# Openbaar eindrapport Power4T

## Gegevens project

- Projectnummer: 1821104
- Projecttitel: Power management of 4-terminal tandems (Power4T)
- Penvoerder en medeaanvragers: Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek TNO (TNO, Project Manager), Taylor Technologies Holding B.V.
- Projectperiode: 01-04-2020 t/m 30-06-2021
- Publicatiedatum openbaar rapport: 20-09-2021

## Samenvatting van uitgangspunten, doelstelling en samenwerkende partijen

*Uitgangspunten:* Zonnepanelen met significant verhoogd rendement op basis van tandem-zonneceltechnologie zijn een commercieel vooruitzicht geworden dankzij de recente ontwikkeling van perovskiet-zonnecellen. De tandem-zonnecellen die binnen dit project onderzocht zijn, bestaan uit combinatie van perovskiet- en siliciumzonnecellen. De perovskiet-zonnecellen converteren het licht met korte golflengte, en de silicium-zonnecellen converteren het overblijvende licht met langere golflengte, waardoor een hoger rendement kan worden bereikt dan met zonnecellen van één enkel type. In het laboratorium heeft TNO, met onderzoekspartners, met zulke tandems momenteel een rendement van meer dan 29% bereikt. Het vooruitzicht is dat een rendement van 30% en meer bereikt kan worden. Er zijn globaal twee routes om zulke tandem-zonnecellen te maken: de perovskiet- en silicium-zonnecellen kunnen afzonderlijk gemaakt en gecontacteerd worden (4-terminal, 4T), of de perovskiet-zonnecel kan op de silicium-zonnecel gedeponeerd worden met een serieschakeling inwendig in de resulterende gestapelde zonnecel, en daardoor maar twee contacten (2-terminal, 2T: 1 contact aan de siliciumzijde, en 1 contact aan de perovskietzijde). Er zijn vele aspecten aan de afweging tussen beide routes, en beide worden wereldwijd onderzocht in industrie en R&D instituten. Onder deze aspecten wordt de onzekerheid hoe een 4T module moet worden ontworpen, en mogelijke systeemcomplexiteit, vaak genoemd.

In het Power4T project zijn ontwerpen geanalyseerd voor toekomstige zonnepanelen gebaseerd op de perovskiet-silicium tandem-zonneceltechnologie, met nadruk op de rol die power optimizers in zulke zonnepanelen kunnen of moeten spelen (module level power electronics – MLPE). Het Power4T project was gewijd aan de 4-terminal (4T) tandemtechnologie. De zonnecellen worden gecombineerd tot perovskiet- en silicium-submodules. In het zonnepaneel (zonnepaneel = PV module) worden de geleverde vermogens van beide types submodules dan gecombineerd met hulp van de MLPE, zodat het zonnepaneel een 2-terminal aansluiting krijgt. Zo'n 2-terminal module-aansluiting is vanzelfsprekend aantrekkelijk voor installatie van de modules in de praktijk, en daarnaast kan de MLPE nog verdere functionaliteit en prestatie-bevorderende eigenschappen aan de zonnepanelen toevoegen.

*Doelstelling:* Het doel van het project Power4T was om mogelijke ontwerpen voor 4T tandem-zonnepanelen met 2-terminal module-aansluiting te analyseren op haalbaarheid en prestaties, inclusief analyse van de benodigde MLPE. De analyse is gebaseerd op modellering en simulaties van de ontwerpen, met experimentele karakterisering van de zonnecellen als basis.

*Samenwerkende partijen:* TNO heeft wereldwijd een leidende rol in de ontwikkeling en industrialisatie van zowel perovskiet, silicium, als perovskiet/silicium tandem PV technologie, mede via het samenwerkingsverband Solliance dat onderzoek doet aan perovskiet-zonnecellen en -moduletechnologie. Taylor is een bedrijf dat micro-elektronica ontwikkelt voor zonnepanelen, zoals cell-string-optimizers die geïntegreerd kunnen worden in de junction box van het zonnepaneel.

