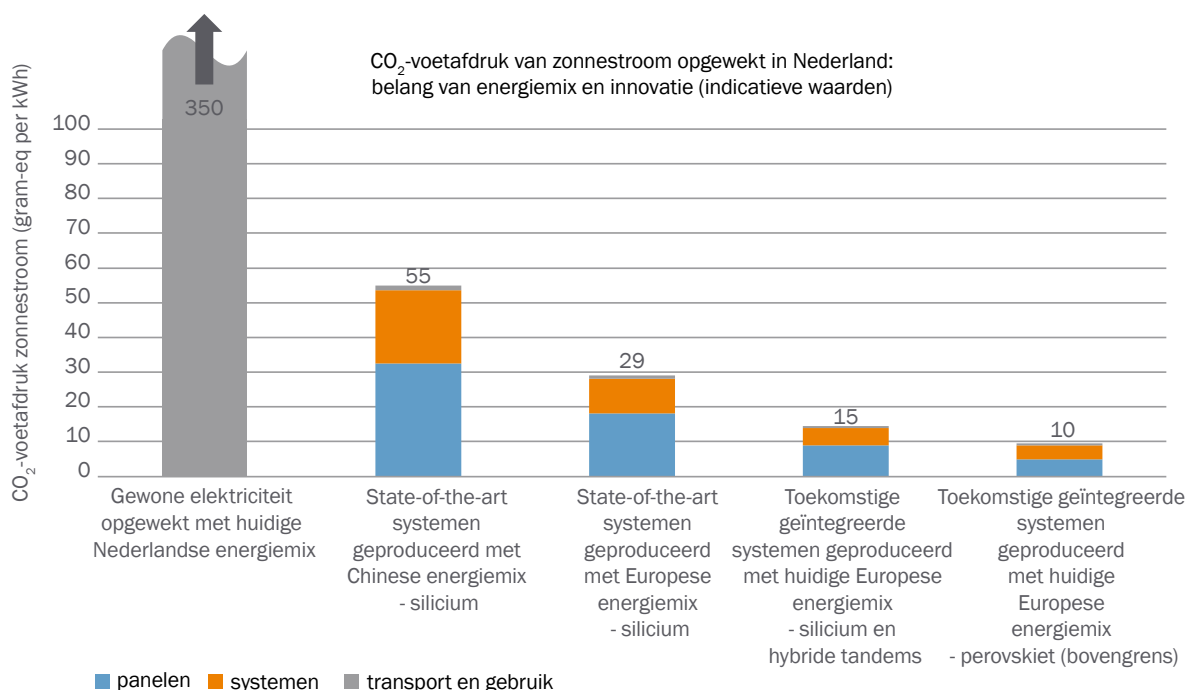
<sup>11</sup> Merk op dat het energiegebruik in de gebruiksfase en voor recycling of afdanken meestal niet wordt meegenomen bij de bepaling van de energierterugverdientijd.

De *energieterugverdientijd* van zonne-energie werd in 2018 op basis van eerder gepubliceerde gegevens en (meta)analyses voor gebieden met gematigde instraling zoals Nederland geschat op 1 tot 4 jaar, onder meer afhankelijk van het type technologie. Het *rendement op geïnvesteerde energie* bedraagt dan grofweg een factor 7 tot 25 [21]. Deze schattingen hebben een vrij brede range omdat hierin cijfers zijn samengenomen voor verschillende technologieën (dunnefilm en kristallijn silicium) en uit verschillende literatuurbronnen. Een recente analyse geeft voor state-of-the-art siliciumgebaseerde systemen geproduceerd in China en geïnstalleerd in Noordwest-Europa een energierugverdientijd van 1,3 jaar [22]. Daarmee komt het rendement op geïnvesteerde energie op ongeveer 20.



### SCHONERE PRODUCTIE

De CO<sub>2</sub>-voetafdruk ('carbon footprint') van zonnestroom opgewekt in Freiburg, Duitsland (instraling 1330 kWh/m<sup>2</sup>/jaar) werd in een recente studie [38] berekend op 43 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh<sup>12</sup> voor state-of-the-art siliciumgebaseerde systemen geproduceerd met de energiemix van China (met veel kolencentrales) en 23 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh voor systemen geproduceerd met de Europese energiemix. Van deze afdruk komt ongeveer 60% voor rekening van de panelen en 40% van de overige systeemonderdelen, het transport en de gebruiksfase. Als de energiemix van Noorwegen (met veel waterkracht) zou worden gebruikt was de voetafdruk nog kleiner: 17 g. Voor de Nederlandse instraling komen deze getallen respectievelijk op ongeveer 55, 29 en 21 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh (Figuur 10). Deze cijfers tonen de grote invloed van de productielocatie, of liever de energiemix op de CO<sub>2</sub>-voetafdruk. Het is in dit verband belangrijk te benadrukken dat een verduurzaming van de energiemix gebruikt bij productie van zonnepanelen en andere onderdelen automatisch leidt tot een (verdere) verkleining van de CO<sub>2</sub>-voetafdruk van zonnestroom.



**Figuur 10:** CO<sub>2</sub>-voetafdruk van zonnestroom uit huidige en toekomstige systemen, in vergelijking met de elektriciteit opgewekt met de gemiddelde energiemix in Nederland (indicatieve waarden). De voetafdruk van zonnestroom uit toekomstige systemen is een bovengrens omdat die kleiner wordt naarmate de energiemix gebruikt voor productie duurzamer wordt. Als bronnen zijn o.a. [24, 38, 39] en eigen inschattingen gebruikt. Opmerking: de 'end-of-life' fase is hier buiten beschouwing gelaten, zie tekst.

<sup>12</sup> Een waarde die goed overeenkomt met het geometrisch gemiddelde van 42 gram/kWh over verschillende technologieën en LCA studies in een recente geharmoniseerde review van Blanco et al. (2019) [41].

Voor zonnestroom uit dunnefilmsystemen op basis van de huidige industrieel geproduceerde technologieën (CIGS en CdTe) werd de CO<sub>2</sub>-voetafdruk in 2018 geschat op 18 tot 26 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh [40]. Dit is ongeveer helft van de afdruk van stroom uit siliciumsystemen geproduceerd in China. In het afgelopen decennium is deze CO<sub>2</sub>-voetafdruk aanzienlijk kleiner geworden, onder meer door hogere opwekrendementen van zonnepanelen en door verminderd materiaalgebruik.

---

## Zonne-energiesystemen leveren over hun levensduur 20x zoveel energie als het kost om ze te maken.

Figuur 10 geeft ook de indicatieve voetafdruk van zonnestroom opgewekt met toekomstige systemen. Door innovaties op paneel- en systeemniveau is die veel kleiner dan voor systemen van vandaag. Een hoger omzettingsrendement, geringer materiaalverbruik, toepassing van nieuwe materialen, processen en zonneceltypen (waaronder perovskietgebaseerde zonnefolies) en integratie van systemen leiden tot (nog) betere klimaatprestaties. In deze figuur is de huidige energiemix aangenomen, waardoor de getallen een bovengrens aangeven.

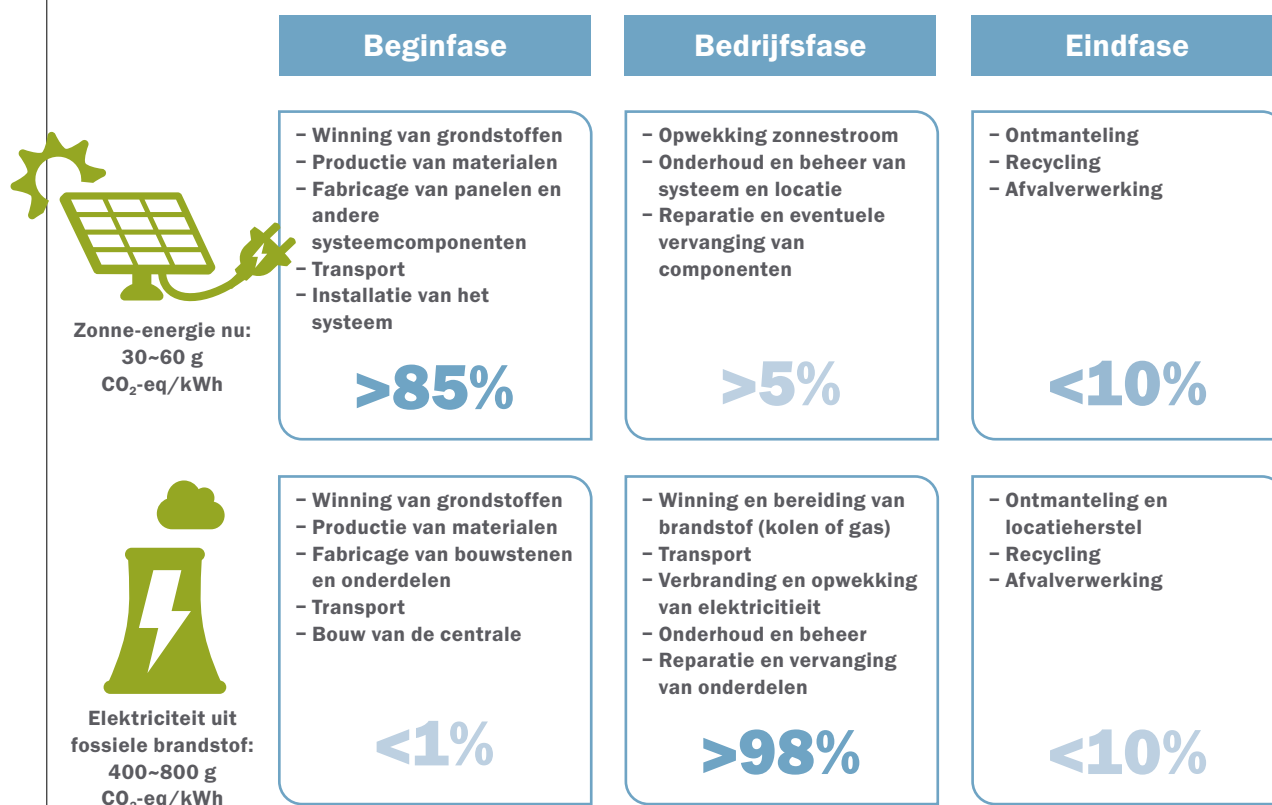
Ter vergelijking: de CO<sub>2</sub>-voetafdruk van elektriciteit opgewekt in een moderne kolencentrale bedraagt ongeveer 730 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh [42], oudere centrales komen op 800 tot 1000 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh [43]. Gascentrales hebben een uitstoot per kWh geproduceerde elektriciteit die ongeveer de helft is van kolencentrales. Hiermee is de uitstoot per kWh van zonnestroom nu al een factor 13 tot 25 lager dan die van een kolencentrale, gemiddeld over de totale levensduur van het zonne-energiesysteem (meestal op 25 jaar gesteld) en afhankelijk van waar het systeem is geproduceerd. Gemiddeld is de uitstoot in Nederland voor de gehele energiemix 350 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh (Figuur 10). Het moet worden opgemerkt dat, anders dan bij kolen- of gascentrales, bij hernieuwbare energiesystemen op zon of wind het rendement op geïnvesteerde energie en CO<sub>2</sub> zal toenemen met de levensduur van de systemen. Immers, gedurende hun levensduur blijven kolen- en gascentrales brandstoffen verbruiken, terwijl hernieuwbare systemen als zon en wind vrijwel zonder extra kosten en CO<sub>2</sub>-uitstoot elektrische energie blijven leveren.

