

Eindrapprotrage SEPAC

Hoe verwerk je flexibele zonnecellen in kunststof halffabricaten?



Martèn Driesser, Juli 2019

Lectoraat *Solar Productietechnologie & Equipment Ontwikkeling*

Avans Hogeschool, Expertisecentrum Technische Innovatie

Eindrapportage SEPAC

Solar Embedded Polymers and Composites

Hoe verwerk je flexibele zonnecellen in kunststof halffabricaten?

Hogeschool Avans,
's-Hertogenbosch, juli 2019

Foto voorblad; samenstelling van meerdere kunststof dakpan elementen met CIGS flexibele zonnecellen erin verwerkt.
(Driesser, juni 2019)

Voorwoord

Voor u ligt de eindrapportage van het project SEPAC dat onder aanvoering van AVANS Hogeschool is uitgevoerd over een tijdsbestek van september 2016 tot januari 2019. Lector Karel Spee is mede initiatiefnemer geweest in dit praktijkgericht onderzoek waarbij de kennis van zonnecel-technologie vanuit AVANS en Solliance is gecombineerd met vakkennis van kunststof verwerkingstechnieken van de diverse Nederlandse MKB bedrijven. In gezamenlijkheid is er gezocht naar technieken en materialen om flexibele zonnecellen van enkele tientallen micrometers dik naadloos te verwerken in kunststof producten. Doel van het project en deze rapportage was niet om tot daadwerkelijke eindproducten te komen, maar juist te leren en te weten te komen hoe diverse producten inclusief zonnecellen gemaakt zouden kunnen worden. Dit alles als kennisdocument en ter inspiratie zodat de partners hiermee met en voor de eigen klanten iets vernieuwends en duurzaam kunnen maken.

Dit project is uitgevoerd met ondersteuning van regieorgaan SIA.

Dank aan alle studenten die stages, afstudeerrapporten en diverse opdrachten binnen de diverse opleidingen hebben uitgevoerd. Hun werk wordt in deze rapportage veelvuldig aangehaald.

Dank wordt ook uitgesproken naar de AVANS collega's voor het werk dat verzet is binnen dit project; Ad Breukel, Hugo de Moor, Menno Mandemaker, Bas de Waal, Edwin Geldof, Sanne Kristensen en Karel Spee.

Veel inspiratie toegewenst

Ir. Ing. Marten Driesser, projectleider SEPAC.

Inhoud

Inleiding	4
Lectoraat	5
Partners	6
Leeswijzer	7
Flexibele zonnecel	8
Testen van zonnecellen	10
Elektrische optimalisatie	11
Composiet met zonnecellen	13
Hand layup	13
Vacuüm baging	14
Vacuüm infusie	14
Introduceren van een zonnecel in een composiet	14
Aanbevelingen	16
Marktkansen en marktbenaderingen;	17
Vacuümvormen	18
Marktkansen en marktbenaderingen;	22
Conclusies en aanbevelingen	23
Zonnecellen in het spuitgietproces	24
Hechtingsonderzoek	26
Laminaatopbouw	27
Ontwerp van een geschikte mal	29
Invloed van het spuitgiet proces op de efficiëntie van de zonnecel	30
Nodige flexibiliteit van zonnecel in spuitgietproces	31
Marktkansen en marktbenaderingen;	32
Markt applicaties	35
Poster PV conferentie PV-SEC	36
Afronding	37
Partner informatie	38
Bibliografie	39

Inleiding

In een tijd waarin steeds meer elektrische apparaten een plaats krijgen in onze samenleving neemt daarmee ook de energieconsumptie sterk toe. Straatlantaarns zijn er nog steeds, maar nu ook met sensoren om beweging te detecteren en soms ook met camera's of elektrische neuzen om de luchtkwaliteit te meten. En uiteraard aan het internet gekoppeld voor data-verzameling en aansturing. Waar in het verleden naar ieder apparaat een stroomkabel getrokken moest worden, zijn door de ontwikkeling van kleine batterijen de mogelijkheden sterk toegenomen. Maar deze batterij raakt ook een keer leeg en dan kan vervangen of bijladen op diverse afgelegen locaties een grote uitdaging vormen.

Zonnecellen die zonlicht omzetten in bruikbare elektriciteit kunnen hier deels een oplossing bieden. Als de zonnecellen genoeg oppervlakte hebben om de batterij bij te laden en op de juiste locatie onder de juiste invalshoek zijn gepositioneerd laden deze cellen de batterij bij op zonnige dagen of ook met daglicht¹.

Maar in hoeverre is de vorm en maat van de zonnecellen compatibel met de vorm en functionaliteit van het apparaat dat het van stroom voorziet? Een groot zonnepaneel² voor een klein lampje of een gewenste fraaie ergonomische vorm die door het vlak oppervlak van de module weer teniet wordt gedaan.



Figuur 1; Een zonnepaneel langs de weg voor voeding van detectielussen. Paneel is op zuid gericht, maar ondervindt hinderlijke schaduw van de bosrand³.



Figuur 2; Een straatlantaarn uitgevoerd met zonnepaneel. De panelen zijn disproportioneel ten opzichte van de armaturen⁴.



Figuur 3; Stand alone tuinlamp met buitenproportioneel zonnepaneeltje⁵. Ideaal van de toepassing is de vrijheid in positionering. Er is geen kabel vereist.

Dergelijke producten worden PIPV genoemd, Product Integrated PhotoVoltaics⁶. Dus producten waar zonnecellen in verwerkt zijn voor eigen energieopwekking. In de formule voor CO₂ uitstoot, opgesteld door Bill Gates komt deze techniek terug. Hij stelde dat $P \times S \times E \times C = CO_2$ waarbij geldt dat; aantal mensen (*People*) maal aantal elektrische apparaten (*Services*) maal energieverbruik per apparaat (*Energy*) maal CO₂ uitstoot per eenheid energie (*Carbondioxide*) de toekomstige CO₂ uitstoot bepaalt⁷. Het aantal mensen zal komende tijd nog toenemen, net als het aantal apparaten per persoon. Dus als de *Services* producten zouden zijn die een lage energievraag hebben en middels zonlicht opladen is de CO₂ uitstoot daarvan verminderd.

¹ ZONNECELLEN WORDEN IDEALITER IN WEST-EUROPA GEPLAATST ONDER EEN HOEK VAN 30 A 40 GRADEN, OP HET ZUIDEN GEORIËNTEERD EN ZONDER SCHADUW-OPWERPENDE OBSTAKELS ERVOOR. INDIEN HIER VAN AFGEWeken WORDT ZAL DE OPBRENGST AFNEMEN

² IN DIT RAPPORT WORDEN DE TERMEN (ZONNE)PANEEL EN (ZONNE)MODULE DOOR ELKAAR GEBRUIKT. IN WEZEN IS ER GEEN ONDERSCHIED

³ [HTTP://WWW.VERKEERSKUNDE.NL/VRAAG-ANTWOORD/VRAAG-EN-ANTWOORD/ZONNEPANELEN-LANGS-BOSRAND-\(VK-7-2010\).23198.LYNKX](http://www.verkeerskunde.nl/vraag-antwoord/vraag-en-antwoord/zonnepanelen-langs-bosrand-(vk-7-2010).23198.LYNKX)

⁴ [HTTP://WWW.SOLAR-CONSTRUCTIONS.COM/WORDPRESS/ECLAIRAGE-SOLAIRE-LED-RUE/](http://www.solar-constructions.com/wordpress/eclairage-solaire-led-rue/)

⁵ [HTTPS://COOLGODS.NL/PRODUCT/GADGETS/TUIN-LAMPEN-VERSTELBAAR-ZONNEPANEEL/](https://coolgods.nl/product/gadgets/tuin-lampen-verstelbaar-zonnepaneel/)

⁶ PHOTOVOLTAICS IS DE TECHNISCHE TERM WAARBIJ LICHT (PHOTO) WORDT OMGEZET IN ELEKTRICITEIT (VOLT). AFKORTING PV

⁷ ENERGY EXUATION VAN BILL GATES VIA [HTTPS://WWW.YOUTUBE.COM/WATCH?V=SPSMGXNPMO](https://www.youtube.com/watch?v=SPSMGXNPMO)

Met deze problematiek is vanuit de kunststof branche de vraag gesteld aan het lectoraat Solar van AVANS Hogeschool hoe hier een betere, goedkopere, eenvoudigere invulling aan gegeven zou kunnen worden. Hierbij is vanuit het consortium een centrale onderzoeksvraag opgesteld;

Hoe kunnen flexibele dunne film zonnepanelen efficiënt en effectief geïntegreerd worden verwerkt in composiet- en kunststof-halfabricaten?

Deze onderzoeksvraag is over een periode van 2,5 jaar door docenten en studenten van Avans Hogeschool in samenwerking met de diverse partners uitgewerkt in het project SEPAC⁸. Het doel van het SEPAC project is mkb-bedrijven praktisch inzicht te verschaffen in de technische en economische haalbaarheid van het produceren en toepassen van flexibele zonnepanelen in composiet- en kunststof- halfabricaten.

Het project is mede gefinancierd door SIA regieorgaan⁹ als RAAK-MKB project. Hierbij zijn praktijkgericht onderzoek en kennis transfer van hogescholen en kennisinstituten naar het Nederlandse MKB uitgangspunten.

Het projectconsortium dat bij het onderzoek betrokken is geweest bestaat uit:

- 12 mkb bedrijven actief op het terrein van composietverwerking, spuitgieten en thermovormen van kunststoffen: ACRATS, Delft Infra Composites, Plastica Thermoforming, Polyplastic, Alligator Plastics, HSV TMP, Promolding, HTLE, Posterama, Quality Services en Ubbink.
- Hogescholen Avans (penvoerder) en NHL;
- Kennisinstituut dunne-film zonnecellen: Solliance;
- Brancheverenigingen NRK PVT (kunststofverwerkers) en RAI CarrosserieNL (automotive).

Lectoraat

Binnen Avans bestaan diverse onderzoeksgroepen die actief zijn met praktijkgericht onderzoek. Vanuit het technische domein is het Expertisecentrum Duurzame Innovatie¹⁰ de plaats waar diverse lectoraten zich bezig houden met dergelijke onderzoeken. Thema's zijn ondermeer Robotica, Smart Energy en Bouwtechnieken. Dit SEPAC project valt onder het lectoraat *Solar Productietechnologie & Equipment Ontwikkeling*¹¹ van lector Karel Spee. Andere projecten en onderzoeken die vanuit dit lectoraat lopen of gelopen hebben zijn Tex-Energie (zonnecellen in functionele textiele zoals kleding, zonneschermen en geveldoeken), Solar@Sea (flexibele zonnecellen op drijvende basis voor toepassingen op zee), zonnecel snijmachines (ideaal worden flexibele zonnecellen op grote eindeloze rollen geproduceerd en met secure machines in kleinere segmenten gesneden voor verdere verwerking in producten) maar ook de acceptatie en verdienmodellen rondom zonnepanelen in de consumentenmarkt.

"Het interessante van het onderzoek bij een lectoraat is dat je niet gebonden bent aan 1 of 2 (technische) opleidingen, maar bij iedere opleiding van AVANS dingen voor elkaar kunt krijgen. Voor machines en elektronica zijn technische studenten beschikbaar, maar als ik product-ideeën met zonnecellen erin verwerkt wil zien zijn er opleidingen als CMD en Business Innovation beschikbaar. Of voor haalbaarheidsstudies en marktanalyse bijvoorbeeld Technische Bedrijfskunde of Commerciële Economie¹²."

⁸ SEPAC IS HET ACRONYM VAN SOLAR EMBEDDED POLYMERS AND COMPOSITES, KUNSTSTOF EN COMPOSIT MET GEÏNTEGREERDE ZONNECELTECHNOLOGIE

⁹ REGIEORGAAN SIA IS ONDERDEEL VAN DE NEDERLANDSE ORGANISATIE VOOR WETENSCHAPPELIJK ONDERZOEK (NWO) EN WORDT GEFINANCIERD DOOR HET MINISTERIE VAN ONDERWIJS, CULTUUR EN WETENSCHAP.

¹⁰ EDI IS PER 1 JANUARI GEWIJZIGD IN ETI, EXPERTISECENTRUM TECHNISCHE INNOVATIE

¹¹ HET LECTORAAT IS BEÏNDIGD PER 31 DECEMBER 2017, HET SEPAC PROJECT IS GECONTINUEERD.

¹² MARTEN DRIESSE, PROJECTLEIDER LECTORAAT SOLAR

Partners

Het SIA RAAK-MKB project is uitgevoerd met onderstaande partners.

- *ACRATS* uit Hoogerheide is opleidingsinstituut op het gebied van composiet productie en reparatie.
- Vanuit het spuitgiet productieproces is partner *Alligator Plastics* uit Son betrokken. Kunststof steunen voor zonnepanelen worden al door Alligator geproduceerd en met dit project komt de duurzame energie nog meer terug in de kennis en expertise van het bedrijf.
- *AVANS Hogeschool* is in Noord-Brabant in de steden Breda, Tilburg en 's-Hertogenbosch gevestigd en biedt opleidingen aan in praktisch alle studierichtingen.
- *Delft Infra Composites* is gevestigd in Breukelen en producent van grote composiet producten zoals bijvoorbeeld brugdelen.
- *HSV TMP* is ook een spuitgiet-bedrijf in het Gelderse Ede. Hier staan zeer grote machines die producten groter dan 2 bij 1 meter kunnen produceren zoals industriële dakventilatoren of kinderglijbanen.
- *HTLE* en *Posterama* zijn 2 zusterbedrijven in Heerenveen waar labels worden ontwikkeld voor de kunststof industrie. Dit zijn functionele labels die handmatig kunnen worden aangebracht of in het productieproces zoals bijvoorbeeld in-mold labeling. Een belangrijke functie die het label kan krijgen is elektriciteit geleiding zoals voor LED verlichting of sensoren.
- *NHL* is de hogeschool in Leeuwarden waar een lectoraat opgericht is rondom de composiet productie. Tegelijkertijd aan het SEPAC project loopt een project van NHL waarin kristallijne zonnecellen in composiet verwerkt worden.
- *NRK-PVT* is de branchevereniging van kunststofverwerkende bedrijven in Nederland en mede initiator van dit onderzoek. Leden van de NRK-PVT willen qua kennis en kunde voorop lopen in de wereld en vragen de vereniging om actief deel te nemen in diverse innovatieve projecten.
- In Bergen op Zoom is *Plastica Thermoforming* actief met thermovormen wat een range heeft van kleine producten tot zeer groot. Bijvoorbeeld kunststof douchecabines en de voorruit van de solar-auto Stella van Technische Universiteit Eindhoven.
- *Polyplastic* produceert middels thermovormen acrylaat dakramen voor campers en caravans. Ook doorzichtige koelkastdeuren in supermarkten worden door dit bedrijf in Rotterdam geproduceerd.
- Het in Den Haag gevestigde *Promolding* is ook actief in het spuitgieten en heeft een gedeelte van het machinepark in een cleanroom ISO klasse 7 staan voor de medische industrie. Tevens is een eigen techniek ontwikkeld op het gebied van 3D printen van een spuitgiet-productiemal om zeer snel kleine series prototypes te kunnen maken.
- *Quality Services* of *QS* is partner op het vlak van beproevingen en testen. Vanuit Bennekom worden testen ontwikkeld voor infrastructuur, weg en waterbouw, afval beheer maar ook materiaalanalyse. Bijvoorbeeld treksterkte proeven onder nauwkeurige en geconditioneerde omstandigheden is een welkome expertise binnen het project.
- De sectie *RAI CarrosserieNL* behartigt de collectieve belangen van fabrikanten en importeurs van wegtransportmiddelen, zoals aanhangwagens, opleggers, carrosserieën en aanverwante producten in Nederland. Mede door de roep om verlaging van uitstoot van deze sector is deze branchevereniging aanhaakt in het project.
- *Solliance* is een samenwerkingsverband tussen onderzoeksinstituten in Nederland, België en Duitsland op het gebied van dunne-film zonnecellen. Vanuit Nederland zijn TNO, ECN Holst Centre en TU/e de initiatiefnemers van deze Joint Venture¹³.
- Als producent van bouwmaterialen is *Ubbink* betrokken in het project. Zowel spuitgieten als thermovormen behoort tot de productiemogelijkheden voor bijvoorbeeld dakramen, rookgasafvoeren maar ook bevestigingsmateriaal voor gewone zonnepanelen.

¹³ VANUIT SOLLIANCE SLUIT HET SEPAC PROJECT GOED AAN BIJ DE EIGEN STRATEGIE OM VAN TECHNOLOGY PUSH NAAR MARKET PULL TE GAAN. DOOR ACTIEF DIVERSE DEMONSTRATIEPROJECTEN EN PRODUCTEN TE ONTWIKKELEN KAN DE MARKT ZIEN EN ERVAREN WAT ER ALLEMAAL MET FLEXIBELE ZONNECELLEN MOGELIJK IS. DIT MET HET IDEE DAT DOOR TOENEMENDE VRAAG NAAR ZONNECELLEN OOK DE EIGEN ONDERZOEKSACTIVITEITEN NAAR PRODUCTIEMACHINES ZAL TOENEMEN.



Leeswijzer

In deze rapportage worden de diverse onderwerpen besproken die onderzocht zijn. Eerst wordt kort de gebruikte zonnecel toegelicht waarna de verwerking in de technieken composiet, thermovormen en spuitgieten aan bod komt. Daarna volgen nog enkele beschrijvingen van productontwikkelingen en marktkansen voor enkele technieken en of producten. Achterin de rapportage is informatie te vinden over de partners en de bibliografie.

Flexibele zonnecel

Zonnepanelen die bij bedrijven en particulieren op daken liggen zijn in 95% van de gevallen uitgerust met kristallijne zonnecellen¹⁴. Dit zijn dunne halfgeleiders van Silicium (180 μm) die het zonlicht om kunnen zetten in een potentiaalverschil. Ze zijn echter wel erg fragiel en moeten derhalve goed beschermd worden met een glasplaat aan de voorzijde. En glas is ook kwetsbaar dus moet hier vaak weer een aluminium kader omheen geplaatst worden. Door deze toevoegingen is een regulier zonnepaneel van 1 vierkante meter met een vermogen van 180 Wattpeak (Wp) al snel 11 kg¹⁵. Doorgerekend is dit 16 Wp per kg waarbij vooral het glas en het aluminium kader voor het gewicht zorgen.

