

**Oratie**

Integratie door  
differentiatie

*De rol van zonne-energie in  
de samenleving*

Wilfried van Sark





**Universiteit Utrecht**

## **Integratie door differentiatie**

**De rol van zonne-energie in de samenleving**

Wilfried van Sark

*Hoogleraar Integration of Photovoltaic Solar Energy*

Inaugurele rede (in verkorte vorm) uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van hoogleraar aan de faculteit Geowetenschappen van de Universiteit Utrecht, op 31 oktober 2019

## COLOFON

### **ISBN**

978 90 6266 565 5

### **Uitgave**

Faculty of Geosciences – Utrecht University, 2019

### **Foto Wilfried van Sark**

Ed van Rijswijk

### **Omslagillustratie**

NASA, Ed van Rijswijk

### **Illustraties/grafieken**

Eigen ontwerp en van bronnen aangegeven in de figuurbijbschriften

### **Grafische verzorging**

C&M (9704)

Let photons beget electrons  
*Ian McEwan, "Machines like me", 2019*

Voor Guido, Sophie, Miki, en Dávid  
*de volgende generatie*



*Mijnheer de Rector Magnificus, geachte aanwezigen,*

Wij liepen zojuist deze Aula binnen begeleid door orgelklanken. Organist Jan Jaap Steensma speelde *Promenade*, het eerste deel van de *Schilderijtentoonstelling* van Moessorgski. Als symbool voor de gang die ik samen met u wil maken langs een aantal aspecten rond integratie van zonne-energie – alsof we samen in een museum van kunstwerk naar kunstwerk lopen, door kleurrijke zalen.

## I Inleiding

Zonne-energie is onmiskenbaar aanwezig in de samenleving. Blauwe zonnepanelen liggen als tangram puzzels (Figuur 1) op vele daken en wekken grote hoeveelheden elektriciteit op. Tot volle tevredenheid van de ruim half miljoen eigenaren in Nederland. Op niet al te warme zonnige dagen rond het middaguur wekken al die zonnepanelen momenteel samen tot wel een derde op van de elektriciteit die we nodig hebben. Op jaarbasis is dit natuurlijk minder, maar zeker zo'n drie procent.

De opmars van zonne-energie zorgt ook voor allerlei controverses. Zo zouden zonnepanelen lelijk zijn – of althans, ze kunnen een stuk mooier [1] –, ze vliegen in brand, moeten ze nu wel op landbouwgrond, gaan ze niet ten koste van onze schaarse natuur, of zijn ze juist goed voor de biodiversiteit [2], er is te lage netcapaciteit om



*Figuur 1. Drie voorbeelden van zonnepanelen op huizen in Utrecht.*

systemen aan te sluiten [3], etc etc. Maar deze controverses zijn eigenlijk heel goed nieuws. Zonnepanelen – of beter gezegd fotovoltaïsche zonne-energie, ‘photovoltaics’, zonnestroom, of zonPV, de afkorting waarop we in Nederland zijn uitgekomen – worden eindelijk echt serieus besproken. En niet langer slechts door een selecte groep activistische wetenschappers en goedbedoelende geitenwollensokkendragers, maar door een brede doorsnee van de samenleving, van de Tweede Kamer en ministeries tot en met de buurman met zijn of haar zonnepanelen (“Zeg buurman, wat heb je vandaag al opgewekt?”). ZonPV is bijna dagelijks in het nieuws. Zo schreef De Volkskrant op de Dag van de Duurzaamheid op 10 oktober j.l. in haar artikel over de aankondiging door TenneT van een extra investering van 215 miljoen euro in Drenthe en Groningen om problemen met netcapaciteit aan te pakken [3] bijna poëtisch: “Het is alsof Mondriaan nabij Delfzijl nieuwe inspiratie heeft gekregen”.

Het gaat hard, harder dan verwacht lijkt het wel. Nu is die ontwikkeling in de landen om ons heen en met name Duitsland, al veel langer aan de gang. Maar we hebben in Nederland inmiddels ook een gigawatt markt, 12 jaar na Duitsland weliswaar [4], met een marktomzet van een paar miljard euro. Deze groei zal zich voortzetten, en zonPV is vanzelfsprekend onderdeel van het Nederlandse Klimaatakkoord. Daarom is het nu noodzaak ons de volgende vragen te stellen:

1. hoe zorgen we er met zijn allen voor dat de noodzakelijke groei van zonPV zich doorzet in de komende decennia?
2. hoe krijgen we zonPV geïntegreerd op een esthetisch verantwoorde manier op en in gebouwen, en in onze omgeving?
3. hoe gaan we om met de variabiliteit van zonPV in het elektriciteitsnet?

In mijn oratie zal ik trachten antwoorden te geven of in ieder geval richtingen waarin we deze antwoorden kunnen vinden, en hoe wetenschappelijk onderzoek hieraan kan bijdragen.

Maar laat ik bij het begin beginnen.

### **1.1 Het fotovoltaïsch effect**

In 1839 beschreef de toen 19-jarige (!) Alexandre-Edmond Becquerel het fotovoltaïsch effect, toen hij in het laboratorium van zijn vader Antoine César Becquerel bezig was om zilver chloride aan te brengen op een platina electrode. Hij observeerde dat als hij de elektrodes bescheen met licht dat er dan spanning en stroom werd opgewekt:

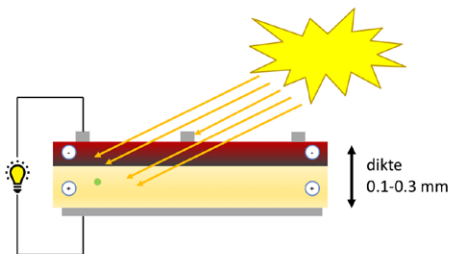


het fotovoltaïsch effect [5]. Ter gelegenheid van de 150<sup>e</sup> verjaardag van de ontdekking door Becquerel heeft de Europese Commissie in 1989 de Becquerel prijs ingesteld, en deze wordt elk jaar uitgereikt tijdens de European Photovoltaic Solar Energy Conference [6]. Het verheugt me zeer dat de enige Nederlandse winnaar ooit, Wim Sinke, hier in de zaal aanwezig is [7].

Via Albert Einstein en Max Planck duurde het nog toch 1954 voordat de eerste zonnecellen werden ontwikkeld, in de Verenigde Staten door onderzoekers Daryl Chapin, Calvin Fuller en Gerald Pearson van Bell Telephone Laboratories, in de tijd dat grote bedrijven nog een research lab hadden [8]. Deze Bell Solar Battery, zo genoemd omdat de zonnecellen een batterij moesten opladen [9], werd voor het eerst toegepast, het kon ook niet missen, als oneindige energiebron voor een telefoon. Het eerste voorbeeld van integratie van zonnecellen in een product. En daarna meteen de ruimte in: in 1958, mijn geboortjaar, werd de Vanguard I satelliet gelanceerd, een bol van zo'n 15 cm doorsnee, de vierde satelliet ooit, na de Sputnik, en nu nog de langstlevende in een baan rond de aarde. Het tweede voorbeeld van integratie [10].

## 1.2 Werkingsprincipe

Hoe werkt nu zo'n zonnecel eigenlijk? Zonder een diepgaande verhandeling te houden over halfgeleider- en vastestoffysica, kunnen we een zonnecel beschouwen in haar meest basale vorm als een dunne plak monokristallijn materiaal (de hele plak is één kristal) waarin kleine hoeveelheden van twee verschillende andere materialen aan zijn toegevoegd, om een negatieve en een positieve laag te kunnen maken: een diode of  $p-n$  overgang [11], zie Figuur 2. Lichtdeeltjes (fotonen) worden geabsorbeerd in het materiaal en de energie van de fotonen wordt omgezet in bewegelijke elektronen in het materiaal. Door de structuur van het materiaal kan een deel van die elektronen als stroom naar buiten het materiaal worden geleid, en kan er met die stroom iets nuttigs



*Figuur 2.*  
*Werkingsprincipe van*  
*een zonnecel (met dank*  
*aan Atse Louwen).*

worden gedaan, dat noemen we arbeid verrichten. Het meeste gebruikte materiaal is silicium waaraan fosfor of borium is toegevoegd om de  $p-n$  structuur te realiseren.

In essentie is er aan die structuur niets veranderd in de afgelopen vijftien jaar. De cellen zijn groter geworden, en meer vierkant. Er zijn technologische snufjes aan toegevoegd om meer licht in de zonnecel te krijgen en zo veel mogelijk verliesfactoren te minimaliseren om het omzettingsrendement zo hoog mogelijk te krijgen [12,13]. Vanwege mogelijk lagere kosten is ook multikristallijn silicium als materiaal voor zonnecellen ontwikkeld. Het record rendement voor een monokristallijn silicium zonnecel is nu 26.7% [14], terwijl het theoretisch maximaal rendement 32% is [15]. Het is lastig om die laatste paar procent daadwerkelijk te realiseren [16]. Voor multikristallijn silicium is het record rendement nu 22.3% [14].

Nog steeds worden meerdere cellen verzameld in een zonnepaneel en in serie geschakeld. Vroegere panelen waren gebaseerd op 3-inch ronde monokristallijn silicium cellen, met een paneel vermogen van 10-15 Wp, later werden dat vierkante cellen van 10x10 cm<sup>2</sup>, met een paneelvermogen van 100 Wp, en huidige panelen bestaan uit vierkante cellen van 15x15 cm<sup>2</sup> en hebben vermogens van 250 tot 400 Wp. Het record rendement van een zonnepaneel is een paar procent lager dan het zonnecel record [14]. Omdat er nogal wat fabrikanten van zonnepanelen zijn die hun producten op de markt aanbieden is het interessanter te kijken naar het gemiddeld rendement van de panelen die op de markt zijn. Dat is ongeveer 18%

De capaciteit van een zonnepaneel wordt aangeduid met de eenheid wattpiek (Wp). Dit is het *vermogen* dat wordt opgewekt onder standaard test condities van 1000 W/m<sup>2</sup> zonne-intensiteit en een kleurspectrum dat overeenkomt met dat van een zonnige dag in Parijs (Air Mass 1.5), terwijl het zonnepaneel een temperatuur heeft van 25 °C [11]. Een zonnepaneel van 400 Wp levert daarom maar 200 Watt als de zonne-intensiteit de helft is van 1000 W/m<sup>2</sup>.

De hoeveelheid elektrische *energie* die een zonnepaneel van 400 Wp opwekt in een heel jaar in Nederland is 350 kWh, gebaseerd op kentallen van het Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS) [18]. In praktijk varieert dit per jaar en dit is ook afhankelijk van de locatie van het zonnepaneel in Nederland. Zo hebben we gezien dat 2018 een record jaar was voor zonnepaneel bezitters [19], met tot wel 30% meer opgewekte energie dan normaal.

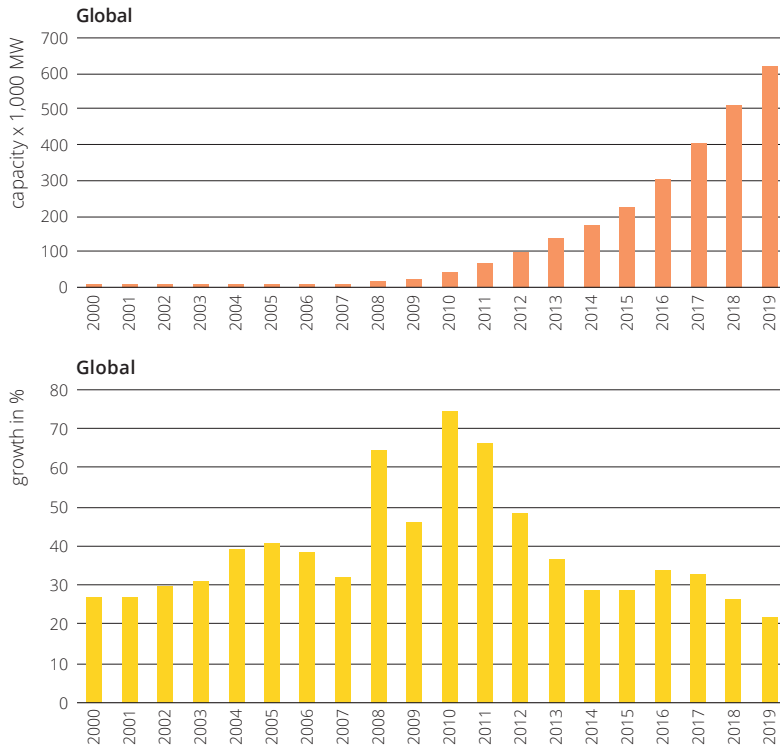
voor monokristallijne zonnepanelen en bijna 17% voor multikristallijne panelen [17]. Het huidige marktaandeel van multikristallijne silicium is overigens met 62% bijna het dubbele van dat van monokristallijn silicium (33%). De rest van de markt (5%) bestaat uit dunne film cel technologie gebaseerd op cadmiumtelluride (CdTe), koperindium(gallium)sulfide (CI(G)S) en amorf silicium.

### 1.3 Marktontwikkeling wereldwijd

Vijfenzestig jaar na de eerste zonnecel zal er wereldwijd meer dan 600 gigawattpiek (GWp) aan zonPV geïnstalleerd zijn eind 2019 [20], zie Figuur 3. Dat zijn zo'n 2 miljard zonnepanelen van elk 300 Wp. Als je die in een rij achter elkaar zou leggen, zou dat een afstand zijn van ruim 4 maal heen en weer naar de maan. Sinds het jaar 2000 is de gemiddelde jaarlijkse groei aan installaties bijna 40% geweest, met hier en daar uitschieters naar boven als gevolg van variatie in grondstofprijzen en dumppraktijken. Zonder die uitschieters is de jaarlijkse groei zo'n 25 tot 30%. Hoewel er wordt verwacht dat dit soort groeipercentages zullen afnemen na 2020 tot 10% en lager [21], wordt er sterk op gehamerd dat een groeipercentage van 25 tot 30% nodig is tot voorbij 2030 [20] om tot een constant jaarlijks marktvolume te komen van 1-3 TWp [22,23]. Dat is dan inclusief de vervanging van panelen die na een levensduur van 25 jaar gerecycled zullen worden. Zo'n jaarlijks marktvolume zal leiden tot een totale capaciteit van 25-80 TWp in 2050, dat is zo'n honderdmaal zoveel als op dit moment is geïnstalleerd: the age of terawatt photovoltaics [24].