## Beschrijving van de behaalde resultaten, de knelpunten en het perspectief voor toepassing

*Behaalde resultaten*:

Het project Power4T had twee werkpakketten, en binnen het project zijn de volgende resultaten gehaald:

<u>Werkpakket 1</u>: Eigenschappen en randvoorwaarden voor 4T-tandem-zonnepaneelontwerp

Allereerst zijn door TNO in het project technische randvoorwaarden voor gebruik van perovskiet-zonnecellen in zonnepanelen onderzocht, specifiek met betrekking tot eigenschappen waarover nog weinig bekend is, te weten gedrag dat van belang is bij beschaduwing ('reverse bias' karakteristieken van de perovskietzonnecellen), en temperatuurcoëfficiënten. Er zijn grenswaarden voor reverse bias vastgesteld waarbinnen de perovskietzonnecellen geen of reversibele degradatie vertoonden. Experimenten op individuele perovskietzonnecellen lieten zien dat reverse bias tot -6V toegestaan is, waarbij aangetekend moet worden dat dit voorlopige resultaten zijn, en langduriger tests nodig zijn om zekerder te zijn van afwezigheid van permanente degradatie. Daarnaast is dit een resultaat voor specifieke opbouw en materialen van de perovskietzonnecel, dat niet generiek geldig zal zijn voor perovskietzonnecellen in het algemeen.

Hierop aansluitend heeft Taylor geanalyseerd wat geschikte ontwerpen voor optimizers voor de perovskiet-submodules zouden kunnen zijn. Het ontwerp van de perovskiet-submodules volgde in het project het gangbare principe voor dunne-film-modules, te weten lange smalle zonnecellen, die in hun korte richting in serie geschakeld zijn, wat resulteert in relatief hoge uitgangsspanning en lage uitgangsstroom. Er is gekeken naar globaal twee uitvoeringsvormen van een 4T tandemmodule: één waarin de perovskiet-submodule een eenvoudige layout heeft maar daardoor wel een hoge uitgangsspanning (100 - 200 V, hierna "HV tandem" genoemd), en één waarin de perovskiet-submodule wordt opgesplitst in parallel-geschakelde secties om een lage uitgangsspanning (ca. 40 V, vergelijkbaar met de uitgangsspanning van de silicium-submodule, hierna "LV tandem") te verkrijgen. Voor de lage uitgangsspanning is een cell-string-optimizer (CSO) gebaseerd op aanpassing van de bestaande taylor CSO voor silicium mogelijk, voor de hoge uitgangsspanning zijn de mogelijkheden voor een kosteneffectieve en efficiënte CSO bekeken en is een geschikt ontwerp gemaakt en gesimuleerd.

Daarnaast is de mogelijkheid tot bescherming van de perovskietsubmodule door de CSO tegen reverse bias door beschaduwing gesimuleerd. Alleen volledige beschaduwing van individuele perovskietcellen is in aanmerking genomen; het effect van gedeeltelijke beschaduwing van individuele perovskietcellen is onderwerp voor aanvullend onderzoek. De aanpak en resultaten zijn vertrouwelijk, maar een globale uitkomst is dat een redelijke, in de praktijk waarschijnlijk voldoende, bescherming verkregen kan worden in het geval van de LV tandem, maar niet in het geval van de HV tandem met zijn veel grotere perovskiet-stringlengte.

Werkpakket 2: Modellering en analyse van 4T-tandem-zonnepaneelontwerpen

Op basis van de hierboven beschreven experimenten en uitkomsten zijn definitieve ontwerpen gemaakt voor de LV en HV tandem-zonnepanelen. Zowel de silicium- als perovskiet-submodules zijn hierin voorzien van CSO's, waarvan de uitgangen parallel geschakeld zijn om stroom-spanningskarakteristieken van de modules te realiseren die vergelijkbaar zijn met conventionele zonnepanelen (met een hogere uitgangsstroom vanwege het hogere rendement). Voor het LV zonnepaneel zijn ook twee versies gedefinieerd waarin alleen de perovskiet-submodule van een CSO is voorzien, parallel geschakeld aan de silicium-submodule, of waarin perovskiet- en silicium-submodules parallel zijn geschakeld en samen voorzien van één CSO (zogenaamde 2-terminal voltage-matched – 2T VM – module-ontwerpen). De silicium-submodules bevatten 60 vierkante cellen met 158.75mm zijde, een gangbare afmeting.