De CO<sub>2</sub>-terugverdientijd van zonnestroom hangt niet alleen af van de emissies die samenhangen met productie, installatie en bedrijf van het systeem, maar ook met de emissies van de elektriciteit waarvoor zonnestroom in de plaats komt. Voor dat laatste kan het gemiddelde van de energiemix worden gebruikt, maar er zijn ook goede argumenten om het deel van de mix te nemen dat wordt verdrongen, bijvoorbeeld de elektriciteit uit kolencentrales. Met andere woorden: zonne-energie wordt niet geïnstalleerd om windenergie te verdringen, maar centrales gestookt met fossiele energie. Een enigszins kunstmatig gevolg van het gebruik van de gemiddelde energiemix in de berekening is ook dat de CO<sub>2</sub>-terugverdientijd zou toenemen naarmate het aandeel hernieuwbare energie in de mix toeneemt. Afhankelijk van de aannames kan de CO<sub>2</sub>-terugverdientijd dus variëren. Wanneer zonnestroom uit Chinese panelen in Nederland stroom vervangt uit een moderne kolencentrale, dan geeft dat een CO<sub>2</sub>-terugverdientijd van ongeveer 2 jaar. Uitgaande van vervanging van de gemiddelde energiemix in Nederland is dit echter 4 jaar. Voor in Europa geproduceerde systemen zijn de CO<sub>2</sub>-terugverdientijden respectievelijk

1 en 2 jaar, voor in Noorwegen geproduceerde systemen nog lager. Meer informatie over de energie- en de CO<sub>2</sub>-terugverdientijd is te vinden in de Appendix.

In de voorgaande berekeningen is de 'end-of-life-' of afdankfase vooralsnog buiten beschouwing gelaten omdat daarvoor nog geen duidelijke en gestandaardiseerde methoden zijn afgesproken en omdat sommige gegevens nog niet beschikbaar zijn (bijvoorbeeld omdat recyclingprocessen nog in ontwikkeling zijn). Figuur 11 schetst een globale indicatie op basis van literatuur en eigen expertinschattingen van de CO<sub>2</sub>-uitstoot verbonden met de verschillende fasen van de levenscyclus van centrales op basis van fossiele brandstof en van zonne-energie. Merk op dat voor zonnepanelen de effectieve CO<sub>2</sub>-uitstoot in de Eindfase ("afdankfase") nog onduidelijk is. In sommige berekeningen wordt deze zelfs als negatief weergegeven [44], omdat men aanneemt dat de energie- en klimaatwaarde van de teruggewonnen materialen voor hergebruik hoger is dan de investering die nodig is voor het terugwinnen. We kennen een soortgelijke situatie bijvoorbeeld al van primair en secundair (gerecycled) aluminium. In Figuur 11 is die mogelijke winst nog niet verwerkt en die geeft daarmee een 'worst case scenario'.

### Relatieve CO<sub>2</sub>-uitstoot per fase (indicatieve verhoudingen)



**Figuur 11:** Indicatieve verdeling van relatieve CO<sub>2</sub>-uitstoot tijdens de verschillende fasen van de levensduur van elektriciteitscentrales gebaseerd op zonnepanelen en op fossiele brandstof. Deze figuur is een bewerking van de figuur in [45] voor zonnestroom mede gebruikmakend van gegevens uit [45] en eigen inschattingen.

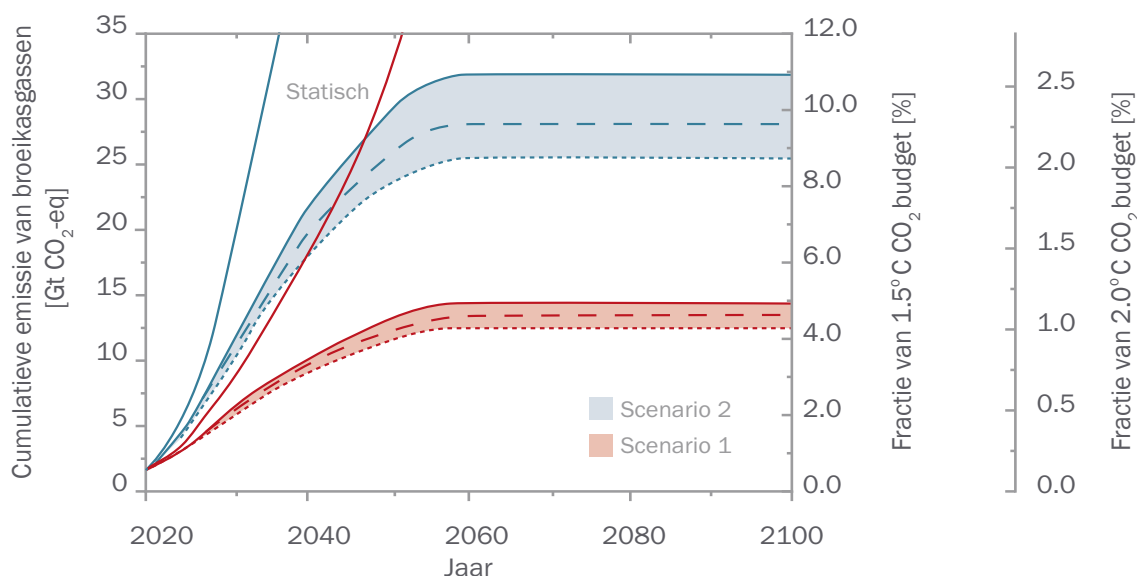
### 3.2.1 Totale CO<sub>2</sub>-emissies door productie van zonne-energiesystemen

Om zoals afgesproken in het Klimaatakkoord van Parijs (2015) de wereldwijde opwarming te beperken tot maximaal 1,5°C<sup>13</sup>, zouden we als mensheid vanaf 2015 naar schatting nog maximaal 800 Gigaton CO<sub>2</sub> mogen uitstoten voordat we daar in 2050 helemaal mee gestopt zijn. Eind 2021 was van dit ‘budget’ nog minder dan 330 Gigaton over [46]. De momenteel dominante zonnestroomtechnologie (monokristallijn silicium type ‘PERC’) heeft in huidige productie in China een geschatte CO<sub>2</sub>-voetafdruk van 1,3 Gigaton CO<sub>2</sub>-eq per TWp op niveau van het zonne-energiesysteem [24]. De panelen nemen daarvan ongeveer twee derde voor hun rekening. Opbouw van een capaciteit van 60 TWp zou daarmee een uitstoot van zo’n 80 Gigaton CO<sub>2</sub>, ofwel een kwart van het resterende budget voor het 1,5°C scenario veroorzaken. Bij verdere groei van het geïnstalleerd vermogen zou dit nog toenemen. Een andere berekening komt op zo’n 18% van het resterende 1,5°C budget [39]. Een zo grote uitstoot is natuurlijk onacceptabel en gelukkig ook helemaal niet nodig.