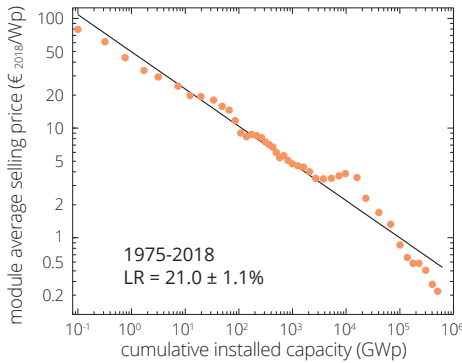
Is dat allemaal wel nodig, kun je je afvragen? Ja, stellen diverse energiescenaristen. In toekomstscenario's die zich richten op een volledig duurzame energievoorziening zal zonPV een cruciale rol spelen, en samen met wind zou in 2050 een situatie bereikt kunnen worden waarin alle energie duurzaam wordt opgewekt én waarbij geen CO<sub>2</sub> wordt uitgestoten [25,26]. 'Parijs' kan zo worden gehaald. Of dit ook zal gebeuren hangt vooral af van politieke wil, en van de mate waarin de mensheid bereid is haar klimaatvriendelijke gedrag te veranderen.

Tegelijkertijd met de sterke toename van zonPV installaties, en natuurlijk direct daaraan gerelateerd, zijn de kosten van zonPV zeer sterk gedaald, van 80 \$/Wp in 1974 via 4,5 \$/Wp in 2000 tot 0,28 \$/Wp in 2019 [27]. Dat betekent dat een zonnepaneel van 300 Wp op dit moment voor 75 Euro over de toonbank gaat. Een veelgebruikte manier om de kosten te relateren aan de totale hoeveelheid geïnstalleerd zonPV is de zogenaamde leercurve, ook wel 'experience curve' [28]. Daarin wordt uitgedrukt dat door het produceren van meer en meer producten de kosten per



*Figuur 3. Groei van het geïnstalleerd zonPV vermogen, wereldwijd, en het jaarlijkse groeipercentage. Data van Solar Power Europe [20].*

product lager worden. Deze wetmatigheid stamt uit de jaren dertig van de vorige eeuw, toen werd vastgesteld dat bij een verdubbeling van het aantal geproduceerde vliegtuigen er 20% minder arbeidstijd nodig was. Deze experience curve is breed toegepast, voor vele energietechnologieën, maar bijvoorbeeld ook op de verkoop van Japans bier [29]. Het blijkt dat in veel gevallen de kosten van een product met 10-30% dalen wanneer het aantal producten wordt verdubbeld, de leersnelheid. We kunnen dit het meest inzichtelijk weergeven in een dubbellogaritmische grafiek, met de kosten (of prijs) op de  $y$ -as en cumulatieve productie op de  $x$ -as. Zo is een rechte lijn te zien, waarbij de helling een maat is voor de mate waarin leren plaatsvindt. De



*Figuur 4. Ontwikkeling van de gemiddelde kosten van een zonPV module als functie van het wereldwijde cumulatief geïnstalleerd zonPV vermogen [27].*

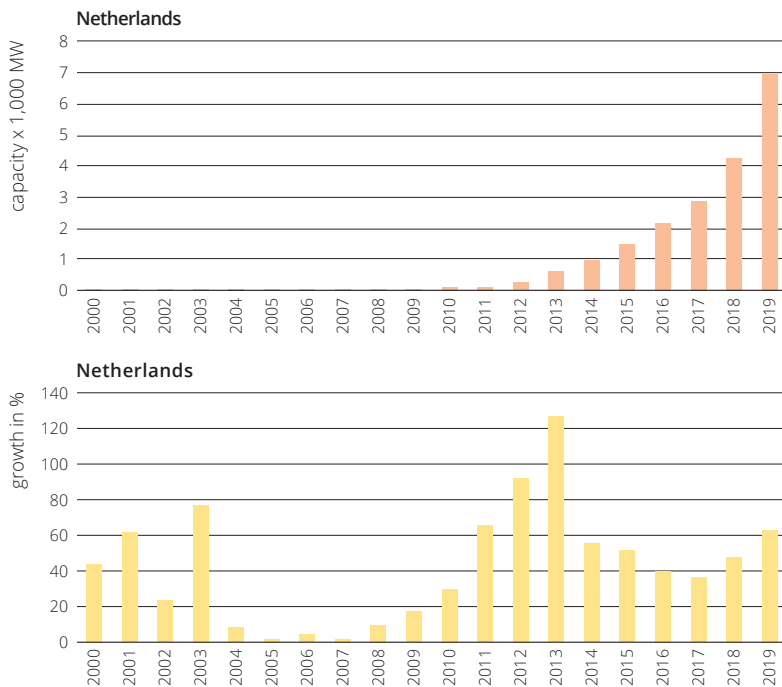
zonPV leercurve is zo langzamerhand een beroemde, omdat deze al sinds 1974 is bijgehouden. De meeste recente curve is te zien in Figuur 4, en de niet-lineaire fit geeft ons inderdaad een leersnelheid van 20%, om precies te zijn  $21.0 \pm 1.1\%$  [27].

Maar pas op: zo'n plaatje is een gevaar, zeker in handen van politici. Het ligt zo ontzettend voor de hand om een rechte lijn door te trekken om zo te komen tot de prijs van zonPV modules van 0.10 \$/Wp bij een capaciteit van 10 TWp of meer [23]. Terwijl de curve met nadruk een analyse van historische gegevens betreft, zonder garanties voor de toekomst. Kosten zullen niet zomaar automatisch dalen, er moet geleerd kunnen worden, processen moeten efficiënter kunnen worden en schaalvoordelen moeten mogelijk zijn. Er zal een bodemprijs zijn, maar waar die ligt is onduidelijk.

Integratie van de leercurve geeft de totale hoeveelheid kosten die gemaakt zijn om tot een bepaalde capaciteit te komen. Sinds 1975 is ruim 300 miljard\$ uitgegeven aan de realisatie van zonPV modules, en dat zullen de jaarlijkse kosten zijn bij een markt van 1.5-3 TWp met modulekosten van 0.10 \$/Wp. In de afgelopen 10 jaar schommelt het jaarlijks marktvolume rond de 30 miljard dollar.

#### 1.4 Situatie in Nederland

En hoe zit dat nu in Nederland? Figuur 5 geeft de groei van geïnstalleerd zonPV vermogen weer vanaf het jaar 2000, met duidelijke hobbels in de jaarlijkse groei. Met name in de laatste paar jaar is er heel veel zonPV toegevoegd, tot een totale



*Figuur 5. Groei van het geïnstalleerd zonnepV vermogen in Nederland, en het jaarlijkse groeipercentage. Data van CBS [30].*

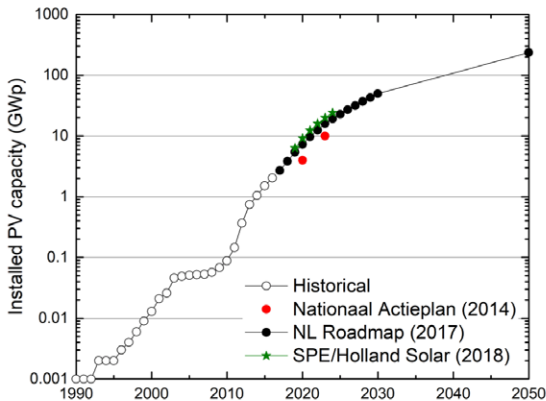
capaciteit van ruim 4 GWp eind 2018 [30]. Dat jaar was het voor het eerst dat de jaarlijkse markt in Nederland groter was dan 1 GWp. Dat betekent dat er dag in dag uit 6 panelen per minuut worden geïnstalleerd. Er wordt verwacht dat eind 2019 de totale capaciteit bijna 7 GWp zal zijn. Holland Solar, de branchevereniging van de Nederlandse zonne-energiesector, stelt dat de markt verder zal groeien naar meer dan 4 GWp per jaar vanaf 2024 [20]. Hierin is onderscheid gemaakt tussen verschillende markten. Waar tot voor kort de groei van PV vooral in de residentiële markt plaatsvond, is nu de verwachting dat vooral de commerciële sector zal groeien in marktomvang tot ruim 2 GWp per jaar in 2024. De markt voor grote zonneparken, utility scale, met installaties van een omvang van tientallen MWp, wordt verwacht minder hard te groeien tot 1 GWp per jaar in 2024. Dat geldt ook voor

de residentiële markt. Volgens deze voorspelling zal er in 2024 in totaal 24 GWp zonnepV in Nederland zijn geïnstalleerd. Dat is hoger dan de getallen uit het Nationaal Actieplan Zonnestroom van 2016 [31] en dan de getallen uit de Roadmap PV Systemen en Toepassingen uit 2017 [32]. ZonnepV blijft verbazen, in diverse studies, ook internationaal worden voorspellingen rechts en links ingehaald door de feiten.

Hoe zal deze ontwikkeling verder gaan in Nederland? Samen met ECN, nu part of TNO, en TKI-Urban Energy hebben we eind 2017 een gedetailleerde analyse gemaakt van het potentieel voor zonnepV in Nederland [32]. Dat was al wel eerder gedaan, maar meer op hoofdlijnen. Voor het eerst hebben we toen ook het potentieel van zonnepV op water bepaald, zowel op binnenwater als op zee. Als totaal zonnepV potentieel kwamen we uit op 237 GWp, dat mogelijk in 2050 gerealiseerd zou kunnen worden (zie Figuur 6). Dat is ruim 50 maal zoveel als eind 2018 geïnstalleerd was, een enorme opgave. Gezien de grote marktgroei van de afgelopen jaren zou dat mogelijk moeten zijn. Sterker nog, als de jaarlijkse groei van de markt afvlakt van de huidige 30-40% naar 15% in 2030, en daarna constant blijft op 10 GWp kan 237 GWp worden gerealiseerd. Dit klopt niet helemaal, omdat zonnepV panelen 25 jaar of langer mee gaan of zullen gaan, en dan vervangen zullen gaan worden, maar het duidt wel de orde van grootte.

Een aantal vragen liggen nu voor de hand:

1. hebben we dat allemaal wel nodig?
2. kan het huidige elektriciteitsnetwerk dat wel aan?
3. waar gaan we dat allemaal neerzetten?



*Figuur 6. Roadmap voor de ontwikkeling van het cumulatief PV vermogen in Nederland [32].*

## 2 Noodzaak hernieuwbare bronnen

Het kabinet publiceerde op 28 juni j.l. het Klimaatakkoord [33], als uitwerking van de internationale klimaatafspraken die eind 2015 in Parijs waren gemaakt. Het beschrijft een pakket van maatregelen die moeten leiden tot 49% reductie van CO<sub>2</sub>-emissies in 2030 en 95% in 2050, dit alles ten opzichte van het emissie niveau van 1990. Ten behoeve van elektriciteitsvoorziening in 2030 wordt gesteld dat er 120 TWh vraag zal zijn op jaarbasis, en dat dat voor 70% (84 TWh) opgewekt zal moeten worden met duurzame bronnen: wind, op zee en op land, en zonPV, zie Tabel 1. De gestelde 49 TWh aan offshore wind zal aan capaciteit 11,5 GW zijn. Volgens de Nationale Energieverkenning van 2017 [34] is voorgenomen beleid, zonder SDE+ subsidie (Stimulering Duurzame Energieproductie [35]), goed voor 3,7 GW (12 TWh) wind op land en 14,3 GW (12,2 TWh) zonPV, samen dus 24 TWh, voor installaties met capaciteit groter dan 15 kW. Maar, omdat er van die 12,2 TWh zonPV naar schatting 7 TWh door kleinschalige zonPV zal worden opgewekt (8,2 GWp capaciteit) zou voorgenomen beleid leiden tot 6 GWp zonPV in de vorm van zonneparken. De resterende 18 TWh zal nog moeten worden gerealiseerd via SDE+ en haar opvolger SDE++, hernoemd tot de Stimuleringsregeling Duurzame Energietransitie [36,37]. Dat zou bijna 19,9 GWp aan zon op land, inclusief gebouwde omgeving, kunnen zijn, of 5,25 GW wind, of een combinatie daarvan. De roadmap gaat uit van 50 GWp zonPV in 2030, en stelt dat de helft daarvan in de gebouwde omgeving geïnstalleerd zal worden [32]. Met de door Holland Solar voorspelde jaarlijkse marktomvang moet dat mogelijk zijn.

*Tabel 1. Hoeveelheid op te wekken hernieuwbare energie en bijbehorende capaciteit volgens het Klimaatakkoord [33].*

	Energie	Vermogen
Wind op zee	49 TWh	11.5 GW
Hernieuwbaar op land (>15 kW)	35 TWh	Zonder SDE+ 3,7 GW (wind op land) 14,3 GW (zonPV, incl) Met SDE+(+) Of 5,25 GW (wind), of 19,9 GWp (zonPV), of combinatie
Overig hernieuwbaar	pm	
<b>Totaal</b>	<b>84 TWh</b>	



Vanwege de aanhoudende discussies over landgebruik en beperkte netcapaciteit heeft de minister onlangs aangekondigd dat de SDE++ die in 2020 in zal gaan zo zal worden aangepast dat voorrang gegeven zal worden aan zonPV systemen waarbij (een deel van) de opgewekte energie direct zelf gebruikt wordt [38]. Daarmee zullen zonneparken op het platteland, ver van bedrijven en steden minder snel in aanmerking komen voor SDE++ subsidie. Op deze manier geeft de minister vorm aan de zonneladder: eerst daken vol, dan andere gebieden in de gebouwde omgeving en daarna pas natuur- en landbouwgronden [38].

Of, hoe en waar deze hoeveelheden zon en wind zullen worden gerealiseerd zal in belangrijke mate afhangen van hoe 30 aangewezen regio's in Nederland zelf hun zogenaamde Regionale Energie Strategie (RES) zullen vormgeven. Dit proces vloeit voort uit het Klimaatakkoord en medio 2020 zullen de concept strategieën klaar moeten zijn, waarna een definitieve versie verwacht wordt voorjaar 2021 [39]. Ondersteuning voor de ontwikkeling hiervan wordt gegeven door het Nationaal Programma RES, door middel van kennisdeling, data en cartografische ondersteuning, en handige infographics, die duiden dat het Klimaatakkoord op diverse samenhangende lagen speelt: van wijkniveau tot landelijk niveau. In het voorjaar 2021 moeten dan alle plannen bij elkaar op worden opgeteld en het is maar te hopen dat het totaal inderdaad leidt tot de gewenste 49% CO<sub>2</sub> reductie.

Samen met ECN, part ofTNO, Geodan en I-Real hebben we de afgelopen jaren met steun van de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) via TKI-Urban Energie financiering gewerkt aan het gedetailleerd in kaart brengen van informatie over energie [40], en dat is bijeengebracht in Geodan's PICO (Project Interactieve Communicatie- en Ontwerptool) [41]. Zo is dakoppervlak in kaart gebracht met een ruimtelijke resolutie van 0,5 meter om het zonPV potentieel te kunnen bepalen. Andere informatie betreft de locaties en grootte van bestaande windturbines en ruimte voor toekomstige, ook offshore. En per adres is informatie beschikbaar over energieverbruik (gas en elektra), energielabel, warmtevraag. Binnenkort kunnen er via een eenvoudig interface diverse toekomstscenario's doorgerekend worden, met een unieke tijdsresolutie van 1 uur, om zo toekomstige mogelijkheden en knelpunten in de energievoorziening te identificeren. Het moge duidelijk zijn dat dit gebruikt kan worden ter ondersteuning van RES ontwikkeling.

