

OPENBAAR

Westerduinweg 3
1755 LE Petten
Postbus 15
1755 ZG Petten

TNO-rapport

www.tno.nl

T +31 88 866 50 65

Opti-Shade: de optimale systeemconfiguratie in geval van schaduw

Datum	23 april 2021
Auteur(s)	R. Jonkman, R. van der Ven, E. Gramsbergen, M.S. Dörenkämper, M.J. Jansen, A.R. Burgers en N.J.J. Dekker
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	28
Aantal bijlagen	0
Opdrachtgever	RvO
Projectnaam	Opti-Shade
Projectnummer	TEUE116154

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2021 TNO

OPENBAAR

Inhoudsopgave

1	Het project	3
1.1	Samenvatting	3
1.2	Doelstelling	5
1.3	Samenwerkende partijen	5
2	Inhoudelijke reportage	6
2.1	Resultaten	6
2.2	Knelpunten	23
2.3	Perspectief voor toepassing	23
3	Doelstelling, spin off en publicaties	25
3.1	Bijdrage aan de doelstellingen van de regeling	25
3.2	Spin off binnen en buiten de sector	26
3.3	Openbare publicaties	26
3.4	Contactpersoon	27
4	Subsidie	28

1 Het project

1.1 Samenvatting

Zonnepanelen worden goedkoper en worden daardoor steeds vaker ook geïnstalleerd op plaatsen met schaduw. Door de schaduw wordt de opbrengst van het systeem lager en kunnen zogenaamde hotspots in de beschaduwde cellen van de zonnepanelen optreden. Optimizers kunnen de energieopbrengst van zonnepanelen met schaduw verhogen en het optreden van hotspot beperken.

Toevoeging van power optimizers aan alle zonnepanelen in een string inverter systeem verhogen de kosten van het systeem aanzienlijk. Om de kostenstijging te beperken kunnen optimizers selectief worden geplaatst bij alleen de zonnepanelen met schaduw. In dit project is het effect onderzocht van selectief gebruik van optimizers op de opbrengst van het systeem en het optreden van hotspots in de beschaduwde zonnepanelen.

Uit de theoretische beschouwing van zonnepanelen, optimizers en inverters blijkt dat het effect van optimizers op de opbrengst afhangt van het type schaduw. Bij een geringe schaduw op een beperkt deel van het paneel kan een optimizer op systeemniveau weinig winst geven. In theorie is er meer winst te behalen bij een schaduw over meerdere substrings per zonnepaneel. Optimizers zullen volgens de theoretische werking wel zorgen dat hotspots minder vaak voorkomen. In deze beschouwing is uitgegaan van ideale componenten zonder energieverlies en optimaal regelgedrag van zowel de optimizers als de inverters.

Optimizers zijn niet ideaal, maar geven zoals iedere converter energieverlies. Met metingen in het laboratorium is het energieverlies en regelgedrag van de optimizers onder verschillende praktijkcondities gemeten. Naast energieverlies geven optimizers een verhoging van de opbrengst doordat optimizers in geval van schaduw veelal meer energie uit een zonnepaneel kunnen halen.

Het verlies en de meeropbrengst van de optimizers onder verschillende praktijkcondities is bepaald met metingen in het veld. Deze metingen zijn uitgevoerd met vaste schaduwelementen op de zonnepanelen en met een veranderende schaduw van een paal. Deze metingen hebben aangetoond dat de optimizers en inverters veelal het juiste werkpunt vinden voor maximale energieopbrengst. De winst in opbrengst door optimalisering van de opbrengst van het beschaduwde zonnepaneel wordt deels te niet gedaan door het energieverlies van de optimizers.

Zonder optimizer worden onder bepaalde schaduwcondities in een open rack systeem temperaturen bereikt van 130°C. Indien op een dak de zonnepanelen aan de achterzijde minder geventileerd worden kunnen deze temperaturen nog hoger worden. Indien dergelijke hoge temperaturen geregeld op dezelfde cel optreden door bijvoorbeeld schaduw van een paaltje of schoorsteen kan niet worden uitgesloten dat dit op termijn een verhoogde degradatie van het zonnepaneel tot gevolg heeft. Optimizers blijken het optreden van de hoge temperaturen te voorkomen, zoals op basis van de theoretische werking van de optimizers werd verwacht.

Uit de metingen is een vergelijking afgeleid voor de berekening van het energieverlies van de optimizers als functie van de stroom. Deze vergelijking is gebruikt voor modelberekeningen van systemen met en zonder schaduw.

Uit de theorie, metingen en berekeningen zijn algemene richtlijnen opgesteld voor verschillende schaduwcondities:

1. Beperkte schaduw op veelal een enkele cel van een enkele string
2. Schaduw op meerdere substrings van één of meerdere zonnepanelen
3. Gelijke schaduw op een gehele rij zonnepanelen per MPPT van de inverter.

Een beperkte schaduw op een enkele cel van een enkele string zal een beperkte invloed hebben op de opbrengst van het systeem. Een optimizer kan in dit geval een beperkt positief effect hebben op de opbrengst. De temperatuur toename is bij dit soort schaduwen echter juist relatief hoog en kunnen worden voorkomen door het gebruik van een optimizer. Daarom wordt het gebruik van een optimizer op de beschaduwde module aanbevolen.

Bij een schaduw op meerdere substrings op een of meerdere zonnepanelen, zoals kan optreden bij een schoorsteen of dakkapel, kan een optimizer wel een positief effect hebben op de opbrengst. Ook kan een optimizer hier het optreden van hoge temperaturen voorkomen, indien de schaduw gedurende de dag op een enkele cel van een substring valt. Vanwege de opbrengst en het voorkomen van hoge temperaturen wordt het gebruik van optimizers op de beschaduwde zonnepanelen aanbevolen.

Optimizers kunnen geen verbetering van de opbrengst geven indien een gelijke schaduw over alle substrings van een gehele rij portrait geplaatste zonnepanelen valt, zoals aangesloten op één MPPT van een inverter. Dit komt in de praktijk zelden voor, omdat de schaduw veelal niet op alle panelen gelijk zal zijn. In dit geval wordt aanbevolen om de panelen met schaduw te voorzien van een optimizer. Indien er gedurende de dag bij hoge instraling schaduw valt op een enkele cel in een substring zullen optimizers het optreden van hoge temperaturen voorkomen.

Inverters hebben een instelling om het effect van schaduw op de opbrengst te minimaliseren door iedere 5-10 minuten over een breed spanningsgebied te zoeken naar een mogelijke maximum power point met hogere vermogen. Tijdens deze scan zal de inverter minder vermogen leveren. Tot enkele jaren geleden was deze instelling standaard niet geactiveerd en kon dit handmatig worden geactiveerd. Door verbetering van de hardware en software van inverters is het energieverlies van deze instelling geminimaliseerd en daarom bij de huidige inverters standaard geactiveerd. Uit de metingen is gebleken dat voor een juiste werking van een systeem met optimizers deze instelling moet zijn geactiveerd.

De resultaten in dit rapport gelden niet voor het SolarEdge systeem, bestaande uit SolarEdge optimizers in combinatie met een SolarEdge inverter. In dit systeem zijn de optimizers en inverter volledig op elkaar afgestemd. De inverter werkt hierbij op een vaste spanning zonder MPPT, waardoor deze inverters veelal goedkoper en efficiënter zijn in vergelijking tot een stringinverter. Vanwege de opbouw van dit systeem is selectieve toepassing van deze SolarEdge optimizers in een SolarEdge systeem niet mogelijk.

1.2 Doelstelling

Het doel van het project is de ontwikkeling van een power optimizer/inverter systeem dat schaduw tolerant is tegen lage investeringskosten. Deze systemen hebben lage elektrische productie kosten (€/kWh) bij een hoge specifieke opbrengst (kWh/m²). Daarnaast wordt onderzocht hoe zogenaamde “hotspots” in de zonnepanelen als gevolg van de schaduw kunnen worden vermeden en hoe zonnepanelen op een dak kunnen worden geplaatst zonder rekening te hoeven houden met schaduw door schoorstenen en dakkapellen, zodat een dak op een esthetisch verantwoorde manier van zonnepanelen kan worden voorzien.

1.3 Samenwerkende partijen

Penvoerder:

A. Vermeer
ScaleUp Capital B.V.
High Tech Campus 9
5656 AE Eindhoven
Nederland

Medeaanvragers:

R. Jonkman
Heliox B.V.
De Waal 24
5684 PH Best
Nederland

R. van der Ven
SolNed
Zandven 10
5508 RN Veldhoven
Nederland

E. Gramsbergen
RE-Source Solar
Zandven 18
5508 RN
Veldhoven
Nederland

N.J.J. Dekker
TNO
Westerduinweg 3
1755 LE Petten
Nederland

2 Inhoudelijke reportage

2.1 Resultaten

Het project is opgedeeld in 5 werkpakketten.

WP1. Theoretische studie (TNO)

Uit een onderzoek naar optimizers voor optimalisatie op paneel niveau is gekozen voor de grootste 4 optimizer fabrikanten. Daarnaast heeft Heliox in dit project een power optimizer ontwikkeld voor selectief gebruik, zoals beschreven in WP2.