Anders is het met flexibele *thin film* zonnepanelen. Hierbij is de energie-omzettende laag aanzienlijk dunner (circa 10 μm) en daarmee dus ook het materiaalverbruik. CIGS¹⁶ is momenteel de meest gebruikte techniek voor *thin film*. Deze materialen moeten op een dragende folie aangebracht worden en als deze flexibel wordt uitgevoerd¹⁷ is daarmee ook de gehele module flexibel. Binnen het SEPAC project wordt samengewerkt met het Chinese Hanergy. Een regulier, commercieel verkrijgbaar zonnepaneel is de PowerFlex FG-M6BPM-315¹⁸. Met afmetingen 5411x493 en gewicht van totaal 6,3 kg is het per m^2 slechts 2,36 kg. En het vermogen per m^2 118 Wp. Hoewel het vermogen dus lager ligt dan een regulier paneel is het wel 50 Wp per kg.

Hoewel het vermogen per vierkante meter iets lager ligt zijn deze *thin film* technieken wel snel beter geworden door onderzoek en verbeterde productiemethoden. Mede met het werk wat bij Solliance verricht wordt neemt de efficiency nog steeds toe en wordt de productiemethode verbeterd. Dit zal op termijn ook een positieve invloed hebben op de prijs. Momenteel liggen deze nog sterk uit elkaar. Waar een regulier kristallijn zonnepaneel circa 55 cent per Wp is inclusief BTW¹⁹, is de prijs voor een flexibel zonnepaneel nog bijna het 3-voudige²⁰.

Het hierboven genoemde PowerFlex paneel is een commercieel product wat inclusief goede bescherming zo op daken en objecten gelegd kan worden. Voor ons onderzoek maken we gebruik van halffabricaat zonnecellen van Hanergy waarbij de cellen een formaat hebben van een A4 en totaal niet ingepakt zijn. Dit zijn de basis-elementen van de grotere PowerFlex panelen. Deze zijn flinterdun en zo flexibel als een 200 grams papier. Met een vermogen van 8,3 Wattpeak per stuk en een gewicht van 32 gram zou dit betekenen dat het 250Wattpeak per kg zou zijn. Dit is 15 keer lichter dan een gewoon kristallijn paneel²¹. In Figuur 4 staan de cijfers nog eens naast elkaar.

Vanuit het lectoraat is met name gewerkt met de 8 Wp submodule. Zelfstandig onderzoek verrichten naar de zonne-energie technologie is te complex en omslachtig. Daarom is bewust gekozen om de zonnecel als gegeven te beschouwen en de focus te leggen op de integratie van deze cellen. Hoofdzakelijk is er gewerkt met deze ICI cellen van GlobalSolar²². In een later stadium van het project is ook een ander type cel beschikbaar gekomen. Dit is de MiaSole CIGS solar cell²³ met een iets hogere efficiency als de ICI maar vooral ook een eenvoudigere bewerkingswijze. Met deze nieuwe cel zijn ook onderzoeken gedaan, maar er is geen aanpassing geweest op al wat al gedaan was. Door vergelijkbare folies te hanteren voor het inkapselen veranderde er voor de integratie weinig. Met name de elektrotechnische verwerking is sterk vereenvoudigd. (Moers, Van der Kooij, 2018)

¹⁴ <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>

¹⁵ EEN REGULIER 60 CELLS MONOKRISTALLIJN ZONNEPANEEL MET AFMETINGEN 1650X992MM MET 3,2 MM GLASDIKTE WEEGT 18 A 19 KILOGRAM (REFERENTIE YL290P-29B VAN YINGLI SOLAR)

¹⁶ COPPER INDIUM GALLIUM DISILENIDE, MEERDERE DUNNE LAGEN MATERIAAL WORDEN OP EEN FLEXIBELE METAL-SHEET GEDEPONEERD DAT TOT EEN HALFGELEIDER LEIDT.

¹⁷ ER WORDEN OOK MODULES GEPRODUCEERD MET THIN FILM SILICIUM LAGEN DIE OP GLAS WORDEN GEDEPONEERD. DEZE ZIJN UITERAARD NIET FLEXIBEL EN LICHT.

¹⁸ <http://www.globalsolar.com/powerflex-flexible-solar-panels>

¹⁹ PRIJS GEBASEERD OP JA-SOLAR 275 POLYKRISTALLIJN VIA <https://www.solar-nu-webshop.nl/> (JULI 2019)

²⁰ PRIJS GEBASEERD OP OFFERTE HANERGY AAN AVANS HOGESCHOOL 26 SEPT 2018, € 1,45/WATTPEAK INCL BTW VOOR MIAFLEX 02W340WP

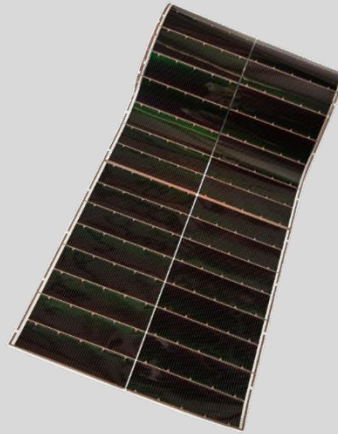
²¹ <http://www.globalsolar.com/original-equipment-manufacturers>

²² INTEGRATED CELL INTERCONNECT, <http://www.globalsolar.com/technology>

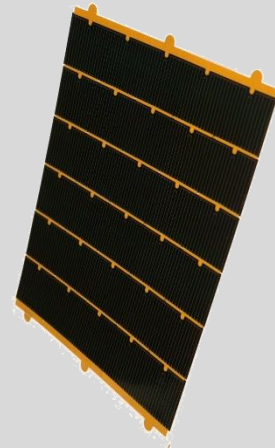
²³ http://miasole.com/wp-content/uploads/2014/09/SolarCell_DATASHEET_5.PDF



Monokristallijn paneel,
180 Wp/m²,
11 kg/m²,
16 Wp/kg,
0,55 €/Wp



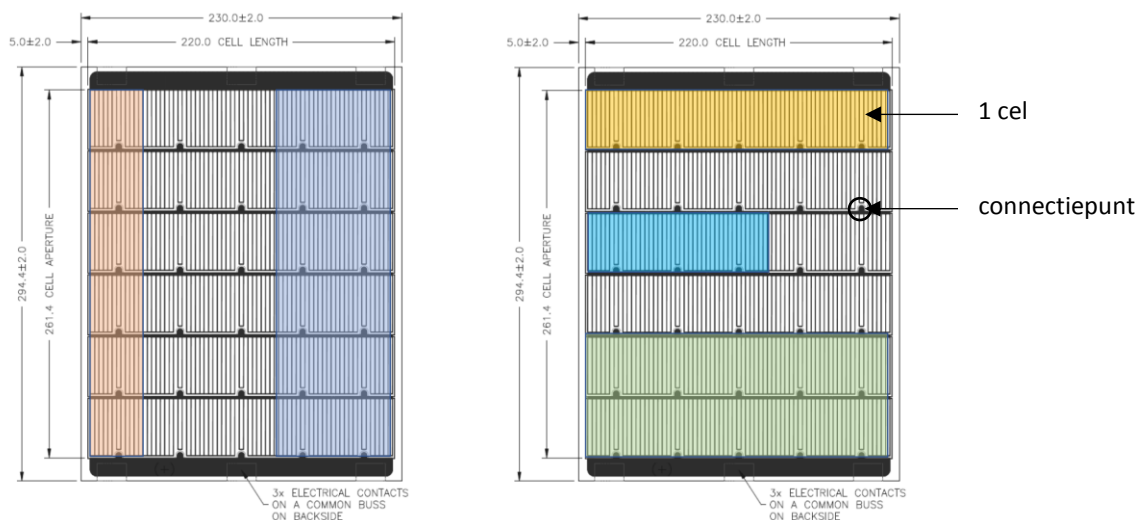
Powerflex module,
118 Wp/m²,
2,36 kg/m²,
50 Wp/kg,
1,45 €/Wp



ICI submodule,
122 Wp/m²,
0,47 kg/m²,
250 Wp/kg,
2,65 €/Wp

Figuur 4; De besproken modules naast elkaar met vergelijking van specificaties.

Het werken met deze GlobalSolar ICI submodule geeft een grote vrijheid in afmeting doordat deze met een eenvoudige papiersnijder tot de gewenste maat kan worden bewerkt. Het moeten altijd rechthoeken zijn, maar lang en smal of kort en breed is vrij te kiezen. Daarbij dient een afweging gemaakt te worden tussen beschikbaar oppervlakte en benodigde stroom en spanning. Een volledige module (261x220mm) heeft een spanning van 3,3V en een stroom van 2,5A bij MPP waarbij er 6 brede cellen boven elkaar verbonden zijn. Per cel zijn er 5 connectiepunten voor de verbinding met de volgende cel. Door de cellen in te korten zoals op de linker figuur in Figuur 5 blijft de spanning gelijk, maar neemt de stroom evenredig af. In de rechter figuur zijn de cellen juist gescheiden waardoor de spanning daalt maar stroom gelijk blijft. Beide bewerkingen kunnen ook gecombineerd worden. (Kristensen, & De Moor, 2018)



Figuur 5; Schematische weergave van stroom/spanning opbouw van een bewerkte module.

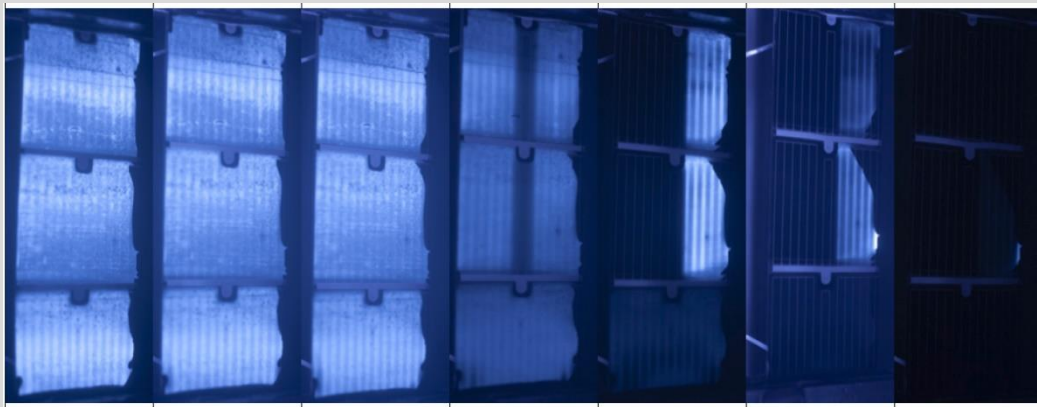
Linker figuur/ Roze gedeelte (261x44mm) 3,3V bij 0,5A;
Linker figuur/ Blauwe gedeelte (261x88mm) 3,3V bij 1A;

Rechter figuur/ Gele gedeelte (44x220mm) 0,6V bij 2,5A;
Rechter figuur/ Groene gedeelte (88x220mm) 1,1V bij 2,5A;
Rechter figuur/ Blauwe gedeelte (44x132mm) 0,6V bij 1,5A.

Testen van zonnecellen

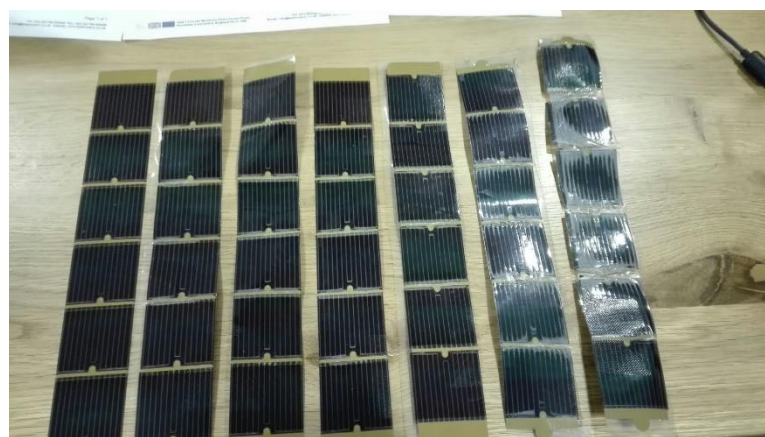
In het hele project worden er diverse samples gemaakt met de ICI cellen waarbij door de verschillende productietechnieken andere krachten op de cellen komen dan bij regulier gebruik. Daarom zijn er testen gedaan naar de levensduur onder extreme omstandigheden zoals temperatuur en rek.

Bij een test naar de maximale rek tot wanneer de kale ICI cellen nog blijven functioneren zijn er door middel van een trekbank, een IV meetopstelling en EL beelden²⁴ analyses gemaakt. Hieruit blijkt dat een strip cellen (145 mm lang) faalt ter plekke van de interconnectie, maar dat er een rek toegestaan is tot 0,85% verlenging. Dus is een strip 500 mm lang, kan deze theoretisch tot 4,25 mm verstrekking aan. (Houtman, 2018)



Figuur 6; Totaal 7 EL-foto's van het gemeten sample waarbij de trek toeneemt van links naar rechts. De donkere vlakken in de cel stralen geen licht uit en geven indicatie van defecten. In foto 4 neemt het donkere vlak toe wat dus het begin van een defect aangeeft. De foto's 5, 6, en 7 tonen steeds grotere donkere vlakken. Op basis van meerdere testen is de maximale verlenging van 0,85% bepaald. (Houtman, 2018)

Er is een test uitgevoerd naar de treksterkte van een strip cellen bij hogere temperaturen. Bij een temperatuur van 150°C zijn diverse strips op treksterkte getest waarbij geconcludeerd is dat bij hogere temperaturen juist meer rek door de strip kan worden opgevangen. Tot een belasting van 70% van de maximale treksterkte (100N) blijken de cellen nog redelijk te functioneren, namelijk 72% van maximaal. (Van Loenhout, 2017)



Figuur 7; Foto van 7 samples die middels een verwarmde trekbank zijn beproefd. Met name ter plekke van de interconnectie tussen de cellen (lichtbruine strip) faalt de module. (Van Loenhout, 2017)

Naast deze trekproeven zijn er ook onderzoeken uitgevoerd naar de impact van hagel op cellen (breuk voornamelijk in de geleidende tabs, impact kan worden gereduceerd door gebruik PO in laminaten (Kreulen, 2017)) en hoe de cel onder invloed van licht herstelt van een specifieke thermische belasting. Dit is het

²⁴ EL STAAT VOOR ELECTROLUMINESCENCE WAARBIJ ER MET EEN STROOMBRON ENERGIE DOOR DE CEL WORDT GESTUURD. DOOR DEZE STROOM STRAALT DE CEL LICHT UIT IN HET NABIJ-INFRAROOD SPECTRUM. MET SPECIALE FILTERS OP EEN CAMERA KAN DIT LICHT WORDEN GEREGEREERD.

LightSoaking effect. Volgens de theorie kan een CIGS zonnecel onder invloed van (halogeen)licht een verbetering ervaren op de prestaties (Gostein & Dunn, 2011). Echter zijn de procestemperaturen in het SEPAC project dermate dat het effect heeft op de algehele performance van de cellen. Daarom is onderzocht of een zonnecel die voor langere tijd op een hoge temperatuur is behandeld ook dit LightSoak effect kan ondervinden. Echter toonden de experimenten aan dat dit specifieke effect niet bij debehandelde zonnecellen optreedt en kan worden geconcludeerd dat een lange thermische belasting funest is voor CIGS. (15 minuten en 60 minuten op 180°C (Vogels, 2017) respectievelijk 2, 6 of 10 minuten op 170°C en 230°C (Scholt, 2017)) Dit moet bij het definiëren van de productieprocessen voor de verschillen de technieken meegenomen worden.



Figuur 8; 9 samples die voor meerdere minuten op hoge temperaturen zijn behandeld. Duidelijk zichtbaar is de vervorming van de strips welke tot onherstelbare schade heeft geleidt. (Scholt, 2017)

Elektrische optimalisatie

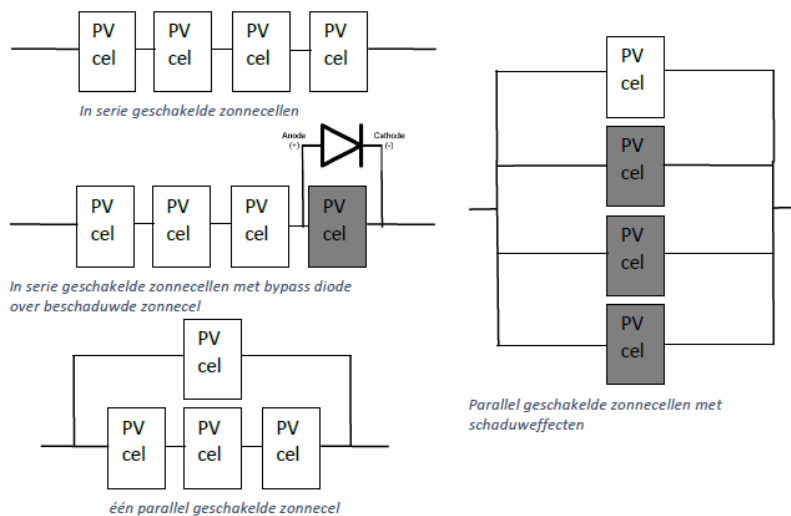
Panelen die op een dak liggen worden onder een optimale oriëntatie en hellingshoek gepositioneerd. Engineers van installatiebedrijven ontwerpen een systeem van meerdere panelen in combinatie met een omvormer²⁵ zodanig dat het goed zal functioneren. Zo vangen ze voor die locatie zo veel mogelijk zonlicht en daarmee een zo hoog mogelijke opbrengst. En als er schaduw optreedt kan een ingebouwde diode ervoor zorgen dat er door de hoge weerstand geen schade aan de cellen ontstaat²⁶.