## 3 Elektriciteitsnetwerk

### 3.1 Netwerk management

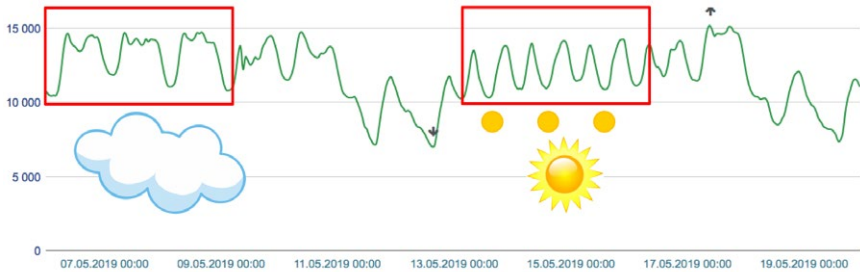
Het huidige elektriciteitsnetwerk is gebaseerd op een beperkt aantal grote centrales die elektriciteit opwekken en precies zoveel als nodig is [42]. TenneT is hiervoor verantwoordelijk en diverse technische en marktmechanismen worden daarvoor gebruikt of zijn zelf ontwikkeld. Het elektriciteitsnetwerk functioneert met een frequentie van 50 Hz en Europees is afgesproken hoeveel daarvan afwijken kan worden voordat maatregelen worden genomen. TenneT zorgt voor de balans in het net: balans tussen vraag en aanbod. Als er verschillen zijn, worden die verhandeld op een onbalansmarkt. Daar is geld mee te verdienen.

Er zijn drie spanningsniveaus in het net: hoog, midden en laagspanning.

Grote elektriciteitscentrales zoals die op de Maasvlakte of Borssele zijn op het hoogspanningsnetwerk aangesloten [42], en wind en zonneparken meestal op het middenspanningsnet. In de gebouwde omgeving wordt het laagspanningsnet gebruikt (230 V), waar alle kleine zonPV installaties op zijn aangesloten. Conversie van spanningsniveaus vindt plaats door middel van transformatoren.

Met de ambities neergelegd in het Klimaatakkoord gaat er nogal wat veranderen in de organisatie van het elektriciteitsnet. Was er voorheen sprake van eenrichtingsverkeer, van centrale naar gebruiker, zal dat in de toekomst (en nu vaak ook al, als de zon flink schijnt) tweerichtingsverkeer zijn. De gebruiker, die ook zonnepanelen heeft, is nu energieproducent geworden, naast consument, en we spreken daarom van een *prosumant*. Wanneer zonnepanelen meer elektriciteit opwekken dan op dat moment nodig is, gaat dat het net op. Het zal gebruikt gaan worden door de burens waarschijnlijk, als zij geen zonnepanelen hebben. Maar als iedereen in de wijk zonnepanelen heeft, is er in de hele wijk te veel vermogen en zal het surplus via de transformator naar het middenspanningsnet gaan. Schijnt in heel Nederland de zon, dan zal er ook surplus naar het hoogspanningsnet gaan en zal TenneT dat merken, zodat er via de onbalansmarkt fossiele centrales op een lager pitje moeten gaan draaien.

In Nederland zien we al effecten van zonnige dagen op de netbalans. Voor twee weken in mei is de elektriciteitsvraag weergegeven in Figuur 7 [43]. In de tweede week van mei (6-12 mei) zijn een ochtend en avond piek te zien, en een diep dal in de nacht. In het weekend is het profiel duidelijk anders, maar in de week daarna ook.



*Figuur 7. Fluctuatie van elektriciteitsvraag voor twee weken in mei 2019. Data van TenneT [43].*

Op 13, 14 en 15 mei was het zonnig en is het duidelijk dat de vraag rond de middag met 2-3 GW afneemt, terwijl het in de week ervoor bewolkt weer was. De netbalans geeft de netto vraag weer, en op zonnige dagen zal zonnestroom lokaal al in de vraag voorzien, zodat op hoogspanningsniveau de vraag afneemt, en de netbalans meer fluctueert. In Duitsland, waar al 60 GW wind en 48 GWp zonPV is geïnstalleerd [44] is het controleren van de balans lastiger, en dit leidt soms tot negatieve elektriciteitsprijzen, zoals op 28 en 29 september j.l. [44].

Met deze voorbeelden heb ik laten zien dat fluctuaties van zon (en wind) effect hebben op de netbalans, en data zoals getoond in Figuur 7 leert ons dat het management van die balans complexer wordt, en dat er meer flexibiliteit nodig is in het net. Behalve gascentrales zijn andere conventionele centrales niet of nauwelijks flexibel. Meer opslag, en welke vorm dan ook, is dan de boodschap, ook thermisch [45].

Een verdere uitdaging voor management van het net is de verwachte groei van elektrisch vervoer, en die van de benodigde laadpalen, door het uitfaseren van auto's met een benzine of dieselmotor. Tegelijkertijd zal het uitfaseren van gas voor verwarming in de gebouwde omgeving leiden tot elektrificatie van de warmtevraag door de invoering van warmtepompen. Kortom, meer vraag naar elektriciteit én meer aanbod van zon.

### 3.2 Zon voorspellen

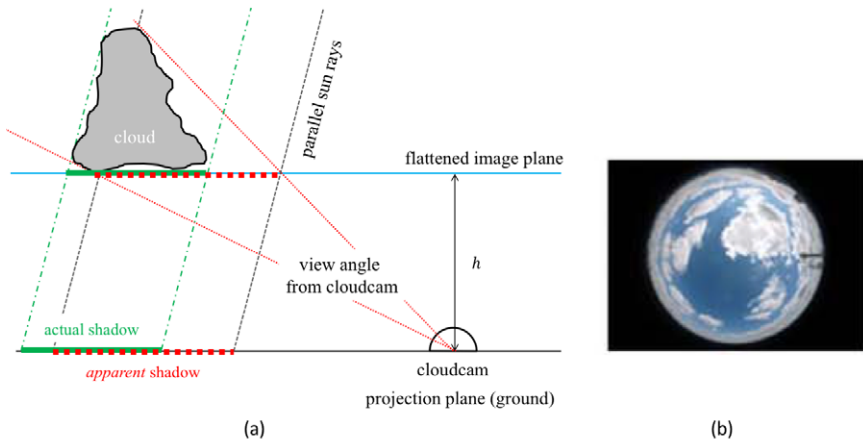
Het wordt daarom belangrijker de vraag naar elektriciteit goed te voorspellen. Even belangrijk is een goede, betrouwbare voorspelling van het aanbod. Hoewel vaak

gezegd wordt dat het probleem van zon (en wind) hun onvoorspelbare fluctuerende karakter is, is dat niet correct. Dat hangt af van de tijdschaal waarop gekeken wordt [46,47]. Seizoenen zijn voorspelbaar, en langere periodes met veel wind of veel zon zijn goed te voorspellen door gebruik te maken van weersvoorspellingen zoals KNMI die maakt op basis van Europese voorspellingen door het European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Maar omdat zonPV installaties vooral op het laagspanningsnet zijn aangesloten zullen kortdurende fluctuaties in de intensiteit van de zon, veroorzaakt door onze fameuze schapenwolkjes, juist lokaal voor snel veranderende vermogensstromen zorgen, van en naar transformatorhuisjes in een wijk.

We hebben dat gemeten, met sensoren die het vermogen meten van zonPV installaties verspreid over de provincie Utrecht [48]. Door op een kaart het actuele vermogen van een zonPV systeem weer te geven met een kleurcode (groen representeert vol vermogen, en rood laag vermogen) lijkt zo'n kaart op een bewolkte dag op een flikkerende sterrenhemel, met veel variatie in vermogen per systeem. Op de zonnige dag gaan de systemen aan in de ochtend en uit in de avond. Door zeer gedetailleerd te kijken naar de fluctuaties van individuele zonPV systemen, maar ook naar de onderlinge correlaties tussen systemen, hebben we een analytische methode ontwikkeld om voor elk systeem een voorspelling te maken van vermogen van 15 minuten vooruit, gebaseerd op metingen van de andere systemen in het recente verleden [49]. Het onderliggende idee is natuurlijk dat een wolk die zorgt voor een lagere opbrengst even later dat ook doet voor een ander systeem niet al te ver daar vandaan, in de richting van de wind.

Een maat voor de kwaliteit van de voorspelling wordt uitgedrukt in de zogenaamde forecast skill. Die vergelijkt een voorspelmethode met persistence. Persistence gaat uit van het voortduren van dezelfde zonintensiteit in de toekomst. Voor onbewolkt weer, of juist geheel bewolkt weer is 'persistence forecasting' een hele goede voorspelmethode. Bij snel veranderende bewolking niet. En juist dan is een goede voorspelmethode noodzakelijk. Onze methode blijkt dan juist beter te zijn dan 'persistence forecasting': de forecast skill is groter dan 0 [49].

In onze methode hebben we bewust geen gebruik gemaakt van informatie over het weer, om te onderzoeken hoe goed (of slecht) de methode zou zijn. Nu we dit weten, gaan we juist weerinformatie wél meenemen. Dat willen we samen met het KNMI gaan doen, om zo de verwachting op uurbasis met ruimtelijke resolutie van zo'n 3



*Figuur 8. (a) Projectie van de schaduw van een 3D wolk op het 2D vlak, met vervorming van de schaduw. (b) Beeld van wolken met een wolkencamera gemaakt [50].*

bij 5 km te kunnen verfijnen naar een tijdsresolutie van een minuut en ruimtelijke resolutie van een paar meter. Daartoe willen we zogenaamde all-sky imagers, of wolkencamera's gaan inzetten. Met zulke camera's kunnen we de dynamiek van bewegende wolken bestuderen, en met name hoe de geprojecteerde schaduwen van die wolken over de grond bewegen, over de zonPV systemen heen. Als we die beweging goed kunnen voorspellen, kunnen we ook zonPV vermogen voorspellen. Zo ver zijn we nog niet.

Ten eerste, met een wolkencamera projecteren we een driedimensionaal beeld op een tweedimensionaal vlak, zie Figuur 8 [50], en dat kan leiden tot vervormingen, met name op de randen van het beeldvlak. Ten tweede, de wolkhoogte is niet bekend, en dat is van belang voor de projectie op de grond van de wolkschaduw [49]. Deze hoogte, die doorgaans varieert van één tot enkele kilometers kan worden bepaald met een ceilometer. Maar ook met behulp van een tweede wolkencamera, waarmee stereo beelden gemaakt kunnen worden [51–53], als de onderlinge afstand zo'n 500 tot 1500 meter bedraagt.

Het lijkt een uitgelezen kans voor intensievere samenwerking en onderzoek met KNMI om gezamenlijk drie wolkencamera's te installeren: één bij KNMI in de Bilt, één op het sportcentrum Olympos en één op het Freudenthalgebouw op het Utrecht Science Park, want daar staat er al een. Onderlinge afstand varieert tussen 850 en 1600

meter, dus zeer geschikt om stereoscopische analyses te kunnen maken van wolken. Kalibratie van de methode om de hoogte van de wolken kan plaats vinden met de ceilometer van KNMI zelf.

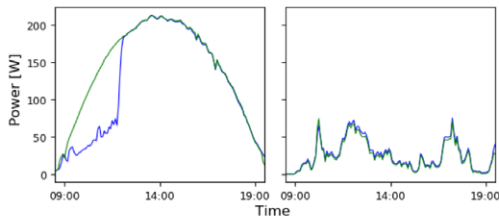
Het bewegende wolkenveld, en de afgeleide schaduwen die over de grond bewegen kunnen we daarnaast ook heel goed in kaart brengen met de ruim 4000 zonnepanelen die al op de daken van de universiteitsgebouwen liggen. Hoewel die niet afzonderlijk bemeten worden, maar in rijen van 10 tot 20, kunnen we onderlinge fluctuaties goed zien, als we ook snel genoeg meten. Dat vereist mogelijk nog wat aanpassing in omvormers en software, maar dan hebben we een uniek meetveld op de grond en in de lucht tot onze beschikking.

De volgende stap is het wolkenbeeld over de hele stad Utrecht te gaan meten. Dat zou kunnen met zo'n 25 wolkencamera's. Doel daarvan is dan een gedetailleerde voorspelling te kunnen maken van de fluctuaties van zonPV vermogen in de stad.

### 3.3 Functioneren van zonPV systemen

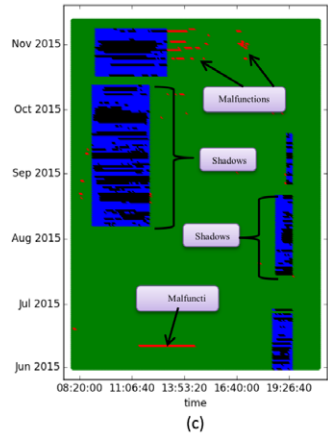
Voor een betrouwbare voorspelling van het vermogen van een zonPV systeem is het nodig dat bekend is hoe het zonPV systeem functioneert. Dat wil zeggen, als de zon met een bepaalde intensiteit schijnt, kan berekend worden hoeveel vermogen het systeem op dat moment opwekt. Vanzelfsprekend moeten oriëntatie en hellingshoek bekend zijn, maar ook of, en zo ja wanneer er schaduw optreedt die de opbrengst nadelig beïnvloedt. De wellicht bekende 'Tel de Zon' actie die door ons een paar jaar geleden onder 5000 eigenaren van zonPV systemen is uitgevoerd, heeft aan het licht gebracht dat de meeste zonPV systemen weliswaar naar verwachting presteren, maar dat er zo'n 10% van de systemen last hebben van een vorm van schaduw, zonder dat eigenaren dat in de gaten hebben [54]. Het is ook complex om vast te stellen als leek of jouw zonPV systeem het wel goed doet, je ziet op de omvormer, of via een app, wel dat er vermogen wordt opgewekt, maar niet of dat ook het vermogen is dat het systeem zou moeten opwekken. Diverse commerciële partijen bieden daarvoor hun diensten aan, maar meestal wegen de kosten niet op tegen de baten. Een geautomatiseerde, en gratis service voor kleine systemen zou dan uitkomst bieden.