WP2. Ontwikkeling van een power optimizer (Heliox)

Heliox heeft voor het OptiShade project een power optimizer ontwikkeld met lage kosten en hoge efficiency voor selectief gebruik in combinatie met een standaard string inverter. In overleg met TNO-Petten en SolNed zijn een aantal mogelijke concepten bekeken. De meest kansrijke configuratie bleek een buck converter te zijn met een algoritme voor de MPPT van het zonnepaneel en variabele duty-cycle van de DC/DC converter om de door de inverter gevraagde stroom te leveren. Indien de optimizer geactiveerd is zal de MPPT continu zoeken rond het local maximum power point van het zonnepaneel voor de optimale opbrengst van het zonnepaneel. Daarnaast doet de optimizer iedere 6 minuten een volledige spanning sweep om te zoeken naar een mogelijk global maximum power point, zoals kan optreden in geval van schaduw op een zonnepaneel.

De optimizer wordt op dezelfde manier aangesloten als de commercieel verkrijgbare optimizers in dit onderzoek. Heliox heeft in totaal de benodigde 4 optimizers geleverd voor de testen in het laboratorium en in het veld.

WP3. Selectie van de power optimizer (TNO)

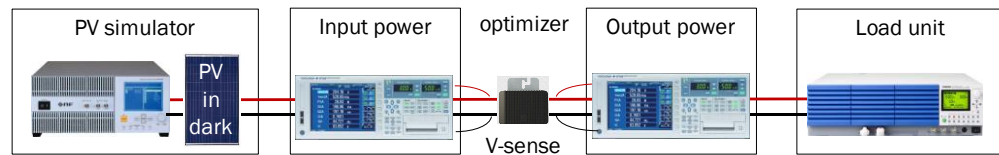
Voor de selectie en karakterisering van de geselecteerde power optimizers zijn er bij TNO-Petten zowel metingen in het laboratorium als in het veld gedaan.

- Metingen in het laboratorium

Voor het meten van de efficiency en het regelgedrag van een optimizer is een meetopstelling gebouwd bestaande uit een PV-simulator, power meter en een load unit (Figuur 2.1).

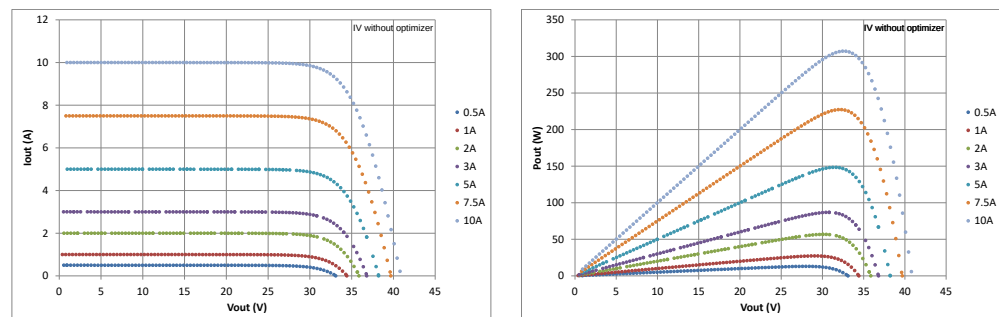
De PV-simulator bestaat uit een constant current voedingsbron (NF BP4610), parallel geschakeld aan een zonnepaneel (Yingli 60 cells) in het donker. De stroombron heeft hierbij dezelfde werking als zonlicht. Door de keuze van de stroom wordt een bepaalde hoeveelheid zonlicht gesimuleerd.

De power meter (Yokogawa WT1800) meet de ingaande en uitgaande spanning, stroom, vermogen en energie van de optimizer. Door aan de ingang en uitgang van de optimizer met een 4-draads systeem te meten (V-sense) kan het vermogensverlies en de efficiency van de optimizer met hoge nauwkeurigheid worden bepaald. De load unit (Kikusui PLZ-664WA) bepaald de belasting van de optimizer, veelal door een bepaalde stroom in te stellen.



Figuur 2.1. Opstelling voor het meten van efficiency en regelgedrag van optimizers

In Figuur 2.2. staan de stroom en vermogen van de PV-simulator als functie van de spanning gegeven voor 5-100% van de maximale inputstroom. Deze curven zijn vergelijkbaar met die van een zonnepaneel onder verschillende lichtcondities en zijn daarmee een goede bron voor de optimizer.



Figuur 2.2. Stroom (links) en vermogen (rechts) als functie van de spanning van de PV-simulator bij een input van 5, 10, 20, 30, 50, 75 en 100% (=10A) van de stroom.

- Resultaten van de metingen in het laboratorium

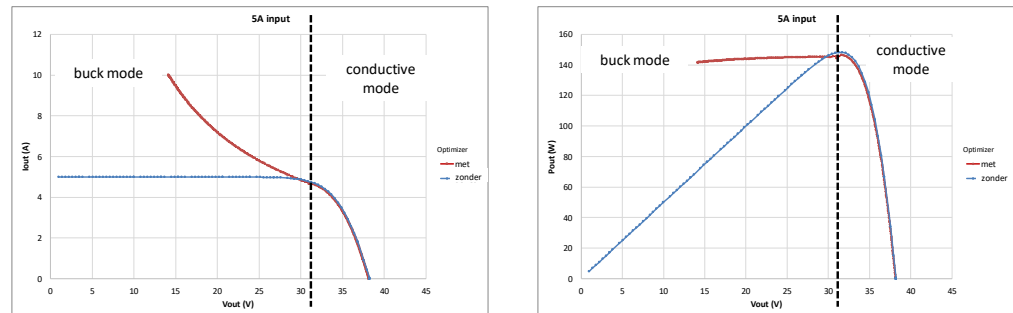
In een systeem kan het zonnepaneel een bepaalde stroom leveren en zal de inverter een bepaalde stroom vragen. Een zonnepaneel met schaduw zal minder stroom kunnen leveren dan zonnepanelen zonder schaduw. De optimizer is geschakeld tussen het zonnepaneel en de inverter en heeft hierbij de volgende functie:

- optimaliseren van het vermogen van het zonnepaneel.
- matchen van de stroom zoals geleverd door het zonnepaneel en gevraagd door de inverter.

Deze situatie is gesimuleerd met de laboratorium meetopstelling. De stroom van de voedingsbron van de PV-simulator is ingesteld op een constante waarde, waarbij de stroom van de load unit is gevarieerd van 0-10A. De stroom van de voedingsbron is overeenkomstig met de I_{sc} (kortsluitstroom) van een zonnepaneel in de zon, de I_{mpp} (stroom in het maximum power punt) is ongeveer 5% lager.

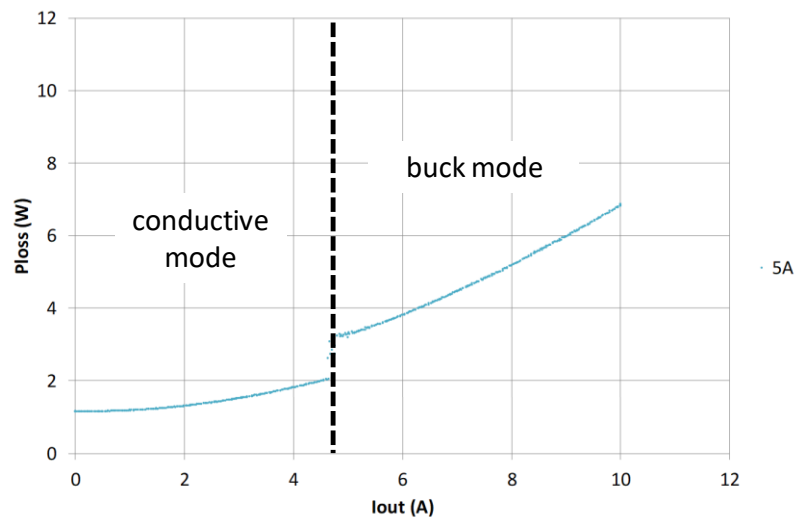
Uit deze metingen blijkt dat de optimizer twee “operating modes” heeft (Figuur 2.3):

- De gevraagde stroom door de inverter is lager of gelijk aan de I_{mpp} stroom van het zonnepaneel. In dit geval zal de optimizer de stroom geleiden (“conductive mode”) en het vermogen van het zonnepaneel niet optimaliseren. In de praktijk zal de optimalisatie van het vermogen van het gehele systeem plaatsvinden door de maximum power point tracker van de inverter.
- De gevraagde stroom door de inverter is hoger dan de I_{mpp} van het zonnepaneel. In dit geval zal de optimizer de spanning en stroom zoeken van het zonnepaneel voor maximaal vermogen (MPP) en deze stroom verhogen naar de door de inverter gevraagde stroom (“buck mode”).



Figuur 2.3. Stroom (links) en vermogen (rechts) als functie van de spanning van een zonnepaneel met (rode lijn) en zonder optimizer (blauwe lijn) bij 5A input stroom.

Een optimizer zal altijd vermogensverlies hebben, zoals gemeten met de laboratorium testinstallatie. Het vermogensverlies is in Figuur 2.4 weergegeven als functie van de stroom aan de uitgang van de optimizer bij een maximale input stroom van de PV-simulator van 5A.