Anders is het voor zonnecellen die op kleinere objecten worden gefixeerd. Dan moet de gebruiker relatief vrij zijn in positionering van de objecten of in ieder geval geen HBO opleiding zonne-energie te moeten hebben gevolgd. Of nog extremer, wat als de cellen op bewegende objecten geplaatst worden zoals auto's, rugzakken of in een gebouwde omgeving met veel schaduwval gedurende de dag. Dan zou de gebruiker ontzorgd moeten worden en dat de techniek slim schakelt voor een optimale opbrengst²⁷. Met dit in het achterhoofd is er gewerkt aan een schakel systeem waarbij de cellen via hardware gekoppeld zijn en software dan de goede cellen tijdelijk kan scheiden van de niet werkende, beschaduwde cellen. Dit is de dynamische matrix gedoopt door Storey (Storey, 2014) welke door student Van Heist is uitgewerkt voor de PIPV applicatie. Eerst zijn computer simulaties opgesteld van hoe de hardware moet worden uitgevoerd waarna een script is geschreven van hoe de cellen in diverse scenario's zouden moeten schakelen, de *routing*. Na het optimaliseren van het systeem is een board-design gemaakt van de printplaat en is deze geproduceerd en getest. (Van Heist, 2018)

²⁵ Een OMFORMER ZET DE GELEVERDE GELIJKSTROOM (DC) VAN DE ZONNECEL OM IN BUIKBARE WISSELSTROOM (AC)

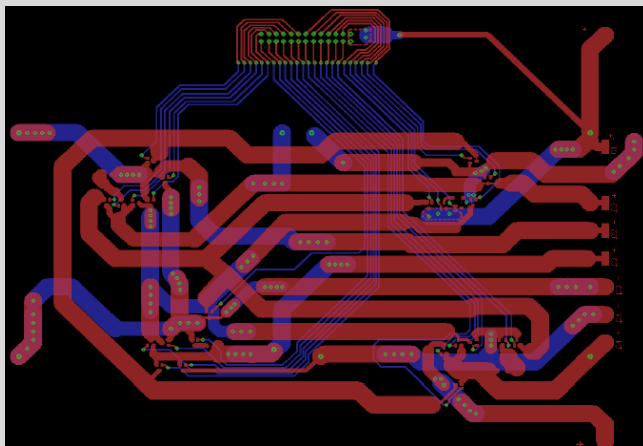
²⁶ IN REGULIERE PANEELEN ZITTEN SKIFFY DIODES. SLIMMERE SCHAKELINGEN ZIJN IN OPKOMST ZOALS DE MAXIM SUBMODULE OPTIMIZER ([HTTPS://WWW.MAXIMINTEGRATED.COM/](https://www.maximintegrated.com/)) OF DE EXTERNE OPTIMIZERS VAN SOLAREEDGE ([HTTPS://WWW.SOLAREEDGE.COM/](https://www.solaredge.com/)) OF TIGO ([HTTPS://WWW.TIGOENERGY.COM/](https://www.tigoenergy.com/))

²⁷ OF IN IEDER GEVAL SCHADE AAN DE CELLEN VOORKOMT. EEN BESCHADUWDE CEL WERKT ALS EEN WEERSTAND EN ALS DE WEERSTANDEN TE HOOG WORDEN KAN DE CEL INTERN DEFECT RAKEN.



Figuur 9; Diverse scenario's van schakelingen en hoe schaduw op kan treden. Juist door hier een slim schakel systeem voor te ontwikkelen wordt er een universele technische oplossing aangedragen die de energieopbrengst zou moeten optimaliseren. (Van Heist, 2018)

Op de printplaat zijn vervolgens diverse diodes en MOSFETS gemonteerd waarna de daadwerkelijke testen gedaan konden worden waarbij een externe schakelmodule voor de simulatie van beschaduwde zonnecellen fungeerde. Diverse iteraties van het systeem zijn gemaakt mede met input van elektronica-expert Harm Lok²⁸. Zijn expertise ligt in de embedded hardware en software rondom energiesystemen. Momenteel werkzaam als onderzoeker bij EnTranCe (Energy Transition Centre), opgezet door Hanzehogeschool Groningen²⁹.



Figuur 10; Board ontwerp van de dynamische matrix.

Uiteindelijk is de schakeling in staat om de zonnecellen individueel te meten waarmee de schakelementen worden aangestuurd. Dit resulteert in het herpositioneren van diverse zonnecellen in andere strings om opbrengst maximalisatie te bewerkstelligen. Hiermee is het product zeker nog niet af; het maximaal aantal cellen is momenteel 16, maar zal zeker meer moeten worden in de toekomst. Ook is het algoritme nog niet snel en effectief genoeg om goed met snel wisselende schaduw om te kunnen gaan. (Van de Ween, 2018) Hier zal nog nader onderzoek naar gedaan moeten worden om een werkbaar, compact en intelligent systeem voor op te stellen. Het gebruik van DC-DC buck converters waarmee door Golroodbari veelbelovende resultaten zijn behaald kan een alternatief zijn (Golroodbari, 2019). Beide concepten zouden elkaar kunnen versterken wellicht.

²⁸ <https://www.linkedin.com/in/harm-lok-69772123/>

²⁹ <https://www.en-tran-ce.org/>

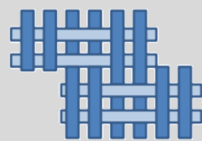
Composiet met zonnecellen

Composiet materiaal heeft zijn nut de afgelopen jaren zeker getoond in het licht en stijf construeren. Waar in de vliegtuig industrie composiet al 40 jaar wordt toegepast, zijn afgelopen decennia ook consumenten in contact gekomen met dit materiaal, bijvoorbeeld fietsframes, hockeysticks en brilmonturen.

De techniek van composiet bestaat in de basis uit 2 materiaalsoorten die samen voor een sterk geheel kunnen zorgen. Dit is een slappe vezel en een vloeibare hars. Echter door de hars tussen de vezels te laten uitharden ontstaat er een bijzonder sterk geheel. In dit onderzoek is gewerkt met vezel versterkte kunststoffen (VKK). Deze vezels dienen in een specifieke samenstelling toegepast te worden en met hars te worden geïnjecteerd.



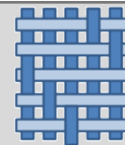
Effen binding (plain weave)



Panama binding (basket weave)



Keperbinding (twill weave)



Satijnbinding (satin weave)

Figuur 11; Voorbeeld soorten van weven (Nijssen, 2015). De richting en weeftype heeft invloed op de sterkte en stijfheid van eindproduct. Daarnaast kunnen meerdere lagen ook verschillend van elkaar gepositioneerd worden. Ook het type vezel kan variëren zoals glasvezel, basalt, koolstofvezel, aramide of een natuurlijke vezel. Glasvezel is goedkoop met een goede lichtdoorlatendheid voor de cellen terwijl koolstofvezel tot wel 3 keer duurder is maar ook een hogere stijfheid, hogere treksterkte en een lager gewicht heeft. Aramide heeft een hoge taaiheid en wordt in kogelwerende vesten gebruikt. Natuurlijke vezels hebben een laag soortelijk gewicht en de oorsprong is duurzamer. Echter zijn de vezels vaak korter en zijn ze gevoelig voor vocht en daarmee kan rotting optreden. (Van der Lugt, 2018).

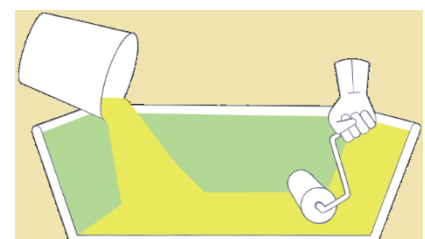
De hars die gebruikt wordt in deze techniek is thermohardend (mix polymeer en vernetter)³⁰. De polymeer kan epoxy, polyester of vinylester zijn. Hieronder zijn de voor en nadelen genoemd van de polymeren

	Voordeel	Nadeel
Epoxy	Betere chemische eigenschappen dan vinylester Betere mechanische eigenschappen dan vinylester Goede eigenschappen bij hoge temperaturen	Hoge prijs Mengverhouding is kritisch Gevoelig tijdens productieproces qua vocht & temperatuur
Polyester	Lage prijs Eenvoudige verwerking	Gevoelig voor water Krimp bij uitharden Matige mechanische eigenschappen
Vinylester	Betere chemische eigenschappen dan polyester Betere mechanische eigenschappen dan polyester	Grote krimp bij uitharden Duurder dan polyester

Tabel 1; Eigenschappen van algemeen toegepaste harsen (Broeren, 2017). Voor alle producten geldt dat ze kunnen 'vergeleken'. Dit kan voorkomen worden door UV-stabilisator bij te mengen. (Van der Lugt, 2018)

Er kan gekozen worden uit diverse methoden van injecteren van de hars. Hieronder volgt een korte omschrijving van de 3 meest voorkomende³¹;

Hand layup is de meest basale wijze van produceren waarbij de matten handmatig worden bedekt met hars. Het complete pakket aan matten kan in 1 keer worden doordrenkt met hars en met een eenvoudige verfröller uitgesmeerd. Of het gaat in fases waarbij de hars beter bij de vezels kan komen als het pakket dik wordt. Aan 1 zijde is het pakket zo vlak als de mal, aan de andere zijde is de afwerking ruw door het gebruik van de verfröller. Ook is door deze techniek het product voorzien van veel overtollige hars wat een dikker en zwaarder product oplevert³².

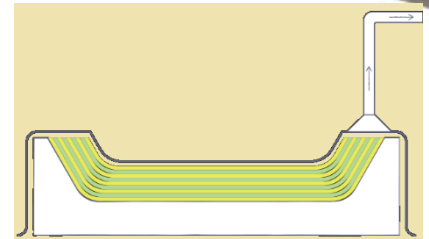


³⁰ Er kan ook gewerkt worden met thermoplasten voor composiet productie, echter vraagt dit een hoge druk met een hoge temperatuur. En met name deze hoge temperatuur voor langere tijd is voor de zonnecel ongunstig waardoor in de onderzoeken gefocust is op thermoharders.

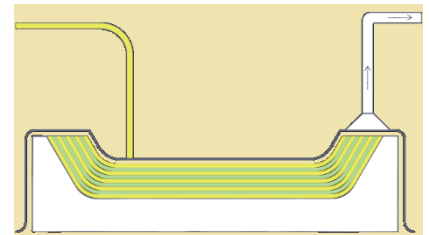
³¹ Er zijn nog veel andere productiemethoden, echter zijn deze voor AVANS niet haalbaar door onder meer kostbare productiefaciliteiten.

³² Illustraties afkomstig van <http://compositeslab.com/>

Vacuüm baging werkt verder waar de Hand Layup eindigt, namelijk door een luchtdichte mal (folie) rondom het product te plaatsen en aan 1 zijde middels een vacuüm de overtollige hars weg te zuigen. Dit kan wel vele uren duren, maar hierdoor is het eindproduct wel dunner, lichter en sterker doordat er meer contact is tussen de vezels.

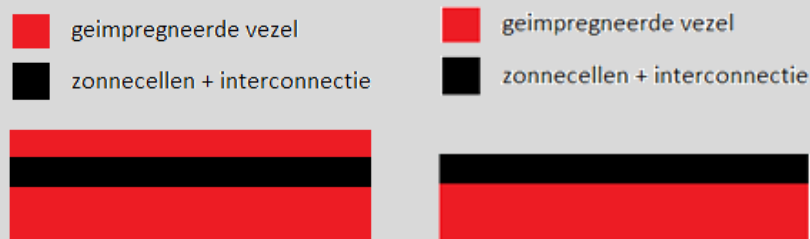


Vacuüm infusie is een verbeterde versie van vacuüm baging waarbij de vezelmatten droog in de mal worden geplaatst en wederom luchtdicht wordt ingesloten. Aan 1 zijde is een toevoer van hars, aan de andere zijde van de mal wordt een vacuüm afzuiging gecreëerd. Nu wordt de hars door het product getrokken. Dit is een minder arbeidsintensieve methode en er wordt minder hars gebruikt. Wel moet er goed nagedacht worden over de routing van de hars zodat overal voldoende versterking optreedt.



Introduceren van een zonnecel in een composiet

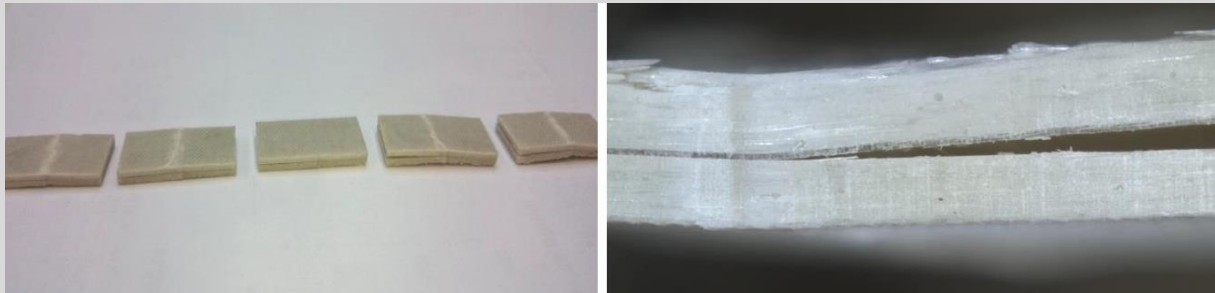
Het implementeren van flexibele zonnecellen in composiet levert enkele technische issues op die een negatieve invloed hebben op de eigenschappen van het product. Ideaal ligt de zonnecel beschermt tussen de vezels zodat er een mechanische sterkte rondom de cel gevormd wordt. Gewone zonnecellen hebben een glasplaat ter bescherming. Flexibele zonnecellen hebben een 150 µm kunststof folie.



Figuur 12; Schematische weergave van de positie van de cel ten opzichte van het vezelpakket. Links is de cel volledig omsloten door de vezels, rechts ligt de cel op het vezelpakket. (Van der Lugt, 2018)

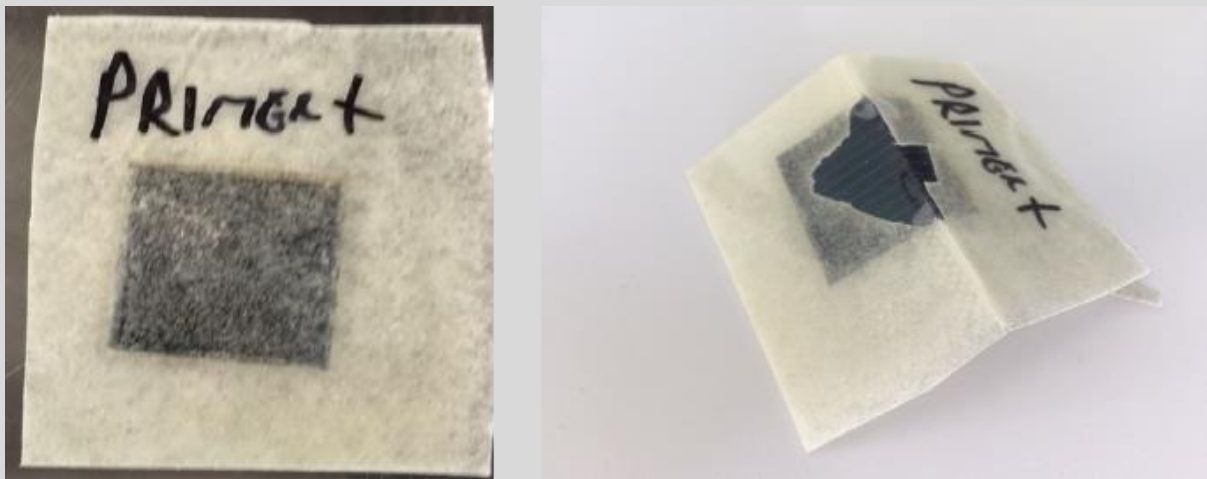
Echter door de zonnecel tussen de vezels te leggen ontstaat er een extra scheidende folie tussen de boven en onderlaag waar de hars zich niet optimaal kan mengen. Lokaal is het composiet daar door de slecht hechtende tussenlaag fragieler. Dit is aangetoond met een ILSS test³³ waarbij de bezwijkende schuifspanning bij een extra PET-laag lager ligt dan een referentie sample (Kranendonk, 2017).

³³ INTER LAMINATE SHEAR STRENGTH, UITGEVOERD CONFORM NEN-EN-ISO_14130_1997_EN



Figuur 13; Een 5-tal samples getest door Kranendonk middels de ILSS test. Rechts een close-up van sample 5 (meest rechts sample) waarbij trekspanning en afschuiving de bezwijkmechanismen zijn. De scheiding is daar waar de PET folie gepositioneerd is.

Ook testen die uitgevoerd zijn bij NHL hogeschool wijzen dit uit waardoor het daadwerkelijk integreren van zonnecellen in het composiet als niet wenselijk beschouwd mag worden (Van der Steen, 2018).

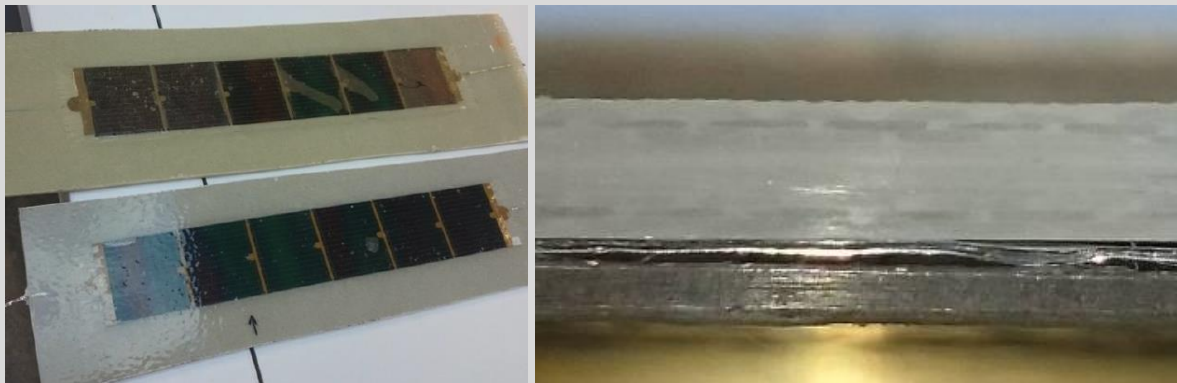


Figuur 14; Sample van een ICI zonnecel met PET barrière-folie, ingewerkt in een glasvezel composiet met polyesterhars, verwerkingsmethode vacuüm infusie. Met een mes is de top laag ingesneden tot aan de cel en daarna is het sample gebogen. Duidelijk zichtbaar op foto rechts is het loslaten van de toplaag t.o.v. de PET folie (Van der Steen, 2018).

