2016•2017

Masterproef

Testopstelling als validatie voor een thermomechanisch stressmodel van PV-modules

Promotor : Prof. dr. ir. Michael DAENEN

Gezamenlijke opleiding Universiteit Hasselt en KU Leuven



Senne Jans , Joeri Smeets Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

FACULTEIT INDUSTRIËLE INGENIEURSWETENSCHAPPEN master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Copromotor : De heer Philippe NIVELLE



2016•2017 Faculteit Industriële ingenieurswetenschappen master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Masterproef

Testopstelling als validatie voor een thermomechanisch stressmodel van PV-modules

Promotor : Prof. dr. ir. Michael DAENEN Copromotor : De heer Philippe NIVELLE

Senne Jans , Joeri Smeets

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektromechanica





Woord vooraf

In het laatste jaar van onze opleiding master industriële wetenschappen elektromechanica hebben wij de kans gekregen om onze masterproef uit te voeren bij het onderzoeksinstituut imo-imomec van de Universiteit Hasselt. Het uitvoeren van deze masterproef was een zeer leerrijke en interessante ervaring. Graag willen wij daarom enkele personen bedanken voor hun steun en bijdrage aan deze masterproef.

Allereerst willen wij in het bijzondere onze promotor Prof. dr. ir. Michaël Daenen en copromotor ing. Philippe Nivelle bedanken voor hun uitstekende begeleiding en kritische reflecties. Tijdens het verloop van deze masterproef konden wij altijd rekenen op hun ondersteuning.

Daarnaast willen wij het bedrijf ArcellorMittal bedanken voor het sponseren van sandwichpanelen en de heer Rigali Luca van het bedrijf Festo voor zijn ondersteuning bij het uitwerken van het pneumatisch systeem. Ook willen wij de medewerkers van imo-imomec bedanken, met name de heer Lieven De Winter voor het uitwerken van een versterker voor een krachtsensor en de heer Jan Mertens voor zijn technische ondersteuning bij het gebruik van het programma LabView en het kalibreren van de krachtsensor.

Tot slot willen wij onze ouders bedanken voor de steun en mogelijkheden die ze ons hebben gegeven tijdens de afgelopen jaren van onze opleiding.

Smeets Joeri & Jans Senne Januari 2017

Inhoudsopgave

WOOR	VOORAF		1
TABELL	ENLIJST		5
FIGURE	NLIJST		7
ABSTRA	СТ		9
ABSTRA	CT IN ENGLISH		11
			12
HUUFD	STOK I: INLE		13
1.1	SITUERING		
1.2	PROBLEEMSTELLING		
1.3	DOELSTELLING		
1.4		HODE	
1.5	OPBOUW VAN DE SC	RIPTIE	15
HOOFD	STUK 2: LITEF	RATUURSTUDIE	17
2.1	MECHANISCH BELAS	TEN VAN PV-MODULES	17
2.2	TESTEN VOLGENS DE	NORMEN	19
2.3	SCHEUREN VAN PV-	MODULES	20
2.4	INVLOED VAN VARIË	RENDE TEMPERATUREN OP EEN PV-MODULE	23
2.5	VERSCHIL TUSSEN M	IONO- EN MULTI-KRISTALLIJNE PV-MODULES ONDER MECHANISCHE BELASTING	25
2.6	INVLOED VAN META	LLISATIEPROCESSEN OP PV-MODULES	27
2.7	INVLOED VAN INTER	CONNECTIETECHNIEKEN OP DE MECHANISCHE STERKTE	29
2.8	VERMOGEN VAN EEI	N PV-MODULE EN DE IMPACT VAN SCHEUREN HIEROP	31
HOOFD	STUK 3: VERG	GELIJKENDE STUDIE	35
3.1	MECHANISCHE STRE	SSTESTOPSTELLINGEN IN DE LITERATUUR	35
3.	1.1 Gelijk verd	eelde statische belasting	36
3.	1.2 Ongelijk ve	rdeelde statische belasting	36
3.	1.3 Gelijk verd	eelde dynamische belasting	37
3.2	BRAINSTORMSESSIE		38
3.3	MINIMALE EISEN UIT	THET VOORONDERZOEK	39
3.4	MARKTONDERZOEK		41
3.	4.1 PSE AG me	chanische stresstester	41
3.	4.2 Sensoren		43
3.	4.3 Cilinders		48
3.	4.4 Constructie	e elementen	53
3.	4.5 Vergelijkin	g tussen verschillende groottes van PV-modules	57
3.5	BESLUIT UIT HET VO	ORONDERZOEK	64
HOOFD	STUK 4: ONT	WERPEN	67
4.1	Ркототуре		67
4.2	MECHANISCHE STRE	SSTESTOPSTELLING	
4.	2.1 Eerste ontv	verp	70
4.	2.2 Tussenonty	werpen tot resultaat	71
4.3	Kostenberekening	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	

4.4	Sturin	GEN	77
4.4	4.1 l	Pneumatische gedeelte	77
4.4	4.2 l	Elektronisch gedeelte	79
4.4	4.3 I	Interface	82
HOOFDS	STUK 5:	: RESULTATEN	83
5.1	BUIGTE	STEN PROTOTYPE	83
5.2	Месна	ANISCHE STRESSTESTEN OP DE STRESSTESTOPSTELLING	85
5.2	2.1 I	Mechanische stresstest op een 2 x 2 module	85
5.2	2.2	Vergelijking tussen verschillende aanstuurtypes	86
5.2	2.3 I	Kalibratietest krachtsensor	87
HOOFDS	STUK 6:	: BESLUIT	89
BIBLIOG	GRAFIE.		91
BIJLAGEN			95

Tabellenlijst

Tabel 1: Invloed van etsen op de mechanische sterkte [25]	. 27
Tabel 2: Mechanische sterkte van verschillende kristalliniteit types [25]	. 27
Tabel 3: Invloed van verschillende Al pasta's [27]	. 28
Tabel 4: Vergelijking van interconnectietechnieken [30]	. 30
Tabel 5: Overzicht verplaatsingssensoren	. 46
Tabel 6: Overzicht krachtomvormers met eigenschappen [39]	. 47
Tabel 7: Overzicht krachtsensors	. 48
Tabel 8: Prijsvergelijking tussen de verschillende opstellingen	. 52
Tabel 9: Prijsvergelijking tussen verschillende zuignappen	. 53
Tabel 10: Afmetingen profielen voor kosten-batenanalyse van constructie elementen	. 53
Tabel 11: Onderdelen aluminiumconstructie met hun prijzen	. 54
Tabel 12: Onderdelen staalconstructie met hun prijzen	. 55
Tabel 13: Onderdelen RVS-constructie met hun prijzen	. 56
Tabel 14: Minimale kosten voor eigen ontwerp voor full-size PV-modules	. 59
Tabel 15: Minimale kosten voor mini-modules	.61
Tabel 16: Minimale kosten voor PV-modules bestaande uit één cel	. 63
Tabel 17: Samenvatting vergelijking modules	. 64
Tabel 18: Kosten sensoren	. 75
Tabel 19: Kosten constructieonderdelen	. 75
Tabel 20: Kosten pneumatische installatie	. 76
Tabel 21: Kosten sturing en elektronische componenten	. 76
Tabel 22: Totale kosten van de finale opstelling	. 77
Tabel 23: Pinaansluitingen proportioneel drukregelventiel VPPX	. 79

Figurenlijst

Figuur 1: Belastingen on PV-modules [1]	17
Figure 2: Schoma van oon vrijstaande DV module in oon luchtstroom (zwart) met nesitiev	· 1 /
(orania) on nogatiovo drukgobiod (blauw) on resultorendo boweging (rood) [6]	= 10
Figure 2: Componenten on con BV module [7]	10
Figuur 3: Componenten op een PV-module [7]	01 . 20
Figuur 4. EL-meting van een FV-module na een methamstne stresstest [10]	. 20
Figuur 5: verschliende vormen van scheuren en nun verdeling over een volledig	21
zonnepaneer [9]	. 21
Figuur 6: Invided van scheuren op een PV-module [9]	. 21
Figuur 7: Richting van de hoofdrek [9]	. 22
Figuur 8: Invioed Inkapselingsmiddel [13]	. 23
Figuur 9: Statisch en dynamische test op PV-modules met verschillend inkapselingsmiddel	DIJ
verschniende temperaturen [13]	. 24
Figuur 10: Multi-kristallijne en mono-kristallijne zonnecellen [22]	. 25
Figuur 11: Breekpunt afnankelijk van type PV-cei en belastingsrichting [23]	. 26
Figuur 12: Visuele weergave van kristalliniteit types [25]	. 27
Figuur 13: Links: Gebroken interconnectie [4]. Rechts: EL-meting voor detectie gebroken	20
Interconnecties [3]	. 29
Figuur 14: Maximale breekkracht van verschillende interconnectietechnieken voor	
zonnecellen met dikte 150 of 200 μm [29]	. 30
Figuur 15: I-V curve en ideale zonnecel [15]	.31
Figuur 16: Fill factor van een PV-module [15]	.31
Figuur 17: Equivalent schema van een zonnecel [15]	. 32
Figuur 18: Effect van parasitaire weerstanden [31]	. 32
Figuur 19: EL-meting voor en na verouderingstest [18]	. 33
Figuur 20: Vermogensverlies voor en na verouderingstest [32]	. 34
Figuur 21: Invloed van rek op de I-V curve [33]	. 34
Figuur 22: Gelijk verdeelde statische belasting [34]	. 36
Figuur 23: Ongelijk verdeelde statische belasting, Sneeuwbelasting [34]	. 36
Figuur 24: Gelijk verdeelde golvende dynamische belasting, belasting aangebracht via een	l
pneumatisch membraam [8]	. 37
Figuur 25: Testopstelling met luchtdruk	. 37
Figuur 26: Gelijk verdeelde wisselende dynamische belasting, via pneumatische cilinders ϵ	en
zuignappen, zowel op druk als trek belast [9]	. 38
Figuur 27: MLT12 [35]	. 41
Figuur 28: MLT24 [35]	. 42
Figuur 29: MLTSYS [35]	. 42
Figuur 30: Werkingsprincipe van een ultrasoon sensor [36]	. 43
Figuur 31: Laser triangulatie werkingsprincipe [37]	. 44
Figuur 32: Werkingsprincipe fiber bragg gratings [38]	. 45

Figuur 33: Werkingsprincipe fiber bragg gratings, rekstrookje [38]	45
Figuur 34: Basisopstelling van vier rekstrookjes in een krachtsensor [39]	47
Figuur 35: Dubbelwerkende cilinder bediend door elektrisch ventiel	49
Figuur 36: Opstelling EPCO cilinder [40]	50
Figuur 37: Minimale kracht per grootte module	57
Figuur 38: Volledige PV-module [42]	58
Figuur 39: Mini-module	60
Figuur 40: PV-module van één cel	62
Figuur 41: Links: prototype; rechts: spanklem	67
Figuur 42: Digitale meetklok met houder	68
Figuur 43: Meetproces glasplaat	68
Figuur 44: Het ontwerp voor de kosten-batenanalyse	70
Figuur 45: Klimaatkast	71
Figuur 46: Verder uitgewerkt ontwerp van de horizontale opstelling	72
Figuur 47: Horizontaalontwerp in detail	72
Figuur 48: Horizontaal ontwerp verder uitgewerkt met verbindingsstukken en	
isolatiemateriaal	73
Figuur 49: Finaal ontwerp	73
Figuur 50: Subassemblage belastingsas; licentie KeyShot van promotor	74
Figuur 51: Pneumatische installatie met bijhorend schema	78
Figuur 52: Pinaansluitingen proportioneel drukregelventiel VPPX	79
Figuur 53: Elektrisch schema magneetventiel voor één contact	80
Figuur 54: Elektrisch schema positiesensor	80
Figuur 55: Elektrisch schema setpoint instellen	81
Figuur 56: Blokschema LabView MakerHub LINX	
Figuur 57: Meting met het prototype	
Figuur 58: Meetresultaten prototype	
Figuur 59: Links: Doorbuiging 3 x 3 module; Rechts: Doorbuiging glasplaat	
Figuur 60: Meetresultaten statische drukbelasting op een 2 x 2 module	84 85
Figuur 60: Meetresultaten statische drukbelasting op een 2 x 2 module Figuur 61: Vergelijking tussen verschillende aanstuurtypes, grafiek kracht-doorbuig	
Figuur 60: Meetresultaten statische drukbelasting op een 2 x 2 module Figuur 61: Vergelijking tussen verschillende aanstuurtypes, grafiek kracht-doorbuig Figuur 62: Vergelijking tussen verschillende aanstuurtypes, grafiek kracht-druk	84 85 ging86 87

Abstract

De onderzoeksgroep Energy Systems Engineering van het onderzoeksinstituut imo-imomec te Diepenbeek doet onderzoek naar de betrouwbaarheid van fotovoltaïsche (PV)-systemen. De groep wenst versnelde mechanische stresstesten uit te voeren op PV-modules om simulatiemodellen te valideren. Hierdoor kwam de vraag om onderzoek te verrichten naar het mechanisch stresstesten van PV-modules en hieruit een geschikte oplossing voor uit te werken.

Allereerst werd een marktonderzoek uitgevoerd om de mogelijkheden en nadelen van bestaande testopstellingen te vergelijken. Ook werden verschillende manieren bestudeerd waarop mechanische stress geïnduceerd kan worden in een stresstest. Bovendien werd aan de hand van een vast budget, beschikbare apparatuur en informatie uit de literatuur onderzocht welke grootte van modules het meest interessant was om te testen. Aan de hand van deze analyses is de beslissing genomen om een eigen testopstelling te ontwerpen voor zogenaamde "mini-modules".

Met behulp van een prototype konden statische belastingstesten uitgevoerd worden op een module van 3x3 cellen waaruit de nodige kracht en de maximale doorbuiging van de module bepaald is. De finale opstelling is in staat om statische en dynamische belastingen over te brengen met behulp van pneumatische cilinders en kan ook gekoppeld worden aan een klimaatkast. De eerste resultaten tonen een verschil aan in doorbuiging tussen trek- en drukbelasting als gevolg van een verandering in contactoppervlak.

Abstract in English

The research team Energy Systems Engineering of the research centre imo-imomec at Diepenbeek researches the reliability of photovoltaic (PV)-systems. The team wants to perform accelerated mechanical stress tests on PV-modules to validate simulation models using these tests. From which the question emerged to investigate mechanical stress tests on PV-modules and to work towards a suited solution.

First a market research was conducted to compare the possibilities and downsides of existing test setups. In addition, the different ways of inducing mechanical stress in the form of a stress test have been studied. Based on a fixed budget, available equipment and information from literature the most interesting size of modules to perform tests on was determined. As a result from these analyses the decision was made to design a test setup for small modules or so-called "mini-modules" ourselves.

Using a prototype setup static load tests were performed on a PV-module of 3x3 cells, of which the needed force and maximum deflection of the PV-module was determined. The final design is able to perform both static and dynamic loads by the use of pneumatic cylinders moreover the setup can also be attached to a climate chamber. The first results show a different in deflection between a tensile and compressive load as a result of a change in contact surface area.

Hoofdstuk 1: Inleiding

1.1 <u>Situering</u>

Deze masterproef vindt plaats in het Instituut voor Materiaalonderzoek (imo-imomec) van de Universiteit Hasselt. Met een team van meer dan 100 mensen is imo-imomec het grootste onderzoeksinstituut van de universiteit [1].

De onderzoeken rond PV-modules (*fotovoltaïsche modules*) worden op imo-imomec uitgevoerd door de onderzoeksgroep *Energy Systems Engineering (ESE)*. Deze onderzoeksgroep is gekoppeld aan de faculteit industriële ingenieurs wetenschappen op het gebied van elektronica en elektromechanica en ontwikkelt verschillende onderzoeksdoelen van 'lab schaal' tot 'industrie klare' toepassingen[2].

De primaire interesse van ESE [2] ligt in de betrouwbaarheid van alle componenten van PV-systemen. Verschillende technieken worden gebruikt om de levensduur en efficiëntie te onderzoeken van deze samengestelde delen, zoals versnelde levensduur testen en *multi-physics* simulaties van componenten en volledige installaties.

1.2 Probleemstelling

Vanaf de productie worden PV-modules al blootgesteld aan verschillende vormen van mechanische belasting. Zo kunnen er al micro-scheurtjes ontstaan in zonnecellen tijdens het soldeerproces van de interconnecties. Na de productie vergroten deze micro-scheurtjes als gevolg van trillingen en schokken tijdens transport en montage. Eens de PV-modules geïnstalleerd zijn worden ze vervolgens dagelijks belast door statische en dynamische krachten veroorzaakt door wind, sneeuw en thermische uitzetting [3].

Deze mechanische belastingen kunnen uiteindelijk leiden tot breuken in zonnecellen en resulteren in een verlies van vermogen en levensduur van de PV-module. Daarom wenst de onderzoeksgroep ESE versnelde stresstesten uit te voeren op PV-modules door middel van mechanische belastingen. Ze hopen met deze testen, simulatiemodellen te valideren en zwakke punten in een module op te sporen om naar een langere levensduur van PV-modules toe te werken. Hierdoor kwam de vraag om onderzoek te verrichten naar het mechanisch stresstesten van PV-modules en hieruit een geschikte oplossing voor uit te werken.

1.3 <u>Doelstelling</u>

Het hoofddoel van deze masterproef is het verrichten van onderzoek naar het mechanisch stresstesten van PV-modules en hieruit een geschikte praktische oplossing voor uit te werken. Om dit te bereiken moet er eerst een vooronderzoek plaatsvinden om na te gaan wat er reeds bestaat rond het mechanisch stresstesten van PV-modules en op welke manieren dit in de praktijk wordt gedaan. Vervolgens moet het vooronderzoek uitwijzen welke grootte van modules het meest interessant is om te testen en aan de hand van een vast budget beslist worden om een bestaande testopstelling aan te kopen of deze zelf te ontwerpen. Als laatste moeten er testen worden uitgevoerd op de stresstestopstelling.

1.4 Materiaal en methode

Wat is er al getest en op welke manier, welke soorten invloeden hebben mechanische lasten op PV-modules, op welke manieren worden panelen belast in de werkelijkheid, wat heeft allemaal een invloed op de mechanische sterkte van een PV-module etc. allemaal vragen die beantwoord moesten worden vooraleer er kon gekeken worden naar het realiseren van een stresstestopstelling. Daarom is er allereerst een uitgebreide literatuurstudie uitgevoerd, waar door middel van wetenschappelijke artikels, menselijke ervaring en knowhow de vragen worden beantwoord.

Gelijktijdig met de literatuurstudie hebben er een aantal vergaderingen plaatsgevonden. Hier werden de minimale verwachtingen van de stresstestopstelling besproken en in een eisenpakket gegoten. De resultaten van de literatuurstudie konden hier ook gepresenteerd worden en werd er een brainstormsessie georganiseerd om eerste ideeën te creëren voor een eerste eigen ontwerp.

Er moesten wel nog veel keuzes gemaakt worden zoals, op wat voor grootte van modules wordt er getest, de stresstestopstelling aankopen of zelf ontwerpen en maken en de mogelijkheid om gecombineerde testen uit te voeren met een klimaatkast? Om deze keuzes makkelijker te maken zijn er eerst kosten-batenanalyses uitgevoerd op deze opties. Uit deze analyses is de beslissing gekomen om de testopstelling zelf te ontwerpen en dat voor zogenaamde kleine modules of "mini-modules". De combinatie met een klimaatkast was niet een eis maar wel een wens.

Vervolgens werd het ontwerp uitgetekend met behulp van het CAD-pakket 'PTC Creo' en na een goedkeuring volledig opgebouwd. De finale opstelling is in staat om zowel statische als dynamische belastingen over te brengen met behulp van pneumatische cilinders en kan daarbij ook gekoppeld worden aan een klimaatkast. De gerealiseerde stresstestopstelling wordt hierbij aangestuurd door middel van een arduino sturing. Als laatste werden de eerste statische stresstesten uitgevoerd op deze stresstestopstelling.

1.5 Opbouw van de scriptie

De masterproef werd uitgevoerd in drie fases, namelijk een vooronderzoek, een ontwerpfase en een meetfase. Deze onderverdeling wordt ook gevolgd door de scriptie waarbij hoofdstukken 2 en 3 het vooronderzoek beschrijven, hoofdstuk 4 de ontwerpfase en als laatste worden in hoofdstuk 5 de meetresultaten besproken.

In hoofdstuk 2 wordt de literatuurstudie beschreven. Deze werd uitgevoerd om een beter beeld te krijgen rond het mechanisch stresstesten van PV-modules. Zo wordt nagegaan wat het effect is van een mechanische belasting op een PV-module, wat er allemaal een invloed heeft op de mechanische sterkte en hoe het vermogen van een PV-module hierdoor beïnvloed wordt.

In hoofdstuk 3 wordt het vooronderzoek verdergezet in de vorm van een vergelijkende studie tussen de verschillende mogelijkheden van opstelling. Om zo te beslissen tussen het aankopen of zelf ontwerpen van een opstelling. Dit begint met een vergelijking tussen bestaande stresstestopstellingen uit de literatuur en het opstellen van een eisenpakket waaraan de stresstestopstelling minimaal aan moet voldoen. Vervolgens wordt er een marktonderzoek uitgevoerd en aan de hand van een vast budget, beschikbare apparatuur en informatie uit de literatuur onderzocht welke grootte van modules het meest interessant is om te testen. Uiteindelijk werd besloten om zelf een stresstestopstelling te ontwerpen voor zogenaamde kleine modules of "mini-modules".

In hoofdstuk 4 wordt het ontwerp beschreven. Dit begint met het beschrijven van een prototype waarmee de eerste statische testen werden uitgevoerd. Door middel van deze testen werden de nodige specificaties voor de pneumatische cilinders bepaald. Vervolgens wordt het ontwerp zelf beschreven met een kostenberekening voor de volledige opstelling. Als laatste wordt de gebruikte sturing van de opstelling beschreven.

In hoofdstuk 5 worden de eerste meetresultaten van het prototype en de gerealiseerde opstelling besproken. De meetresultaten van het prototype bestaan uit een statische belasting uitgevoerd met verschillende gewichten op een 3 x 3 module en de glasplaat van een module. De eerste meetresultaten van de gerealiseerde opstelling bestaan uit statische drukbelastingen uitgevoerd door de pneumatische cilinder op een 2 x 2 module en een vergelijking tussen verschillende aanstuurtypes.

In hoofdstuk 6 wordt de scriptie afgesloten met het besluit en een vooruitblik naar toekomstige uitbreidingen.

2016-2017

Hoofdstuk 2: Literatuurstudie

Het realiseren van een stresstestopstelling start met een uitgebreid vooronderzoek. Dit vooronderzoek wordt uitgevoerd in twee fases, namelijk een literatuurstudie en een vergelijkende studie. Beginnend met de literatuurstudie wordt in dit hoofdstuk onderzocht wat er reeds bestaat omtrent het mechanisch belasten van PV-modules. Zo wordt nagegaan wat het effect is van een mechanische belasting op een PV-module, wat er allemaal een invloed heeft op de mechanische sterkte en hoe het vermogen van een PV-module hierdoor wordt beïnvloed.

In hoofdstuk 3 wordt het onderzoek voortgezet in de vorm van een vergelijkende studie tussen de verschillende mogelijkheden van testopstellingen en bijhorende kosten.

Aan de hand van de resultaten uit het vooronderzoek wordt uiteindelijk de beslissing gemaakt tussen het aankopen of ontwerpen van de stresstestopstelling en bepaalt op welke grote van modules er getest gaat worden.

2.1 Mechanisch belasten van PV-modules

PV-modules worden dagelijks belast door statische en dynamische krachten veroorzaakt door wind, sneeuw en thermische uitzetting (vb.: dag en nacht, seizoenen, etc.; Figuur 1) [4].



Figuur 1: Belastingen op PV-modules [4]

Zonnesimulatie-, hagelimpact- en regentesten en thermische en mechanische stresstesten zijn een aantal proeven die PV-modules moeten doorstaan om een IEC 61215-standaard [5] te krijgen. De norm dient echter eerder als een kwaliteitscontrole en zegt dus niks over de mogelijke levensduur en betrouwbaarheid van het PV-systeem. Op het gebied van mechanische stresstesten bevat deze norm enkel een methode voor het aanleggen van een statische belasting. Assmus Marcus, et al. [6] hebben in hun onderzoek echter aangetoond dat vrijstaande PV-modules wel degelijk dynamische deflectie ondervinden wanneer onderhevig aan windbelasting (Figuur 2). Door de verscheidene onderzoeken naar dynamische belastingen in werkelijkheid op PV-modules zijn er ook normeringen voor dynamische testopstellingen ontwikkeld en uiteindelijk uitgebracht in 2016, namelijk de IEC 62782 norm.



Figuur 2: Schema van een vrijstaande PV-module in een luchtstroom (zwart) met positieve (oranje) en negatieve drukgebied (blauw) en resulterende beweging (rood) [6]

In Figuur 3 wordt de samenstelling van een silicium PV-module weergegeven. Als basis is er een silicium zonnecel. Deze is opgebouwd uit een silicium wafer waarop zich metallische contacten bevinden die de opgewekte stroom verzamelen en geleiden. Deze bestaan uit busbars, de twee of meerdere grote strips op de zonnecel en zogenaamde vingers, de kleine strips loodrecht met de busbars. Deze metallische contacten worden met behulp van zeefdrukken geplaatst op de silicium wafer. Hierbij wordt er een zilveren pasta door een patroonscherm gesmeerd op de wafer waarbij de gebieden met gaten in het patroon het metallisch patroon achterlaten op het oppervlak van de wafer, namelijk de busbars en vingers. Om de verschillende zonnecellen van een module met elkaar te verbinden worden op de busbars interconnecties (cell stringing ribbons) geplaatst. Dit gebeurt meestal door middel van een soldeerverbinding. Op het einde van een rij zonnecellen worden de interconnecties met elkaar verbonden (string connector ribbons) om een verbinding te verkrijgen tussen de verschillende rijen. Vervolgens komt er een inkapselingsmiddel (encapsulant) rondom de zonnecellen om te zorgen voor een samenhang en om de cellen te beschermen tegen invloeden van de omgeving zoals vocht en dergelijke. Aan de achterkant van het inkapselingsmiddel komt een backsheet voor ondersteuning met de junction box van de module en aan de voorkant een glasplaat voor het verstevigen van de module. Sommige modules hebben ook een glasplaat aan de achterkant die voor extra versteviging zorgt. Als laatste komt er een frame rondom het geheel en vormt zo een volledige PV-module.



Figuur 3: Componenten op een PV-module [7]

Het toebrengen van een mechanische belasting op een PV-module kan verschillende gevolgen hebben. Volgens M. Ebert, et al. [4] zijn dit de typische mechanische defecten die hierbij voorkomen:

- breken van het glas;
- breken van de zonnecellen;
- breken van de interconnecties;
- delaminatie.

Op welke manier PV-modules zich gedragen onder een mechanische belasting en hoe bepaalde componenten de mechanische sterkte van een PV-module beïnvloeden zal verder worden besproken in volgende hoofdstukken.

2.2 Testen volgens de normen

Het testen van de mechanische sterkte van PV-modules gebeurt meestal vertrekkend van twee normen, namelijk de IEC 61215 en de IEC 62782 norm. Deze normen beschrijven de kwaliteitseisen waaraan PV-modules moeten voldoen voordat een fabrikant ze op de markt kan brengen. De IEC 61215 norm beschrijft het uitvoeren van statische mechanische stresstesten op kristallijn silicium fotovoltaïsche modules. Deze test bestaat uit het uitvoeren van drie cycli van een statische belasting met een uniforme lading van 2400 Pa en dit toegediend voor één uur wisselend aan de voor- en achterzijde. Alternatief wordt er nog een extra statische belasting van 5400 Pa toegediend gedurende de laatste cyclus aan de voorzijde van het paneel voor het simuleren van een sneeuwbelasting. De test is geslaagd indien de stroom doorheen de PV-modules nergens wordt onderbroken en als het vermogensverlies minder dan 5 % bedraagt [5].

De IEC 62782 norm beschrijft het uitvoeren van dynamisch mechanische stresstesten op PV-modules. Hierbij moet een dynamisch mechanische belasting met een maximum druk van \pm 1000 Pa worden aangebracht en dit voor 1000 cycli aan een snelheid van één tot drie cycli per minuut. Het toebrengen van de maximale positieve en negatieve druk moet ten minsten 7 \pm 3 seconden duren. Deze norm is pas uit gebracht in 2016, waardoor het testen van dynamische belastingen nog maar zelden is gebeurt volgens de norm [8].

2.3 <u>Scheuren van PV-modules</u>

PV-modules worden blootgesteld aan mechanische belastingen gedurende hun hele leven. Al vanaf de productie kunnen soldeer- en lamineerprocessen leiden tot kleine scheurtjes in de zonnecellen. Deze worden vervolgens groter door thermomechanische belasting zoals ervaren in dag/nacht en zomer/winter cycli. De grootste gevolgen van mechanische belasting na de productie resulteren van zowel transport als wind en sneeuw. Deze mechanische belastingen kunnen uiteindelijk leiden tot breuken in zonnecellen en resulteren tot een verlies in vermogen van de PV-module [9].

Het onderzoek naar scheuren in zonnecellen is niets nieuws en wordt al sinds het ontstaan van PV-modules uitgevoerd. Hiertoe worden verschillende manieren gebruikt. In kleine testen op één enkelen zonnecellen (156 x 156 mm) of mini-modules bestaande uit enkele cellen zijn de vier- en drie-punts buiging test, "bal-on-ring" test en twist test de meest gebruikte testmethodes [10]. Voor volledige zonnepanelen of kleine PV-modules wordt er gebruik gemaakt van verschillende methodes voor het aanbrengen van een statische of dynamische belasting, gaande van een simpele opstelling met bakstenen of zandzakjes tot volledige stresstestopstellingen gebruikmakend van bijvoorbeeld pneumatische cilinders [11], luchtdruk [12] of een pneumatisch membraan [13]. Deze opstellingen worden verder besproken in hoofdstuk 3.1. Alternatief wordt er voor dynamische analyses ook gebruik gemaakt van triltafels voor het simuleren van een windbelasting of trillingen ten gevolge van transport [14].

Voor het onderzoeken van scheurtjes in een PV-module na een mechanische stresstest wordt onder andere gebruik gemaakt van Elektroluminescence (EL) metingen. Dit is een optisch verschijnsel waarbij een materiaal licht geeft als reactie op de doorgang van een elektrische stroom [15]. Hierbij wordt er een stroom gestuurd doorheen de PV-module waarbij regio's met een slecht contact verschijnen als donkere vlekken. Het resultaat van zo een EL-meting is weergegeven in Figuur 4, waarbij de donkere strepen de ontstane microscheurtjes zijn. Vaak zijn deze microscheurtjes onzichtbaar voor het blote oog.



Figuur 4: EL-meting van een PV-module na een mechanische stresstest [16]

Ook merkbaar in Figuur 4 is dat er verscheidende vormen van scheuren optreden. In Figuur 5 wordt hiervan een beter onderscheid weergegeven. Zo toont onderzoek aan dat er zes verschillende types van scheuren optreden. Ook geeft de figuur de verdeling van deze scheuren weer, verspreid over een volledig zonnepaneel. Hieruit blijkt dat de meeste scheuren parallel lopen met de busbars en dat de uiteindes het meeste kans hebben om te scheuren volgens een 45° hoek [9].



Figuur 5: Verschillende vormen van scheuren en hun verdeling over een volledig zonnepaneel [9]

Deze scheuren hebben een invloed op het vermogen van een PV-module. De grootte van deze invloed wordt bepaald door het type van scheur en wordt weergegeven in Figuur 6. Scheuren onder een hoek van 45° in de uiteindes zorgen dat 6,25 % van een zonnecel wordt onderbroken. Dit komt doordat de vingers worden onderbroken en niet meer in contact staan met de bijliggende busbar. Scheuren parallel met de busbars zijn het meest voorkomend en ook het meest schadelijk. Deze kunnen zorgen voor onderbreking tot ¼ van een volledige zonnecel. Scheuren loodrecht met de busbars komen het minst voor en hebben de minste invloed op een PV-module. Dit omdat dit type scheur evenwijdig loopt met de vingers en deze dus ook niet onderbreekt [9].



Figuur 6: Invloed van scheuren op een PV-module [9]

De reden waarom de meeste scheuren parallel met de busbars gebeuren en dat in de uiteindes meestal scheuren onder een hoek van 45° optreden wordt verklaard aan de hand van Figuur 7. Deze figuur geeft een simulatie weer met de oriëntatie van de hoofdrek op het glasoppervlak van een PV-module samen met de verdeling van de eerste hoofdrek. Deze simulatie toont aan dat de hoofdrek gericht is volgens de y-as in de centrale regio. Dit verklaart waarom Pv-modules meer geneigd zijn om parallel ten opzichte van de busbars te scheuren in de centrale regio. Bovendien toont deze simulatie ook aan dat de richting van de hoofdrek onder een hoek van 45° staat in de uiteindes, wat verklaart waarom scheuren meer geneigd zijn om diagonaal op te treden in de uiteindes van een PV-module [9].



Figuur 7: Richting van de hoofdrek [9]

Onderzoek [9] heeft aangetoond dat het roteren van de busbars met 90° het potentieel heeft om de gevolgen van de optredende scheuren te verminderen. Hierdoor zal de oriëntatie van de overheersende scheuren veranderen naar scheuren loodrecht op de busbars. Belangrijk hierbij is dat de frequentie van scheuren hetzelfde blijft, maar dat enkel de impact zal verminderen.

2.4 Invloed van variërende temperaturen op een PV-module

PV-modules worden gedurende hun hele leven blootgesteld aan wisselende temperaturen door dag/nacht en zomer/winter cycli. Maar hebben deze variërende temperaturen ook een invloed op de mechanische sterkte van PV-modules? Onderzoek toont aan dat PV-modules duidelijk hieraan onderhevig zijn. Door variërende temperaturen gaan alle onderdelen van een module uitzetten en krimpen. De grootte van deze uitzetting of krimp wordt bepaald door de thermische uitzettingscoëfficiënt van het materiaal. Doordat PV-modules zijn opgebouwd uit verschillende onderdelen waarbij elk onderdeel bestaat een ander materiaal, zullen er verschillende uitzettingen optreden. Dit heeft als gevolg dat er spanningen worden opgebouwd op de module die ervoor zorgen dat een PV-module sneller zal breken en dat bestaande micro-scheurtjes vergroten. Als gevolg zal het vermogen van de PV-module dalen [16], [17], [18].

PV-modules worden altijd voorzien van een inkapselingsmiddel om te zorgen voor een samenhang van de verschillende zonnecellen en om de cellen te beschermen tegen invloeden van de omgeving zoals vocht en dergelijke [15]. Voor het inkapselingsmiddel wordt in de meeste gevallen EVA (ethyl vinyl acetate) als materiaal gebruikt. Onderzoek [13] heeft bewezen dat dit materiaal een invloed heeft op de mechanische strekte van de zonnecellen. De grootte van deze invloed wordt bepaald door de temperatuur. In Figuur 8 zijn de dynamisch mechanische eigenschappen van EVA en silicone inkapselingsmiddels weergegeven. Zo is te zien dat de stijfheid van het EVA-materiaal een grote stijging vertoont bij het dalen van de temperatuur. Bovendien ligt de glastemperatuur van EVA rond de -20 °C [8]. Dit is de temperatuur waarbij kunststoffen bros worden. Deze groter wordende stijfheid heeft als gevolg dat er meer spanningen worden overgebracht naar de zonnecellen zelf en deze dus meer kans hebben te breken onder een belasting [13].

Inkapselingsmiddelen op basis van siliconen vertonen veel betere eigenschappen, maar door de hogere kost van dit materiaal wordt het maar zelden toegepast als inkapselingsmiddel voor PV-modules en blijft EVA de standaard.



Figuur 8: Invloed inkapselingsmiddel [13]

In Figuur 9 zijn de resultaten uit een onderzoek [13] weergegeven die inderdaad bewijzen dat de temperatuur een invloed heeft op de mechanische sterkte van een PV-module afhankelijk van het gebruikte inkapselingsmiddel. Deze statische en dynamische stresstesten werden uitgevoerd op een aantal 2x2 modules en dit in een temperatuurbereik van -30 °C tot en met 85 °C. Zo is te zien dat een module met inkapselingsmiddel van silicone geen scheuren vertoont onder de testcondities, terwijl modules met EVA, scheuren vertonen bij - 30 en 25 °C. Dit komt door de verhoogde stijfheid van EVA bij lagere temperaturen zoals weergegeven en besproken op vorige pagina.



Figuur 9: Statisch en dynamische test op PV-modules met verschillend inkapselingsmiddel bij verschillende temperaturen [13]

De invloed van variërende temperaturen op een PV-module toont aan dat het zeker zijn nut heeft om mechanische stresstesten uit te voeren in een klimaatruimte. Dit wordt in de praktijk dan ook vaak toegepast.

2.5 <u>Verschil tussen mono- en multi-kristallijne PV-modules onder mechanische</u> <u>belasting</u>

Kristallijn silicium PV-modules kunnen uitgerust zijn met twee soorten cellen, namelijk mono-kristallijne of multi-kristallijne PV-cellen (Figuur 10). Mono-kristallijn is de oudste en meest gevorderde soort van de twee. Mono-kristallijne panelen worden gecreëerd, zoals de naam al zegt, van een enkele continue kristalstructuur. Deze soort wordt geproduceerd volgens de "Czochralski" methode. Hierbij wordt een silicium kristallen 'zaadje' geplaatst in een vat van gesmolten silicium. Vervolgens wordt dit zaadje langzaam uit het gesmolten silicium getrokken en vormt er een vaste kristalstructuur rond het zaadje bekend als een ingot. Deze ingot wordt vervolgens gesneden in kleine schijfjes gekend als de silicium wafers die de basis vormen van een PV-module. Vergeleken met multi-kristallijne modules zijn mono-kristallijne modules 20 % duurder te produceren maar hebben ze een betere mechanische sterkte en 10 tot 15 % meer efficiëntie[15],[19].

Multi-kristallijne PV-cellen zijn de tweede soort en worden gekenmerkt door de zichtbare 'vlekken' op de zonnecel. De productie van deze soort start ook bij een silicium kristallen 'zaadje' dat geplaatst wordt in een vat van gesmolten silicium, maar in plaats van het zaadje er vervolgens weer uit te trekken krijgt het vat simpelweg de tijd om af te koelen. Dit vormt de verscheidende randen en korrels in de zonnecel. Vergeleken met mono-kristallijne PV-modules zijn multi-kristallijne PV-modules goedkoper te produceren, hebben ze een lagere mechanische sterkte maar een lagere efficiëntie. Door technische innovaties wordt het verschil in efficiëntie echter steeds kleiner. Er zijn al reeds teststalen van multikristallijne PV-modules die dezelfde efficiëntie behalen als mono-kristallijne PV-modules [20],[19],[21].



Figuur 10: Multi-kristallijne en mono-kristallijne zonnecellen [22]

Uit onderzoek [23] is aangetoond dat multi- kristallijne PV-cellen bij een lagere stress waarde barsten vertonen dan mono- kristallijne PV-cellen. Figuur 11 toont het verschil in mechanische sterkte aan tussen mono- kristallijne en multi- kristallijne PV-cellen aan. Hierbij wordt een vergelijking weergegeven tussen twee soorten van stalen, namelijk modules die onbeschadigd waren en modules die reeds schade hadden opgelopen na het solderen of lamineerproces. Bovendien wordt het verschil duidelijk aangetoond wanneer de belasting loodrecht of parallel met de busbars wordt aangelegd. Zo is te zien dat de beschadigde stalen bij veel lagere stress al barsten vertonen dan de onbeschadigde stalen. Dit komt doordat er in onbeschadigde stalen reeds micro-scheurtjes aanwezig zijn die niet met het blote oog zichtbaar zijn. Deze micro-scheurtjes ontstaan tijdens het productieproces en groeien snel uit tot grote barsten bij het ondervinden van een belasting [23].

Bovendien toont de grafiek ook aan dat wanneer de belasting parallel met de busbars wordt aangebracht de PV-cel veel sneller zal falen dan wanneer de belasting loodrecht met de busbars wordt aangebracht. De reden hiervoor is dezelfde als deze beschreven bij Figuur 7 en wordt de weerstand van de PV-module ten opzichte van de belastingsrichting dus bepaald door de oriëntatie van de hoofdrek [23].

De reden waarom er verschil is tussen de mechanische sterkte van mono- kristallijne en multi- kristallijne Pv-cellen wordt verder besproken in volgend hoofdstuk.



- ▲ Multi-crystalline, perpendicular
- Multi-crystalline, parallel
- △ Multi-crystalline, perpendicular, damaged
- ▲ Multi-crystalline, parallel, damaged
- Mono-crystalline, perpendicular
- Mono-crystalline, parallel
- Mono-crystalline, perpendicular, damaged
- Mono-crystalline, parallel, damaged

Figuur 11: Breekpunt afhankelijk van type PV-cel en belastingsrichting [23]

2.6 Invloed van metallisatieprocessen op PV-modules

Het verlagen van kosten van een PV-module door het verlagen van de kans op het breken ervan is één van de rode draden bij onderzoek in PV-modules. Om dit te bereiken moet er al vanaf de eerste productiestap beoogt worden de hoogste mechanische sterkte te behalen voor een PV-module. Dit start bij de silicium wafers waarbij de verschillende verwerkingsomstandigheden en metallisatie-eigenschappen een invloed hebben op de mechanische sterkte [24].

Het productieproces van silicium PV-modules start met een blok silicium. Vervolgens worden uit deze blok de wafers gesneden die de basis vormen van PV-modules [15]. Het is vanaf hier dat de productiestappen al een belangrijke rol spelen in de mechanische sterkte van een PV-module. Zo toont Tabel 1 de invloed aan van het al dan niet etsen van de wafers. Zo heeft een niet geëtste wafer een beduidend lagere mechanische sterkte dan een geëtste wafer [25].

Etching conditions	Strength, MPa
No etching	155
With etching	234

Tabel 1: Invloed van etsen op de mechanische sterkte [25]

In het vorige hoofdstuk werd al aangetoond dat er een verschil is in mechanische sterkte tussen mono- en multi-kristallijne PV-cellen. De reden hiervoor wordt verklaard door Tabel 2. Figuur 12 geeft een visuele weergave van verschillende kristalliniteit types en Tabel 2 de bijhorende mechanische sterkte. Uit onderzoek [25] is aangetoond dat het type van kristalliniteit een vrij grootte invloed heeft op de mechanische sterkte. Zo is silicium bestaande uit één grote kristal ongeveer 1,5 keer sterker dan een wafer bestaande uit meerdere kleine kristallen. Aangezien multi-kristallijne PV-cellen bestaan uit meerdere kleine kristallen met verschillende oriëntaties en mono-kristallijne PV-cellen uit één groot kristal in het midden, verklaart dit waarom multi-kristallijne PV-cellen veel sneller falen dan andere soorten van cellen onder mechanische stress.

Tabel 2: Mechanische sterkte van verschillende kristalliniteit types [25]

Crystallinity type	$\sigma_{\rm mean}({\rm MPa})$	$\sigma_{ m o}({ m MPa})$
One big grain	273±40	286.62
Twin boundary	241 ± 33	256.10
Triple junction	239 ± 39	255.16
GB parallel to the loading direction	238 ± 32	241.57
Several grains	221 ± 46	228.24
Many small grains	178 ± 34	208.52



Figuur 12: Visuele weergave van kristalliniteit types [25]

Tijdens de productie van een PV-module wordt er op een bepaald moment een laag aluminium pasta gezeefdrukt op de achterkant van de module. Dit zorgt voor een *"back surface field"* (magnetisch veld aan achterzijde) waardoor de efficiëntie verhoogt en daarbij ook de zonnecel versterkt [26].

In Tabel 3 zijn de resultaten te vinden uit een vergelijkende studie [27] tussen verschillende aluminium pasta's. Zo toont deze studie aan dat er een verschil van 10 – 20 % is in mechanische sterkte afhankelijk van het type aluminium pasta. Het nadeel van deze studie is dat er geen specificaties worden weergegeven van de verschillende aluminium pasta's. De studie toont echter wel aan dat het soort aluminium pasta een belangrijke rol speelt in de mechanische sterkte van een PV-module. Aangezien het verlagen van kosten steeds samengaat met de levenstijd van een PV-module speelt het kiezen van de juiste aluminium pasta zeker een belangrijke rol hierin.

Al paste type	Al suface in tension		Si surface in tension	
	Stress at fracture in AI (MPa)	Stress at fracture in Si (MPa)	Stress at fracture in Al (MPa)	Stress at fracture in Si (MPa)
A	110	266	71	206
В	94	237	68	195
С	82	217	67	193

Tabel 3: Invloed van verschillende Al pasta's [27]

2.7 Invloed van interconnectietechnieken op de mechanische sterkte

De verschillende cellen in een PV-modules worden met elkaar verbonden door middel van interconnecties en kunnen breken door vermoeidheid. Deze vermoeidheid wordt veroorzaakt door verschillende oorzaken zoals het soldeerproces zelf, thermische cycli en fysische stress ten gevolge van een mechanische belasting [3].

Figuur 13 toont een gebroken interconnectie. Net zoals bij het detecteren van scheurtjes maakt een EL-meting het mogelijk om gebroken interconnecties te detecteren. Het breken van een interconnectie zal ertoe leiden dat de helft van bijhorende cel als donker gebied wordt weergegeven in een EL-meting. Bovendien kan één onderbreking van de interconnectie al leiden tot een vermogensverlies van 35% [3].





Figuur 13: Links: Gebroken interconnectie [4]. Rechts: EL-meting voor detectie gebroken interconnecties [3]

Tijdens het solderen van de busbars op de PV-module gaan de zonnecel en busbars opwarmen en uitzetten en vervolgens weer krimpen na het verwijderen van de warmte. Aangezien koper en silicium verschillende materiaaleigenschappen hebben gaan deze twee materialen ook verschillend krimpen en uitzetten, waardoor er spanningen worden opgebouwd in het systeem. Dit kan leiden tot micro-scheurtjes in de PV-module die onder invloed van een mechanische last zullen uitgroeien tot grotere scheuren in de module [28]. Zoals vermeld verlaagt het soldeerproces de mechanische sterkte van een PV-module. Voor deze reden wordt er dan ook onderzoek gedaan naar verschillende soorten van interconnectietechniek. In Figuur 14 is een vergelijking tussen verschillende interconnectietechnieken en een standaard zonnecel zonder interconnecties weergegeven. De verschillende technieken bestaan uit het lijmen van de verbindingen, laser solderen, inductief solderen en infrarood solderen met verschillende materialen. Zo is duidelijk vast te stellen dat het lijmen het minste invloed heeft op de cel en dat infrarood solderen met de compositie "SnPbAg" de grootste invloed heeft. Het lijmen heeft de minste invloed, maar door de hogere productiekost wordt dit minder toegepast en blijft het solderen de meest gebruikte manier. Van de verschillende soldeertechnieken geeft het infrarood solderen met een "*low CTE*" (lage uitzettingscoëfficiënt) materiaal de beste resultaten. De keuze van het soort verbinding hangt grotendeels af van de kost en de verwachte levensduur dat de PV-module heeft met een bepaalde interconnectietechniek [29].



Figuur 14: Maximale breekkracht van verschillende interconnectietechnieken voor zonnecellen met dikte 150 of 200 μm [29]

In Tabel 4 zijn resultaten te vinden uit een tweede onderzoek [30] betrekkende drie verschillende interconnectietechnieken, namelijk het klemmen, solderen en het vastlijmen van de verbindingen. Meteen is duidelijk dat ook hier het lijmen de beste resultaten heeft op lange termijn en mechanische stabiliteit. Het vastklemmen van de verbindingen heeft geen slechte invloed op de mechanische stabiliteit, maar zorgt wel voor een slechtere stabiliteit op lange termijn. Als laatste heeft het solderen goede resultaten op lange termijn en minimale impact op de mechanische stabiliteit, maar zoals onderzoek [29] heeft aangetoond wordt deze invloed bepaald door het type van solderen en de gebruikte materialen.

-			_
Ribbon	Clamped	Soldered	Glued
Interconnection			
Long term		+	+
stability	-	I	
Mechanical	+	0	+
stability	1	0	

Tabel 4: Vergelijking van	interconnectietechnieken	[30]

2.8 Vermogen van een PV-module en de impact van scheuren hierop

Een zonnecel kan men elektrisch voorstellen als een stroombron parallel met een diode. Als er geen licht aanwezig is om een stroom op te wekken gedraagt de zonnecel zich als een diode. Bij het verhogen van de lichtintensiteit zal de zonnecel een stroom opwekken (Figuur 15) [31].



Figuur 15: I-V curve en ideale zonnecel [15]

Het bepalen van het vermogen P van een PV-module gebeurt aan de hand van een I-V curve, waarbij $P = I \cdot V$. In Figuur 15 is een typische I-V curve van een PV-module weergegeven. Hierbij stelt I_{SC} de kortsluitstroom voor en is dit de maximale stroom van een zonnecel die voorkomt wanneer de spanning over de zonnecel 0 V bedraagt. De V_{oC} is de open klem spanning ook wel de maximale spanning van een zonnecel genoemd en komt voor als de netstroom doorheen de zonnecel 0 A bedraagt [15].

Op beide beschreven punten bedraagt het vermogen van een zonncel 0 W. Daarom wordt er gebuik gemaakt van de fill factor, dit is een parameter die samen met I_{sc} en V_{oc} het maximale vermogen van de zonnecel bepaalt. De fill factor wordt gedefinieerd als de verhouding tussen het maximaal vermogen van de zonnecel en het product tussen I_{sc} en V_{oc}. Grafisch gezien (Figuur 16) is de fill factor een maatstaf voor de haaksheid van de zonnecel en is het het gebied van de grootste rechthoek die past in de I-V curve [15].



Figuur 16: Fill factor van een PV-module [15]

Wiskundig kan de fill factor worden bepaald als:

$$FF = \frac{gebied A}{gebied B} = \frac{I_{MP} \cdot V_{MP}}{I_{SC} \cdot V_{OC}}$$

Waarbij gebieden A en B worden weergegeven in Figuur 16 op vorige pagina, I_{SC} de kortsluitstroom is, V_{OC} de open circuit spanning, I_{MP} de stroom bij het maximaal vermogen en V_{MP} de spanning bij het maximaal vermogen. De waardes van de fill factor liggen typisch tussen 0,5 en 0,82 [31].

In Figuur 15 wordt het ideale schema van een zonnecel weergegeven, maar in de praktijk moet er ook rekening worden gehouden met zogenoemde parasitaire weerstanden die de efficiëntie van de zonnecel verlagen. Namelijk de serie weerstaand R_s en de shunt weerstand R_{SH} weergegeven in Figuur 17.



Figuur 17: Equivalent schema van een zonnecel [15]

In Figuur 18 wordt het effect van de parasitaire weerstanden weergegeven. Zo zal een verhoogde serie weerstand de I-V curve naar links verschuiven en een verlaagde shunt weerstand de I-V curve naar beneden verschuiven. Uiteraard zal hierdoor de fill factor van de zonnecel negatief worden beïnvloed.



Figuur 18: Effect van parasitaire weerstanden [31]

Veel onderzoek wordt uitgevoerd naar het testen van mechanische sterkte en de vorming van scheuren, maar wat is nu juist de invloed van deze scheuren op het vermogen van een zonnecel? Onderzoek [32] toont aan dat micro-scheurtjes maar een zeer klein effect hebben op het vermogen van nieuwe PV-modules, maar wanneer de module verouderd en belast wordt door thermische en mechanische belastingen vergroot dit effect. Een herhaaldelijke relatieve beweging van het gescheurde gedeelte van de zonnecel kan resulteren in een complete elektrische scheiding en dus resulteren in inactieve gedeeltes [32].

Voor het testen van scheurtjes op lange termijn maakt men gebruik van versnelde verouderingstesten om de impact van scheurtjes te simuleren op lange termijn. Hierbij wordt de PV-module in een klimaatkast blootgesteld aan 200 temperatuur cycli tussen -40 °C en 85 °C. Uiteindelijk wordt er een EL-meting gedaan en de I-V curve opgemeten. Deze worden vervolgens vergeleken met de stand van voor de verouderingstesten [5],[32]. In Figuur 19 wordt de EL-meting van voor en na een verouderingstest weergegeven. De afbeelding na de verouderingstest is duidelijk donkerder, wat aantoont dat het vermogensverlies toegenomen is.



Figuur 19: EL-meting voor en na verouderingstest [18]

In Figuur 20 wordt de invloed van microscheurtjes op het vermogen aangetoond voor en na een verouderingstest op een aantal PV-modules bestaande uit 60 cellen (156 x 156 mm). Deze microscheurtjes waren het gevolg van een mechanische stresstest volgens de IEC 61215 norm. Zo is te zien dat de aanwezigheid van 15 - 41 microscheurtjes maar zorgt voor een vermogensverlies van 0 - 1,5 %. Maar na een verouderingstest zorgen 8 - 27 scheurtjes al voor een vermogensverlies van 4 - 9,5 %. Dit komt doordat de scheurtjes groter worden tijdens de verouderingstest en dus ook een grotere invloed gaan hebben op het vermogen. Bovendien toont onderzoek [32] ook aan dat de grootte van het vermogensverlies wordt bepaald door de zonnecel met het grootste inactief gebied.



Figuur 20: Vermogensverlies voor en na verouderingstest [32]

In Figuur 21 wordt de invloed van de rek weergeven op de I-V curve van een PV-module. Dit onderzoek [33] werd uitgevoerd door een trekproef uit te voeren op een zonnecel en tegelijkertijd de I-V curve op te meten. Meteen is duidelijk dat een rek van 0,2 % maar een kleine invloed heeft op het vermogen, maar bij een verdubbeling van deze rek zakt de prestatie van de PV-module meteen met meer dan 50 %. Een nog hogere rek zorgt dat de zonnecel bijna geen vermogen meer kan leveren.



Figuur 21: Invloed van rek op de I-V curve [33]
Hoofdstuk 3: Vergelijkende studie

In vorig hoofdstuk werd de algemene literatuur rond het mechanisch belasten van PV-modules onderzocht. Hierin werd aangetoond dat PV-modules beschadigingen oplopen in de vorm van scheurtjes als gevolg van een mechanische belasting. Deze beschadigingen leiden tot een verlies in vermogen, vooral bij het ouder worden van de module. Om dit te onderzoeken op een korte termijn worden er reeds versnelde stresstesten uitgevoerd op PV-modules. Startend met deze resultaten wordt daarom in dit hoofdstuk het onderzoek verdergezet in de vorm van een vergelijkende studie tussen de verschillende mogelijkheden van stresstestopstelling. Om zo tot een beslissing te komen tussen het aankopen of zelf ontwerpen van een stresstestopstelling.

Eerst wordt er gekeken naar de verschillende stresstestopstellingen die reeds gebruikt worden in de literatuur en wordt er via deze bevindingen en een brainstormsessie een eisenpakket opgesteld waaraan de stresstestopstelling minimaal moet voldoen. Vervolgens vindt er een marktonderzoek plaatst tussen aankoopbare opstellingen en verschillende componenten. Als laatste wordt aan de hand van een vast budget, beschikbare apparatuur en informatie uit de literatuur onderzocht welke grootte van modules het meest interessant is om te testen.

Uiteindelijk werd besloten om zelf een stresstestopstelling te ontwerpen voor zogenaamde "mini-modules". Het ontwerp hiervan wordt in hoofdstuk 4 besproken.

3.1 Mechanische stresstestopstellingen in de literatuur

In de literatuur wordt er gebruik gemaakt van verschillende mechanische stresstestopstellingen. Daarom is er nagegaan welke soort van belastingen deze opstellingen kunnen aanbrengen en welke componenten hiervoor nodig zijn. Op deze manier wordt er een beter beeld gegeven van wat er reeds bestaat en welke soort opstelling het meest geschikt zou zijn voor imo-imomec. De verschillende opstellingen worden hier kort besproken. De drie-, vierpuntbuiging, twistproeven en vibratietesten zullen niet worden besproken aangezien deze reeds uitvoerig worden toegepast. In de literatuur zijn dit de meest gebruikte soorten van mechanische stresstestopstellingen:

- Gelijk verdeelde statische belasting;
- Ongelijk verdeelde statische belasting;
- Gelijk verdeelde dynamische belasting.
 - Golvend;
 - Wisselend.

Voor en na een mechanische test worden er EL-metingen uitgevoerd en I-V curves opgemeten. Dit wordt gedaan om te vergelijken en conclusies te trekken uit de proef.

3.1.1 Gelijk verdeelde statische belasting

Misschien wel de simpelste en meest toegepaste opstelling. De gelijk verdeelde belasting wordt veroorzaakt door een doodgewicht, dit wordt op de PV-module gelegd om deze te stressen (Figuur 22). Deze testen worden aangezien als de factor voor mechanische sterkte van PV-modules. Om te slagen op de IEC 61215 worden de modules met 5400 Pa belast. In een voorbeeld van een standaard 60-cellige module, bedraagt dat een gewicht van 916 kg aan belasting. Is het verschil van het vermogensverlies <5 % dan is de module geslaagd voor de norm.



Figuur 22: Gelijk verdeelde statische belasting [34]

3.1.2 <u>Ongelijk verdeelde statische belasting</u>

Deze opstellingen (Figuur 23) worden vooral toegepast om sneeuwbelasting te simuleren. Omdat PV-modules onder een hoek worden gemonteerd, verschuift de sneeuw naar onder en zo ook het zwaartepunt van de belasting. Zo komt er een verhoogde belasting aan de onderkant van de module en visa versa voor de bovenkant van de module. Hierdoor is er een ongelijk verdeelde belasting.



Figuur 23: Ongelijk verdeelde statische belasting, Sneeuwbelasting [34]

3.1.3 Gelijk verdeelde dynamische belasting

In de selectie van deze opstellingen zijn er twee varianten. De zwellende en wisselende dynamische belasting. Het verschil tussen de twee ligt aan de zin van de belasting, zo is die bij de zwellende opstellingen altijd hetzelfde en bij de wisselende variërend. In Figuur 24 wordt een eerste opstelling voor dynamische belastingen weergegeven. Hierbij wordt een PV-module van vier cellen groot geklemd tussen een onderplaat en een pneumatischmembraam. Door de druk te verhogen/verlagen van het membraam wordt een golvende dynamische belasting aangelegd. Met deze opstelling kan ook een gelijkverdeelde statische test worden uitgevoerd. Nadeel aan de opstelling is dat deze enkel uniforme belastingen kan overbrengen en geen trek kan uitoefenen. Bovendien is de grootte van de PV-modules beperkt.



Figuur 24: Gelijk verdeelde golvende dynamische belasting, belasting aangebracht via een pneumatisch membraam [8]

Een tweede opstelling voor het uitvoeren van een dynamische belasting is een opstelling dat gebruik maakt van luchtdruk (Figuur 25). De PV-module wordt vastgeklemd in een afgesloten ruimte en vervolgens wordt deze ruimte gevuld met lucht onder druk. Deze opstelling kan golvende en wisselende dynamische belastingen en bijgevolg trek en druk belastingen uitvoeren. Nadelig is dat ook deze opstelling enkel uniforme belastingen kan aanleggen.



Figuur 25: Testopstelling met luchtdruk

Met de opstelling van Figuur 26 kunnen gelijk verdeelde wisselende dynamische testen worden uitgevoerd, alsook dynamische golvend en statische testen. De opstelling werkt met behulp van pneumatische cilinders en zuignappen. Door de zuignappen kunnen de cilinders de module zowel op druk als trek belasten. Bovendien kan door middel van de druk-/trekpunten te clusteren een gelijk verdeelde belasting nagebootst worden. Vergeleken met de andere opstellingen kan een testopstelling met cilinders en zuignappen de meeste vormen van belasting aanleggen en kan het belastingsoverbrengend oppervlak makkelijk worden aangepast door een andere grootte van zuignap te nemen. Een ander groot voordeel is dat dit soort opstelling makkelijk aanpasbaar is voor alle groottes van PV-modules, zo kan men bijvoorbeeld één enkele cel opspannen en hierbij één cilinder bedienen of een volledig paneel opspannen en alle cilinder gelijktijdig bedienen. Kort gezegd bieden testopstellingen met cilinders en zuignappen de meeste mogelijkheden.



Figuur 26: Gelijk verdeelde wisselende dynamische belasting, via pneumatische cilinders en zuignappen, zowel op druk als trek belast [9]

3.2 Brainstormsessie

Tijdens de literatuurstudie is er een brainstormsessie gehouden om meer inzicht te krijgen over de verwachtingen van imo-imomec en om een aantal ideeën te hebben voor een eerste eigen ontwerp. De sessie is gehouden tijdens een vergadermoment van ESE en verliep als volgt:

- a) De deelnemers kregen een probleem of onderwerp voorgeschoteld.
- b) Ze kregen een afgesproken tijd om na te denken.
- c) Als de tijd verstreken was, kwam iedereen één voor één aan het woord om hun ideeën uit te leggen.
- d) Vervolgens werden de ideeën geclusterd.
- e) Als laatste stap werden ze geëvalueerd.

Er werden tijdens de sessie meer vragen gecreëerd dan opgelost. Achteraf konden de meeste vragen worden beantwoord door middel van de literatuurstudie. De praktische vragen zoals wat is de grootorde van de doorbuiging, wat is de maximale kracht die een PVmodule kan verdragen, etc. moesten proefondervindelijk bepaald worden of opgezocht worden. Daarom is besloten om een prototype te maken, om de grootorde van de doorbuiging en kracht te bepalen van kleine PV-modules (3x3: een module van negen cellen groot).

3.3 Minimale eisen uit het vooronderzoek

Aan de hand van de bevindingen uit de literatuurstudie, brainstormsessie en enkele vergaderingen werden de eerste minimale eisen opgesteld waaraan de mechanische stresstestopstelling moest voldoen. De testopstelling kreeg volgende minimale eisen opgesteld:

• de testopstelling moet in staat zijn om statische en dynamische belastingen aan te brengen.

Uit verscheidende onderzoeken en de literatuur (hoofdstuk 2.1) werd aangetoond dat PV-modules statische belastingen ondervinden door bijvoorbeeld sneeuw en dynamische belastingen als gevolg van wind. Om dit te simuleren is het vanzelfsprekend dat de opstelling in staat moet zijn om statische en dynamische belastingen te kunnen uitvoeren.

• minimaal moet de testopstelling de IEC 61215 en IEC 62782 normen kunnen uitvoeren zoals beschreven in hoofdstuk 2.2.

Zoals vermeld in hoofdstuk 2.2 beginnen de meeste testen uit de literatuur vanuit deze normen. Daarom moet de testopstelling minimum de belastingen kunnen aanleggen zoals beschreven in de normen. De exacte nodige specificaties van de onderdelen werden later bepaald aan de hand van een prototype, beschreven in hoofdstuk 4.1.

• de testopstelling moet instelbaar zijn om uniforme en onverdeelde belastingen te kunnen opleggen(bv. puntbelasting).

Zoals eerder vermeld bij de eerste eis ondervinden PV-modules verschillende vormen van belasting. Deze belastingen zijn niet altijd uniform, maar kunnen ook onverdeeld zijn, zoals bijvoorbeeld een sneeuwbelasting die gedeeltelijk naar onder is gezakt. Daarom moet de opstelling instelbaar zijn om uniforme en onverdeelde belastingen te kunnen opleggen.

• Indien mogelijk moet de testopstelling testen kunnen uitvoeren in een klimaatkast binnen een temperatuurgebied van -40 tot 70 °C.

Deze eis was meer een wens en hangt af van de nodige kosten en mogelijkheden om alle apparatuur in dit temperatuurbereik te laten werken. Deze eis/wens is opgesteld uit de bevindingen van hoofdstuk 2.4 in de literatuurstudie. Onderzoeken hebben aangetoond dat breuken in PV-modules vergroten door thermische uitzetting en dat het inkapselingsmiddel van EVA een invloed heeft op de mechanische sterkte van PV-modules bij wisselende temperaturen.

• kracht en doorbuiging moeten opgemeten worden aan de hand van sensoren met een nauwkeurigheid van 1-5 %.

Om de belasting nauwkeurig te kunnen instellen en de doorbuiging te kunnen opmeten is het vanzelfsprekend dat de opstelling is uitgerust met de nodige sensoren. Deze sensoren moeten een nauwkeurigheid van 1-5 % van het totale meetbereik hebben.

• de testopstelling moet aanpasbaar zijn voor verschillende grootte van PV-modules.

PV-modules bestaan uit verschillende groottes gaande van één cel tot volledige panelen bestaande uit bijvoorbeeld 60 cellen. Om de invloed van verschillende groottes te onderzoeken moet de opstelling aanpasbaar zijn. De maximale grootte van PV-modules voor in de opstelling wordt later bepaald met behulp van vergelijken tussen verschillende groottes.

• jaarlijks onderhoud.

Dit was een algemene vraag van imo-imomec zelf om de opstelling onderhoudsvriendelijk te houden, zodat men niet na een aantal testen de volledige machine moet onderhouden.

Na het bestuderen van de verschillende testopstellingen in de literatuur werd ook besloten om de belasting uit te oefenen gebruikmakend van cilinders. Dit omdat cilinders de meeste vormen van belasting mogelijk maken en de grootte van het belastingsoverbrengend oppervlak makkelijk aanpasbaar is door het wisselen van zuignap grootte. De volgende stap was het uitvoeren van een marktonderzoek om een beslissing te nemen tussen het aankopen of zelf ontwerpen van de testopstelling en te bepalen op welke grootte van PV-modules er getest gaat worden. In het marktonderzoek wordt vervolgens gekeken wat het kostenverschil is tussen het aankopen van een opstelling met cilinders of het zelf ontwerpen van deze opstelling en wat de mogelijke cilinderopstellingen hierbij zijn.

3.4 Marktonderzoek

Wat is er beschikbaar op de markt? Dat is de vraag die dit hoofdstuk wil beantwoorden. Naast het zoeken van volledige mechanische stresstesters wordt er ook gekeken naar componenten zoals sensoren, cilinders en constructieonderdelen om een eerste schatting van kosten te krijgen. Vervolgens wordt er een vergelijking gemaakt tussen de verschillende groottes van PV-modules, door een kosten- en toepassingsanalyse uit te voeren. Als laatste wordt aan de hand van deze gegevens de beslissing gemaakt tussen het aankopen of zelf ontwerpen van een testopstelling en wordt er bepaald op welke grootte van modules er gaat getest worden.

3.4.1 <u>PSE AG mechanische stresstester</u>

PSE AG is een Duits bedrijf dat zich gespecialiseerd heeft op gebied van testopstellingen voor PV-modules. Ze hebben een aanbod van drie kant en klare mechanische stresstestopstellingen. Het werkingsprincipe van de drie opstellingen is gelijkaardig, ze werken allemaal op basis van pneumatische cilinders en zuignappen, net zoals eerder besproken bij Figuur 26. Het verschil tussen de drie ligt aan de hoeveelheid van cilinders en zo de maximale kracht die aangelegd kan worden.

De drie verschillende opstellingen zijn:

1. MLT12 (Figuur 27)

Dit is de kleinste en goedkoopste opstelling met een prijs van € 65.000. De testopstelling bestaat uit 12 cilinders met zuignappen die in staat zijn om uniforme/niet-uniforme statische en dynamische belastingen uit te voeren volgens de IEC-normen (hoofdstuk 2.2) voor PV-modules. De opstelling heeft een testruimte van 2,3 x 1,3 groot en kan een maximale drukkracht van 13.860 N (6930 Pa op 2m², 1155 N per cilinder) leveren en een maximale trekkracht van 11.100 N (5550 Pa op 2m²). Standaard is deze testopstelling niet geschikt om te werken binnenin een klimaatkamer, maar kan wel op vraag aangepast worden om binnen een bepaald temperatuurbereik te werken. Uiteraard verhoogt de kostprijs hierdoor.



Figuur 27: MLT12 [35]

2. MLT24 (Figuur 28)

Dit is de geavanceerde testopstelling van PSE en heeft een prijs van € 100.000. Net zoals de MLT12 kan deze opstelling uniforme/niet-uniforme statische en dynamische belastingen uitvoeren volgens de IEC-normen. Het verschil ligt in het aantal cilinders en de maximale kracht. De MLT24 gebruikt namelijk 24 cilinders en kan bijgevolg een maximale drukkracht van 27.720 N (13.860 Pa op 2m²) leveren en een maximale trekkracht van 22.200 N (11.100 Pa op 2m²). Net zoals de MLT12 is deze opstelling standaard niet geschikt om te werken binnenin een klimaatkamer, maar kan op aanvraag weer aangepast worden.



Figuur 28: MLT24 [35]

3. MLTSYS (Figuur 29)

De MLTSYS is de *full option* opstelling. Zo kunnen er drie volledige modules per keer getest worden en dat in combinatie met een klimaatkamer. Net zoals de MLT24 gebruikt deze opstelling 24 cilinders. Het nadeel aan deze opstelling is de lagere kracht die geleverd kan worden, namelijk 6000 Pa voor druk en trek.



Figuur 29: MLTSYS [35]

3.4.2 <u>Sensoren</u>

Er is marktonderzoek gedaan naar twee types van sensoren:

- verplaatsingssensoren;
- krachtopnemers / krachtsensors

3.4.2.1 Verplaatsingssensoren

Met deze sensor kan de doorbuiging van de module onder belasting gemeten worden. De data verschaft inzicht in hoe de PV-module beweegt onder belasting. Alsook kan de radius van doorgebogen PV-module bepaald worden. De radius kan berekend worden door de techniek van *circumcircle* toe te passen.

Naar het zoeken van gepaste verplaatsingssensoren is er beroep gedaan op de literatuurstudie. Zo werd er gekeken naar wat voor sensoren al worden toegepast bij bestaande mechanische stresstesters. Alsook werd er aandacht gespendeerd aan het temperatuurbereik van de sensoren, om de mogelijkheid van metingen uit te voeren tijdens gecombineerde testen met een klimaatkamer te garanderen.

Ultrasoon sensoren:

Deze techniek van afstandsmeting wordt vaak en veelzijdig toegepast en het heeft een makkelijk werkingsprincipe (Figuur 30). De sensor stuurt een ultrasoon geluidssignaal uit (rood). Dit signaal wordt gereflecteerd (groen) door het object (blauw) dat in het meetbereik komt. Het gereflecteerde geluid wordt terug ontvangen door de sensor. Dankzij ingebouwde software wordt de afstand tussen de sensor en het object berekend. De sensor doet een tijdsmeting tussen het gestuurd en ontvangen signaal en met behulp van de snelheid van het geluid kan een nauwkeurige afstand berekend worden.



Figuur 30: Werkingsprincipe van een ultrasoon sensor [36]

Een groot voordeel van het gebruiken van dit type van sensor is dat het mogelijk wordt gemaakt om metingen uit te voeren op transparante materialen.

Optische sensoren:

Dit soort van sensoren zijn niet meer weg te denken in de huidige industrie en het wordt ook toegepast bij verschillende mechanische stresstestopstellingen. Bijvoorbeeld de opstellingen van PSE zijn uitgerust met één of meerdere optische sensor(en). Een vaak toegepaste techniek voor het meten van afstanden is het laser triangulatie principe (Figuur 31).



Figuur 31: Laser triangulatie werkingsprincipe [37]

De sensor projecteert een laserlicht op het te meten object, het teruggekaatste licht wordt terug ontvangen door de sensor. Afhankelijk van de afstand is de hoek van het teruggekaatste licht anders. De ontvanger kan op deze manier de afstand berekenen.

Naast de sensoren die werken volgens dit principe is er ook gezocht naar een speciaal type van optische sensor. *Fiber Bragg Gratings* is een sensor die momenteel wordt toegepast als er nauwkeurige metingen moeten worden gedaan over een grote afstand en op meerdere plaatsen. De sensor bestaat uit drie hoofddelen:

- scannereenheid;
- optische kabel;
- FBG.

De scannereenheid (Figuur 32) stuurt een spectrum van licht uit door een optische kabel. De FBG "de sensor" zit in de kabel op een bepaalde plaats en laat al het licht door buiten één golflengte. Het licht van deze golflengte wordt terugkaatst en wordt ontvangen door de scannereenheid.



Figuur 32: Werkingsprincipe fiber bragg gratings [38]

De werking van een FBG-rekstrookje is te zien in Figuur 33. De FBG wordt vastgeplakt op het te meten object en bestaat uit verschillende schuifjes die op een gelijke afstand zijn geplaatst. Als het object wordt belast, verandert de afstand tussen de schuifjes alsook de golflengte die de FBG terugkaatst. Op deze manier kan de rek van het object worden bepaald.



Figuur 33: Werkingsprincipe fiber bragg gratings, rekstrookje [38]

<u>Overzicht:</u>

In Tabel 5 is een selectie van verplaatsingssensoren te vinden. Door dit overzicht werd een eerste idee van kostenraming en nauwkeurigheid in kaart gebracht.

Tabel 5: Overzicht verplaatsingssensore	n
---	---

Methode	Sensor	Nauwk.	Meetber.	Temp.	Prijs (€)	Extra
Ultrasoon	UM12-	>0,069	20-250	-40°C tot	€ 196	Metingen van
	1172211	mm	mm	+85°C		transparante
						materialen
	UM30-212112	>0,18	65 – 600	-40°C tot	€ 200	Dito
		mm	mm	+85°C		
Optisch:	FBG-SCAN	±40 Pm	/	/	€ 12.866	Dit is enkel de
Fiber Bragg	700/800					scanner
Gratings						
	SGK-01				€ 3.105	Dit zijn enkel de
						rekstrookjes
Optisch:	OD2-	2 µm	26 – 34	-20°C tot	€ 725	
laser	P30W04I0		mm	+60°C		
	OD1-	200 µm	50 – 250	-20°C tot	€ 570	
	B150F0AQ15		mm	+ 60°C		
	OD350-100T1	50 µm	250 – 450	/	€ 1.431	Oppervlak-
			mm			onafhankelijk

3.4.2.2 Krachtopnemers/krachtsensoren

Om de belasting te meten en te controleren wordt er bij bestaande stresstestopstellingen gebruik gemaakt van krachtsensoren. Het meten van de kracht kan op verschillende manieren, zoals te zien in Tabel 6 die een overzicht geeft.

Device type	Typical range of rated capacities	Typical uncertainty	Typical temperature sensitivity and operating range
		% of reading	% of reading per °C
Strain gauge load cells:			
Semiconductor gauges	0.01 N to 10 kN	0.2 to 1	0.02 (-40 °C to +80 °C)
Thin film gauges	0.1 N to 1 MN	0.02 to 1	0.02 (-40 °C to +80 °C)
Foil gauges	5 N to 50 MN	0.02 to 1	0.01 (-40 °C to +80 °C)
Piezoelectric crystal	1.5 mN to 120 MN	0.3 to 1	0.02 (-190 °C to +200 °C)
Hydraulic	500 N to 5 MN	0.25 to 5	0.05 (+5 °C to +40 °C)
Pneumatic	10 N to 500 kN	0.1 to 2	0.05 (+5 °C to +40 °C)
LVDT, capacitive,	10 mN to 1 MN	0.02 to 2	0.02 (-40 °C to +80 °C)
tuning-fork, vibrating			
wire			
Magnetostrictive	2 kN to 50 MN	0.5 to 2	0.04 (-40 °C to +80 °C)
Gyroscopic**	50 N to 250 N	0.001	0.0001 (-10 °C to +40 °C)
Force balance**	0.25 N to 20 N	0.0001	0.0001 (-10 °C to +40 °C)

 Tabel 6: Overzicht krachtomvormers met eigenschappen [39]

<u>Rekstrookje:</u>

Eén van de meest toegepaste krachtsensor is die wat werkt op basis van rekstrookjes. Dit komt door de lage aankoopkosten en de mogelijkheid tot een hoge nauwkeurigheid. Een basisopstelling van een sensor is te zien in Figuur 34.



Figuur 34: Basisopstelling van vier rekstrookjes in een krachtsensor [39]

Lineair variabele differentiaaltransformator (LVDT)

LVDT kan gebruikt worden in krachtsensoren om de verplaatsing te meten van een elastisch element in de plaats van rekstrookjes. De LVDT is in wezen een transformator die een wisselstroom (AC) uitgangsspanning als functie van de verplaatsing van een afzonderlijke beweegbare magnetische kern biedt. Het ontbreken van wrijving en de lage massa van de kern resulteert in hoge resolutie en lage hysterese, waardoor dit apparaat ideaal is voor toepassingen met dynamische meting.[39].

Overzicht:

In Tabel 7 is een selectie van krachtsensoren te vinden. Door dit overzicht werd een eerste idee van kostenraming en nauwkeurigheid in kaart gebracht.

Merk	Туре	Gevoeligheid	Meetbereik.	Temp.	Prijs (€)	Extra
HBM	U9C	1 mV/V	500 N	-10 tot	€ 530	
				+70°C		
	S2M	2 mV/V	500 N	-10 tot	€ 360	S-type
				+70°C		
	RSCC3/50KG	2 mV/V	50 kg	-10 tot	€ 386	S-type
				+70°C		
	RSCC3/100KG	2 mV/V	100 kg	-10 tot	€ 386	S-type
				+70°C		
HAEHNE	KMB12	1 mV/V	1 kN	-10 tot	€ 499	Kracht
				+70°C		metende
						bout
PHIDGETs	CZL301C	2,993 mV/V	100 kg	-10 tot	€ 41	S-type
				+40°C		

Tabel 7: Overzicht krachtsensors

3.4.3 <u>Cilinders</u>

Na het bestuderen van verschillende stressopstellingen en enkele vergaderingen was de beslissing genomen om de belasting uit te oefenen met behulp van cilinders. Dit omdat bijna alle soorten van belasting hiermee kunnen worden uitgeoefend. Zo is het mogelijk om een uniforme statische belasting aan te leggen door alle cilinders gelijktijdig te sturen en kan met behulp van zuignappen dynamische trek- en drukbelastingen worden uitgeoefend. Bovendien kunnen alle cilinders apart worden aangestuurd om zo een onverdeelde belasting aan te brengen en kan er zelf een puntbelasting worden aangebracht op eender welke plaats door één enkele cilinder aan te sturen. Om een idee te krijgen over de kosten van het zelf ontwerpen van een opstelling met cilinders wordt er gekeken naar verschillende cilinderopstellingen en wat hierbij de mogelijkheden en bijhorende kosten zijn. Deze resultaten worden later vergeleken met koopbare opstellingen. Voor het vergelijken van mogelijke cilinderopstellingen en bijhorende kosten wordt een onderscheid gemaakt tussen drie soorten:

- 1. dubbelwerkende pneumatische cilinders bediend door standaard ventielen;
- 2. elektrische cilinders;
- 3. dubbelwerkende pneumatische cilinders bediend door een proportioneel ventiel.

Bij het bekijken van de mogelijke onderdelen per opstelling wordt er ook altijd gekeken naar onderdelen die binnenin een klimaatkast kunnen werken en wat hierbij de extra kost is. Als laatste wordt er ook gekeken naar de mogelijke zuignappen.

3.4.3.1 <u>Dubbelwerkende pneumatische cilinders bediend door standaard ventielen</u>

De eerste en simpelste soort van opstelling voor cilinders zijn dubbelwerkende pneumatische cilinders bediend door standaard ventielen. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een 5/2 elektrisch ventiel die bij het verkrijgen van een signaal de cilinder zal uitsturen of naar binnen sturen. Het principe hiervan wordt weergegeven in Figuur 35. Indien het ventiel in de stand staat zoals in de figuur zal de cilinder naar binnen worden gestuurd. Bij het verkrijgen van een elektrisch signaal zal het ventiel schakelen naar de tweede stand en wordt de cilinder uitgestuurd.



Figuur 35: Dubbelwerkende cilinder bediend door elektrisch ventiel

Een groot voordeel van dit soort opstelling is de lage prijs, maar deze opstelling heeft ook een nadeel. Namelijk dat er geen automatische drukregeling mogelijk is. De druk kan enkel handmatig worden geregeld met een drukregelaar. Indien men dus een gewenste kracht wilt instellen, moet men steeds de drukregelaar handmatig aanpassen totdat een krachtsensor de gewenste kracht meet. Uiteraard is dit vrij onpraktisch, onnauwkeurig en kan men ook niet met behulp van een computersturing een gewenst programma laten uitvoeren, maar moet alles handmatig worden ingesteld. Een mogelijke oplossing voor dit probleem is een opstelling met een proportioneel drukregelventiel. Dit soort opstelling wordt verder besproken in hoofdstuk 3.4.3.3.

3.4.3.2 Elektrische cilinders

De tweede mogelijke opstelling is een opstelling met elektrische cilinders. Deze soort van cilinders werken door middel van een kogelschroefspindel aangedreven door een stappenmotor. Bij het verdraaien van de spindel wordt de stang van de cilinder in beweging gebracht. Het aansturen van dit soort van cilinders gebeurt op een andere manier dan bij gewone pneumatische cilinders. In plaats van ventielen gebeurt de aansturing bij elektrische cilinders door een controllereenheid. Deze controllereenheid kan gekoppeld en aangestuurd worden via een computer of PLC (Figuur 36). Het aansturen via computer werkt met behulp van het programma "*Festo configuration tool*" waarbij men eenvoudig de kracht, snelheid, versnelling, etc. kan instellen. Nadelig is dat het koppelen met een computer enkel gaat met één cilinder en indien de opstelling bestaat uit meerdere cilinders de aansturing moet gebeuren via een PLC of een andere elektronische sturing met de nodige in- en uitgangen.



Figuur 36: Opstelling EPCO cilinder [40]

Indien we elektrische cilinders vergelijken met pneumatische cilinders ligt het verschil vooral bij de mogelijkheden van positionering. Elektrische cilinders kunnen nauwkeurig eender welke positie innemen door de computersturing, terwijl pneumatische cilinders altijd volledig uit gaan met een bepaalde druk. Hierdoor bieden elektrische cilinders de mogelijkheid om een positiesturing te voorzien waarbij de doorbuiging van een PV-module om de zoveel tijd met een bepaald aantal wordt verhoogd. Een ander groot verschil ligt bij de nodige installatie. Elektrische cilinders hebben enkel een elektrische verbinding nodig om te werken, terwijl pneumatische cilinders een volledige pneumatische installatie nodig hebben en dus ook enkel kunnen werken op locaties met een pneumatische installatie.

Zoals eerder vermeld werken elektrische cilinders door middel van een kogelschroefspindel. Dit zou voor een probleem kunnen zorgen bij een dynamische trek/druk belasting van kleinere PV-modules waarbij er maar een doorbuiging van enkele mm tot 1 cm wordt verwacht. Dit doordat de kogelschroefspindel hierbij telkens over hetzelfde stuk gaat bewegen waardoor deze sneller versleten geraakt en de levensduur van de cilinder verlaagt. Dit is een belangrijk punt waarmee rekening moet gehouden worden bij het kiezen van de juiste opstelling.

3.4.3.3 <u>Dubbelwerkende pneumatische cilinders bediend door een proportioneel ventiel</u>

De derde en laatste mogelijke opstelling maakt gebruik van dezelfde cilinders uit de eerste opstelling, maar nu worden deze bediend door een proportioneel drukregelventiel. Dit ventiel is in staat om de druk automatisch aan te passen en constant te houden. Dit gebeurt aan de hand van ingebouwde klepjes die geregeld worden door een spannings- of stroomsignaal.

Een mogelijk type van deze soort ventielen is het VPPX type van Festo. Deze kan ingesteld worden via een computer en gestuurd worden door een PLC of andere elektronische sturingen met een analoge uitgang. Bovendien is er een mogelijkheid om voor een terugkoppeling te zorgen met een externe sensor. Op deze manier is het mogelijk om een krachtsensor te koppelen aan het ventiel en door middel van de sturing te zorgen voor een krachtregeling, waarbij het ventiel de druk aanpast totdat de gewenste kracht wordt gemeten door de krachtsensor. Vergeleken met opstelling 1 is het met deze opstelling wel mogelijk om de druk automatisch te regelen via een sturing.

3.4.3.4 Vergelijking tussen de verschillende opstellingen

Als eerste wordt er gekeken naar de minimale specificaties van slaglengte en leverbare kracht die de cilinders moeten bezitten. Dit gebeurt volgens gegevens uit de literatuur waarbij men testen uitvoerde die minimaal voldeden aan de IEC normen uit hoofdstuk 2.2. Als we kijken naar wat er in de literatuur al getest is geweest is te zien dat een volledig paneel van 60 cellen (10x6) in het midden begint te breken bij een doorbuiging van 50 mm en dat vervolgens de grootte van de scheuren proportioneel toenemen tot bij 95 mm doorbuiging (einde test) [41]. Een tweede test toont aan dat een PV-module van 10 cellen (5x2) breekt bij een doorbuiging van 45-50 mm bij een kracht van ± 750 N [23]. Als er terug wordt gekeken naar de koopbare opstellingen uit hoofdstuk 3.4.1 is te zien dat de MLT12 opstelling een maximale kracht van 1155 N per cilinder kan leveren. Aan de hand van deze gegevens wordt in het marktonderzoek gekeken naar cilinders met een maximale slaglengte tot 150 mm (afhankelijk van grootte PV-module) en een leverbare kracht van maximum ± 1000 N.

Voor het bepalen van mogelijke pneumatische en elektrische cilinders wordt beroep gedaan op de catalogus van Festo. Hieruit zijn er twee types van pneumatische cilinders geschikt, namelijk de DSBC en DSBF voor specifiek temperatuurbereik met verhoogde corrosiebescherming types. De specificaties (kracht, slaglengte, nauwkeurigheid, etc.) van beide types zijn hetzelfde en ligt het verschil bij het werkzaam temperatuurbereik. DSBFcilinders voor specifiek temperatuurbereik met verhoogde corrosiebescherming zijn cilinders die werkzaam zijn in een temperatuurbereik van -40 tot 80°C en kunnen dus zonder probleem binnenin een klimaatkast werken, terwijl cilinders van het DSBC type dit niet kunnen. De leverbare kracht van de cilinders wordt bepaald door de stangdiameter. Zoals vermeld werd er gekeken naar cilinders die maximaal een kracht kunnen leveren van ± 1000 N. Voor pneumatische opstellingen één en drie voldoen cilinders met een stangdiameter van 32 mm en 40 mm. Deze leveren respectievelijk een kracht van 805 N en 1256,66 N bij 10 bar (maximale druk voor de componenten). Tussen deze twee stangdiameters zit maar een prijsverschil van ± € 10. Voor de elektrische opstelling voldoet een elektrische cilinder van type EPCO 40 5P. Deze kan een maximale kracht van 650 N leveren, dit is bovendien de hoogste kracht van alle elektrische cilinders. Nadelig aan deze elektrische cilinders is dat deze niet binnen het temperatuurbereik van een klimaatkast kunnen werken.

In Tabel 8 worden de verschillende prijzen, inclusief nodige ventielen, controllereenheid en bekabelingen van de opstellingen weergegeven. De prijzen kunnen ± € 5 verschillen tussen een slaglengte van 50-150 mm en bij de pneumatische cilinders ± € 10 tussen de stangdiameters van 32 en 40 mm. De keuze van opstelling hangt vooral af van de verschillende mogelijkheden die ze bieden en wat hierbij de totale kost is. Zo is opstelling één relatief goedkoop ten opzichte van de andere opstellingen, maar is bij deze opstelling geen computersturing mogelijk en moet het regelen van druk/kracht handmatig gebeuren. Opstelling twee en drie hebben ongeveer dezelfde prijs, maar zijn de mogelijkheden verschillend. Zo leveren elektrische cilinders wel een lagere kracht, maar kunnen deze wel nauwkeurig positiegestuurd worden en hebben ze geen pneumatische installatie nodig. Opstelling drie kan dan weer nauwkeurig krachtgestuurd worden door middel van de koppeling tussen krachtsensor en proportioneel ventiel.

Opstelling 1 (pneumatische cilinders)	Kracht bij 10 bar	Totaalprijs voor 1 cilinder (€)
DSBC-cilinder	805 N bij stang 32 mm	207,40 ± 15
DSBF-cilinder voor specifiek temperatuurbereik	1256,66 N bij stang 40 mm	268,90 ± 15
Opstelling 2 (elektrische cilinders)		
EPCO 40 5P	650 N	1228 ± 5
Opstelling 3 (proportioneel ventiel)		
DSBC-cilinder	805 N bij stang 32 mm	1070 ± 15
DSBF-cilinder voor specifiek temperatuurbereik	1256,66 N bij stang 40 mm	1131,50 ± 15

Tabel 8: Prijsvergelijking tussen de verschillende opstellingen

3.4.3.5 <u>Zuignappen</u>

Na het bekijken van mogelijke cilinderopstellingen wordt er vervolgens gekeken naar de zuignappen. Deze zijn nodig om een trekbelasting uit te voeren. Ook voor de zuignappen wordt weer beroep gedaan op de catalogus van Festo. Hierbij is een zuignap van type ESS het meest geschikt. Deze worden gemaakt van siliconen en kunnen door dit materiaal werken in een temperatuurbereik van -30 tot 200 °C. Hierdoor zijn deze ook geschikt om te werken binnenin een klimaatkast. Voor de zuignapdiameter zijn er verschillende mogelijkheden gaande van 2 mm tot en met 200 mm met een maximale trekkracht gaande van 0,1 tot en met 1610 N. In Tabel 9 worden de kosten voor de zuignappen weergegeven die onderverdeeld zijn in verschillende grootten zoals gebruikt in de Festo catalogus.

Zuignap grootte	Maximale houdkracht (N)	Prijs (€)
1 (& 2 - 4 mm)	0,1-0,46	7
2 (¤ 6 - 8 mm)	1,1 – 2,3	7
3 (© 10 - 15 mm)	3,9 – 8,5	10
4 (୭ 20 - 50 mm)	16,3 – 105,8	10
5 (୭ 60 - 100 mm)	166,1 — 503,6	36 ± 13
6 (\& 150 - 200 mm)	900 - 1610	205 ± 15

Tabel 9: Prijsvergelijking tussen verschillende zuignappen

3.4.4 Constructie elementen

Naast het bekijken van sensoren en cilinderopstellingen wordt er als laatste gekeken naar de mogelijkheden van de constructie:

- aluminium extrusie profielen;
- staalprofielen;
- RVS-profielen.

Van deze drie constructie elementen is een kosten-batenanalyse gemaakt. Hier werd gekeken hoeveel het zou kosten om één en dezelfde constructie te bouwen uit elke soort van profiel. Het ontwerp was één van de eerste zelf bedachten constructies (Figuur 44). Zie 4.2.1 voor meer informatie over het ontwerp. Het aantal profielen en de daarbij horende lengtes zijn te zien in Tabel 10.

Tabel 10: Afmetingen profielen voor kosten-batenanalyse van constructie elementen

Lengte [m]	Aantal
1,522	4
0,740	11
0,755	8
0,255	1

3.4.4.1 <u>Aluminium extrusie profielen</u>

Veel opstellingen worden gebouwd uit aluminium extrusie profielen, omdat ze veelzijdig toegepast kunnen worden, makkelijk zijn om mee te bouwen en aanpasbaar zijn. De constructie kan door middel van simpele gereedschappen in elkaar gestoken worden. Een elektrische zaag, een meter en een set steeksleutels en men kan eraan beginnen. De profielen zijn duurder in aankoop t.o.v. profielen vervaardigd uit ijzer. Ook zal er naast de profielen ook nog verbindingsonderdelen gekocht moeten worden, zoals hoekverbindingen, bouten en moeren.

In Tabel 11 staan de onderdelen die nodig zijn om de constructie te maken. Samen met Tabel 10 kan een totaalprijs bepaald worden. Bij het nemen van een realistisch aantal verbindingselementen komt de prijs op:

Totaal:	€881.41	
Wieltjes:	€19,19 × #4 stuks = €76,76	+
Hoekbeugel:	€5,03 × #44 <i>stuks</i> = €221,32	
M8 glijblokjes:	€9,67 × #10 stuks = €96,70	
45 × 45 <i>L</i> :	€29,96 × #6 profielen + €50,19 × #1 profiel = €229,95	
45 × 90 <i>L</i> :	$€64,17 \times #4 \ profielen = €256,68$	

Tabel 11: Onderdelen aluminiumconstructie met hun prijzen

Onderdeel	Prijs/eenheid ¹
Profiel: 45mm x 90mm L x 2m	€ 64,17
45mm x 45mm L x 2m	€ 29,96
45mm x 45mm L x 3m	€ 50,19
M8 glijblokjes	€ 9,67
Hoekbeugel 45 x 45 x 45	€ 5,03
Wieltjes	€ 19,19

¹ Prijzen van de site rs-online.com

3.4.4.2 <u>Staalprofielen</u>

Bij het opzoeken van staalprofielen is er ook gekeken naar prijzen van laswerken en nabehandelingen om corrosie tegen te gaan. Uit de drie opties die onderzocht worden zijn deze profielen het goedkoopste in aankoop. Door middel van laswerken kan er een statische opstelling gecreëerd worden. Als nabehandeling is er gekeken naar het galvaniseerproces gevolgd door poederlakken. De ijzeren profielen zijn steviger t.o.v. de aluminium extrusie profielen, wat lijdt tot een kleinere doorbuiging van de profielen tijdens belasting of dit kan leiden tot het kiezen van een kleiner profielmaat.

In Tabel 12 staan de onderdelen en de behandelingen die nodig zijn om de constructie te maken. Samen met Tabel 10 kan de totaalprijs bepaald worden. Bij het nemen van een realistisch aantal uren voor het lassen komt de prijs op:

Totaal:	€1024,68	
Wieltjes:	€19,19 × #4 stuks = €76,76	+
Verzinken en poederlakken:	€500	
Lassen:	$\frac{\notin 50}{uur} \times 5 \ uur = \notin 250$	
$40 \times 40 \times 2$:	€12,55 × #8 profielen = €100,40	
$80 \times 40 \times 2$:	€24,38 × #4 profielen = €97,52	

Tabel 12: Onderdelen staalconstructie met hun prijzen

Onderdeel en bewerking	Prijs/eenheid ²
Profiel: 80mm x 40mm x 2mm x 2m	€24,38
40mm x 40mm x 2mm x 2m	€12,55
Lassen	€50/uur
Verzinken/poederlakken	€500
Wieltjes	€19,19

² Prijzen komen van sites en telefonisch contact: ijzershop.nl; rs-online.com en HVSi

+

3.4.4.3 <u>RVS-profielen</u>

Zoals de naam roestvaststaal het al zegt zijn deze profielen bestand tegen roestvorming desalniettemin moeten de profielen toch nog behandeld worden tegen aantasting. Door de constructie te coaten met een verflaag, is deze beter bestand tegen corrosie.

Door de tabellen Tabel 10 en Tabel 13 te combineren kan een kostenplaatje gecreëerd worden:

Totaal:	€918,04
Wieltjes:	€19,19 × #4 stuks = €76,76
Verf:	$\frac{\notin 4,60}{l} \times 5l = \notin 23$
Lassen:	$\frac{\notin 50}{uur} \times 5 uur = \notin 250$
$40 \times 40 \times 2$:	€44,10 × #8 profielen = €352,80
$80 \times 40 \times 2$:	€53,87 × #4 profielen = €215,48

Tabel 13: Onderdelen RVS-constructie met hun prijzen

Onderdeel en bewerking	Prijs/eenheid ³
Profiel: 80mm x 40mm x 2mm x 2m	€53,87
40mm x 40mm x 2mm x 2m	€44,10
Lassen	€50/uur
Verf: forever black varnish	€4,60/I
Wieltjes	€19,19

³ Prijzen komen van sites: ijzershop.nl; rs-online.com

3.4.5 Vergelijking tussen verschillende groottes van PV-modules

Na het bekijken van koopbare opstellingen en mogelijke onderdelen voor een eigen ontwerp werd er aan de hand van een vast budget, beschikbare apparatuur en informatie uit de literatuur onderzocht welke grootte van modules het meest interessant is om te testen. Dit start met het vergelijken van testmogelijkheden die de verschillende groottes van modules bieden. Vervolgens worden kostenvergelijkingen gemaakt tussen het aankopen van een opstelling of het zelf ontwerpen voor de verschillende groottes van modules. Als laatste wordt er ook gekeken naar wat de extra kost is indien de volledige opstelling binnenin een klimaatkast moet werken. Het vast budget heeft een waarde van € 10.000

De verschillende groottes van PV-modules kunnen we onderverdelen in drie groepen:

- 1. PV-modules tot en met een grootte van 2,00 x 1,00 m;
- 2. mini-modules tot en met 3 x 3 cellen;
- 3. PV-modules bestaande uit één cel.

Om een eerste idee te krijgen van de grote van opstelling en de nodige kracht per grootte van module wordt de IEC 61215 norm als basis genomen. In Figuur 37 worden de verschillende groottes en de nodige kracht weergegeven om te voldoen aan de norm. De berekende krachten worden gebruikt om te bepalen hoeveel cilinders er telkens minimum nodig zijn voor een eigen ontwerp.



Oppervlakte

Groot: 2,00 x 1,00 m = 2 m² Normaal: 1,65 x1,00 m = 1,65 m² Klein: 1,58 x 0,81 m = 1,28 m² 9 cellen: 9 x 0,024336 m² = 0,219024 m² 4 cellen: 4x 0,024336 m² = 0,097344 m² 1 cel: 156 x 156 mm = 0,024336 m² <u>Kracht (5400 Pa)</u> Groot: 10800 N Normaal: 8910 N Klein: 6910,92 N 9 cellen: 1182,73 N 4 cellen: 525,66 N 1 cel: 131,41 N

Figuur 37: Minimale kracht per grootte module

3.4.5.1 Full-size PV-modules

De eerste grootte van modules die wordt besproken zijn de PV-modules tot en met een grootte van 2,00 x 1,00 m (Figuur 38). Dit zijn de modules die in de praktijk worden gebruikt in zonne-installaties en geven dus de best link met de realiteit.



Figuur 38: Volledige PV-module [42]

De voor- en nadelen van het testen op deze grootte van modules zijn:

<u>Voordelen</u>

- link met de realiteit;
- alle mogelijke falen zijn testbaar;
- bevestigingssysteem op de opstelling kan dezelfde zijn als in de praktijk;
- de testopstelling kan als een dienstverlening worden aangeboden aan fabrikanten van PV-modules.

<u>Nadelen</u>

- grootte van opstelling en de bijhorende prijs van alle onderdelen;
- moeilijker om binnenin een klimaatkast te passen door de grootte;
- meer kracht nodig;
- hoge productiekosten voor grote PV-modules.

De koopbare opstellingen uit hoofdstuk 3.4.1 zijn gemaakt om te testen uit te voeren op deze grootte van modules. Deze hebben een minimumprijs van € 65.000 voor de basisopstelling. Aangezien er een vast budget van € 10.000 was voorzien voor de testopstelling is de mogelijkheid voor het aankopen van zo'n opstelling zeer klein.

Om vervolgens een idee te krijgen van de kost voor het zelf ontwerpen van een testopstelling voor PV-modules tot 2,00 x 1,00 m groot wordt er teruggekeken naar mogelijke componenten uit het marktonderzoek. Hierbij wordt er gekeken naar de drie mogelijke cilinderopstellingen uit hoofdstuk 3.4.3, de nodige sensoren en constructieonderdelen. In Tabel 14 wordt een ruwe schatting gegeven van de minimale totaalprijs voor de drie verschillende cilinderopstellingen indien men wilt voldoen aan de IEC61215 norm. De gemiddelde totaalprijs is samengesteld uit een gemiddelde van de prijzen voor de krachtsensoren, positiesensoren, cilinderopstellingen en constructieonderdelen uit de voorgaande hoofdstukken in het marktonderzoek. Hierbij wordt de prijs vooral bepaald door het aantal cilinders en krachtsensoren. De prijs van positiesensor, constructieonderdelen en sturing is voor alle opstellingen ongeveer hetzelfde en bedraagt gemiddeld € 1700.

Het aantal cilinders wordt bepaald uit de berekening in Figuur 37. Indien men een beter beeld wilt van de mechanische sterkte moet men uiteraard een hogere kracht kunnen aanleggen. Dit betekent natuurlijk een hoger aantal cilinder en dus een hogere kost. Voor een module van 2,00 x 1,00 m moet er minimum een kracht van 10800 N worden aangelegd op het volledig oppervlak om te voldoen aan de norm. De krachten in de tabel zijn bepaald bij een druk van 10 bar (maximale druk voor de componenten). Meteen is duidelijk dat de prijs voor het zelf ontwerpen lager ligt dan de € 65.000 voor de koopbare opstelling. Ook is te zien dat opstelling één het goedkoopst is, maar zoals beschreven in hoofdstuk 3.4.3.1 gebeurt de krachtregeling volledig handmatig. Door het nodige aantal cilinders zijn opstellingen twee en drie dus veel interessanter door hun automatische krachtregeling.

Aangezien het nodige aantal cilinders bijna verdubbeld en zo ook de kost bij het verkleinen van de cilinder, is het aangeraden om een cilinder van stangdiameter 40 mm te nemen voor deze grootte van modules. Bovendien is er een groot verschil in aantal cilinders en totale prijs tussen elektrische en pneumatische opstellingen. Dit komt door de lagere kracht die elektrische cilinders kunnen uitoefenen, waardoor er dus ook meer elektrische cilinders nodig zijn. Voor de onderdelen te laten werken in het temperatuurbereik van een klimaatkast komt er een prijs van $\pm \in 3000$ bij. Dit prijsverschil wordt vooral bepaald door de krachtsensoren die ook binnen het temperatuurbereik moeten kunnen werken.

Opstelling 1	Kracht (N)	Minimum aantal cilinders	Gemiddelde totaalprijs (€)
Cilinder stang 32	754	15	8111
Cilinder stang 40	1256	9	5636,6
Cilinder klimaatkast	1256	9	9430,1
Opstelling 2			
EPCO 40 mm	650	17	26503
Opstelling 3			
Cilinder stang 32	754	15	21050
Cilinder stang 40	1256	9	13409
Cilinder klimaatkast	1256	9	17193,5

Tabel 14: Minimale kosten voor eigen ontwerp voor full-size PV-modules

3.4.5.2 Mini-modules

De tweede grootte van modules die wordt besproken zijn de zogenaamde mini-modules (Figuur 39). Dit zijn PV-modules bestaande uit enkele cellen. Voor dit onderzoek wordt de grootte van deze mini-modules beperkt tot 9 cellen, omdat dit de maximale grootte van PVmodules is die imo-imomec makkelijk zelf kan produceren. Het zelf kunnen produceren van deze modules is een groot voordeel en zal uiteraard een rol spelen in het bepalen van de grootte van modules.



Figuur 39: Mini-module

De voor- en nadelen van het testen op deze grootte van modules zijn:

<u>Voordelen</u>

- kunnen zelf geproduceerd worden door imo-imomec en zijn dus goedkoper dan grote modules;
- alle mogelijke falen zijn nog steeds te testen;
- kan makkelijker binnenin een klimaatkast dan volledige modules;
- kleinere opstelling;
- minder kracht nodig;
- makkelijker om verschillende types van modules te testen, er is niet telkens een volledig nieuw paneel nodig;

Negatief

- geen echte link met de realiteit meer;
- bevestigingssysteem kan niet exact hetzelfde zijn als in de praktijk;
- kleinere doorbuiging vereisen nauwkeurigere sensoren.

Een groot nadeel van mini-modules ten opzichte van volledige panelen is dat er geen echte link met de realiteit meer is, men kan namelijk niet meer exact de invloed onderzoeken van een belasting zoals deze in de praktijk zou gebeuren. Maar voor dit probleem bestaat er reeds een oplossing die in de literatuur wordt toegepast, namelijk het gebruik maken van simulatiemodellen [23], [16]. Hierbij worden de resultaten van een mechanische stresstest op mini-modules gebruikt om simulatiemodellen te valideren. Eens deze gevalideerd zijn en kloppen gaat men deze modellen uitbreiden tot volledige panelen. Op deze manier kan men toch nog de invloed op een volledig paneel bepalen aan de hand van simulatiemodellen.

Net zoals bij de full-size PV-modules wordt er weer een prijsvergelijking weergegeven voor de verschillende opstellingen in Tabel 15. Om te voldoen aan de norm moet er voor 9 cellen een kracht van 1182,73 N worden uitgeoefend op het volledig oppervlak (0,22 m²). Dit is bijna 10 keer kleiner dan op de grote modules waardoor er dus ook veel minder cilinders nodig zijn. Kijkend naar het aantal cilinders zou één pneumatische cilinder al voldoende zijn om minimaal aan de norm te voldoen. Maar dan zou de cilinder wel met een oppervlak van 0,22 m² moeten duwen/trekken op de module om de druk van 5400 Pa te krijgen.

Om de mechanische sterkte het beste in kaart te brengen is het meest interessante om één cilinder per zonnecel te gebruiken. Hierdoor verhoogt het aantal cilinders wel naar negen voor een 3 x 3 module of naar vier voor een 2 x 2 module. De totale kost voor de opstelling zou dus in de buurt komen van de kost voor de grote modules (± € 13.000), maar zoals vermeld kan imo-imomec deze mini-modules zelf makkelijk produceren waardoor de kosten van het testen zelf veel lager liggen. Bovendien kan een veel hogere kracht worden aangelegd op de mini-modules dan gevraagd door de norm en kan men zelfs tot het breekpunt van een module testen.

Opstelling 1	Kracht (N)	Minimum aantal cilinders	Gemiddelde totaalprijs (€)
Cilinder stang 32	754	2	2554,8
Cilinder stang 40	1256	1	2137,4
Cilinder klimaatkast	1256	1	2558,9
Opstelling 2			
EPCO 40 mm	650	2	4618
Opstelling 3			
Cilinder stang 32	754	2	4280
Cilinder stang 40	1256	1	3001
Cilinder klimaatkast	1256	1	3421,5

Tabel 15: Minimale kosten voor mini-modules

3.4.5.3 <u>PV-modules bestaande uit één cel</u>

Als laatste wordt er gekeken naar PV-modules bestaande uit één cel (Figuur 40). Deze zijn uiteraard veel goedkoper te produceren en één cilinder is al voldoende voor de belasting uit te oefenen, maar deze modules bieden uiteraard ook veel minder testmogelijkheden.



Figuur 40: PV-module van één cel

De voor- en nadelen van het testen op deze grootte van modules zijn:

<u>Voordelen</u>

- nog goedkoper en kleinere testopstelling;
- één cilinder is voldoende om de belasting uit te voeren;
- nog minder kracht nodig;
- kan makkelijk binnenin een klimaatkast.

<u>Nadelen</u>

- bevestigingssysteem;
- niet alle mogelijke falen zijn te testen, bijvoorbeeld interconnecties tussen zonnecellen;
- sensoren moeten nog nauwkeuriger;
- geen onverdeelde belasting mogelijk.

In Tabel 16 wordt de prijsvergelijking weergegeven voor PV-modules bestaande uit één cel. Meteen is duidelijk dat voor elke soort opstelling één cilinder voldoende is om de nodige kracht te leveren, namelijk 131,41 N volgens de norm. Uiteraard zorgt dit voor een veel lager prijs voor de opstelling. Maar het grote nadeel van PV-modules bestaande uit één cel is dat niet alle mogelijke falen te testen zijn. Zo kan men al geen interconnecties tussen verschillende zonnecellen mechanisch stresstesten of een niet-uniforme belasting aanleggen tussen meerdere zonnecellen. Wel kan men goedkoper verschillende types zoals mono- en multi-kristallijne zonnecellen testen of zonnecellen bestaande uit een verschillend aantal busbars.

Opstelling 1	Kracht (N)	Minimum aantal cilinders	Gemiddelde totaalprijs (€)
Cilinder stang 32	754	1	2127,4
Cilinder stang 40	1256	1	2137,4
Cilinder klimaatkast	1256	1	2558,9
Opstelling 2			
EPCO 40 mm	650	1	3159
Opstelling 3			
Cilinder stang 32	754	1	2990
Cilinder stang 40	1256	1	3001
Cilinder klimaatkast	1256	1	3421,5

Tabel 16: Minimale kosten voor PV-modules bestaande uit één cel

3.5 Besluit uit het vooronderzoek

Na het vooronderzoek heeft er een vergadering plaatsgevonden om te bepalen tussen het aankopen of zelf ontwerpen van de testopstelling en op welke grootte van PV-modules er gaat getest worden. In Tabel 17 wordt een samenvatting gegeven van de belangrijkste vooren nadelen van de verschillende grootten van modules en de nodige kosten voor een opstelling opgebouwd met pneumatische cilinders en proportionele drukregelventielen (opstelling drie uit hoofdstuk 3.4.3). Deze opstelling wordt geplaatst in de tabel doordat deze de beste kosten-baten verhouding heeft van de drie cilinderopstellingen.

	Full-size panelen	Mini-modules	PV-modules met één cel
Voordelen	Link met de realiteit	Zelf produceerbaar door imo- imomec	Goedkopere en nog kleinere opstelling
	Alle mogelijke falen	Alle mogelijke falen	Eén cilinder is voldoende om de belasting uit te voeren
	Reëel bevestigingssysteem	Kleinere opstelling	Kan makkelijk binnenin een klimaatkast
	Opstelling Kan aangeboden worden als Dienstverlening	Minder kracht nodig	
Nadelen	Grootte opstelling en bijhorende prijs	Geen echte link met de realiteit meer	Bevestigingssysteem
	Moeilijker pasbaar in klimaatkast door grote opstelling	Geen reëel bevestigingssysteem	Niet alle mogelijke falen zijn te testen
	Meer kracht nodig	Kleinere doorbuiging vereisen nauwkeurigere sensoren	Sensoren moeten nog nauwkeuriger
	Hoge productiekost modules		Geen onverdeelde belasting mogelijk
Aankopen opstelling	65000	/	/
Kosten ontwerpen (€)	13409 (9 cilinders)	3001 (1 cilinder)	3001 (1 cilinder)
Kosten voor opstelling te laten werken binnenin klimaatkast(€)	17193,50 (9 cilinders)	3421,50 (1 cilinde r)	3421,50 (1 cilinder)

Tabel 17: Samenvatting vergelijking modules

Als eerste werd aan de hand van het marktonderzoek gekeken naar het prijsverschil tussen aankoopbare opstellingen uit hoofdstuk 3.4.1 en het zelf ontwerpen van de opstelling. Aangezien de koopbare opstellingen geschikt zijn om testen uit te voeren op PV-modules tot 2,00 x 1,00 m groot werd er gekeken naar prijzen uit hoofdstuk 3.4.5.1 voor de full-size PV-modules die in de praktijk worden gebruikt bij zonne-installaties. De koopbare opstellingen starten met een prijs van € 65.000 terwijl het zelf ontwerpen start bij een prijs van ± € 5600. Maar zoals vermeld bij hoofdstuk 3.4.3.1 op blz. 49 moet men bij de goedkoopste ontwerpopstelling de kracht handmatig regelen en is dit niet geschikt voor het aantal nodige cilinders. De pneumatische opstelling gebruikmakend van proportioneel drukregelventielen is een betere opstelling voor deze grootte van PV-modules. Voor 9 cilinders bedraagt deze opstelling een kost rond de € 13.500. De goedkoopste aankoopbare opstelling, de MLT12, bezit 12 cilinders. Indien er dus zelf een opstelling wordt ontworpen met 12 cilinders zou dit een totale geschatte kost hebben van ± € 17.500. Dit is een verschil van € 47.500 tussen het aankopen en zelf ontwerpen van deze opstelling. Aangezien dit groot prijsverschil is de beslissing genomen om zelf een stresstestopstelling te ontwerpen.

Na het beslissen van het zelf ontwerpen van de testopstelling werd gekeken naar de grootte van PV-modules waarop getest gaat worden rekening houdend met een vast budget van € 10.000. Een opstelling met 12 cilinders voor de grote PV-modules tot 2,00 x 1,00 m groot heeft een geschatte kost van € 17.500. In hoofdstuk 2.4 werd reeds aangetoond dat het uitvoeren van mechanische stresstesten in een klimaatkast zeker zijn nut heeft. Voor deze opstelling te laten werken binnenin een klimaatkast komt er nog kost van ± € 5000 bij. Bovendien heeft imo-imomec zelf geen klimaatkast ter beschikking waarin deze grootte van modules past. Ze hebben wel de mogelijkheid om een klimaatkast van het Technologiecentrum in Diepenbeek te gebruiken als diensteverlening. Als laatste komt bij elke test ook nog een productiekost voor de PV-module. Aangezien de nodige kost ver boven het budget zou liggen werd er vervolgens gekeken naar mini-modules en PV-modules bestaande uit één cel.

Eén van de grote nadelen van het testen op grote PV-modules was de productiekost voor de module. Dit nadeel wordt bij mini-modules en PV-modules bestaande uit één zonnecel gedeeltelijk weggewerkt doordat imo-imomec zelf makkelijk mini-modules kan produceren tot en met een maximale grootte van 9 cellen. Bovendien is het dus ook veel goedkoper om verschillende types (meerdere busbars, mono- en multi kristallijne, ...) van zonnecellen te testen, er moet namelijk niet telkens een volledig paneel opnieuw worden gemaakt. Als er wordt gekeken naar de geschatte kosten uit hoofdstuk 3.4.5 is een testopstelling voor PV-modules bestaande uit één cel het goedkoopste, namelijk een minimale kost van ± € 2100 voor de goedkoopste opstelling met alles inbegrepen. Nadelig aan PV-modules bestaande uit één cel is dat niet alle mogelijke falen en alle vormen van belasting getest kunnen worden.

Bij mini-modules zijn wel alle mogelijke falen en alle vormen van belasting te testen, maar zoals vermeld in hoofdstuk 3.4.5.2 op blz. 60 zijn hiervoor voor een mini-module van 9 cellen ook 9 cilinders nodig ofwel vier cilinder voor een mini-module van vier cellen. De geschatte prijs van een pneumatische opstelling voor mini-modules met proportioneel drukregelventielen voor 9 cilinders bedraagt ± € 13.000 met alles inbegrepen. Deze prijs ligt in de buurt van de prijs voor een opstelling voor grote PV-modules, maar door de veel lagere productiekost van mini-modules is het testen opzicht veel goedkoper. Bovendien heeft imoimomec zelf een klimaatkast ter beschikking waar mini-modules nog net in passen. Hierdoor kan er een opstelling worden ontworpen die werkt met deze klimaatkast.

Een groot nadeel van mini-modules ten opzichte van volledige panelen was dat er geen echte link met de realiteit meer is, maar zoals reeds beschreven in hoofdstuk 3.4.5.2 op blz. 61 kan dit gedeeltelijk worden opgelost door gebruik te maken van simulatiemodellen.

Aan de hand van deze analyses is de beslissing genomen om zelf een stresstestopstelling te ontwerpen voor mini-modules. Aangezien de geschatte prijs boven het budget kwam werd besloten om het aantal cilinders tot één cilinder te houden voor deze masterproef, maar het ontwerp moest wel zo gemaakt zijn dat uiteindelijk 9 cilinders erop passen. Bovendien was gevraagd om te proberen de opstelling te ontwerpen zodat deze gekoppeld kan worden aan de klimaatkast van imo-imomec, zodat de PV-modules zelf binnenin de ruimte van de klimaatkast zitten. In een latere fase zal men aan de hand van de bekomen resultaten simulatiemodellen valideren en deze vervolgens uitbreiden naar verschillende groottes van PV-modules.

Na de beslissing van het zelf ontwerpen van een stresstestopstelling voor mini-modules werd gekeken naar mogelijk onderdelen uit het marktonderzoek. Dit begon met mogelijke sensoren en cilinders. Om een idee te krijgen van het nodige meetbereik en nauwkeurigheid van de kracht- en verplaatsingssensoren en bovendien een idee te hebben over de nodige slaglengte en kracht van de cilinders werd besloten om een prototype uit te werken voor mini-modules van 9 cellen groot. Dit wordt verder besproken in hoofdstuk 4.1.

In hoofdstuk 3.4.3 op blz.48 werden verschillende mogelijke cilinderopstellingen besproken. Om zeker te weten welke opstelling het meest geschikt was voor de testopstelling werd contact opgenomen het bedrijf Festo en werden de verschillende opstellingen besproken met een specialist in cilinderopstellingen.

Voor de constructieonderdelen werd besloten om de volledige opstelling te ontwerpen met aluminiumprofielen. Dit omdat de profielen volledig aanpasbaar zijn en omdat op deze manier ook makkelijk een klemsysteem kon worden voorzien dat aanpasbaar is voor verschillende groottes van mini-modules.

Na het vooronderzoek werd overgegaan naar het ontwerpen van de opstelling. Dit wordt verder besproken in hoofdstuk 4.

Hoofdstuk 4: Ontwerpen

In vorig hoofdstuk werd het marktonderzoek uitgevoerd om te beslissen tussen het aankopen of zelf ontwerpen van een stresstestopstelling en op welke grootte van PVmodules er getest gaat worden. Hieruit is besloten om zelf een stresstestopstelling te ontwerpen voor mini-modules met de vraag de opstelling te ontwerpen zodat deze gekoppeld kon worden aan de klimaatkast van imo-imomec.

In dit hoofdstuk wordt het ontwerp beschreven. Dit start met een prototype waaruit de nodige specificaties van sensoren en cilinders werd bepaald. Vervolgens wordt de mechanische stresstestopstelling zelf beschreven. Dit wordt gevolgd door een kostenberekening van alle gebruikte componenten. Als laatste worden de sturingen bestaande uit een pneumatisch en elektronisch gedeelte beschreven.

In hoofdstuk 5 worden vervolgens de eerste meetresultaten van het prototype en de gerealiseerde stresstestopstelling besproken.

4.1 Prototype

Nadat besloten was om zelf een stresstestopstelling te ontwerpen moesten de juiste specificaties voor de sensoren en cilinders bepaald worden. De literatuur gaf al een eerste idee van wat de specificaties konden zijn voor de cilinders zoals beschreven in hoofdstuk 3.4.3.4 op blz.51. Deze doorbuigingen en bijhorende krachten zijn verschillend voor elke vorm van PV-module. Om zeker te zijn over de nodige specificaties voor de mini-modules die met de opstelling getest gaan worden, werd besloten om een prototype uit te werken voor een 3x3 module van 570 x 570 mm groot. Bovendien kon ook het klemsysteem worden uitgetest en konden de eerste statische belastingstesten plaatsvinden. Dit klemsysteem wordt uiteindelijk ook gebruikt in de gerealiseerde stresstestopstelling.

Het uitgewerkte prototype wordt weergegeven in Figuur 41. Hierbij rust de PV-modules op vier aluminium profielen en wordt deze vast geklemd door 6 spanklemmen. Deze spanklemmen kunnen in totaal een kracht van 6 kN weerstaan (1 kN per klem).



Figuur 41: Links: prototype; rechts: spanklem

Met het prototype werden verschillende statische doorbuigmetingen uitgevoerd op een 3x3 module en de glasplaat van een module. De doorbuiging werd telkens opgemeten met behulp van een digitale meetklok weergegeven in Figuur 42. Deze meetresultaten worden verder besproken in hoofdstuk 5.1.



Figuur 42: Digitale meetklok met houder

Voor het bepalen van de nodige specificaties werd gebruik gemaakt van de glasplaat. Deze had afmetingen van 570 x 570 x 3,1 mm en bestond uit verhard glas. Om de nodige kracht en maximale doorbuiging te bepalen werden verschillende gekalibreerde gewichten gestapeld op de glasplaat totdat deze brak. In Figuur 43 wordt weergegeven hoe deze test werd uitgevoerd. De glasplaat werd op dezelfde manier ingeklemd als de PV-module. Voor het overbrengen van de kracht werd gebruik gemaakt van de kop van een bout, deze had een diameter van 15 mm. Het oppervlak waarmee de kracht werd overgebracht werd zo klein genomen zodat de opgewekte spanning in dit punt zeker hoog genoeg was om het glas te breken. Deze bout werd in een verlengstuk gestoken met daar bovenop een houten plank. Op deze plank konden vervolgens de verschillende gewichten worden gestapeld en op deze manier bleef de grootte van het contactoppervlak constant ongeacht de vorm van de gewichten. Om de bout en het verlengstuk recht te houden en de meter enigszins te beschermen werd een tafeltje over het prototype geplaatst. Vervolgens werden verschillende gewichten op de plank geplaatst totdat de glasplaat brak.



Figuur 43: Meetproces glasplaat

De glasplaat brak uiteindelijk bij een gewicht van 60,439 kg (60 kg gekalibreerde gewichten + 0,439 kg stapelplank), omgerekend komt dit overeen met een maximale kracht van $F = m \cdot g = 60,439 \cdot 9,81 = 592,9 N$. Hierbij werd een maximale doorbuiging van 6,239 mm gemeten. Aan de hand van deze resultaten konden de juiste sensoren en cilinders worden bepaald.

Voor de krachtsensor werd teruggekeken naar de mogelijkheden uit het marktonderzoek in Tabel 7 op blz. 48. Aangezien het maximaal gewicht van 60,439 kg werd gekeken naar krachtsensoren met een meetbereik van 100 kg (1 kN). Er zijn drie krachtsensoren die hieraan voldoen, namelijk een S-beam sensor van HBM met een prijs van € 386, een kracht metende bout van HAEHNE met een prijs van € 499 en een S-beam sensor van PHIDGETs met een prijs van € 41. Door het grootte prijsverschil werd besloten om de S-beam sensor van PHIDGETs te nemen. Deze heeft wel een lagere nauwkeurigheid dan de andere twee, maar voldoet nog steeds aan de verwachtingen.

Ook voor de verplaatsingssensor werd weer teruggekeken naar de mogelijkheden uit het marktonderzoek in Tabel 5 op blz. 46. Hierbij werd gekozen voor de ultrasone sensor UM12-1172211 van SICK met een prijs van € 196. Deze heeft een meetnauwkeurigheid van 1 % en voldoet dus aan de gevraagde nauwkeurigheid van 1-5 %. De ultrasone sensor werd nog niet aangekocht gedurende deze masterproef. Op dit moment wordt er gebruik gemaakt van een positiesensor op de pneumatische cilinder die de verplaatsing van de stang opmeet. Aan de hand van deze meting wordt de doorbuiging van een PV-module bepaalt.

Voor de juiste cilinder en bijhorende opstelling te kiezen werd contact opgenomen met het bedrijf Festo. Uit deze bespreking werd ons een opstelling met pneumatische cilinders bedient door een proportioneel drukregelventiel aangeraden (opstelling drie uit hoofdstuk 3.4.3). Aangezien de maximale kracht van 592,9 N en de doorbuiging van 6,239 mm werd voor de pneumatische cilinder een normcilinder met stang 40 mm en slaglengte 50 mm genomen. Deze kan een drukkracht van 754 N en een trekkracht van 633 N bij 6 bar (1256 N / 1055 N bij 10 bar) leveren. Hiermee kan makkelijk worden voldaan aan de twee IEC-normen en kan er zelfs tot het breekpunt van de module worden getest. Bovendien is deze kracht bijna hetzelfde als de leverbare kracht van de cilinders uit de koopbare MLT12 opstelling (hoofdstuk 3.4.1), deze was namelijk 1155 N. De volledige pneumatische opstelling wordt verder besproken in hoofdstuk 4.4.1.

4.2 <u>Mechanische stresstestopstelling</u>

De ontwerpfase van de stresstestopstelling liep gedeeltelijk parallel met het vooronderzoek. Niet omdat de beslissing toen al gekend was tussen het aankopen of zelfontwerpen maar om een betere kostenanalyse te maken. Het heel ontwerpproces wordt hier aangehaald vanaf de eerste ideeën tot de huidige opstelling.

4.2.1 Eerste ontwerp

De aanleiding om een eerste eigen ontwerp te maken kwam tijdens het vooronderzoek. Op dit moment waren de mogelijkheden bekend en moesten er belangrijke beslissingen genomen worden. Een belangrijke factor voor deze beslissing was de kostprijs. Wat de kosten-batenanalyse en marktonderzoek startte.

Met behulp van een brainstormsessie (3.2) was het de bedoeling om op ideeën te komen voor dit eerste ontwerp. Het resultaat hiervan samen met de informatie van de opstellingen reeds toegepast in het veld kwam Figuur 44 als ontwerp uit de bus. Het ontwerp bezit nog maar enkel de constructieonderdelen en diende als berekeningsmodel voor de analyse voor de keuze van constructiemateriaal. Het ontwerp was voorzien voor het testen op minimodules van drie op drie cellen groot. Verder in het ontwerpproces kreeg dit ontwerp de naam "verticale opstelling", omdat de belasting in een verticale richting werkte. De belasting zou worden aangelegd door middel van het zuiger/zuignap principe (zie 3.1.3). Het vastklemmen van de PV-module was nog niet voorzien in het ontwerp. Deze opstelling zou gecombineerde testen kunnen uitvoeren, want de opstelling zou in de klimaatkast van het verpakkingscentrum passen. Alleen zou elk onderdeel van de opstelling dan tegen deze barre omstandigheden bestand moeten zijn.



Figuur 44: Het ontwerp voor de kosten-batenanalyse.
4.2.2 <u>Tussenontwerpen tot resultaat</u>

Na het marktonderzoek is gebleken dat het eerste ontwerp niet ideaal is voor de gecombineerde testen met een klimaatkast. Omdat elk onderdeel van de opstelling dan bestand moest zijn tegen het brede temperatuurbereik. Er bestaan onderdelen die binnen de nodige specificaties vallen, maar deze zijn duur t.o.v. de standaard onderdelen die binnen een normaal temperatuurbereik worden gebruikt. Het bedrijf ZWICK ROELL een fabrikant van versnelde mechanische testapparatuur, raden ons aan om zoveel mogelijk onderdelen buiten de klimaatkast te plaatsen. Hun eigen thermomechanische opstellingen zijn zo gebouwd dat de cilinders en meeteenheden buiten de klimaatkast vallen en zo niet bestand moeten zijn tegen het fel variërend temperatuurbereik. Op imo-imomec staat een klimaatkast (Figuur 45), waar ze talloze proeven mee uitvoeren alsook een gecombineerde test waar men een zonnesimulator aan de klimaatkast koppelen. Dit doen ze door de deur van de klimaatkast te ontkoppelen en de zonnesimulator er tegenop te klemmen, zodat er een afsluiting plaatsvindt. Het werkingsprincipe van dit systeem diende als inspiratiebron voor de volgende ontwerpen.



Figuur 45: Klimaatkast

Na het grondig opmeten van de klimaatkast kon het ontwerpen van een nieuwe opstelling beginnen. Na talloze schetsen was het nieuwe idee om de belastingsrichting horizontaal te richten in plaats van verticaal. Eén van de betere schetsen werd vervolgens uitgetekend in een CAD-tekenpakket (Figuur 46). De opstelling zou zoals de zonnesimulator tegen de klimaatkast gemonteerd worden en door middel van isolerend materiaal een extensie vormen van de klimaatkast. In deze extensie zouden de mechanische testen dan plaatsvinden. Het aanbrengen van mechanische belasting gebeurd op dezelfde manier als het eerste ontwerp, met uitzondering dat de stangen van de cilinders door het isolerend materiaal moeten. Het frame werd getekend zodat er genoeg plaats is voor uitbreidingen naar meerder cilinders, want er was beslist om de opstelling eerst te voorzien van één cilinder. De opstelling is mobiel door middel van wieltjes, zo kan de opstelling met gemak verplaats worden. Het klemsysteem voor de modules was hetzelfde als het geteste prototype uit hoofdstuk 4.1. Net zoals het frame was het klemsysteem opgebouwd met aluminium profielen zodat deze aanpasbaar is voor verschillende groottes van PV-modules.



Figuur 46: Verder uitgewerkt ontwerp van de horizontale opstelling

Om de module makkelijk te vervangen werd er gedacht aan een schuifsysteem aan de zijkant van de opstelling (Figuur 47). Standaard wieltjes voor aluminium profielen konden gebruikt worden om een schuif naar buiten te rollen. Dit idee is echter niet doorgegaan omdat het ontwerp onnodig complex werd gemaakt. De wieltjes zouden al de krachten moeten opvangen, waaraan getwijfeld werd.



Figuur 47: Horizontaalontwerp in detail

De klimaatkast van imo-imomec is van de fabrikant "WEISS TECHNIK" en voor meer informatie, opties en advies te winnen voor het ontwerp is er contact opgenomen met de firma. Een product specialist van de Belgische tak is langsgekomen om een beterzicht te krijgen over de situatie. Hij adviseerde ons om te werken met isolatiesandwichpanelen van een minimale dikte van 80 mm. De klimaatkast zou de extra ruimte ook met gemak geklimatiseerd krijgen. ArcelorMittal fabrikant van isolatiesandwichpanelen sponseerde het project, door de panelen te schenken. De opstelling met de isolatiepanelen is te zien in Figuur 48. Na berekeningen van de doorbuiging van de profielen is het ontwerp aangepast (Figuur 49). Zo had een 45 x 45 aluminium profiel van 785 mm lang (langste belastingsdragend profiel in het ontwerp) een doorbuiging van 0,188 mm bij een kracht van 600 N en een 90 x 45 aluminium profiel maar een doorbuiging van 0,027 mm bij dezelfde belasting. Om die reden werd voor alle belastingsdragende profielen gekozen voor een profiel van 90 x 45, om de doorbuiging van de profielen te minimaliseren en zo de foutmarge van de afstandsmeting te verminderen.



Figuur 48: Horizontaal ontwerp verder uitgewerkt met verbindingsstukken en isolatiemateriaal



Figuur 49: Finaal ontwerp

De belastingsas (Figuur 50) zal gelagerd worden door middel van een gleilager, wat zich in de figuur aan de rechterkant van het isolatiepaneel bevindt. Om de doorgang af te dichten zal er een dichtingsring, linkerkant van het paneel en in het rood, gebruikt moeten worden. De afdichtingsring zou twee doorgangen moeten sperren, degene rond de as en die van de behuizing. Er is ook speciaal een uitsparing voorzien in het verlengstuk van de as om de vacuümleiding tot aan de zuignap te leiden. De technische tekeningen van de maakonderdelen staan in Bijlage A.



Figuur 50: Subassemblage belastingsas; licentie KeyShot van promotor.

4.3 Kostenberekening

In dit hoofdstuk wordt een uiteenzetting gegeven van alle gebruikte componenten in de finale opstelling en hun bijhorende kosten. De componenten kunnen onderverdeeld worden in:

- sensoren;
- constructieonderdelen;
- pneumatische installatie;
- sturing en bijhorende elektronische componenten.

Als eerste komen de gebruikte sensoren aan bod weergegeven in Tabel 18 met hun specificaties en kosten. Deze bestaan op dit moment enkel uit de krachtsensor. Zoals eerder vermeld werd de ultrasone verplaatsingssensor nog niet aangekocht.

Tabel 18: Kosten sensoren

Sensor	Туре	Nauwkeurigheid /gevoeligheid	Meetbereik	Temperatuur	Prijs (€)
Krachtsensor: S-beam	PHIDGETs CZL301C	2,993 mV/V	100 kg	-10°C tot 40°C	41
				Totaal:	41

Totaal:

902,4

Als tweede wordt in Tabel 19 een uiteenzetting gegeven van de gebruikte constructieonderdelen bestaande uit aluminiumprofielen, hoekprofielen, klemmen en wieltjes.

Tabel 19: Kosten constructieonderdelen						
Onderdeel	Aantal	Totaalprijs (€)				
Profiel 45 x 45L Nut 10	32 m (10 x 2 m en 4 x 3 m)	331,52				
Profiel 45 x 90L	8 m (4 x 2 m)	167,76				
Hoekprofiel 45	98	244,02				
Wieltjes 75 mm	4	29,04				
Zaagwerk	1	35,50				
Klemmen	6	94,56				

Tabel 19: Kosten constructieonderdelen

Als Derde wordt in Tabel 20 een uiteenzetting gegeven van alle gebruikte componenten van de pneumatische installatie.

Onderdeel	Туре	Aantal	Totaalprijs (€)
Positietransmitter	SDAT-MHS-M50-1L-SA-E-0.3-M8	1	127,99
Verbindingskabel	NEBU-M8G4-K-5-LE4	1	9,01
Proportioneel		1	420.67
drukregelventiel	VFFX-01-L-1-1-0L1011-51	Ŧ	430,07
Adapter	NEFC-M12G5-0.3-U1G5	1	129,97
Normcilinder	DSBC-40-50-T-PA-N3	1	109,66
Debietregelaar	GRLA-1/4-QS-8-RS-D	2	23,64
Magneetventiel	VUVG-L14-B52-T-G18-1R8L	1	67,48
Verbindingskabel	kabel NEBU-M8G3-K-2.5-LE3		10,02
Vacuümzuiger	ESS-100-SS	1	33,55
Programmeerkabel	VAVE-P8-VPS	1	57,15
Duoloiding	NEDU-L1R2-V9-M12G8-E-LE5-5R1-LE3-	1	E2 66
Dubleiding	5R2	Ŧ	55,00
Voetbevestiging	HNC-40	1	8,64
Persleiding	PUN-H-8X1,25-BL	1	54
Koppelstukjes	QS-1/8-8-I en U-1/8	1	22,32
		Totaal:	1137,76

Tabel 20: Kosten pneumatische installatie

Als vierde wordt in Tabel 21 een uiteenzetting gegeven van de kosten voor de sturing en bijhorende elektronische componenten.

Totaal:

3,94 210,94

Onderdeel	Prijs (€)
Arduino Uno met USB-kabel + 9V voeding	30,90
Power Supply 24V/1.75A	66,95
Noodstop	25,15
safety relais	84

Tabel 21: Kosten sturing en elektronische componenten

Din Rail

Als laatste wordt in Tabel 22 een uiteenzetting gegeven van de totale kosten voor de gerealiseerde opstelling. Deze bedroeg een totaalprijs van € 2292,10.

Tabel 22: Totale kosten van de finale opstelling

Component	Prijs (€)
Sensoren	41
Constructieonderdelen	902,40
Pneumatische installatie	1137,76
Sturing en elektronische componenten	210,94
Totaal:	2292,10

4.4 <u>Sturingen</u>

Na het bespreken van het ontwerp wordt er nu dieper ingegaan op de aansturingen van de opstelling. Deze kunnen onderverdeeld worden in twee gedeeltes, namelijk een pneumatisch en een elektronisch gedeelte. Als eerste komt het pneumatisch gedeelte aanbod waarbij er dieper wordt ingegaan op de verschillende pneumatische componenten, als tweede wordt het elektronisch gedeelte besproken bestaande uit de verschillende aansluitingen met de Arduino en ten laatste wordt het interface besproken.

4.4.1 <u>Pneumatische gedeelte</u>

Zoals vermeld wordt de kracht uitgoefend door middel van een pneumatische cilinder aangestuurd door een proportioneel drukregelventiel. De keuze van deze pneumatische opstelling is gekomen uit besprekingen met het bedrijf Festo. Hierbij werden de verschillende opstellingen uit hoofdstuk 3.4.3 besproken en werd de opstelling gebruikmakend van een proportioneel drukregelventiel aangeraden voor onze toepassing. Dit omdat opstelling 1 geen automatische drukregeling heeft en dus ook geen automatische krachtregeling toelaat. Door de kleine doorbuiging van 6,239 mm bij de 3 x 3 module kan de kogelschroefspindel van een elektrische cilinder uit opstelling twee problemen ondervinden, omdat deze bij trek/drukbelastingen steeds over hetzelfde stukje heen en weer gaat bewegen en zo sneller versleten kan geraken. Dit verlaagt uiteraard de levensduur van de elektrische cilinder. Uiteindelijk werd opstelling drie met het proportioneel drukregelventiel aangeraden, omdat deze een nauwkeurige krachtregeling toelaat en dus perfect geschikt is voor de stresstestopstelling. Dit systeem werd bovendien gedemonstreerd met een testopstelling.



De pneumatische installatie met bijhorend schema van de finale opstelling wordt weergegven in Figuur 51 en kan opgedeeld worden in vier componenten.

Figuur 51: Pneumatische installatie met bijhorend schema

Als eerste is er het 3/2 proportioneel drukregelventiel VPPX. Dit is het belangrijkste onderdeel van de pneumatische installatie en maakt een druk- of krachtsturing mogelijk. Het ventiel werkt door middel van ingebouwde klepjes die de druk regelen en vervolgens constant houden op de ingestelde waarde.

Het programmeren van dit ventiel gebeurt aan de hand van het programma '*Festo Configuration Tool*'. Hierbij is het mogelijk om het ventiel intern of extern te regelen. Bij een interne regeling kan men de druk rechtstreeks regelen met een spannings- of stroomsignaal. Een spanningssignaal van 0-10 V of een stroomsignaal van 0-20 mA of 4-20 mA komt hierbij overeen met een druk van 0-10 bar. Bij een externe regeling kan er een krachtsensor worden gekoppeld aan het ventiel en zal deze constant de druk regelen om de ingestelde kracht te behouden.

Als tweede is er een 5/2 magnetisch bistabiel ventiel van het type VUVG verbonden met het proportioneel drukregelventiel. Aangezien het proportioneel drukregelventiel een 3/2 ventiel is, kan het ventiel enkel in één richting de cilinder regelen. Dit betekent dat 78

bijvoorbeeld enkel de drukkracht bij de uitgaande beweging geregeld kan worden, maar niet de trekkracht bij de ingaande beweging van de cilinder. Om een trekkracht te kunnen regelen zou men dus handmatig de leiding moeten omdraaien. Om te zorgen voor een automatische regeling tussen een trek- of drukbelasting wordt er gebruik gemaakt van het 5/2 magnetisch ventiel.

Als derde zijn er twee debietregelaars om het debiet te kunnen regelen waarmee de cilinder wordt gevuld en als laatste komt de cilinder verbonden met het magnetisch ventiel. Deze cilinder is van het type DSBC met een doorlopende stang van diameter 40 mm, slaglengte van 50 mm en kan een maximale kracht van 1256,66 N leveren bij een druk van 10 bar. Op deze cilinder is vervolgens de krachtsensor, positiesensor en zuignap gemonteerd. De krachtsensor kan via een terugkoppeling verbonden worden met het proportioneel drukregelventiel.

4.4.2 <u>Elektronisch gedeelte</u>

Om de componenten van de pneumatiek aan te sturen en de sensoren te lezen via de Ardiuno UNO zijn er enkele elektronische schakelingen nodig. Voor het compleet elektrisch schema zie Bijlage B.

4.4.2.1 <u>Proportioneel drukregelventiel VPPX</u>

De aansluitingen voor het proportioneel drukregelventiel zijn te zien in Tabel 23 en in Figuur 52.

Pin	Kabelkleur	Klemaanduiding	
1	Wit (WH)	Digitale communicatie	
2	Bruin (BN)	+24V dc-voedingsspanning	
3	Groen (GN)	Analoge input W- (-setpoint)	
4	Geel (YE)	Analoge input W+ (+setpoint)	
5	Grijs (GY)	Digitale communicatie	
9	Roze (PK)	Analoge output X (werkelijke waarde)	
7	Blauw (BU)	0V DC of GND	
8	Rood (RD)	Analoge input Xext (externe werkelijke waarde)	

Tabel 23: Pinaansluitingen proportioneel drukregelventiel VPPX



Figuur 52: Pinaansluitingen proportioneel drukregelventiel VPPX

4.4.2.2 Magnetisch bistabiel ventiel VUVG

De toestand van het ventiel wordt geschakeld door middel van twee elektropneumatische contacten. Deze hebben echter een voedingsspanning van +24V DC nodig, iets wat de Arduino niet kan leveren, daarom is volgend schema (Figuur 53) noodzakelijk om toch het ventiel te kunnen aansturen.



Figuur 53: Elektrisch schema magneetventiel voor één contact

4.4.2.3 Positiesensor SDAT

De sensor heeft 24V DC voeding nodig en geeft een 4 tot 20mA signaal als uitgang. De analoge ingangen van de Arduino UNO hebben echter een bereik van 0V tot 5V. Daarom werd een weerstand parallel met de aarding gehangen (Figuur 54) om in dit meetbereik te vallen. Aan de hand van de Wet van Ohm kan de waarde bepaald worden van deze weerstand. Er is gekozen voor een weerstandswaarden van 220 Ohm om niet boven de maximale 5V te komen.



Figuur 54: Elektrisch schema positiesensor

Omdat de Arduino een 10-bit analoog digitaal convertor (ADC) heeft is de maximale resolutie ca. 5mV. Echter is de kleinste verandering van de SDAT-positiesensor na de schakeling 3,6mV. Dus de sensor is nauwkeuriger dan wat de Arduino kan binnenlezen, wat leidt tot een nauwkeurigheid verlies. Dit probleem kan worden opgelost door gebruik te maken van een 12-bit ADC, hierdoor kunnen stappen van ca. 1,2mV gelezen worden.

4.4.2.4 Instellen van een setpoint

Voor de regelkring ingang te sturen moet er eerst een setpoint gegeven worden. Om van het PWM-signaal (Pulsbreedtemodulatie) naar een analoog signaal te gaan is volgend schema nodig (Figuur 55). Hierbij wordt het PWM-signaal omgezet in een 0-5 V analoog signaal, dat ingelezen kan worden door het proportioneel drukregelventiel.



Figuur 55: Elektrisch schema setpoint instellen

4.4.2.5 <u>Terugkoppeling krachtsensor</u>

Om het signaal van de krachtsensor in te lezen met het VPPX-ventiel zou het signaal versterkt moeten worden. Het schema en de implementatie van deze versterking heeft de persoon voor technische ondersteuning van imo-imomec voor ons uitgewerkt. Zie Bijlage B voor het schema.

4.4.3 Interface

Als interface en communicatietool voor de Arduino is gebruik gemaakt van een extensie van LabView. MakerHub LINX laat het toe om in de betrouwde LabView omgeving Arduino code te fabriceren. De code moet niet geschreven worden maar wordt "achter de schermen" voor u gemaakt aan de hand van een zelfgemaakt blokschema in LabView. Zie Bijlage C voor het interface en in Figuur 56 het blokschema.



Figuur 56: Blokschema LabView MakerHub LINX

Hoofdstuk 5: Resultaten

In vorig hoofdstuk werd de ontwerpfase van de testopstelling beschreven. Dit begon met een prototype om de nodige specificaties voor sensoren en cilinders te bepalen. Ook konden de eerste metingen worden uitgevoerd met dit prototype. Vervolgens werd het ontwerpproces beschreven tot de finale opstelling met bijhorende kosten en sturingen.

In dit hoofdstuk worden de eerste meetresultaten van het prototype en de gerealiseerde opstelling besproken. De meetresultaten van het prototype bestaan uit een statische belasting uitgevoerd met verschillende gewichten op een 3x3 module en de glasplaat van een module. De eerste meetresultaten van de gerealiseerde opstelling bestaan uit statische drukbelastingen uitgevoerd door de pneumatische cilinder op een 2 x 2 module en een vergelijking tussen verschillende aanstuurtypes.

In volgend hoofdstuk wordt de scriptie afgesloten met een besluit en vooruitblik naar toekomstige uitbreidingen.

5.1 <u>Buigtesten prototype</u>

De eerste metingen werden uitgevoerd met behulp van het prototype, beschreven in hoofdstuk 4.1. Deze eerste meting bestond uit een simpele statische belasting, uitgevoerd met verschillende gekalibreerde gewichten van 1; 1,5; 3; 5; 6; 8 en 11 kg groot. Het contactoppervlak dat de kracht uitvoerde was de onderkant van het gekalibreerd gewicht van 1 kg. Deze had een diameter van 47,96 mm. Op dit gewicht werden vervolgens de verschillende gewichten gestapeld zodat het contactoppervlak steeds hetzelfde bleef, dit tot een totaalgewicht van 11 kg (Figuur 57).



Figuur 57: Meting met het prototype

De metingen werden eerst uitgevoerd op mono-kristallijne 3 x 3 module van 570 x 570 x 7,14 mm groot. Deze module was opgebouwd als een glas-glas-module. Dit betekent dat er aan beide zijden van de module een glasplaat is. Vervolgens werden dezelfde metingen uitgevoerd op de glasplaat van een module, deze was 570 x 570 x 3,1 mm groot en bestond uit verhard glas. Voor het opmeten van de doorbuiging werd gebruik gemaakt van de

digitale meetklok weergegeven in Figuur 42 op blz. 68. De metingen werden uitgevoerd bij een temperatuur van 19,8 °C.

In Figuur 58 worden de meetresultaten weergegeven. Meteen is duidelijk dat de doorbuigingen van de module en de glasplaat lineair verlopen. Ook is er een duidelijk verschil merkbaar tussen de doorbuigingen van de glasplaat en de 3 x 3 module. Aangezien de glasplaat van een PV-module dient om de module te versterken en de maximale doorbuiging van de PV-module bepaalt, kunnen de metingen van de glasplaat worden aangezien als doorbuigingsmetingen van een PV-module bestaande uit één glasplaat en geven de meetresultaten in feite het verschil weer tussen een glas-glas-module (3 x 3 module) en een enkel-glas-module. Hieruit kan geconcludeerd worden dat een PV-module opgebouwd als een glas-glas-module beduidend sterker is dan een PV-module met maar één glasplaat. Zo had de glasplaat 4,2 keer (1,898 mm t.o.v. 0,411 mm) meer doorbuiging bij het maximaal gewicht van 11 kg. Dit verschil komt vooral door de verschillende diktes van de modules. Zo had de glasplaat een dikte van 3,1 mm terwijl de 3 x 3 module een dikte van 7,14 mm had.



Figuur 58: Meetresultaten prototype

Buiten het opmeten van de maximale doorbuiging bij een bepaald gewicht werd ook telkens de doorbuiging opgemeten bij verschillende posities om een volledig beeld te krijgen van de doorbuiging. Deze resultaten werden verwerkt met het programma 'MATLAB' door middel van interpolatie. Het resultaat van deze verwerking bij een gewicht van 11 kg is te zien in Figuur 59. Ook hier is weer een duidelijk verschil in doorbuiging merkbaar tussen beide metingen.



Figuur 59: Links: Doorbuiging 3 x 3 module; Rechts: Doorbuiging glasplaat

5.2 Mechanische stresstesten op de stresstestopstelling

Naast het uitvoeren van metingen met behulp van het prototype werden ook de eerste testen uitgevoerd op de gerealiseerde opstelling. Deze bestonden uit statische drukbelastingen uitgevoerd op een 2 x 2 module door de pneumatische cilinder en een vergelijking tussen verschillende aanstuurtypes.

5.2.1 <u>Mechanische stresstest op een 2 x 2 module</u>

De allereerste test die werd uitgevoerd op de gerealiseerde stresstestopstelling was een statische drukbelasting op een mono-kristallijne 2 x 2 module. De belasting werd hierbij uitgeoefend door de pneumatische cilinder met bijhorende zuignap. De 2 x 2 module was opgebouwd als een glas-glas-module en had een afmeting van 350 x 350 x 4,66 mm. De zuignap, die de kracht overbracht, had een diameter van 100 mm met inbegrip van de flexibele silicone ring. Maar bij een drukbelasting speelt de flexibele silicone ring geen rol en wordt de kracht overgebracht door de metalen schijf van de zuignap. Deze heeft een diameter van 67 mm, omgerekend is dit een oppervlak van 3525,7 mm² dat de kracht overbrengt. Het klemmen van de module gebeurde op dezelfde manier als bij het prototype, met behulp van spanklemmen.

In Figuur 60 worden de meetresultaten weergegeven. Hierbij werd de kracht opgemeten door de krachtsensor, de doorbuiging door de positiesensor op de cilinder en de druk ingesteld via het zelfgemaakte LabView programma. De achterste glasplaat van de module brak bij een maximale kracht van 431,3 N en had hierbij een doorbuiging 3,95 mm. De reden dat enkel de achterste glasplaat brak is doordat deze op trek werd belast, in tegenstelling tot de glasplaat aan de voorkant die vooral op druk werd belasting. De buigtreksterkte van glas is namelijk ongeveer 10 keer kleiner dan de drukweerstand [43].



Figuur 60: Meetresultaten statische drukbelasting op een 2 x 2 module

5.2.2 Vergelijking tussen verschillende aanstuurtypes

Naast het uitvoeren van de eerste mechanische stresstest op de opstelling werd er ook een vergelijking gemaakt tussen verschillende aanstuurtypes. Deze bestaan uit druksturing, krachtsturing en positiesturing. De verschillende aansturingen werden telkens bij een druken trekbelasting getest op een plexiglasplaat van 350 x 350 x 5 mm groot. De belastingen werden uitgeoefend door de pneumatische cilinder met zuignap van diameter 100 mm. Tijdens de metingen werd een temperatuur gemeten van 25°C gemiddeld.

Het uitzetten van de meetwaardes in een kracht-doorbuigingsgrafiek (Figuur 61) geeft een duidelijk verschil weer tussen de waardes belast op trek en op druk. Zo is te zien dat de op trek belaste trendlijnen (Donkerblauw, grijs en lichtblauw) steiler lopen dan de op druk belaste trendlijnen (Geel, groen en oranje). De reden voor dit verschil ligt aan de verandering van het contactoppervlak, de diameter van de zuignap varieert van 100 mm bij trek tot 67 mm bij druk. Dit wordt veroorzaakt door de flexibele silicone ring van de zuignap, deze wordt aan de kant geduwd bij de drukproeven waardoor de metalen achterzijde van de zuignap het nieuw contactoppervlak wordt. Het gevolg van dit verkleint oppervlakte is dat het een hogere druk uitoefent op de plexiglasplaat. Deze verhoging resulteert in een grotere doorbuiging bij eenzelfde ingestelde kracht als bij trekproeven.



Figuur 61: Vergelijking tussen verschillende aanstuurtypes, grafiek kracht-doorbuiging



Als dezelfde meetwaardes in een grafiek van kracht en druk (Figuur 62) worden gegooid, is het fenomeen statische wrijving waar te nemen. Om de statische wrijving te overwinnen moet de druk ca. 0,4 Bar bedragen, eens over deze drempel zal de cilinderstang bewegen.

Figuur 62: Vergelijking tussen verschillende aanstuurtypes, grafiek kracht-druk

5.2.3 Kalibratietest krachtsensor

Om een correcte krachtmeting uit te voeren moet de krachtsensor gekalibreerd worden. De sensor werd verticaal opgehangen in een klimaatkast om zo de invloeden van de omgevingstemperatuur in rekeningen te brengen (Figuur 63). De lichtblauwe lijn is de temperatuur, deze werd in drie stappen telkens met 20 °C verhoogt. De oranje lijn bestaat uit de meetwaarde van de krachtsensor uitgedrukt in volt. Nadat de kast op temperatuur was, werd een gewicht van 4963,4 g aan de sensor gehangen. Na een redelijke tijd werd dit gewicht er weer afgenomen, dit proces werd drie keer herhaald. In ruststand gaf de sensor een gemiddelde waarde van 4,857 V weer, na het aanbrengen van het gewicht een gemiddelde van 4,369 V. Uit deze waardes kan dan berekend worden dat één kilogram een uitwijking van 0,0983 V teweegbrengt. In de specificaties van de krachtsensor staat dat de sensor een gecompenseerd temperatuurbereik heeft van -10 °C tot +45 °C en dit is ook te zien in de grafiek. Zo valt op dat de meetwaardes gemeten bij een temperatuur van 50 °C een lichte offset bedragen t.o.v. de meetwaardes die binnen het bereik vallen.

2016-2017



Figuur 63: Krachtsensor kalibratietest resultaten bij een variërende temperatuur

Hoofdstuk 6: Besluit

Deze masterproef begon met een vooronderzoek over het mechanisch stresstesten van PV-modules. In een eerste fase vond er een algemene literatuurstudie plaats, beschreven in hoofdstuk 2, om te onderzoeken wat er reeds bestond omtrent dit onderwerp. Dit werd in een volgende fase verdergezet in de vorm van een vergelijkende studie tussen verschillende manieren waarop mechanische stress geïntroduceerd wordt bij bestaande opstellingen, zoals beschreven in hoofdstuk 3.1. In hoofdstuk 3.3 werd aan de hand van deze vergelijkingen en bevindingen uit de literatuur een eisenpakket opgesteld waaraan de stresstestopstelling minimaal moest voldoen en werd besloten om de mechanische belastingen uit te oefenen door middel van cilinders.

Startend met het opgesteld eisenpakket vond er vervolgens een marktonderzoek plaats tussen aankoopbare opstellingen en de verschillende nodige onderdelen voor een eigen ontwerp. Dit om een beslissing te nemen tussen het aankopen of zelf ontwerpen van een mechanische stresstestopstelling en om te bepalen op welke grootte van modules er getest ging worden. Dit werd beschreven in hoofdstukken 3.4 en 3.5. Uit het vooronderzoek kwam uiteindelijk de beslissing om een eigen testopstelling te ontwerpen voor mini-modules. Dit vooral omdat deze mini-modules zelf geproduceerd kunnen worden door imo-imomec.

De finale opstelling, beschreven in hoofdstuk 4, is in staat om zowel statische als dynamische belastingen over te brengen met behulp van een pneumatische cilinder en kan daarbij ook gekoppeld worden aan een klimaatkast. De gebruikte pneumatische cilinder wordt hierbij krachtgestuurd via van een proportioneel drukregelventiel. Dit ventiel wordt aangestuurd met een zelfgemaakte arduino-sturing.

De nodige specificaties voor sensoren en cilinders werden bepaald aan de hand van een prototype gebruikmakend van een destructieve test op de glasplaat van een module, zoals beschreven in hoofdstuk 4.1. Ook konden de eerste statische belastingstesten worden uitgevoerd met behulp van dit prototype. Deze testen werden besproken in hoofdstuk 5.1 en toonden aan dat een PV-module opgebouwd als een glas-glas-module beduidend sterker is dan een enkel-glas-modules.

Naast het uitvoeren van metingen op het prototype werden ook de eerste testen uitgevoerd op de gerealiseerde opstelling en besproken in hoofdstukken 5.2.1 en 5.2.2. Deze bestonden uit statische drukbelasting uitgevoerd door de pneumatische cilinder op een 2 x 2 module en een vergelijking tussen verschillende aanstuurtypes. Bij de mechanische stresstest op de PVmodule brak de module bij een kracht van 431,3 N en had hierbij een doorbuiging van 3,95 mm. Bovendien toonden testen een verschil aan in doorbuiging tussen trek- en drukbelasting als gevolg van een verandering in contactoppervlak. In de toekomst zal de stresstestopstelling worden gebruikt om uitgebreidere testen uit te voeren. Zo zullen er verschillende statische en dynamische testen worden uitgevoerd en dit in combinatie met de klimaatkast. Uiteindelijke zullen de verzamelde testresultaten worden gebruikt om simulatiemodellen te valideren. Deze simulatiemodellen van mini-modules kan men dan uitbreiden naar full-size modules om de impact van een belasting op deze grootte van modules te simuleren.

In een volgende fase zal de stresstestopstelling worden uitgebreid naar 9 cilinders. Op deze manier kan er op een 3 x 3 module één cilinder per cel worden gebruikt. Bovendien zal hierbij de sturing worden aangepast om compatible te zijn met deze hoeveelheid van cilinders en nodige ventielen. Aangeraden is om de arduino uit te breiden met een 12-bit ADC om nauwkeurigere meetwaardes te bereiken, zoals beschreven in hoofdstuk 4.4.2.3. Ook zal de sturing worden uitgebreid naar een *"internet of things"* status. Dit betekent dat de stresstestopstelling continu verbonden is met het internet. Op deze manier kan iemand van op eender welke plaats connectie maken met de opstelling en hierbij de status controleren of aanpassingen aanbrengen zonder dat men zelf naar de opstelling moet gaan.

Bibliografie

- [1] "About imo-imomec." [Online]. Available: http://www.uhasselt.be/UH/IMO/About-IMO-IMOMEC. [Accessed: 27-Sep-2016].
- [2] "Engineering Materials & amp; APplications." [Online]. Available: http://www.uhasselt.be/UH/IMO/Visit-the-groups/Engineering-Materials-ampamp-APplications.html. [Accessed: 28-Sep-2016].
- [3] M. Köntges et al., Review of Failures of Photovoltaic Modules. 2014.
- [4] S. Dietrich, M. Pander, M. Sander, S. H. Schulze, and M. Ebert, "Mechanical and Thermomechanical Assessment of Encapsulated Solar Cells by Finite-Element-Simulation," *Fraunhofer - Center for Silicon-Photovoltaics CSP*. 2010.
- [5] IEC, "International Standard IEC61215 (10.16)." p. 19/21, 2005.
- [6] M. Assmus, S. Jack, and M. Koehl, "Dynamic Mechanical Loads on Pv-Modules," *Eu Pvsec 24*, pp. 3395–3397, 2009.
- [7] S. Weckend, A. Wade, and G. Heath, "Challenges and oppurtunities." 32nd EU PVSEC, Munich, 2016.
- [8] G. S. Kinsey, "Dynamic mechanical load testing," Solar Power International Workshops on Bankability. Fraunhofer Center for Sustainable Energy Systems (CSE), Chicago, IL, 2013.
- [9] S. Kajari-Schröder, I. Kunze, U. Eitner, and M. Köntges, "Spatial and orientational distribution of cracks in crystalline photovoltaic modules generated by mechanical load tests," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 95, no. 11, pp. 3054–3059, 2011.
- [10] J. B. S. Schoenfelder*, A. Bohne, "Comparison of test methods for strength characterization of thin solar wafer," *Fraunhofer Inst. Mech. Mater.*, no. 100, pp. 2–6, 2007.
- [11] PSE, "PSE mechanical load tester," www.PSE.DE. .
- [12] R. Czyzewicz and S. Bennison, "Solar Module Mechanical Measurement and Mechanical Modeling Technique for Rapid Parametric Design." E.I. DuPont de Nemours & Co., Wilmington, 2011.
- [13] R. Mickiewicz *et al.*, "Effect of Encapsulation Modulus on the Response of PV Modules to Mechanical Stress," in *26th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2011.
- [14] A. Kilikevičius, A. Čereška, and K. Kilikevičiene, "Analysis of external dynamic loads influence to photovoltaic module structural performance," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 66, pp. 445–454, 2016.
- [15] C. Honsberg and S. Bowden, "PVEducation." [Online]. Available: http://pveducation.org/pvcdrom. [Accessed: 25-Nov-2016].
- [16] M. Sander, "Crack Investigation of Encapsulated Solar Cells Under Thermal and Mechanical Stresses." Fraunhofer Center for Silicon Photovoltaics CSP, Saale, 2013.

- [17] L. Yixian and A. A. O. Tay, "(presentation) Stress Analysis of Silicon Wafer Based Photovoltaic Modules in Operation." SERIS, Hannover, 2015.
- [18] U. Jahn, "PV Module Reliability Issues Including Testing And Certification," in 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2012.
- [19] Judy Lee and Julian Itagaki, "The Great Debate? Monocrystalline vs Polycrystalline Solar Panels - On & amp; Off the Grid," Yingli solar, 2015. [Online]. Available: http://blog.yinglisolar.com/great-debate-monocrystalline-vs-polycrystalline-solarpanels/. [Accessed: 29-Nov-2016].
- [20] Andrew Sendy, "Pros and Cons of Monocrystalline v's Polycrystalline solar panels,"
 2016. [Online]. Available: http://www.solarreviews.com/solar-energy/pros-and-consof-monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels/#advantagesMonocrystalline.
 [Accessed: 29-Nov-2016].
- [21] Mark Osborne, "Trina Solar sets 21.25% multicrystalline cell efficiency record | PV-Tech," Trina Solar, 2015. [Online]. Available: http://www.pv-tech.org/news/trinasolar-sets-new-21.25-multicrystalline-cell-efficiency-record. [Accessed: 29-Nov-2016].
- [22] Tindo Solar, "Poly vs Mono Crystalline | Tindo Solar Panels System Adelaide & amp; Melbourne." [Online]. Available: http://www.tindosolar.com.au/learn-more/poly-vsmono-crystalline/. [Accessed: 29-Nov-2016].
- [23] M. Sander, S. Dietrich, M. Pander, M. Ebert, and J. Bagdahn, "Systematic investigation of cracks in encapsulated solar cells after mechanical loading," Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 111, pp. 82–89, 2013.
- [24] C. Kohn *et al.*, "Influence of the Metallization Process on the Strength of Silicon Solar Cells," in *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2009, pp. 1419–1423.
- [25] V. A. Popovich, A. Yunus, M. Janssen, I. M. Richardson, and I. J. Bennett, "Effect of silicon solar cell processing parameters and crystallinity on mechanical strength," Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 95, no. 1, pp. 97–100, 2011.
- [26] "Aluminum Paste for Silicon Solar Cell Manufacturers | Targray." [Online]. Available: http://www.targray.com/solar/crystalline-cell-materials/aluminum-paste. [Accessed: 27-Nov-2016].
- [27] V. Popovich, M. Janssen, and I. M. Richardson, "Breakage issues in silicon solar wafers and cells." ResearchGate, Petten, 2016.
- [28] A. Gabor *et al.*, "Soldering induced damage to thin Si solar cells and detection of cracked cells in modules," in *21st European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2006.
- [29] J. A. B. Lalaguna, P. Sánchez-Friera, H. Mäckel, D. Sánchez, "Evaluation of stress on cells during different interconnection processes," 23rd Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib., pp. 2705–2708, 2008.
- [30] T. G. and J. B. S. Pingel, Y. Zemen, O. Frank, "Mechanical stability of solar cells within solar panels." SOLON SE, Berlin.

- [31] National instruments, "Part II Photovoltaic Cell I-V Characterization Theory and LabVIEW Analysis Code - National Instruments," 2012. [Online]. Available: http://www.ni.com/white-paper/7230/en/. [Accessed: 01-Dec-2016].
- [32] M. Kntges, I. Kunze, S. Kajari-Schrder, X. Breitenmoser, and B. Bjørneklett, "The risk of power loss in crystalline silicon based photovoltaic modules due to micro-cracks," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 95, no. 4, pp. 1131–1137, 2011.
- [33] J. C. Kim and S. K. Cheong, "I-V curve characteristics of solar cells on composite substrate under mechanical loading," J. Mech. Sci. Technol., vol. 28, no. 5, pp. 1691– 1696, 2014.
- [34] M. Loading, I. M. Loading, D. M. Loading, M. Loading, and A. Ml, "Advanced mechanical loading tests for different solar applications," vol. 1, pp. 1–3.
- [35] "Mechanical Load Tester." [Online]. Available: http://www.pse.de/testequipment/photovoltaic-modules/mechanical-load-tester/. [Accessed: 27-Dec-2016].
- [36] "ultrasonic afbeelding." [Online]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sonar_Principle_EN.svg. [Accessed: 18-Dec-2016].
- [37] R. Heitz, "SICK AG NON-CONTACT MEASUREMENT WITH DISPLACEMENT MEASURING."
- [38] "FBG principle." [Online]. Available: http://www.fbgs.com/technology/fbg-principle/. [Accessed: 18-Dec-2016].
- [39] A. Hunt, R. Jenkins, G. Thompson, M. Baker, and M. Hopkins, "Guide to the Measurement of Force Guide to the Measurement of Force," 2013.
- [40] "Electrical positioning systems | Festo." [Online]. Available: https://www.festo.com/cms/nl-be_be/21495.htm. [Accessed: 21-Dec-2016].
- [41] F. Haase, J. Käsewieter, and M. Köntges, "Understanding the Movement of Cracked Solar Cell Parts in PV-modules During Mechanical Loading," *Energy Procedia*, vol. 92, pp. 554–559, 2016.
- [42] "KEBA Electronics." [Online]. Available: http://www.kebaelectronics.com.au/products/PVModules.html. [Accessed: 27-Dec-2016].
- [43] G. Zarmati, "Buigweerstand van glas WTCB." [Online]. Available: http://www.wtcb.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbricontact&pag=Contact26&art=394. [Accessed: 12-Jan-2017].

2016-2017

Bijlagen

Bijlage A	Technische tekeningen	Blz. 96-99
Bijlage B	Elektrisch schema	Blz. 100-104
Bijlage C	Interface LabView	Blz. 105-106



SECTION A-A







				biz. 50
Materiaal:			Ruwmaten:	
Norm:			Behandeling:	
		T	Tek.nr: 0	Aantal: 1
Benaming . ASIV		51	Stuknr:	Mach.nr: 1
Killin	Tekenaar:	Formaat:	Schaal:	
KULEUVEN	Senne Jans	A 1	1/10	
universiteit	Joeri Smeets	AI	1/10	
	Groep:	Datum:	16/01/2017	- · ·

	45x45Lx695 (AL)		11	
	45x45Lx1500 (AL)		2	
	45x45Lx1498 (AL)		4	
	45x45Lx905 (AL)		8	
	45x90Lx1414 (AL)		2	
	45x90Lx785 (AL)		2	
	DSBC-40-50-T-PA-N3		1	
	Koppelstuk cilinder	1	1	
	PHIDGETs CZL301C		1	
	Koppelstuk zuignap	2	1	
	ESS-100-SS		1	
			blz. 9	96
Μ	ateriaal:	Ruwmaten:		
N	orm:	Behandeling:		

	Naam	Tek.nr	Aantal
	Isolatie sandwichpaneel rechts		1
	Isolatie sandwichpaneel boven		1
	Isolatie sandwichpaneel achter		1
	Isolatie sandwichpaneel links		1
	Isolatie sandwichpaneel onder		1
	Aanslagplaat	3	1
	Wieltjes 75 mm		4
	45x45Lx532 (AL)		4
	45x45Lx940 (AL)		2
	45x90Lx875 (AL)		2
	45x45Lx760 (AL)		2
	45x45Lx530 (AL)		2
	45x45Lx695 (AL)		11
	45x45Lx1500 (AL)		2
	45x45Lx1498 (AL)		4
	45x45Lx905 (AL)		8
	45x90Lx1414 (AL)		2
	45x90Lx785 (AL)		2
	DSBC-40-50-T-PA-N3		1
-	Koppelstuk cilinder	1	1
	PHIDGETs CZL301C		1
	Koppelstuk zuignap	2	1







Materiaal:	Inox			
Norm:				
Benaming :	ning: Koppelstuk zuignap			
	KHLim	Tekenaar:	F	
KU LEUVEN		Senne Jans		
universit	eit selt	Joeri Smeets		
KNOWLEDGE IN	ACTION	Groep:	Da	



	Behandelir	ng:		
	Tek.nr:	2	Aantal:	1
	Stuknr:	22	Mach.nr:	1
ormaat:	So	chaal:		
A3		1/1		(\bigcirc)
atum:	16/01/201	6		$\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{$







ISO 2768-mK

Blz.99

	Ruwmaten:		Plaatdikte 12		
	Behandeli	ng:			
	Tek.nr:	3		Aantal:	1
	Stuknr:	6		Mach.nr:	1
ormaat:	S	chaal:			
A3	1/1				(\bigcirc)
atum: 16/01/2017					\rightarrow

Bijlage B











<u>Bijlage C</u>

LabView interface



LabView blokschema


Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling: Testopstelling als validatie voor een thermomechanisch stressmodel van PV-modules

Richting: master in de industriële wetenschappen: elektromechanica Jaar: 2017

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Voor akkoord,

Jans, Senne

Smeets, Joeri

Datum: 18/01/2017