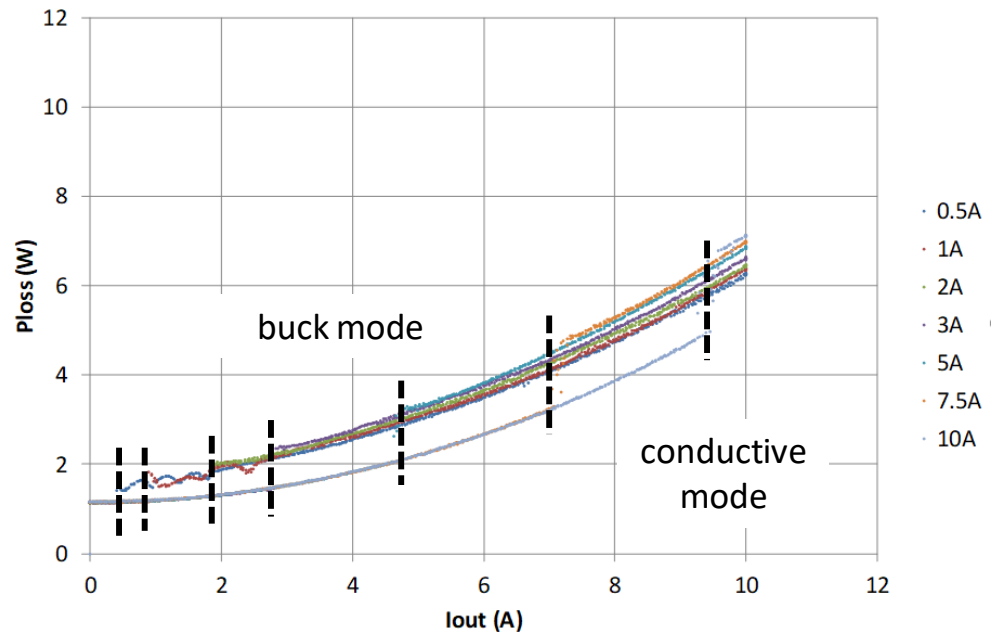


Figuur 2.4. Vermogensverlies van een power optimizer als functie van de uitgangsstroom bij 5A input stroom van de PV-simulator.

In Figuur 2.4. zijn de operating modi van de optimizer te onderscheiden:

- Stroom 0. Dit is het eigenverbruik van de optimizer zonder dat deze vermogen levert en is rond de 1 Watt.
- Stroom 0 – 4.7A: Dit is het vermogensverlies in “conductive mode”, waarbij de optimizer de stroom doorlaat zonder MPP. Bij verhoging van de stroom van 0 tot 4.7A neemt het vermogensverlies kwadratisch toe met de stroom aan de uitgang van de optimizer. Dit vermogensverlies is te beschrijven als het ohmse verlies van met name de spoelen en de MOSFET in geleiding in de optimizer.
- Stroom 4.7-10A: Dit is het vermogensverlies in buck mode. De stroom die aan de uitgang van de optimizer wordt gevraagd is hoger dan de I_{mp} stroom van het zonnepaneel bij een input stroom van 5A, waardoor de optimizer omschakelt van “conductive mode” naar “buck mode”. Bij dit omschakelen is een vermogensverlies toename te zien omdat in “buck mode” de MOSFET’s in de optimizer afwisselend aan en uit worden geschakeld. In “buck mode” zal de optimizer het MPP van het zonnepaneel zoeken.

In Figuur 2.5. is het vermogensverlies gegeven als functie van de uitgangsstroom voor stromen van 0.5-10A van de stroombron. Voor deze optimizer is duidelijk te zien dat het verlies in vermogen een functie is van de uitgaande stroom. Het omschakelpunt van “conductive mode” naar “buck mode” wordt bepaald door de stroom van de voedingsbron. Bij een bronstroom van 0.5A ligt het omschakelpunt rond de 0.47A, bij 10A rond de 9.6A.



Figuur 2.5. Vermogensverlies van een power optimizer als functie van de uitgangsstroom bij een bronstroom van 0.5 – 10A (verticale stippellijnen geven het omschakelen van “conductive” mode naar “buck mode” voor de verschillende stromen van de voedingsbron).

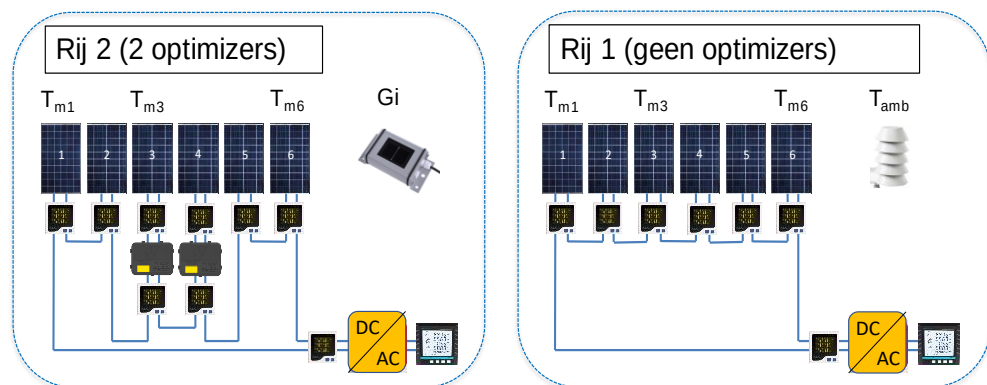
Deze metingen in het laboratorium onder gesimuleerde condities laten duidelijk zien dat een optimizer vermogensverlies heeft, die per optimizer verschillend is. Naast vermogensverlies hebben systemen met optimizers in geval van schaduw ook vermogenswinst, zoals blijkt uit de theorie, veldtesten en de simulatieberekeningen.

- Veldtest opstelling TNO-Petten

Voor de veldtest bij TNO-Petten is in dit project een nieuwe testinstallatie gebouwd, waarbij de zonnepanelen geplaatst zijn door RE-Source Solar. De installatie bestaat uit 2 rijen zonnepanelen (Figuren 2.6 en 2.7). De voorste rij heeft geen power optimizers, de achterste rij heeft 2 power optimizers zoals aangesloten op de middelste 2 zonnepanelen. De output van ieder zonnepaneel, input/output van de optimizers en inverter wordt gemeten met DC en AC power meters (nauwkeurigheid 0.2%). Daarnaast is de instraling gemeten met een referentiecel en de temperatuur van de omgeving. Ook is de temperatuur gemeten ter plaatse van een cel in het midden van 6 van de 12 zonnepanelen. Alle metingen zijn gedaan op hetzelfde moment, waardoor er een directe correlatie kon worden gelegd tussen de instraling, temperatuur en de spanning/stroom/vermogen van de zonnepanelen, optimizers en inverters.

Er zijn 2 schaduw experimenten gedaan:

- Vaste schaduw op de zonnepanelen
- Schaduw van een paal op 30 cm van de middelste 2 zonnepanelen



Figuur 2.6. Aansluitschema van systeem met en zonder power optimizers



Figuur 2.7. Veldopstelling met paalschaduw, met en zonder power optimizers

Om de resultaten van de metingen te begrijpen volgt eerst een theoretische uitleg over de werking van zonnepanelen, optimizers en inverters met betrekking tot opbrengst en temperatuur van de zonnepanelen, gevolgd door de resultaten van de veldtest.

- Theorie: invloed van schaduw op opbrengst en temperatuur

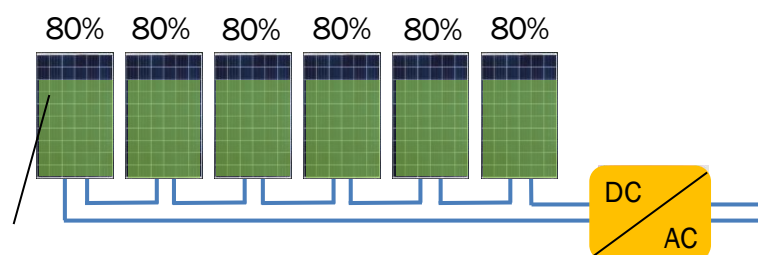
De stroom die een zonnecel kan leveren is evenredig met de hoeveelheid licht die op een zonnecel valt. Bij schaduw zal er minder licht op de zonnecel vallen, waardoor deze minder stroom kan leveren. In een zonnepaneel staan alle zonnecellen elektrisch in serie.

Zonnepanelen met 60 of 72 cellen hebben vrijwel altijd 3 bypassdioden, dit betekent één bypass diode per substring van 20 of 24 cellen. Een bypass diode zorgt ervoor dat een substring wordt kortgesloten als de stroom die door de inverter wordt gevraagd hoger is dan een cel of cellen in de substring kunnen leveren. Bypass dioden beperken het vermogensverlies van zonnepanelen in geval van schaduw en limiteren de temperatuuroptima van beschaduwde cellen.

Bij een systeem met een stringinverter zonder optimizers staan deze zonnepanelen in serie geschakeld. De inverter zoekt de stroom/spanning combinatie van de serie schakeling van zonnepanelen met het hoogste vermogen (Maximum Power Point, MPP).

In geval van schaduw heeft de vermogenscurve meerdere maxima, zoals toegelicht in de Figuren 2.8 en 2.9 voor 20% schaduw op een cel van één van de zonnepanelen. De beschaduwde cel kan hierdoor maar 80% van de stroom leveren in vergelijking tot de stroom van een niet-beschaduwde cel.