Samen met een Utrechtse start-up SunData hebben we met steun van TKI-Urban Energy een methode ontwikkeld die de opbrengst van zonPV systemen onderling vergelijkt, zogenaamde *peer-to-peer comparison* [55,56]. Uitgangspunt hierbij is dat vergelijkbare systemen dezelfde opbrengst zouden moeten hebben. Omdat schaduw



(a)

(b)



(c)

*Figuur 9. (a) Vermogen van twee zonPV systemen op een zonnige dag, waarvan er één last heeft van schaduw in de ochtend. (b) Idem, op een bewolkte dag. (c) Schaduwtijdslijn, met in groen normaal gedrag, en in blauw de dag en tijdstip wanneer afname van het vermogen door schaduw verwacht kan worden [55,56].*

veel voorkomt in de gebouwde omgeving, kunnen we een zogenaamde schaduw-tijdslijn maken, die weergeeft wanneer in het jaar en op welk tijdstip een lagere opbrengst verwacht kan worden, zoals te zien is in Figuur 9. Als eigenaar kun je daar niet veel aan veranderen, behalve misschien een boom afzagen of een schoorsteen verwijderen. Als er op andere tijdstippen een verlaagde opbrengst te zien is, dan is er echt iets aan de hand, en zou de eigenaar daarvan een melding moeten ontvangen. Op dit moment zijn we bezig dit te testen met een groot aantal zonPV systemen in beheer bij SunData.

### 3.4 Schaduwbestendigheid

Het is inherent aan het ontwerp van een zonnepaneel met in serie geschakelde zonnecellen dat het vermogen van het gehele paneel negatief beïnvloed wordt wanneer enkele cellen worden beschaduwd. Dat gaat niet-lineair, een schoorsteen die 6 cellen beschaduwd kan ervoor zorgen dat het hele zonnepaneel geen vermogen meer opwekt. Dat kan er zelfs toe leiden dat een heel zonPV systeem van in serie geschakelde zonnepanelen waarvan er één sterk wordt beschaduwd geen vermogen meer opwekt. Daar zijn commerciële oplossingen voor, die per paneel het vermogen optimaliseren, en een beschaduwd paneel eigenlijk isoleren van de andere, niet beschaduwde panelen. Dat kan ook per paneel, en zelfs per cel [57]. We hebben een

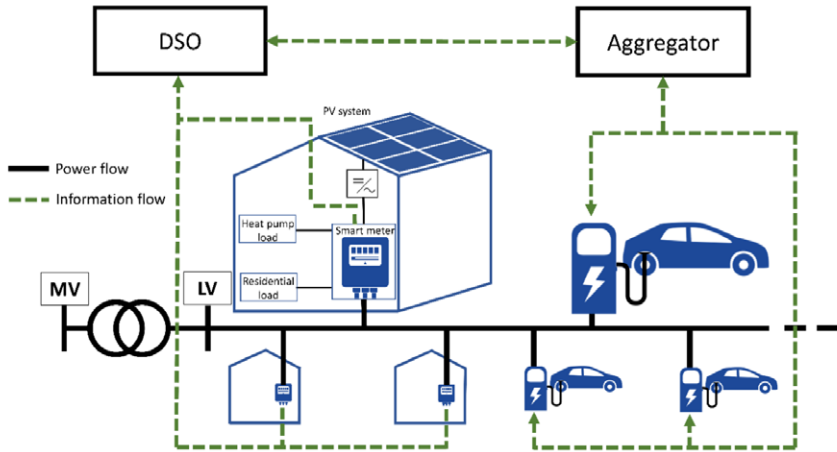
elektronische oplossing bedacht voor panelen, waarbij de cellen in 10 groepen van 6 cellen zijn onderverdeeld. Na grondige simulaties en experimentele tests [58,59], zullen we in de komende tijd het gedrag in praktijk gaan testen door verschillende schaduwvormen toe te passen en te onderzoeken hoe ons slimme paneel daarop reageert.

### 3.5 ZonPV en elektrisch vervoer

Met een toename aan goed functionerende zonPV systemen waarvan we de opbrengst goed kunnen voorspellen wordt al die zonnestroom direct gebruikt en/of het net opgestuurd. Direct gebruiken noemen we zelfconsumptie. In Nederland gebruiken zonPV eigenaren gemiddeld zo'n 30% van de opgewekte energie direct zelf [60]. Door een batterij aan te schaffen kan dit percentage aanzienlijk worden opgehoogd [61]. Maar gezien de huidige salderingsregeling (je krijgt evenveel voor je terug geleverde stroom als dat je moet betalen voor afgenomen stroom) is de aanschaf niet economisch interessant. Dat zal veranderen als saldering zal worden afgebouwd vanaf 2023 [62]. Met een grote hoeveelheid zonPV in een wijk allemaal aangesloten op één transformator station zal dit op zonnige dagen leiden tot grote hoeveelheden vermogen die mogelijk de capaciteit van de transformator te boven gaat. Dat kan op een aantal manieren worden aangepakt: 1) door het teveel aan vermogen anders te gebruiken via *demand side management* (bijvoorbeeld door wasmachines aan te zetten, of dieper te koelen met de vriezer), 2) door het te begrenzen (*curtailment*, betekent afknippen in goed Nederlands), 3) door het op te slaan in batterijen, klein, groot, en met of zonder wielen. Het kan natuurlijk ook via een combinatie hiervan.

In Utrecht, maar ook op andere plaatsen, wordt geëxperimenteerd met de inzet van batterijen als ondersteuning bij het management van het lokale elektriciteitsnetwerk. Er wordt veel gemeten en gesimuleerd. Vanwege de hoeveelheid gegevens en de analyse daarvan spreekt men dan ook ondertussen ook wel van Big Data en Big Data Analytics. Oftewel: het is noodzakelijk dat ICT veel meer wordt ingezet. Er moet onderscheid worden gemaakt tussen de fysieke vermogensstromen, en de informatiestromen, zoals aangegeven in Figuur 10 [63]. Dit maakt het tevens mogelijk dat nieuwe partijen actief worden, naast de lokale netbeheerder (Distribution Network Operator, DSO). Zo zijn er al bedrijven die bijvoorbeeld laadpalen beheren voor het opladen van electric vehicles (EVs), en als aggregator, met laadpalen verspreid over heel Nederland, kunnen handelen op elektriciteitsmarkten. Diezelfde aggregatoren [64] kunnen naar gelang hun businessmodel grote stationaire batterijen inzetten. Maar ook eigenaren van zonPV systemen kunnen hun teveel





*Figuur 10. Schematische weergave van een laagspanningselektriciteitsnet met huishoudens met zonnepV, elektrische auto's en laadpalen [63].*

aan energie verhandelen, daartoe zijn recent diverse initiatieven gebaseerd op blockchaintechnologie gestart. Samen met de prosumertengemeenschap in het Oostelijk Havengebied van Amsterdam onderzoekt mijn groep samen met Resourcefully en de Energycoin Foundation of dit mogelijk is en of dat voldoende voordelen biedt aan de prosumenten [65,66].

De groei van elektrisch vervoer, met name EVs, leidt tot grote laadpieken juist wanneer men thuiskomt van het werk en de stekker in de laadpaal steekt. Deze pieken komen bovenop de piek in de vraag naar elektriciteit die er al tussen 18:00 en 20:00 is. Dit zogenaamde ongecontroleerd of 'domme' laden zal op een gegeven moment leiden tot problemen, er wordt simpelweg te veel vermogen gevraagd. Wij hebben met simulaties gevonden dat met slim laden pieken kunnen worden voorkomen. Dat hangt af van de 'agenda' van de EV, ofwel, hoeveel kilometer wil een gebruiker gaan rijden en wanneer. Als je daarnaast ook met zonne-energie wilt laden, is een goede voorspelling daarvan essentieel om tot een optimale laadstrategie te komen [67].

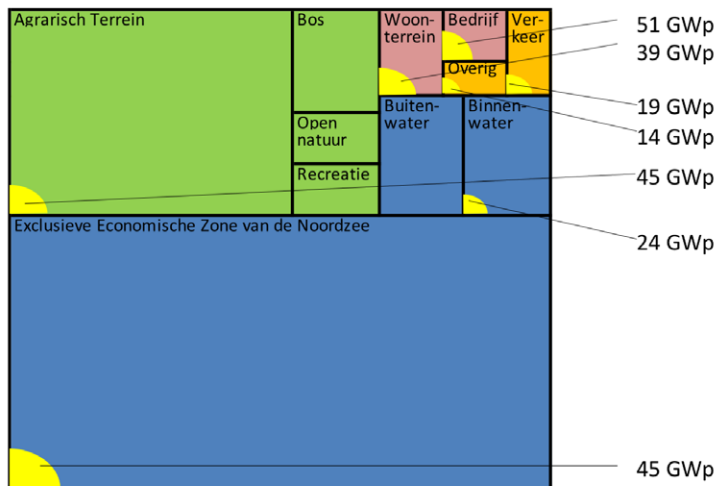
In de wijk Lombok in Utrecht hebben we kunnen bepalen aan de hand van beschikbare metingen aan laadpalen dat EVs veel langer aan de laadpaal staan dan

nodig is om de batterij vol te laden [68]. Dat noemen we laadpaalkleven. Omdat er genoeg laadpalen zijn, is dat geen probleem. Sterker nog, deze flexibiliteit is uitstekend te gebruiken. Afgelopen voorjaar is in Lombok het eerste bidirectionele ecosysteem ter wereld geopend, in aanwezigheid van de koning. Een laadpaal én een EV, de Renault Zoe, én een nieuwe AC laad/ontlaad norm: ISO 15118 [69]. Dit alles in het kader van het project Smart Solar Charging [70]. Hierin werken vele partijen samen: Lomboxnet, WeDriveSolar, Stedin, Hogeschool Utrecht, Jedlix, LastMileSolutions, Vidyn en New Solar, onder aanvoering van het Utrecht Sustainability Institute. Misschien wel een schoolvoorbeeld van transdisciplinair onderzoek. In het project worden in totaal vijf proeftuinen ingericht waarin de bi-directionele technologie, of vehicle-to-grid (V2G) wordt uitgetest [70], niet alleen technisch, maar ook de businesskant. Wat het nog bijzonderder maakt is dat de EVs gebruikt worden als deelauto's, en dat zonne-energie gebruikt wordt om de EVs op te laden, slim laden met de zon dus. Dit samenspel van zonPV en EV helpt de DSO Stedin om het net te managen, zo dat congestie in het net voorkomen wordt zonder dat nieuwe kabels de grond in moeten. ZonPV en EV kunnen zo samen doorgroeien, van een wijksysteem naar een systeem voor de hele stad.

De vijf verschillende proeftuinen zijn zo geselecteerd dat er verschillende soorten gebruikers de EVs gebruiken. Zo is Lombok een woonwijk met uiteenlopende typen woningen en een beperkte parkeergelegenheid en worden in het Utrecht Science Park [71] wonen, onderwijs en werken gecombineerd. Deze verscheidenheid zal een schat van gegevens opleveren om energiemangement in een netwerk van de toekomst te kunnen optimaliseren. Dat houdt nadrukkelijk ook in de interactie met gebruikers, ook al omdat hun gedrag bepalend is voor netwerkmanagement. In samenwerking met sociale wetenschappers en mobiliteitsexperts van de UU gaan we dit nader onderzoeken. Met name door de toekomstige verdichting van steden in de randstad zal privé autobezit onder druk komen te staan, omdat parkeerruimte sterk zal worden beperkt. Deelautogebruik en/of ander duurzaam openbaar vervoer zal daarom gestimuleerd moeten worden.

## **4 Mogelijke zonPV locaties**

In de al genoemde Roadmap PV systemen en toepassingen hebben we een analyse gemaakt van mogelijke zonPV locaties in Nederland [32]. Zoals het een goed fysicus betaamt houd ik het simpel. Stel Nederland is een vierkant. Dan kunnen



Figuur 11. Oppervlak Nederland naar categorie, met zonPV potentieel [32].

we de hoeveelheid land en water rangschikken naar hun gebruik (Figuur 11). In groen agrarische en natuurgebieden, nader onderverdeeld in bos, open natuur en recreatie, in blauw het water, onderverdeeld in binnen en buitenwater en Noordzee, in oudroze de gebouwde omgeving met woonterrein en bedrijventerreinen, en in okergeel verkeer, met name infrastructuur en overig [32]. Bij elkaar is dat 10 miljoen ha, waarvan zo'n 55% de Noordzee en 45% land en binnen en buitenwater zoals Waddenzee. Waar zonPV zou kunnen komen hebben we bepaald aan de hand van vier categorieën: kosten, maatschappelijk draagvlak, opwek daar waar de vraag is, en dubbel gebruik van oppervlak.

Dit resulteerde in de gele taartpunten in Figuur 11 die aangeven welk deel van het oppervlak per categorie kan worden gebruikt. Gezamenlijk telt dit op tot een totaal van 237 GWp geïnstalleerd zonPV vermogen. In Tabel 2 zijn details weergegeven. Rekening houdend met verschillen in energieopbrengst per toepassingsgebied zou er 715 PJ (200 TWh) aan energie kunnen worden opgewekt. Hiermee zou de energievoorziening (400 PJ aan warmte door middel van gas, en elektriciteit [72]) voor alle particuliere huishoudens ruimschoots kunnen worden opgewekt, evenals de benodigde hoeveelheid energie voor particulier elektrisch vervoer [73]).

Tabel 2. Potentiële toedeling van oppervlak per toepassingsgebied, naar [32].

Toepassingsgebied		Totaal oppervlak (km <sup>2</sup> )	Te gebruiken voor zonPV (km <sup>2</sup> )	%	Capaciteit (GWp)	Totaal (GWp)
Gebouwen (dak en gevel)	Woningbouw	1000	212	21.2%	39	90
	Bedrijven	1250	216	17.3%	37	
	Agrarisch	250	60	24.0%	11	
	Overig	800	18	2.3%	3	
PV parken	Agrarisch terrein	22000	325	1.5%	45	45
	Natuurterrein	6000	0	0.0%	0	
Infra	Weg/spoorberm	300	70	23.3%	14	33
	Dijk	300	55	18.3%	11	
	Wegdek	900	30	3.3%	3	
	Spoorweg	100	10	10.0%	2	
	Overig	280	19	6.8%	3	
Water	Binnen	3700	133	3.6%	24	69
	Buiten	6000	0	0.0%	0	
	Noordzee	57000	250	0.4%	45	
Totaal						237

Van de totale zonPV capaciteit zal bijna 40% op gebouwen kunnen worden gerealiseerd, zo'n 29% op water, waarvan ongeveer een-derde op binnenwater en twee-derde op de Noordzee, 19% op land, en 14% op infrastructuur.