Door voortdurende technologische verbetering en het zoveel mogelijk vermijden van het gebruik van fossiele brandstoffen in de productieketen kan het benodigde CO<sub>2</sub>-budget namelijk enorm gereduceerd worden. Figuur 12 toont de CO<sub>2</sub>-emissies en het gebruik van het resterende CO<sub>2</sub>-budget gebaseerd op de cijfers uit 2020 voor 1.5°C en 2°C temperatuurstijging bij gelijkblijvende technologie en energiemix (“Statische” lijnen). Daarnaast toont het de cijfers voor zich steeds verder ontwikkelende technologieën (technologisch ‘leren’; het effect van innovatie en schaalvergroting), in combinatie met een steeds duurzamere energiemix bij productie. De twee kleuren tonen twee scenario’s voor cumulatieve zonnepaneelinstallaties, zoals getoond in Figuur 6: blauw gaat uit van ongeveer 60 TWp in 2050, terwijl rood staat voor ongeveer 22 TWp. Figuur 6 toont ook dat beide scenario’s uitgaan van een verdere groei na 2050.

Figuur 12 toont dat het benodigde deel van het CO<sub>2</sub>-budget sterk afhankelijk is van de marktintroductie van technologische evoluties en revoluties op gebied van panelen en systemen (zoals bijvoorbeeld perovskiet-gebaseerde panelen [47] en geïntegreerde systemen). Naast deze effecten moet uitfasen van het gebruik van fossiele brandstoffen sowieso plaatsvinden. Op basis van een aantal factoren en aannames zouden de emissies die samenhangen met mondiale groei van zonne-energie kunnen worden beperkt tot 4-11% van het 1,5°C budget, zelfs bij toename tot 170 TWp in 2100 [24]. Dat is niet helemaal verwaarloosbaar, maar levert in die ambitieuze scenario’s dan wel de hoeksteen van de klimaatneutrale energievoorziening.

13 Het betreft de stijging van de gemiddelde wereldwijde temperatuur in het referentiejaar 2100. Hierna blijft in de scenario’s van het IPCC de temperatuur doorstijgen.



**Figuur 12:** Cumulatieve CO<sub>2</sub>-emissiescenario's voor de productie van zonne-energiesystemen door de wereldwijde zonne-energiesector. De emissie is weergegeven als cumulatieve CO<sub>2</sub>-uitstoot en als percentage van het beschikbare CO<sub>2</sub>-budget voor het 1.5°C- en het 2°C-scenario vanaf 2020 [24]. De "statische lijnen" beschrijven de situatie zonder verbeteringen, de scenario's 1 en 2 gaan uit van technologische ontwikkelingen met verschillende snelheden (de bandbreedte) en van verduurzaming van de energiemix bij productie (het afvlakken). De scenario's verwijzen naar twee verschillende installatiesnelheden, de cumulatieve productiecijfers hiervan zijn weergegeven in Figuur 6.

### 3.2.2 De volgende stappen



#### SCHONERE PRODUCTIE

Nu snelle vermindering van CO<sub>2</sub>-emissies topprioriteit krijgt, is dat een extra motivatie voor het uitbreiden van productie-faciliteiten in Europa: deze panelen hebben immers een lagere CO<sub>2</sub>-uitstoot per kWh. De EU heeft in 2021 nog geen

overeenstemming kunnen bereiken over streefgetallen om de maximaal toelaatbare CO<sub>2</sub>-voetafdruk van hernieuwbare elektriciteit uit zonnepanelen te beperken en stapsgewijs te verlagen, maar het is een breed gedragen inzicht dat het zo snel mogelijk verkleinen van deze voetafdruk mogelijk en noodzakelijk is.



#### – MAATSCHAPPELIJK VERANTWOORDE PRODUCTIE – EERLIJKE VERDELING VAN KOSTEN EN BATEN

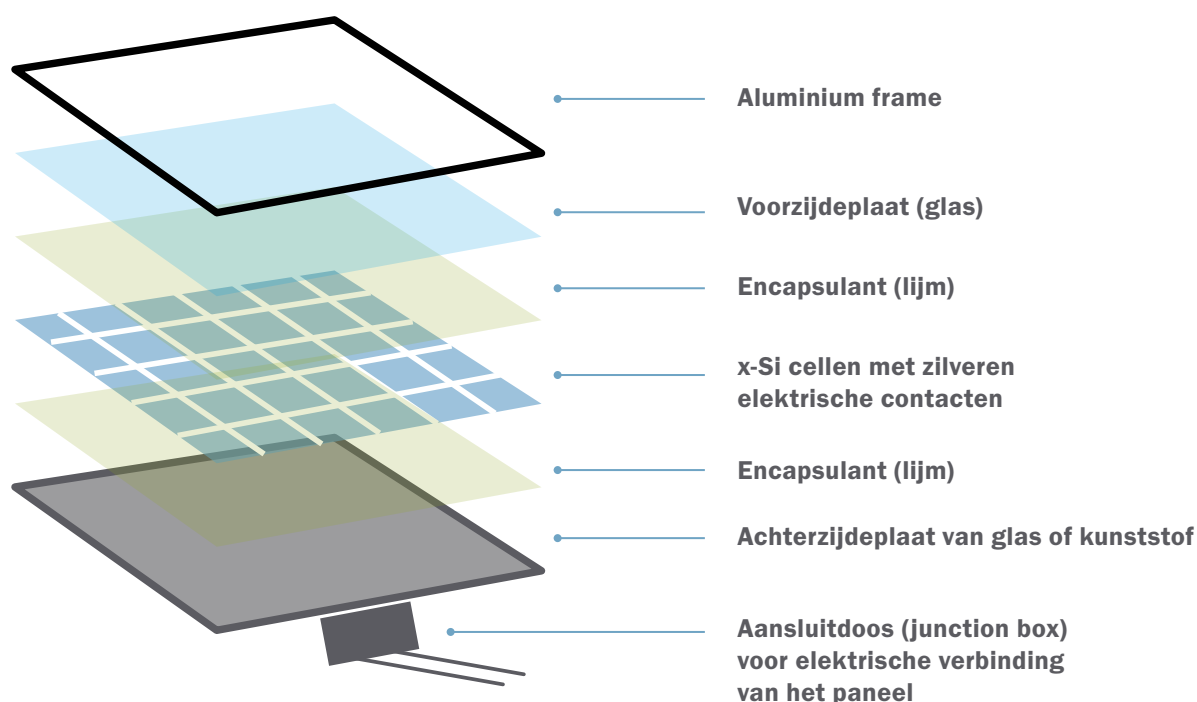
Behalve het opwekken van zonnestroom, vragen ook de eventuele extra maatregelen voor energiesysteemintegratie een investering in energie en daarmee op dit moment tevens in CO<sub>2</sub>. Zo heeft bijvoorbeeld ook opslag in batterijen een CO<sub>2</sub>-voetafdruk [48], ook al brengt hun toepassing zeer duidelijk CO<sub>2</sub>-voordelen mee. Een gedetailleerde bespreking van de

duurzaamheidsaspecten van energiesysteemintegratie van zonne-energie vraagt inzicht in de aard, de omvang en de snelheid van de maatregelen in het gehele energiesysteem en dat ontbreekt op dit moment nog. Daarom beperken we ons tot de -zeer belangrijke- aspecten van stroomopwekking, waarbij ook al enkele belangrijke keuzes gemaakt kunnen worden.

Vanwege de kosten, maar ook vanwege de duurzaamheidsaspecten die gemoeid zijn met energiesysteemintegratie is het belangrijk om het ontwerp en de plaatsing van zonnestroomsystemen niet alleen te optimaliseren voor minimale opwekkosten, maar een breder perspectief te kiezen. Welke keuzes geven de laagste kosten of klimaatimpact voor de samenleving? Makkelijker gezegd dan gedaan, maar er valt veel te winnen. Een belangrijke opgave en een gezamenlijke zoektocht voor de komende periode waarin zonnestroom verder groeit naar impact.

### 3.3 GRONDSTOFFEN EN MATERIALEN

Het materiaalgebruik is een zeer belangrijk onderwerp voor de duurzaamheid van zonnepanelen, zowel in relatie tot productie als bij de ontwikkeling van end-of-life scenario's. Het gebruik van grondstoffen en materialen is sterk afhankelijk van het type zonnepaneel en in iets mindere mate van het type systeem. Daarnaast zijn het netto gebruik, de hoeveelheid die is 'opgesloten' in de panelen zolang ze hun werk doen en de hoeveelheid die 'weglekt' uit de keten afhankelijk van de gebruiksduur en van de mate waarin recycling plaatsvindt.