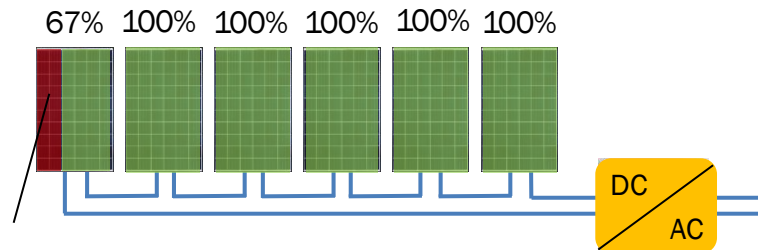
In Figuur 2.8 heeft de inverter gekozen voor 80% van de maximale stroom van de onbeschaduwde cellen, waardoor alle cellen vermogen kunnen leveren. De spanning is in dit geval vergelijkbaar met de spanning van een systeem zonder schaduw. Vanwege de lagere stroom zal het vermogen 80% zijn in vergelijking tot een systeem zonder schaduw.



Figuur 2.8. Een cel heeft 20% schaduw. De inverter kiest het maximum power punt bij 80% van de stroom van de onbeschaduwde zonnepanelen. In dit geval zullen alle cellen vermogen leveren. Het vermogen van het systeem is 80% ten opzichte van een onbeschaduwde systeem.

In Figuur 2.9 heeft de inverter gekozen voor 100% van de maximale stroom van de onbeschaduwde cellen. Hierdoor kunnen de onbeschaduwde zonnepanelen hun volledige vermogen leveren. De stroom is te hoog voor de beschaduwde cel, waardoor de spanning van deze cel negatief wordt. In plaats van energie leveren zal deze cel nu energie opnemen, waardoor deze warm wordt. De bypass diode

voorkomt dat de spanning van de groep met cellen negatief wordt door deze kort te sluiten. Door het kortsluiten van de groep van cellen met de beschaduwde cel verliest het beschaduwde zonnepaneel 33% van zijn vermogen. Het totale systeem van 6 zonnepanelen kan hierdoor nog 94% van het vermogen leveren in vergelijking tot de situatie zonder schaduw.

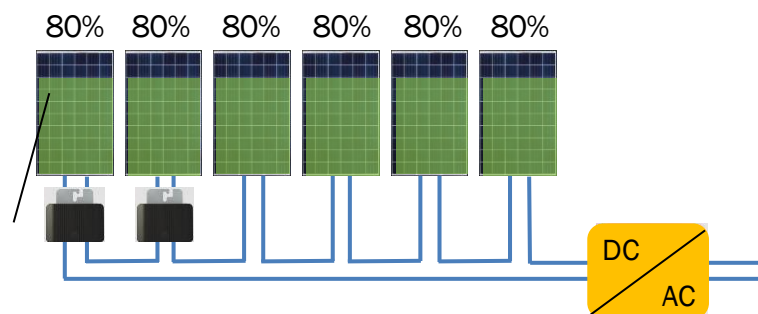


Figuur 2.9. Een cel heeft 20% schaduw. De inverter kiest het maximum power punt bij 100% van de stroom van de onbeschaduwde zonnepanelen. In dit geval zal de beschaduwde cel overbelast zijn en wordt de substring met de beschaduwde cel door de bypass diode kortgesloten. Het vermogen van het systeem is 94% ten opzichte van een onbeschaduwd systeem.

De inverter zal in dit geval kiezen voor de stroom/spanning combinatie met 94% van het vermogen, waarbij de beschaduwde cel warm zal worden. Afhankelijk van de conditie kan de temperatuur ver boven de 100°C komen, zoals later zal blijken uit de metingen in het veld.

In de Figuren 2.10 en 2.11 staat dezelfde situatie weergegeven, maar nu met optimizers op de zonnepanelen met mogelijke schaduw.

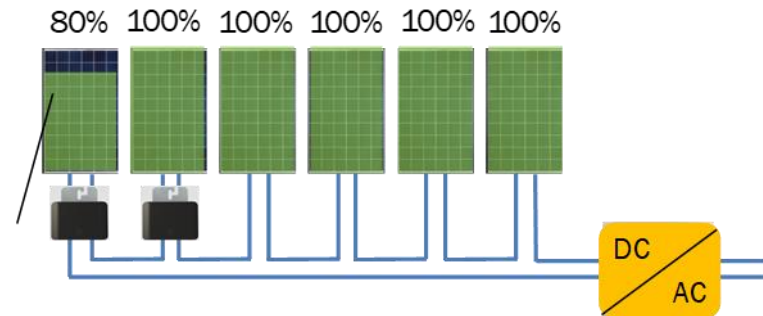
In Figuur 2.10 heeft de inverter gekozen voor 80% van de stroom. De optimizer geleidt in dit geval de stroom ("conductive mode") en alle cellen in de zonnepanelen leveren vermogen. Het totale vermogen is hier 80% van het vermogen zonder schaduw, vergelijkbaar met de situatie zonder optimizers van Figuur 2.8.



Figuur 2.10. Een cel heeft 20% schaduw. De inverter kiest het maximum power punt bij 80% van de stroom van de onbeschaduwde zonnepanelen. In dit geval zullen alle cellen vermogen leveren. De optimizer geleidt de stroom zonder MPPT. Het vermogen van het systeem is 80% ten opzichte van een onbeschaduwd systeem.

Ook met optimizers kan de inverter kiezen voor 100% van de stroom (Figuur 2.11). In dit geval is de stroom die de inverter vraagt hoger dan de beschaduwde cel kan leveren. De optimizer wordt hierdoor actief en zal het maximum power point zoeken van het beschaduwde zonnepaneel. Bij 20% schaduw zal dit 80% van de stroom zijn. De optimizer verhoogt hierbij de stroom van 80% (stroom van het beschaduwde

zonnepaneel bij maximaal vermogen) naar 100% (gevraagde stroom door de inverter, stroom bij maximaal vermogen van de onbeschaduwde zonnepanelen) onder evenredige verlaging van de spanning ("buck mode"). Het totaal vermogen van het systeem is nu 97% van het vermogen zonder schaduw. Dit is 3% hoger dan in het geval zonder optimizers.



Figuur 2.11. Een cel heeft 20% schaduw. De inverter kiest het maximum power punt bij 100% van de stroom van de onbeschaduwde zonnepanelen. In dit geval zal de optimizer de stroom van het beschaduwde paneel verhogen, waardoor deze 80% van het vermogen van een onbeschaduwde paneel levert. Het vermogen van het systeem is 97% ten opzichte van een onbeschaduwde systeem.

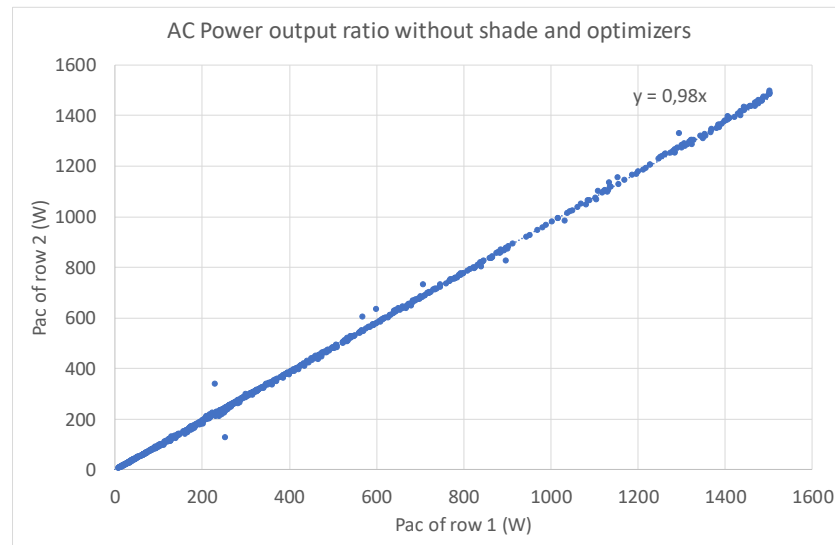
Doordat de optimizer de stroom verhoogd blijven alle cellen stroom leveren. Hierdoor worden geen cellen overbelast, waardoor er geen cellen warm worden.

Dit is een ideale theoretische benadering om het principe uit te leggen van het effect van schaduw op systemen met en zonder optimizers. Met optimizers is het ideale theoretische vermogen 97% ten opzichte van een systeem zonder schaduw, zonder optimizers is dit 94%. De theoretische winst met 20% schaduw op een cel is daarom 3%. Hierbij is geen rekening gehouden met het energieverlies van de optimizers, zoals gemeten in het laboratorium of een niet ideaal gedrag van een optimizer of inverter. Ter bepaling van het gedrag van optimizers en inverters in de praktijk voor verschillende optimizers en de temperatuur effecten zijn bij TNO-Petten metingen in het veld gedaan.