#### 4.1 ZonPV in de gebouwde omgeving

Hoewel mijn onderzoek zich deels richt op offshore zonnevelden in offshore windparken en deels zal gaan richten op effecten van zonneparken op biodiversiteit, beperk ik me in het vervolg op integratie van zonPV in de gebouwde omgeving. Daar ligt niet alleen de grootste opgave voor de realisatie van het zonPV potentieel, maar is ook de grootste hoeveelheid geïnstalleerd zonPV te vinden. En de korte termijn verwachting van Holland Solar is dat daar de grootste marktgroei zal plaatsvinden, met name in de commerciële sector [20].

De Stad van de Zon in Heerhugowaard, was met in totaal 5 MWp, gerealiseerd tussen 2000 en 2009 [74], een enorme stap in Nederland en Europa naar integratie van zonPV op gebouwen. Ervaringen die waren opgedaan met gebouwintegratie in het 1 MWp project in de wijk Nieuwland in Amersfoort, dat eind vorige eeuw was gerealiseerd als pilotwijk [75], zijn daar gebruikt om de energieopbrengst van de zonnepanelen te optimaliseren. De Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO), destijds nog AgentschapNL, daarvoor SenterNovem en daarvoor Novem, heeft op basis van die ervaringen in 2010 een Leidraad Zonnestroomprojecten samengesteld, nog steeds zeer lezenswaardig [76].

Om op jaarbasis de grootste hoeveelheid energie op te wekken in Nederland met zonPV moeten de panelen naar het zuiden zijn gericht, maar wel iets (5 graden) naar het westen, onder een hoek van 36 graden [76]. Dan is de instraling op het paneel 1100 kWh/m<sup>2</sup> per jaar. Een goed presterend systeem zou dan 176 kWh/m<sup>2</sup> op kunnen wekken (met performance ratio van 0.8 [77] en paneelrendement van 20%), ofwel 880 kWh/kWp. Het CBS gebruikt 875 kWh/kWp als kental om uit te rekenen hoeveel elektriciteit er door zonPV jaarlijks in Nederland wordt opgewekt, op basis van de totale geïnstalleerde hoeveelheid [18].

Omdat zonPV tien jaar geleden veel duurder was dan nu, werden alle zonPV installaties optimaal gepositioneerd. In gebouwde omgeving beperkte dat de groei van de installaties, omdat de terugverdientijd, inclusief subsidies nauwelijks onder de levensduur van de installaties uitkwam. Met de enorme prijsverlaging die zich vanaf 2012 inzette [78], kwam er veel meer 'economisch geschikt' dakoppervlak beschikbaar. Dat kwam mede door het feit dat de opbrengst niet heel veel afhangt van de oriëntatie en hellingshoek: het varieert tussen zo'n 80% en 100% ten opzichte van de optimale situatie. Je ziet daarom veel installaties op platte daken in een soort harmonicavorm, met rijen panelen gericht naar het westen én naar het oosten, beiden onder een hellingshoek van 10 graden. Ook op gebouwen van de Universiteit Utrecht op het Utrecht Science Park is dat zo uitgevoerd, met SDE+ subsidie. Opbrengst per kWp geïnstalleerd vermogen is weliswaar lager, maar juist per vierkante meter dakoppervlak hoger. Immers, bij zuid-gerichte opstellingen moet er ruimte tussen de rijen worden opgehouden ter voorkoming van wederzijdse beschaduwing. Uit onderzoek met studenten is gebleken dat het systeem goed functioneert [79].

#### 4.2 Energiezuinige gebouwen: van BENG tot gasloos

De energietransitie in de gebouwde omgeving gaat gepaard met elektrificatie van verwarming door de inzet van warmtepompen, als dat niet met stadsverwarming zal of kan gebeuren. De energierekening van huishoudens zal in de toekomst vooral bestaan uit kosten voor gebruik van elektrische energie. Met ‘de grote verbouwing’ zoals Diederik Samsom de energietransitie in de gebouwde omgeving aanduidde [80] moeten we onze 7 miljoen woningen en 1 miljoen bedrijfsgebouwen gaan verduurzamen, waarbij isolatie prioriteit nummer één is. In de afgelopen jaren is gewerkt met energielabels van gebouwen, van A tot en met G, waarbij A staat voor het meest energiezuinige gebouw, en G voor het meest energieslurpende gebouw [80]. Dat is sinds 2006 uitgedrukt in de Energie Prestatie Coëfficiënt (EPC) [82]. Dit ontwikkelt zich nu verder naar BENG (Bijna EnergieNeutraal Gebouw) en ZEN (Zeer Energiezuinige Nieuwbouw) voortbouwend op de Europese Energy Performance of Buildings Directive [83].

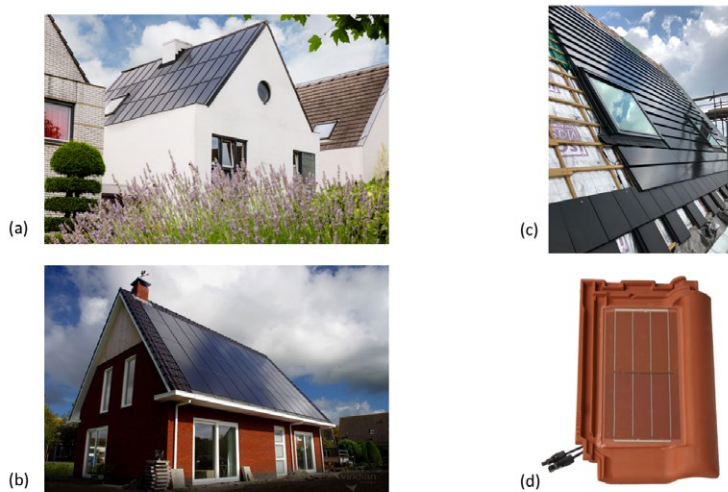
Bij BENG gaat het om drie indicatoren [81]: energiebehoefte van het gebouw, primair fossiele energiegebruik, en aandeel hernieuwbare energie:

- BENG1: behoefte aan energie voor verwarming en koeling, mag niet meer zijn dan 25 kWh/m<sup>2</sup> gebruiksoppervlak per jaar thermisch
- BENG2: de hoeveelheid fossiele brandstof die gebruikt wordt voor verwarming, koeling, warmwater en installaties, mag niet meer zijn dan 25 kWh/m<sup>2</sup> per jaar primair fossiel
- BENG3: de hoeveelheid hernieuwbare energie gedeeld door het totaal primaire energiegebruik (fossiel + hernieuwbaar) moet minimaal 50% zijn.

Dat deze eisen niet onrealistisch zijn wordt bewezen door diverse bouwpartijen, die reeds energieproducerende woningen ontwerpen en bouwen: ‘Plus-op-de-meter’ woningen [84], die daarmee verder gaan dan ‘Nul-op-de-meter’ [85]. ZonPV wordt daarin massaal ingezet.

#### 4.3 Gebouweïntegreerd zonPV

Al decennia hebben verschillende partijen met wisselend succes geprobeerd mooie zonPV producten te ontwikkelen [86,87], met name geïntegreerd in het dak, of gevel. Hier is ook meer en meer vraag naar, omdat niet iedereen gecharmeerd is van de standaard blauwe panelen van 1.6 m<sup>2</sup> op het dak. Ik zal er een aantal van deze producten laten zien, in het bijzonder van Nederlandse bedrijven [88] die deel uitmaken van het samenwerkingsverband BIPV Nederland [89].



*Figuur 12. Vier voorbeelden [90-93] van BIPV: (a) Beasolar, (b) Viridian Solar, (c) Solinso, (d) Zep.*

De Building Integrated Photovoltaics (BIPV) oplossingen van Beasolar [90] en Viridian Solar [91] (Figuur 12) maken gebruik van standaard panelen, maar hebben een dakframe ontwikkeld, waarbij de panelen onderdeel van het dak zijn geworden, en dus ook voor de waterdichtheid zorgen. Solinso heeft langwerpige dakpannen ontworpen [92], terwijl Zep juist uitgaat van de standaard dakpan en daar een zonnecel in heeft geïntegreerd [93].

Integratie van standaard zonnepanelen kan ook in de gevel, zoals het voorbeeld van een gasloos, all-electric, nul-op-de-meter appartementencomplex in Best voor de sociale huursector laat zien [94]. In Utrecht zal de flat aan de Henriëttedreef in Overvecht, die van het naoorlogse Intervam type is en waarvan er een groot aantal in Nederland te vinden is, met woningbouwvereniging Bo-Ex in het project Inside-Out worden gerenoveerd [95]. Na renovatie waarbij BIPV-elementen zullen worden gebruikt zal de flat minimaal nul-op-de-meter zullen zijn, en verwarming en warmwatervoorziening zal met behulp van warmtepompen plaats vinden. Er zal een uitgebreid monitoring-programma worden uitgevoerd om na te gaan of het nul-op-de-meter ontwerp ook in praktijk nul-op-de-meter zal zijn. Juist om uit te zoeken



*Figuur 13. Gekleurde façade gebaseerd op standaard zonnepanelen met geprinte structuren op glas [96].*

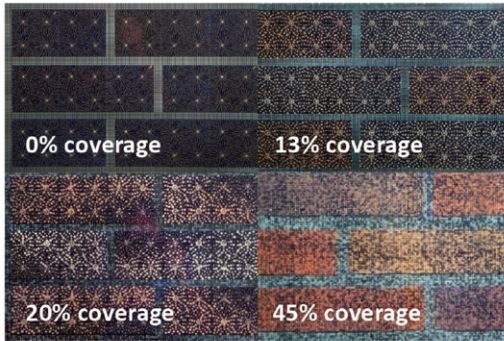
in hoeverre bewonersgedrag het energiegebruik bepaalt, en of, en in hoeverre dat te beïnvloeden is.

Een ander concept, gebaseerd op standaard zonnepanelen is recent gerealiseerd in Helmond op de façade van het gebouw van Kuijpers, in samenwerking met Studio Solarix en Kameleon Solar [96], zie Figuur 13. Op basis van een printtechniek waarbij keramische patronen van puntjes op glas worden aangebracht, zijn er veel ontwerpen mogelijk. Zoals egale kleuren, maar ook patronen bestaande uit verschillende kleuren. Het patroon is zodanig dat de zonnecellen achter het glas niet meer zichtbaar zijn op een afstand van 5 meter [97]. Het geprinte patroon zal minder licht doorlaten en daarmee zal het rendement van het zonnepaneel lager zijn dan van een standaardpaneel, met zo'n 10-40%. Dat weegt dan wel of niet op tegen de esthetische waarde van het ontwerp, dat zal een keuze van projectontwikkelaar en architect zijn.

Baksteen kun je ook printen op glas, zoals door Dutch Solar Design is gemaakt [98]. Of je de onderliggende zonnecellen kunt zien, is afhankelijk van de dichtheid van de print, zie Figuur 14. Bakstenen muren kunnen zo ook voorzien worden van zonPV.

Weer een andere façade oplossing is die van ZigZagSolar [99], die in haar ontwerp PV-panelen optimaal naar de zon richt met daar min of meer tegenover reflecterende panelen, zie Figuur 15a. Een geheel ander ontwerp van Wellsun [100] in Figuur 15b is een mix van energieopwekking en zonwering. Direct zonlicht wordt opgevangen en omgezet in zonnestroom, terwijl diffuus licht wordt doorgelaten.

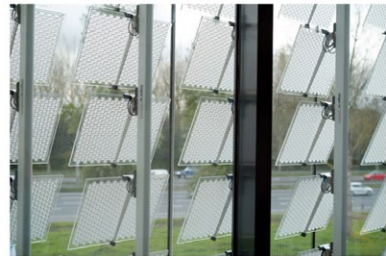




Figuur 14. Geprinte baksteen-structuren op zonnepanelen [98].



(a)



(b)

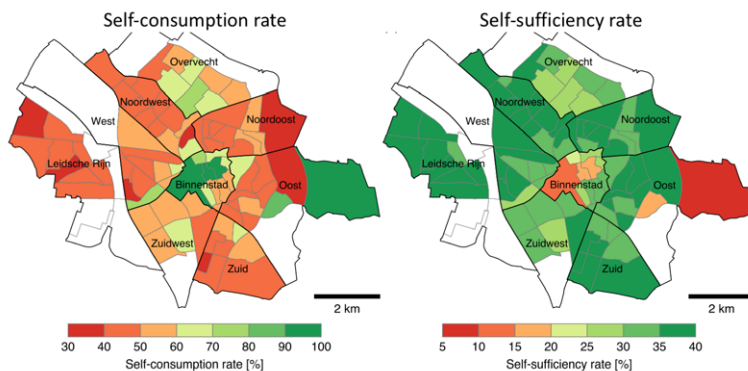
Figuur 15. Façade ontwerp van ZigZagSolar [99] en Wellsun [100].

#### 4.4 Opbrengst

Door grote variatie in hellingshoek en oriëntatie zullen zonPV systemen in de gebouwde omgeving niet optimaal energie opwekken. Maar juist die variatie in hellingshoek en oriëntatie zal er ook voor zorgen dat de opwek verspreid wordt over de dag. En dat leidt weer tot minder problemen op het net, omdat de zonPV piek rond het middaguur lager en breder wordt.