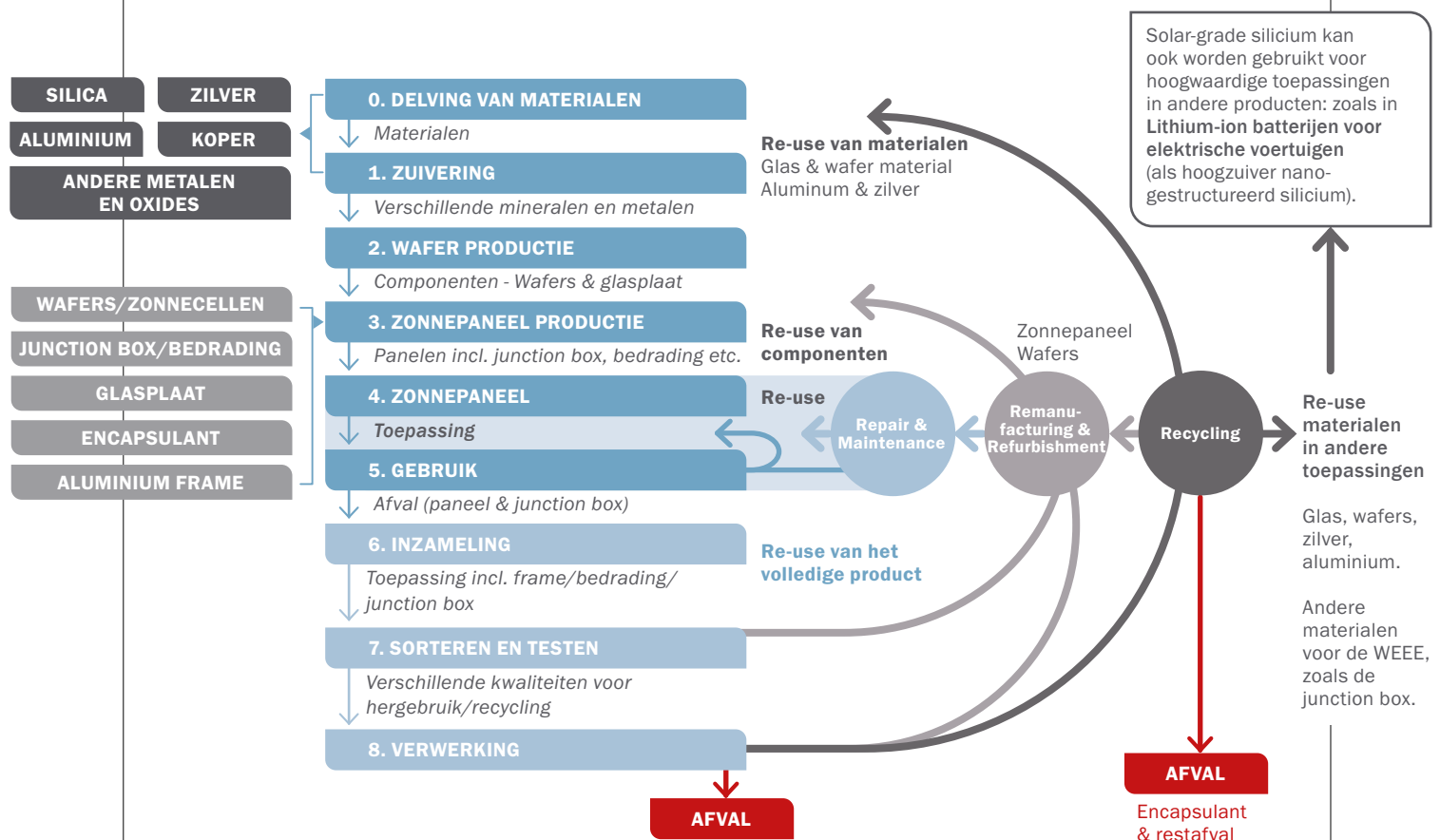
**Figuur 13:** Opbouw van een standaard kristallijn silicium paneel.

De materialen die benodigd zijn om een kristallijn silicium zonnepaneel te maken staan aangegeven in Figuur 13. In het hart van het paneel zitten de zonnecellen, waarin het zonlicht wordt omgezet in elektriciteit. Deze worden ingepakt door een transparante plaat aan de voorzijde (meestal glas) en een al dan niet transparante plaat of folie aan de achterzijde (glas of kunststof). In het geval van een transparante achterzijde kan het paneel dubbelzijdig werkend worden uitgevoerd. Om alles aan elkaar te maken wordt een transparante kunststof (encapsulant) gebruikt: een soort lijm bestaande uit polymeren die smelten en uitharden. Deze kunststof zorgt voor een goede optische koppeling (bijvoorbeeld geen lucht tussen de cellen en het glas aan de voorzijde) en een mechanisch robuust geheel, vergelijkbaar met veiligheidsglas. Dit hele pakket beschermt de cellen en hun onderlinge verbindingen tegen weersinvloeden van buitenaf (vocht, stof, zand, uv-straling, etc.) en tegen mechanische beschadiging tijdens installatie en gebruik (montage, wind, sneeuw, etc.). Tot slot en heel belangrijk zorgt het voor elektrische veiligheid. Vaak wordt het paneel van een aluminium of kunststof frame voorzien, maar dat hoeft niet per se. Daarnaast heeft een paneel een aansluitdoos (*junction box*) voor de elektrische verbinding met andere panelen of de omvormer.

Dunnefilm panelen zijn vergelijkbaar opgebouwd, maar hebben meestal geen encapsulant (lijm) aan de achterkant omdat de cellen direct op glas of folie zijn aangebracht. Ze kunnen bovendien flexibel worden uitgevoerd met buigbare verpakkingsmaterialen aan zowel voor- als achterzijde. We spreken dan van zonnefolies.

### 3.3.1 Productie, gebruik en levenseinde van zonnepanelen

Het paneel zoals getoond in Figuur 13 kent verschillende levensfasen. Figuur 14 toont de processen, materialen, componenten en producten tijdens de fabricage-, gebruiks- en afdankfase en de verschillende mogelijkheden voor levensduurverlenging en hergebruik. Het resultaat van een succesvolle circulariteitsstrategie is dat de hoeveelheid afval (in rood) zeer gering is ten opzichte van het totaal.



**Figuur 14:** Processen, materialen, componenten en producten in de productie-, gebruiks- en afdankfase van een kristallijn silicium zonnepaneel.

### 3.3.2 Beschikbaarheid van materialen

Diverse materialen die voor hernieuwbare energieopwekking (zon en wind) gebruikt worden, zijn nu al als grondstof [49] in beperkte hoeveelheden beschikbaar. Bij grootschalige toepassing kan schaarste een probleem gaan vormen, vooral omdat deze materialen vaak ook voor tal van andere toepassingen nodig zijn. Winbare reserves van dergelijke materialen kunnen maar langzaam groeien, omdat nieuwe mijnbouwlocaties een ontwikkeltijd van 10 tot 20 jaar vergen. Zo zijn de huidige materialen voor het maken van elektrische contacten en verbindingen, zoals de metalen zilver en koper, over 30 jaar niet zonder meer voldoende voorhanden [50]. Dat betekent dat er belangrijke innovaties nodig zijn om verbruik te verminderen of dat er op termijn uitgeweken moet worden naar alternatieven.

#### NIEUWE MATERIALEN



- MINDER MATERIAAL GEBRUIK
- MEER HERGEBRUIK

Het winnen van metalen uit minder gunstige mijnen of op minder toegankelijke locaties kost meer energie en er zijn scenario's die voorspellen dat in 2050 tot wel 40% van het wereldwijde energieverbruik gaat zitten in het extraheren van

metalen [51]. Op dit moment is het al zo dat de winning van 1 ton koper 250 ton afvalmateriaal oplevert. Hergebruik in circulaire processen is daarom niet alleen noodzakelijk vanwege onvoldoende beschikbaarheid of voor verminderd gebruik van materialen, maar ook omdat de keten anders minder effectief wordt in termen van netto energieproductie. Daarnaast kan de winning van metalen gepaard gaan met negatieve bijeffecten voor ecosystemen en mensen en resulteren in conflictisico's. De nationale doelstelling is om 50% minder primaire grondstoffen (mineraal, fossiel, en metalen) te gebruiken in 2030 [52].

De huidige kristallijn silicium zonnepanelen bestaan qua volume en gewicht vooral uit glas, silicium en kunststoffen (encapsulant en eventueel de achterzijdefolie) en eventueel aluminium voor een frame. De grondstoffen voor glas en silicium zijn ook bij zeer grootschalige toepassing in voldoende mate beschikbaar. Silicium is op zichzelf geen schaars materiaal, integendeel, het is een van de meest voorkomende elementen in de aardkorst. In praktische zin kan de beschikbaarheid echter wel degelijk beperkt zijn door de productiecapaciteit [24]. Het benodigde zeer zuivere silicium wordt momenteel namelijk alleen geproduceerd uit het mineraal kwartsiet, waarvan de voorraden beperkt zijn. Daarnaast is het omzettingsproces zeer energie-intensief. De productie concentreert zich bovendien op slechts enkele plaatsen op de wereld en is door de EU als (politiek/strategisch) 'kritiek' bestempeld [53]. Op dit moment wordt jaarlijks ongeveer een half miljoen ton hoogzuiver silicium geproduceerd (meestal polysilicon genoemd). De hoeveelheid silicium per watt-piek is in de afgelopen 13 jaar gedaald van 16 gram/Wp naar 3,5 gram/Wp, maar ook bij een nog veel lager gebruik van 2 gram/Wp is voor 60 TWp cumulatief 120 miljoen ton hoogzuiver silicium nodig. Een nadere analyse van de consequenties van dit grote volume moet nog gemaakt worden.

Ook voor glas, dat grotendeels bestaat uit  $\text{SiO}_2$ , is beschikbaarheid geen automatisme: hoewel het geproduceerd wordt uit zand, moet dit zand zuiver en laag in ijzer zijn, zodat lang niet alle voorraden hiervoor bruikbaar zijn. Bovendien moet de productiecapaciteit voor de benodigde honderdduizenden vierkante kilometers beschikbaar zijn. Bij een productie van 2 TWp aan panelen met een rendement van 25% per jaar is 8000 km<sup>2</sup> glas nodig. Dat is bijna net zoveel als het huidige totale gebruik van vlakglas voor de bouw en andere sectoren.

---

**Beschikbaarheid van grondstoffen en materialen kan de groei van zonne-energie belemmeren als we niet tijdig maatregelen nemen.**

Omdat het bij CIGS-, CdTe- en perovskiet-panelen om dunnefilm zonnecellen van hooguit enkele micrometers dik gaat, is het materiaalgebruik voor de actieve lagen per paneel in absolute zin beperkt, maar voor sommige materialen kan de totale vraag toch groot worden in vergelijking met de schaarse voorraden.