Bezien de resultaten van de diverse testen is het verwerken van een zonnecel in het vezelpakket niet wenselijk. De zonnecel vormt een non-permeabele laag waardoor lucht moeilijk kan ontsnappen, vooral bij *hand layup* en kan hars lastig het pakket doorstromen bij vacuüm technieken. Mede hierdoor is vervolgens gewerkt met een positie van de cel boven op het vezelpakket. Door NHL een *hybride proces* genoemd. (Van der Steen, 2018) Hierbij wordt de zonnecel op zijn kop in de mal geplaatst en het glasvezel pakket erboven op. Voor de goede hechting wordt de zonnecel aan de achterzijde eerst middels PO voorzien van een glasvezelmat waarna het *vacuüm bagging* of *vacuüm infusie* proces voor de sterkte en stijfheid van het oorspronkelijke product zorgt. Als toplaag voor de zonnecel kan achteraf nog een coating gebruikt worden. Dit kan G130 polyester zijn (lichte vergeling na dampheat test) of BV200 PU coating (geen vergeling) (Kranendonk, 2017).

De interconnectie van de zonnecellen is bij composiet niet eenvoudig. Deze bedrading moet na de productie nog bereikbaar zijn, maar mag tijdens de productie niet hinderen in bijvoorbeeld het creëren van een vacuüm. Het gebruik van vlakke tabs lijkt hierdoor gunstig, al zijn deze niet geïsoleerd. Achteraf dient er nog een waterdichte afsluitdoos³⁴ aangebracht te worden. Ook zijn bij HumidityFreeze testen³⁵ de vlakke tabs afgebroken wat mede komt door het vocht in luchtbelletjes dat door bevriezing schade aanbrengt aan zijn omgeving door het uitzetten. Het gebruik van ronde, geïsoleerde draden heeft daarom de voorkeur, maar dit is tijdens de productie weer lastiger te gebruiken. Dit is verder niet expliciet onderzocht.

De levensduur van de diverse samples is ook getest met behulp van een klimaatkast. Student Nico Kranendonk heeft zijn samples voor 6,5 dagen blootgesteld aan continue +85°C bij een luchtvochtigheid van 85%. Deze Damp Heat Test is ook gebruikelijk in de zonne-energie sector. Zijn samples toonden een lichte verkleuring en een delaminatie in de kale cel. Daarmee is aangetoond dat een composiet pakket als geheel niet voldoende beschermt tegen invloeden van buitenaf. Het additioneel inpakken van een zonnecel met PET barrière-folie is noodzakelijk.



Figuur 15; Links 2 samples waarbij de bovenste 6,5 dagen een DampHeat test heeft ondergaan. Duidelijk zichtbaar is de verkleuring van het product. Rechts een doorsnede foto van dezelfde verkleurde sample. Duidelijk zichtbaar de delaminatie van de diverse lagen in de cel zelf. (Kranendonk, 2017)

Aanbevelingen

De techniek is nog niet volledig uitgewerkt, met name rondom de connectiviteit is nog onderzoek vereist. Wel is duidelijk dat de cel aan de buitenzijde toegepast moet worden voor zowel de levensduur van de cel alsook de mechanische eigenschappen van het oorspronkelijke product. Wel moet dan de toepassing van beschermende coatings verder worden onderzocht. Deze coating dient ter bescherming, maar moet wel voldoende transparant zijn om de energie-opwekking niet te veel te hinderen.

In de afdank fase zou de cel eenvoudig verwijderbaar moeten zijn. Door de positie op de structuur is dit in theorie mogelijk, al zal nader onderzoek gedaan moeten worden naar de juiste techniek en materialen.

³⁴ IN EEN MARKTONDERZOEK IS GEBLEKEN DAT ER NIETS PASSENDS BESTAAT IN DE MARKT MOMENTEEL VOOR DEZE APPLICATIE. DERHALVE LIJKT EEN 3D GEPRINTE AANSLUITDOOS WELLICHT HAALBAAR, AL DIENT DEZE WEL ONTWERPEN TE WORDEN CONFORM DE GELDENDE RICHTLIJNEN. (VAN DER STEEN, 2018)

³⁵ EEN HUMIDITYFREEZE TEST IS EEN CYCLUS VAN 20 UUR IN EEN OMGEVING VAN 85°C EN 85% LUCHTVOCHTIGHEID, WAARNA DE TEMPERATUUR BINNEN 4 UUR SNEL NAAR -40°C WORDT GEBRACHT. DEZE CYCLUS WORDT 10 MAAL HERHAALD.

Marktkansen en marktbenaderingen;

Door de relatief handmatige productietechniek is het in wezen mogelijk om eenmalige composiet producten uit te rusten met zonnecellen. Echter is het wel vereist dat er per product de juiste maat zonnecel en zonnecel-combinatie geconfigureerd wordt. Dit vereist vooraf veel ontwerpcapaciteit waardoor de producent zich moet afvragen wel zo *custom made* bezig te willen zijn.

Gezien wat de partners binnen SEPAC momenteel zelf produceren lijken de lichtgewicht esthetische afwerkplaten voor brugdelen die Delft Infra Composites maakt bijzonder interessant. Dit zijn grote elementen die met behulp van vacuüm infusie in bepaalde series worden geproduceerd. Binnen het project is het helaas niet tot een full-scale mock-up gekomen om de juiste instellingen en ontwerprichtlijnen uit te werken, met name rondom de afwerking van de bekabeling. Ook zou een groter product een goed beeld kunnen geven over de uiteindelijke uitstraling van de cellen.

In het verlengde van de brugdelen lijken geveldelen voor de gebouwde omgeving zich ook te lenen voor deze applicatie daar deze op vergelijkbare wijze worden geproduceerd.

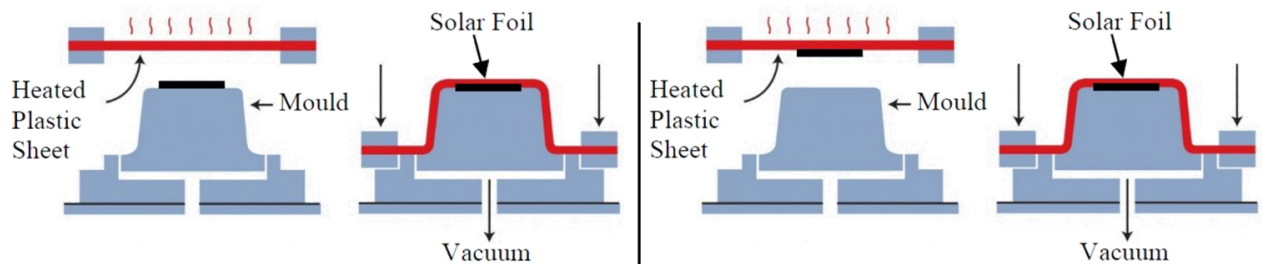
Voor ACRATS zijn er geen producten geschikt daar ACRATS meer een opleidingscentrum is rondom het onderhoud en reparatie van composiet producten.



Figuur 16; Voorbeeld van een typisch brugdeel geproduceerd door Delft Infra Composites. De composiet delen zijn licht en vormvrij en lijken zich te lenen voor integratie van flexibele zonnecellen. (Ecoduct N350, bron; <https://www.infracomposites.com/nl/project/>)

Vacuümvormen

Bij vacuümvormen wordt een kunststof vlakke plaat over een mal getrokken. Hiertoe wordt de plaat eerst kortstondig verwarmd zodat deze in glasfase komt waarna de vorm erin wordt aangebracht. Dit kan met overdruk of met een vacuüm. Ook is er onderscheid tussen een positieve mal en een negatieve mal. Het einddoel van het project is om in één processtap de zonnecel met de aansluitingen te bevestigen, op of onder een gevacuümvormde kunststof plaat van ABS of PETG.



Figuur 17; Principe van vacuümvormen met positieve mal waarbij de zonnecel op de mal gepositioneerd kan zijn (situatie links) of reeds aan de vlakke plaat gekleefd zit (situatie rechts).

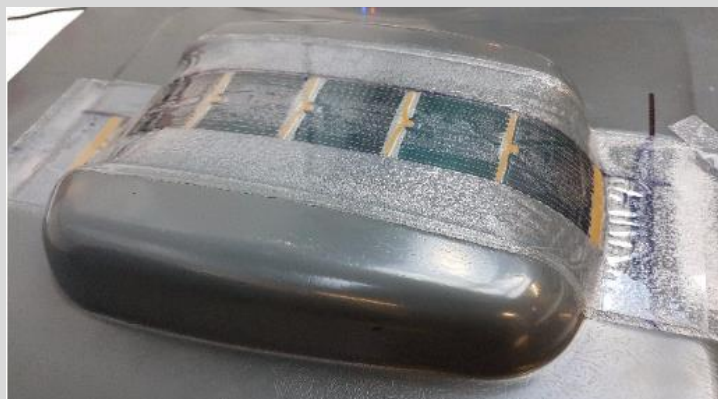
Voor deze productietechniek zijn er drie concepten getest, mede gekozen op basis van ingeschatte moeilijkheidsgraad en veelgebruikte materialen;

1. Zonnecel op ABS (niet-transparant) in 1 richting gekromd
2. Zonnecel onder PETG (transparant) in 1 richting gekromd
3. Zonnecel op of onder een dubbel gekromd oppervlak

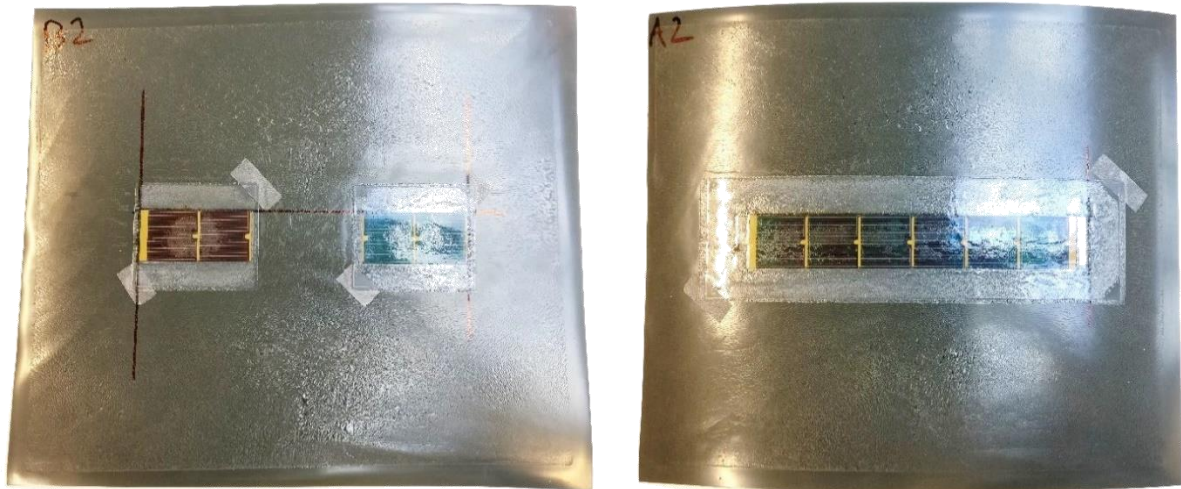
Afhankelijk van het gewenste eindproduct kunnen er specifieke eisen gesteld worden zoals esthetiek, levensduur en hechting. Voor een industrieel product gelden andere eisen qua uiterlijk dan voor bijvoorbeeld consumentenproducten. Ook de levensduur mag variëren zoals bijvoorbeeld voor producten in de openbare ruimte tegenover producten voor kortstondig gebruik zoals mode-gerelateerde producten.

Zonnecel op ABS (niet-transparant) in 1 richting gekromd

Tijdens de eerste testen bij Plastica Thermovormen werden al diverse issues geconstateerd zoals luchtballen tussen de cel en de plaat, cellen die door de hoge temperatuur beschadigd raakten en kleeflagen die na een korte periode loslaten als gevolg van krimp in het basismateriaal (Van Grinsven, 2017).

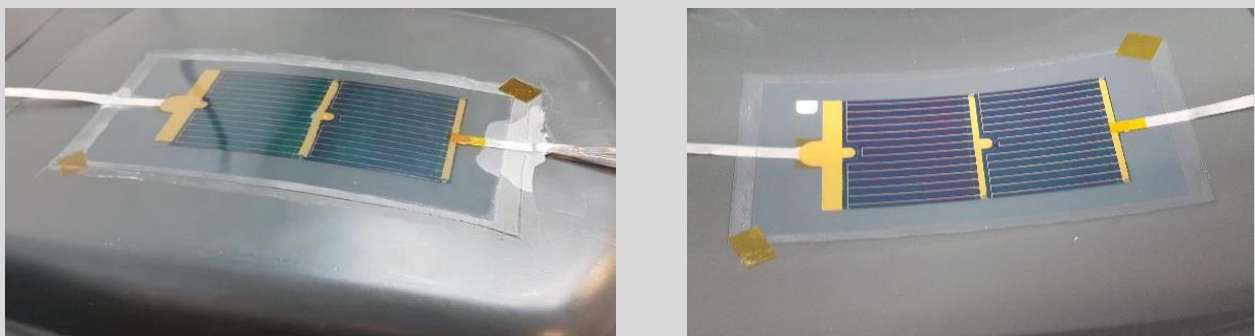


Figuur 18; Sample van ABS met GlobalSolar ICI zonnecellen waarbij de vervorming op de randen goed zichtbaar is. De beperkte verstrekking van de zonnecel weerhoudt de ABS drager ervan de correcte vorm aan te nemen. (Van Grinsven, 2017)



Figuur 19; Twee samples van 2mm ABS met GlobalSolar ICI zonnecellen, gelamineerd in PO met procestemperatuur van circa 160°C. In de linker sample zijn de cellen apart waardoor stress in basismateriaal beperkt is. In rechter sample is een langere cel toegepast waardoor de stress tussen ABS en zonnecel toeneemt. Ook duidelijk zichtbaar zijn de luchtbelletjes onder de folie, de witte uitslag. Dit als gevolg van lamineerprocedé middels hotpress waarbij geen vacuüm is toegepast. (Van Grinsven, 2017)

Om een voldoende levensduur te bereiken wordt de ICI zonnecel ingepakt in voorverstreekte PET-folie. Kale folie heeft slechts een zeer beperkte levensduur³⁶ en moet derhalve altijd extra ingepakt worden.



Figuur 20; Twee samples met korte cellen waarbij gevarieerd is met de opbouw van het pakket. Links is de configuratie ABS-PO-ICI-PO-PET, rechts ABS-PU-ICI-PU-PET

In Figuur 20 is te zien dat de hechting van PU op het ABS is beter dan die van PO (zie de witte vlekken bij de aansluitstrips, dit is lucht). De krimp in het ABS na afkoelen, leidde tot spanning in de zonnefolie. Bij kleine samples leidt dit tot vervorming van het ABS. Bij grotere samples loopt de spanning verder op en laat de zonnefolie los van het ABS bij het afkoelen.

Zonnefolie onder PETG (transparant) in 1 richting gekromd

Om de hechting te verbeteren is als lijmlaag 2-componenten epoxy en acryl TESA-tape, 4965, geïntroduceerd. Alleen de laatste TESA tape geeft goede resultaten (Wijnhof, 2018). Er is een goede hechting tussen het PET, waarin zonnefolie is ingepakt, en PETG. Er wordt echter spanning opgebouwd want de folie is aan de achterkant niet glad. De folie wordt opgedrukt (Figuur 21).

Tijdens het experimenten is een video van het vacuümvormen gemaakt waarin te zien is dat met PET ingepakte zonnestrips, bevestigd met TESA 4965 onder de PETG-plaat, vrij kunnen bewegen in de eerste fase van het vormen, 130-140°C. Bij verder afkoelen en krimpen van het PETG hecht de tape weer zo sterk aan de zonnefolie

³⁶ VERSNELDE VEROUDERINGSTESTEN BIJ SOLLIANCE TONEN AAN DAT EEN KALE ZONNECEL NOG GEEN DAG KAN BIJVEN FUNCTIONEREN IN EEN REGULIERE OMGEVING. HIERBIJ IS DE THERMAL-CYCLE TEST UITGEVOERD MET 12 UURS CYCLI VAN +85°C NAAR -20°C BIJ EEN LUCHTVOCHTIGHEID VAN 85%.

dat deze geen mogelijkheid heeft om te verplaatsen. De drukspanning resulteert dan in plaatselijk loslaten, want het PET krimpt niet.

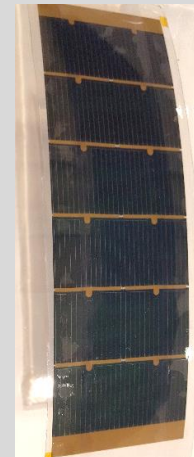
Stress in het basismateriaal is zonder de zonnecel al complex te voorspellen. Sweeney heeft diverse modellen opgesteld om de relaxatie van het materiaal vooraf te duiden. Echter vormt een additionele zonnecel hieeen extra variabelen die niet in het model past. (Sweeney, 2012) Eindige-elementen berekeningen tonen aan dat een combinatie van polyolefine en polyurethaan op de PET-laag een oplossing kan zijn om de stress op te vangen bij het afkoelen van PETG. PU vermindert de stress uitgeoefend door PETG. PO, dat een kleine Young's modules heeft, zet de stress om in een vervorming (Mandemaker, 2018).



Figuur 21; Geen hechtlaag



*ICI gelamineerd -
PO 450 μ m - PU 150 μ m - PETG*

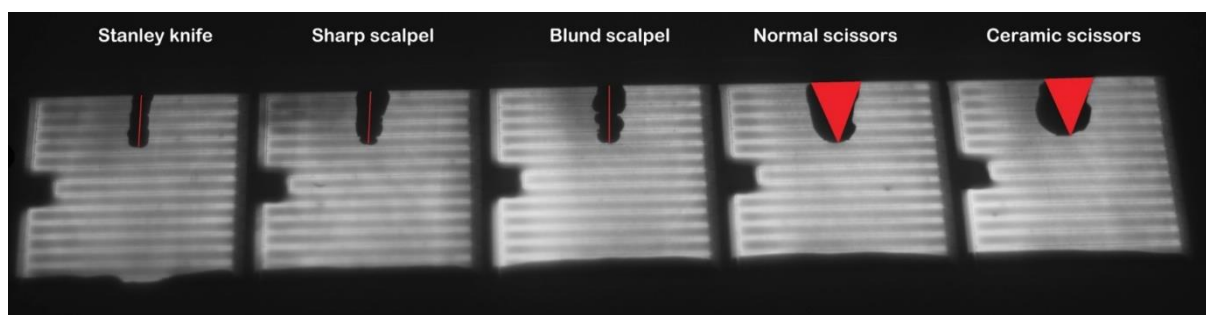


TESA-tape

In Figuur 21 is te zien dat de vervorming drastisch afneemt door de tussenlagen. Het gebruik van TESA acryl-tape vermindert de stress in de zonnecel, er is alleen nog vervorming bij de connectiepunten. Echter blijven de folies op diverse plaatsen loslaten van het PETG wat optisch niet fraai is.