Het wordt lastiger om de opbrengst van een zonPV systeem te berekenen als dat systeem in de gebouwde omgeving is geïnstalleerd, met name vanwege schaduweffecten van omliggende gebouwen, die tijdsafhankelijk zijn. Er zal een

3D beeld van de gebouwde omgeving gemaakt moeten worden, waarmee met hoge tijdsresolutie en informatie over de zonne-intensiteit en temperatuur van bijvoorbeeld een bepaald gemiddeld jaar de tijdsafhankelijke energieopbrengst bepaald kan worden: 4D modellen dus. We hebben dit onlangs gedaan voor de stad Utrecht door gebruik te maken van het Actueel Hoogtebestand van Nederland [101,102]. Op basis van de ruimtelijke resolutie van 50 centimeter is het mogelijk oriëntatie en hellingshoek van dakvlakken te identificeren. Per dakoppervlak kunnen we uitrekenen hoeveel zonne-energie er kan worden opgewekt. Uitgaande van een bedekking van 50% van al het beschikbare dakoppervlak hebben we voor het jaar 2015 uitgerekend hoeveel energie er in Utrecht zou zijn opgewekt. Met gegevens van het CBS over het huidige energieverbruik in huishoudens hebben we vervolgens onderzocht in hoeverre zonPV dat energieverbruik kan opwekken [102]. We bepalen zo zelfconsumptie en zelfvoorzienendheid. In de linker kaart in Figuur 16 is te zien dat directe zelfconsumptie in historische wijken van de stad 100% is. Dat wil zeggen dat alle ‘stroom van het dak’ meteen in huis wordt gebruikt. In de buitenwijken zoals Leidsche Rijn in het westen is dat duidelijk niet het geval. Dit komt natuurlijk doordat daken in het centrum kleiner zijn dan in een buitenwijk, en ook doordat energieverbruik verschilt. De rechter kaart illustreert dat Utrecht niet zelfvoorzienend is, gemiddeld kan een derde van de benodigde energie worden opgewekt. Ook alle daken helemaal vol leggen is niet voldoende. Maar, de witte vlekken op de kaart (o.a. Lageweide, in het noordwesten) zijn vooral industrie en kantoren. Vanwege privacy redenen hebben we juist daar geen gegevens van energieverbruik kunnen



*Figuur 16. Zelfconsumptie en zelfvoorzienendheid voor de stad Utrecht met op 50% van de daken zonPV [102]*

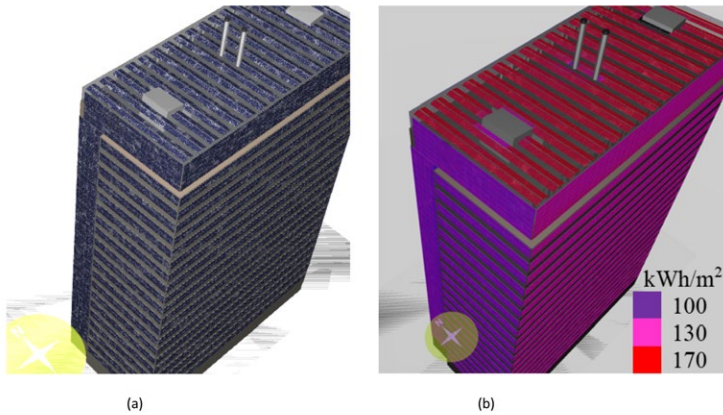
weergeven, maar Lageweide kan een belangrijke bron zijn van zonne-energie voor de stad. Daarnaast is er nog een groot façade potentieel, wat nog niet goed in kaart is gebracht. En wat te denken van burgerinitiatieven zoals Rijn Energie die ruim 200 ha zonnenveld in het zuidwesten wil realiseren met de gemeente in goede balans tussen de belangen van bewoners en omwonenden en de productie van duurzame energie. De gemeente stelt ook als voorwaarde dat een deel van de opbrengst van het zonnenveld ten goede moet komen aan de bewoners en omwonenden [103].

#### 4.5 Utrecht Science Park

De kaarten laten goed zien dat er nog veel werk aan de winkel is in het Utrecht Science Park (USP) ten oosten van de stad. Omdat er in totaal zo'n 8000 panelen op de daken liggen en het energieverbruik hoog is, is zelfconsumptie nagenoeg 100% en zelfvoorzienendheid niet hoger dan 5%. Om de duurzaamheidsambities van de partijen op het USP [104] te realiseren staan meer zonne-energie toepassingen op de radar. Maar met alle daken vol red je het niet. Met nadruk moet gekeken worden naar het potentieel op façades, maar ook op de beschikbare gronden in het USP. Daar lopen nu op allerlei niveaus binnen de Universiteit diverse discussies. Laten we daarbij vooral expertise binnen de UU benutten en kansen grijpen voor onderzoek en onderwijs.

Een voorbeeld. Het iconische W.C. van Unnikgebouw [105], gebouwd eind zeventiger jaren en vijftig jaar oud. Na een lang proces is besloten dat het grondig zal worden gerenoveerd. Het wordt volledig gestript en weer opgebouwd. Niets let ons om daar weer een iconisch gebouw van te maken, maar dan een duurzaamheidsicoon. We hebben alvast een voorzet gemaakt, een schets, met focus op gebouwgeïntegreerde zonPV [106]. We gebruiken hierbij het dak, met oost-west harmonica opstelling, en alle vier de façades (Figuur 17a). Op alle niet-transparante onderdelen van de gevel plaatsen we zonnepanelen, in totaal 1,69 MWp (ruim 5000 zonnepanelen), en we berekenen dan per façade de opbrengst. Tijdsopgelost zien we op een zonnige zomerdag een piek in opbrengst in de ochtend op de oostelijke façade, rond het middaguur op de zuid façade en in de middag op de westelijke façade. Samen is dat meer dan genoeg. In de winter is dat duidelijk anders.

Op basis van de berekende zonne-instraling (Figuur 17b) is de specifieke jaarlijkse opbrengst bepaald op 506 kWh/kWp, logischerwijs aanzienlijk lager dan het kentel van 875 kWh/kWp voor optimale oriëntatie. Per jaar wordt 853 MWh energie opgewekt, en dit leidt tot een zelfvoorzienendheid van 67%, op basis van huidig



*Figuur 17. Schets van het Unnikgebouw met ruim 5000 zonnepanelen en verdeling van zonneinstraling [106].*

energieverbruik van 1280 MWh. Na renovatie zal dit flink lager moeten zijn zodat naar verwachting een gebouwgeïntegreerde zonPV-oplossing mogelijk zou zijn. Vanzelfsprekend esthetisch verantwoord.

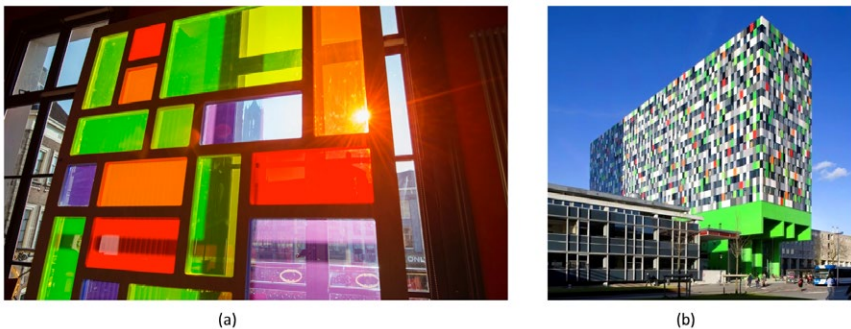
#### 4.6 Transparant en kleurrijk zonPV

In het voorbeeld van het Unnikgebouw zijn alleen de niet-transparante delen van de gevel gebruikt. Maar ook ramen kunnen zonPV componenten zijn. In vele kantoorgebouwen bestaat ongeveer de helft van het façade oppervlak uit ramen. Natuurlijk zijn die bedoeld om daglicht binnen te laten, maar meestal is de transparantie van ramen maar maximaal 80%, in het zichtbare deel van het spectrum. Omdat het zonnespectrum veel breder is, van ultraviolet tot ver infrarood, zou een zonPV raam tot maximaal 22% van het zonlicht kunnen omzetten in elektriciteit, zonder dat dat het comfort binnen beïnvloedt [107]. Dan moet wel al het ultraviolet licht en het infrarood licht met energie tot aan de band gap van silicium én 20% van het licht in het zichtbare deel volledig worden omgezet. Één van de technologieën die als zonPV raam zou kunnen worden gebruikt is de luminescent solar concentrator (LSC). Het principe daarvan is eenvoudig [108–110]. Licht valt op een raam met dunne coating erop (of bestaat geheel uit een plastic plaat), waarin een kleurstof is opgenomen. Die kleurstof absorbeert licht, maar zendt dat ook weer uit, in een

kleur die iets roder is dan de inkomende kleur. Door de structuur van de coating zal driekwart van dat licht naar de zijkanten worden geleid, en als je daar zonnecellen plaatst kun je elektriciteit opwekken. Het maximale experimenteel gerealiseerde rendement van een kleine LSC is 7.1% [111], maar met lage transparantie.

Om de mogelijkheden te verkennen voor opschaling van LSC-technologie hebben we de Electric Mondrian ontwikkeld [112], een energie opwekkend “glas-in-lood” raam, een demonstratiemodel van één vierkante meter groot. Het bestaat uit LSC platen van verschillende grootte en kleur. Hoewel de Electric Mondrian een omzettingrendement heeft van maar ongeveer 1%, heeft het ons geleerd hoe we het beste de zonnecellen moesten schakelen, namelijk kleur bij kleur, om meer vermogen te genereren. En ontwikkelen we inzichten hoe je gekleurde transparante zonPV het best kunt integreren in een transparante gevel. Daarnaast zijn we samen met onder andere collega's van het Debye Instituut (Prof. Vanmaekelbergh en Dr. Celso de Mello Donegá) aan het verkennen hoe en welke nanokristallen gebruikt kunnen worden om het rendement tot boven de 10% te krijgen [113]. Het ligt voor de hand om drie LSC lagen te stapelen, één gevoelig voor ultraviolet, één in het zichtbare licht, en één in het infrarood, in een driedubbelglas raam. We zijn met studenten daarvoor nu modellen aan het bouwen. En we voorzien een fleurig Casa Confetti waarvan de hele gevel energie opwekt.

Als je alle gebouwgeïntegreerde zonPV voorbeelden die ik heb gegeven op een rij zet, zie je dat er een kleurrijke gebouwde omgeving zou kunnen ontstaan waarin



*Figuur 18. Electric Mondrian en huidige Casa Confetti studentenhuysvesting op het USP.*

alle oppervlaktes energie opwekken zonder dat men er zich bewust van is dat dat zonnepanelen zijn: zonPV is onzichtbaar aanwezig.

## 5 Tot slot

In het voorgaande heb ik u geleid langs een divers aantal aspecten van integratie van zonPV, met daarin aandacht voor het onderzoek dat in mijn groep plaats vindt of dat we gaan starten. Het moge duidelijk zijn dat dit twee richtingen opgaat: 1) integratie in het elektriciteitsnet, en 2) kleurrijke integratie in gebouwen. Uiteindelijk komt dat samen in een 3D en 4D model van de gebouwde omgeving, een zogenaamde ‘digital twin’ [114]. Dit is nodig om naast de grote verbouwing ook energie infrastructuur (elektra, gas, warmte) zodanig aan te passen en te beheren dat de energietransitie ook daar gestalte kan krijgen. Het wordt nog een fikse uitdaging om menselijk gedrag daarin op een respectvolle en niet privacygevoelige manier mee te nemen.

Modelering en simulatie is van groot belang, met name voorafgaand aan de verbouwing om de goede keuzes te maken in de gebouwde omgeving. Om de correctheid van die keuzes te verifiëren zal er veel gemonitord moeten worden en big data analyse technieken zijn nodig voor bijvoorbeeld het functioneren van zonPV, EV-laadgedrag, en de dynamiek van wolken. We hebben te maken met meerdere disciplines in het onderzoek en streven naar transdisciplinariteit, als was het alleen maar omdat living labs ons data geven waarmee we aannames en modellen kunnen checken en verbeteren.

### 5.1 Financiering

Tenslotte nog een paar opmerkingen van een andere orde, maar die mij zeer ter harte gaan, omdat het de kern van het wetenschap bedrijven raakt.

Ons onderzoek sluit naadloos aan bij één van de 25 routes van de Nationale Wetenschapsagenda [115], te weten de route Energietransitie, en met name de uitdagingen ‘Elk oppervlak wekt duurzame energie op’, ‘Gebouwen als energiecentrale en vervoermiddelen als energiebuffer’, ‘Omgaan met variaties’, en ‘Intelligente energiesystemen’. Met enorme gedrevenheid hebben we met zo veel mogelijk zonPV onderzoekers in Nederland die aan verschillende aspecten van zonPV onderzoek werken grote voorstellen ingediend voor financiering van onderzoek. Dit kostte veel tijd en inspanning van een heleboel onderzoekers. Tijd

die we niet aan onderzoek of onderwijs konden besteden. Nadat bleek dat de kans op financiering maar 5% was, zijn veel boze emails heen en weer gegaan. Dit lage honoreringspercentage is overigens helaas niet uniek, en is al jaren een doorn in het oog van veel onderzoekers. Er wordt wel geroepen dat dit financieringssysteem maar het beste vervangen kan worden door een loterij of bingo, temeer er een willekeur lijkt te zijn in het wel of niet honoreren van voorstellen afhankelijk van de samenstelling van adviescommissies [116]. De competitie is doorgeschoten, zo stelt ook de commissie van Rijn [117], en overheveling van NWO gelden naar universiteiten is noodzakelijk om de rust in de wetenschappelijke wereld te herstellen [118]. Wim van Saarloos, voorzitter van de Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen (KNAW), heeft op persoonlijke titel een voorzet gegeven om de wetenschappelijke basis aan universiteiten te herstellen: “Elke fulltime hoogleraar zou de beschikking moeten krijgen over twee promotieposities” [119]. Ik zou daaraan toe willen voegen dat dat per onderzoeksteam zou moeten gebeuren. Dit zou veel onderzoekers weken tot maanden per jaar schelen aan tijd die anders verspild wordt aan het nodeloos schrijven van onderzoeksvorstellen.

## 5.2 Verwevenheid van onderwijs en onderzoek

Al het hier besproken onderzoek is teamwork: dat wil zeggen junioren, postdocs, en universitair docenten in mijn groep, maar ook daarbuiten, zoals collega's van de Energy & Resources groep, Copernicus Instituut, facultaire groepen, tot groepen ver over de landsgrenzen.

Maar essentieel zijn al die studenten, met name die in hun master thesis inhoudelijk bijdragen aan de vooruitgang in het veld. Na een gedegen bacheloropleiding, die in mijn ogen vooral gericht moet zijn op het verwerven en verwerken van kennis en kunde in één discipline. Verbreden kan later. Het is voor mij altijd ontroerend te merken wanneer je aan de ogen van een student kunt zien dat zij of hij gegrepen is door een onderwerp. Talent is belangrijk, maar drive is belangrijker. Kleinschalig onderwijs schept daarin de voorwaarden, dat met name tot uiting komt in het een-op-een onderwijs tijdens de master thesis. De vaak gehoorde opmerking “we trekken wel een blik studenten open” doet absoluut geen recht aan het waardevolle werk dat studenten verrichten. Studenten zijn juist van groot belang voor het uitbouwen van onderzoeksideeën. Dit is echt een win-win situatie. Als een idee onzin blijkt, heeft de student dat op een wetenschappelijke manier aangetoond in zijn thesis, en studeert hij af. Als een idee wel goed blijkt, is dat op eenzelfde wetenschappelijke manier aangetoond, en studeert hij ook af. Maar daar kan dan wel op worden

voortgebouwd door andere studenten of begeleiders. Mogelijk leidt dit zelfs tot een wetenschappelijke publicatie.

Ik ben trots op al die honderden studenten die ik heb mogen onderwijzen of begeleiden en waarvan een groot deel terecht is gekomen in het duurzame energie veld, met daarbij ook enkele succesvolle startups. Op deze manier zijn we van onderop bezig de maatschappij te verduurzamen en de energietransitie vorm te geven, transdisciplinair én kleurrijk.

### 5.3 Dankwoord

Tot slot een paar woorden van dank. Allereerst mijn dank aan rector Henk Kummeling, voormalig Geo-decaan Piet Hoekstra, decaan Wilco Hazeleger en Copernicus directeur Marko Hekkert voor het in mij gestelde vertrouwen. Ik vind het een eer aan deze universiteit te mogen werken en te hebben gestudeerd.