De dunnefilm technologieën die nu op de markt zijn (CdTe en CIGS) bevatten één of meer schaarse elementen die toepassing op multi-TW-schaal moeilijker maken (tellurium<sup>14</sup>, indium<sup>15</sup> en gallium). Perovskiet-gebaseerde dunnefilm zonnepanelen zouden in de komende tien jaar een doorbraak kunnen betekenen (bij voldoende stabiliteit en een oplossing voor het omgaan met lood<sup>16</sup> als toxische component):



– NIEUWE TYPE  
ZONNEPANELEN  
– NIEUWE MATERIALEN

GESTAPELDE ZONNEPANELEN  
(TANDEMS)

een voorbeeld van technologische revolutie. Daarbij gaat het in dit verband vooral om een laag verbruik van bovendien ruim beschikbare materialen voor de actieve lagen. Dat voordeel wordt daarnaast gecombineerd met een zeer korte energierugverdiëntijd en zeer lage CO<sub>2</sub>-voetafdruk op het niveau van de panelen of folies<sup>17</sup>, een verwachte lage kostprijs, een hoge productiesnelheid met lagere investeringskosten, en een hoge mate van inpasbaarheid

(flexibiliteit, vormvrijheid, transparantie). Om deze redenen is de ontwikkeling van perovskiet-gebaseerde zonnestroomsystemen belangrijk en een prioriteit in veel onderzoekprogramma's, ook bij TNO. Perovskiet-panelen en perovskiet-gebaseerde tandempanelen voor grootschalig gebruik zijn nog niet op de markt, maar de verwachting is dat dat in de komende jaren zal veranderen en daarom is het belangrijk ze nu al in de beschouwingen mee te nemen.

### 3.3.3 Giftige en potentieel schadelijke stoffen



MAATSCHAPPELIJK  
VERANTWOORDELIJKE  
PRODUCTIE

Bij de productie van zonnepanelen wordt een aantal giftige en andere potentieel schadelijke stoffen gebruikt, zowel in het fabricageproces als voor het product zelf. Welke stoffen dat zijn, hangt wederom af van het type zonnepaneel en de gebruikte processen.

De meest genoemde stoffen zijn lood (in de soldeer) bij kristallijn silicium zonnepanelen, cadmium bij CdTe-zonnepanelen en selenium bij CIGS-panelen<sup>18</sup>. Van deze stoffen worden relatief kleine hoeveelheden gebruikt die bovendien bij normaal gebruik ook niet vrijkomen. Toch zijn er drie potentiële risicosituaties waarin deze stoffen wel vrij zouden kunnen komen: brand, uitloging na paneelbreuk, of uitloging na stort op een slecht beheerde stortplaats (zonder opvang van water). Voor deze drie risicosituaties is onderzocht hoeveel er van de genoemde stoffen in het milieu kan komen. Uit deze onderzoeken blijkt dat de uitstoot van deze stoffen naar het milieu steeds binnen de geldende veiligheidsnormen blijft, ook bij worst-case omstandigheden [53,54,55]. Bij vergelijking van zonne-energie met elektriciteit uit fossiele brandstof blijkt dat de hoeveelheid giftige stoffen die vrijkomt per kWh zonne-energie veel lager is dan de hoeveelheid die vrijkomt bij de productie van een kWh elektriciteit uit aardgas of steenkool [57]. Niettemin vindt er veel onderzoek plaats naar manieren om giftige en

14 Er is 20-40 ton tellurium (Te) nodig voor 1 GWp CdTe terwijl wereldvoorraad ruim 30.000 ton bedraagt; de huidige wereldproductie is ruim 500 ton Te/jaar, waarvan 40% wordt gebruikt voor zonnestroom [58,59].

15 Er is 15,5 ton indium (In) nodig per GWp CIGS, terwijl er momenteel 900 ton In/jaar beschikbaar is. Als 35% hiervan voor zonnestroom wordt gebruikt, kan 20 GWp/jaar aan CIGS geproduceerd worden. Groei in beschikbare Indium (factor 4) en verbeterde efficiëntie van CIGS zijn voorzien, waardoor >100GW/jaar produceerbaar is [60].

16 Er is 1,5-3 ton lood (Pb) nodig per GWp perovskiet (afhankelijk van samenstelling en rendement); commercieel product van Oxford PV bevat 0,3 gram lood per vierkante meter [61].

17 Omdat voor de opwekking van zonnestroom niet alleen panelen, maar complete systemen nodig zijn wordt de voetafdruk per kWh bepaald door meer dan de panelen alleen. Niettemin hebben de panelen grote invloed en is de verwachte voetafdruk voor zonnestroom uit perovskiet-gebaseerde systemen aanzienlijk lager dan die uit evolutionair verbeterde systemen; zie Figuur 10.

18 CdTe- en CIGS- zijn twee soorten dunnefilm zonnepanelen. Zie 2.1 voor de korte beschrijving van de diverse zonne-energie technologieën.

andere potentieel schadelijke stoffen zoveel mogelijk te vermijden. Zo zijn er intussen meerdere leveranciers die loodvrije silicium zonnepanelen aanbieden.

Lood wordt, zoals reeds opgemerkt, ook gebruikt in perovskiet, althans in de variant die tot nu toe met afstand de best presterende zonnecellen levert. Het gaat daarbij om zeer geringe hoeveelheden [61] (typisch 0,3 gram per m<sup>2</sup>), maar dat betekent niet automatisch dat het wat betreft regelgeving of marktacceptatie geen probleem kan vormen wanneer perovskiet-panelen op de markt worden gebracht. Er wordt wereldwijd veel onderzoek gedaan aan zonnecellen op basis van loodvrije perovskieten, maar het is nog niet zeker of die qua prestaties voldoende dicht in de buurt zullen kunnen komen van hun loodhoudende familieleden om grootschalig te kunnen worden gebruikt. Een alternatief is om (ook in de regelgeving) te accepteren dat perovskietpanelen lood bevatten, omdat hun (klimaat)voordelen opwegen tegen het nadeel van loodhoudendheid.

Een ander potentieel milieuprobleem bij zonnepanelen zijn fluorverbindingen in de achterzijdefolie van de panelen. Deze fluorverbindingen zijn onderdeel van een groep stoffen die bekend staat onder de naam 'PFAS' (*per- and polyfluoroalkyl substances*) en zijn slecht of niet afbreekbaar als ze in het milieu terecht komen. Na afdanking zijn de fluorhoudende achterzijdefolies niet te recyclen en bij verbranding komen giftige fluorverbindingen vrij, zie ook de volgende paragraaf. Voor deze folies zijn er intussen meerdere alternatieven op de markt. Men kan kiezen voor een folie van fluor- en chloorvrije kunststof of voor een achterplaat van dun glas.



#### EERLIJKE VERDELING VAN KOSTEN EN BATEN

Een probleem dat sinds enige tijd aandacht krijgt, is dat bij een grote brand van een gebouw met zonnepanelen kleine fragmenten van zonnecellen of -panelen kunnen vrijkomen. Deze scherven zijn over het algemeen niet giftig, maar wel scherp.

Ze kunnen over een groot gebied verspreid raken - afhankelijk van de hoeveelheid brandbaar materiaal, de omvang van de brand en de weersomstandigheden. Dit kan gevaar opleveren voor mens en dier en zorgen voor vervuiling van landbouwgewassen. Een probleem hierbij is dat nog niet duidelijk is wie deze deeltjes moet opruimen en wie daarvoor de rekening betaalt [62]. Het is duidelijk dat ook hier geldt: voorkomen is beter dan genezen. Er is dan ook grote aandacht voor brandveiligheid van zonne-energiesystemen. Daarbij gaat het grofweg om de volgende aspecten: kwaliteit en aard van gebruikte materialen en componenten, kwaliteit van het systeemontwerp en de installatie en actieve maatregelen om de brandveiligheid te vergroten, bijvoorbeeld door elektronische detectie van onregelmatigheden in het elektrisch gedrag van het systeem en onmiddellijke reacties daarop.

#### RECYCLING PROCESSEN



- WETGEVING
- CIRCULAIR MATERIAALGEBRUIK
- EERLIJKE VERDELING VAN KOSTEN EN BATEN

#### 3.3.4 Recycling

In vergelijking met veertien andere (WEEE-)afvalcategorieën<sup>19</sup> voor elektronisch afval hebben zonnepanelen de laagste restwaarde per kg vanwege het grote volume en de lage concentratie van waardevolle materialen. De restwaarde van een zonnepaneel is bijvoorbeeld 100 keer lager dan die van een mobiele telefoon. Het zou goed zijn als er voor zonnepanelen, gezien de lange productlevensduur, specifieke vereisten worden ingevoerd binnen de WEEE-regelgeving. Op Europees niveau wordt er binnen het Actieplan voor de

<sup>19</sup> WEEE = Waste from Electrical and Electronic Equipment [63].

Circulaire Economie een positieve ontwikkeling in de richting van hoogwaardiger recycling en gebruik van secundaire grondstofstromen verwacht.