Zonnecel op of onder een dubbel gekromd oppervlak

De experimenten zijn voornamelijk uitgevoerd op halffabricaten die maar in èèn richting gekromd zijn. Ideaal heeft de ontwerper een vormvrijheid om ook dubbelgekromde oppervlaktes te kunnen benutten voor energie-opwekking. Hierbij is echter het verfrommelen van de zonnecel een beperkende factor. Om hiertoe een werkbare oplossing voor te vinden zijn er testen uitgevoerd naar het insnijden van de folie (Kristensen, & De Moor, 2018). Door deze insnede ontstaat er een plaatselijke overlap waardoor een dubbel gekromd oppervlak beperkt wel mogelijk is. Dit gaat slechts beperkt ten koste van de opbrengst indien de insnede correct wordt uitgevoerd op de juiste locatie en met de juiste middelen. Echter, omdat het zonnecelmateriaal door de snede aan de lucht wordt blootgesteld, is de levensduur erg kort en zal hierop geanticipeerd moeten worden.



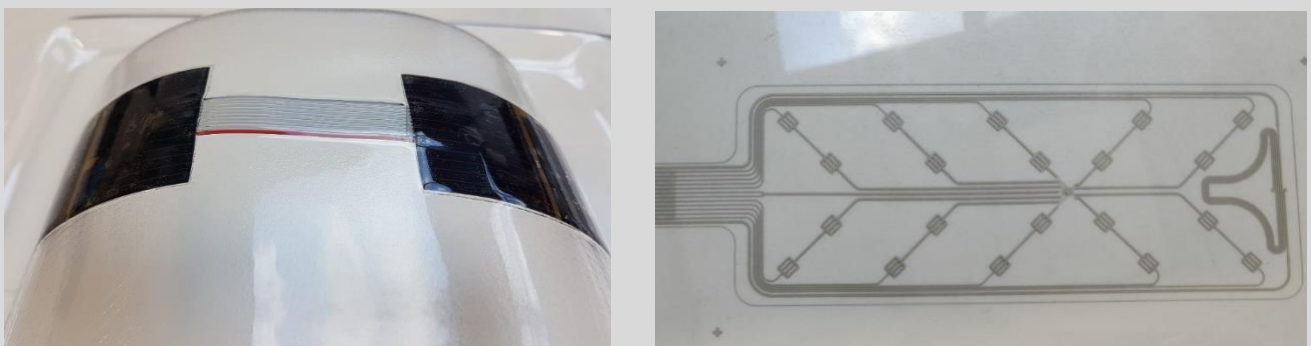
Figuur 22; EL weergave en de impact van verschillende snijgereedschappen op de insnede. Het rode vlak is wat er bewerkt is aan de ICI cel, het zwarte vlak rondom de snede toont aan waar de cel niet meer functioneert. Hoe groter het zwarte vlak, hoe minder energie-omzetting in de cel. (Kristensen, & De Moor, 2018)



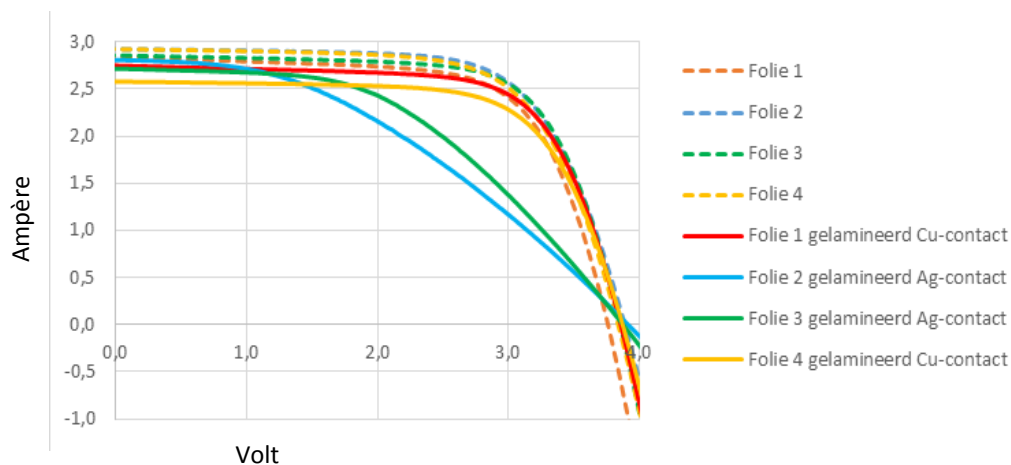
Figuur 23; Foto's van een vacuumgevormd fiets spatbord sample. Op de linker foto een onbewerkte ICI cel waarbij de kreukels zichtbaar zijn. Op de rechter foto zijn vlak onder de lichtbruine connectiestrips (rechterzijde in dit geval) snede aangebracht waarmee de lagen iets kunnen overlappen. Hierdoor zijn er minder kreukels in het oppervlak (Driesser, 2018).

Geleiding bij thermovormen

De zonnecellen zijn in deze experimenten niet of beperkt uitgevoerd met geleidende contacten om de opgewekte energie af te voeren naar overige elektrische componenten. Dit vanwege de complexiteit van het onderzoek. Ideaal worden deze geleidende contacten ook in dezelfde productierun mee verwerkt. Hiertoe kan reguliere bedrading toegepast worden (geïsoleerde metaaldraden) of folies met geleidende sporen erop gescreenprint. Idee hierbij is dat er twee flexibele folies gebruikt kunnen worden in het proces wat de vormvrijheid ten goede komt. Zie voor extra informatie Figuur 24 en Figuur 25.



Figuur 24; Twee voorbeelden van elektrische geleiding. Links een flatwire, meegelamineerd in de folie met 2 zonnecellen. Nadeel is dat deze flatwire significant dikker is dan de dunne zonnecellen wat delaminatie tot gevolg kan hebben. Rechts een voorbeeld van een doorzichtige drager met daarop een gescreenprint circuit van geleidende sporen. Voordeel is dat vormvrijheid enorm is met screenprinting, echter moet er wel een bepaalde materiaal dikte toegepast worden om de serieweerstand beperkt te houden. In de folie zouden ook diodes verwerkt kunnen worden, al moet er dan wel rekening gehouden worden met de (tijdelijke) verstreking van het materiaal en hoe de connectie met de stugge componenten dan intact blijft. Dit zou bijvoorbeeld kunnen met Torsion Beams die in het vlak kunnen torderen om zo rek op te kunnen vangen. (Shafqat, 2017)



Figuur 25; IV curve van 4 verschillende zonnecellen met koper geleiding (Cu) en zilver geleiding (Ag). Het koper is aangebracht met Cu-folie, het zilver is gezeefdrukt op PET-folie. Duidelijk zichtbaar is de hoge serieweerstand van het zilvercontact. De dikte van de zeefdruk is dan te dun voor de benodigde geleiding. Lamineren en vacuümvormen hebben geen negatieve impact op de contacten.

Marktkansen en marktbenaderingen;

Vanuit de partner Plastica Thermoforming uit Bergen op Zoom is veel kennis geleverd rondom deze productietechnologie. Sprekende over welk type product geschikt zou kunnen zijn voor de zonnecel integratie kwamen uiteenlopende producten naar voren. In eerste instantie werd een ombouw van een airco op bussen genoemd, maar de energieopbrengst zal niet in verhouding staan tot de energievraag van de airco. Medio voorjaar 2018 kreeg Plastica Thermoforming een projectopdracht voor de productie van doorzichtige overkappingen voor openbare prullenbakken met een mechanische compressie installatie³⁷. Onder de gevraagde overkapping zal de opdrachtgever Procomat reguliere zonnecellen toepassen. Dit is bij uitstek de applicatie die het SEPAC project wenst te kunnen dienen. De assemblage van het hele systeem zal sterk worden gereduceerd en de ontwerp mogelijkheden uitgebreid.



Figuur 26; Illustratie en foto van de Procopress V5 Solar Waste Compactor van firma Procomat, een prullenbak met reguliere kristallijne cellen onder een polycarbonaat deksel. Bij uitstek een applicatie die met de kennis van het SEPAC project met flexibele zonnecellen uitgevoerd zou kunnen worden. (Hoedt, juli 2019)

³⁷ [HTTPS://WWW.PROCOMAT.NL/PROCOMPRESS-V5/](https://www.procomat.nl/procopress-v5/)

In het bovengenoemde voorbeeld van de prullenbak is een duidelijk omlinjnde productomschrijving inclusief een programma van eisen op te stellen. In het kader van dit project is ook voor de maritieme sector naar applicaties gezocht waarin flexibele zonnecellen een rol kunnen spelen. De schepvaart wil zeker wel verduurzamen, al moet bij deze toepassing van zonnecellen wel helder zijn dat het geen significante bijdrage aan de voortstuwing kan leveren. Juist het meer onafhankelijk worden van walstroom lijkt voor deze applicatie het meest marktrijp (De Vries, 2018).

Conclusies en aanbevelingen

Vacuümvormen van zonnefolie op ABS lijkt goed te lukken. Eventuele stress op de gelamineerde zonnefolie is niet zichtbaar in het eindproduct. Levensduurtesten moeten uitwijzen of de hechting stabiel is.

Vacuümvormen van zonnefolie onder PETG lukt niet zonder zichtbare onthechting.

Smalle stroken zouden een oplossing kunnen zijn, maar de produceerbaarheid wordt dan een issue. Een tussenlaag van siliconen, flexibel over een groot temperatuurgebied, zou een andere oplossingsrichting kunnen zijn.

Het bevestigen van zonnefolie op een dubbel gekromd oppervlak lukt praktisch niet. Smalle stroken, waardoor het een quasi-enkel gekromd oppervlak wordt lijkt de enige oplossing indien dit wenselijk is. Al is de levensduur van de zonnecel dan twijfelachtig.

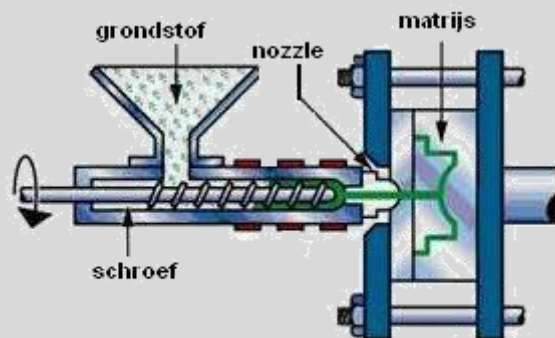
Ideaal zouden de zonnecellen niet als rechthoeken moeten worden toegepast, maar juist in een zelf te definiëren vrije vorm. Door een vrije vormgeving kan op basis van stressvoorspelling in het object tijdens het thermovormen gekozen kunnen worden om daar geen actief PV deel toe te passen en elders, op vlakkere delen juist wel. Voor AVANS is in dit project geen beschikbaarheid voor dergelijke vrije vormen, maar als het werk van Deepak beschikbaar komt zou dat voor de produceerbaarheid van PIPV veel kunnen betekenen. (Deepak, 2015) Hieronder is een voorbeeld van een windscherm van een Suzuki motor met een concept ontwerp van hoe de zonnecel vormgegeven zou moeten zijn voor maximale energieopbrengst.



Figuur 27; Uitgewerkte configuratie van front electrode design van een Suzuki motor. (Deepak, 2015) Als dit technische mogelijk is, is de weg open voor algehele vormvrijheid waarbij de zonnecel geheel de vormgeving van het product kan volgen in plaats van andersom.

Zonnecellen in het spuitgietproces

Als derde onderzochte productietechniek komt spuitgieten aan bod. Spuitgieten is een kunststofverwerkingstechniek waarmee kunststoffen in een gewenste vorm kunnen worden gemaakt. Het gewenste plastic wordt gesmolten en onder hoge druk in een mal (matrijs) gespoten. Deze mal is zo vormgegeven dat hij het plastic in de gewenste vorm duwt. Nadat het plastic is afgekoeld is het product klaar. In Figuur 28 is te zien hoe het spuitgietproces verloopt. Er wordt grondstof (plastic granulaat) in de machine gestopt. Dit granulaat wordt dan via een verwarmde schroef naar de matrijs geleid. Tijdens dit proces zal het plastic opwarmen en smelten, zodat het aangekomen bij de nozzle (spuitmond) onder een hoge druk de matrijs ingespoten kan worden.



Figuur 28; Infographic van het spuitgietproces (Espol Plastics, 2018)

Het spuitgietproces is een populaire techniek in veel kunststof branches. Voor bedrijven in de spuitgiet sector is het belangrijk om innovatief te zijn en om hun klanten veel technische mogelijkheden te kunnen bieden. De partners in dit onderzoek zijn Alligator Plastics, Promolding, Posterama, HSV-TMP en Ubbink. Gezamenlijk is gewerkt aan deze duurzame innovatie die wellicht de wereld van spuitgieten kan veranderen: het integreren van flexibele zonnepanelen in het spuitgietproces.

Om een zonnepaneel succesvol in een spuitgietproduct te kunnen integreren waren er meerdere uitdagingen die overwonnen moesten worden.

Ten eerste is het noodzakelijk dat er een goede hechting tot stand komt tussen het spuitgietproduct en tussen het paneel waarmee de zonnecel is ingepakt. Deze techniek wordt al veelvuldig gebruikt als in-mold labeling, echter worden de labels gemaakt uit een materiaal uit dezelfde productfamilie als het basismateriaal. De zonnecellen hebben andere typen folie waarmee ze zijn ingepakt. Nu moeten er dus verschillende materialen samen worden gebracht om met elkaar te hechten onder hoge temperaturen. Deze verschillende kunststoffen hebben verschillende glasovergangstemperaturen en verschillende thermische uitzettingscoëfficiënten. Hierdoor zullen er spanningen ontstaan op de raakvlakken van de verschillende materialen, wat kan leiden tot delaminatie effecten. Of het kan zijn dat er überhaupt geen hechting ontstaat doordat er geen vermenging tussen de materialen op het raakvlak ontstaat.

De onderzoeksvragen die hierbij zijn opgesteld zijn als volgt (Kristensen, 2018);

Hoe kan een succesvolle hechting tot stand gebracht worden tussen de folie waarin de zonnecel is gelamineerd en de spuitgietmassa?

Deze vraag resulteert in diverse vervolgvragen zoals welke materialen zijn geschikt en onder welke procesparameters is er een optimale hechting tussen de folie en de spuitgietmassa? Ook is het onbekend of er een lijmlaag nodig is tussen het spuitgietdeel en de folie om een goede hechting tot stand te laten komen en in welke mate een oppervlakte behandeling van de folie de hechting bevordert?

Om deze vragen te kunnen beantwoorden is er bronnenonderzoek gedaan naar verschillende materiaal eigenschappen van kunststoffen die vaak gebruikt worden in het spuitgietproces, naar het gebruiken van een

lijm laag in het spuitgietproces en naar de effecten van een plasma behandeling op de hechtingskwaliteit van materialen. Ook zijn er experimenten uitgevoerd om de optimale procesparameters te benaderen en de hechting te testen van de geselecteerde materialen; zowel materialen die wel een plasma behandeling hebben verkregen als onbehandelde materialen.

Ten tweede vindt het spuitgietproces typisch plaats bij hoge temperaturen en een hoge druk. Aan het begin van het SEPAC project was nog niet duidelijk wat een combinatie van extreme omstandigheden zouden betekenen voor de efficiëntie van de zonnecel. Het zou namelijk kunnen dat de extreme omstandigheden van het spuitgietproces er voor zorgen dat de zonnecellen zodanig beschadigd raken dat ze niet meer bruikbaar zijn. Om dit risico te onderzoeken is de volgende onderzoeksvraag opgesteld:

Hoe wordt de karakteristiek van de zonnecel beïnvloed door de temperatuur en druk van het spuitgietproces?

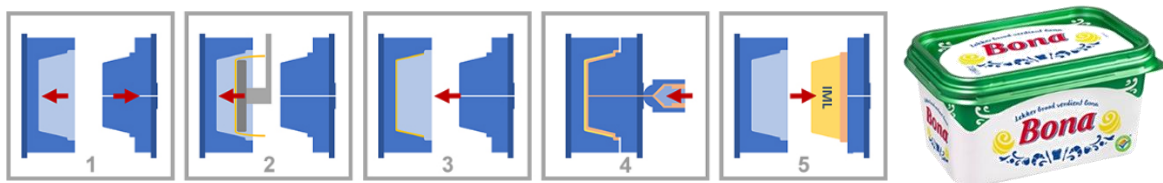
Om deze onderzoeksvraag te kunnen beantwoorden zijn er proefspuitingen gedaan met werkende zonnecellen en de karakteristiek van de zonnecel zowel voor als na de proefspuiting bepaald.

Een laatste technologische uitdaging is het onderzoeken van de grenzen aan de flexibiliteit van de zonnecellen die gebruikt worden in combinatie met het spuitgieten om zo optimaal gebruik te kunnen maken van de voordelen van de flexibele zonnecel technologie. Er was nog niet veel bekend over het gedrag van de zonnecel onder mechanische belasting. Daarom is de volgende onderzoeksvraag opgesteld:

Wat is de vormvrijheid die toegepast kan worden in de zonnecel geïntegreerde producten?

Kunnen de zonnecellen ook succesvol geïntegreerd worden in een gebogen product en wat zijn de grenzen aan de radius van het product?

Om deze onderzoeksvraag te kunnen beantwoorden zijn er proefspuitsessies gedaan met een gebogen mal. Ook is er een vergelijkend onderzoek uitgevoerd om informatie te winnen uit het thermovormwerkpakket waarbij zonnecellen ook op een gebogen oppervlak worden geïntegreerd onder hoge temperatuur en druk. Verder zijn er mechanische trektesten gedaan op kale zonnecellen om meer informatie te verkrijgen over de rek die een zonnecel aankan. Hij heeft de zonnecellen beproeft op longitudinale rek. (Houtman, 2017)



Figuur 29; Schematische weergave van In-mold Labeling process. Het label wordt in de mal geplaatst (2) waarna de mal sluit (3) en met spuitgietmassa gevuld (4). Eindproduct is een kunststof kuipje inclusief geheel verkleefd label. Bron; <http://www.en.pet-pack.today/solutions/in-mold-labeling-iml/> & <http://www.weydeland-waardenburg.nl/>

Hechtingsonderzoek

In de beginfase van het SEPAC-project is er in samenwerking met Ultrapolymers³⁸ onderzoek gedaan naar welke type materialen geschikt zijn om te combineren in het spuitgietproces (Van Rooij, 2017). Het onderzoek heeft als startpunt de bestaande kennis van Ultrapolymers genomen. Ook is er onderzoek gedaan naar welke materialen geschikte eigenschappen hebben om een duurzaam product te vormen.