Het is ruim 50 jaar geleden dat Willie Wortel en Lampje mij het licht hebben laten zien, met onnavolgbare hulp van mijn vader, moeder, en mijn oom Piet. Alle drie zagen het: dat jochie wordt ooit hoogleraar. Het is nooit te laat. Wel voor hen, helaas, want ze mochten dit moment niet meemaken. In mijn puberteit verloor het Nederlands elftal onterecht de WK, en speelde de Club van Rome en het Bonifatius College hier in Utrecht een grote rol in mijn leven. Twijfelend tussen fysica en het orgelspel werd het toch het eerste. Daarna ben ik samen met mijn leermeesters Frans Saris, Wim Sinke, John Giling, Werner van der Weg, Wim Turkenburg, en mijn medeleerlingen Albert Polman en Ruud Schropp de wondere wereld van de zonne-energie ingedoken.

Er zijn nog veel meer personen voor mij belangrijk of belangrijk geweest in de afgelopen jaren. Ze allemaal bedanken kan vanwege de tijd niet. Maar zichzelf weten maar al te goed wie ik bedoel.

Mijn collega's van Energy & Resources, voorheen Natuurwetenschap en Samenleving, en het Copernicus Instituut wil ik graag bedanken voor de open, niet-hiërarchische sfeer. Van een MT met één hoogleraar en drie UHDs, zijn we nu gegroeid naar een MT met vijf hoogleraren en één UHD. Met de nodige aanstormende UHDs en UD's is de groep nu en in de toekomst krachtig genoeg om de uitdaging van de energietransitie aan te kunnen gaan.



Maar speciaal wil ik een dankwoord uitbrengen aan de vele junioren, postdocs en UDs die ik de afgelopen jaren enorm heb zien groeien, en zonder wie ik nooit zo'n succesvolle onderzoeksgroep had kunnen bouwen. En natuurlijk veel dank aan de honderden studenten die ik in cursussen heb onderwezen of bij hun onderzoek heb begeleid en die mij altijd scherp hebben gehouden.

Ten slotte, zonder mijn vrouw Erzsó had ik hier niet gestaan. Köszönöm szépen! Onmetelijk veel dank, voor alle grote en kleine dingen, altijd mijn soul-mate, nu ik ook in een jurk, het is nooit te laat voor de liefde.

Ik draag deze oratie op aan onze kinderen, biologisch en niet-biologisch: Guido, Sophie, Miki, en Dávid. Het is hún wereld – en die van al die generaties die daarop zullen volgen – die wij kunnen en moeten redden: wij zijn het hen verplicht.

Ik heb gezegd.

## Referenties

1. <https://nos.nl/artikel/2225983-zonne-energie-kan-een-stuk-mooier.html>
2. <https://www.volkskrant.nl/wetenschap/zonnepanelen-kunnen-bijdragen-aan-meer-bloemetjes-en-bijtjes~bf1425eb/>
3. <https://www.volkskrant.nl/nieuws-achtergrond/hoogspanning-op-het-net-de-energietransitie-gaat-bovengronds~b17d86c7/>
4. International Energy Agency, Photovoltaic Power Systems Programma (IEA-PVPS), Trends 2018 in photovoltaic applications, Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2017, Report IEA PVPS T1-34:2018, 2018 [http://iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/2018\\_iea-pvps\\_report\\_2018.pdf](http://iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/2018_iea-pvps_report_2018.pdf)
5. E. Becquerel, Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires, *Compte Rendu des Séances de L'Académie des Sciences* 9 (1839) 561-567.
6. The Becquerel Prize, 2018, [https://www.becquerel-prize.org/fileadmin/user\\_upload/Becquerel\\_Brochure\\_web.pdf](https://www.becquerel-prize.org/fileadmin/user_upload/Becquerel_Brochure_web.pdf)
7. <https://www.ecn.nl/nl/nieuws/item/wim-sinke-honoured-with-prestigious-award-for-outstanding-merits-in-pv/>
8. D.M. Chapin, C.S. Fuller, G.L. Pearson, A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power, *Journal of Applied Physics* 25 (1954) 676-677.
9. M.B. Prince, Silicon solar energy converters, *Journal of Applied Physics* 26 (1955) 68-74.
10. J. Perlin, Let It Shine: the 6000 Year Story of Solar Energy, New World Library, Novato CA, USA, 2013.
11. A. Reinders, P.Verlinden, W. van Sark, A. Freundlich (Eds.), Photovoltaic Solar Energy, From Fundamentals to Applications, Wiley, 2017.
12. J. Lofersky, The first forty years: A brief history of the modern photovoltaic age, *Progress in Photovoltaics* 1 (1993) 67-78.
13. M.A. Green, Silicon photovoltaic modules: a brief history of the first 50 years, *Progress in Photovoltaics* 13 (2005) 447-455.
14. M.A. Green, E.D. Dunlop, D.H. Levi, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, A. W.Y. Ho-Baillie, Solar cell efficiency tables (version 54), *Progress in Photovoltaics* 27 (2019) 565-575.
15. W. Shockley, H.J. Queisser, Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells, *Journal of Applied Physics* 32 (1961) 510-519.

16. A. Polman, M. Knight, E.C. Garnett, B. Ehrler, W.C. Sinke, Photovoltaic materials: Present efficiencies and future challenges, *Science* 352 (2016) aad4424.
17. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Photovoltaics report 2019, <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>
18. W.G.J.H.M. van Sark, L. Bosselaar, P. Gerrissen, K. Esmeijer, P. Moraitis, M. van den Donker, G. Emsbroek, Update of the Dutch PV specific yield for determination of PV contribution to renewable energy production: 25% more energy!, *Proceedings of the 29<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference* (Eds. T. Bokhoven, A. Jäger-Waldau, P. Helm), WIP-Renewable Energies, Munich, Germany, 2014, pp. 4095-4097.
19. <https://www.uu.nl/nieuws/2018-was-droomjaar-voor-zonnepaneel-eigenaren-opbrengst-tot-25-hoger>
20. Solar Power Europe, Global Market Outlook for Solar Power 2019-2023, 2019. <http://www.solarpowereurope.org/wp-content/uploads/2019/05/SolarPower-Europe-Global-Market-Outlook-2019-2023.pdf>
21. E. Vartiainen, G. Masson, C. Breyer, D. Moser, 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* 27 (2019), in press.
22. P. Verlinden, Challenges for the PV industry in the 21<sup>st</sup> century, rede bij aanvaarding Becquerel prize 2019, 36<sup>th</sup> *European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 9 September 2019, Marseille, Frankrijk.
23. W. Hoffmann, A. Metz, Modules at a price of 10 \$ct/Wp – dream or reality? New approach for future cost and price predictions, *Proceedings of the 36<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference* (Eds. F. Lambert, R. Kenny, P. Helm), WIP-Renewable Energies, Munich, Germany, 2019, pp. 1966-1971.
24. N.M. Haegel, R. Margolis, T. Buonassisi, D. Feldman, A. Froitzheim, R. Garabedian, M. Green, S. Glunz, H.-M. Henning, B. Holder, I. Kaizuka, B. Kroposki, K. Matsubara, S. Niki, K. Sakurai, R. A. Schindler, W. Tumas, E.R. Weber, G. Wilson, M. Woodhouse, S. Kurtz, Terawatt-scale photovoltaics: Trajectories and challenges, Coordinating technology, policy, and business innovations, *Science* 356 (2017) 141-143.
25. M. Ram, D. Bogdanov, A. Aghahosseini, A. Gulagi, A.S. Oyewo, M. Child, U. Caldera, K. Sadovskaia, J. Farfan, L.S.N.S. Barbosa, M. Fasihi, S. Khalili, B. Dalheimer, G. Gruber, T. Traber, F. De Caluwe, H.-J. Fell, C. Breyer, Global Energy System based on 100% Renewable Energy – Power, Heat, Transport

- and Desalination Sectors. Study by Lappeenranta University of Technology and Energy Watch Group, Lappeenranta, Berlin, March 2019, [http://energywatchgroup.org/wp-content/uploads/EWG\\_LUT\\_100RE\\_All\\_Sectors\\_Global\\_Report\\_2019.pdf](http://energywatchgroup.org/wp-content/uploads/EWG_LUT_100RE_All_Sectors_Global_Report_2019.pdf).
26. D. Bogdanov, J. Farfan, K. Sadovskaia, A. Aghahosseini, M. Child, A. Gulagi, A. Solomon Oyewo, L. de Souza Noel Simas Barbosa, C. Breyer, Radical transformation pathway towards sustainable electricity via evolutionary steps, *Nature Communications* 10 (2019) 1077.
  27. A. Louwen, W. van Sark, Photovoltaic solar energy, in M. Junginger, A. Louwen (Eds.) *Technological learning in the transition to a low-carbon energy system*, Elsevier, 2020 (in press).
  28. M. Junginger, A. Faaij, W. van Sark (Eds.) *Technological Learning in the Energy Sector, Lessons for Policy, Industry and Science*. Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK, 2010.
  29. Boston Consulting Group. *Perspectives on Experience*; 1972.
  30. CBS, <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/82610NED/table?ts=1573161718677>
  31. Nationaal Actieplan Zonnestroom 2016, <https://www.dnvgl.com/energy/details/naz.html>
  32. W. Folkerts, W. van Sark, C. de Keizer, W. van Hooff, M. van den Donker, Roadmap PV Systemen en Toepassingen, 2017, <https://www.uu.nl/sites/default/files/roadmap-pv-systemen-en-toepassingen-final.pdf>
  33. Klimaatakkoord, 2019, <https://www.rijksoverheid.nl/ministeries/ministerie-van-economische-zaken-en-klimaat/documenten/rapporten/2019/06/28/klimaatakkoord>
  34. Energieonderzoek Centrum Nederland, Nationale Energieverkenning 2017, 2017, [https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2017-nationale-energieverkenning-2017\\_2625.PDF](https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2017-nationale-energieverkenning-2017_2625.PDF)
  35. <https://www.rvo.nl/subsidies-regelingen/stimulering-duurzame-energieproductie>
  36. <https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2018/11/23/verbreding-sde>
  37. [https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2019-conceptadvies-sde-plus-plus-2020-zonne-energie\\_3690.pdf](https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2019-conceptadvies-sde-plus-plus-2020-zonne-energie_3690.pdf)
  38. [https://www.tweedekamer.nl/kamerstukken/brieven\\_regering/detail?id=2019Z15975&did=2019D33080](https://www.tweedekamer.nl/kamerstukken/brieven_regering/detail?id=2019Z15975&did=2019D33080)
  39. Nationaal Programma Regionale Energie Strategieën, <https://www.regionale-energiestrategie.nl/organisatie/default.aspx>

40. Advanced Scenario Management, Phase 2, <https://projecten.topsectorenergie.nl/projecten/advanced-scenario-management-phase-2-00027623>
41. Project Interactieve Communicatie- en Ontwerptool (PICO), <https://pico.geodan.nl/pico/index.html>
42. Tennet, netkaarten, <https://www.tennet.eu/nl/bedrijf/nieuws-en-pers/pers/netkaarten/>
43. <https://www.tennet.eu/nl/elektriciteitsmarkt/data-dashboard/belasting/>
44. Fraunhofer ISE, Energy Charts, [https://www.energy-charts.de/power\\_inst.htm](https://www.energy-charts.de/power_inst.htm), <https://www.energy-charts.de/price.htm>
45. H. Lund, Renewable heating strategies and their consequences for storage and grid infrastructures comparing a smart grid to a smart energy systems approach, *Energy* 151 (2018) 94-102, and Corrigendum, 153 (2018) 1087.
46. J. Antonanzas, N. Osorio, R. Escobar, R. Urraca, F. Martinez-de Pison, F. Antonanzas-Torres, Review of photovoltaic power forecasting, *Solar Energy* 136 (2016) 78-111.
47. L. Visser, T. AlSkaif, W. van Sark, Benchmark analysis of day-ahead solar power forecasting techniques using weather predictions, *Proceedings 46<sup>th</sup> Photovoltaic Specialist Conference (PVSC46)*, IEEE, 2019 (in press).
48. B. Elsinga, W. van Sark, Spatial Power Fluctuation Correlations in Urban Rooftop Photovoltaic Systems, *Progress in Photovoltaics* 23 (2015) 1390-1397.
49. B. Elsinga, W.G.J.H.M. van Sark, Short-term peer-to-peer solar forecasting in a network of photovoltaic systems, *Applied Energy* 206 (2017) 1464-1483.
50. B. Elsinga, Chasing the Clouds: Irradiance Variability and Forecasting for Photovoltaics, PhD thesis, Utrecht University, 2017.
51. D.A. Nguyen, J. Kleissl, Stereographic methods for cloud base height determination using two sky imagers, *Solar Energy* 107 (2014) 495-509.
52. Z. Peng, D. Yu, D. Huang, J. Heiser, S. Yoo, P. Kalb, 3D cloud detection and tracking system for solar forecast using multiple sky imagers, *Solar Energy* 118 (2015) 496-519.
53. P. Crispel, G. Roberts, All-sky photogrammetry techniques to georeference a cloud field, *Atmospheric Measurement Techniques* 11 (2018) 593-609.
54. O. Tsafarakis, P. Moraitis, B.B. Kausika, H. van der Velde, S. 't Hart, A. de Vries, P. de Rijk, M.M. de Jong, H.-P. van Leeuwen, W.G.J.H.M. van Sark, Three years experience in a Dutch public awareness campaign on photovoltaic system performance, *IET-Renewable Power Generation* 11 (2017) 1229-1233.
55. O. Tsafarakis, K. Sinapis, W.G.J.H.M. van Sark, Data analysis for effective monitoring of partially shaded photovoltaic systems, *Proceedings of the 33<sup>rd</sup> European*

- Photovoltaic Solar Energy Conference* (Eds. A. Smets, N. Taylor, P. Helm), WIP-Renewable Energies, Munich, Germany, 2017, pp. 1950–1953.
56. O. Tsafarakis, K. Sinapis, W.G.J.H.M. van Sark, A Time-Series Data Analysis Methodology for Effective Monitoring of Partially Shaded Photovoltaic Systems, *Energies* 12 (2019) 1722.
  57. K. Sinapis, T.T.H. Rooijackers, L.H. Slooff, L.A.G. Okel, M.J. Jansen, A.J. Carr, Towards new module and system concepts for linear shading response, *Proceedings 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC44)*, IEEE, 2017.
  58. S.Z. Mirbagheri Golroodbari, A.C. de Waal, W.G.J.H.M. van Sark, Improvement of Shade Resilience in Photovoltaic Modules using Buck Converters in a Smart Module Architecture, *Energies* 11 (2018) 250.
  59. S.Z. Mirbagheri Golroodbari, A.C. de Waal, W.G.J.H.M. van Sark, Proof of concept for a novel and smart shade resilient photovoltaic module, *IET-Renewable Power Generation* 13 (2019) 2184–2194.
  60. G.B.M.A. Litjens, W.G.J.H.M. van Sark, E. Worrell, Influence of demand patterns on the optimal orientation of photovoltaic systems, *Solar Energy* 155 (2017) 1002–1014.
  61. G. Litjens, E. Worrell, W. van Sark, Assessment of forecasting methods on performance of photovoltaic–battery systems, *Applied Energy* 221 (2018) 358–373.
  62. <https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2019/04/26/salderingsregeling-verlengd-tot-2023>
  63. N.B.G. Brinkel, M.K. Gerritsma, T.A. AlSkaif, I. Lampropoulos, A.M. van Voorden, H.A. Fidler, W.G.J.H.M. van Sark, Impact of rapid PV fluctuations on Power Quality in the Low-Voltage Grid and Mitigation Strategies using Electric Vehicles, *International Journal of Electrical Power & Energy* (submitted).
  64. I. Lampropoulos, M. van den Broek, E. van der Hoofd, and K. Hommes, W. van Sark, A system perspective to the deployment of flexibility through aggregator companies in the Netherlands, *Energy Policy* 118 (2018) 534–551.
  65. G. van Leeuwen, T. AlSkaif, M. Gibescu, W. van Sark, An integrated blockchain-based energy management platform with bilateral trading for microgrid communities, *Applied Energy* (submitted).
  66. T.A. AlSkaif, W.L. Schram, B.J.D. Holthuisen, E. van der Veen, I. Lampropoulos, W.G.J.H.M. van Sark, A Blockchain-based Configuration for Balancing the Electricity Grid with Distributed Assets, *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy* (submitted).