- Metingen veldtest (TNO-Petten)

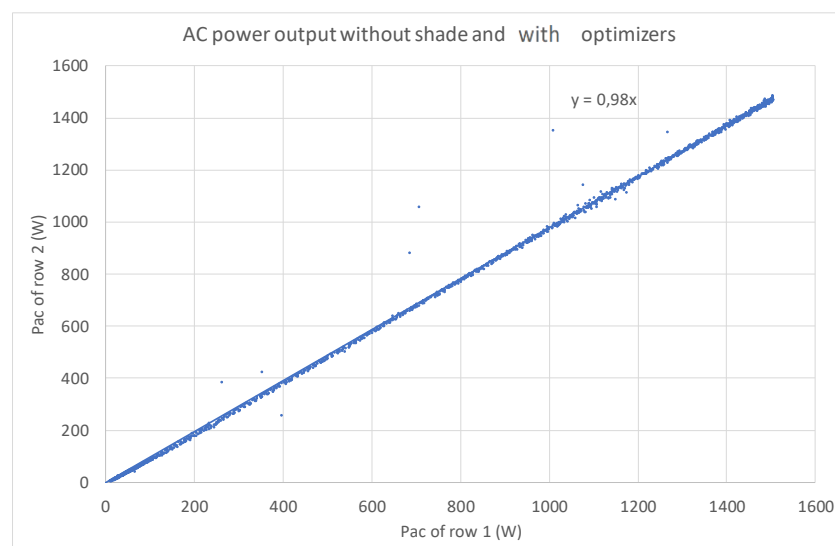
De metingen zijn gedaan met vaste schaduwelementen op de zonnepanelen en een schaduw van een paal voor de panelen, waarbij de schaduw van de paal zich gedurende de dag verplaatst over de zonnepanelen.

Als 1^e referentie meting is de opbrengst gemeten van de 2 rijen zonnepanelen, zoals gemeten zonder schaduw en zonder optimizers. De 2^e rij blijkt circa 2% minder opbrengst te hebben in vergelijking tot 1^e rij, als gevolg van met name verschil in albedo en positie (Figuur 2.12).



Figuur 2.12. Vergelijking van het vermogen van de 2^e rij als functie van het vermogen van de 1^e rij (1^e referentie meting, geen optimizers en geen schaduelelementen). De 2^e rij heeft een circa 2% lager vermogen als gevolg van verschil in albedo en positie.

Als 2^e referentiemeting zijn er 2 optimizers toegevoegd aan de 2^e rij (Figuur 2.13). Zonder schaduelelementen blijken de optimizers in “conductive mode” te zijn zonder MPPT. De 2^e rij heeft circa 2% lager vermogen ten opzichte van de 1^e rij zonder optimizers, vergelijkbaar met de meting zonder optimizers. Het geringe energieverlies van de optimizers in de totaalopbrengst is niet significant, omdat maar 2 power optimizers zijn toegevoegd aan de 6 zonnepanelen.



Figuur 2.13. Vergelijking van het vermogen van de 2^e rij met optimizers als functie van het vermogen van de 1^e rij zonder optimizers (referentie meting, geen schaduelelementen). De 2^e rij heeft 2% lager vermogen als gevolg van verschil in albedo en positie.

Met schaduwelementen op de zonnepanelen wordt een constant schaduwpercentage bereikt, waarmee de werking van de optimizers onder goed gedefinieerde omstandigheden wordt getest. De schaduwelementen zijn geplaatst op de 2 zonnepanelen met optimizers (rij 2) en de overeenkomstige 2 zonnepanelen bij het systeem zonder optimizers (rij 1).

Als schaduw zijn vier schaduwconfiguraties gebruikt, gekozen om de verschillende operating modi van de optimizers te testen. Hierbij zijn 2 panelen per rij op de volgende manier beschaduwd:

- 25% schaduw op 1 cel per zonnepaneel
- 50% schaduw op 1 cel per zonnepaneel
- 75% schaduw op 1 cel per zonnepaneel
- 50% schaduw op 2 cellen uit verschillende substrings per zonnepaneel

Dit geeft de volgende resultaten:

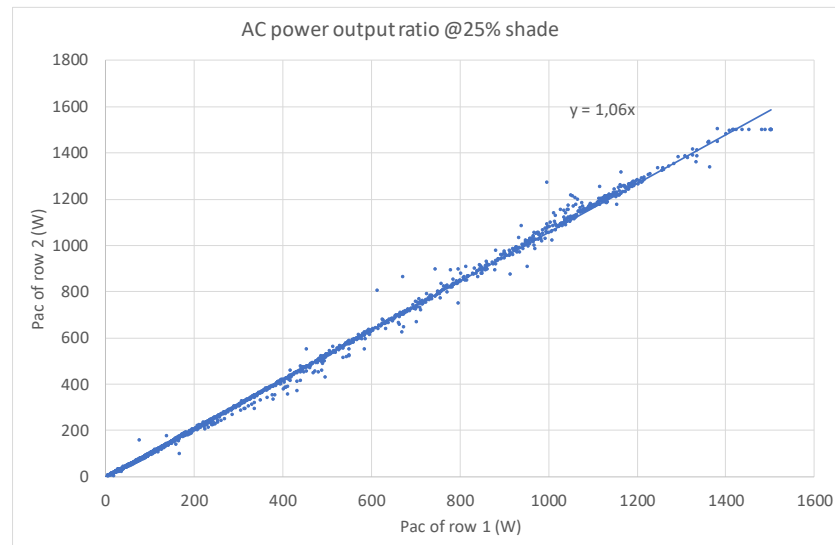
- 25% schaduw op 1 cel per zonnepaneel (Figuur 2.14).



Figuur 2.14. 25% schaduw op 1 cel per zonnepaneel, beschaduwing op 2 zonnepanelen per systeem.

Op basis van de theorie wordt bij 25% schaduw zonder optimizers het hoogste vermogen bereikt indien de inverter kiest voor de hoge stroom waarbij de substring met beschaduwde cel wordt kortgesloten. Dit bleek bij de metingen te gebeuren. Na beschaduwing van de zonnepanelen zakte de spanning van de beschaduwde zonnepanelen van 30V naar 20V terwijl de stroom overeenkomstig bleef met de installatie. Het beschaduwde deel van het zonnepaneel wordt hierbij dus opgeofferd om tot een totaal hoger vermogen te komen.

Bij 25% schaduw op het zonnepaneel met optimizers heeft de optimizer de keus tussen 75% van de stroom (waarbij alle cellen van de zonnepaneel vermogen blijven leveren) of 100% van de stroom (waarbij de substring met beschaduwde cel wordt kortgesloten). Dit is overeenkomstig met het geval zonder optimizers waarbij 33% van het vermogen van het beschaduwde zonnepaneel verloren gaat. De optimizers kozen voor 75% van de stroom, waarbij de uitgangsstroom van de optimizer aangepast werd aan de gevraagde stroom van de inverter zodat de onbeschaduwde zonnepanelen hun maximale vermogen konden blijven leveren. Het systeem met optimizers levert met 25% vaste schaduw op 2 zonnepanelen circa 6% meer vermogen (Figuur 2.15).



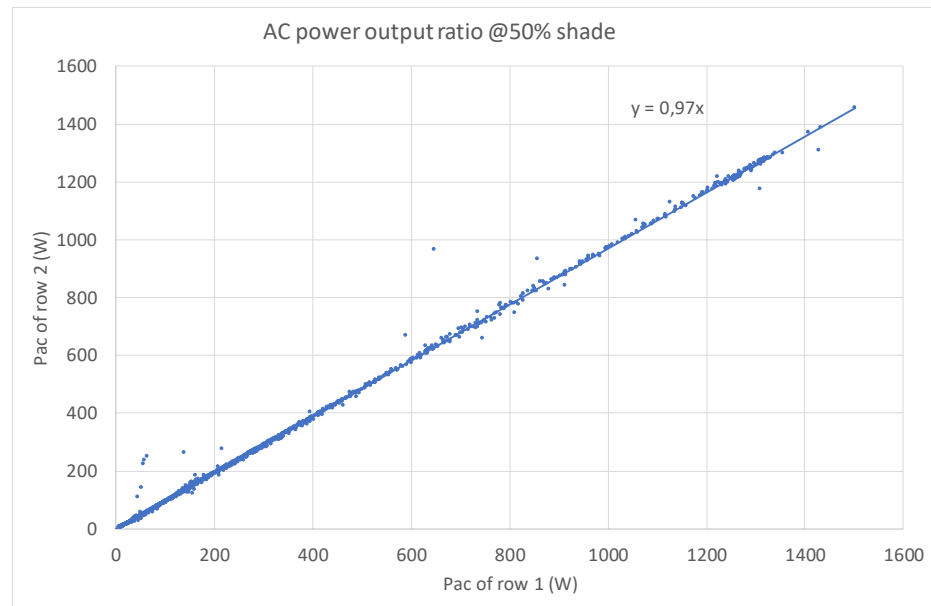
Figuur 2.15. Vergelijking van het vermogen van het systeem met 2 optimizers (rij 2) in vergelijking tot het systeem zonder optimizers (rij 1) met in beide gevallen 25% schaduw op 1 cel van 2 zonnepanelen. Het systeem met optimizers heeft circa 6% hoger vermogen.

- 50% schaduw op 1 cel per zonnepaneel.

Bij het systeem zonder optimizers wordt de beschaduwde substring opgeofferd, zodat de onbeschaduwde cellen hun maximale vermogen kunnen leveren.