Materiaaleigenschappen

In het verleden zijn er al meerdere testen gedaan om de hechtingskwaliteit in het spuitgietproces tussen plastics te testen. In Tabel 2 zijn de resultaten bevonden door Ultrapolymers weergegeven. In deze tabel valt met name op dat alle plastics een excellente hechting vormen met hetzelfde type plastic. Er zijn nog veel andere materiaalcombinaties die leiden tot een goede hechting. In ons onderzoek is er voor gekozen om alleen te focussen op materialen die eerder een excellente of goede hechting bleken te hebben in gepubliceerde test resultaten³⁹.

Het is van groot belang dat de plastics die gebruikt worden, geschikt zijn om de levensduur van het gewenste product te kunnen halen. Hierbij is de belangrijkste factor de barrière eigenschap ten opzichte van waterdamp. Er is geen enkel plastic wat waterdamp 100% tegenhoudt. Glas heeft wel deze eigenschap, maar glas voldoet niet aan onze flexibiteitseisen en is niet te verwerken in het spuitgietproces. Om toch de zonnecel te kunnen beschermen tegen vocht met een plastic folie, wordt een barriërefolie gebruikt bestaande uit een 125 µm PET⁴⁰ folie met een anorganische coating (De Moor, 2017).

Material	ABS	ASA	CA	PA 6	PA 6.6	PA Blend	PBT	PC	PC/ABS	PC/PBT	PC/PET	PE	PET	PMMA	POM	PP	PPO	PS	SAN	TPE	TPU	LSR
ABS	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
ASA	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
CA	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
PA 6	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
PA 6.6	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
PA Blend	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
PBT	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
PC	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
PC/ABS	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
PC/PBT	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
PC/PET	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
PE	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
PET	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
PMMA	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
POM	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
PP	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
PPO	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
PS	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
SAN	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
TPE	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
TPU	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
LSR	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green

Tabel 2 Hechtingskwaliteit van verschillende materiaalcombinaties

Gedurende het project zijn er diverse experimenten gedaan om de hechting tussen het product en de zonnecel tot stand te brengen. Van Rooij heeft als basismateriaal ASA⁴¹ en PP⁴² gebruikt waarbij er een zekere mate van hechting ontstond met de PET folie van de zonnecel. Echter zijn in vervolgonderzoeken deze resultaten niet reproduceerbaar gebleken (Apri, 2017) (Teeuwen, 2018).

De hechting van het spuitgietdeel aan PET folie waren wisselend voor iedere materiaalsoort die is geprobeerd. PP met PET gaf als complicatie dat de samples sterk kromtrokken als gevolg van 3% krimp van PP ten opzichte van PET, zie Figuur 30. De combinatie van PET met ASA of PBT gaf het beste resultaat. Met behulp van een pull-off adhesie test is gebleken dat de hechting tussen PET en ASA een sterkte heeft van 3 MPa. Ook PBT heeft vergelijkbare waarden. Door een plasma behandeling uit te voeren op de PET folies bleef de sterkte van de hechting ongeveer 3 MPa. Er is dus geen dusdanige positieve verandering in de hechting waardoor de extra kosten van een plasma behandeling verantwoord wordt. Zowel met, als zonder plasma behandeling wisselde de hechting per proefstuk sterk. Bij veel proefstukken was de PET folie met de hand makkelijk te verwijderen van het ASA of PBT spuitgietdeel (Teeuwen, 2018). In Tabel 3 zijn de diverse testresultaten van verschillende onderzoeken visueel getoond.

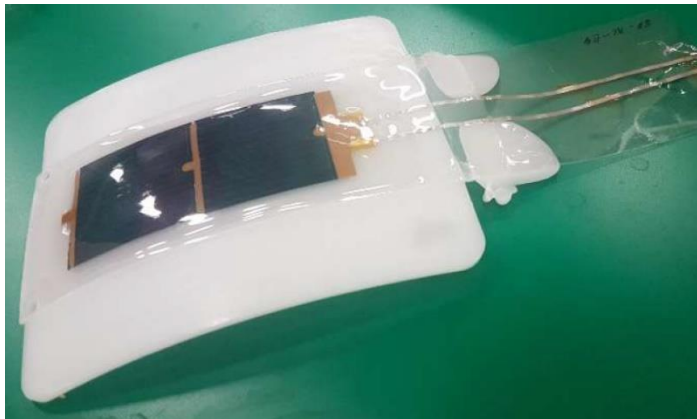
³⁸ EEN TOELEVERANCIER VAN PARTNERS IN HET PROJECT, CONTACTPERSOON CONSTANT PEEK. [HTTPS://WWW.ULTRAPOLYMERS.COM/](https://www.ultrapolymers.com/)

³⁹ [HTTP://WWW.NEMOLD.COM/PDFs/COMPAT-CHART.PDF](http://www.nemold.com/PDFs/COMPAT-CHART.PDF)

⁴⁰ POLY ETHYLENE TEREPHTHALATE, TYPE MELINEX ST504, DUPONT TEIJIN FILMS

⁴¹ ACRYLONITRILE-STYRENE-ACRYLATE, WAARBIJ GEWERKT IS MET LG LI912 IVM HOGE FLOW RATE.

⁴² POLYPROPYLENE



Figuur 30; Extreme kromming als gevolg van de nakrimp bij ASA (Apri, 2017).

Folie \ Massa	PC	PP	PO	PFA	PFA plasma	ETFE	ETFE plasma	PET	PET plasma	PEN	PEN plasma
PC											
PP											
ASA											
PBT											
PBT-PC											
PET											
PBT 10%glas											
PBT 20%glas											
Tritan											
PS											
ABS											

Tabel 3; Mate van hechting voor verschillende materiaalcombinaties gebaseerd op de onderzoeksresultaten van Apri, Van Rooij, Teeuwen en Kristensen.

Rood: Er vindt geen hechting plaats

Oranje: Er vindt hechting plaats, maar met wisselende sterkte. Er is geen stabiel goed hechtend proces te creëren voor deze materiaalcombinaties

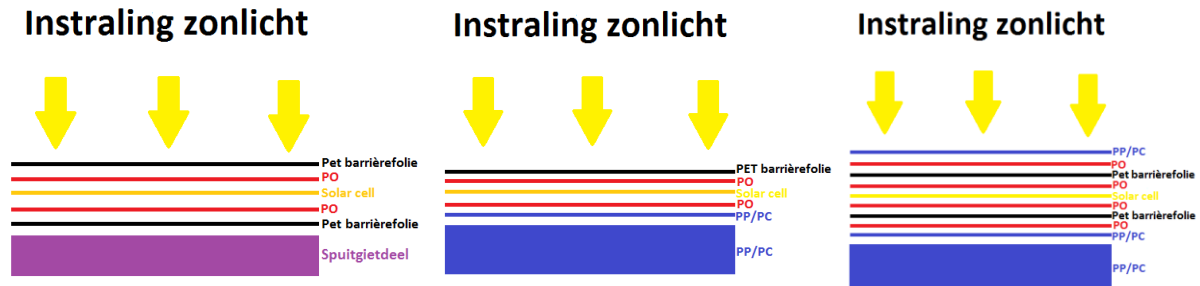
Groen: Er vindt een goede hechting plaats.

Laminaatopbouw

Een kale ICI submodule heeft niet genoeg bescherming om lang te functioneren. Daarom zijn er verschillende laminaat-opbouwen getest⁴³. Het reguliere laminaat, wat zou kunnen zorgen voor een goede bescherming van de zonnecel tegen vocht, is te zien in Figuur 31, optie1. Hierbij wordt de zonnecel ingepakt met PET barrière folie. Er wordt een PO laag tussen de zonnecel en het PET-folie geplaatst die zorgt voor de hechting van de verschillende lagen tijdens het lamineren. Aangezien er met PET folie geen reproduceerbaar, goed hechtend resultaat behaald werd, is er getest hoe verschillende type folies hechten aan verschillende plastics. Deze resultaten zijn te vinden in Tabel 3. De combinaties van polycarbonaat folie en polycarbonaat plastic, en polypropyleen folie en polypropyleen plastic resulteren in een uitstekende hechting. PC gaf een waarde van ongeveer 7 MPa bij de pull-off adhesie test waarbij het basismateriaal eerder faalde dan de hechting tussen materiaal en folie. PP is niet vergelijkbaar getest (lijm van dollytester hecht niet of nauwelijks op PP) echter manueel gaf dit vergelijkbare sterktes (Kristensen, 2018)

⁴³ ALLE LAMINATIEMETHODES WERDEN UITGEVOERD BIJ SOLLIANCE MET DPL-24A OPTEK VACUÛM LAMINATOR. DE PROEFSTUKKEN WORDEN VOOR 15 MINUTEN OP 145 °C GELAMINEERD. NA HET LAMINEREN KOELEN DE PROEFSTUKKEN AF ONDER EEN ZWARE METALEN PLAAT, OM TE VOORKOMEN DAT DE LAMINATEN KROMTREKKEN TIJDENS HET AFKOELEN.

Met deze nieuwe inzichten is er pragmatisch besloten om het laminaat van de zonnecel anders samen te stellen als regulier. Dit is te zien in onderstaande figuur, optie 2 en 3.



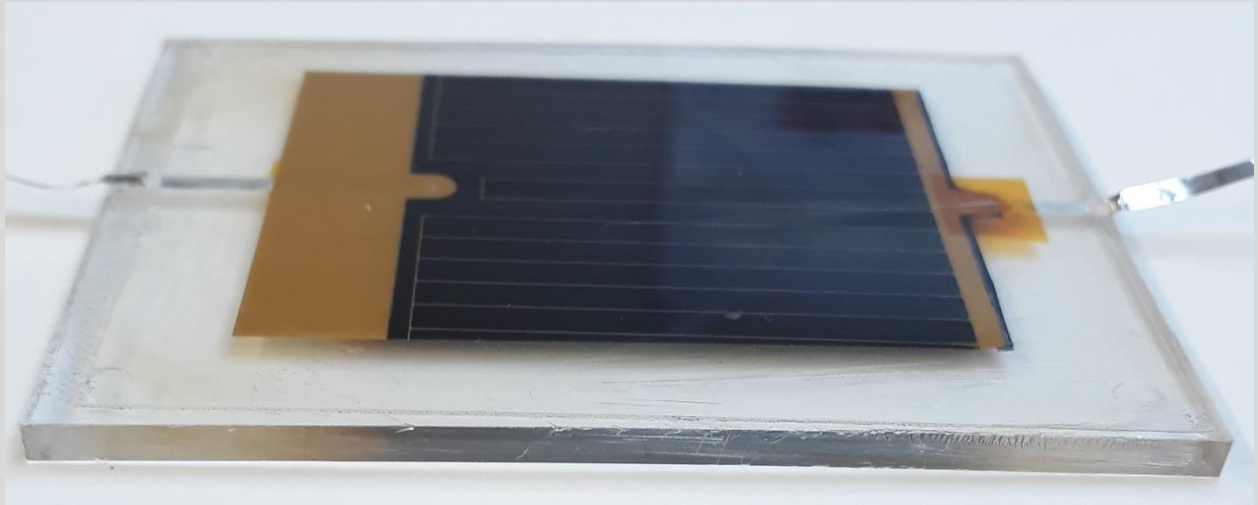
*Figuur 31; Productopbouw laminaat ICI solar cell met van links naar rechts optie 1, 2 en 3;
optie 1; regulier, symmetrisch laminaat met PET barrièrefolie aan de buitenzijde.
optie 2; asymmetrisch laminaatopbouw met PP, of PC op het contactvlak met het product.
optie 3; symmetrisch laminaatopbouw met PP, of PC op het contactvlak met het product.*

Ook de testen waarbij de zonnecel zoals in een productopbouw zoals Figuur 31, optie 2 en 3, geïncorporeerd zijn in het spuitgietproces met PC en PP ontstond er een erg goede hechting. In Figuur 32 is een van de resultaten te zien van het laminaat van optie 2 met een PP folie in combinatie met een PP spuitgietmassa. Het laminaat en het plastic product zijn volledig versmolten tot een massa. Wel valt het op dat de proefstukken gemaakt met PP erg krom trekken tijdens het afkoelen. Dit is natuurlijk geen gewenst effect. In Figuur 33 is een proefstuk te zien die is gemaakt met PC folie en waarbij PC is gebruikt als spuitgietmassa. De proefstukken die zijn gemaakt met deze materiaalcombinatie zijn volledig plat. Dit is dus een materiaalcombinatie die met beperkt vervolgonderzoek toegepast zal kunnen worden in producten.



Figuur 32; Proefstuk met zonnecel geïntegreerd in het spuitgietproces met PP.

Een probleem van de laminaatopbouw zoals in Figuur 31, optie 2 is de asymmetrie in het laminaat. Zeker bij gebruik van PP folie worden de laminaten hierdoor erg krom. Dit zorgt er voor dat het laminaat niet goed in de mal te plaatsen is. Vandaar dat er een uiteindelijk laminaat voorstel is gedaan wat de zonnecel vanaf beide zijdes beschermd met barrièrefolie en waarbij PP, of PC aan beide zijdes wordt bevestigd om er voor te zorgen dat het laminaat minimaal krom trekt. Deze samenstelling is optie 3 in Figuur 31.

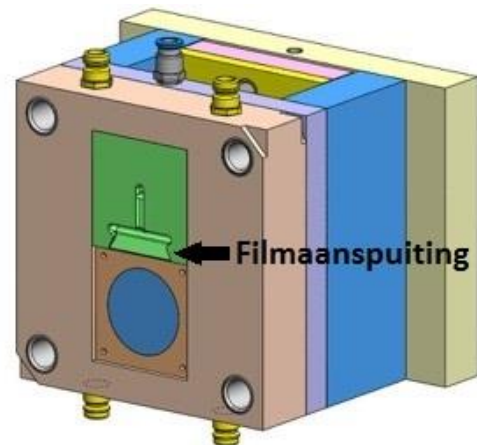
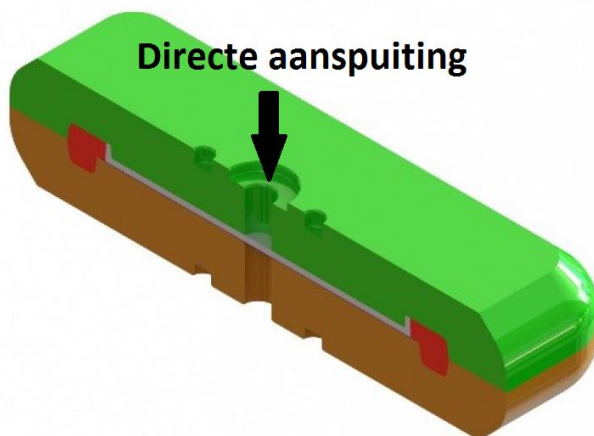


Figuur 33; Proefstuk met zonnecel geïntegreerd in het spuitgietproces met PC.

Ontwerp van een geschikte mal

Gedurende het project zijn er verschillende configuraties van mallen uitgetest om te testen wat de beste aansluiting en inklemming van de zonnecel is.

In Figuur 34 is een dwarsdoorsnede van het ontwerp van de eerste mal te zien die is gebruikt in dit project. Dit ontwerp is gemaakt door Marijn van Rooij en is gerealiseerd bij Promolding met behulp van 3D-printen⁴⁴ (Van Rooij, 2017). Hierbij is er sprake van een centraal punt waar het kunststof de mal in komt., een zogenaamde directe aansluiting. Hiermee ontstaat er een goede verspreiding van materiaal door de mal, echter is de druk en de temperatuur op de zonnecel extreem wat negatief is voor de levensduur van de cel. In vervolg ontwerpen is gewerkt met filmaansluiting waarbij het plastic vanaf een zijkant van de mal evenwijdig aan de zonnecel in de mal wordt gespoten (Figuur 35).



Figuur 34; Mal met directe aansluiting (Van Rooij, 2017) Figuur 35; Mal met film aansluiting (Teeuwen, 2018)

Voor het inklemmen en positioneren van de zonnecel in de mal zijn meerdere ideeën uitgetest. Een klem systeem verwerkt in de mal perste de folie van de cel te veel plat waardoor de tussenlaag PO uitstroomde. Middels een centraal aanzuigpunt in de mal is de cel op zijn plaats gehouden, echter stroomde er incidenteel kunststof vóór de cel door omdat de cel rondom niet genoeg vlak gehouden kon worden. Vervolg hierop waren dunne luchtkanalen ten behoeve van het vacuüm, maar dit is zichtbaar in het eindproduct. Een geheel vlakke mal waarbij met magnetische pinnen wordt gewerkt lijkt werkbaar, maar dit is beperkt onderzocht. Na

⁴⁴ PROMOLDING HEEFT EEN 3D PRINT TECHNIEK ONTWIKKELD VOOR HET MAKEN VAN EEN MAL VOOR HET SPIJTGieten. DEZE IS VOOR KLEINE PROTO-SERIES GESCHIKT.
[HTTPS://WWW.P3D-PRIM.COM/](https://www.p3d-prim.com/)

diverse experimenten is er nog geen vaststaande methode voor het fixeren van de cel. Wel lijkt de vacuüm techniek nog het bruikbaarst. Latere samples met dikkere cel-pakketten hadden minder zichtbare luchtkanalen aan het oppervlak.



Figuur 36; Sample van PBT met PET folie. Duidelijk zichtbaar de dunne lijnen wat de luchtkanalen zijn in de mal.

Bij de diverse testen bleek het van groot belang dat de zonnecel precies de juiste grootte heeft om hem goed in te kunnen inklemmen in de mal. In veel testen was de zonnecel net te klein, waardoor de zonnecel werd verschoven in de mal, of te groot, waardoor de zonnecel bol ging staan en plastic voor de zonnecel terecht kwam. Verwacht wordt dat voor industriële productie ook de ingepakte cellen machinaal geproduceerd kunnen gaan worden wat voor een betere nauwkeurigheid zorgt.