67. M. van der Kam, W. van Sark, Smart charging of electric vehicles with photovoltaic power and vehicle-to-grid technology in the residential sector: a case study, *Applied Energy* 152 (2015) 20-30.
68. M. Gerritsma, T. AlSkaif, W. van Sark, Flexibility of electric vehicle demand: analysis of measured charging data and simulation for the future, *World Electric Vehicle Journal* 10 (2019) 14.
69. <https://www.wedrivesolar.nl/bidirectioneелеcosystem.html>
70. <https://smartsolarcharging.eu>
71. <https://www.uu.nl/nieuws/stroomnetwerk-van-de-toekomst-bij-de-uu>
72. CBS, <https://www.cbs.nl/nl-nl/achtergrond/2018/14/energieverbruik-van-particuliere-huishoudens>
73. Energietrends 2016, ECN, Energie Nederland, Netbeheer Nederland, <https://energiecijfers.info/energietrends/>
74. M. Elswijk, H. Kaan, L. Bleijendaal, Heerhugowaard Stad van de Zon (City of the Sun), 2008, <http://www.pvupscale.org/IMG/pdf/Heerhugowaard.pdf>
75. A.C. de Keizer, E. Ter Horst, E.C. Molenbroek, W.G.J.H.M. van Sark, Evaluating 5-years performance monitoring of 1 MW building integrated PV project in Nieuwland, Amersfoort, the Netherlands. in: *Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference* (Eds. G. Willeke, H. Ossenbrink, P. Helm), WIP-Renewable Energies, Munich, Germany, 2007, pp. 2960-2965.
76. RVO, Leidraad Zonnestroomprojecten, 2010, rapport 2DENB1003, <https://www.rvo.nl/sites/default/files/bijlagen/Leidraad%20Zonnestroomprojecten.pdf>
77. N.H. Reich, B. Mueller, A. Armbruster, W.G.J.H.M. van Sark, K. Kiefer, Ch. Reise, Performance Ratio revisited: Are PR > 90% realistic?, *Progress in Photovoltaics* 20 (2012) 717-726.
78. W.G.J.H.M. van Sark, P. Muizebelt, J. Cace, A. de Vries, P. de Rijk, Price Development of Photovoltaic Modules, Inverters, and Systems in the Netherlands in 2012, *Renewable Energy* 71 (2014) 18-22.
79. W. van Sark, A. de Waal, J. Uithol, N. Dols, F. Houben, R. Kuepers, M. Scherrenburg, B. van Lith, F. Benjamin, Energy performance of a 1.2 MWp photovoltaic system distributed over nine buildings at Utrecht University campus, *Proceedings of the 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference* (Eds. A. Smets, N. Taylor, P. Helm), WIP-Renewable Energies, Munich, Germany, 2017, pp. 2284-2287
80. <https://www.cobouw.nl/bouwbreed/nieuws/2018/11/diederik-samsom-gehoopt-dat-het-kabinet-enkele-stappen-meer-zou-zetten-101266627>

81. Lenteakkoord, Woningbouw volgens BENG, Do's en don'ts voor bijna energieneutraal bouwen, Februari 2017, <https://www.bouwendnederland.nl/download.php?itemID=3769752>
82. RVO, EPC, <https://www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernemen/gebouwen/wetten-en-regels-gebouwen/nieuwbouw/energieprestatie-epc>
83. European Commission, Energy Performance of Buildings Directive, <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/energy-performance-of-buildings/energy-performance-buildings-directive>
84. <https://www.hendriks Coppelmans.nl/specialismen-concepten/ontwikkeling/plus-op-de-meter-wonen/>
85. RVO, Nul op de meter brochure, 2015, [https://www.rvo.nl/sites/default/files/Nul%20op%20de%20Meter\\_A4\\_Brochure.pdf](https://www.rvo.nl/sites/default/files/Nul%20op%20de%20Meter_A4_Brochure.pdf)
86. P. Bonomo, A. Chatzipanagi, F. Frontini, Overview and analysis of current BIPV products: new criteria for supporting the technological transfer in the building sector, *Vitruvio – International Journal of Architectural Technology and Sustainability* 1 (2015) 67-85.
87. I. Zanetti, P. Bonomo, F. Frontini, E. Saretta, M. van den Donker, F. Vossen, W. Folkerts, Building Building Integrated Photovoltaics: Product Overview for Solar Building Skins, Status Report 2017. SUPSI – Swiss BIPV Competence Centre & Solar Energy Application Centre & SEAC, Eindhoven (2017). [https://www.seac.cc/wp-content/uploads/2017/11/171102\\_SUPSI\\_BIPV.pdf](https://www.seac.cc/wp-content/uploads/2017/11/171102_SUPSI_BIPV.pdf)
88. E. Bontekoe, W. van Sark, J. van Leeuwen, Building Integrated Photovoltaics, in *Designing with Photovoltaics*, A. Reinders, W. Eggink, W. van Sark (Eds.), Taylor and Francis, 2020 (in press).
89. Samenwerkingsverband BIPV Nederland, <https://www.bipvnederland.nl>
90. Beausolar, <https://beausolar.eu/>
91. Viridian Solar, <http://www.viridiansolar.co.uk>
92. Solinso, Mystiek Zonnepanelen, <https://solinso.nl>
93. Zep Solar, <https://www.zep.solar/>
94. BAM, appartementen Best, <https://www.duurzaambedrijfsleven.nl/infra/29867/zonnepanelen-op-de-gevel-maken-deze-woningen-all-electric>
95. Project Inside Out Prototype-testflat, <https://projecten.topsectorenergie.nl/projecten/inside-out-prototype-testflat-00031773>
96. Kameleon Solar, <https://kameleonsolar.com/project/solarix-helmond/>
97. <https://www.volkskrant.nl/wetenschap/dit-schilderij-wekt-stroom-op~bcc04345/>



98. L.H. Slooff, J.A.M. van Roosmalen, L.A.G. Okel, T. Minderhoud, G. Gijzen, L.C. Polinder, F. Goethals, T. Sepers, Dutch solar design BIPV: optimizing power output and aesthetic performance in architectural design, *Proceedings of the 35th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (Eds. T. Bokhoven, A. Jäger-Waldau, P. Helm), WIP-Renewable Energies, Munich, Germany, 2017, pp. 1483-1487
99. ZigZagSolar, <https://zigzagsolar.nl>
100. Wellsun Lumiduct, <https://www.wellsun.nl/lumiduct>
101. Actueel Hoogtebestand van Nederland AHN: <https://www.ahn.nl>
102. G.B.M.A. Litjens, B.B. Kausika, E. Worrell, W.G.J.H.M. van Sark, A spatio-temporal city-scale assessment of photovoltaic power integration scenarios, *Solar Energy* 174 (2018) 1185-1197.
103. <https://rijne-energie.nl>
104. <https://www.uu.nl/nieuws/ambitiedocument-utrecht-science-park-aangeboden-aan-wethouder-verschuure>
105. <https://www.uu.nl/willem-c-van-unnikgebouw>
106. W. van Sark, E. Bontekoe, Towards a near-zero energy landmark building using building integrated photovoltaics: the case of the Van Unnik building at Utrecht Science Park, Chapter 29 in *Sustainability in Energy and Buildings 2019, Smart Innovation, Systems and Technologies* 163, J. Littlewood, P. Kaparaju, R. J. Howlett, (Eds), Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019, pp. 339-348.
107. C.J. Traverse, R. Pandey, M.C. Barr, R.R. Lunt, Emergence of highly transparent photovoltaics for distributed applications, *Nature Energy* 2 (2017) 849-860.
108. W.G.J.H.M. van Sark, K.W.J. Barnham, L.H. Slooff, A.J. Chatten, A. Büchtemann, A. Meyer, S.J. McCormack, R. Koole, D.J. Farrell, R. Bose, E.E. Bende, A.R. Burgers, T. Budel, J. Quilitz, M. Kennedy, T. Meyer, C. De Mello Donegá, A. Meijerink, D. Vanmaekelbergh. Luminescent Solar Concentrators – A review of recent results, *Optics Express* 16 (2008) 21773-21792.
109. F. Meinardi, F. Bruni, S. Brovelli, Luminescent solar concentrators for building-integrated photovoltaics, *Nature Reviews Materials* 2 (2017) 17072.
110. Z. Krumer, S.J. Pera, R.J.A. van Dijk-Moes, Y. Zhao, A.F.P. de Brouwer, E. Groeneveld, W.G.J.H.M. van Sark, R.E.I. Schropp, C. de Mello-Donagá, Tackling self-absorption in Luminescent Solar Concentrators with type-II colloidal quantum dots, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 111 (2013) 57-65.
111. L. H. Slooff, E. E. Bende, A. R. Burgers, T. Budel, M. Pravettoni, R. P. Kenny, E. D. Dunlop, and A. Büchtemann, A luminescent solar concentrator with 7.1% power conversion efficiency, *Physica Status Solidi RRL* 2 (2008) 257-259.

112. W. van Sark, P. Moraitis, C. Aalberts, M. Drent, T. Grasso, Y. L'Ortye, M. Visschers, M. Westra, R. Plas, W. Planje, The 'Electric Mondrian' as a Luminescent Solar Concentrator demonstrator case study, *Solar RRL* 1 (2017) 1600015.
113. P. Moraitis, R.E.I. Schropp, W.G.J.H.M. van Sark, Nanoparticles for luminescent solar concentrators – a review, *Optical Materials* 84 (2018) 636–645.
114. S. Scharl, A. Praktijn, The Role of a Digital Industry 4.0 in a Renewable Energy System, *International Journal of Energy Research* 43 (2019) 3891–3904.
115. Nationale Wetenschapsagenda, <https://wetenschapsagenda.nl/publicaties/>
116. M. Kamperman, Beurzen verdelen met de bingomolen, *Volkskrant*, 27 August 2019, <https://www.volkskrant.nl/wetenschap/de-verdeling-van-wetenschapsgeld-is-zo-oneerlijk-laait-een-bingomolentje-voortaan-bepalen-wie-een-beurs-krijgt~b6fb226c/>
117. Adviescommissie Bekostiging Hoger Onderwijs en Onderzoek, Commissie van Rijn, Wissels om, naar een transparante en evenwichtige bekostiging, en meer samenwerking in hoger onderwijs en onderzoek, May 2019, <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2019/05/01/bekostiging-hoger-onderwijs-en-onderzoek-wissels-om>
118. P. Duisenberg, S. Gielen, Overheveling tweede naar eerste geldstroom, brief aan Minister van Engelshoven, Ministerie van Onderwijs, Cultuur en Wetenschap, VSNU, NWO, 29 May 2019, <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/brieven/2019/05/29/overheveling-tweede-naar-eerste-geldstroom>
119. W. van Saarloos, Jaarrede, 29 August 2019, <https://www.knaw.nl/nl/actueel/nieuws/jaarrede-van-knaw-president-wim-van-saarloos>





Wilfried van Sark (1958) studeerde experimentele fysica aan de Rijksuniversiteit Utrecht en studeerde in 1985 af op het onderwerp “Analysis of IV characteristics of poly-silicon solar cells”, uitgevoerd bij AMOLF Amsterdam. Vervolgens promoveerde hij in de experimentele vastestoffysica in 1989 aan de Katholieke Universiteit Nijmegen op het onderwerp “III-V Solar Cells and the Metal Organic Vapour Phase Epitaxy Process”.

Als postdoc werkte hij van 1989-1996 aan plasmadepositie van amorf silicium, en werd een Europees zonnecel record behaald van 10%. Ook introduceerde hij VHF-plasmadepositie in Nederland. Van 1996-1999 was hij universitair docent aan de Radboud Universiteit Nijmegen, en werkte daar aan III-V zonnecellen, GaN en ferro-elektrische oxides. Van 1999-2002 werkte hij bij het Debye Instituut voor Nanomaterialen aan spectroscopie van nanodeeltjes.

Eind 2002 startte hij als universitair docent PV performance bij de groep Natuurwetenschap en Samenleving en in 2016 werd hij benoemd tot universitair hoofddocent. Ondertussen had zijn werk zich al verbreed richting inpassing van zonPV in de samenleving, met aandacht voor beleidsaspecten, marktontwikkeling, milieuanalyse, performance analyse, slimme netten, en ontwikkeling van nieuwe generatie zonneceltechnologie op basis van spectrum modificatie, waaruit de Electric Mondrian™ is voortgekomen. Ook was hij enige tijd programmaleider en coördinator van het Masterprogramma Energy Science.

Per 1 september 2018 is hij benoemd tot hoogleraar Integration of Photovoltaic Solar Energy. Met zijn leeropdracht zet hij het werk van de afgelopen jaren voort, maar zal hij zich nog meer dan voorheen richten op integratie van zonPV in brede zin. Focus zal zijn systemen en componenten voor gebouw geïntegreerde zonPV hand in hand met inpassing van zonnestroom in het (lokale) elektriciteitssysteem, waarbij energimanagement en weersvoorspellingen cruciaal zullen zijn.