Leveranciers van zonnepanelen zijn op grond van een Europese richtlijn<sup>20</sup> verplicht om zonnepanelen aan het einde van hun levensduur weer in te zamelen en te recyclen. Toch worden schaarse of waardevolle materialen, zoals hoogzuiver silicium, zilver en koper, hierbij in de praktijk nog nauwelijks teruggewonnen. Hier is dus nog veel winst te behalen. Het gebruik van zilver in x-Si zonnepanelen is de afgelopen tien jaar al fors teruggedrongen om kosten te besparen. Een belangrijke manier om het netto zilveragebruik nog verder terug te dringen, is om zilver te gebruiken dat is teruggewonnen uit afgedankte zonnepanelen. Op dit moment wordt dat nog niet gedaan, maar TNO werkt met partners aan processen om terugwinnen mogelijk te maken. Na het aantonen van de technische mogelijkheid is opschaling nodig om het ook economisch haalbaar te maken. Ook het waardevolle hoogzuivere silicium wordt op dit moment nog niet teruggewonnen voor hoogwaardig hergebruik in zonnecellen (of lithiumbatterijen). Omdat voor de productie van dat silicium veel energie nodig is, is dat vanuit duurzaamheidsoogpunt een enorme gemiste kans. Het is technisch en economisch een uitdaging om hoogwaardig silicium uit de afvalstroom te winnen, maar ook hier werken TNO en partners aan een oplossing die naar verwachting in de komende jaren beschikbaar komt [65].

---

## Schaarse en waardevolle materialen in zonnepanelen worden op dit moment nog nauwelijks teruggewonnen.

Ook voor een qua grondstoffen op zichzelf niet schaars materiaal als glas, een essentieel onderdeel van vrijwel alle zonnepanelen, is hergebruik zeer belangrijk. Het is een hoogwaardig en waardevol materiaal en zoals hierboven beschreven is de productiecapaciteit beperkt en gaat het om miljoenen tonnen per jaar. Recycling van glas voor nieuwe hoogwaardige toepassingen is daarom belangrijk voor een duurzame toekomst; op dit moment gebeurt dat nog vrijwel niet [20,66].

Ook voor dunnefilm panelen is het belangrijk om de schaarse materialen terug te winnen. Voor CIGS-panelen is aangetoond dat het halfgeleidermateriaal voor meer dan 90% kan worden teruggewonnen [67]. Voor CdTe-panelen heeft de grootste fabrikant een *take-back* en recycling-systeem in gebruik, waarmee zij naar eigen zeggen meer dan 90% van het halfgeleidermateriaal terugwinnen uit de ingezamelde panelen [68]. Voor perovskiet-zonnecellen is op laboratoriumschaal niet alleen het recyclen van het halfgeleidermateriaal aangetoond [69], maar zijn uit het teruggewonnen materiaal weer nieuwe zonnecellen gemaakt van een vergelijkbare kwaliteit.

---

20 Dit is verplicht op grond van de WEEE-richtlijn 2012/19/EU [64].



## NIEUWE RECYCLING-TECHNIKEN

Er moet ook aandacht zijn voor de recycling van de polymere achterzijdefolies. Deze zijn samengesteld uit dunne lagen van verschillende polymeren en daardoor lastig te recyclen.

Verbranding is een onaantrekkelijke optie voor fluorhoudende folies, omdat dit extra veiligheidsmaatregelen vereist. Daarom is het belangrijk om andere materialen te gaan toepassen die wel volledig circulair kunnen worden verwerkt. In dit verband is bijvoorbeeld een combinatie van polyolefinen (voor hechting) en polypropyleen (als vochtbarrière) een van de aantrekkelijke alternatieven. Naast de achterzijdefolies bestaan ook de encapsulanten, zoals Ethyleen Vinyl Acetaat (EVA) uit polymeren. Het onthechten van dergelijke materialen is een lastig proces, dus deze materialen worden op dit moment verbrand, waarbij de warmte wordt gebruikt.

Een andere uitdaging is de onvoldoende verwerkingscapaciteit in Nederland voor het recyclen van zonnepanelen, zelfs voor de beperkte scope van de huidige recycling. Dit zorgt niet alleen voor vragen over de continuïteit, maar betekent ook onzekerheid in de financiering hiervan. Tariefstijgingen van 30% vanwege de groei in het aanbod bij buitenlandse verwerkers in 2021 zijn een logisch gevolg van de schaarste aan recyclemogelijkheden en van de aanscherping van de EU-regelgeving. In Nederland werden in het jaar 2020 27.000 zonnepanelen verwerkt [70], terwijl er 10 miljoen nieuwe panelen werden geïnstalleerd. Slechts dit zeer kleine aantal van 27.000 wordt gefinancierd voor verwerking (zie 3.3.5.3).

### 3.3.5 Circulaire ontwerp oplossingen

In verband met materiaalgebruik en de impact van winning van grondstoffen, maar ook om een afvalberg te voorkomen, is het noodzakelijk de keten volledig circulair te maken. Hierbij moet al in de ontwerp- en productiefase rekening gehouden met de afdankfase. Dit kan de huidige praktijk van storten als elektronisch afval of laagwaardiger hergebruik veranderen in een circulair proces op basis van gelijkwaardig of hoogwaardiger hergebruik. Hiertoe moet aan een aantal voorwaarden worden voldaan:

- De huidige panelen zijn in ontwerp en materiaalgebruik niet geoptimaliseerd om aan het eind van hun levensduur weer in componenten en materialen te scheiden. Daarom moeten nieuwe panelen specifiek ontworpen worden om eenvoudige en volledige scheiding mogelijk te maken. Dit wordt aangeduid met de term ‘Ontwerp voor Circulariteit’ of ‘Design for Recycling’ (D4R) (hoofdstuk 3.3.5.1).
- Complexe primaire en secundaire basismaterialen voor zonnepanelen zijn vaak opgebouwd uit combinaties van verschillende materialen. Er moet gestreefd worden naar een hogere zuiverheid van de grondstoffen die door het recyclingproces moeten worden verwerkt en naar vermindering van het aantal heterogene materialen. Daarnaast moeten het ontwerp en de productie van zonnepanelen gebeuren met zoveel mogelijk identieke materialen. Aan het einde van de levensduur moet de samenstelling bekend zijn, zodat de recycling optimaal kan plaatsvinden. Hiervoor kan een Materialenpaspoort worden ingevoerd (hoofdstuk 3.3.5.2).
- Organiseren van een circulaire waardeketen, die ook eerlijk is ten opzichte van toekomstige partijen (hoofdstuk 3.3.5.3).

### 3.3.5.1 Design for recycling

#### ONTWERP VOOR CIRCULARITEIT



#### CIRCULAIR MATERIALEN- GEBRUIK

Een essentiële verbetering moet gezocht worden in het eenvoudig en zonder verontreiniging ontmantelen van het paneel.

De wetenschappelijke en technische uitdaging daarbij is om het ontwerp van het zonnepaneel te herzien, met als doel dat alle componenten op een eenvoudige manier volledig kunnen worden teruggewonnen voor gebruik in hoogwaardige producten. Dit kan er bijvoorbeeld voor zorgen dat werkende

zonnecellen uit een kapot paneel direct kunnen worden hergebruikt ("refurbish", R4 in Figuur 3). Bij een dergelijk ontwerp moet daarnaast rekening worden gehouden met het toepassen van minder schaarse materialen met een lage CO<sub>2</sub>-voetafdruk in combinatie met behoud of verbetering van functionaliteit.

Aanpassing en toepassing van circulair materiaal door industriële partijen is urgent met betrekking tot beperking van afvalstromen. De praktijk leert echter dat de directe overgang naar industriële fabricage van een compleet D4R-zonnepaneel een stap te ver is. Geleidelijke introductie van D4R-paneelcomponenten ter vervanging van recycling-onvriendelijke materialen kan hierbij een oplossing vormen.

Een kansrijke ontwikkeling op het gebied van Design for Recycling (Ontwerp voor Circulariteit) van zonnepanelen richt zich op het vervangen van het polymere encapsulatiemateriaal dat dient als hechtmateriaal tussen alle onderdelen van het paneel. Hedendaagse encapsulanten zijn alleen door verbrandingsprocessen te verwijderen, hetgeen gecontroleerde ontmanteling van panelen en terugwinning van waardevolle materialen hindert. Ook maakt verbranding hergebruik van de encapsulant zelf natuurlijk onmogelijk. TNO ontwikkelt en test samen met partners een nieuwe generatie van encapsulanten. Deze kunnen aan het einde van de levensduur van het zonnepaneel in een niet-hechtende begintoestand teruggebracht worden. Zonnecellen en glasplaten zijn daardoor eenvoudig(er) van elkaar te scheiden. Hierna kunnen zowel de materialen uit de zonnecellen als het zonnepaneelglas worden teruggewonnen.

Figuur 15 geeft een indicatief overzicht van de verschillende stappen in de ontwikkeling en industriële toepassing van recyclingtechnologieën en ontwerp voor circulariteit.



**Figuur 15:** Stappen in de ontwikkeling en industriële toepassing van recyclingtechnologieën en ontwerp voor circulariteit (indicatieve volgorde).

### 3.3.5.2 Een materialenpaspoort voor meer effectieve recycling

Om afvalbeheersing en circulariteit te bereiken, moet informatie over het paneel aan het einde van zijn levensduur beschikbaar zijn. Hierbij kan een databank met *materialenpaspoorten* een waardevolle ondersteuning zijn. Deze paspoorten moeten gedetailleerde informatie over de samenstelling van ieder individueel geproduceerd zonnepaneel opslaan in een betrouwbare en openbaar toegankelijke databank.