Met optimizers is het verschil in vermogen tussen het wel of niet opofferen van de beschaduwde deel van het zonnepaneel gering. Bij de hoge stroom met opoffering vervalt 1/3 van het vermogen van het beschaduwde zonnepaneel. Bij 50% van de stroom blijft het gehele paneel stroom leveren. Ook wordt de spanning van het zonnepaneel door de lagere stroom hoger, waardoor het vermogensverlies overeenkomstig is met het opofferen van het beschaduwde deel van het zonnepaneel. Door het geringe verschil in vermogen tussen de 2 mogelijke operating modes blijven de optimizers gedurende de dag schakelen tussen lage stroom/hoge spanning en hoge stroom/lage spanning.

De opbrengst van het systeem met optimizers is circa 3% lager dan zonder optimizers (Figuur 2.16), vrijwel gelijk aan de referentiemetingen zonder schaduwelementen en met optimizers (Figuur 2.13). De optimizers kunnen in dit geval in overeenstemming met de theorie de opbrengst niet verhogen en hebben mogelijk een gering verlies van 1% ten opzichte van de referentiemeting.



Figuur 2.16. Vergelijking van het vermogen van het systeem met 2 optimizers (rij 2) in vergelijking tot het systeem zonder optimizers (rij 1) met in beide gevallen 50% schaduw op 1 cel van 2 zonnepanelen. De relatieve opbrengst is vrijwel vergelijkbaar met de referentiemeting zonder schaduw, de optimizers kunnen de opbrengst in overeenkomst met de theorie niet verhogen.

- 75% schaduw op 1 cel per zonnepaneel.

Bij het systeem zonder optimizers wordt de beschaduwde substring opgeofferd, zodat de onbeschaduwde cellen hun maximale vermogen kunnen leveren.

Bij deze schaduw kan de optimizer geen hogere opbrengst geven. De meeste optimizers gaan in "conductive mode", waarbij de beschaduwde substring wordt opgeofferd en de relatieve opbrengst vergelijkbaar is, zoals gemeten met de referentiemetingen zonder schaduw. 75% schaduw op een enkele cel zal zelden optreden, mede ook vanwege het veelal hoge percentage indirect licht.

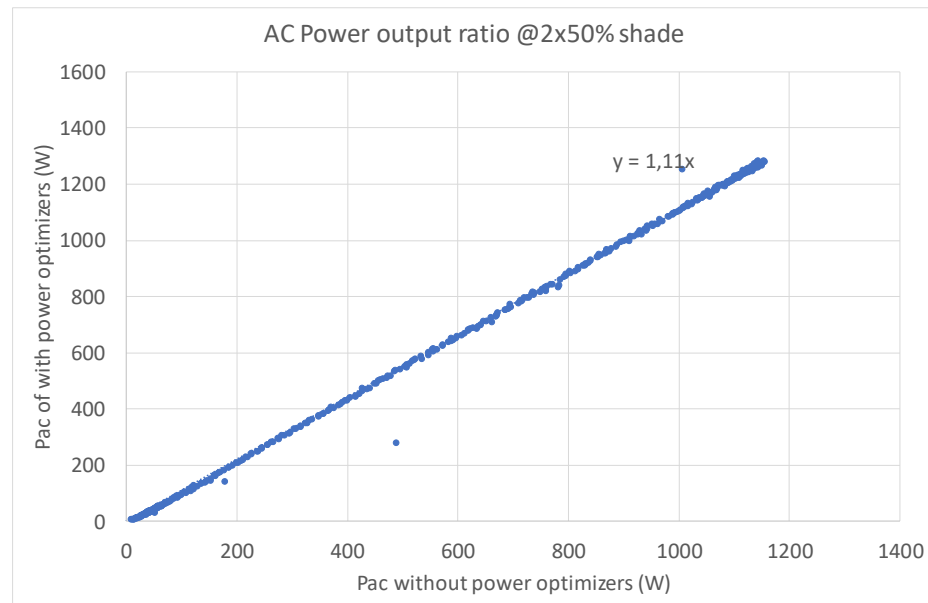
- 50% schaduw op 2 cellen op verschillende substrings per zonnepaneel.



Figuur 2.17. 50% schaduw op 2 cellen per zonnepaneel op verschillende substrings, beschaduwning op 2 zonnepanelen per systeem.

Bij het systeem zonder optimizers worden de beschaduwde substrings opgeofferd, zodat de onbeschaduwde cellen hun maximale vermogen kunnen leveren.

Met optimizers wordt door alle optimizers gekozen voor 50% van de stroom, waardoor geen opoffering van cellen plaatsvindt en het systeem circa 11% meer vermogen levert in vergelijking tot het systeem zonder optimizers (Figuur 2.18).



Figuur 2.18. Vergelijking van het vermogen van het systeem met 2 optimizers (rij 2) in vergelijking tot het systeem zonder optimizers (rij 1) met in beide gevallen 50% schaduw op 2 cellen van verschillende strings van 2 zonnepanelen. Het systeem met optimizers heeft circa 11% hoger vermogen.

Uit deze metingen blijkt dat de inverters en optimizers met een vast percentage schaduw veelal het juiste operating punt kiezen met het hoogste vermogen. Zonder optimizers wordt hierbij altijd de beschaduwde substring opgeofferd zodat de onbeschaduwde delen van de zonnepanelen hun maximale vermogen kunnen leveren. Dit is het MPP met de maximale opbrengst zonder power optimizers.

Met optimizers kiezen de optimizers veelal het operating punt van de beschaduwde zonnepanelen met het hoogste vermogen, terwijl in alle gevallen de onbeschaduwde zonnepanelen hun maximaal vermogen leveren. In de gevallen dat de optimizers niet het juiste operating punt kiezen is het verschil in opbrengst gering. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat de inverter ingesteld moet staan op maximale opbrengst in geval van schaduw. Indien de inverter niet staat ingesteld op optimale opbrengst werken ook de systemen met optimizer niet optimaal. Met name bij stabiel zonnig weer schakelen de optimizers bij invallen van schaduw niet over van "conductive mode" naar "buck mode", waardoor de optimizer de stroom alleen geleid en niet als MPPT functioneert. Ook in geval van optimizers moet de inverter worden ingesteld op maximale opbrengst in geval van schaduw.

Voor de metingen met schaduw door een paal is er een paal geplaatst op 30 cm afstand van de onderkant van de middelste 2 zonnepanelen (zie Figuur 2.7).

De schaduw van de paal op de zonnepanelen wordt bepaald door het tijdstip, de datum en de verhouding tussen direct en indirect licht. Op onbewolkte dagen is er een duidelijke schaduw zichtbaar (Figuur 2.19).



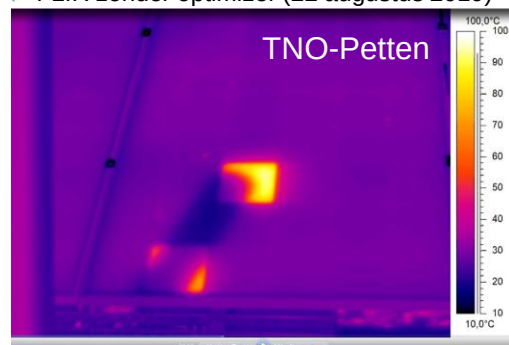
Figuur 2.19. Voorbeeld van de schaduw van de paal op de zonnepanelen op een onbewolkte dag (22 augustus 2019)

Aan de hand van de metingen is bepaald of de systemen met en zonder optimizers de juiste spanning/stroom kiezen voor het maximaal vermogen. Dit bleek meestal het geval te zijn. Zonder optimizer zal een substring bij meer dan 10-20% schaduw moeten worden opgeofferd doordat de inverter voorrang geeft aan de substrings zonder schaduw. Dit is de schaduwconditie waarbij de hoogste temperaturen optreden in de beschaduwde cel. Met optimizer zal een substring pas moeten worden opgeofferd indien er meer dan circa 50% schaduw valt op een cel in deze substring. Omdat de stroom bij een hoger schaduwpercentage lager is zal deze beschaduwde cel veel minder warm worden.

Om dit effect te bepalen zijn met een FLIR-camera video's gemaakt van de voorkant van de beschaduwde zonnepanelen (Figuur 2.20) bij de rijen zonder (links) en met (rechts) optimizer.

Zonder optimizer is net voldoende schaduw op een cel in de middelste string gekomen waarbij deze wordt opgeofferd. De temperatuur neemt hierbij snel toe tot wel 130°C. Met optimizer neemt de temperatuur in de middelste string niet toe en is alleen een geringe temperatuurstijging te zien bij de hogere schaduwpercentages.

FLIR zonder optimizer (22 augustus 2019)



FLIR met Heliox optimizer (12 september 2019)



Figuur 2.20. Vergelijking van de temperatuurstijging als gevolg van de schaduw van een paal voor het systeem zonder (links) en met (rechts) optimizer.