Invloed van het spuitgiet proces op de efficiëntie van de zonnecel

Het spuitgietproces hanteert hoge temperaturen en hoge drukken, zij het wel kortstondig. De temperatuur van het plastic waarmee wordt gespoten hangt erg af van het type plastic dat wordt gebruikt, en kan per proces variëren. Bij de meeste processen ligt de temperatuur van de spuitgietmassa tussen de 200 en 300 graden Celsius. Een andere temperatuurfactor waarmee rekening gehouden moet worden is de temperatuur van de mal. Vaak wordt tijdens het spuitgieten de mal opgewarmd (typisch tot 50-100 graden Celsius) om er voor te zorgen dat het plastic zich goed kan verdelen in de mal voordat het stolt. De zonnecellen die gebruikt gaan worden zullen een tijd tegen de mal aan geplaatst worden. Het is dus ook een belangrijke vraag, of dit schadelijk is voor de zonnecel. Het plastic wat de mal in komt, wordt onder hoge druk de mal in geleid. De waardes voor deze druk varieert ook sterk per materiaal en mal. In de uitgevoerde experimenten varieert de druk van 33bar tot 1415bar.

Rendementseffecten temperatuur spuitgietmassa

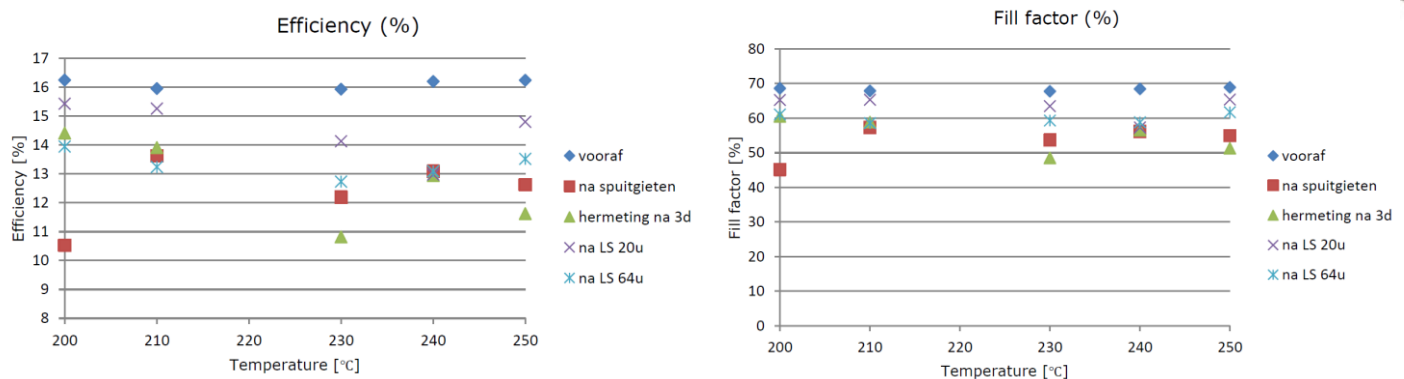
In een test van Marijn van Rooij zijn de efficiëntie en de vulfactor van zonnecellen gemeten voor en na het spuitgietproces. Er zijn 6 verschillende proefstukken getest op 6 verschillende temperaturen. De proefstukken die zijn getest op 200, 210 en 220 graden Celsius. De cellen waren voor het spuitgieten niet ingepakt in barriërefolie, maar werden kaal in de mal vast getapet met een plakbandje.

De proefstukken zijn gemeten voor het spuitgieten, direct na het spuitgieten, 20 uur na het spuitgieten waarin ze in het licht hebben gelegen en 64 uur na het spuitgieten waarbij ze tijdens die 64 uur in het licht hebben gelegen, dit wordt *light soaking* genoemd. Het sample van 220°C is tijdens het proces defect geraakt en daarom niet meer te beoordelen. Gemeten is zowel de *efficiency*⁴⁵ als de *Fill Factor*⁴⁶.

Duidelijk zichtbaar is de sterke daling van de waarden direct na het spuitgieten. Daarna zijn de zonnecellen in het daglicht gelegd na 20 uur nog een keer gemeten. Dit verbeterde voor alle proefstukken zowel de efficiëntie als de Fill Factor aanzienlijk, behalve voor het proefstuk van 240 graden. Na 64 uur LS is er nogmaals gemeten en dit gaf een daling, waarschijnlijk door het feit dat de zonnecellen niet goed zijn ingepakt tegen vocht en omgevingsinvloeden (Kristensen, 2018).

⁴⁵ DE EFFICIËNTIE GEEFT WEER HOEVEEL PROCENT VAN TOTALE ZONNE-ENERGIE WAT OP DE ZONNECEL VALT, WORDT OMGEZET IN ELEKTRISCHE ENERGIE.

⁴⁶ PERCENTAGE WAARIN EEN WERKENDE CEL MET EEN REËEL VERMOGEN ($V_{MP} \cdot I_{MP}$) FUNCTIONEERT TEN OPZICHTE VAN THEORETISCH MAXIMAAL OP BASIS VAN $V_{OC} \cdot I_{SC}$.



Figuur 37; Resultaten van de efficiëntie en Fill Factor van ICI-CIGS zonnecellen voor en na het spuitgieten op verschillende temperaturen

Een belangrijke kanttekening is dat de testen per temperatuur maar op 1 proefstuk zijn uitgevoerd en daarmee is een kwantitatieve uitspraak over de temperatuurbestendigheid van zonnecellen dus niet geoorloofd. Wel kan worden geconcludeerd dat de nog redelijk functioneren.

Rendementseffecten maltemperatuur

Het onderzoek wat is uitgevoerd om te bepalen of de maltemperatuur van groot effect zou zijn op de zonnecel is uitgevoerd op basis van literatuur. Er zijn namelijk uitgebreide dry heat-testen uitgevoerd met ICI-CIGS zonnecellen. Hierbij worden de zonnecellen duizenden uren getest in een temperatuur van meestal 85 graden Celsius. Aangezien de mal temperatuur in onze experimenten 80 graden Celsius was, kunnen wij deze resultaten als goede benchmark gebruiken. Uit resultaten van deze testen blijkt dat als de zonnecellen 50 uur blootgesteld zijn aan een temperatuur van 85°C de efficiëntie afneemt van 13,7% naar 11.9% (Wennerberg, 2002). De zonnecel zal tijdens het spuitgieten naar schatting maximaal een minuut in de mal geklemd zijn voordat het spuitgieten begint, dit is dus een veel korter tijdsbestek dan 50 uur en de zonnecel zal in die tijdsperiode niet volledig opwarmen tot de temperatuur van de mal. Ook is "light soaking" een effectieve manier om het rendement van de zonnecel te verhogen nadat de cel is blootgesteld aan een temperatuur van rond de 85 graden Celsius (M Gostein, L Dunn, 2011).

Rendementseffecten druk

In de testen gedaan gedurende het SEPAC project is er gevarieerd met druk om er achter te komen of een hoge druk een negatief effect heeft op de prestatie van de zonnecel ten opzichte van een lagere druk. Helaas waren de resultaten op dit gebied niet betrouwbaar genoeg om hier uitsluitel over te geven. Om het effect van de druk te verminderen is besloten om een filmaanspuiting te gebruiken. Hierbij komt het plastic parallel aan de zonnecel binnen in plaats van loodrecht op de zonnecel. Ook is er per proces gezocht naar de laagste druk waarvoor het proces goed werkt, om eventuele negatieve effecten van een hoge druk te minimaliseren.

Nodige flexibiliteit van zonnecel in spuitgietproces

In de voorbereiding van de onderzoeken is het vergelijk met *Inmold labeling* veel gemaakt. Deze folies worden met robotarmen opgepakt, gebogen, in de mal geplaatst, gefixeerd en aangespoten. Derhalve is flexibiliteit van de cel noodzakelijk. Echter gezien alle complicaties tijdens het onderzoek is de focus meer komen te liggen in de hechting en materialengebruik dan dat er geëxperimenteerd is met gebogen oppervlakten en eventuele automatisering van het proces. De samples zijn voornamelijk vlakke elementen geweest waarbij flexibiliteit niet gevraagd is. In vervolgonderzoek zou hier meer aandacht aan geschonken kunnen worden.

Marktkansen en marktbenaderingen;

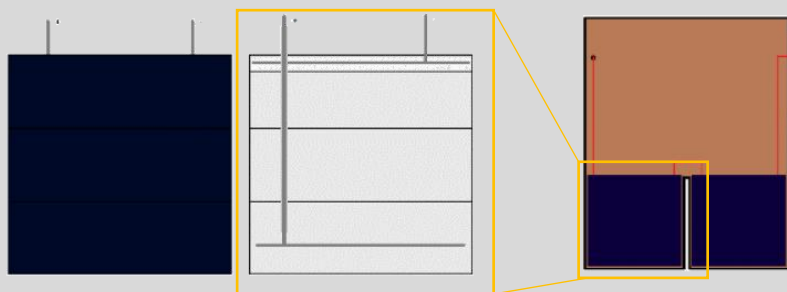
Nu er bekend is welke materialen in welke hoedanigheid gebruikt kunnen worden en hoe de mal ten aanzien van de zonnecel opgesteld moet worden, kan er gewerkt worden aan producten. Vanuit partner Alligator Plastics is een product naar voren geschoven welke opportuun lijkt voor de SEPAC technologie. Het betreft een zeep-dispenser voor binnen gebruik welke momenteel met een kristallijne zonnecel wordt gevoed. Er zijn productontwerpen gemaakt om aan de gewenste stroom en spanning te komen⁴⁷ echter functioneert een CIGS cel bij artificieel licht minder goed als een kristallijne cel (Moers, 2019).

Een andere geschikte productvorm is een kunststof dakpan van Promolding⁴⁸. Deze is voor buiten bedoeld en het oppervlakte is geheel vlak. Voor dit product met afmetingen circa 170 x 300 mm zijn eerst zonnecellen uitgewerkt die toegepast kunnen worden. Hierbij is gekozen voor MiaSole cellen omdat deze eenvoudiger te configureren zijn in specifieke afmetingen.



Figuur 38; Foto van 4 prototypes van ECOBINDERS dakpan van Promolding. Op het onderste gedeelte kunnen zonnecellen worden gepositioneerd, dit is het gedeelte dat daadwerkelijk belicht zal worden. Rechts een schets van in het blauw de 3 cellen boven elkaar, 2 submodules naast elkaar.

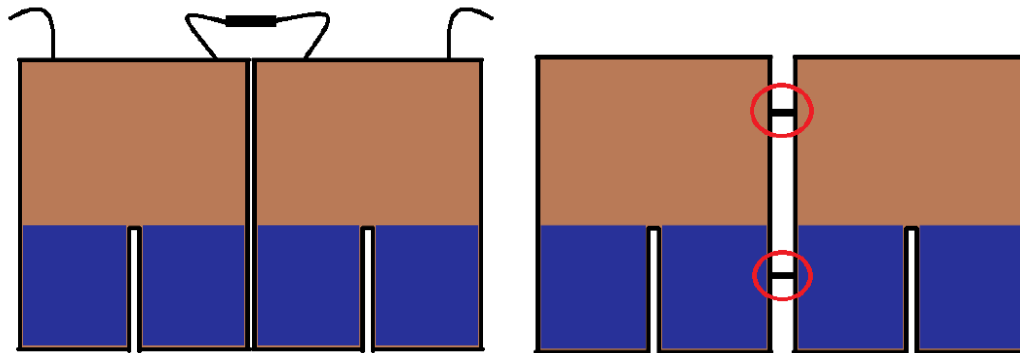
Naast de integratie van de cel in het materiaal zal ook de interconnectie tussen de cellen en de connectie tussen de dakpannen gerealiseerd moeten worden. Voor de interconnectie tussen de cellen zou ideaal een folie meegespoten worden waarin geleidende sporen verwerkt zijn. Partner HTLE uit Heerenveen heeft hier ervaring mee. Al is dit wel met wat lagere stroom en spanning. Dikkere tabs of geïsoleerde draad zou dan ook kunnen, al is dit in het spuitgietproces wel complexer te realiseren.



Figuur 39; Ontwerp van een submodule, bestaande uit 3 MiaSole cellen en de interconnectie van de submodule in de dakpan (Moers, 2019)

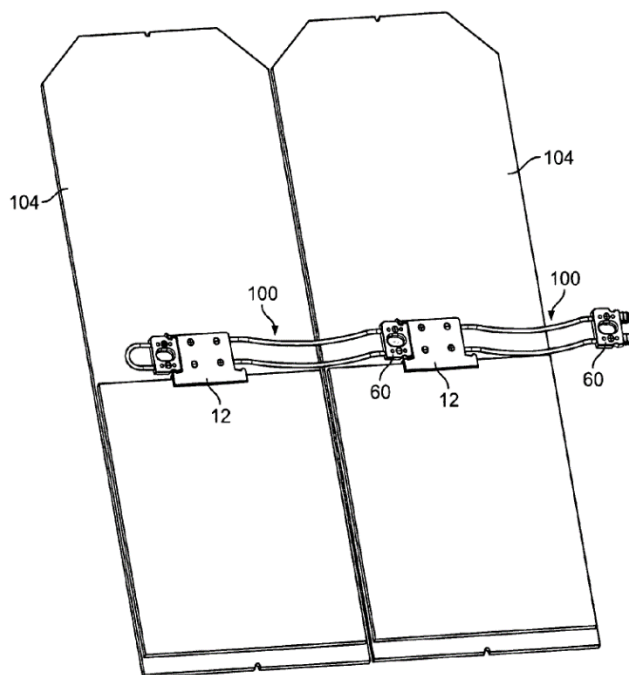
⁴⁷ HIERBIJ IS GEBRUIK GEMAAKT VAN DE MIASOLE ZONNECEL OM JUISTE SPANNING TE VERKRIJGEN.

⁴⁸ PRODUCT UIT EEN EU ONDERZOEK ECOBINDERS. [HTTPS://WWW.PROMOLDING.NL/ECOBINDERS/](https://www.promolding.nl/ecobinders/)



Figuur 40; 2 uitgewerkte ontwerpen van interconnectie. Links middels een klassieke manier met stekkers, rechts met een geïntegreerde stekker.

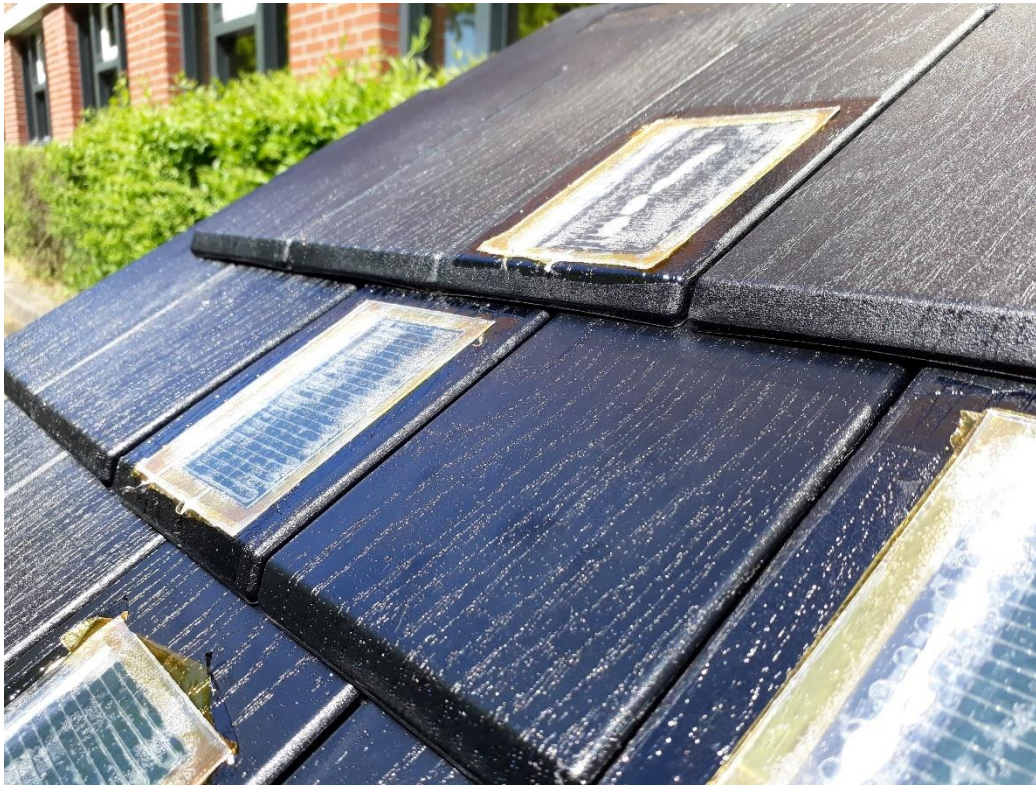
De interconnectie tussen de dakpannen zou in geval van realisatie nog goed ontworpen moeten worden. De klassieke wijze met stekkers zoals bij gewone panelen is mogelijk, echter zoveel stekkers zoveel kansen op fout. Derhalve is onderzocht in hoeverre een ontwerp met geïntegreerde stekkers zou kunnen. Dit op basis van het ANDALAY principe⁴⁹ of zoals Daily in zijn patent beschrijft (Daily, 2008). Dit zou de montage van het geheel sterk vereenvoudigen en de kans op fouten reduceren.



Figuur 41; Figuur 5 uit het patent van Daily met een slim stekker systeem voor PV dakpannen (Daily, 2008)

Diverse samples zijn er geproduceerd met de mal van Promolding bij de machine van HSV-TMP. De mal is niet aangepast zodat de zonnecel met Kapton tape is gefixeerd in de mal (gele randen op foto). De resultaten zijn veelbelovend. Zoals in het testrapport te lezen (Moers, 2019) functioneren de cellen nog, ook na temperaturen van bijna 300°C. De cellen liggen strak in het vlak en de hechting is goed. Er zijn geen dolly testen uitgevoerd, echter zitten de cellen zeer goed vast op basis van handtesten. De interconnectie is in deze samples eenvoudig uitgevoerd met tabs die onder uit de cellen lopen.

⁴⁹ [HTTPS://INSTANTCONNECTSOLARPANELS.WORDPRESS.COM/TAG/SOLAR-POWER-SYSTEMS/](https://instantconnectsolarpanels.wordpress.com/tag/solar-power-systems/)



Figuur 42; Close up van een mock-up met meerdere kunststof dakpannen met een MiaSole zonnecel erin verwerkt. Het gele randje is Kapton tape die gebruikt is voor de fixatie van de cel in de mal. (Foto; Driesser, juni 2019, 's-Hertogenbosch)

Met deze samples wordt ook voldaan aan de wens van de consument om fraaie, dakgeïntegreerde modules te produceren. Met het gebruik van deze CIGS cellen is de efficiëntie wat lager dan gewone kristallijne modulen van 1600x1000mm en de prijs per Wp waarschijnlijk hoger. Echter, de bereidheid van de consument om hier meer voor te betalen is er. Vooral de esthetica is voor steeds meer consumenten doorslaggevend (Breukel, Van Dijk, & Spee, 2017) & (De Vries, 2018).



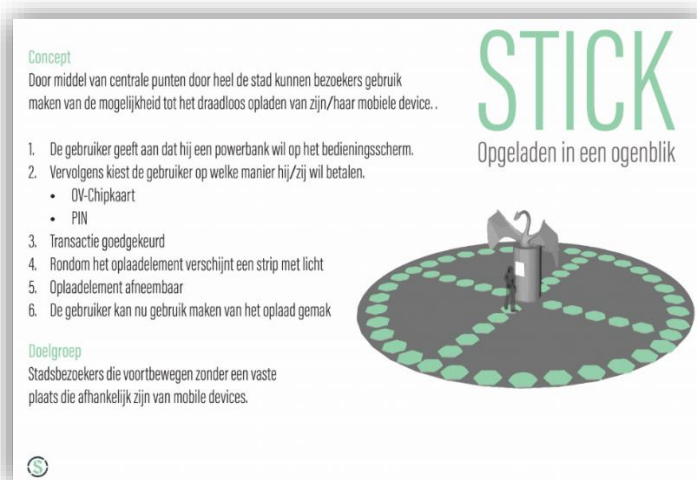
Figuur 43; Meerdere PV-dakpannen in gelijk vlak (Foto; Driesser, juni 2019, 's-Hertogenbosch)

Markt applicaties

Binnen het project was het een nadrukkelijke streven om de werkwijze van integratie te onderzoeken en niet te kijken naar daadwerkelijke producten. Dit is aan de partners om deze kennis om te zetten in producten. Of dit gaat middels een verticale keten en de partners als OMM leverancier optreedt of in een horizontale keten is bedrijf-specifiek (Van Steenis, 2018). Toch is er naar het einde van de projectfase gekeken naar enkele applicaties en hoe de technologie hierin verwerkt zou kunnen worden. De ECOBINDERS dakpan is reeds genoemd maar er zijn meer producten bedacht door diverse studenten en uitgewerkt tot niet-functionerende prototypes. Deze producten zijn niet echt gemaakt, maar wel steeds met de opgedane kennis ten aanzien van de productiemogelijkheden in het achterhoofd.

Voor de automotive sector is in overleg met Roelof De Haan van Raivereniging CarrosserieNL gekeken naar integratie van flexibele zonnecellen in trailers en carrosserieën. Voor een kleine koelwagen kan een zonnecel wel iets bijdragen, maar niet *stand-alone* opereren. Ook voor grotere trailers is het actief koelen middels zonne-energie een stap te ver, echter als de temperatuur al laag is kan zonne-energie wel bijdragen om de temperatuur redelijk constant te houden indien de koelruimte afgesloten blijft (Van Beek, 2019). Ook is onderzocht in samenwerking met IM-efficiency hoe geïntegreerde zonnecellen op de trailer bij kunnen dragen in het dieselverbruik van de combinatie.

Gedurende de looptijd van het project hebben studenten van de opleiding CMD diverse producten gemaakt die met zonne-energie kunnen functioneren. Het verst uitontwikkeld is het concept van *powerbanks* die in de openbare ruimte beschikbaar zijn voor bezoekers van de stad. De powerbanks hangen aan een kleefmuur die op het zuiden gericht is en zo met de ingebouwde zonnecel opladen voor vervolg gebruik (Van de Wiel, (2018).



Figuur 44; Projectvoorstel voor oplaadbare Powerbanks in de vorm van schubben, voortgekomen uit het symbool voor 's-Hertogenbosch, de draak.

Vanuit de opleiding Business Innovation hebben 2 studenten een onderzoek uitgevoerd voor Alligator over hoe een dergelijk nieuwe innovatie kan worden vermarkt (Van de Ven, & Koolen, 2018). Binnen organisaties zijn er altijd wel ontwikkeltrajecten maar deze reiken lang niet altijd tot aan de daadwerkelijke commerciële fase van bedrijven. Ondanks dat een product goed is kan de klantvraag niet geheel goed zijn geïnterpreteerd. Of dat de klant niet eens vraagt om producten met zonnecellen omdat de klant niet afweet van de mogelijkheden. Zo is er door de studenten besproken hoe nieuwe technieken beter bekend kunnen raken bij (potentiele) klanten zodanig dat er wél vraag ontstaat. Hierin zijn onder meer *gatekeepers* benoemd als onmisbare schakels binnen de organisatie. Dit onderzoek heeft zich met name gericht over de informatieoverdracht en in mindere mate op het initiëren van daadwerkelijke producten voor Alligator.

Poster PV conferentie PV-SEC

September 2018, Brussel. Poster horende bij paper (Spee, Kristensen, De Moor, Geldof, Driesser, 2018)

Integration of flexible solar cells in plastic and composite materials

Avans University of Applied Science

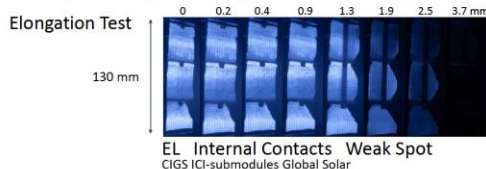
S.W. Kristensen, H.H.C. de Moor, M.H.B. Driesser, E. Geldof and C.I.M.A. Spee

e-mail: hmc.demoor@avans.nl

Aim To explore the potential of direct integration of solar foils with the end-product.
Process-simplification as well as better aesthetics can enhance the application of solar in autonomous products
Three techniques are evaluated: Injection Moulding, Vacuum Forming and Vacuum Bagging of Composites

Mechanical stress

Injection moulding and Vacuum forming: High Temperatures
Heating or Cooling down: expansion or shrinkage



Deformation around
the connection area.



Internal delamination

Vacuum Forming

Shrinkage of Plastic (PETG and ABS) causes Stress
⇒ Deformation of Solar Foil
Partial Detachment

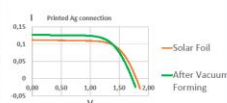
Solution: Flexible Interlayer of PO-PU



When the PETG is shaped
the Solar Foil is able to move.
When cooling down it is
immediately fixed.

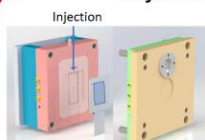


No Interlayer PO-PU
⇒ PO-PU less stress



Electrical properties OK
after Vacuum Forming
and bending

Injection Moulding

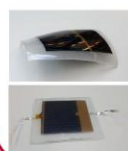


Injection parallel to the solar foil
to minimize damage and obtain
a uniform product



Polycarbonate Flat

Adhesion of plastics to
solar foil (PET) is poor.
Only PP (polypropylene)
and PC (polycarbonate)
have potential.
Efficiency is maintained



PP on substrate side
⇒ bending

PP double sided
⇒ flat

Composite Materials

Vacuum Bagging and Infusion are suitable for
Solar Foils integrated Products

Fibers: glass (transparent), carbon and aramid

Resins: epoxy, polyester and vinyl ester



Vacuum Infusion
Back Glass Fiber + Polyester
Solar Foil
Front Glass fleece + polyester



Vacuum Bagging
Back Glass Fiber + Epoxy
Solar Foil
Front Epoxy

Conclusion Products from cm^2 to m^2 can be made with integrated solar foils.

Injection Moulding, Vacuum Forming can be used while maintaining good electrical properties of the Solar Foils

Composite based products can be made using Vacuum Bagging or Infusion

Acknowledgements

A RAAK-mkb project
financed by SiA



Partners in SEPAC



Afronding

Dus als er een PIPV ontwikkeld wordt, let dan op deze elementen;

- Een composiet elementen maken met flexibele zonnecellen kan prima, als de zonnecel maar niet in de constructieve lagen gepositioneerd wordt in verband met de non-permeabele laag die het creëert. Het composiet is geen vochtdichte bescherming voor de cellen, dus hier dient passende encapsulatie⁵⁰ voor te worden gebruikt. De zonnecel moet verbindingstrippen krijgen welke uit het composiet dienen te steken. Hier zal product afhankelijk een waterdichte aansluitdoos voor moeten worden geselecteerd of ontworpen.
- Thermovormen met zonnecellen is mogelijk waarbij de cellen al op of onder de vlakke plaat liggen voor vervorming. Echter dienen de cellen niet te groot te zijn en op plaatsen te liggen waar de verstrekking zeer beperkt is. Door het verschil in rek ontstaat er onwenselijke vervorming van de basisvorm tijdens het afkoelen. De gebruikte lijmlaag (PO) reduceert de stress, maar niet onbeperkt. Door de dikte van de PO laag te variëren kan de stress worden beïnvloed. Het gebruik van geleidende sporen welke gedeponereerd zijn op folies lijkt werkbaar, maar niet voor hoge vermogens.
- Zonnecellen in het spuitgietproces is werkbaar als de opbouw van de cel aangepast is aan het basismateriaal van het te vormen product. De cel 'overleeft' de hoge druk en temperatuur. De encapsulant dient de langere levensduur te garanderen. Testen zijn voornamelijk gedaan met kleinere samples en producten, hoe groot de cellen kunnen zijn moet uitgezocht worden. Nader onderzoek moet nog gedaan worden op het gebied van connectie, in welke mate kan ook deze functie meegenomen worden in het spuitgietproces? Er is kennis op dit vlak bij enkele partners die bekend zijn met de MID⁵¹ techniek.
- Ontwerp de zonnecel zodanig dat deze genoeg energie kan leveren (stroom of spanning, dus parallel of in serie geschakeld) en benut de -beperkte- vormvrijheid⁵² en vooral de flexibiliteit in het ontwerp.
- Door het inzetten van slimme elektronica kan het product een hogere energieopbrengst behalen. Deze elektronica dient wel dermate compact te worden dat het goed kan worden geïntegreerd in het totaal product.

Veel inspiratie toegewenst om tot duurzame toepassingen te komen middels deze techniek.

Deze publicatie is mede tot stand gekomen met de financiering vanuit SIA.

Voor nadere informatie kunt u contact opnemen met AVANS of rechtstreeks de desbetreffende partner.

Marten Driesser

Mhb.driesser@avans.nl



⁵⁰ DE GENOEMDE PET FOLIE ALS BARRIÈRE LAAG IS GESCHIKT.

⁵¹ MOLDED INTERCONNECT DEVICE

⁵² CELLEN ZIJN MET HUIDIGE STAND DER TECHNIEK NOG WEL STEEDS RECHTHOEGIG. RONDE VORMEN EN NOG EXTREMER ZIJN MOMENTEEL NOG NIET VOORHANDEN.

Partner informatie

Het project is uitgevoerd met hulp van onderstaande bedrijven en instellingen. Per bedrijf/ instelling is de contactpersoon gegeven alsook de URL.

ACRATS, Edwin Smarius, Hoogerheide, <https://acrats.nl/>

Alligator Plastics, Wietse Wissema, Eindhoven, <https://alligator-plastics.nl/>

AVANS Hogeschool, Martèn Driesser, 's-Hertogenbosch,
<https://www.avans.nl/onderzoek/expertisecentra/technische-innovatie/lectoraten/solar-productietechnologie-en-equipmentontwikkeling>

Delft Infra Composites, Paul Honing, Breukelen, <https://www.infracomposites.com/nl/>

HSV TMP, Wilfred Cornelissen, Ede, <https://www.hsv-tmp.nl/>

HTLE, Frans-Theo Niemeijer, Heereveen, <https://www.htle.nl/>

NHL, Johannes van der Steen, Leeuwarden, <https://www.nhlstenden.com/>

NRK-PVT, Martin van Dort, Den Haag, <https://www.pvt.nl/>

Plastica Thermoforming, Timo Osse, Bergen op Zoom, <https://plastica-thermoforming.eu/>

Polyplastic, Rick van Horssen, Rotterdam, <http://polyplastic.nl/>

Posterama Frans-Theo Niemeijer, Heereveen, <https://www.posterama.nl/>

Promolding, Jac Gofers, Den Haag, <https://www.promolding.nl/>

Quality ServicesBV, Jan Breen, Bennekom, <https://www.qsbv.com/>

RAI CarrosserieNL, Roelof de Haan, Amsterdam, <https://raivereniging.nl/carrosserienl>

Solliance, Peter Toonsen, Eindhoven, <https://www.solliance.eu/>

Ubbink, Jasper Klomps, Doesburg, <https://www.ubbink.nl/>

Bibliografie

- Apri, C. (2017). *Onderzoeksrapport; Integreren van dunne-film zonnecellen in het spuitgietsproces*. AVANS Hogeschool.
- Breukel, A., Van Dijk, C., & Spee, K. (2017). *The Relative Importance of Aesthetics in the Adoption Process of Solar Panels in the Netherlands*. AVANS Hogeschool.
- Broeren, S. (2017). *Integratie van dunne-film zonnecellen en elektronische componenten in composiet*. AVANS Hogeschool.
- De Vries, D. (2018). *Zonnecellen in dakbedekking*. AVANS Hogeschool.
- Deepak, K. G., Langelaar, M., Barink, M., Van Keulen, F. (2015). *Optimizing front metallization patterns: Efficiency with aesthetics in free-form solar cells*. Technische Universiteit Delft.
- Driesser, M. (2018). *Naadloze verwerking van flexibele zonnecellen in producten*, lezing ESEF beurs Utrecht, febr 2018. AVANS Hogeschool.
- Golroodbari, S., De Waal, A.C., Van Sark, W. (2019). *Proof of concept for a novel and smart shade resilient photovoltaic module*. Copernicus Institute, Utrecht University.
- Gostein, M., & Dunn, L. (2011). *Light soaking effects on photovoltaic modules: Overview and literature review*. Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference. 003126-003131. 10.1109/PVSC.2011.6186605.
- Habraken, R. (2015). *Zonnepanelen; connectoren en bedrading*. TNO Solliance.
- Houtman, G. (2018). *Elektromechanische test van ICI CIGS zonnefolie m.b.v. Electroluminescentie*. AVANS Hogeschool.
- Kranendonk, N. (2017). *Integratie van zonnepanelen in composiet*. AVANS Hogeschool.
- Kreulen, D., Vrolijk, M., De Ron, Y., Van Agtmaal, P. (2017) *Impacttest hagelstenen*. AVANS Hogeschool.
- Kristensen, S. (2018). *Tussenrapportage SEPAC, werkpakket spuitgiets*. AVANS Hogeschool.
- Kristensen, S., & De Moor, H. (2018). *ICI-folies vormvrijheid*. AVANS Hogeschool.
- Leestemaker, F. (2018). *Verkennd nationaal marktonderzoek SEPAC in maritieme sector*. AVANS Hogeschool.
- Mandemaker, M. (2018). *Modelvorming Materiaalspanning en Vervorming door Krimp na Thermovormen*. Avans Hogeschool.
- Moers, D. (2018). *De integratie van flexibele zonnecellen in spuitgietsproducten*. AVANS Hogeschool.
- Moers, D., Van der Kooij, A. (2018). *Verwerking MiaSole Zonnecellen*. AVANS Hogeschool.
- Moers, D. (2019). *De integratie van zonnecellen in spuitgegoten kunststof dakpannen*. AVANS Hogeschool.
- Nijssen, R. P. L. (2015). *Composieten Basiskennis*. Nederland
- Schot, A., Sneep, C., Brok, K., Kolkman, M. (2017). *Onderzoek naar het herstel van CIGS-zonnecellen na blootstelling aan een thermische belasting*. AVANS Hogeschool.
- Shafqat, S., et al (2017). *Ultra-Stretchable Interconnects for High-Density Stretchable Electronics*. TU/e, Eindhoven.
- Spee, K., Kristensen, S., De Moor, H., Geldof, E., Driesser, M. (2018). *PAPER Integration of flexible solar cells in plastic and composite materials_PVSEC 1CV.4.56 Avans NL 26092018*
- Storey, J., Wilson, P., Bagnall, D.M. (2014). *The Optimized-String Dynamic Photovoltaic Array*. *Power Electronics*, IEEE Transactions on. 29. 1768-1776. 10.1109/TPEL.2013.2265497.
- Sweeney, J., et al (2012). *A material model for multiaxial stretching and stress relaxation*. University of Bradford, UK.
- Teeuwen, J. (2018). *Onderzoek naar de hechting van dunne-film zonnecellen aan plastics tijdens het spuitgietsproces*. AVANS Hogeschool.
- Van Beek, B. (2019). *Zonnecellen in vrachtwagens*. AVANS Hogeschool.
- Van de Ven, L., & Koolen, M. (2018). *SEPAC, de flexibele zonnecel*. AVANS Hogeschool.
- Van de Ween, J., Van Heist, T., Van der Ven, T., Van den Oever, R., Soetekouw, D., Pennings, J., Dominicus, J. (2018) *Overdrachtsdocument Dynamische Solar Array*. AVANS Hogeschool.
- Van de Wiel, N. et al. (2018). *Scale, Take Charge and Recharge*. AVANS Hogeschool.
- Van der Lugt, D. (2018). *Zonnecellen in composiet*. AVANS Hogeschool.
- Van der Steen, J. (2018). *Dunne film zonnepanelen in composiet*. NHLStenden hogeschool.
- Van Grinsven, J. (2017). *THERMOVORMEN IN COMBINATIE MET DUNNE-FILM ZONNECELLEN, THE FLEXIBILITY OF SOLAR-POWER*. AVANS Hogeschool.
- Van Heist, T. (2018). *Flexibele zonnecellen in een dynamische matrix*. AVANS Hogeschool.
- Van Loenhout, J., et al. (2017). *Onderzoek naar treksterkte van verwarmde zonnecellen*. AVANS Hogeschool.
- Van Rooij, M. (2017). *Integration of flexible solar cells into polymer products using injection molding*. AVANS Hogeschool.
- Van Steenis, T., et al. (2018). *Voortzetting SEPAC-project verticale en horizontale keten*. AVANS Hogeschool.
- Vogels, T., De Bruijn, B., Rijs, B., Peek, L. (2017) *Herstel van zonnecellen na thermische belasting*. AVANS Hogeschool.
- Wennerberg, J. (2002). *Design and Stability of CIGS-Based Solar Cell Modules*. Uppsala: Faculty of Science and Technology of Uppsala.
- Wijnhof, J. (2018). *Thermovormen met flexibele zonnecellen*. AVANS Hogeschool.

Einde rapportage