De karakteristieken van de perovskiet-submodule zijn gebaseerd op goede laboratoriumcellen van dit moment, met 17.6% celrendement, resulterend in een aperture area submodulerendement van ca. 15.3%. De silicium submodule is gebaseerd op huidige commerciële PERC-cellen, resulterend in een aperture area rendement van ca. 8.8% (in tandemconfiguratie; lager dan op zichzelf staand gebruik omdat 42% van het vermogen in het invallende licht door de perovskiet submodule heen de silicium cellen bereikt). Het aperture area rendement van de geanalyseerde tandemmodules is de som van beide rendementen en dus 24.1%; dit zonder verliezen in de MLPE in aanmerking te nemen. Dezelfde PERC-cellen leveren, als referentie, een conventionele siliciummodule met aperture area rendement van 21.2%. De overeenkomende laboratorium tandem-zonnecel heeft dus een rendement van ca. 26.4%. Zoals eerder genoemd, een verhoging van tandemcelrendement tot 30% of hoger behoort naar verwachting tot de mogelijkheden, wat zich zou doorvertalen in een vergelijkbare verhoging van het modulerendement.

In de HV module zijn de perovskietzonnecellen in hun lange richting verticaal georiënteerd, omdat deze niet door de CSO beschermd kunnen worden tegen schaduw, en deze oriëntatie voor liggende panelen de minste gevoeligheid geeft voor 'row-to-row' schaduw. In de LV module zijn de perovskietzonnecellen in hun lange richting horizontaal georiënteerd omdat dat het meest praktisch voor modulefabricage is, en schaduwtolerantie wordt verschaft door de CSO.

Voor de CSO's zijn twee ontwerpen gemaakt en doorgerekend. Beide zijn zogenaamde bucking converters (d.w.z. de spanning verlagend en de stroom verhogend): een LV CSO op basis van huidige c-Si CSO van taylor, met beperkt verlies van ca. 1.5 W bij 10 A uitgangsstroom (het verlies is kwadratisch afhangend van de uitgangsstroom), en een HV CSO van nieuw ontwerp voor ca. 200 V ingangsspanning, met ca. 10 W verlies bij 10 A uitgangsstroom. Dit relatief hoge verlies is een gevolg van 'switching loss' in de MOSFET's die toeneemt naarmate de ingangsspanning (en daardoor de vereiste spanningsverlaging door de CSO) toeneemt.

Met deze ontwerpen en gegevens zijn energie-opbrengsten in Nederland gesimuleerd. Het is aangenomen dat de modules bifacieel zijn (dus ook licht aan de achterzijde invangen), op het zuiden gericht onder een hellingshoek van 30 graden, en alleen 'row-to-row' schaduw ondervinden. Als referentie is een bifacieel PERC zonnepaneel zonder CSO's aangenomen.

De LV tandem (ook de 2T VM varianten) levert 4-5% meer energie dan de HV tandem, vanwege de verliezen in de HV CSO. Onder de gemaakte aannames voor celrendement levert de LV tandem ongeveer 15% meer energie dan de c-Si referentiemodule, een winst die vergelijkbaar is met het hogere rendement van de tandem t.o.v. de c-Si module. De 2T VM variant (dus met minder CSO's) produceert 1% meer energie dan de reguliere LV tandem.

Wanneer row-to-row schaduw significant is, en wanneer de c-Si referentiemodule geen CSO's bevat, neemt de winst in energie-opbrengst van LV tandem t.o.v. c-Si toe tot 23-25%, maar die extra 10% energie-opbrengst is dus een effect van de CSO's, en niet van de tandemarchitectuur op zich. De extra CSO's in de LV tandem in vergelijking met de 2T VM variant, resulteren nu in een ca. 2% hogere energieopbrengst. We schatten dat in deze situatie van significante row-to-row schaduw, de energieopbrengst van de LV tandem nog 3-4% hoger zou zijn indien de perovskietzonnecellen in de LV tandem ook verticaal geöriënteerd zouden zijn, net als in de HV tandem.