- Jaaropbrengst berekeningen (TNO-Petten)

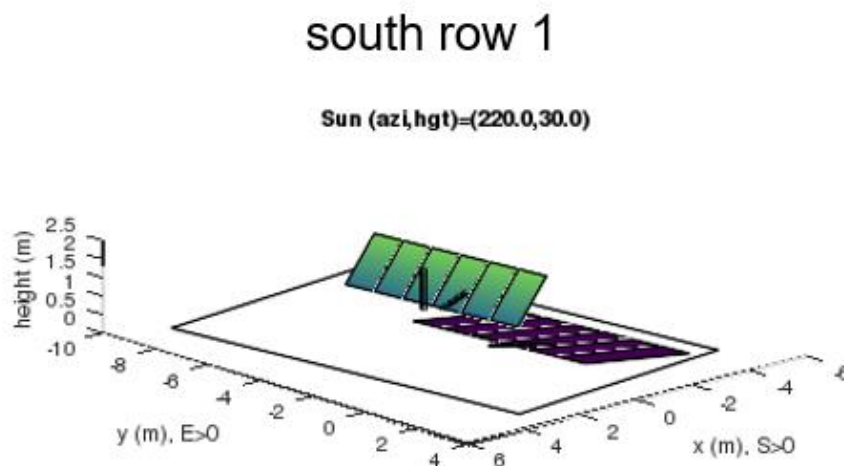
De metingen hierboven zijn uitgevoerd onder veel verschillende condities, zoals onder andere:

- Referentiemetingen zonder en met optimizers
- 4 verschillende vaste schaduwelementen
- Paalschaduw
- 5 verschillende optimizers
- Extra meting met inverter zonder optimale schaduwinstelling.

De 5 verschillende schaduwconfiguraties en 5 verschillende optimizers zijn al 25 verschillende configuraties. Hierdoor was het niet mogelijk om de jaaropbrengst per configuratie te bepalen.

Om het effect van het selectief gebruik van optimizers op de jaaropbrengst te bepalen zijn modelberekeningen uitgevoerd met het door TNO-Petten ontwikkelde programma "BIGEYE". De input van het model waren de karakteristieken van de zonnepanelen, optimizers en inverter, zoals bepaald met de metingen in het laboratorium en in het veld zoals in dit hoofdstuk beschreven. De gebruikte instralingsdata is gemeten in Petten gedurende een jaar. Veel instralingsdata sets zijn gemiddelde over een uur, waardoor hoge en lage waarden worden uitgemiddeld. Vanwege de snelle verandering van de zon levert dit geen goede simulaties op. De data zoals gebruikt bij deze berekeningen zijn geen gemiddelde waarden maar instantane waarden zoals iedere 6 minuten gemeten.

In Figuur 2.21 wordt de configuratie weergegeven van de 6 zonnepanelen met de paalschaduw in het midden van de zonnepanelen, waarbij de middelste 2 zonnepanelen zijn voorzien van optimizers. Deze configuratie is overeenkomstig met de metingen bij TNO-Petten.



Figuur 2.21. Simulatie van de paalschaduw met het programma BIGEYE overeenkomstig met de metingen bij TNO-Petten.

De berekeningen met het model bleken goed overeen te komen met de metingen, waarmee het model geschikt is voor de berekeningen van de jaaropbrengst.

Uit de berekeningen zonder paalschaduw volgt dat de opbrengst van het systeem zonder optimizers 0.7% lagere opbrengst heeft dan het systeem met optimizers. Deze lagere opbrengst komt door het energieverlies van de optimizers in “conductive mode”. In het geval van de berekeningen met paalschaduw heeft het systeem met optimizers 1.1% hogere opbrengst ten opzichte van het systeem zonder optimizers. Bij deze berekeningen is er van uitgegaan dat de optimizers en inverters altijd hun MPP vinden, zoals bij de metingen ook veelal het geval was. Uit deze berekeningen volgt dat de meeropbrengst door gebruik van optimizers bij de gegeven paalschaduw gering is ten opzichte van een systeem zonder power optimizers. De optimizers voorkomen wel het optreden van extreme temperaturen, zoals aangetoond met de metingen in het veld.

WP4. Veldtest (TNO-Eindhoven)

Bij TNO-Eindhoven is een veldtest gedaan op het dak van het “Vertigo” gebouw van de Technische Universiteit Eindhoven (Figuur 2.22). Het meetsysteem bestaat uit 3 sets van 6 zonnepanelen. Iedere set is aangesloten op een 1.5 kW inverter. Op de achterste 2 sets van 6 zonnepanelen zijn op 2 zonnepanelen power optimizers aangesloten (PO) van GNE (links) en Heliox (rechts). Op de 6 panelen aan de rechter voorzijde zijn geen power optimizers aangesloten, dit is de referentie van de systemen met power optimizers. SolNed heeft de GNE optimizers, GSM router en monitoring apparatuur geleverd, de monitoring online gebracht en de opgetreden problemen opgelost. Heliox heeft de binnen dit project ontwikkelde optimizers geleverd.



Figuur 2.22. Test faciliteit in TNO-Eindhoven. De achterste 2 rijen zonnepanelen zijn voorzien van 2 power optimizers (links Heliox en rechts GNE), de voorste rechter rij heeft geen power optimizer.

Bij iedere set is een paal schaduw element geplaatst in het midden voor de 2 rechter zonnepanelen (Figuur 2.23). Met dit systeem is het effect van de paalschaduw gemeten op de opbrengst zonder (rechter rij aan de voorkant) en met selectieve toepassing van optimizers (achterste 2 rijen). Op verschillende momenten zijn de paal schaduw elementen verwijderd om de opbrengst van de systemen zonder schaduw te bepalen.



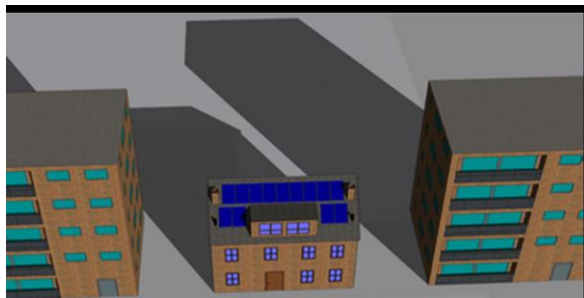
Figuur 2.23. Positie van het paal schaduw element.

Om het effect van de schaduw op de opbrengst te meten zijn iedere minuut van iedere optimizer en inverter de spanning, stroom en vermogen gemeten (Yokogawa WT1800). Voor de bepaling van de specifieke opbrengst zijn tegelijkertijd met de opbrengst de in-plane en horizontale instraling, omgevings- en module temperaturen gemeten.

Zonder de paalschaduw elementen zijn alle zonnepanelen gelijk, waardoor de power optimizer alleen de stroom doorlaat zonder optimalisering van het vermogen. Doordat iedere optimizer een verlies van vermogen heeft, was de opbrengst van het systeem met optimizers in de gegeven meetperiode 0.9% lager in vergelijking tot het systeem zonder optimizers.

Met de paalschaduw elementen kunnen de optimizers wel de opbrengst van het systeem verbeteren, waarbij de opbrengst van het systeem met optimizer in de gegeven meetperiode 2.4% hoger was in vergelijking tot het systeem zonder optimizers.

Voor de berekening van het effect van verschillende soorten schaduwen op de jaaropbrengst zijn modelberekeningen gedaan aan fictieve situaties (Figuur 2.24). Dit model bestaat uit een 3D SketchUp model, een schaduw model, een instralingsmodel, een temperatuurmodel, een IV-model van de zonnepanelen en een systeem verlies model van de optimizers en inverters. De gebruikte parameters van de optimizers en inverters zijn zoals bepaald met de metingen in Eindhoven.



Figuur 2.24. Weergave van de verschillende schaduw varianten van de modelberekeningen.

De berekeningen zijn gedaan voor uitlaatgaspijpjes, schoorsteen, dakkapel, schaduw door naastliggende gebouwen of schaduw door gebouwen voor de zonnepanelen.

Uit deze berekeningen volgt dat een beperkte schaduw van een pijp slechts een gering effect heeft op de opbrengst van het systeem zonder optimizers. Dit komt door de sterk verbeterde MPP-tracking van de inverters. De beperkte verbetering van de opbrengst door de power optimizers in geval van schaduw wordt tenietgedaan door het vermogensverlies van de optimizers. Power optimizers hebben in dit geval daarom geen positief effect op de opbrengst. Wel beperken power optimizers in dit geval het optreden van hotspots, zoals uit de metingen bij TNO-Petten blijkt. Vergelijkbare conclusies gelden voor een schoorsteen, al is het vermogensverlies hoger dan in vergelijking tot een pijp.

Een gebouw geeft schaduw over meerdere strings van een zonnepaneel. Hierdoor is het vermogensverlies zonder optimizers groter. In dit geval kunnen optimizers wel een geringe verbetering van de opbrengst geven.

Indien er schaduw optreedt op alle zonnepanelen van de string kunnen optimizers geen verhoging van de opbrengst geven. Door het vermogensverlies van de optimizers kan in dit geval de opbrengst met optimizers zelfs lager zijn dan zonder optimizers.

De combinatie van de theorie, de metingen en berekeningen bij TNO-Petten en TNO-Eindhoven hebben geleid tot algemene richtlijnen, zoals vermeld in de perspectief voor toepassing.