- TRANSPARANTIE VAN DE WAARDEKETEN
- CIRCULAIR MATERIAALGEBRUIK

Deze databank met materialenpaspoorten kan bijvoorbeeld worden uitgevoerd met behulp van een ‘digital ledger’ of ‘digitaal grootboek’ aanpak, zoals toegepast in een pilotproject voor recycling van plastic [71]. De databank

maakt het mogelijk om de individuele panelen te volgen van creatie tot circulatie met behulp van een QR-code voor elk paneel. Als eerste stap zal de fabrikant van het oorspronkelijke zonnepaneel dat moeten voorzien van een digitale badge die de componenten identificeert. Daarna moeten alle spelers zoals leveranciers, overheidsinstanties, afvalinzamelaars, detailhandel, partijen voor herfabricage en recyclers ook informatie kunnen toevoegen en inzien. Aan het einde van de levensduur kunnen de afvalinzamelaars de zonnepanelen sorteren op type en samenstelling door de badges te scannen. Hierdoor wordt de verwerking van de afgedankte zonnepanelen eenvoudiger en kunnen de terugwinningspercentages toenemen.

Dit zal leiden tot een efficiënter gebruik van grondstoffen, een meer winstgevend model voor de economie van recycelaat van zonnepanelen en bijdragen aan het genereren van een afzetmarkt in hoogwaardige applicaties.

---

Een materialenpaspoort kan een waardevol hulpmiddel zijn om circulariteit te bereiken.

### 3.3.5.3 Organiseren van de circulaire waardeketen

#### EERLIJKE VERDELING VAN KOSTEN EN BATEN



Tot 2014 betaalde elke Nederlandse consument een verwijderingsbijdrage bovenop de aankoop prijs van witgoed of elektronica. Die bijdrage was -in principe- kostendekkend voor de recycling van het betreffende apparaat. Producenten

stonden bovendien helemaal los van deze geldstroom. In 2014 is een omslagstelsel ingevoerd. Een recyclingbijdrage wordt niet gereserveerd voor de toekomstige verwerking van een apparaat of zonnepaneel dat een consument nu koopt, maar om de recycling van apparaten op dit moment te financieren. De bijdrage wordt verwerkt in de prijs en producenten zijn verantwoordelijk voor zowel de inzameling als de afdracht van het geld. De huidige producentenbijdrage voorziet er niet in om de toekomstige recycling van nu verkochte panelen te betalen. Werkelijke kosten zullen pas moeten worden betaald wanneer zonnepanelen die vandaag verkocht worden het einde van hun levensduur hebben bereikt. Partijen die nu zonnepanelen op de markt brengen en importeren zijn met het omslagstelsel niet meer verantwoordelijk voor recycling van afgedankte panelen, als zij tegen die tijd geen Nederlandse marktpartij zijn. De rekening komt dan in de eerste plaats bij consumenten en marktpartijen die tegen die tijd zonnepanelen op de markt brengen.

In het licht van het voorgaande is er dringend behoefte aan een eerlijker en waarschijnlijk houdbaarder systeem, waarin de afdracht gebaseerd is op de toekomstige inzameling en recycling voor zonnepanelen. Het opnemen in de afdracht van een bijdrage voor afvalbeheersing en voor onderzoek om zo snel mogelijk goede recyclingactiviteiten voor grondstoffenterugwinning uit zonnepanelen in Nederland mogelijk te maken, kan daaraan een belangrijke bijdrage leveren.

### 3.3.6 De volgende stappen

Om materialen, maar ook energie, te besparen is het dus van groot belang om kritisch te kijken naar de omgang met materialen tijdens en na de volledige levensduur van zonnepanelen. Hiervoor is het nodig om de hele zonne-energieketen circulair in te richten. Hierbij moet aandacht zijn voor alle aspecten van de R-ladder (sectie 1.5): het vermijden en slimmer maken van productie en gebruik, het verlengen van de levensduur van producten en onderdelen en het nuttig toepassen van materialen en energie uit producten. Om dit mogelijk te maken zijn ingrijpende technologische ontwikkelingen nodig, gecombineerd met wetgeving en stimulering.

## › 4. ZONNESTROOM VOOR DE LANGE TERMIJN: ZO SNEL MOGELIJK VAN HERNIEUWBAAR NAAR DUURZAAM

De transitie naar een energievoorziening die in belangrijke mate draait op hernieuwbare elektriciteit uit zon en wind vereist een enorme hoeveelheid installaties. Het goede nieuws is dat het technisch nu al kan: met de huidige technieken zouden we de wereldbevolking van hernieuwbare energie kunnen voorzien.

Zonnestroom is echter nog niet uitontwikkeld: er moet en kan nog veel worden verbeterd. Om wereldwijd voldoende zonnestroomcapaciteit op te bouwen is veel materiaal nodig. De winning en bewerking van dit materiaal is belastend voor ons ecosysteem, kost veel energie, en heeft, totdat de transitie is voltooid, nog een te grote, zij het afnemende CO<sub>2</sub>-voetafdruk. Door in te blijven zetten op onderzoek en ontwikkeling kunnen zonnestroomsystemen nog bijna twee keer zo efficiënt worden. De (mogelijk schaarse) actieve materialen kunnen veel dunner gemaakt worden, en met minder materiaal tot systemen gebouwd worden die door verdergaande integratie meerdere functies tegelijk kunnen hebben. De huidige systemen zijn geoptimaliseerd op kosten (€/Wp of €/kWh), maar kunnen nog aanzienlijk geoptimaliseerd worden op vermindering van materiaal- en energiegebruik, ontwerp met het oog op hergebruik, het organiseren van circulair gebruik van grondstoffen en onderdelen, en het vergroten van maatschappelijke acceptatie door betere integratie in onze leefomgeving en het combineren van functies.

Als we die ontwikkelingen voortvarend en ambitieus aanpakken zal zonne-energie een hoofdrol kunnen spelen in de mondiale duurzame en klimaatneutrale energievoorziening van de toekomst. Dat is het doel van het onderzoeksprogramma dat door TNO en zijn partners in binnen- en buitenland wordt uitgevoerd.

## › 5 APPENDIX: CO<sub>2</sub>-TERUGVERDIENTTIJD EN DE ENERGIETERUGVERDIENTTIJD

De CO<sub>2</sub>-terugverdiëntijd en de energierterugverdiëntijd van zonne-energie houden verband met elkaar, maar zijn niet uitwisselbaar. Beide zijn ze lager naarmate een zonnestroomsysteem over zijn levensduur meer elektriciteit opwekt en naarmate er minder (fossiele) energie nodig is voor de productie en installatie van het systeem. De CO<sub>2</sub>-terugverdiëntijd hangt daarnaast sterk af van *de manier waarop de elektriciteit wordt opgewekt die wordt gebruikt tijdens de productie van de zonnepanelen en van het gebruik van overige energiedragers én van de CO<sub>2</sub>-emissies die samenhangen met de elektriciteit die door de zonnestroom wordt verdrongen*. Als de elektriciteit voor productie wordt opgewekt uit een hernieuwbare bron, bijvoorbeeld met een waterkrachtcentrale, dan is de CO<sub>2</sub>-terugverdiëntijd kort. Komt die elektriciteit daarentegen uit een kolencentrale dan is de CO<sub>2</sub>-terugverdiëntijd lang. Verdringt zonnestroom aan de gebruikskant kolenstroom, dan is de terugverdiëntijd korter dan wanneer stroom uit een gascentrale wordt verdrongen. De *energieterugverdiëntijd* daarentegen hangt niet zozeer af van de aard van de gebruikte energie, maar de verhouding van *het totale rendement in de keten* van opwekking van energie tot het gebruik daarvan voor de productie van zonne-energiesystemen. Elektriciteit uit een waterkrachtcentrale die met veel transportverliezen van ver weg wordt aangevoerd kan bijvoorbeeld slechter scoren dan elektriciteit uit een kolencentrale om de hoek, zonder transportverliezen. Met andere woorden: zonne-energiesystemen geproduceerd met hernieuwbare energie hebben weliswaar een geringe CO<sub>2</sub>-voetafdruk (of zelfs nul, als die hernieuwbare opwekkers ook weer met hernieuwbare energie zijn gemaakt; de ‘renewable breeder’), maar hebben niet noodzakelijk een korte energierterugverdiëntijd. Omgekeerd kan een zonne-energiesysteem geproduceerd met kolenstroom een kleine CO<sub>2</sub>-voetafdruk hebben als er weinig energie wordt gebruikt. Hierover bestaat regelmatig verwarring.

### **Meer informatie over dit onderwerp vindt u in de volgende bronnen en de literatuurlijst:**

H. Kerp en I. Jonsthovel, M2i, *Kansen en uitdagingen voor Circulaire Zon PV*, mei 2021

M. Beeftink, G. Bergsma, CE Delft, *Kennisnotitie Zonnepanelen Circulair*, februari 2021

Holland Solar *Factsheet Duurzaamheid*, oktober 2020

Sungevity, *De schaduwkant van zonnepanelen*, juni 2021

## › 6 REFERENTIES

- [1] Report of the World Commission on Environment and Development: *Our Common Future* (1987)
- [2] United Nations Development of Economic and Social Affairs, *The 17 goals*
- [3] G. Haughton, *Environmental Justice and the Sustainable City*, Journal of Planning Education and Research 18 (3) (1999)
- [4] B. Giddings, B. Hopwood, G. O'Brien, *Environment, economy and society: fitting them together into sustainable development*, Sustainable Development 10, 4, 187-196 (2020)
- [5] Earth Summit: United Nations Conference on Environment and Development (UNCED) (United Nations Conference on Environment and Development, Rio de Janeiro, Brazil, 3-14 June 1992 | United Nations). Zusterconventies: *UNFCCC: United Nations Conventions on Climate Change* en *UN Convention to Combat Desertification*.
- [6] *Global Energy Assessment* (2012) p. 432
- [7] EU Technical Expert Group on Sustainable Finance, *Taxonomy: Final report of the Technical Expert Group on Sustainable Finance* (2020)
- [8] J. Kirchherr, D. Reike, M. Hekkert, *Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions*, Resources, Conservation and Recycling 127 (2017) 221-232
- [9] Ellen MacArthur Foundation, *Towards the Circular Economy*, Isle of Wight (2013)
- [10] European Commission, *Circular Economy Action Plan* (2020)
- [11] K. Hartley, A. van Santen, J. Kirchherr, J., *Policies for transitioning towards a circular economy: Expectations from the European Union (EU)*, Resources, Conservation and Recycling 155 (2020) (104634)
- [12] Rijksoverheid, *Nederland circulair in 2050, Rijksbreed programma Circulaire Economie*, september (2016)
- [13] Uitvoeringsprogramma 'circulaire maakindustrie'
- [14] European Commission, *EU industrial policy* (2020)
- [15] *European Raw Materials Alliance (ERMA)*
- [16] Holland Solar, *Vragen over Oeigoerse dwangarbeid in de keten van zonnepanelen* (2021)
- [17] Solar Energy Industries Association (SEIA), *Solar Supply Chain Traceability Protocol*
- [18] RVO, *R-ladder – strategieën van circulariteit* (2021)
- [19] PBL, *Circulaire economie: wat we willen weten en kunnen meten* (2018)
- [20] CE Delft, *Kennisnotitie Zonnepanelen Circulair* (2021)
- [21] ETIP PV, *PV Quality and Economy* (2018)
- [22] Fraunhofer ISE, *Photovoltaics Report 2021* (2021)
- [23] M. Ram et al., *Global Energy System based on 100% Renewable Energy* (2019)
- [24] J.C. Goldschmidt, L. Wagner, R. Pietzcker, L. Friedrich, *Technological learning for resource efficient terawatt scale photovoltaics*, Energy and Environmental Science 14 (2021)
- [25] E. Vartiainen, G. Masson, C. Breyer, D. Moser and E. Román Medina, *Impact of weighted average cost of capital, capital expenditure, and other parameters on future utility-scale PV levelised cost of electricity*, Progress in Photovoltaics: Research and Applications 28 (2020) 439-453
- [26] N. Taylor and A. Jäger-Waldau, *Photovoltaics Technology Development Report 2020*, JRC123157 (2020)

- [27] Eco-invent *Life cycle thinking*
- [28] Rijkswaterstraat, *Solar Highways*
- [29] SolarRoad, SolaRoad – SolaRoad combineert weg met zonnepaneel
- [30] Physee, Power
- [31] *Personenauto's op zonne-energie, zonnecellen in carrosserie*
- [32] *TNO Zonpositief*
- [33] *Nationaal Consortium Zon in Landschap*
- [34] J. van Roosmalen et al., *De energietransitie: Een nieuwe dimensie in ons landschap* (2017)
- [35] Nederlandse Vereniging Duurzame Energie, Sven Stremke, *Landschapsarchitect: Jongere generatie kijkt met andere ogen naar zonne- en windparken* (2020)
- [36] *Nationaal Consortium Zon op Water*
- [37] M. Raugei, R. Frischknecht, C. Olson, P. Sinha, G. Heath, *Methodological Guidelines on Net Energy Analysis of Photovoltaic Electricity*, IEA-PVPS Task 12, Report T12- 07 (2016)
- [38] L. Wagner (Fraunhofer ISE), presentatie op de online-conferentie EUPVSEC 2021 en A. Müller, L. Friedrich, C. Reichel, S. Herceg, M. Mittag, D. Holger Neuhaus, *A comparative life cycle assessment of silicon PV modules: Impact of module design, manufacturing location and inventory*, Solar Energy Materials & Solar Cells 230 (2021) 111277.
- [39] L. Wagner, S. Mastroianni, A. Hinsch, *Reverse Manufacturing Enables Perovskite Photovoltaics to Reach the Carbon Footprint Limit of a Glass Substrate*, Joule 4 (4) (2020) 882-901
- [40] L. Stamford and A. Azapagic, *Environmental Impacts of Photovoltaics: The Effects of Technological Improvements and Transfer of Manufacturing from Europe to China*, Energy Technology 6 (2018) 1148-1160
- [41] C. Blanco, S. Cucurachi, W. Peijnenburg, A. Beames en M. Vijver, *Are Technological Developments Improving the Environmental Sustainability of Photovoltaic Electricity?* Energy Technol. (2020), 1901064
- [42] F. Rooijers, H. Croezen en J. Blommerde, CE Delft, *CO<sub>2</sub> reductie bij een moderne kolencentrale* (2016)
- [43] M. Steen, *Greenhouse gas emissions from fossil fuel fired power generation systems*, JRC report EUR 19754 EN
- [44] N. Dodd, N. Espinosa, P. van Tichelen, K. Peeters, A. Soares, *Preparatory study for solar photovoltaic modules inverters and systems* (2020) JRC report 122431
- [45] NREL, *Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Electricity Generation: Update (2021)*
- [46] *MCC carbon clock*
- [47] E. Leccisi and V. Fthenakis, *Life cycle energy demand and carbon emissions of scalable single-junction and tandem perovskite PV*, Progress in Photovoltaics: Research and Applications 29 (2021) 1078-1092
- [48] L. Krebs, R. Frischknecht, P. Stoltz, P. Sinha, *Environmental Life Cycle Assessment of Residential PV and Battery Storage Systems* (2020) IEA PVPS Task 12.
- [49] E. Rietveld, H. Boonman, T. van Harmelen, T. Bastein, *Global energy transition and metal demand - an introduction* (2018)
- [50] P. Macé, E. Bosch and M. Aleman, *Terawatt Scale PV by 2050 and Competition for Minerals: The Case of Silver and Copper*, presentation at 38<sup>th</sup> EUPVSEC (2021) (4CO.4.6)

- [51] T. Graedel and E. van der Voet (editors), Linkages of sustainability, MIT Press 2010, ISBN 978-0-262-01358-1
- [52] Rijksoverheid, Nederland circulair in 2050 (2016),
- [53] European Committee, Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU: A Foresight Study (2020)
- [54] P. Sinha, G. Heath, A. Wade, K. Komoto, 2018, Human health risk assessment methods for PV, Part 1: Fire risks, International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, Report T12-14:2018. ISBN 978-3-906042-78-7
- [55] P. Sinha, G. Heath, A. Wade, K. Komoto, 2019, Human health risk assessment methods for PV, Part 2: Breakage risks, International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, Report T12-15:2019. ISBN 978-3-906042-87-9
- [56] P. Sinha, G. Heath, A. Wade, K. Komoto, 2019, Human health risk assessment methods for PV, Part 3: Module disposal risks, International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, Report T12-16:2020. ISBN 978-3-906042-96-1
- [57] E. Hertwich, T. Gibon, E. Bouman, A. Arvesen, S. Suh, G. Heath, J. Bergesen, A. Ramirez, M. Vega, L. Shi, Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies, PNAS May 19 112 (20) (2015) 6277-6282.
- [58] U.S. Geological Survey, Tellurium (2021)
- [59] Y. Houari, J. Speirs, C. Candelise, R. Gross, A system dynamics model of tellurium availability for CdTe PV, Progress in Photovoltaics: Research and Applications 22 (2014) 129-146
- [60] CIGS-PV.net, CIGS Thin Film Photovoltaics for EU's prosperity, energy transition and enabling net zero emission targets
- [61] We'll be shipping at the beginning of 2022, Interview met C. Case, Oxford PV, Photon International July 2021, page 55
- [62] Instituut Fysieke Veiligheid (2021). Depositie bij branden met zonnepanelen (2021)
- [63] Waste from Electrical and Electronic Equipment (WEEE).
- [64] Richtlijn 2012/19/EU van het Europees Parlement en de Raad van 4 juli 2012 betreffende afgedankte elektrische en elektronische apparatuur
- [65] TNO, Volledig recyclebare zonnepanelen in aantocht
- [66] Harold Kerp en Iris Jönsthövel, M2i, Kansen en uitdagingen voor circulaire Zon PV met focus op materiaal en technologie (2021)
- [67] A. Gustafsson, B. Steenari, C. Ekberg, Recycling of CIGS solar cell waste materials Separation Science and Technology, 50 (2015) 2415–2425
- [68] First Solar, Sustainability Report 2021
- [69] J. Kadro, N. Pellet, F. Giordano, A. Ulianov, O. Müntener, J. Maier, M. Grätzel en A. Hagfeldt Proof of concept for facile perovskite solar cell recycling, Energy & Environmental Science 10, 2016
- [70] Nationaal WEEE register 2020
- [71] Informatie afgeleid van BASF blockchain plastic recycling

## › CONTACT

**prof. dr. Wim Sinke**  
hoofdonderzoeker Zonne-energie  
wim.sinke@tno.nl