Tenslotte is de kosten-baten-afweging voor tandems bekeken.

Allereerst de vergelijking HV tandem versus LV tandem: De vereenvoudiging van de module-layout voor de HV tandem t.o.v. de LV tandem wordt geschat op een reductie van materiaalkosten (voor interconnectiemateriaal zoals tabs) van 0.5 €/module, en we nemen aan dat materiaalkosten de dominante kostenfactor voor deze vergelijking zijn. Daar staan extra kosten voor de HV CSO tegenover, en ook een lagere energie-opbrengst van de HV tandem die deze HV variant 10 €/module 'minder waard' maken dan de LV variant. We concluderen dat een HV tandem geen aantrekkelijke propositie is t.o.v. een LV tandem. Daar komt nog bij dat een CSO in de HV tandem in de praktijk de perovskiet-submodule waarschijnlijk niet goed kan beschermen tegen reverse bias door beschaduwing.

Dan de vergelijking LV tandem versus conventioneel c-Si systeem: Als we een systeemprijs voor het conventionele c-Si systeem aannemen van 0.6 €/Wp, komt de 15% hogere energieopbrengst overeen met een meerwaarde van het tandemsysteem van ca. 30 €/module. Die meerwaarde moet minimaal opwegen tegen de meerkosten voor de perovskiet-submodule, de CSO of CSO's, en mogelijke overige wijzigingen in het systeem. (Verschil in levensduur of degradatiesnelheid van c-Si- en tandemmodules zouden ook effect hebben in deze vergelijking, maar daar zijn nog geen concrete gegevens over bekend.) Voor de kosten van de perovskiet-submodule is beperkte literatuur beschikbaar, en kosten van de orde van 15 €/module lijken, alhoewel ambitieus, in principe niet onmogelijk te zijn. De beste kosteneffectiviteit wordt dan bereikt door het 2T VM systeem, vanwege de laagste kosten voor CSO's. De kosten van inzet van CSO's in tandem versus c-Si referentiesysteem spelen ook een belangrijke rol. Met name in situaties waar er duidelijke meerwaarde is voor het gebruik van CSO's door het conventionele c-Si systeem, dus wanneer de relevante vergelijking is tussen tandemmodule met CSO's en c-Si module met CSO's, wordt de kosteneffectiviteit van het tandemsysteem versterkt.

Deze vergelijkingen schalen eenvoudig met het rendement van de tandemmodule (een hoger rendement betekent proportioneel hogere meerwaarde) en de conventionele systeemkosten (de meerwaarde voor de tandem schaalt met de conventionele systeemkosten per Wp). We benadrukken dat we uitgegaan zijn van op dit moment in het laboratorium bewezen perovskietcelrendement, en dat in de toekomst hogere tandemrendementen mogen worden verwacht.

*Knelpunten*:

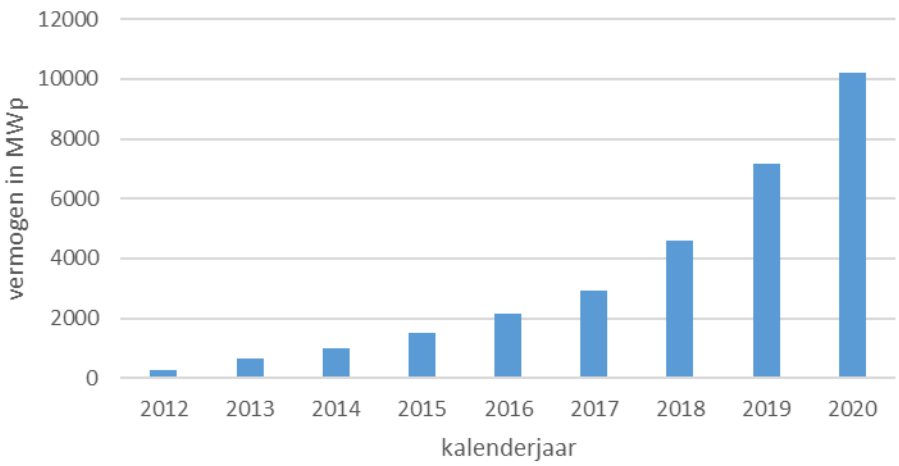
De ontwikkeling en introductie op de PV-markt van perovskiet- en tandemtechnologie kent in het algemeen verschillende onzekerheden, die globaal worden aangestipt in de volgende alinea. Elk van die onzekerheden beslaat vele facetten. Het is op dit moment nog lastig en weinig zinvol om daar specifieke knelpunten als wellicht meest relevant uit te lichten.

*Perspectief voor toepassing*:

Toepassing van perovskiet/c-Si tandem PV hangt af van vele voorwaarden. Zo is verdere ontwikkeling van de perovskiet- en tandem-technologie tot industriële schaal nodig, zal de perovskiet- en tandem-technologie zich in de praktijk volledig moeten bewijzen, zullen industriële producenten de technologie moeten willen introduceren op de markt, en zal de eerder beschreven potentiële kosteneffectiviteit van tandemtechnologie zich ook in de praktijk moeten bewijzen. Ook zal moeten blijken of 4T tandemtechnologie, alle aspecten afwegend, aantrekkelijker of haalbaarder is dan 2T tandemtechnologie. In de International Technology Roadmap for PV (de ITRPV) is marktintroductie van tandemtechnologie voorzien in 2022 of 2023, wat laat zien dat de verwachting in de industrie is dat de ontwikkelingen zich zeer snel zullen doorzetten.

## Beschrijving van de bijdrage van het project aan de doelstellingen van de regeling (duurzame energiehuishouding, versterking van de kennispositie)

PV zonne-energie wordt ook in Nederland steeds meer gebruikt als duurzame bron van elektriciteit. Volgens de TKI roadmap zal naar verwachting tot wel 240 $GW_p$ aan geïnstalleerd vermogen in Nederland te realiseren zijn in 2050[1]. Nu al is zichtbaar dat zonne-energie steeds grootschaliger wordt toegepast en een grotere rol speelt in de productie van elektriciteit. De in het Klimaatakkoord afgesproken doelstelling van 21-23 $GW_p$ PV installatie in 2030 is een zeer conservatieve schatting aangezien het cumulatief geïnstalleerde vermogen eind 2020 al meer dan 10 $GW_p$ bedroeg[2], met meer dan 3 $GW_p$ groei in het afgelopen jaar, zoals weergegeven in Figuur 1.



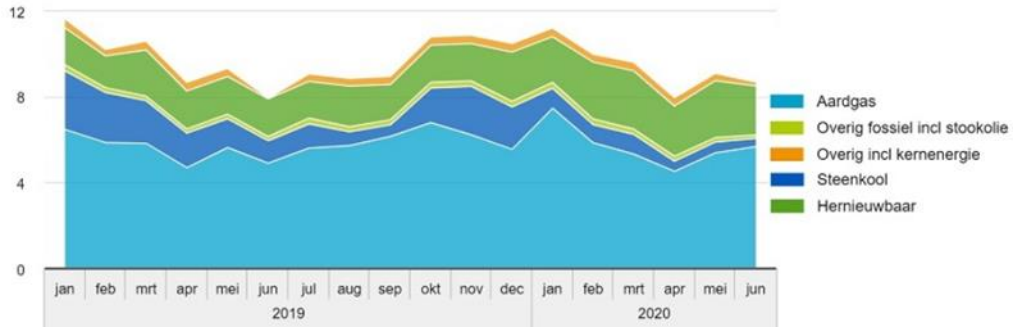

Figuur 1: Totaal geïnstalleerd cumulatief PV vermogen in Nederland. Bron cijfers: CBS.