2.2 Knelpunten

Bij aanvang van het project heeft TNO-Eindhoven overleg gehad met de inverter fabrikant voor de instelling van de inverter bij gebruik van power optimizers. Volgens de fabrikant zou bij gebruik van power optimizers het schaduwmanagement systeem van de inverter moeten worden uitgeschakeld. Uit de metingen in het laboratorium en de veldtesten bleek dat voor de goede werking van de optimizers het schaduwmanagement systeem van de inverter wel ingeschakeld moet zijn. Omdat de eerste series metingen zijn gedaan met uitgeschakeld schaduwmanagement systeem moesten deze metingen worden herhaald. Hiervoor is verlenging van het project aangevraagd en verleend. Inmiddels heeft de inverter fabrikant het advies aangepast.

2.3 Perspectief voor toepassing

Selectieve toepassing van optimizers blijkt een goede oplossing om het vermogensverlies van beschaduwde zonnepanelen te beperken en hoge temperaturen van beschaduwde zonnecellen te voorkomen. Doordat bij selectieve toepassing alleen de beschaduwde zonnepanelen worden voorzien van optimizers zijn de meerkosten van het systeem in vergelijking tot een systeem met string inverter beperkt, afhankelijk van het aantal zonnepanelen met schaduw (zie 3.1).

De gegeven resultaten gelden alleen indien de zonnepanelen zonder schaduw dezelfde opbrengst hebben. Indien dit niet het geval is, bijvoorbeeld omdat de zonnepanelen onder verschillende hoeken zijn geplaatst, verschillend zijn in vermogen door bijvoorbeeld degradatie of geplaatst worden in een omgeving met veel vervuiling, wordt aanbevolen om op alle zonnepanelen een optimizer te plaatsen.

Inverters hebben een MPPT die continu met een beperkte spanningsvariatie zoeken naar het MPP van het systeem. Daarnaast hebben inverters een schaduw management systeem, waarbij de inverter op gezette tijdsintervallen een volledige spanningsscan uitvoert om te kijken of er een MPP is met een hoger vermogen, zoals in geval van schaduw het geval kan zijn. Voor een goede werking van de optimizers moet dit schaduwmanagement systeem ingeschakeld staan.

Er worden continu nieuwe type inverters en optimizers op de markt gebracht, ook wordt geregeld de software van de inverters verbeterd. De gegeven resultaten zijn dan ook een momentopname voor de gegeven modellen.

De resultaten in dit rapport gelden niet voor het SolarEdge systeem, bestaande uit SolarEdge optimizers in combinatie met een SolarEdge inverter. In dit systeem zijn de optimizers en inverter volledig op elkaar afgestemd. Bij dit systeem werkt de inverter op een vaste DC spanning zonder MPPT, waardoor deze veelal goedkoper en efficiënter is in vergelijking tot een string inverter. Vanwege de opbouw van dit systeem is selectieve toepassing van deze SolarEdge optimizers niet mogelijk.

3 Doelstelling, spin off en publicaties

3.1 Bijdrage aan de doelstellingen van de regeling

De doelstelling van de regeling is het verlagen van de opwekkosten door verlagen van de productie kosten, verhogen van de elektriciteitsopbrengst per m², verlengen van de levensduur en verlagen van kosten voor onderhoud en beheer.

- verlagen van de productie kosten

Bij selectief gebruik van optimizers worden alleen optimizers toegepast op de zonnepanelen met schaduw. Voor de afschatting van de productiekosten is uitgegaan van een referentiesysteem bestaande uit 10 zonnepanelen van 340 Wp per paneel (Tabel 3.1). Zonder optimizers kost dit systeem €3400 (laag) tot €5100 (hoog). Selectieve toevoeging van 1 tot 2 optimizers verhoogt de systeemkosten met 1-2.9%. Indien alle zonnepanelen worden voorzien van optimizers worden de systeemkosten 10-15% hoger. Uit deze berekening volgt dat selectieve toepassing slechts een geringe verhoging heeft van de systeemkosten, veel lager in vergelijking tot een systeem met toepassing van optimizers op alle zonnepanelen.

Systeem kosten		Aantal optimizers			
	€/Wp	0	1	2	10
Laag	1	€ 3400	+ 1.5%	+ 2.9%	+ 15%
Hoog	1.5	€ 5100	+ 1.0%	+ 2.0%	+ 10%

Tabel 3.1. Berekening van de extra kosten voor systemen met 1, 2 of 10 optimizers, in vergelijking tot een systeem met 10 zonnepanelen van 340 Wp zonder optimizers.

- verhogen van de elektriciteitsopbrengst per m² en verlengen van de levensduur.

Het effect van optimizers op de elektriciteitsopbrengst is afhankelijk van het type schaduw, zoals vermeld in de samenvatting en resultaten. Door verbetering van het schaduwmanagement van de stringinverters is het effect van schaduw op de opbrengst van systemen zonder optimizers kleiner geworden, waardoor het positieve effect van optimizers kleiner is geworden in vergelijking tot een aantal jaren geleden.

Schaduw kan leiden tot een sterk verhoogde temperatuur van de beschaduwde cel, die vaker zullen optreden als gevolg van het verbeterde schaduwmanagement van de inverters. In het open-rack systeem zonder optimizers in Petten zijn lokaal temperaturen gemeten tot 130°C. In een dak systeem met minder ventilatie zullen deze temperaturen nog hoger zijn. Indien deze hoge temperaturen jarenlang structureel geregeld optreden als gevolg van een bijvoorbeeld de schaduw van een luchtafvoerkanaal kan dit een verhoogde degradatie van het zonnepaneel tot gevolg hebben.

Deze hoge temperaturen treden op in een systeem zonder optimizers bij een geringe beschaduwing op een enkele cel in een substring van het zonnepaneel. Selectieve toepassing van een optimizer op dit zonnepaneel voorkomt onder deze conditie een verhoging van de temperatuur omdat de optimizer van inactieve geleidingsmode overgaat naar actieve buck mode waarbij geen substrings door de bypass diode worden kortgesloten.

- verlagen van kosten voor onderhoud en beheer.

Doordat optimizers hoge temperaturen van beschaduwde zonnepanelen voorkomen kan dit de levensduur van deze panelen verlengen, waardoor de kosten voor onderhoud en beheer lager worden.

Ondanks dat optimizers veelal een garantie hebben van 25 jaar kunnen deze eerder defect raken. Optimizers die binnen deze periode defect raken kunnen onder bepaalde voorwaarden worden vervangen. Bij selectieve toepassing van optimizers zijn er minder optimizers op het dak en is de kans op defecten kleiner in vergelijking tot een systeem dat volledig is uitgerust met optimizers.

Een groot voordeel van optimizers is dat de werking van zonnepanelen op paneel niveau kan worden gemonitord, waardoor eventuele afwijkingen in het systeem makkelijk kunnen worden gelokaliseerd. Bij selectief gebruik van optimizers kan alleen de opbrengst van het totale systeem en de opbrengst van de panelen met optimizers worden gemonitord, waardoor eventuele afwijkingen in de opbrengst van een systeem minder makkelijk kunnen worden aangetoond en opgelost.

3.2 Spin off binnen en buiten de sector

Dit project heeft veel kennis opgeleverd over het gedrag van optimizers en inverters, die binnen andere projecten wordt en zal worden ingezet. Voorbeelden zijn de projecten SolarWind en Newrail, waarbij het effect van een snel veranderende schaduw van respectievelijk een windmolen en trein wordt onderzocht op de opbrengst van een inverter. Een ander voorbeeld is het project ZonopZee waarbij een systeem is gebouwd met de kennis van OptiShade. Het OptiShade project heeft ook veel kennis opgeleverd op het gebied van het optreden van hotspots in zonnepanelen in geval van schaduw, zoals in opdracht van externe partijen wordt toegepast bij de metingen in het laboratorium met onze zonn simulator. Met de kennis op gebied van optimizers en inverters van het OptiShade project is een meetopstelling gebouwd waarmee de effectiviteit van een arc detector in een inverter kan worden getest.

3.3 Openbare publicaties

De resultaten zijn op volgende manieren openbaar gemaakt:

Master Thesis: Selective deployment of power optimizers in residential PV-systems (26 augustus 2019), Konstantinos Tsatsakis
<http://dspace.library.uu.nl/handle/1874/384134>

Presentatie op de Sunday (13 november 2019):

Optimalisatie van PV bij grootschalige uitrol in de gebouwde omgeving

Effect van schaduw op opbrengst en optreden van hotspots in zonnepanelen

Egbert Gramsbergen (RE-Source) - Nico Dekker (TNO)

<http://sundaynl.nl/programma>

Artikel en presentatie op de EUPVSEC conferentie (10 september 2020)

Selective deployment of power optimizers: effect of shade on performance and hotspots in PV modules

N.J.J. Dekker, M.J. Jansen, A.R. Burgers, M.S. Dörenkämper, R. Jonkman, R. van der Ven and E. Gramsbergen

<https://www.eupvsec-proceedings.com/proceedings?paper=49518>

Artikel: Evaluation and Analysis of Selective Deployment of Power Optimizers for Residential PV Systems (4 februari 2021)

Kostas Sinapis, Konstantinos Tsatsakis, Maarten Dörenkämper, Wilfried G. J. H. M. van Sark (<https://www.mdpi.com/1996-1073/14/4/811>)

Daarnaast is er artikel geschreven voor het Solarmagazine, zoals aangeboden zal worden voor publicatie in 2021.

3.4 Contactpersoon

Voor informatie over dit project kan contact worden opgenomen met Nico Dekker van TNO (nico.dekker@tno.nl)

4 Subsidie

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.