Het is om die reden aan te nemen dat PV een belangrijke bijdrage zal leveren aan de vergaande reductie en uiteindelijk de uitbanning van $CO_2$-emissies. Zeker is dat PV, samen met windenergie, het gebruik van steenkool voor elektriciteitsproductie inmiddels heeft verdrongen[3]. Deze ontwikkeling is weergegeven in Figuur 2. Ook in de EU draagt PV bij aan de Green Deal en het 'FIT for 55'-pakket (55% emissiereductie van broeikasgassen in 2030).
Daarom wordt PV ook door de EU gezien als strategische waardeketen. Het terugbrengen van zonnecel- en zonnepaneelproductie naar Europa wordt door de EU gestimuleerd, waarbij nieuwe technologieën zoals tandem PV belangrijk zijn (dus geen 'kopie' van China).

[1] Roadmap PV Systemen en Toepassingen, auteurs Wiep Folkerts e.a., december 2017.

[2] Bron: CBS, juni 2021

[3] Bron: CBS, september 2020




Figuur 2: Elektriciteitsproductie in Nederland in mld kWh, uit verschillende bronnen van januari 2019 t/m juni 2020. Het aandeel van steenkool (donkerblauw) is sterk verminderd ten gunste van hernieuwbaar (donkergroen). Bron: CBS; overgenomen uit Solarmagazine.

Het Power4T project geeft richting aan de ontwikkeling van technologie voor full-size tandem-zonnepanelen, waar tot op heden vooral aan kleine tandem cellen en modules ontwikkeling gedaan werd. Het laat zien hoe een module en systeem gebaseerd of 4T tandem technologie kan worden ontworpen en wat de prestaties dan zijn. Het geeft taylor een kennispositie om snel in te kunnen spelen op vragen uit de markt, en geeft TNO een beter inzicht in de specifieke kennisvragen en mogelijkheden voor full-size 4T tandem-zonnepanelen, om daarin klanten te kunnen ondersteunen.

Zoals de ITRPV laat zien is de verwachting dat tandem-zonnepanelen al snel op de markt zullen verschijnen. Zeker voor Nederland, met zijn beperkte mogelijke areaal waar zonnepanelen kunnen worden geïnstalleerd (met veelal voorkeur voor installatie op daken), zijn zonnepanelen met het hoogste rendement van groot belang voor maximale bijdrage aan de energietransitie.

## Spin off binnen en buiten de sector

Binnen de PV sector is de uitbreiding van de mogelijkheden bij TNO om tandem-zonnepanelen en MLPE in detail te kunnen modelleren en energie-opbrengsten van slimme zonnepanelen te kunnen modelleren bruikbaar voor de vele activiteiten die TNO op het gebied van PV-modellering verricht. De opgedane kennis op het gebied van de perovskiet-submodules is ook direct zeer relevant voor de ontwikkeling van perovskiet-PV (niet specifiek in tandem met c-Si). Buiten de PV sector is geen directe spin off voorzien.

## Overzicht van openbare publicaties over het project en waar deze te vinden of te verkrijgen zijn

*Publicaties en presentaties:*

L.J. Geerligs et al., Experimental investigation of 2-terminal voltage-matched perovskiet/crystalline silicon tandem modules, IEEE PV Specialists Conference, 2021 (presentatie)

*Peer review papers in voorbereiding:*

Design of 4T tandem modules with module level power electronics and simulation of annual energy yield (working title)

## Meer exemplaren van dit rapport

Meer exemplaren van dit rapport kunnen digitaal worden verkregen via het hieronder genoemde contact.

## Contact voor meer informatie

Meer informatie over dit project kan verkregen worden via:
L.J. Geerligs, TNO EnergieTransitie, bart.geerligs@tno.nl
Michiel Roelofs, taylor, m.roelofs@taylor.solar

## Subsidie

Dit project is mede gefinancierd door TKI-Energie uit de Toeslag voor Topconsortia voor Kennis en innvatie (TKI's) van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat.