

Laserlassen van 3D-geprinte kunststoffen

Onderzoek naar kritische parameters bij overlapverbindingen

ing. Siebe VAN THIENEN

Promotor: dr. ing. P. VAN RYMENANT, EWE

Co-promotor: ing. J. ADRIAENSEN

Masterproef ingediend tot het behalen van de

graad van Master of Science:

Master na Master in Welding Engineering

© Copyright KU Leuven

Zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van zowel de promotor(en) als de auteur(s) is overnemen, kopiëren, gebruiken of realiseren van deze uitgave of gedeelten ervan verboden. Voor aanvragen tot of informatie i.v.m. het overnemen en/of gebruik en/of realisatie van gedeelten uit deze publicatie, kan u zich richten tot KU Leuven technologiecampus De Nayer, Jan De Nayerlaan 5, B-2860 Sint-Katelijne-Waver, +32 15 31 69 44 of via e-mail iiw.denayer@kuleuven.be.

Voorafgaande schriftelijke toestemming van de promotor(en) is eveneens vereist voor het aanwenden van de in deze masterproef beschreven (originele) methoden, producten, schakelingen en programma's voor industrieel of commercieel nut en voor de inzending van deze publicatie ter deelname aan wetenschappelijke prijzen of wedstrijden.

VOORWOORD

Deze masterproef is mede tot stand gekomen dankzij de steun van vele mensen, waarvoor ik hen nadrukkelijk wil bedanken. Hierbij denk ik in de eerste plaats aan mijn dagelijkse begeleider Jurgen Adriaensen en Patrick Van Rymenant, wiens behulpzaamheid en geduld voor mij een grote steun was. Zonder hun raad en feedback zou deze masterproef er wellicht helemaal anders hebben uitgezien. Bijzondere dank gaat ook uit naar Dirk Govers en Peter Geudens wiens visie bepalend was voor het realiseren van deze masterproef. Ook dr. Véronique Van Vlasselaer wil ik bedanken voor de belangrijke hulp bij de statistiek. Mijn medestudenten verdienen ook een speciale vermelding voor de boeiende discussies en inspirerende gesprekken gedurende het voorbije jaar. Tenslotte dank ik mijn ouders, broers, vrienden en in het bijzonder mijn vriendin Lisa Vandepaer voor hun onvoorwaardelijke steun.

Siebe Van Thienen

SAMENVATTING

Deze scriptie handelt over het verbinden van conventionele kunststoffen en geprinte kunststoffen met behulp van lasertransmissielassen. De gebruikte kunststoffen zijn zowel afkomstig uit de groep van conventioneel plaatmateriaal (geëxtrudeerd) alsook geproduceerd door het printen met additive manufacturing. Het onderzoek richt zich op het in kaart brengen van de kritische procesparameters bij overlapverbindingen in functie van de treksterkte.

In het uitgebreide vooronderzoek is aan de hand van literatuurstudie nagegaan wat de mogelijkheden zijn voor het verbinden van kunststoffen met behulp van laserlassen. Nadien is met deze informatie een *work breakdown* opgesteld die de verdere vorm heeft bepaald voor het onderzoek.

Dit onderzoek maakt gebruik van Through-Transmission Laser Welding. Deze lasertechniek steunt op principe van het opwarmen van een zwarte kunststof door het absorberen van de laserstraal. De zwarte kunststof zal door geleiding ook een bovenliggende transparante kunststof – die tegen de zwarte kunststof wordt aangedrukt – opwarmen waardoor een verbinding tot stand komt.

Een lasersturing werd voorgesteld en is ontwikkeld in deze studie. Deze lasersturing voorziet de mogelijkheid om gedurende het lasproces te lassen met een constant vermogen ofwel met een constante temperatuur. Voor een goede werking van de lasersturing bij constante temperatuur, is gebruik gemaakt van een contactloze temperatuurmeter, een pyrometer. Ook de kritische parameters voor een juiste selectie van de geschikte pyrometer is in deze scriptie uiteengezet.

Voor een stabiel en robuust lasproces is een universele tooling ontworpen voor het lassen van alle testsamples. Het universele karakter wordt gewaarborgd doordat slechts één verwisselbare component moet worden ontwikkeld voor elk type testsample, de overige componenten kunnen steeds hergebruikt worden. Ook is een tooling voorzien voor het eenvoudig monteren van de pyrometer. Aan de hand van een microregeling kan de instelling nauwkeurig tot stand komen.

Eenmaal het lasproces voldoende onder controle is, is met behulp van een *Design of Experiments* de invloed van alle procesparameters nagegaan, alsook de interactie tussen alle procesparameters.

Vervolgens is de beschikbare data ook doorheen meerdere statische modellen gehaald. Door het selecteren van het meest geschikte model, kan een voorspelling gemaakt worden van alle mogelijke procesinstelling in functie van de treksterkte. Door uit al deze voorspelde punten het optimum te berekenen, is het meest voordelige punt bepaald. In combinatie met een visuele controle kan zo een kwalitatieve las tot stand komen.

Tot slot is met alle kennis een toepassing uitgewerkt. Deze toepassing is een combinatie van de techniek van lasertransmissie lassen met conventioneel plaatmateriaal alsook met kunststof in geprinte toestand. Met deze toepassing wordt ook aangetoond dat het mogelijk is om complexe vormen te printen in kunststof en nadien te verbinden met eenvoudige, goedkope kunststoffen.

INHOUDSTAFEL

VOORWOORD	3
SAMENVATTING	4
INHOUDSTAFEL	5
AFKORTINGEN EN SYMBOLEN	8
INLEIDING	9
1 ABSOLEM ENGINEERING / PROLAB	10
2 ADDITIVE MANUFACTURING	11
2.1 3D printing als Rapid Technologie	12
2.1.1 Rapid prototyping	12
2.1.2 Rapid tooling	12
2.1.3 Rapid manufacturing	12
2.2 Procedés van Additive Manufacturing	12
2.3 Fused Deposition Modeling (FDM)	13
3 PYROMETER	14
3.1 Meetprincipe	15
3.2 Een zwart lichaam	15
3.3 Stralingsprincipes van een zwart lichaam	16
3.4 Emissie en het grijze lichaam	17
3.5 Temperatuurmetingen van kunststoffen	18
3.6 Experimentele bepaling van emissie	18
3.6.1 Methode 1: Met behulp van een thermokoppel	19
3.6.2 Methode 2: Het toepassen van een zwart lichaam uit het testmateriaal.....	19
3.6.3 Methode 3: Met behulp van een referentie emissiecoëfficiënt.....	19
3.7 Gewenste specificaties	19
3.7.1 Emissiviteit.....	20
3.7.2 Afstand tot het brandpunt.....	21
3.8 Keuze van de pyrometer	21
3.9 Voordelen van IR-metingen	22
3.10 Conclusie	23
4 TOOLING VOOR PYROMETER	24
4.1 Ontwerp en componenten	24
4.1.1 Baseplate	24
4.1.2 Laserlens	24
4.1.3 Laserlenshouder	25
4.1.4 Verticale strip	25
4.1.5 Microregeling	25
4.1.6 Pyrometer	26
4.1.7 Meetkophouder	26
4.2 Assemblage van de tooling	27
4.3 Instelling	28
4.4 Conclusie	28
5 PID-REGELAAR	29
5.1 Basisprincipes	29
5.1.1 De proportionele regelaar of P-regelaar	29
5.1.2 De integrerende regelaar of I-regelaar	30
5.1.3 De differentiërende regelaar of D-actie	31
5.2 De regelaar	32
5.2.1 De parallelle PID-regelaar	32

5.2.2	De seriële PID-regelaar	33
5.2.3	Verband tussen seriële en parallelle tijdsconstanten	33
5.2.4	De PID-regelaar in de Arduino	34
5.2.5	Bepalen van de parameters	34
5.3	Elektrische schema's	35
5.4	Interface voor de operator	37
5.4.1	Opstartscherm	37
5.4.2	Interface bij elke modus	38
5.5	Instellen van de PID-sturing	38
5.5.1	Trial & Error	38
5.5.2	Ziegler-Nichols regelaarsinstellingen	39
5.6	Conclusie	40
6	UNIVERSELE TOOLING VOOR HET LASERLASSEN	42
6.1	Ontwerp en componenten	42
6.1.1	Baseplate	42
6.1.2	Perslucht cilinder	42
6.1.3	Geleidingskolom	43
6.1.4	Beweegbaar plateau	43
6.1.5	Uitlijngscomponent	43
6.1.6	Glasplaat	44
6.1.7	Glasmal	44
6.1.8	Inlegplaat	44
6.2	Werking	45
6.3	Realisatie	45
7	LASERLASSEN	46
7.1	Through-Transmission Laser Welding (TTLW)	46
7.1.1	Laser transparante toplaag	47
7.1.2	Laser absorberende onderlaag	47
7.1.3	Compatibiliteit van materialen	48
7.1.4	Contact	48
7.2	Invloed van materialen en kleuren	48
7.2.1	Overlapping van de smelttemperaturen	48
7.2.2	Interactie van laserstraling met kunststoffen	49
7.2.3	Transmissie	50
7.2.4	Kleuren en additieven	51
7.2.5	Oppervlakteafwerking	52
7.3	Aandachtspunten voor verbindingstypes	52
7.3.1	Overlapverbinding	52
7.3.2	Stuikverbinding	53
7.3.3	Dikte van het transparante toplaag	53
8	TESTSAMPLES	54
8.1	Prototype teststrookje	54
8.2	Materiaalkeuze	54
8.3	Invloed van de positie bij het printen	54
8.4	Analyse van de positie	55
8.5	Verbinding na het lassen	56
9	DESIGN OF EXPERIMENTS [DOE]	57
9.1	Het verschil tussen regressie en DOE	57
9.2	Wanneer DOE toepassen	57
9.3	Praktisch voorbeeld van DOE	57
9.4	Routemap voor DOE	58
9.5	2-Level Full Factorial Designs	58
9.5.1	Het bepalen van het juiste niveau	59

9.5.2	Het uitvoeren van een experiment	59
9.6	Het analyseren van de resultaten	59
9.6.1	Bepalen van het effect van een DOE inputterm	59
9.6.2	Bepalen van het effect van een (de belangrijkste) factor	60
9.6.3	Bepalen van het effect van een interactiefactor	60
10	TOEPASSEN VAN DESIGN OF EXPERIMENTS OP HET ONDERZOEK	61
10.1	Definiëren van de output(s) van het proces	61
10.2	Definiëren van de input(s) van het proces	61
10.2.1	Laservermogen in functie van de aangelegde spanning	62
10.2.2	Voortloopsnelheid van de XY-tafel.....	63
10.2.3	Aandrukkkracht van de cilinder	63
10.2.4	Afstand tot het focuspunt	63
10.2.5	<i>Low, mid</i> en <i>high</i> bij het DOE-onderzoek	63
10.3	Uitvoeren van het experiment	63
10.4	Analyse van de treksterkte.....	65
10.4.1	Verfijnen van het model	68
10.5	Analyse van de breedte en de lengte van de las	69
10.5.1	Invloed van de positie in de aandrukplaat	71
10.6	Aanvullende bevindingen	71
11	STATISTISCHE MODELLEN	73
11.1	Verschillende modellen	73
11.1.1	Regressie	74
11.1.2	Beslissingsbomen	74
11.1.3	Random Forest.....	76
11.1.4	Neuraal Netwerk	76
11.2	Selectie van het juiste model	78
11.3	Optimalisatie van de laserparameters	79
11.4	Invloed van het materiaal	80
11.5	Selectie van de lasparameters per combinatie	81
11.6	Verklaring voor het verhoogde vermogen	82
11.7	Afwijking van de laserbundel door PWM-sturing	84
12	TOEPASSING VOOR DE INDUSTRIE	85
12.1	Ontwerp	85
12.2	Implementatie van de technologie in een praktische toepassing	85
	BESLUIT VAN DE THESIS	86
	BIBLIOGRAFIE	88
	BIJLAGE 1: ONTWERPTEKENING TOOLING PYROMETER	90
	BIJLAGE 2: ONTWERPTEKENING TOOLING LASERLASSEN	92
	BIJLAGE 3: SPECIFICATIES ROFIN DILAS 30 WATT.....	96
	BIJLAGE 4: DATASHEET POLYAMIDE (PA6)	97
	BIJLAGE 5: ONTWERPTEKENING CASE ARDUINO	98

AFKORTINGEN EN SYMBOLEN

ABS	Acrylonitril-butadien-styreen
AM	Additive Manufacturing
c	Snelheid van het licht [m/s]
d_focus	Focusafstand
DOE	Design of Experiments
e	Fout
e(t)	Foutsignaal
FDM	Fused Deposition Modeling
FEP	Fluorinated ethyleen propylene of gefluoreerde kunststoffen
h	Constante van Planck
IR	Infrarood
Kc	Proportionele versterkingsfactor
M _s	Specifieke Spectrale Straling [Wm ²]
nm	nanometer
NN	Neural Network
P_laser	Laservermogen
p_tafel	Aandrukkracht van de tafel
PA	Polyamide of nylon.
PBT	Polybutyleenereftalaat
PC	Polycarbonaat
PE	Polyethyleen of polyetheen
POM	Polyoxymethyleen of polyacetaal
PP	Polypropyleen of polypropeen
PS	Polystyreen
PU	Polyurethaan
RF	Random Forest
STL	Standard Tessellation Language
T	Absolute temperatuur [K]
TPE	Thermoplastische elastomeren
TTLW	Through-transmission laser welding
u(t)	Stuursignaal
UV	Ultraviolet
v_cnc	voortloopsnelheid van de CNC
w	Bundeldiameter
α	Absorptie
ε	Emissie
ρ	Reflectie
τ	Transmissie
τ _d	Differentiatieconstante
τ _i	Integratieconstante

INLEIDING

Laserlassen wordt gekenmerkt door de typische hoge energiedichtheid waardoor het als verbindingstechniek uiterst geschikt is voor het verbinden van kleine componenten waarbij de vervorming beperkt blijft. Deze scriptie handelt over het verbinden van conventionele kunststoffen en geprinte kunststoffen met behulp van laserlassen.

Dit werk is als volgt opgebouwd. Hoofdstuk 2 beschrijft kort het principe van additive manufacturing in het algemeen met een verdieping op de techniek van Fused Deposition Modelling. Deze specifieke techniek zal later in het onderzoek worden toegepast voor het vervaardigen van de geprinte testsamples in polyamide.

Een eerste deel van het onderzoek bevat het selecteren en implementeren van een contactloze temperatuurmetering voor het opmeten van de materiaaltemperatuur tijdens het lasproces. Het principe van deze pyrometer en de bijhorende specificaties zijn in hoofdstuk 3 beschreven. Ook een praktische methode voor een correcte kalibratie is achteraan aan dit hoofdstuk toegevoegd. In hoofdstuk 4 is een tooling voor de pyrometer uitgedacht, uitgetekend en gerealiseerd. De tooling voorziet een eenvoudige en correcte positionering van de pyrometer doorheen de tijd. Alle nodige documentatie voor de tooling is in dit hoofdstuk samengevat.

De temperatuurmetering en een lasersturing zijn samen gebouwd in een behuizing. De theorie achter deze sturing en de praktische realisatie zijn samengevat in hoofdstuk 5. Er is ook de nodige aandacht geschonken aan de gebruiksvriendelijke uitwerking voor de operator tijdens het lasproces met een duidelijke, eenvoudige display en enkel noodzakelijke instelparameters.

Hoofdstuk 6 bevat de volledige uitwerking voor een universele tooling voor het lassen van de testsamples. Het universele karakter van deze opstelling biedt de mogelijkheid om de opstelling ook voor andere onderzoeken of toepassingen te gebruiken. Hierbij moet slechts één component vervangen worden. Met een CAD-pakket werd gecontroleerd dat de tooling van de pyrometer en de tooling voor het laserlassen ook samen kunnen functioneren zonder problemen.

In hoofdstuk 7 wordt het principe van laserlassen uitgebreid besproken. Bij lasertransmissielassen bestaat de lasverbinding uit een bovenliggende transparante kunststof met daaronder een zwarte kunststof. Het verbinden van dit soort kunststoffen met lasertechnologie draagt de naam Through-Transmission Laser Welding.

In hoofdstuk 8 wordt toegelicht hoe de testsamples zijn ontworpen waarop de nodige testen gebeurde. Ook het materiaal, de afmetingen en de printpositie zijn in dit hoofdstuk besproken.

Om een idee te krijgen van de kritische parameters bij het laserproces zijn in hoofdstuk 9 en 10 de invloed van elke individuele parameter, alsook de interacties van alle parameters onderzocht met behulp van Design of Experiments. Hiermee is de basis gevormd voor dit laserlasproces. Nadien is aan de hand van statische modellen in hoofdstuk 11 diezelfde data gebruikt voor het simuleren van alle mogelijke combinaties van de parameters. Zo is het hele lasproces in kaart gebracht.

Tot slot is in hoofdstuk 12 een toepassing voor de industrie uitgewerkt met alle kennis uit het onderzoek. Het logo voor lasergevaar is vervaardigd met een 3D-printer. Deze component is nadien met behulp van lasertransmissielassen bevestigd aan een transparante kunststof.

1 ABSOLEM ENGINEERING / PROLAB

Iets meer dan 6 jaar geleden richtten Ank De Wilde en Bruno Dejaeghere het Mechelse bedrijf Absolem op. Vandaag zet Absolem Engineers meer dan 50 gespecialiseerde ingenieurs in op projectbasis, met een focus op machinebouw, productontwikkeling en project engineering.

Sinds mei 2015 is het laserlab van Philips Lighting in Turnhout een onderdeel van Absolem. Onder de naam Absolem ProLab wil de onderneming bedrijven in België en Zuid-Nederland ondersteunen op het vlak van engineering.

Het nieuwe Absolem ProLab zal voor zijn klanten prototypes van producten maken met behulp van de nieuwste technologieën, waarvan lasertechnologie momenteel de kern is. Dit kan gaan om een component of een volledig product. Het bedrijf helpt haar klanten ook om bestaande producten, componenten en prototypes goedkoper te ontwikkelen en te verbeteren.

"Ons motto is 'Make one, make a good one, make lots of good ones'. We kunnen een prototype ontwikkelen, dat helemaal op punt zetten en ook onderzoeken hoe we die geperfectioneerde versie zo efficiënt mogelijk kunnen opschalen naar massaproductie. Dat kan gaan over een LED-lampje, maar ook over een speciale verbinding voor injectienaalden. Met onze lasers kunnen we die producten lassen, versnijden of aan elkaar bevestigen."

Ank De Wilde

Reshoring

Door innovatie te koppelen aan zin voor kwaliteit hopen de stichters om productiebedrijven in de eigen regio te houden.

"Bedrijven komen geleidelijk terug van offshoring, het verplaatsen van hun productie naar lageloonlanden. Meer en meer ondernemingen geloven in reshoring: bewust hun productie hier houden. Wij ondersteunen graag die ontwikkeling met onze geïntegreerde aanpak, onze brede expertise en unieke uitrusting."

Bruno Dejaeghere

De ex-Philipsmedewerkers Jurgen Adriaensen, Dirk Govers en Peter Geudens zetten hun schouders onder de uitbouw van Absolem ProLab. Het bedrijf is gevestigd op de Open Manufacturing Campus op de Philipssite in Turnhout. (Huysman, 2016)



2 ADDITIVE MANUFACTURING

De term Additive Manufacturing (AM) omvat een breed gamma van technologieën. Laser sinteren, Fused Deposition Modeling en stereolithografie zijn slechts enkele voorbeelden. Deze technologieën kennen toepassingen in verschillende industrieën: automotive, elektronica, cartridges etc.

De bedoeling van Additive Manufacturing is om op een relatief korte tijd complexe componenten of producten te produceren. De kostprijs, het materiaalverbruik en de benodigde tijd zijn opmerkelijk lager dan die van de traditionele technieken.

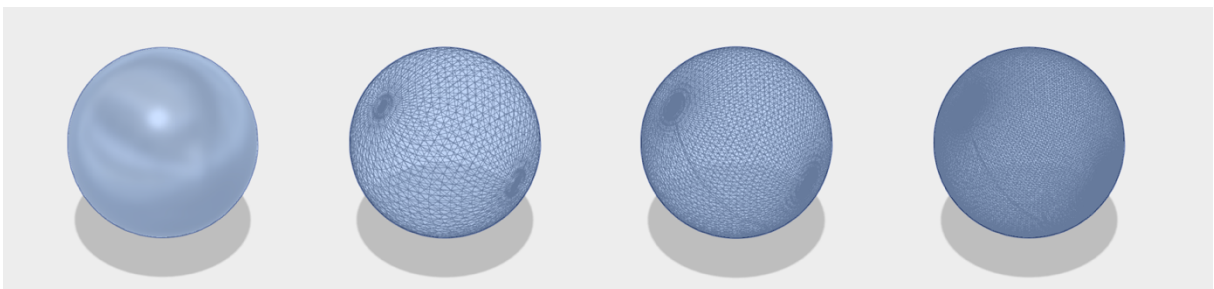
Andere benamingen voor Additive Manufacturing zijn 3D Printing, Rapid Prototyping, Additive Fabrication, Additive Processes, Additive Techniques, Additive Layer Manufacturing, Layer Manufacturing en Freeform Fabrication.

Additive Manufacturing is een technologie om 3D-objecten te produceren door materiaal laag op laag toe te voegen. Dit toegevoegde materiaal kan bijvoorbeeld kunststof, metaal of beton zijn. Het gaat om een opbouwtechniek tegenover subtractieve technieken zoals de verspanende bewerkingsmethoden (draaien, frezen, boren, vonken, slijpen, schuren ...). Afbeelding 1 toont enkele voorbeelden die met Additive Manufacturing geproduceerd zijn.



Afbeelding 1: Enkele complexe voorbeelden van Additive Manufacturing (B.V., 2016).

Additive Manufacturing maakt gebruik van een 3D-modeling software (CAD), machine-apparatuur en opbouw materiaal. Wanneer er een CAD-design is gemaakt, wordt deze geconverteerd naar een STL-bestand (Standard Tessellation Language, Afbeelding 2). Dit bestand beschrijft de oppervlaktegeometrie van het te maken object in driehoeken. De AM-apparatuur leest de gegevens van het STL-bestand in en dropt of voegt opeenvolgende lagen van vloeistof, poeder, plaatmateriaal of ander materiaal toe.



Afbeelding 2: Weergave van STL op een bolvormig oppervlak. V.l.n.r. bolvormig oppervlak zonder STL, bolvormig oppervlak met STL Low, bolvormig oppervlak met STL Medium, bolvormig oppervlak met STL High.

2.1 3D printing als Rapid Technologie

Algemeen zijn er 3 toepassingstechnologieën waar 3D-printen wordt ingezet, nl. voor de fabricatie van prototypes, de productie van specifieke gereedschappen (Rapid tooling) en de productie van onderdelen (Rapid manufacturing). Voor deze meestal kleinere oplages is de Additive Manufacturing sneller dan de conventionele verspaningstechnieken. Bovendien kunnen complexe vormen worden gefabriceerd, wat niet mogelijk is met de traditionele methodes.

2.1.1 Rapid prototyping

Rapid prototyping is het snel maken van een 3D-schaalmodel, van een onderdeel of een samenstelling. Het verkort de ontwikkeltijd aanzienlijk en vermindert het aantal mogelijke fouten doordat het model gemaakt wordt in één stap en niet met verschillende aparte dure bewerkingen. Eventuele fouten in het model kunnen nog gecorrigeerd worden. Eens het model klaar is, kunnen grotere oplages eventueel via de traditionele methodes worden gefabriceerd.

2.1.2 Rapid tooling

Rapid tooling is het maken van complexe gereedschappen die eenvoudiger te fabriceren zijn met additive manufacturing dan met conventionele technieken. Er kunnen complexe geometrische vormen bekomen worden. Deze techniek wordt veel gebruikt om ingewikkelde matrijzen te bouwen.

2.1.3 Rapid manufacturing

Rapid manufacturing wordt meestal toegepast voor onderdelen met een complexe vorm, die met conventionele bewerkingen moeilijk te fabriceren zijn. Het eindproduct is zo goed als volledig afgewerkt en heeft bijna geen nabewerking meer nodig. Rapid manufacturing is voor deze onderdelen goedkoper en sneller.

2.2 Procedés van Additive Manufacturing

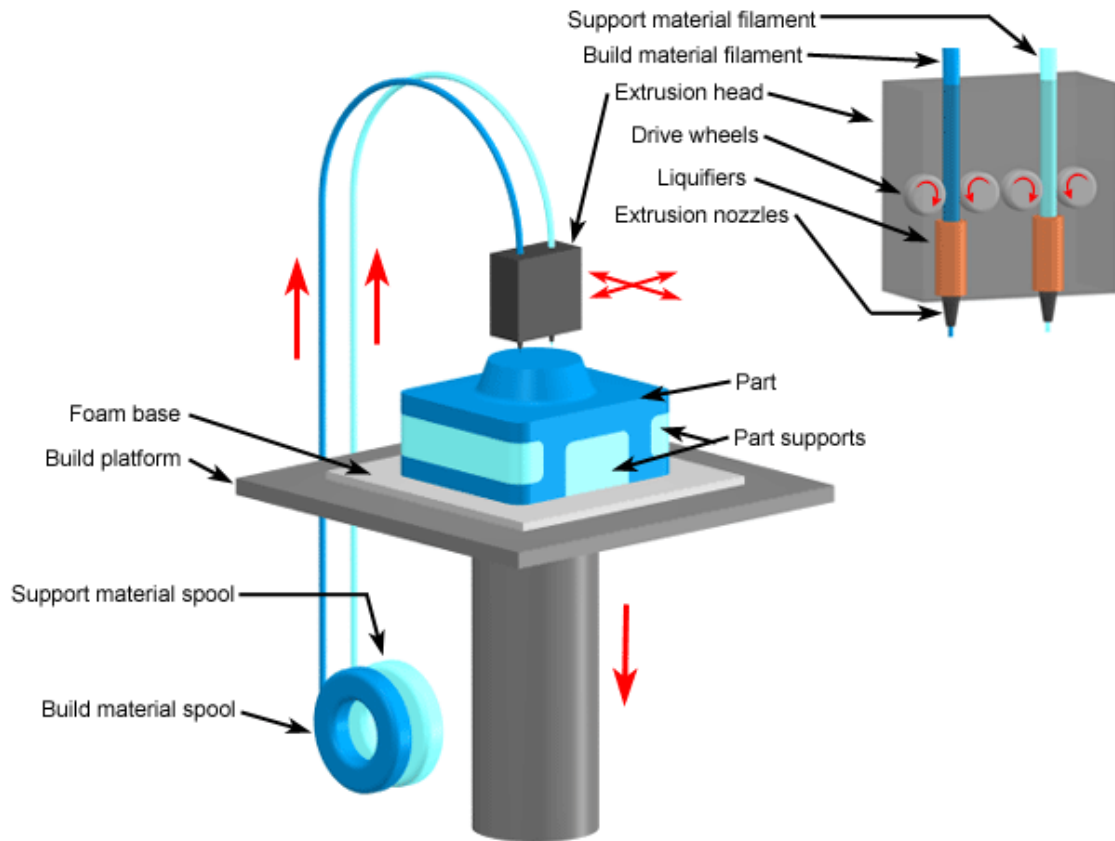
Bij Additive Manufacturing kan een keuze gemaakt worden bij de vorm van het toevoegmateriaal. Het toevoegmateriaal kan vloeibaar, in poedervorm of een vast materiaal zijn. De 3D-printer die tijdens dit onderzoek gebruikt werd, steunt op het principe van Fused Deposition Modeling (FDM). Bij FDM is het toevoegmateriaal of filamant in vaste vorm, meestal op rol (**Afbeelding 3**).



Afbeelding 3: Toevoegmateriaal voor FDM 3D-printer in verschillende materialen en kleuren (allthat3d, 2016).

2.3 Fused Deposition Modeling (FDM)

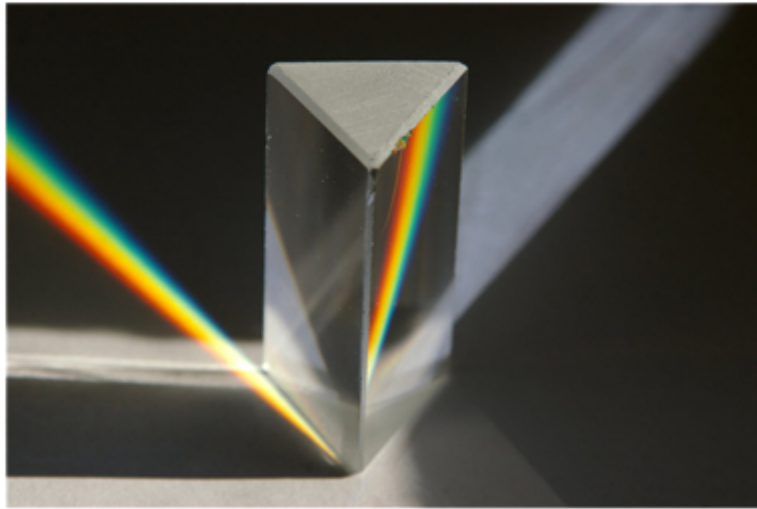
Het te printen materiaal wordt gesmolten en door een extrusiemond op een bouwplatform gedropt (Afbeelding 4). Door de extrusiemond en/of het bouwplatform te bewegen wordt de constructie van het object laag per laag gevormd. Doordat de vloeibare materiaal na het aanbrengen van iedere laag stolt, kan zo de gewenste vorm opgebouwd worden. (Van Mol, 2015) (Van Mol, 2015)



Afbeelding 4: Fused Deposition Modeling - vereenvoudigde opbouw van een FDM-printer (Van Mol, 2015).

3 PYROMETER

Het spectrum van het licht is in 1666 ontdekt door Sir Isaac Newton. Hij liet een bundel zonlicht doorheen een glazen prisma vallen. Newton bestudeerde hoe het licht zich onderverdeelde in verschillende kleuren, dit noemde hij het lichtspectrum. In 1880 ontdekte Sir William Herschel de relatieve energie van elke kleur. De Duitser stelde vast dat de temperatuur in het rode deel van het spectrum hoger lag dan de temperatuur in het blauwe deel. In het deel van het spectrum dat voorbij het rood lag mat hij nog een hogere temperatuur en hij concludeerde, dat in dit deel van het spectrum er licht bestond dat niet voor het menselijk oog waarneembaar is. Dit verschijnsel noemde hij het infrarood (IR). Rond 1900, de wetenschappers Max Planck, Josef Stefan, Ludwig Boltzmann, Wilhelm Wien en Gustav Kirchoff definieerden diverse aspecten van het elektromagnetische spectrum en formuleerden vergelijkingen die het infrarode licht beschreven.



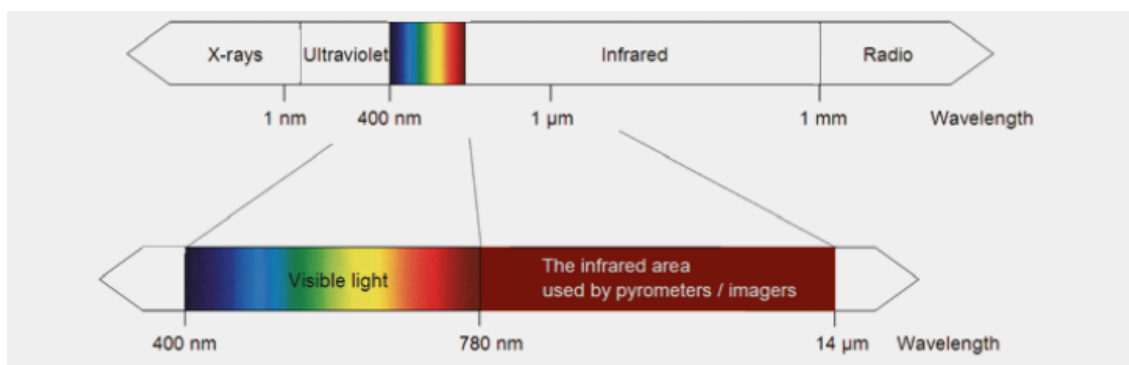
Afbeelding 5: Invallende lichtbundel op een prisma - Experiment van Isaac Newton (Infraroodexpert).

Temperatuurmetingen kunnen onderverdeeld worden in twee categorieën: door contact of contactloos. Thermokoppels en Pt100-probes zijn de meest voorkomende contactmetingen. Om de temperatuur te detecteren is een direct contact vereist. In principe meten deze instrumenten hun eigen temperatuur, die een weerspiegeling is van het te meten object. De temperatuur van het object moet zijn warmte doorgeven aan de meetsonde, dit gaat gepaard met een zekere vertragingstijd. Contactloze infrarood thermometers meten temperatuur op door de infrarode energie die elk materiaal of lichaam – met een temperatuur boven het absolute nulpunt (0 Kelvin) – uitstraalt. Bij de eenvoudigste opstelling focust een lens de infrarode straling op een detector. Deze detector converteert de invallende straling naar een elektrisch signaal. Na het compenseren van de omgevingstemperatuur zal dit signaal worden weergegeven als een temperatuurmeting. Deze opstelling maakt het mogelijk om een temperatuur te meten zonder dat een meetsonde contact dient te maken met een oppervlak. Typische contactloze toepassingen zijn zeer klein of bewegende objecten, stroomvoerende objecten, agressieve chemicaliën, objecten in een vacuümkamer of ander type afgedichte behuizingen en metingen in de buurt van elektromagnetische velden of toepassingen met snelle reactietijden.

3.1 Meetprincipe

Alle lichamen met een temperatuur boven het absolute nulpunt van 0 K (-273.15 °C) zenden infrarode straling uit. Deze straling is proportioneel met hun intrinsieke temperatuur. Infrarode straling is het gedeelte van het elektromagnetisch spectrum tussen het zichtbaar licht en radiogolven.

Het golflengtegebied van infraroodstraling ligt tussen 0.78 µm en 1000 µm, zoals getoond in Afbeelding 6. Praktisch zijn in dit brede domein enkel golflengtes tussen 0.7 µm en 20 µm geschikt voor het meten van temperaturen. Er zijn momenteel nog geen detectoren op de markt die gevoelig genoeg zijn om de kleine hoeveelheid energie van meer dan 20 µm te meten. De hoeveelheid energie uitgezonden door een oppervlak is evenredig met de vierde macht van de temperatuur van het oppervlak.



Afbeelding 6: Elektromagnetisch spectrum met detailweergave van het IR-gebied waar pyrometers werkzaam zijn (Optris).

3.2 Een zwart lichaam

Een zwart lichaam is een geïdealiseerd fysisch object dat alle invallende elektromagnetische straling absorbeert (en dus niet reflecteert).

$$\alpha = \epsilon = 1 \quad (\alpha : \text{absorptie}, \epsilon : \text{emissie})$$

Een zwart lichaam straalt de maximale energie uit op elke golflengte. De concentratie van straling is niet afhankelijk van de hoek ten opzichte van het zwart lichaam. Het zwart lichaam is de basis voor het begrijpen van de fysische principes van contactloze temperatuurmetingen en de kalibratie van infrarood thermometers.

De constructie van een zwart lichaam is eenvoudig. Een thermisch hol lichaam met een kleine opening aan het einde. Als het lichaam wordt verwarmd en een bepaalde temperatuur bereikt en binnenin het lichaam de temperatuur in evenwicht is, dan zendt de kleine opening een straling uit die overeenstemt met de temperatuur van de lucht in het hol lichaam. Als de opening zeer klein is in vergelijking met het oppervlak als geheel, dan is de straling een zeer betrouwbare weerspiegeling van de temperatuur. Wordt nu een meetapparaat gericht op de kleine opening, dan is deze opstelling geschikt voor het kalibreren van meetapparatuur. In werkelijkheid, eenvoudige systemen die gebruik maken van oppervlakken die bedekt zijn met gepigmenteerde verf tonen absorptie- en emissiewaarden van 99 % in het gewenste golflengtebereik. Meestal volstaat dit als kalibratie.

3.3 Stralingsprincipes van een zwart lichaam

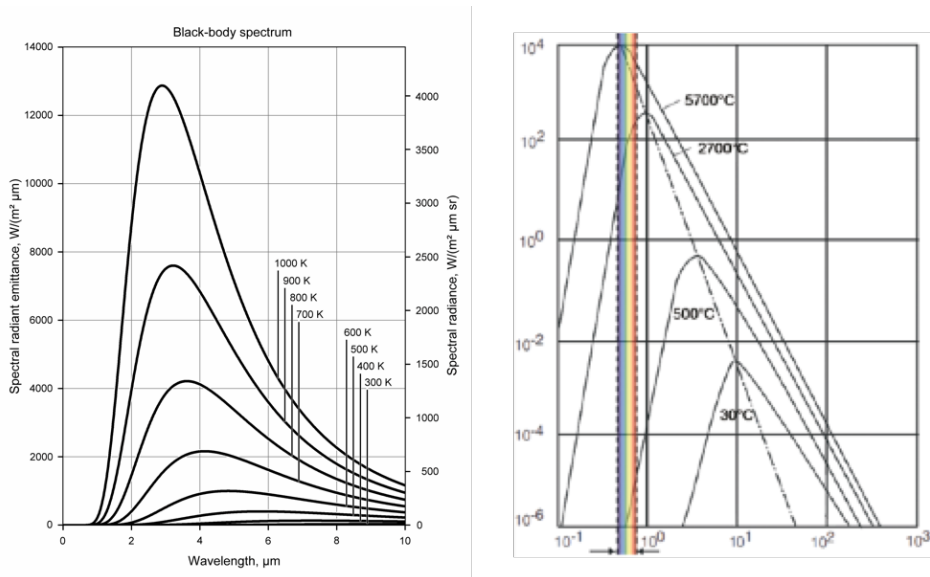
De stralingswet van Planck toont de voornaamste correlatie voor contactloze temperatuurmetingen. Het beschrijft de specifieke spectrale straling M_{λ_s} van het zwart lichaam in de helft van de ruimte afhankelijk van de temperatuur T en de golflengte λ .

$$M_{\lambda_s} = \frac{2\pi^5 h c^2}{15 \lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} = \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{C_2/\lambda T} - 1}$$

Met:

- M_{λ_s} Specifieke spectrale straling [$W \cdot m^{-2}$]
- c snelheid van het licht (299 792 459 m/s)
- C_1 $3,74 \cdot 10^{-16} W \cdot m^2$
- C_2 $1,44 \cdot 10^{-2} K \cdot m$
- h Constante van Planck
- T Temperatuur [K]

Afbeelding 7 toont de grafische beschrijving van de formule afhankelijk van de golflengte λ bij verschillende temperaturen.



Afbeelding 7: Links - Stralingsspectra volgens Planck voor verschillende temperaturen, op lineaire schalen. Rechts - Stralingsspectra volgens Planck voor verschillende temperaturen, op dubbel logaritmische schalen (Optris).

Bij stijgende temperaturen verschuift het maximum van de specifieke spectrale straling naar kortere golflengtes. Aangezien de formule vrij abstract is, kan deze niet voor alle toepassingen gebruikt worden. Door integratie van de spectrale stralingsintensiteit voor alle golflengtes (van nul tot oneindig), is het mogelijk de waarde van de uitgezonde straling van het lichaam te bekomen. Dit is de wet van Stefan-Boltzmann.

$$M_{\lambda_s} = \sigma \cdot T^4$$

Met:

- M_{λ_s} Specifieke spectrale straling [$W \cdot m^{-2}$]
- σ $5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$
- T Absolute temperatuur [K]

De gehele uitgezonden straling van een zwart lichaam in het gehele golflengtebereik neemt evenredig toe met de vierde macht van de absolute temperatuur. De grafische weergave van de wet van Planck toont aan dat golflengte - die gebruikt wordt om het maximum van de uitgezonden straling van een zwart lichaam te genereren - verschuift indien de temperatuur wijzigt. Wien's verplaatsingswet kan worden afgeleid uit de formule van Planck door differentiatie.

$$\lambda_{max} \cdot T = 2898 \mu m \cdot K$$

In het stralingsspectra (Afbeelding 7) verschuiven de maxima van de karakteristieken bij stijgende temperaturen naar links, resp. dalende golflengtes.

3.4 Emissie en het grijze lichaam

Slechts enkele lichamen benaderen een ideaal zwart lichaam. Veel lichamen zenden aanzienlijk minder straling uit bij dezelfde temperatuur. De emissie ε beschrijft de relatie tussen de werkelijke straling en die van een zwart lichaam. De emissie ε is gelegen tussen 0 en 1.

Een grijs lichaam heeft een gelijke emissie bij alle golflengtes en zendt minder infrarode straling uit dan een zwart lichaam ($\varepsilon < 1$). Lichamen met een emissie die afhankelijk is zowel de temperatuur als de golflengte, worden niet-grijze of selectieve lichamen genoemd (bijvoorbeeld metalen).

De infrarood sensor meet de uitgezonden straling van het oppervlak van het lichaam, maar ook de gereflecteerde straling vanuit de omgeving en mogelijk ook de infrarode straling die door het lichaam is verzonden.

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1$$

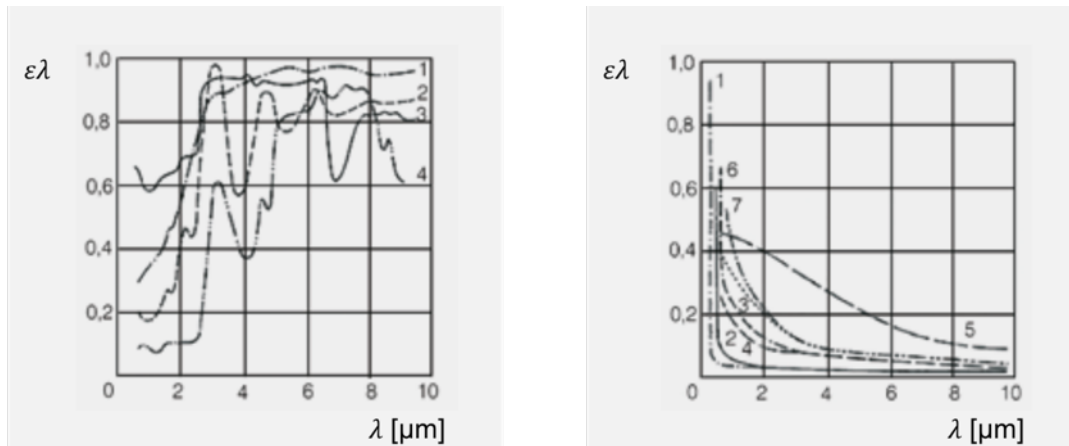
Met:

- ε *Emissie of emissiegraad*
- ρ *Reflectie*
- τ *Transmissie*

Meeste lichamen vertonen geen transmissie van infrarode straling, dan geldt:

$$\varepsilon + \rho = 1$$

Theoretisch is emissie afhankelijk van het materiaal, het materiaaloppervlak, de temperatuur, de golflengte, de meethoek en soms ook de meetopstelling. Veel lichamen bestaande uit niet-metalen (Afbeelding 8, links) vertonen hoge en relatieve constante emissiewaarden bij langgolvlige spectrale bereiken, onafhankelijk van hun materiaaloppervlak.

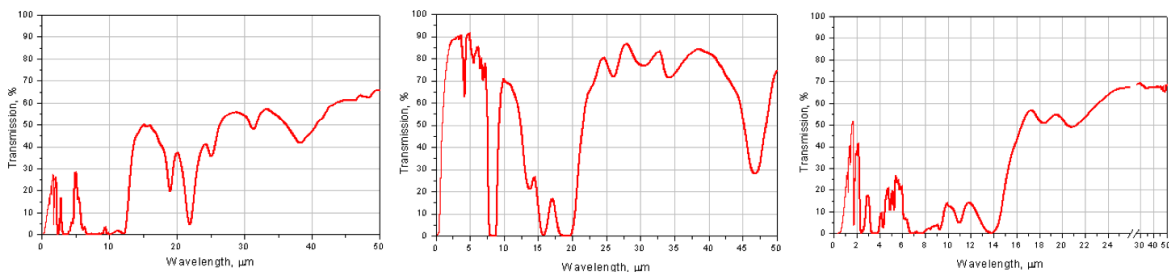


Afbeelding 8: Spectrale emissie van enkele materialen: 1 Email, 2 Pleister, 3 Beton, 4 Klei (links) en spectrale emissie van metallische materialen: 1 Zilver, 2 Goud, 3 Platina, 4 Rodium, 5 Chrom, 6 Tantaal, 7 Molybdeen (rechts) (Optris).

Algemeen vertonen metallische materialen (Afbeelding 8, rechts) een lage emissiegraad, sterk afhankelijk van het materiaaloppervlak die afneemt bij hogere golflengtes.

3.5 Temperatuurmetingen van kunststoffen

De transmissie van kunststof is sterk afhankelijk van de golflengte en is omgekeerd evenredig met de dikte van de kunststof. Dunne kunststoffen zijn beter doorlaatbaar dan dikke kunststoffen. Optimale metingen eisen een transmissie van nagenoeg nul, onafhankelijk van de dikte. Polyethyleen (PE), polypropyleen (PP), nylon en polystyreen (PS) zijn niet transparant bij 3.43 μm . Polyester, polyurethaan (PU), teflon, FEP en polyamide (PA) zijn niet transparant bij 7.9 μm . Voor dickere en gepigmenteerde films kan een golflengtebereik van 8 μm tot 14 μm geselecteerd worden.



Afbeelding 9: Spectrale transmissie van kunststofsampl (2mm dik): v.l.n.r. PP, PTFE en PEHD (Janis Research Company, 2016).

De producent van infrarood sensoren bepaalt het optimale stralingsbereik voor temperatuursensoren door testsamples van kunststoffen op te meten. De reflectie bij kunststoffen is algemeen gelegen tussen 5 en 10 %.

3.6 Experimentele bepaling van emissie

Verschillende beschikbare tabellen geven de emissiecoëfficiënt weer voor verschillende materialen, gebaseerd op technische literatuur en experimenten. Er bestaan verschillende methodes om de emissie te bepalen. Hieronder worden de drie meest courante methodes kort toegelicht.

3.6.1 Methode 1: Met behulp van een thermokoppel

Een eerste methode bestaat uit het gebruik van een contactprobe (thermokoppel). De werkelijke temperatuur van het wordt continu en simultaan opgemeten en vergeleken met de uitgezonde straling van het lichaam. De emissiecoëfficiënt wordt vervolgens zodanig ingesteld dat de temperatuur van de contactprobe overeenkomstig is met de temperatuur opgemeten door de infrarood sensor. Belangrijk hierbij is dat de contactprobe goed contact maakt met het op te meten lichaam. Deze methode is uitsluitend geschikt bij een lage warmteafvoer. Deze methode werd gebruikt om de emissie van de gebruikte kunststof bij dit onderzoek te achterhalen.

3.6.2 Methode 2: Het toepassen van een zwart lichaam uit het testmateriaal

Gebruik makend van een zwart lichaam geproduceerd uit het te meten materiaal. Een geboord gat (met een verhouding van diameter/boordiepte van 1/3) in een thermisch geleidend materiaal reageert gelijkaardig aan een zwart lichaam met een emissiecoëfficiënt van 1. Noodzakelijk is dat de meting gericht wordt op de bodem van het gat, dit omwille van de optische eigenschappen van de infrarode sensor en de meetafstand. Op deze wijze kan de emissiecoëfficiënt bepaald worden.

3.6.3 Methode 3: Met behulp van een referentie emissiecoëfficiënt

Op het lichaam wordt een gekleurde band met een gekende emissiecoëfficiënt aangebracht. Deze emissiecoëfficiënt wordt ingesteld op de pyrometer. Zo kan de temperatuur gemeten worden van het lichaam. Vervolgens wordt de temperatuur opgemeten net naast de gekleurde band. De emissiecoëfficiënt dient nu aangepast worden tot de temperatuur gelijk is aan de temperatuur van de gekleurde zone. Eenmaal de pyrometer een gelijke temperatuur weergeeft, is de emissiecoëfficiënt gekend. (Optris GmbH, 2015) (Keller HCW, 2001-2016)

3.7 Gewenste specificaties

Deze paragraaf beschrijft de voornaamste specificaties die gewenst zijn voor de temperatuurmeting van het smeltbad.

Een eerste grove parameter is een temperatuurbereik van 0 tot ca. 1000 °C. Hoewel de meeste kunststoffen smelten bij 300 °C, is toch een hogere maximale temperatuur gewenst zodat de pyrometer ook bij andere onderzoeken kan gebruikt worden (nl. laserharden, lasergraveren, lasertextureren etc.).

Een andere belangrijke specificatie is de grootte van het meetpunt. De software neemt een gemiddelde van het volledige meetoppervlak. Dit is liefst zo klein mogelijk om accuraat te kunnen meten in het smeltbad. Indien de laser een kleine spotgrootte heeft en de temperatuurmeting gebaseerd is op een grotere spotgrootte dan die van de laser, dan is de gemeten temperatuur lager. De verklaring voor de lagere temperatuur is dat het oppervlak waar de temperatuur op gemeten wordt, te groot is in vergelijking met de diameter van de laserbundel.

Spectral range, of spectraal bereik duidt op de golflengte die door de sensor wordt waargenomen. Het merendeel van de sensoren heeft een bereik gelegen tussen 8 µm en 14 µm. Een spectraal bereik kleiner dan 2 µm is gunstig voor het opmeten van de temperatuur doorheen glas. Dit geeft de mogelijkheid om de kunststof op te spannen met een glasplaat.

Een uitgang (0 – 10 V of 0/4 – 20 mA) is gewenst om data te kunnen plotten en bewaren. Sommige producenten bieden ook de mogelijkheid om een USB-uitgang te kiezen met

bijhorende software. De uitgang geeft ook de mogelijkheid om nadien de temperatuur te gebruiken als input voor de PID-sturing.

De standaard uitgang op de pyrometer zorgt voor een weergave van de meetresultaten. Door nu een andere uitgang parallel te gaan uitlezen en hierop de nodige bewerkingen toe te passen, kan het proces worden verbeterd. Een regeling (bijvoorbeeld PID-regelaar) zorgt voor een stabiel proces. In dit onderzoek zal worden gezocht naar een PID-regelaar voor het continu bijsturen van het laserproces.

3.7.1 Emissiviteit

De emissiviteit¹ is afhankelijk van het materiaal, het oppervlak en andere factoren. De algemene regel luidt: hoe hoger de emissiviteit, hoe eenvoudiger de meting een nauwkeurig resultaat kan geven. Enkele voorbeelden zijn te vinden in Tabel 1, Tabel 2 en Tabel 3.

Tabel 1: Emissietabel van metalen met bijhorende golflengtes (GmbH, 2013).

Material		typical Emissivity			
		1,0 μm	1,6 μm	5,1 μm	8-14 μm
Aluminium	non oxidized	0,1-0,2	0,02-0,2	0,02-0,2	0,02-0,1
	polished	0,1-0,2	0,02-0,1	0,02-0,1	0,02-0,1
	roughened	0,2-0,8	0,2-0,6	0,1-0,4	0,1-0,3
	oxidized	0,4	0,4	0,2-0,4	0,2-0,4
Brass	polished	0,35	0,01-0,05	0,01-0,05	0,01-0,05
	roughened	0,65	0,4	0,3	0,3
	oxidized	0,6	0,6	0,5	0,5
Copper	polished	0,05	0,03	0,03	0,03
	roughened	0,05-0,2	0,05-0,2	0,05-0,15	0,05-0,1
	oxidized	0,2-0,8	0,2-0,9	0,5-0,8	0,4-0,8
Chrome		0,4	0,4	0,03-0,3	0,02-0,2
Gold		0,3	0,01-0,1	0,01-0,1	0,01-0,1
Haynes	alloy	0,5-0,9	0,6-0,9	0,3-0,8	0,3-0,8
Inconel	electro polished	0,2-0,5	0,25	0,15	0,15
	sandblast	0,3-0,4	0,3-0,6	0,3-0,6	0,3-0,6
	oxidized	0,4-0,9	0,6-0,9	0,6-0,9	0,7-0,95
Iron	non oxidized	0,35	0,1-0,3	0,05-0,25	0,05-0,2
	rusted		0,6-0,9	0,5-0,8	0,5-0,7
	oxidized	0,7-0,9	0,5-0,9	0,6-0,9	0,5-0,9
	forged, blunt	0,9	0,9	0,9	0,9
	molten	0,35	0,4-0,6		
Iron, casted	non oxidized	0,35	0,3	0,25	0,2
	oxidized	0,9	0,7-0,9	0,65-0,95	0,6-0,95

¹ Uitgezonden straling van een object vergeleken met de straling van een zwart lichaam. Een coëfficiënt gelegen tussen 0 en 1.

Tabel 2: Vervolg emissietabel van metalen met bijhorende golflengtes (GmbH, 2013).

Material		typical Emissivity			
Spectral response		1,0 μm	1,6 μm	5,1 μm	8-14 μm
Lead	polished	0,35	0,05-0,2	0,05-0,2	0,05-0,1
	roughened	0,65	0,6	0,4	0,4
	oxidized		0,3-0,7	0,2-0,7	0,2-0,6
Magnesium		0,3-0,8	0,05-0,3	0,03-0,15	0,02-0,1
Mercury			0,05-0,15	0,05-0,15	0,05-0,15
Molybdenum	non oxidized	0,25-0,35	0,1-0,3	0,1-0,15	0,1
	oxidized	0,5-0,9	0,4-0,9	0,3-0,7	0,2-0,6
Monel (Ni-Cu)		0,3	0,2-0,6	0,1-0,5	0,1-0,14
Nickel	electrolytic	0,2-0,4	0,1-0,3	0,1-0,15	0,05-0,15
	oxidized	0,8-0,9	0,4-0,7	0,3-0,6	0,2-0,5
Platinum black			0,95	0,9	0,9
Silver		0,04	0,02	0,02	0,02
Steel	polished plate	0,35	0,25	0,1	0,1
	rustless	0,35	0,2-0,9	0,15-0,8	0,1-0,8
	heavy plate			0,5-0,7	0,4-0,6
	cold-rolled	0,8-0,9	0,8-0,9	0,8-0,9	0,7-0,9
	oxidized	0,8-0,9	0,8-0,9	0,7-0,9	0,7-0,9
Tin non oxidized		0,25	0,1-0,3	0,05	0,05
Titanium	polished	0,5-0,75	0,3-0,5	0,1-0,3	0,05-0,2
	oxidized		0,6-0,8	0,5-0,7	0,5-0,6
Wolfram polished		0,35-0,4	0,1-0,3	0,05-0,25	0,03-0,1
Zinc	polished	0,5	0,05	0,03	0,02
	oxidized	0,6	0,15	0,1	0,1

Tabel 3: Emissietabel van niet-metalen met bijhorende golflengtes (GmbH, 2013).

Material		typical Emissivity			
Spectral response		1,0 μm	2,2 μm	5,1 μm	8-14 μm
Asbestos		0,9	0,8	0,9	0,95
Asphalt				0,95	0,95
Basalt				0,7	0,7
Carbon	non oxidized		0,8-0,9	0,8-0,9	0,8-0,9
	graphite		0,8-0,9	0,7-0,9	0,7-0,8
Carborundum			0,95	0,9	0,9
Ceramic		0,4	0,8-0,95	0,8-0,95	0,95
Concrete		0,65	0,9	0,9	0,95
Glass	plate		0,2	0,98	0,85
	melt		0,4-0,9	0,9	
Grit				0,95	0,95
Gypsum				0,4-0,97	0,8-0,95
Ice					0,98
Limestone				0,4-0,98	0,98
Paint non alkaline					0,9-0,95
Paper any color				0,95	0,95
Plastic >50 μm non transparent				0,95	0,95
Rubber				0,9	0,95
Sand				0,9	0,9
Snow					0,9
Soil					0,9-0,98
Textiles				0,95	0,95
Water					0,93
Wood natural				0,9-0,95	0,9-0,95

3.7.2 Afstand tot het brandpunt

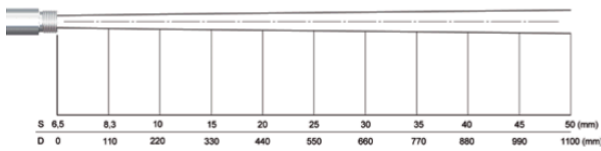
De afstand tot het brandpunt moet voldoende zijn om het smeltbad op te meten doorheen het glas. Anders zal de sensor tot tegen het glas geplaatst moeten worden. Een relatief kleine afstand tot het brandpunt resulteert in een versnelde vervuiling van de lens. Dit kan vermeden worden door gebruik te maken van een lucht zuivering systeem.

3.8 Keuze van de pyrometer

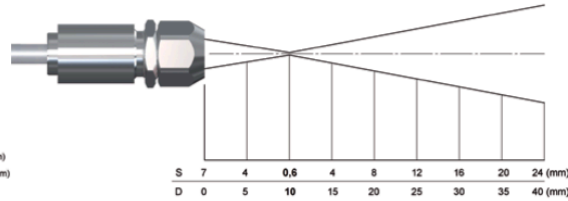
In dit onderzoek is gekozen voor de Optris CT LT22 CF (Afbeelding 11). Hoewel deze niet aan alle vereiste voldoet, is dit type toch een waardige pyrometer. De vereiste specificatie in verband met het spectraal bereik is niet vervuld. Een spectraal bereik kleiner dan 2 μm doet de kostprijs vertienvoudigen. Daarom is in overleg met Absolom ProLab deze

specificatie nadien bijgesteld en kwam de Optris CT LT22 als beste pyrometer naar voor tussen de overige modellen. In Tabel 4 zijn de belangrijkste specificaties terug te vinden van de gekozen pyrometer. De Optris CT LT22 is voorzien van een afneembare Close Focus (CF) lens (Afbeelding 11).

Optics CT LT SF, D:S = 22:1



Optics CT LT CF, D:S = 22:1 (far field = 1,5:1)



Afbeelding 10: Optiek van de Optris CT LT22 met afneembare Close Focus (CF) lens.

Tabel 4: Overzicht van belangrijkste specificaties van pyrometer Optris CT LT22.

Gebruikstemperatuur	- 20 tot 180 °C	Herhaalbaarheid (bij 23,5 °C ± 0,5 °C)	± 0,5% of ± 0,5 °C
Output (analoog)	Ch1 : 0/4 – 20 mA, 0 – 5/10 V Ch2 : 0 – 5/10 V	Resolutie display	0,1 °C
Output (digitaal)	USB	Emissie	0,1 – 1,100
Spectrum bereik	8 – 14 μm	Reactietijd	150 ms
Optische resolutie	22:1	Temperatuursbereik	- 50 tot 975 °C
CF-lens (Close Focus)	0,6 mm @ 10 mm	Software	Optris Compact Connect
Nauwkeurigheid (bij 23,5 °C ± 0,5 °C)	± 1% of ± 1 °C		



Afbeelding 11: Optris CT LT22 met afneembare Close Focus lens.

3.9 Voordelen van IR-metingen

In dit onderzoek is bewust geopteerd voor een contactloze temperatuurmeting. Dit heeft enkele specifieke voordelen. Temperatuurmetingen zijn mogelijk op bewegende of oververhitte objecten en van objecten in een gevaarlijke omgeving, temperatuurmetingen die contactloos zijn, hebben zeer korte reactie- en blootstellingstijden. Een ander voordeel

is dat de temperatuur niet-destructief kan worden gemeten. En tot slot is er nog de duurzaamheid van de meetpunt, aangezien er mechanische slijtage plaatsvindt. (Optris)

3.10 Conclusie

De pyrometer voldoet aan de gewenste specificaties en biedt de mogelijkheid om de temperatuur contactloos op te meten. Het is mogelijk de temperatuur van de kunststof op te meten in zijn vaste vorm alsook in gesmolten de fase. Enkel is, zoals eerder verwacht, het niet mogelijk om doorheen glas te meten. Hierdoor is het niet mogelijk tijdens het lassen van de kunststof de temperatuur op te meten als er gebruikt gemaakt wordt van een glazen aandrukplaat.

4 TOOLING VOOR PYROMETER

Om het gebruik van de pyrometer zo accuraat mogelijk te krijgen, is een hulpmiddel ontworpen voor de montage van de pyrometer. Belangrijk is dat de positie van de pyrometer goed reproduceerbaar is. Aangezien de kans reëel is dat de opstelling tijdens het onderzoek meerdere malen moet gedemonteerd worden.

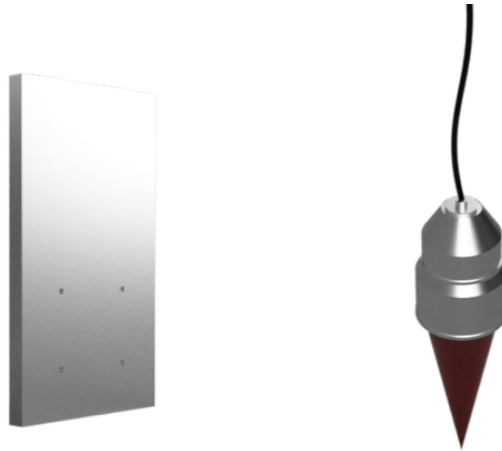
Om de reproduceerbaarheid van de locatie van het meetpunt te waarborgen is gekozen voor een ontwerp met een beperkt aantal vrijheidsgraden.

4.1 Ontwerp en componenten

Het ontwerp is weergegeven in Afbeelding 18. In deze paragraaf worden kort alle componenten besproken en hun functies verklaard. Elke component is eerst grafisch driedimensionaal uitgetekend en later samengebracht in het geheel om de functie van het ontwerp als geheel te controleren.

4.1.1 Baseplate

Deze component is vereenvoudigde weergegeven. In de praktijk is een bestaande baseplate gebruikt - die eerder al voor een andere opstelling gebruikt werd - en aangepast om het geheel te verbinden met de beweegbare Z-as van de opstelling. In de eerder gebruikte baseplate werden vier nieuwe boutgaten aangebracht. De recyclage werd gedreven vanuit het economische standpunt. Een nieuwe baseplate maken zou enkel resulteren in een hogere kost zonder een extra meerwaarde. Het vereenvoudigde ontwerp is afgebeeld links in Afbeelding 12.



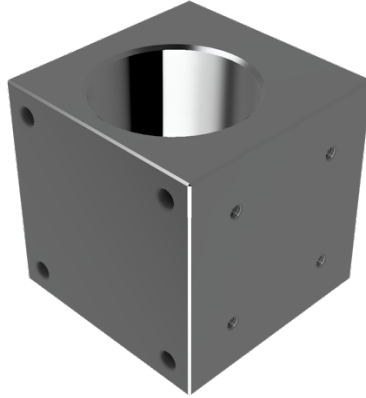
Afbeelding 12: Links - Ontwerp van de baseplate voor de tooling van de pyrometer op de bestaande CNC-sturing. Rechts - Laserlens met een simulatie van de grootst mogelijke laserbundel.

4.1.2 Laserlens

Bij dit onderzoek werd een bestaande laserlens (Afbeelding 12 rechts) gebruikt. Ter controle van het eindontwerp (cfr. Afbeelding 18) is ook de laserbundel getekend indien deze 100% van de beschikbare lens zou innemen. Dit is praktisch niet het geval maar bij het ontwerp is dit beschouwd om invallende straling op andere componenten voortijdig op te sporen. Dit kan anders problemen geven tot ongewenste reflectie, een asymmetrisch smeltbad of een beschadiging van een of meerdere andere componenten.

4.1.3 Laserlenshouder

Deze component (Afbeelding 13) heeft als functie de laserlens op de juiste positie te houden. Met behulp van fijne schroefdraad is de laserlens in de laserlenshouder aangebracht. De laserlenshouder is met bouten tegen de baseplate gemonteerd. Aan de rechterzijde van de laserlenshouder is een microregeling voorzien voor een nauwkeurige afregeling van de verticale strip.



Afbeelding 13: Ontwerp van de laserlenshouder voor de tooling van de pyrometer.

4.1.4 Verticale strip

De verticale strip verbindt de microregeling van de laserlenshouder met de meetkophouder. In een eerder ontwerp was deze component cilindervormig. Dit voegt een extra vrijheidsgraad toe in het ontwerp waardoor een reproductie van de opstelling bemoeilijkt wordt. Afbeelding 14 toont ook het uitgebreide boutenpatroon in deze strip om universeel te fungeren voor het gebruik van lenzen met verschillende focuseerafstanden. De montage van de verticale strip op de laserlenshouder gebeurt met kunststof bouten. De kunststof bouten dienen als gecontroleerd breekelement indien de pyrometer in aanraking komt met de bewegende tafel.



Afbeelding 14: Ontwerp van de verticale strip voor de tooling van de pyrometer.

4.1.5 Microregeling

De microregeling (Afbeelding 15) is toegevoegd om de instelling van de tooling te vergemakkelijken. De microregeling is verstelbaar in twee richtingen loodrecht op elkaar. Als de juiste instelling bekomen is, kan de stand bewaard worden door de *lock*-schroef aan

te draaien. De Newport M-DS40 series XY microregeling is afkomstig uit het materiaalmagazijn.



Afbeelding 15: Newport M-DS40 series XY microregeling voor de tooling van de pyrometer.

4.1.6 Pyrometer

De meetkop van de pyrometer op Afbeelding 16 is louter driedimensionaal getekend voor het simuleren van werking van de tooling. De meetkop is ook voorzien van een fictieve lichtbundel om de ligging van het brandpunt voor te stellen. Praktisch is deze lichtbundel niet zichtbaar, wat het instellen van de tooling moeilijk maakt.

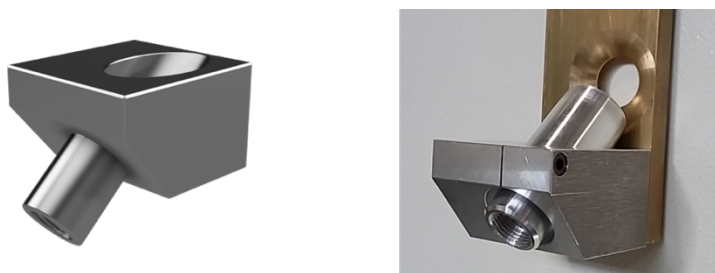


Afbeelding 16: Meetkop van de pyrometer voor het simuleren van de tooling voor de pyrometer.

4.1.7 Meetkophouder

De meetkophouder (Afbeelding 17, links) voorziet twee functies. Het beschermen en fixeren van de meetkop. De uitstekende bus beschermt de schroefdraad en de lens voor laserstraling die, bij een fout, mogelijk op de meetkop zou kunnen invallen. Ook is de bus binnenin voorzien van schroefdraad met een aanslag om de de positie van de meetkop steeds te kunnen reproduceren. De realisatie lijkt lichtjes van het ontwerp. Peter Geudens, die de productie van de tooling voor zich nam, heeft een creatieve wijziging aangebracht waardoor de complexiteit van de meetkophouder afneemt en eindresultaat niet verandert. De bus met inwendige draad en het lichaam werden eerst afzonderlijk gemaakt en pas nadien tot een geheel samengebracht. Hierdoor werd de component opgesplitst in twee eenvoudig te produceren componenten. Afbeelding 17 (rechts) toont het eindresultaat van de meetkophouder op de verticale strip. Eén nadeel van deze wijziging is de extra vrijheidsgraad van de opstelling. Deze afbeelding toont ook dat de verticale strip niet uit aluminium is vervaardigd zoals op het ontwerp is aangegeven, maar wel uit messing. De

verklaring hiervoor is dat de messingstrip met de gewenste maten voorhanden was in het magazijn. Hierdoor konden andere productiestappen worden vermeden.



Afbeelding 17: Ontwerp van de meetkophouder voor de tooling van de pyrometer (inks). Eindresultaat van de subassemblage van de meetkophouder op de verticale strip (rechts).

4.2 Assemblage van de tooling

Na het simuleren van de werking in het CAD-tekenpakket is de werking van de tooling goed bevonden. Vervolgens zijn alle technische tekeningen opgesteld en overlopen met Peter Geudens ter controle van de bemating.

Belangrijk is dat bij het eindresultaat (Afbeelding 18) het brandpunt van de laser samenvalt met de meetspot. Deze voorwaarde waarborgt een correcte meting. Bij het ontwerp is deze voorwaarde gecontroleerd door beide bundels te tekenen op ware grootte en visueel te controleren of de brandpunten samenvielen. Aangezien er mogelijk afwijkingen kunnen ontstaan bij de productie alsook bij de montage is de opstelling daarom voorzien van een microregeling (cfr. 4.1.5).

In de bijlage achteraan deze scriptie kan de lezer alle technische documenten van de tooling terugvinden.



Afbeelding 18: Eindontwerp van tooling voor de pyrometer.

4.3 Instelling

De instelling gebeurt manueel. De laser is ingesteld op een constant vermogen en het brandpunt is ingesteld op het oppervlak van een zwarte kunststof. Eerst wordt de tooling van de pyrometer grof ingesteld op het blote oog. Eenmaal dit gebeurd is, wordt de laser geactiveerd en met behulp van de microregeling de positie fijn afgesteld. De pyrometer geeft de actuele temperatuur. Door de microregeling in zowel X als Y-richting te verplaatsen zal de temperatuur. Het vergt nu de vaardigheid om de hoogste temperatuur te vinden en de microregeling op deze positie te blokkeren. Deze positie komt overeen met het samenvallen van beide brandpunten. Om de instelling vlotter te laten verlopen in bij het ontwerp in het tekenpakket gecontroleerd of een juiste instelling haalbaar was.

4.4 Conclusie

De tooling is met succes gerealiseerd tot een werkend resultaat. Het is mogelijk om de tooling nauwkeurig af te stellen met de microregeling en de instelling kunnen worden bewaard. Het monteren en demonteren kan in enkele minuten gebeuren. Na het opnieuw monteren is het wederom instellen van de tooling niet noodzakelijk. Kunststofbouten voorzien een veiligheid indien de tooling door een foutieve programmering tegen een object zou lopen. De bouten breken af zonder dat de tooling of de pyrometer beschadiging oplopen. Het universele karakter van de tooling geeft de mogelijkheid om de tooling ook bij andere onderzoeken of andere lasercombinaties te gebruiken.

5 PID-REGELAAR

Met behulp van de pyrometer zal een PID-regelaar het proces zodanig sturen zodat een gewenste temperatuur kan worden ingesteld en de laser het vermogen aanpast om deze ingestelde temperatuur te onderhouden. De PID-regelaar is geprogrammeerd op een Arduino. De keuze voor Arduino is te verklaren door de lage investeringskost, het open-source platform en de eerder opgedane kennis in de bachelor industriële ingenieurswetenschappen.

5.1 Basisprincipes

De PID-regelaar (Proportioneel, Integreerend en Differentiërend) is de meeste algemene klassieke regelaar bij processen. Deze volstaat voor de meeste systemen mits een juiste keuze van de parameters K_r , τ_d en τ_i . De regeling is gebaseerd op een verschil (*fout e*) tussen de ingestelde gewenste waarde en de werkelijke gemeten waarde. Deze fout wordt met de regelaar bijgestuurd. Dit gebeurt met drie verschillende onderdelen.

5.1.1 De proportionele regelaar of P-regelaar

Het foutsignaal e wordt eenvoudig versterkt of verzwakt om het stuursignaal voor het systeem te genereren (Afbeelding 19). Het stuursignaal kan worden voorgesteld als:

$$u(t) = K_r \cdot e(t)$$

De P-actie komt bijna bij alle regelaars terug. Deze P-regelaar wordt voorgesteld met een parameter K_r .

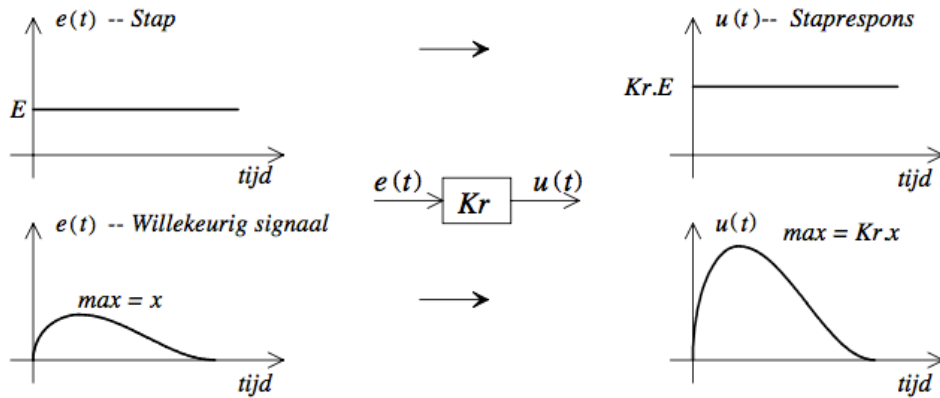
De voordelen van een proportionele regelaar zijn:

- Het sneller maken van een systeem en verkleinen van de standfout of dus vergroten van de statische nauwkeurigheid naar mate K_r groter wordt.
- Goede ruisonderdrukking bij grote K_r waarden.

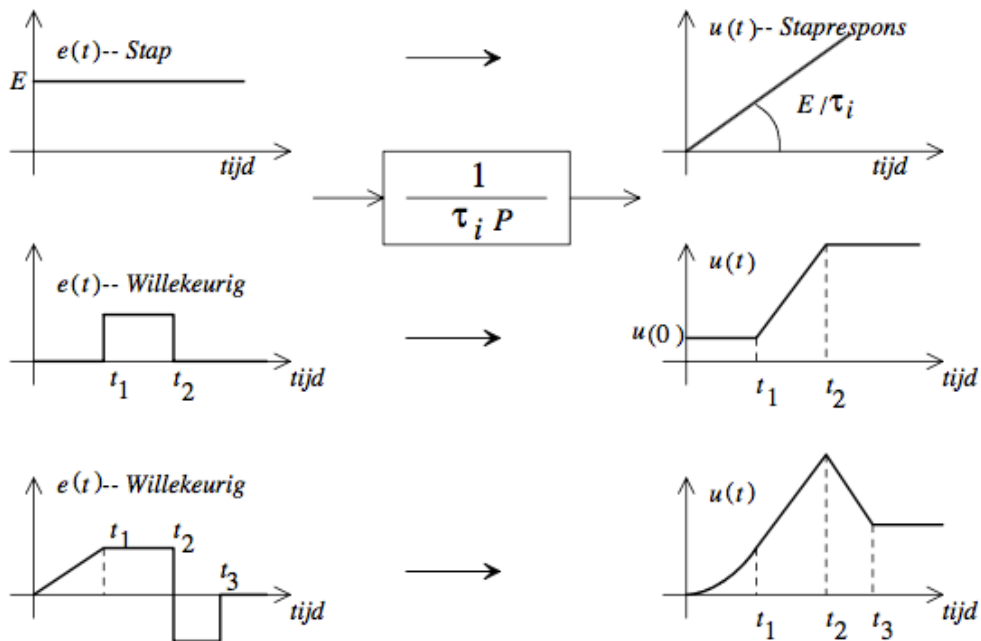
De nadelen zijn:

- Mogelijk instabiel systeem bij te grote K_r waarden.
- Te hevige systemen bij te grote K_r waarden.
- Geen ruisonderdrukking bij te kleine K_r waarden.
- Ontstaan van een standfout, die groter is naarmate K_r kleiner is.

We moeten de voor- en nadelen van de P-regelaar tegen elkaar afwegen bij het bepalen van de optimale K_r waarde. Het belangrijkste hierbij is dat het systeem niet instabiel wordt en best nog een grote relatieve stabiliteit heeft.



Afbeelding 19: Uitgangssignalen van een proportionele regelaar bij de gegeveningangssignalen.



Afbeelding 20: Uitgangssignalen van de integrerende regelaar bij de gegeveningangssignalen.

5.1.2 De integrerende regelaar of I-regelaar

Het foutsignaal e wordt geïntegreerd en met een factor $1/\tau_i$ vermenigvuldigd:

$$u(t) = \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(t) dt$$

Het voordeel van een integrerende regelaar is:

- Standfout of statische fout wordt geëlimineerd door integratie van *fout* e doorheen de tijd.

De nadelen zijn:

- Mogelijk instabiel systeem bij een foutieve (te kleine) τ_i waarde (te snelle integrator).
- Te langzame systemen bij te grote τ_i waarden (te langzame integrator).

Afbeelding 20 toont enkele voorbeelden van het uitgangssignaal van de integrerende-regelaar ten gevolge van een constante fout en twee andere willekeurige foutsignalen $e(t)$.

De integrerende regelaar vergroot het stuursignaal $u(t)$ zolang het verschilsignaal $e(t)$ tussen het gewenste signaal en het werkelijke signaal groter is dan 0. Indien $e(t) < 0$, dan zal het stuursignaal $u(t)$ afnemen. Op het ogenblik dat $e(t) = 0$, en ook gelijk blijft aan nul, houdt de regelaar het stuursignaal van dat ogenblik aan.

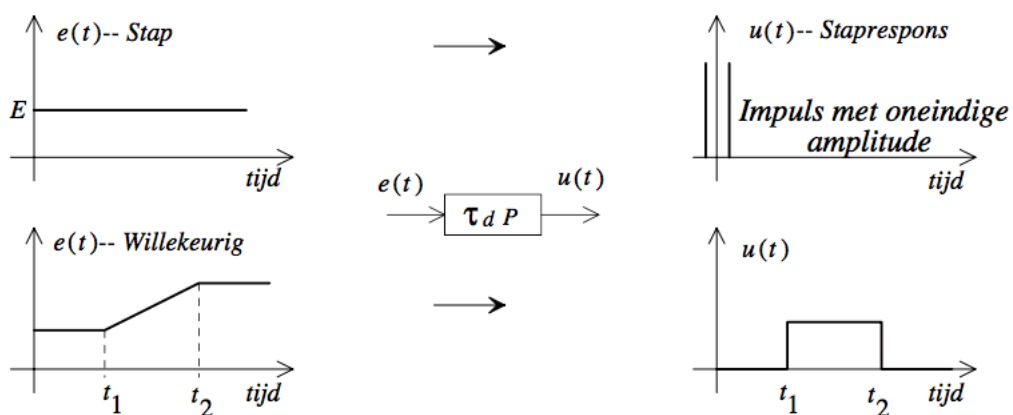
Praktisch moeten en zullen de signalen begrensd zijn. Het te regelen systeem zal dus bepaalde beperkingen opleggen aan de regelaar. Een voorbeeld hiervan is de toegelaten grootte van het stuursignaal. Anderzijds is ook de regelaar zelf fysisch beperkt. Indien we bijvoorbeeld een operationele versterker (OPAMP) gebruiken om de I-regelaar te bouwen, dan kan het uitgangssignaal van de regelaar nooit groter worden dan de voedingsspanning van de OPAMP. In dit onderzoek zal de maximale uitgangsspanning 5 V bedragen. Dit is de maximale spanning die de Arduino kan leveren. Indien men eenmaal deze maximale waarde bereikt heeft (er is m.a.w. een verzadiging opgetreden), zal de regelaar niet meer werken volgens bovenvermelde figuren of formules. De maximumwaarde (of verzadigingswaarde) blijft aangehouden tot het verschilsignaal $e(t)$ terug negatief wordt. Pas dan zal de uitgang van de I-regelaar terug veranderen.

5.1.3 De differentiërende regelaar of D-actie

Het uitgangssignaal van een differentiator is de afgeleide van het ingangssignaal:

$$u(t) = \tau_d \cdot \frac{d(e(t))}{dt}$$

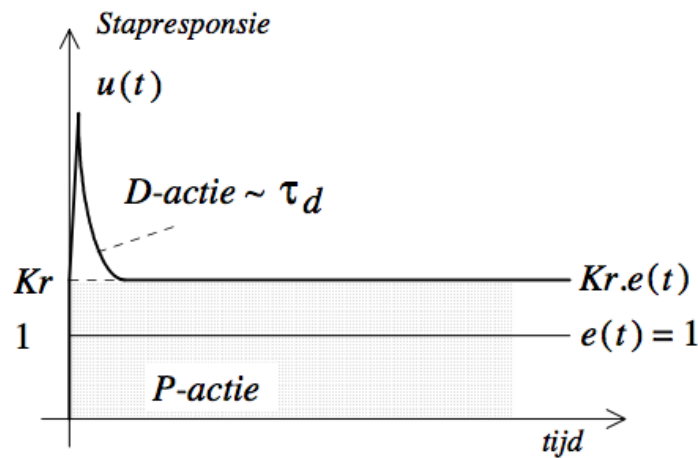
Afbeelding 21 geeft enkele voorbeelden van de D-regelaar. In de praktijk zal een zuivere D-regelaar zelden alleen voorkomen. Het vormt meestal een onderdeel van een grotere regelaar (zoals een PID-regelaar). Vandaar de benaming als D-actie in plaats van D-regelaar.



Afbeelding 21: Uitgangssignalen van de differentiërende actie bij de gegeven ingangssignalen.

Mathematisch gezien is de staprespons van een differentiator een oneindige piek met oppervlakte gelijk aan $E \cdot \tau_d$. Praktisch is dat onmogelijk. De werkelijke staprespons zal meer afgevlakt of afgerond zijn en ook een eindige tijd duren. In Afbeelding 22 wordt dit zo getekend.

De D-actie heeft (meestal) een stabiliserend effect op de regelkring of op het systeem. Men mag τ_d echter niet te klein kiezen want anders is het voordelig effect omzeggens nihil. Anderzijds mag men τ_d ook niet te groot kiezen want dan wordt het gedrag van de regelaar heel 'onrustig'.



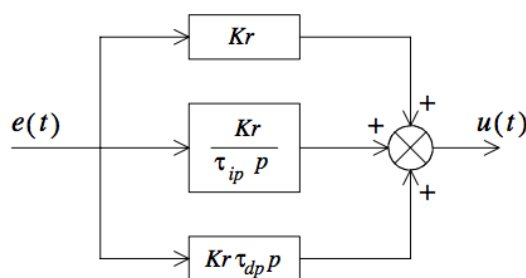
Afbeelding 22: Staprespons van een regelaar bestaande uit een P-regelaar en een D-actie.

5.2 De regelaar

De PID-regelaar bestaat uit de combinatie van de eerder besproken P-, I- en D-regelaar. De voordelen (resp. nadelen) van de P-, I- en D-actie worden hier dan ook gebundeld. In feite bestaan er twee soorten PID-regelaars: de parallelle en de seriële PID-regelaar. Ze hebben ongeveer hetzelfde effect op de regelkring of op het systeem. Enkel de invloed van de tijdconstanten is lichtjes verschillend voor de twee regelaars.

5.2.1 De parallelle PID-regelaar

De parallelle PID-regelaar kan worden voorgesteld zoals in Afbeelding 23.

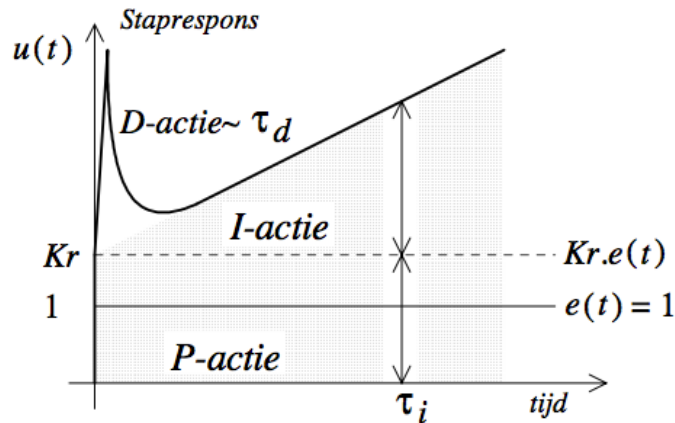


Afbeelding 23: Blokkendiagram van de parallelle PID-regelaar.

Het uitgangssignaal is dus evenredig met het ingangssignaal, de afgeleide en de integraal hiervan:

$$u(t)_{PID-parallel} = Kr \cdot e(t) + Kr \cdot \tau_{dp} \cdot \frac{d(e(t))}{dt} + Kr \cdot \frac{1}{\tau_{ip}} \int_0^t e(t) dt$$

Afbeelding 24 toont het aandeel van elke aparte actie (resp. P-, I- en D-actie) op een aangelegde stap. Hierbij is duidelijk te zien dat de D-actie enkel aangrijpt bij het begin en nadien afneemt. De P- en I-actie blijven actief zolang de aangelegde stap aanwezig is.

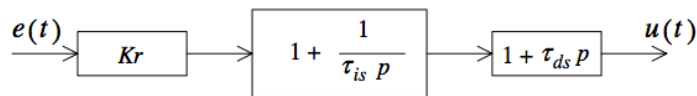


Afbeelding 24: Staprespons van de parallelle PID-regelaar.

5.2.2 De seriële PID-regelaar

De seriële PID-regelaar (Afbeelding 25) kan beschreven worden als:

$$u(t)_{PID-serie} = Kc \left(1 + \tau_{dp} \cdot \frac{d(e(t))}{dt} \right) \left(e(t) + \frac{1}{\tau_{is}} \int_0^t e(t) dt \right)$$



Afbeelding 25: Blokkendiagram van de seriële PID-regelaar.

5.2.3 Verband tussen seriële en parallelle tijdsconstanten

Er heerst een verband tussen de seriële en de parallelle tijdsconstanten. Dit kan analytisch voorgesteld worden als:

$$\tau_{dp} = \frac{\tau_{dp} \cdot \tau_{is}}{\tau_{ds} + \tau_{is}}$$

$$\tau_{ip} = \tau_{is} + \tau_{ds}$$

$$Kr_p = Kr_s \left(1 + \frac{\tau_{ds}}{\tau_{ip}} \right)$$

Merk op dat het product van de seriële en parallelle tijdsconstanten gelijk is.

Vaak zal eenvoudigheidshalve met de parallelle PID-regelaar gewerkt worden indien de regeling zich baseert op de staprespons (of dus een tijdrespons). Indien echter een Bodediagram dient getekend te worden zal de voorkeur gaan naar de seriële PID-regelaar die een aaneenschakeling is van een PI- en een PD-regelaar.

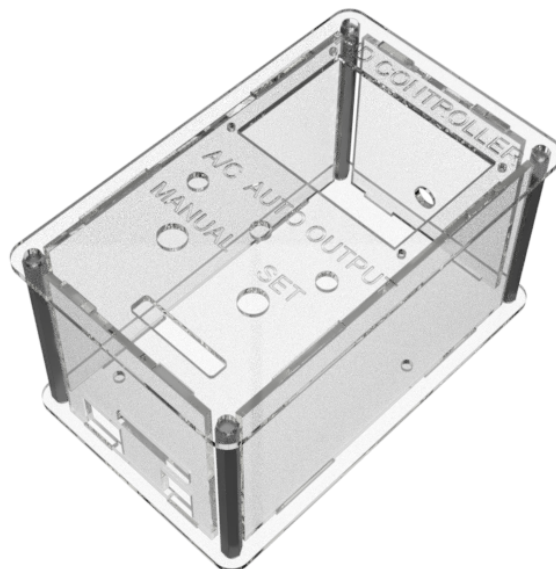
Het Bodediagram valt buiten het bestek van dit onderzoek.

5.2.4 De PID-regelaar in de Arduino

De fundering van de PID-regelaar die in dit onderzoek gebruikt wordt, is omwille van het open-source platform van Arduino, afkomstig van de website van Arduino (www.arduino.org) en is verder aangevuld en aangepast naar de nood van het onderzoek. Bij deze PID-regelaar wordt gebruik gemaakt van een parallelle PID-regelaar zoals eerder besproken. De basiscode is terug te vinden op de website van B. Beauregard. De uiteenzetting van deze code zou deze scriptie te ver laten afdwalen (Beauregard B. , 2011).

De software is geplaatst op een Arduino Uno. Dit is een basismodel en bevat voldoende in- en uitgangen voor de PID-sturing. Voor een eenvoudige en gebruiksvriendelijke werking is de Arduino ingebouwd in een behuizing bestand tegen schokken. De behuizing bevat een draaiknop voor de instelling van de gewenste temperatuur, een schakelaar voor het inschakelen van de PID-sturing (of voor een vast geprogrammeerd vermogen), gekleurde leds als indicatie en een display met weergave van praktische waarden. Langs de korte zijde van de behuizing is een USB-aansluiting voorzien voor het uploaden van software, een connectie voor een externe voedingsbron alsook een snelkoppeling voor een connectie met de lasersturing. In de behuizing zijn 3 aparte schroefkoppeling voorzien voor het aansluiten van een 24 V gelijkspanningsbron, de relais van de CNC voor het inschakelen van de laser en een aansluiting voor het temperatuursmeting. Afbeelding 26 toont de zelf ontworpen behuizing, gesneden met een laser uit plexiglas (PMMA). In bijlage 5 is de volledige lasercontour terug te vinden.

Vanuit het economische standpunt is gekozen voor een afneembaar protoshield waarop alle component gesoldeerd worden. Hierdoor kan de Arduino Uno ook voor andere projecten gebruikt worden. (Arduino)



Afbeelding 26: Ontwerp van transparante case uit plexiglas voor de lasersturing met Arduino.

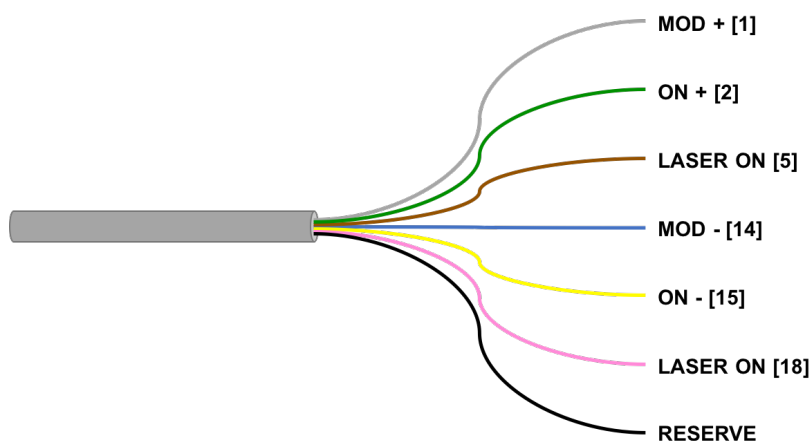
5.2.5 Bepalen van de parameters

In de literatuur bestaan verschillende regels voor de bepaling van de tijdconstanten en de versterkingsfactor van de PID-regelaar. Sommige regels baseren zich op experimentele bepalingen, anderen volgen uit wiskundige afleidingen. Het bepalen van de parameters wordt behandeld in 5.5. (Prof. dr. ir. van Waterschoot) (Baeten) (National Instruments Corporation, 2014)

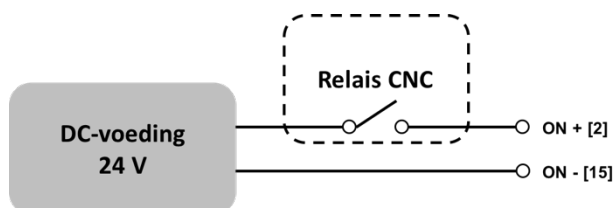
5.3 Elektrische schema's

Eerst is de opstelling uitgebreid getest op een breadboard². Nadat de werking goed bevonden is, is de opstelling gesoldeerd op een protoshield. Hierdoor kan de elektrische schakeling snel en eenvoudig worden aangesloten op de Arduino. Voor een correcte werking en efficiënte aansluiting zijn alle schema's uitgetekend. Hierdoor kunnen latere aanpassingen gebeuren op basis van het fundamenteel schema.

Afbeelding 27 toont de aansluitingen voor de draden externe sturing van de laser met. De nummering tussen de vierkante haken is representatief voor de pinconfiguratie achteraan de laserbron. Met MOD+ en MOD- is het mogelijk het vermogen van de laser te sturen met een spanning. LASER ON is voorzien van een spanning van 5 V die de Arduino kan uitlezen. Hiermee wordt bepaald wanneer de laser al dan niet in werking is. Dit is noodzakelijk om opstartverschijnselen te vermijden. Indien de laser langdurig is uitgeschakeld, zal de PID-sturing steeds meer output voorzien om de fout weg te werken. Echter reageert de laser niet op deze output. Wanneer de laser nu wordt ingeschakeld, zal de laser meteen met vol vermogen werken omwille van de foutieve bijsturing van de PID. LASER ON zorgt ervoor dat de PID-sturing niet actief is als de laser uitgeschakeld is. Hierdoor treedt het opstartverschijnsel niet op. Tot slot is ON+ en ON- nodig ter beveiliging. Wanneer de deur van de laseropstelling geopend is, zal de laser nooit opstarten. Enkel bij een correct gesloten deur zal een relais in de CNC-sturing de laser opstarten (Afbeelding 28). Deze beveiliging is zo ingebouwd in de CNC-sturing. De zwarte draad (in realiteit wit, maar voor een duidelijke voorstelling hier zwart getekend) is niet aangesloten maar aanwezig als reserve in het geval een andere draad niet meer functioneert. Met behulp van een negenpolige sub-D-stekkerverbinding kan de connectie tussen de Arduino en de laser snel tot stand komen.



Afbeelding 27: Aansluitingsschema van draden voor de externe sturing van de laser.



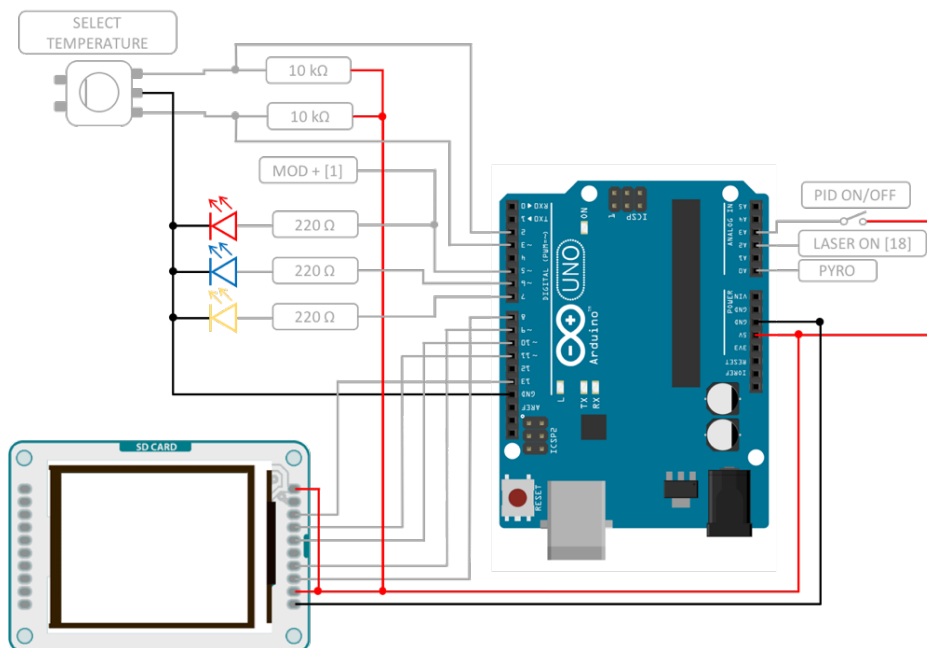
Afbeelding 28: Veiligheidsschakeling voor het stoppen van de laser bij het openen van de deur van de laseropstelling.

² Universeel kunststof prikbordje voor het opbouwen van elektronische schakelingen.

In Afbeelding 29 is het elektrisch schema weergegeven van alle componenten. Een draaiknop geeft de mogelijkheid om een gewenste temperatuur in te stellen. Via een bistabiele schakelaar kan de PID-sturing in- en uitgeschakeld worden. Staat de schakelaar op de positie *PID OFF* dan zal de Arduino een constante spanning naar de laser sturen. Hierdoor zal de laser een constant vermogen genereren. De waarde van het vermogen kan via de software ingesteld worden. De rode led is representatief voor het laservermogen. Indien de rode led is gedoofd, zal het vermogen gelijk zijn aan 0 watt. Brandt de led op de hoogste intensiteit, dan stuurt de Arduino 5 volt (de maximale uitgangsspanning van de Arduino) naar de laser.

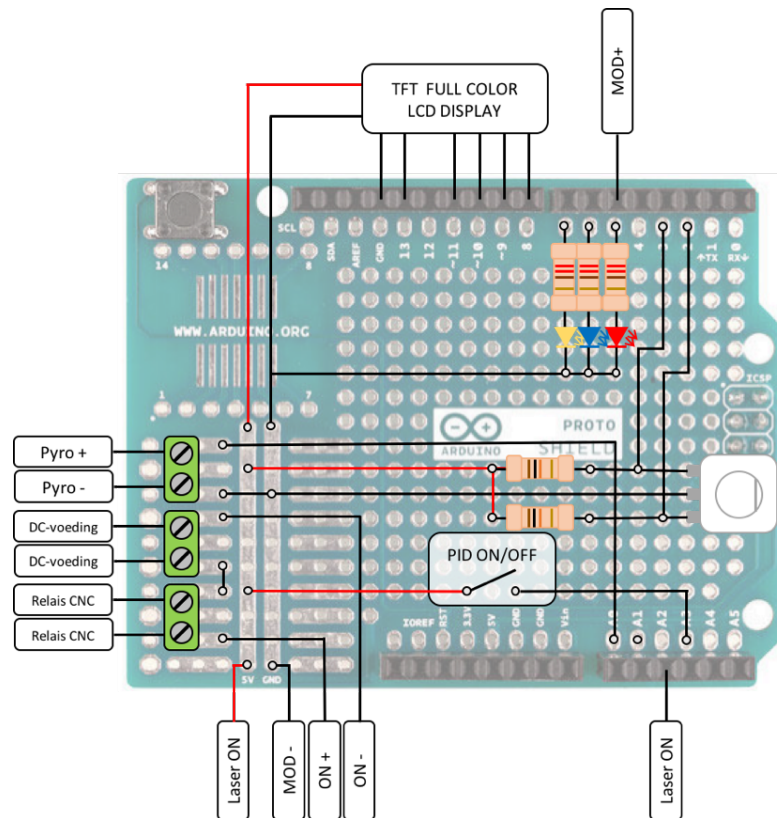
De gele led geeft een indicatie voor parameters van de PID. Indien de gele led oplicht, zijn de agressieve parameters van kracht. Hierdoor stuurt de PID de laser agressief bij. Indien de gele led dooft, zijn de conservatieve parameters van kracht. Hierdoor stuurt de PID de laser gematigd bij. De waarden van de agressieve en de conservatieve parameters zijn enkel toegankelijk via de software.

Tot slot is er nog de blauwe led. Indien de PID-sturing is uitgeschakeld, knippert de blauwe led. Hierdoor kan de operator visueel controleren dat de PID het laservermogen niet bijstuurt in functie van de ingestelde temperatuur.



Afbeelding 29: Elektrisch schema van de PID-regelaar voor een Arduino Uno.

Uiteindelijk is de volledige schakeling definitief aangebracht op het protoshield. Om een efficiënte aanpak te garanderen, is vooraf het volledige schema uitgetekend op de protoshield (Afbeelding 30). Indien gewenst kunnen er nadien nog aanpassing gebeuren. Hiervoor is een schema nodig van het bestaande circuit.



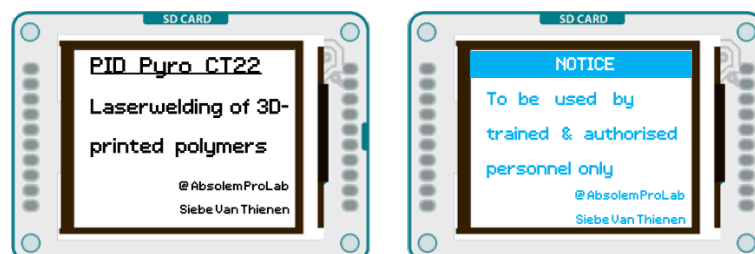
Afbeelding 30: Schema voor het solderen van de PID-regelaar op de protoshield (compatibel met Arduino Uno).

5.4 Interface voor de operator

Niet enkel een snelle aansluiting van de sturing is gewenst, ook de bediening van de sturing moet gebruiksvriendelijk zijn. Een te grote keuze aan parameters en een onduidelijk overzicht veroorzaken vaak problemen bij het gebruik van dergelijke sturingen.

5.4.1 Opstartscherm

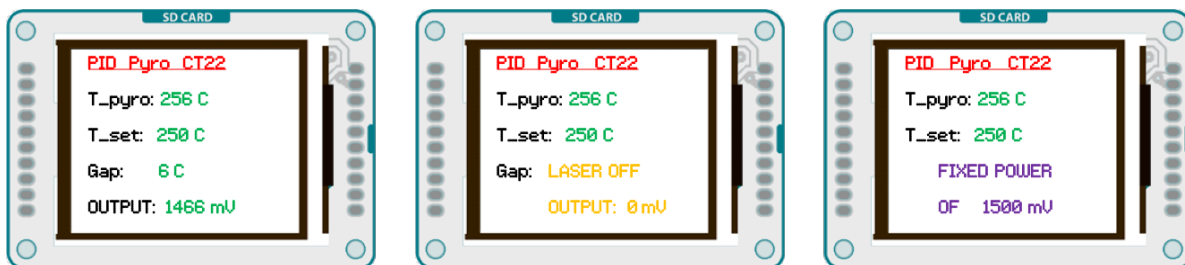
Bij het opstarten van de sturing verschijnt er op de LCD eerst een boodschap van het eindwerk. Na een korte wachttijd verschijnt een boodschap die de gebruiker bewust maakt dat de lasersturing enkel gebruikt mag worden door bevoegde personen met de nodige opleiding. Afbeelding 31 toont het opstartscherm en de waarschuwingsboodschap bij het opstarten van de lasersturing.



Afbeelding 31: Opstartscherm (links) en waarschuwingsboodschap (rechts) bij het opstarten van de lasersturing.

5.4.2 Interface bij elke modus

Eenmaal de opstartprocedure is doorlopen, is de lasersturing klaar voor gebruik. Er zijn drie verschillende modi. Afbeelding 32 toont de drie mogelijke weergaves op de LCD. Links is de interface weergegeven wanneer de laser actief is en de PID-sturing de temperatuur controleert. T_{pyro} toont de temperatuur opgemeten door de pyrometer. T_{set} geeft de ingestelde temperatuur. De gewenste temperatuur kan worden gewijzigd met een draaiknop op de behuizing. Gap duidt op het verschil tussen de actuele gemeten temperatuur en de gewenste temperatuur. De middenste interface is van toepassing wanneer de laser inactief is. Deze modus is van belang om het opstartverschijnsel te controleren. Indien de PID-sturing altijd actief is, zal bij het uitschakelen van de laserstraling de output doorheen de tijd stijgen tot aan het maximum van 5V. Wanneer de laser dan opnieuw actief wordt, zal de laser met vol vermogen starten en langzaam dalen tot de temperatuur stabiel. Dit kan leiden tot een volledige degradatie van het kunststof. Rechts is de interface afgebeeld die actief wordt bij het omschakelen van de schakelaar op de behuizing. Hiermee is het mogelijk om de laser aan te sturen met een vast vermogen. Ook dit vermogen kan met de draaiknop op de behuizing worden ingesteld. Deze laatste instelling was nodig bij het bepalen van de karakteristieken van de kunststoffen alsook om de invloed na te gaan bij het wijzigen van de kritische parameters. Verder in de scriptie wordt hier dieper op in gegaan.



Afbeelding 32: Interface van de lasersturing bij: het gebruik van de PID-sturing tijdens het lassen (links), bij het gebruik van de PID-sturing in stand-by als de laser niet actief is (midden) en bij het gebruik van de lasersturing met een een constant vermogen (rechts).

5.5 Instellen van de PID-sturing

Afhankelijk van de gebruikte laser en de procesopstelling zullen de optimale parameters voor de PID-sturing wijzigen. Voor het bepalen zijn meerdere methodes mogelijk. Voor het bepalen van de P-, I- en D-actie zijn er twee veelgebruikte methodes: *Trial & Error* en *Ziegler-Nichols*.

5.5.1 Trial & Error

De eerste is de *Trial & Error* methode en is gebaseerd op de ervaring van de operator. Door het zelf kiezen van de parameters en meteen uitproberen ervan gaat men opzoek naar goede, aanvaardbare parameters voor de PID-regelaar. Het volgen van volgende stappen verhoogt de kans op een snelle vondst van aanvaardbare instelling:

1. Stel eerst de P-waarde in zodat de standfout minimaal is en de regelaar na twee tot drie slingeringen redelijk stabiel is (hoge versterking).
2. Voer de I-waarde op totdat de regelaar redelijk snel op de goede eindwaarde komt.
3. Stel de D-waarde in zodat de regelaar sneller op de gewenste waarde komt zonder dat de regeling te onrustig wordt.

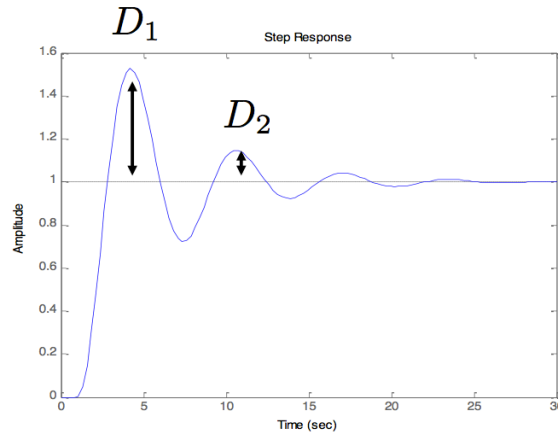
Gegeven dat elke parameter (P,I als D) typisch kan variëren van 0,01 tot 100 en dat de vertragingstijden in het proces groot kunnen zijn kan dit een langdurige opgave zijn.

5.5.2 Ziegler-Nichols regelaarsinstellingen

Ziegler-Nichols heeft als empirische doelstellingen dat de vervalratio moet voldoen aan:

$$\frac{D_1}{D_2} \approx \frac{1}{4}$$

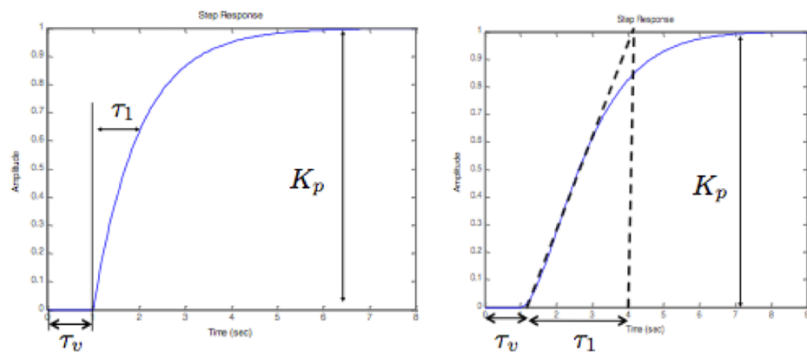
én dat de standfout gelijk moet zijn aan nul. Afbeelding 33 toont hoe dit zich vertaalt in het proces.



Afbeelding 33: Doelstelling voor een staprespons volgens Ziegler-Nichols.

5.5.2.1 Ziegler-Nichols instelling 1

Deze instelling is gebaseerd op de stapresponsie van het ongeregelde systeem. Vervolgens dienen de parameters experimenteel bepaald te worden. Afbeelding 34 toont grafisch hoe deze parameters kunnen worden afgelezen.



Afbeelding 34: Aflezen van de experimentele parameters op de stapresponsie van een ongeregeld systeem.

Aan de hand van deze experimentele parameters is het mogelijk om met behulp van Tabel 5 goede regelaarsinstellingen te bepalen.

Tabel 5: Tabel voor het bepalen van regelaarsinstellingen voor een PID-regelaar volgens Ziegler-Nichols 1.

	$K_r K_p$	$P = K_r$	τ_i	$I = \frac{K_r}{\tau_i}$	τ_d	$D = K_r \tau_d$
P	$\frac{\tau_1}{\tau_v}$	$\frac{\tau_1}{\tau_v K_p}$	-	-	-	-
PI	$\frac{0,9 \tau_1}{\tau_v}$	$\frac{0,9 \tau_1}{\tau_v K_p}$	$3,3 \tau_v$	$\frac{K_r}{3,3 \tau_v}$	-	-
PID	$\frac{1,2 \tau_1}{\tau_v}$	$\frac{1,2 \tau_1}{\tau_v K_p}$	$2 \tau_v$	$\frac{K_r}{2 \tau_v}$	$0,5 \tau_v$	$0,5 K_r \tau_v$

5.5.2.2 Ziegler-Nichols instelling 2

Deze instelling is gebaseerd op de stapresponsie van het proportioneel geregelde systeem. Maak vervolgens het systeem eerst marginaal stabiel en bepaal nadien de volgende parameters:

- K_m : de versterking waarop het systeem marginaal stabiel is,
- T_p : de periode van de oscillatie.

$$T_p = \frac{2\pi}{\omega_p}$$

Met deze kennis en Tabel 6 is het mogelijk om goede parameters voor de PID-regelaar te vinden.

Tabel 6: Tabel voor het bepalen van regelaarsinstellingen voor een PID-regelaar volgens Ziegler-Nichols 2.

	K_r	τ_i	τ_d
P	$\frac{K_m}{2}$	-	-
PI	$\frac{K_m}{2,2}$	$\frac{T_p}{1,2}$	-
PID	$\frac{K_m}{1,7}$	$\frac{T_p}{2}$	$\frac{T_p}{8}$

5.6 Conclusie

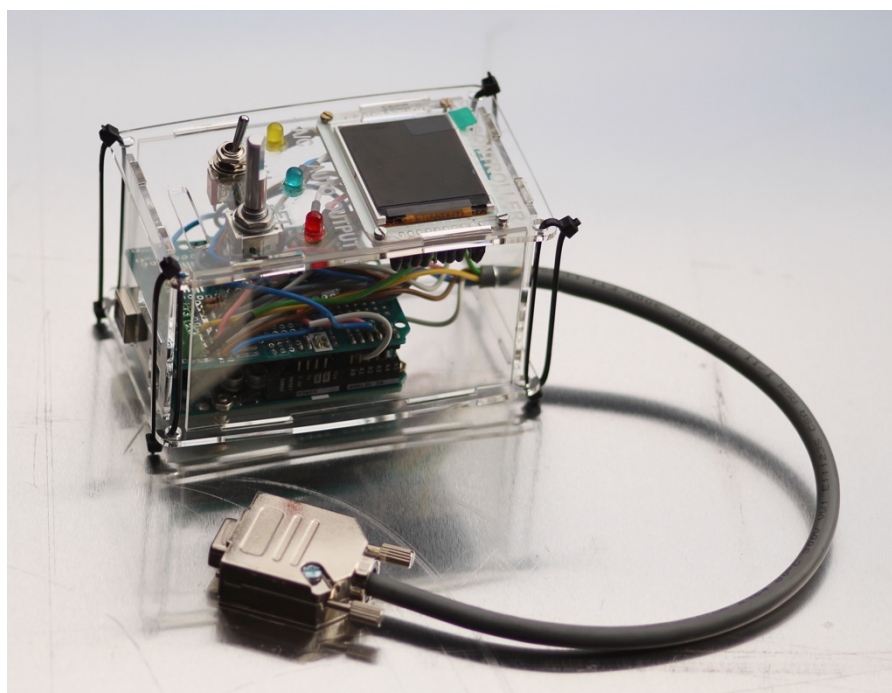
Het eerste deel van de onderzoeksvraag beschrijft de nood aan temperatuurmeting en temperatuurregeling. Met behulp van een Arduino Uno is een universele tool bedacht en uitgewerkt waarmee een laser kan gestuurd worden aan de hand van een temperatuursensor om een vaste temperatuur te waarborgen. Door enkele korte, eenvoudige methodes kan de instelling van de PID achterhaald worden voor een goede werking van de laser. Met behulp van de snelkoppelingen is de temperatuurregeling snel ge(de)monteerd. Door de gebruiksvriendelijke werking is weinig tot geen specifieke kennis nodig voor een correct gebruik.

De PID-regeling voor de pyrometer geeft de mogelijkheid om met de laser een gewenste, regelbare temperatuur constant te houden tijdens het laserproces. De display geeft de

ingestelde en de opgemeten temperatuur, het temperatuurverschil tussen beide alsook de PID-parameters weer. Indien het temperatuurverschil een grenswaarde overschrijdt, zal de PID overgaan naar een agressievere regeling. Hierdoor verkleint de fout sneller en zal de PID automatisch terugkeren naar een fijne regeling.

De lasersturing is voorzien van een USB-poort voor een snelle aanpassing van de programmacode, ook zijn op het afneembare protoshield enkele aansluitingen voorzien voor het aansluiten van een onderbrekingscontact bij het intreden van een veiligheid (bijvoorbeeld bij het openen van de deur wanneer de laser actief is) alsook voor het aansluiten van verschillende soorten temperatuursensoren.

Gedurende het onderzoek was het ook nodig om te lassen met een constant laservermogen. De lasersturing mocht zichzelf dan niet bijsturen. Daarom is ook een functie voorzien zodat het laservermogen constant kan worden gehouden. De keuze tussen de PID en het vast laservermogen gebeurt aan de hand van een schakelaar op de behuizing van de temperatuurregeling. Afbeelding 35 toont de afgewerkte lasersturing.



Afbeelding 35: Lasersturing voor het aansturen van de laser met een vast vermogen of voor het aansturen van de laser met een vaste temperatuur.

6 UNIVERSELE TOOLING VOOR HET LASERLASSEN

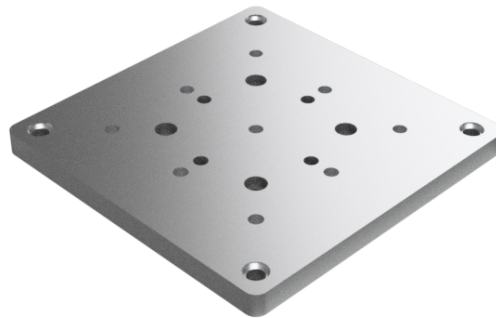
Wanneer een testsample gelast moet worden, is een goede inklemming en uitlijning noodzakelijk. Hiervoor is - samen met Jef Geerinckx - een universele tooling ontwikkeld zodat het te lassen kunststof onderdeel steeds goed uitgelijnd is en voldoende stevig is ingeklemd. Het correct opspannen tijdens het laseren zorgt voor betrouwbare testresultaten. Een belangrijk aandachtspunt is het universele karakter van de tooling voor het verdere gebruik bij andere onderzoeken binnen het labo van Absolom ProLab.

6.1 Ontwerp en componenten

Het ontwerp is weergegeven in Afbeelding 41. In deze paragraaf worden kort alle componenten besproken en hun functies verklaard. Elke component is eerst grafisch driedimensionaal uitgetekend en later samengebracht in het geheel om de functie van het ontwerp als geheel te controleren met behulp van een simulatie.

6.1.1 Baseplate

De baseplaat vormt de basis voor de tooling. De baseplate is met bouten bevestigd aan de beweegbare XY-tafel. Deze component, weergegeven in Afbeelding 36, is voorzien van twee boutpatronen voor de persluchtcilinders. Hierdoor kan, indien gewenst, de kleine persluchtcilinder vervangen worden door een grotere persluchtcilinder (met een grotere aandrukkraft en slaglengte) zonder extra aanpassingen. Voorlopig is de de tooling opgebouwd met de kleinste persluchtcilinder.

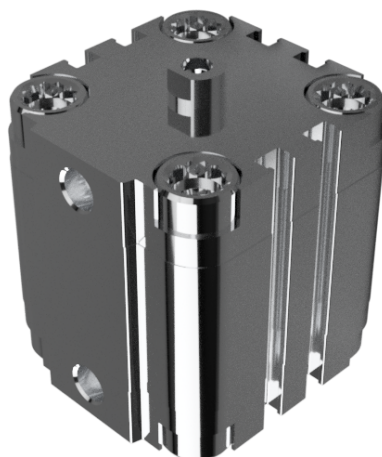


Afbeelding 36: Ontwerp van de baseplate voor de universele tooling van de testsamples.

6.1.2 Perslucht cilinder

De persluchtcilinder van Festo, type ADVU-40-20-P-A is gekozen omwille van zijn compacte opbouw én onmiddellijke beschikbaarheid in het magazijn (Afbeelding 37). De cilinder is bevestigd aan de baseplate en beweegt de plateau tesamen met de inlegplaat. Het zorgt voor een instelbare aandrukkraft tegen de glasplaat zodat de te verbinden kunststoffen goed contact maken met elkaar. Met behulp van een drukreducerventiel kan de aandrukkraft worden ingesteld tussen 0 en 6 bar.

De persluchtcilinder in dit ontwerp heeft een slag van 20 mm en een zuigerdiameter van 40 mm. De instelbare theoretisch aandrukkraft varieert van 0 tot 754 N (bij 6 bar).



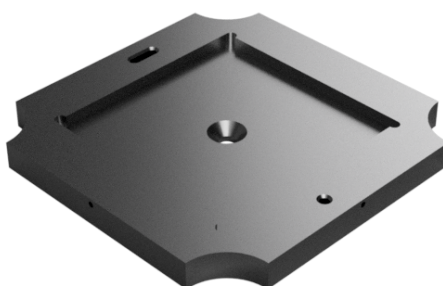
Afbeelding 37: Festo persluchtcilinder, type ADVU-40-20-P-A voor de universele tooling van de testsamples.

6.1.3 Geleidingskolom

De geleidingskolom verzorgt een goede uitlijning van het beweegbare plateau. Omwille van de eenvoud is deze kolom niet weergegeven. In de bijlage achteraan kan de lezer de volledige dimensionering terugvinden.

6.1.4 Bewegbaar plateau

Afbeelding 38 toont het beweegbaar plateau. Het beweegbare plateau is voorzien van een kamer voor de inlegplaat. In de rand van dit plateau zijn uitsparingen voorzien waar de geleidingskolom later zal komen alsook twee uitsparingen voor de nauwkeurige centrering van het geheel ten opzichte van de glasplaat. Twee stalen pennen passen in deze uitsparingen. De ene uitsparing cirkelvormig voor een uitlijning in de X- en Y-richting. De andere uitsparing is sleufvorming voor een uitlijning in Y-richting. Zouden beide uitsparingen cirkelvormig zijn, dan zou er een overdimensionering optreden wat mogelijk kan leiden tot blokkeren van het beweegbaar plateau. Tot slot zijn er nog twee stelschroeven voorzien voor een fixatie van de inlegplaat.



Afbeelding 38: Ontwerp van het beweegbare plateau voor de universele tooling van de testsamples.

6.1.5 Uitlijningscomponent

De uitlijningscomponent is een standaard component en lijnt het beweegbare plateau uit ten opzichte van de glasplaat. De *FK-M8 self-aligning rod coupler* van Festo (Afbeelding 39, links) is later vervangen voor een compactere component om de totale hoogte van de tooling te reduceren. De huidige component is door Peter Geudens zelf ontworpen.

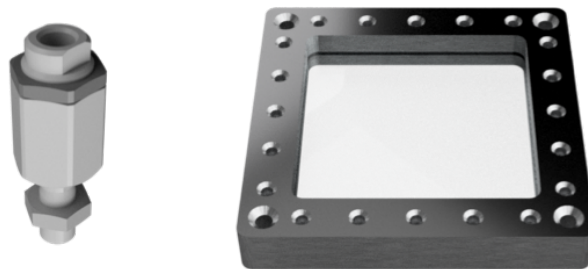
6.1.6 Glasplaat

Het glas waartegen het kunststof wordt aangedruwd is ordinair glas, gebruikt bij serres. Het is 4 mm dik en op maat gesneden. Het moet de laserbundel zo goed mogelijk doorlaten en moet de aandrukkracht kunnen weerstaan. Bij een eerste test werd 3 mm dik glas geplaatst maar dat begaf na enkele keren aandrukken. Nadien is overgegaan naar het 4 mm dikke serreglas. Nadeel van dikker glas is dat er meer absorptie is door het glas waardoor er minder resterend vermogen is voor het lassen.

Bij het gebruik van tooling is gemerkt dat de glasplaat geen uniforme aandrukkracht biedt. De glasplaat komt lichtjes bol te staan waardoor de aandrukkracht in het midden lager is dan de aandrukkracht tegen de rand van de glasmal. Een mogelijke oplossing is om een kamer in de vorm van de kunststof uit te frezen uit de inlegplaat. Door nadien onderaan perslucht aan te voeren wordt de kunststof tegen de glazen plaat aangedruwd. Als het glas nu nog bol komt te staan, zal de kunststof diezelfde vorm aannemen en is het probleem van een slechte krachverdeling opgelost.

6.1.7 Glasmal

De glasmal klemt de glasplaat in en verbindt het met de geleidingskolom. In het ontwerp zijn meerdere boutgaten met schroefdraad voorzien om de inklemming voldoende goed te verspreiden. Bij de opbouw bleek dit niet noodzakelijk en zijn niet alle boutgaten benut. Afbeelding 39 (rechts) toont het eindresultaat van de subassemblage.

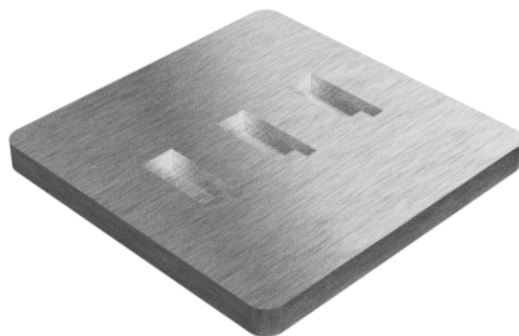


Afbeelding 39: Festo FK-M8 self-aligning rod coupler (links). Ontwerp van de glasmal voor de universele tooling van de testsamples (rechts).

6.1.8 Inlegplaat

De inlegplaat voor testsamples (Afbeelding 40) is een vervangbare component en is voorzien van drie kamers waarin telkens de transparante en de zwarte kunststof kunnen worden ingeplaatst. Daardoor kunnen drie samples gelijktijdig worden gelast met identieke parameters. Beide kunststoffen overlappen elkaar met 10 mm. Deze component kan snel manueel worden ge(de)monteerd. Het geeft de mogelijkheid om nadien ook andere testsamples te lassen met andere afmetingen door een nieuwe inlegplaat te ontwerpen.

Bij het uitvoeren van de testen is op de inlegplaat een referentiepunt aangebracht voor de pilootlaser. Daardoor is het mogelijk om visueel snel te controleren of het startpunt van de CNC-sturing om de juiste plaats ligt.



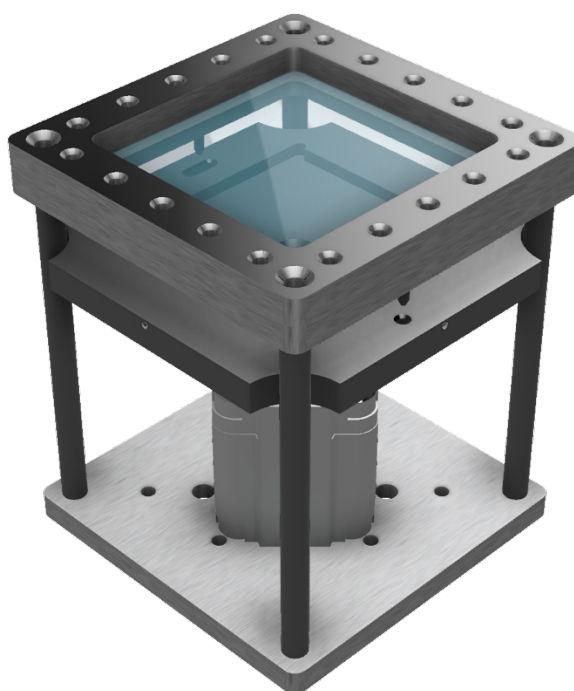
Afbeelding 40: Ontwerp van de inlegplaat voor de universele tooling van de testsamples.

6.2 Werking

De cilinder wordt bediend met een bistabiel persluchtventiel. In de schakeling zijn smoorventielen voorzien om de impact van het bewegende plateau op de glasplaat te beperken. Met het drukreducieerventiel kan de gewenste druk worden ingesteld tussen 0 en 6 bar. Na een kleine honderd lassen is de glasplaat een kwartslag gedraaid omdat in het glas een kleine beschadiging was vastgesteld.

6.3 Realisatie

Het eindresultaat is te zien op Afbeelding 41. Met de software is het geheel gesimuleerd om de werking te controleren op eventuele fouten. In de bijlage achteraan deze scriptie kan de lezer alle technische documenten van de tooling terugvinden.



Afbeelding 41: Samenstelling van de universele tooling voor het laserlassen van kunststofsamples.

7 LASERLASSEN

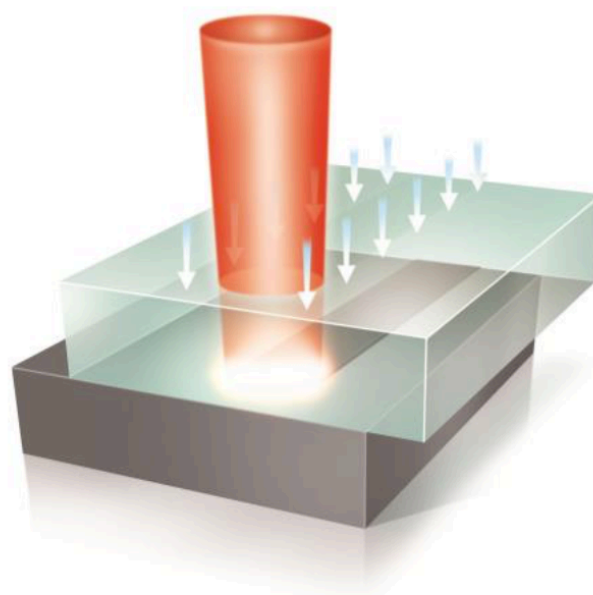
Laserlassen van kunststoffen kan op verschillende manieren gebeuren. Een daarvan is Through-Transmission Laser Welding (TTLW). Deze verbindingsmethode kent tal van voordelen als hogere verbindingkwaliteit, beperkte braamvorming, een hogere kwaliteitscontrole, minder belasting van de component en de mogelijkheid om complexe vormen te lassen etc. Al deze voordelen maken laser kunststof lassen geschikt voor veel toepassingen. De meeste toepassingen bevinden zich in de automobiel- en medische industrie alsook bij consumentenelektronica.

Gedurende dit onderzoek is gebruik gemaakt van een Rofin Dilas 30 Watt laser. De overige specificaties zijn achteraan in de bijlage terug te vinden.

7.1 Through-Transmission Laser Welding (TTLW)

Through-transmission Laser Welding (Afbeelding 42) steunt op het doorlaten van laserenergie door een transparante bovenste laag naar het oppervlak van de onderlaag waar de energie wordt geabsorbeerd, vandaar de naam 'Through transmission'. Anders dan het lassen van metalen, dat een naadlasproces is, beoogt TTLW om warmte te genereren aan het contactoppervlak van het transparante materiaal aan het absorberende materiaal. De uitgezonden laserstraling wordt geabsorbeerd door de onderste absorberende component en veroorzaakt daardoor warmte die beide materialen doet smelten.

Er zijn vier belangrijke eisen voor het laser lasproces gebeuren. Deze vier punten worden beschreven in de volgende paragraaf.



Afbeelding 42: Principe van Through-Transmission Laser Welding.

7.1.1 Laser transparante toplaag

De meeste thermoplastische harsen zullen - in natuurlijke staat - een infrarode straal geheel of grotendeels doorlaten binnen een bepaald golflengtebereik. De transparante toplaag moet doorlatend zijn voor een golflengtebereik tussen 808 nm en 1064 nm³.

In het laserlabo zijn twee lasertypes voorhanden, namelijk 980 nm en 1064 nm. Merk op dat 'laser transparant' is niet hetzelfde is als 'optisch transparant'. Materialen kunnen optisch niet transparant zijn voor het menselijk oog maar wel transparant zijn voor de laser. Dit omdat laserstralen zich voornamelijk buiten het zichtbare lichtspectrum bevinden. Praktisch zijn bij veel laser lastoepassingen de transparante toplagen opaak⁴. Afbeelding 43 is een voorbeeld van een compleet zwarte/opake toplaag die toch doorlatend is voor een laser van 980 nm.



Afbeelding 43: Voorbeeld van een infrarode transparante toplaag voor een 980 nm laser maar niet voor het menselijk oog.

Enkele factoren die een invloed hebben op het lasertransmissiegedrag van kunststoffen zijn kleurstoffen, additieven (UV-stabilisatoren, vlamvertragers en warmte stabilisatoren), vulstoffen (glasvezel, koolstofvezel, blaasmiddelen) en de dikte van het materiaal.

Slechts een klein deel van de laserenergie gaat doorheen de transparante toplaag. De overige energie wordt geabsorbeerd, gereflecteerd en verspreid voordat het de plaats waar de lasverbinding plaatsvindt bereikt. Een minimale transmissiegraad van 3% is vereist, hoewel een hogere transmissiegraad leidt tot een betere en flexibeler procesvenster.

7.1.2 Laser absorberende onderlaag

De laser absorberende onderlaag is verantwoordelijke voor de conversie van de laserstraal - eens deze de transparante toplaag - naar warmte in de laser absorberende onderlaag.

Veel factoren zijn bepalend voor de absorptie van laserstralen zoals eerder vermelde additieven, kleurstoffen en vulstoffen. De meest effectieve methode is ook een van de meest economische, namelijk koolstof (roet). De meeste en grootste harsproducenten gebruiken koolstof om harsen economisch zwart te maken. Vaak wordt gebruik gemaakt

³ Meest voorkomende golflengtes voor through-transmission laser welding.

⁴ Ondoorzichtig voor het menselijk oog.

van 0,2 tot 0,4 volume procenten om uitstekende absorberende eigenschappen te bekomen.

Ideaal zou de transmissiegraad van de het absorberend materiaal gelijk zijn aan nul. Dan zal alle energie zich bundelen op het oppervlak van het absorberend materiaal of net onder het oppervlak. Net op deze plaats is de energie nodig voor de las. Donkere kleuren absorberen effectiever dan lichtere kleuren. Toch is het mogelijk om lasverbindingen te bekomen met een variëteit aan kleuren, zowel van transparante toplaag als absorberende onderlaag (inclusief transparante kleuren).

7.1.3 Compatibiliteit van materialen

De materialen die met behulp van de laserlassen verbonden worden kunnen van hetzelfde thermoplastisch materiaal zijn of van een verschillend type. Belangrijk is dat beide kunststoffen gelijkaardige eigenschappen vertonen om een mogelijke combinatie te vormen. De meest kritische parameters zijn de chemische samenstelling van de polymeerketens, de smelttemperatuur en de oppervlakte-energie van de kunststof. Des te meer deze parameters overeenkomen, des te beter zal de verbinding zijn.

De meeste thermoplasten zijn goed lasbaarheid met zichzelf alsook met volgende combinaties: PA 6, PA 66, POM, PBT⁵, PC, ABS, PP, TPE⁶ en PE.

7.1.4 Contact

Het is essentieel dat warmte-energie, gegenereerd op het oppervlak van de onderlaag, wordt overgedragen naar de bovenste laag om beide materialen goed te laten versmelten in elkaar. Voor een goede warmtegeleiding te waarborgen, is een goed contact tussen beide materialen van groot belang tijdens het lasproces.

Contact is afhankelijk van een goed klemgereedschap. Hiervoor zijn verschillende mogelijkheden beschikbaar. Een andere invalshoek is de materialen zo ontwerpen dat er bij het in contact brengen van de materialen vanzelf een goed contact ontstaat. Het klemmen minimaliseert mogelijke openingen en resulteert in een betere benadering van de toleranties. Het is zeer belangrijk als nauwkeurige onderdelen gelast moeten worden.

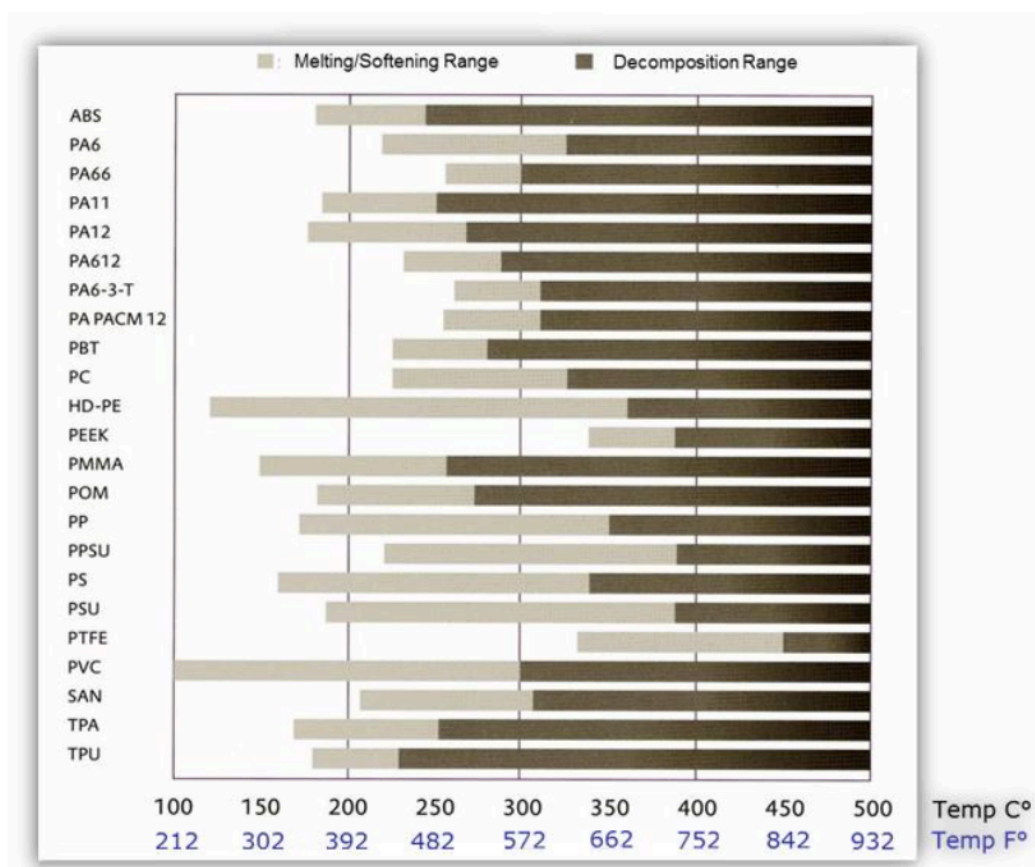
7.2 Invloed van materialen en kleuren

7.2.1 Overlapping van de smelttemperaturen

Het is noodzakelijk dat beide kunststoffen bij laserlassen een gelijkaardige smelttemperatuur hebben (Afbeelding 44). Indien de smelttemperaturen niet voldoende overlappen, zal de ene kunststof verbranden voordat de andere kunststof zijn plasticiteit bereikt. Het is belangrijk dat beide kunststoffen op eenzelfde moment in een gesmolten fase voorkomen gedurende het lasproces om een chemische binding te vormen. Hoe groter de overlapping van smelttemperaturen van de kunststoffen, hoe groter de procesrange. Hierdoor vergroot de flexibiliteit en de is er meer ruimte voor fouten in de productie. Echter is het de bedoeling om het aantal fouten gedurende productie zo laag mogelijk te houden.

⁵ Polybutyleentereftalaat

⁶ Algemene benaming voor thermoplastische elastomeren.



Afbeelding 44: Smeltemperatures van kunststoffen. (LPKF, Laser & Electronics, 2016)

7.2.2 Interactie van laserstraling met kunststoffen

Er zijn vier mogelijke reacties wanneer de laserenergie een interactie aangaat met een thermoplastisch materiaal: reflectie, absorptie, transmissie en verstrooiing. Het is belangrijk te begrijpen welke kenmerken de laserstraal heeft en hoe deze te beïnvloeden. De kenmerken zijn niet enkel te beïnvloeden door onderstaande factoren maar zijn ook afhankelijk van de golflengte van de laser.

7.2.2.1 Reflectie

Niet alle laserenergie wordt door het materiaal doorgelaten of geabsorbeerd. Een aandeel van de energie wordt ook gereflecteerd. Dit is een belangrijk aspect dat invloed heeft op de hoeveelheid laserenergie die overgebracht wordt naar het materiaal. De gereflecteerde energie zal niet bijdragen tot het opwarmen van het absorberend materiaal.

Alle materialen zullen een zeker aandeel aan laserstraling reflecteren. Lichter gekleurde kunststoffen vertonen een grotere hoeveelheid reflectie. De meest opvallende hierbij is het witgekleurde titaniumdioxide (TiO_2). Tot voor kort waren witte kunststoffen moeilijk, zo niet onmogelijk te lassen met lasers. Door innovaties in specifieke kunststoffen en gespecialiseerde processen is daar echter verandering in gebracht. Het is nu wel mogelijk om witgekleurde kunststoffen te lassen, inclusief wit-aan-wit.

7.2.2.2 Absorptie

De meeste zuivere kunststoffen zijn doorgaans sterk doorlatend voor laserstraling. Daarom zijn additieven toegevoegd om absorptie te veroorzaken. Additieven kunnen variëren van kleurstoffen tot glas en glasvezel. Een kort overzicht:

- Kleurstoffen – vooral roet, maar ook andere kleuren hebben een zekere invloed op de absorptie van het laserlicht.
- Additieven – vlamvertragers, stabilisatoren, lossingsmiddelen voor in de matrijs etc. Deze hebben allemaal een zekere invloed op de absorptie en de interactie met het laserlicht.
- Vulstoffen – glas, glasvezel, koolstof etc.
- Vorminrichting – kunststoffen neigen een hogere dichtheid te vertonen bij het toevoerkanaal. Dit kan leiden tot een verhoogde laserabsorptie aan toevoerkanalen (hoofdzakelijk een probleem bij spuitgieten van kunststoffen). Aangeraden is om de laserbewerkingen in deze zones zoveel mogelijk te beperken.
- Type kunststof – afhankelijk van het type kunststof is absorptie anders. Zo zullen sommige thermoplasten hogere en andere thermoplasten lagere absorptiewaarden vertonen, geen rekening gehouden met toevoegingen.

7.2.3 Transmissie

Een direct tegenovergestelde van absorptie is transmissie. Transmissie heeft gelijke kenmerken als absorptie maar met een uitzondering, materiaaldikte. Alle thermoplasten hebben een bepaalde hoeveelheid natuurlijke absorptie, ook zonder toegevoegde absorberende additieven. Hoe dikker het materiaal, hoe sterker het absorberende effect.

Hoe dikker een stuk kunststof, hoe lager de transmissiewaarden vergeleken met een dun stuk kunststof van hetzelfde type, kleur en toegevoegde additieven. De dikte van een kunststof dat gelaserd kan worden varieert tussen een dunne film tot 3 mm. Het is mogelijk kunststoffen te lassen met een dikte van meer dan 3 mm, maar dit wordt eerder uitzonderlijk gedaan. Naarmate de dikte toeneemt, spelen ook andere factoren een belangrijke rol in verband met absorptie. Kunststoffen met toevoegingen van kleurstoffen, vulmiddelen en additieven vereisen een dunner profiel om de laserenergie diep genoeg in het materiaal te krijgen tot de plaats waar de las moet plaatsvinden.

Aangezien er geen eenduidige regels bestaan wat de beste methode is voor het bepalen van de transmissie en de levensvatbaarheid van een las zijn onderzoeken aangewezen op testen.

7.2.3.1 Verstrooiing

Lichtverstrooiing in een thermoplastisch materiaal wordt veroorzaakt door eigenschappen van kunststof die het licht dwingen om op ongelijke wijze doorheen het materiaal te gaan, en eventueel niet-uniform geabsorbeerd te worden. Het eindresultaat is een grotere warmtebeïnvloede zone bij materialen die licht verstrooien. Materialen die weinig of geen licht verstrooien hebben een kleinere en gelijkmatige warmtebeïnvloede zone.

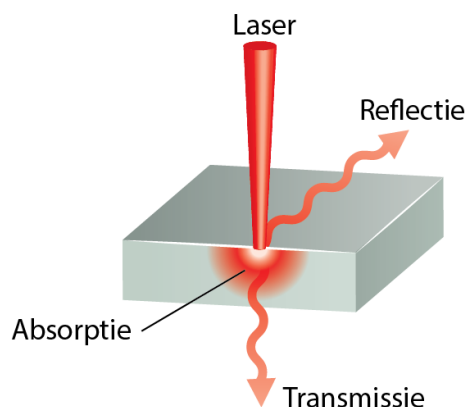
De twee belangrijkste factoren die van invloed zijn op de verstrooiing zijn de kristallijne en amorfe eigenschappen van kunststoffen en glasvullingen. Semi-kristallijne kunststoffen hebben de neiging het licht meer te breken dan amorfe kunststoffen. Dit komt door de kristallijne vorm van de polymeerketens in de kunststof. Deze kristallijne vormen handelen zoals lichtgeleiders, kanaliseren het licht en verstrooien het opnieuw uit voordat het geabsorbeerd kan worden. Om deze reden hebben amorfe kunststoffen de neiging om meer gelijkmatig te absorberen, terwijl de semi-kristallijne kunststoffen een smeltbad zullen creëren dat minder uniform is en mogelijk dieper in het materiaal. In beide gevallen kunnen deze kenmerken zowel als voor- en nadeel gebruikt worden.

Ten tweede kunnen glasvullingen op een gelijkaardige manier handelen als kristallijne polymeerketens. Glasvullingen resulteren in lichtgeleiders voor het laserlicht te verstrooien.

7.2.3.2 Straalbreking

Ook belangrijk is het lensvormig effect van kunststoffen op licht. Net als een glazen lens kunnen kunststoffen het laserlicht buigen en breken. De invalshoek en de vorm van het materiaal bepalen de straalbreking van het laserlicht.

Het is aanbevolen om de transparante toplaag in dikte constant te houden en zoveel mogelijk te vermijden dat de laser invalt op sterk gekromde oppervlakken. Bij gekromde oppervlakken is het zeer moeilijk om straalbreking te voorkomen.



Afbeelding 45: Verdeling van de laserstraal in een kunststof.

7.2.4 Kleuren en additieven

7.2.4.1 Transparant aan zwart

De meest voor de hand liggende kleurencombinatie is transparant (of natuurlijk) aan zwart. Deze combinatie is niet alleen het eenvoudigste om through-transmission laser welding te verklaren, maar biedt ook de grootste procesflexibiliteit en is daarom de gemakkelijkste combinatie.

Dit is te danken aan het feit dat het meer vergevingsgezind is. Uitstekende doorlaatbaarheid (transmissie) wordt gerealiseerd met transparante of natuurlijke toplagen en een excellente absorptie wordt bekomen door zwarte onderlagen (met toevoeging van roet).

7.2.4.2 Zwart aan zwart

Hoewel het schijnbaar onmogelijk lijkt is het toch mogelijk om zwarte kunststoffen te lassen. Het geheim is om in de zwarte 'transparante' toplaag geen organische verbinding zoals roet te gebruiken maar wel kleurstoffen.

In de meeste gevallen zijn de kunststoffen daadwerkelijk geverfd met donkerrood, donkergroen of donkerblauw. Het menselijk oog ervaart dit als zwart. De doorlaatbaarheid van de toplaag is nu beduidend lager dan een transparant materiaal maar nog steeds voldoende voor laserlassen.

Belangrijk is dus om twee afzonderlijke materialen te gebruiken wanneer een zwart-aan-zwart verbinding vereist is.

7.2.4.3 Kleurenvariaties

Een variatie aan kleuren kan worden gelast met een laser, inclusief volledige opake en transparante kleuren. Hogere transparantie zal leiden tot een betere transmissie maar een slechtere absorptie en omgekeerd. Kleuren zorgen voor extra variabele vanwege het feit dat het samenstellen van een kleur of een reeks kleuren de hoeveelheid laserenergie kan beïnvloeden wat betreft de absorptie en de doorlaatbaarheid. Ook kan het soms lastig zijn om aan de eisen van de klant te voldoen wat betreft kleurencombinaties. Maar vaak is het mogelijk na voldoende onderzoek.

7.2.4.4 Transparant aan transparant

Doorzichtige kunststoffen aan elkaar lassen is moeilijk maar met de komst van hogere golf lengtes is het eenvoudiger geworden. Met behulp van TTLW zijn er enkele problemen bij het transparant aan transparant lassen.

Een extra absorberende component is vereist om de onderlaag absorberend te maken. Er zijn meerdere opties voor dergelijke absorberende lagen, een van de belangrijkste daarbij is *Clearweld*. Deze is een absorberende component die speciaal ontworpen is om kunststoffen betere lasereigenschappen te geven wat betreft absorptie zonder het optisch doorlaatvermogen hierbij te veranderen.

Dergelijke componenten kunnen aan de kunststof worden toegevoegd of aan het oppervlak worden aangebracht. Beide opties hebben voor- en nadelen. De component is moeilijk gelijkmatig en consistent te verdelen op het oppervlak, vooral in grote volumes omwille van de beperkte bewerkingstijd. Ook zijn er maar een of twee doorgangen mogelijk met de laser vooraleer de component verdampt. Het alternatief is de component doperen aan het kunststof om een stabiel resultaat te bekomen. Dit alternatief is echter vrij duur.

7.2.4.5 Witte kunststof

Witte plastic wordt meestal vervaardigd met behulp van titaniumdioxide, een sterk reflecterende stof. Omdat witte kunststoffen reflecteren en niet absorberen of doorlaten – waarop het TTLW-principe steunt – is wit veel minder interessant om te gebruiken bij laserlassen. Echter, de recente ontwikkelingen in de soorten van titaniumdioxide, het vermogen van lasers, de laser golf lengte en de controle van de laser maken het lassen van witte kunststoffen toch mogelijk met een aanvaardbaar rendement.

7.2.5 Oppervlakteafwerking

Hoewel er niet echt een eenduidige eis is voor de oppervlakteafwerking, is het belangrijk op te merken dat sommige oppervlakteruwheden problemen kunnen veroorzaken. Zo moet bijvoorbeeld bij een product dat met spuitgieten geproduceerd werd, het injectiekanaal ver genoeg van het lasertraject liggen of het oppervlak moet voldoende goed afgewerkt zijn. Een ander aandachtspunt is dat laserlassen een continu contact vereist van beide te lassen materialen. Een te grote ruwheid of een te sterk afwijkend reliëf kan hierbij problemen veroorzaken.

7.3 Aandachtspunten voor verbindingstypes

7.3.1 Overlapverbinding

Overlappingsen zijn de meest eenvoudige verbindingen. De naam beschrijft exact hoe het werkt. Beide componenten overlappen elkaar en in de overlappingszone wordt een las aangebracht. De belangrijkste factor is de breedte van de overlapping.

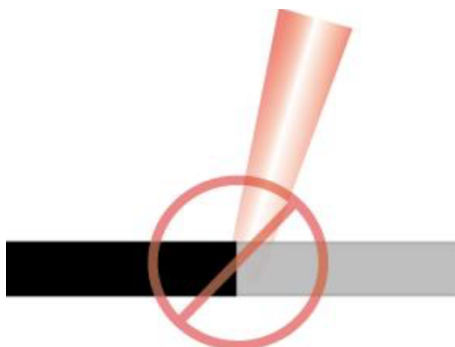
Dit type verbinding wordt vaak gebruikt in microfluidische plaatjes, kleine schermen of deksels en textiel-achtige toepassingen.



Afbeelding 46: Basis overlappingsverbinding van twee materialen.

7.3.2 Stuikverbinding

Stuikverbindingen moeten, hoewel theoretisch mogelijk, zoveel mogelijk worden vermeden. Het hanteren van de onderdelen, het klemmen en de stralingshoek zijn bijna onmogelijk goed te krijgen, las zelfs in ideale lab-instellingen.



Afbeelding 47: Stuikverbindingen, moeten zo veel mogelijk vermeden worden vanwege het moeilijk te beheren lasproces.

7.3.3 Dikte van het transparante toplaag

De belangrijkste factor bij het bepalen van de juiste dikte van de transparante toplaag is het doorlaatvermogen van deze component. Eerder (crf. 7.2) werd de transmissiegraad besproken in kunststoffen. Daarbij was de materiaaldikte een bepalende factor.

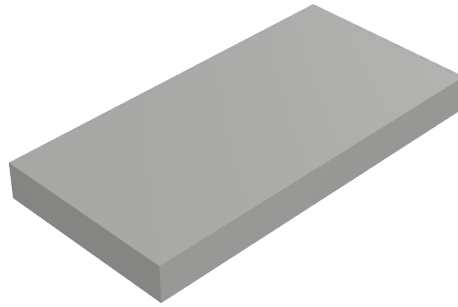
Technisch gezien is er geen minimale materiaaldikte. Wel wordt algemeen beschouwd dat 3 mm de maximale materiaaldikte is voor laserlassen met het TTLW-principe. Het is niet onmogelijk om een materiaaldikte van meer dan 3 mm te overschrijden dan spelen andere factoren een belangrijke rol zoals afwijkende transmissiekaracteristieken.

Het is aangeraden om de transparante toplaag een constante hoogte te geven. Fluctuaties in de materiaaldikte kunnen resulteren in een afwijkende absorptie waardoor de las of het materiaal lokaal oververhit kan geraken alsook er geen las zal optreden. (LPKF, Laser & Electronics, 2016)

8 TESTSAMPLES

8.1 Prototype teststrookje

Vooreerst is een teststrookje (Afbeelding 48) ontworpen om testen op uit te voeren. Hierbij is aandacht gegeven aan de dimensionering. De trekbank die voorhanden is, kan tot 1000 N trekken. Een eerste prototype heeft een lengte van 20 mm, een breedte van 10 mm en een dikte van 3 mm. Dit prototype zal als basis dienen om te controleren dat het resultaat van de trekproef binnen het meetbereik van de trekbank blijft.



Afbeelding 48: Eerste ontwerp van het teststrookje voor sterktemetingen op de testbank.

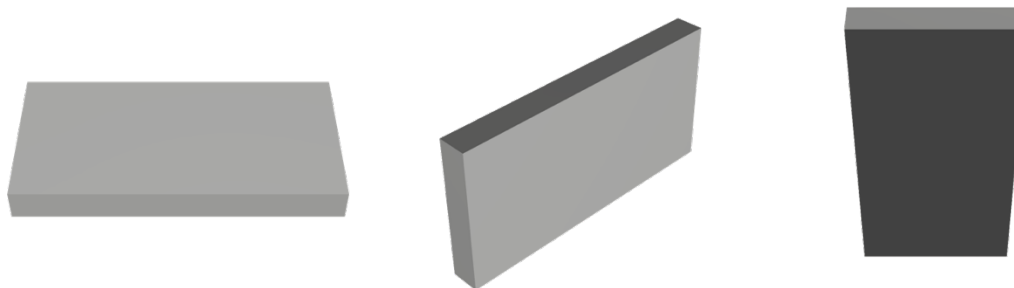
8.2 Materiaalkeuze

Voor het onderzoek is gekozen voor Polyamide als basismateriaal. Polyamide, beter gekend als nylon, is een hoogwaardig kunststof en wordt gekenmerkt door zijn duurzaamheid, hoge sterkte/gewichtsverhouding, flexibiliteit, lage wrijvingscoëfficiënt en corrosieweerstand. Daarom wordt polyamide vaak ook bij de technische kunststoffen gerekend.

Polyamide is onder andere beschikbaar in plaatvorm alsook als filament voor 3D-printers. Volgens de datasheet van de leverancier van het plaatmateriaal (VINK NV, 2001) is het kristallijn smeltpunt 220 graden celsius. Voor PA6 in geprinte vorm ligt de smelttemperatuur rond 185-195 graden celsius. De glastransitietemperatuur, overgang van hard naar rubberachtig, bedraagt 50 graden celsius. De volledige datasheet is terug te vinden achteraan bij de bijlages. (Ultimaker, 2017)

8.3 Invloed van de positie bij het printen

De invloed op de printpositie (Afbeelding 49) wordt getest door identieke teststrookjes te printen met één variabele, de printpositie. Wanneer deze teststrookjes nadien in een trekbank geplaatst worden, kan het verband nagegaan worden van de printpositie. Praktisch zijn de twee staande posities geprint op een dunne basisplaat. Deze basisplaat is nodig om gedurende het printproces voldoende stabiliteit te verzekeren van de teststrookjes. Defecten die ontstaan tijdens het printen hebben een directe, ongewenste invloed op de resultaten van de trekproef.



Afbeelding 49: Printposities van de teststrookjes: v.l.n.r liggende positie, staande positie op lange zijde en staande positie op korte zijde.

8.4 Analyse van de positie

De resultaten (Tabel 7) tonen een duidelijk verschil van treksterkte⁷ bij verschillende printposities (Afbeelding 49). De liggende positie scoort het hoogste resultaat op de trekbank⁸ met een gemiddelde van 494,2 N. De staande positie op lange zijde heeft resultaten die lager liggen met een gemiddelde van 297,9 N. Tot slot de staande positie op korte zijde, deze positie heeft een gemiddelde van 32,81 N. Een van de plaatjes brak zelfs bij het plaatsen in de spanbekken van de trekbank. Dit toont aan hoe zwak deze printrichting is. Ook moet opgemerkt worden dat de spreiding groot is, dit is te wijten aan de verouderde spanbekken van de trekbank. Wanneer er correcte metingen nodig zijn, zijn nieuwe spanbekken vereist. Deze metingen zijn slechts een indicatie voor de grootte van de treksterkte.

Tabel 7: Testresultaten van onderzoek naar invloed van de printpositie bij 3D-geprinte teststrookjes.

Liggend	Staande (lange zijde)	Staande (korte zijde)
405,2 N	247,5 N	37,76 N
523,7 N	273,4 N	26,90 N
553,7 N	372,8 N	33,76 N

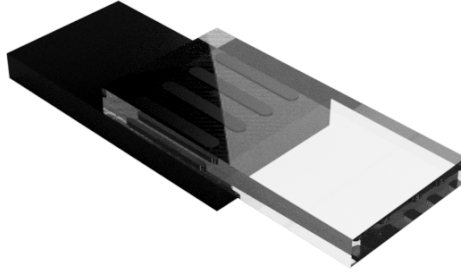
Deze analyse heeft als resultaat dat volgende testen gebeuren met teststrookjes in liggende positie. Hierdoor is het eenvoudiger om teststrookjes te maken met een hogere sterkte en waarbij de sterkte grotendeels bepaalt zal worden door de lasverbinding en niet door printpositie.

⁷ Meetresolutie van de trekbank: 25 N (0.025 N), 100 N (0.1 N) en 1000 N (1N)

⁸ Mecmesin, type: Imperiaal 1000

8.5 Verbinding na het lassen

De verbinding (Afbeelding 50) bestaat uit een transparante en een absorberende kunststof die verbonden is met vier identieke lassen met een theoretische lengte van 8 mm. Met behulp van de universele tooling voor het laserlassen zal dit testsample verschillende keren worden gelast en uitvoerig worden getest.



Afbeelding 50: Resultaat van het lassen van de testsamples met vier identieke lassen.

9 DESIGN OF EXPERIMENTS [DOE]

Design of Experiments of DOE, is een veelgebruikte methode voor het optimaliseren van procesparameters zonder dat alle parametercombinaties werkelijk getest worden. DOE is een acroniem voor een grote reeks experimentele technieken waarbij met de werkwijze wordt geëxperimenteerd op een gecontroleerde manier en de resultaten worden geobserveerd en geanalyseerd.

Het doel is om belangrijke *inputs* van het proces te identificeren en hun invloed te begrijpen op de *output* van het proces. De analytische berekeningen die voor deze methode nodig zijn, zijn overeenkomstig met die voor regressie.

9.1 Het verschil tussen regressie en DOE

Regressietechnieken worden in het algemeen gebruikt voor het analyseren van historische data. Deze data van het proces is vergaard in normale omstandigheden. DOE worden gebruikt voor het creëren en analyseren van *real time* data van het proces die wordt bekomen in een experimentele fase.

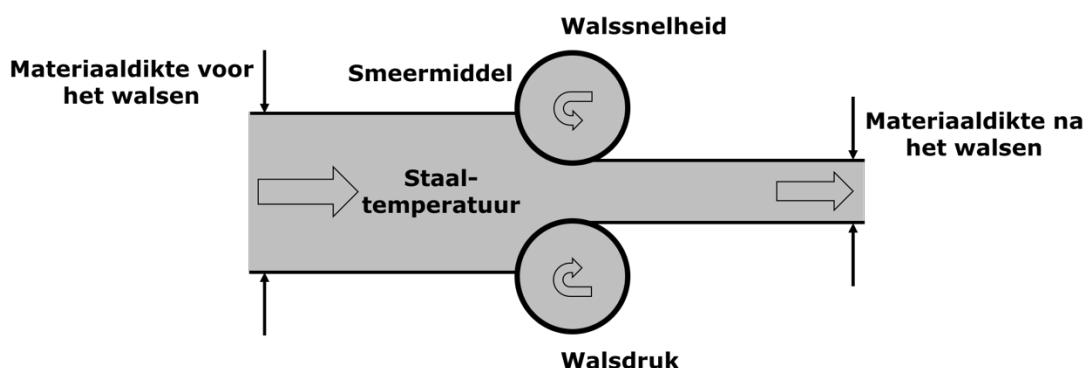
9.2 Wanneer DOE toepassen

Design of Experiments komen vaak voor in Six Sigma projecten die technisch georiënteerd zijn aangezien de omgeving neigt naar een proces dat kan worden gemodificeerd en kan worden aangepast in real time.

9.3 Praktisch voorbeeld van DOE

Een praktisch voorbeeld (gecontroleerde plaatdikte bij het walsen van staal) dat aansluit bij de opleiding van lasingenieurs wordt hieronder geschetst. Dit geeft een indruk van wat DOE omvat.

Praktisch voorbeeld: een project waarbij een goede controle nodig is van de dikte van het staal bij een walsbehandeling. De situatie kan worden voorgesteld volgens Afbeelding 51. Dit proces kent als inputs de materiaaldikte en de temperatuur van het oorspronkelijke staal, het gebruik van smeermiddel, de walssnelheid, de walsdruk. Elk van deze inputs zal een zekere invloed hebben op de bekomen materiaaldikte na het walsen (*output*). Om te achterhalen welk van deze eerder vermelde inputs de belangrijkste invloed heeft en wat de invloed van de overige inputs is, wordt een experiment uitgevoerd.



Afbeelding 51: Design of Experiments toegepast op het walsen van staal.

Welke aanpak is hier nodig om het proces beter te begrijpen? Een algemene aanpak voor experimenten is het veranderen van maximaal één parameter per keer. In het voorbeeld

zou dit zich vertalen naar het veranderen van de walsdruk, een andere keer het veranderen van de materiaaltemperatuur etc.

Een nadeel hiervan is dat het experiment meteen tijdrovend is bij veel *inputs*, en dat vertaalt zich meteen naar hogere kosten. Ook zorgt deze aanpak dat er niet gekeken wordt naar een mogelijk andere output door de interactie van variaties in *inputs* tegelijkertijd.

DOE voorziet een geheel van efficiënte, gestructureerde experimenten waarmee alle *inputs* gelijktijdig kunnen worden onderzocht, met een minimum aan experimenten.

9.4 Routemap voor DOE

Afbeelding 52 geeft de algemene stappen die moeten doorlopen worden om een DOE uit te voeren. Dit schema zal gevolgd worden voor het optimaliseren van de parameters voor het laserlassen.



Afbeelding 52: Overzicht van het verloop van Design of Experiments.

9.5 2-Level Full Factorial Designs

Een '2-Level Full Factorial Design' is de basis bouwsteen voor een DOE. Onder *Factorial* wordt verstaan dat alle inputfactoren simultaan veranderen gedurende het experiment. Met *2-Level* wordt bedoeld dat elke inputfactor twee mogelijke niveaus kan hebben. Dit niveau kan ofwel *high* of *low* zijn. *Full* betekent dat alle mogelijke combinaties van de inputfactoren (de twee mogelijke niveaus) worden gebruikt tijdens het experiment.

9.5.1 Het bepalen van het juiste niveau

Het bepalen van het juiste niveau voor elke input moet gebeuren met voldoende aandacht. Hoewel de inputfactoren een voldoende grote wijziging moeten veroorzaken van de output, mogen de inputfactoren niet buiten het bereik van het proces vallen.

9.5.2 Het uitvoeren van een experiment

Het experiment dat als voorbeeld dient is uitgeschreven in Tabel 8. Het experiment is weergegeven in deze tabel in de *standard order*, dit geeft een gestructureerd patroon van elke inputfactor.

De run order (tweede kolom) geeft een willekeurige volgorde waarin het experiment moet worden uitgevoerd, om de resultaten van het experiment statistisch betrouwbaar te maken.

Tabel 8: Uitgewerkte tabel van de '2-level Full Factorial' van het voorbeeld van het walsen van staal met alle mogelijke combinaties voor de inputfactoren.

Standard order	Run Order	Staal-temperatuur	Walsdruk	Smeermiddel	Walsdikte (output)
1	2	Low	Low	Low	?
2	7	High	Low	Low	?
3	3	Low	High	Low	?
4	4	High	High	Low	?
5	6	Low	Low	High	?
6	5	High	Low	High	?
7	1	Low	High	High	?
8	8	High	High	High	?

Bij het toepassen van DOE op het laserproces zal software gebruikt worden, er is gekozen voor gebruik te maken van Minitab ® in dit onderzoek. Deze software duidt het niveau niet aan met *high* of *low* maar met *1* respectievelijk *-1*. Dit is louter een andere weergave, het verandert niets aan de werkwijze.

9.6 Het analyseren van de resultaten

Voor elke inputfactor in een DOE, is het gemiddelde effect bij het veranderen van deze factor van *low* naar *high* bepaald.

9.6.1 Bepalen van het effect van een DOE inputterm

Het effect van een inputterm⁹ is het gemiddelde van de verschillen in resultaten die optreden wanneer een factor wisselt van *low* naar *high*:

⁹ Inputterm verwijst naar zowel inputfactoren als hun interacties met elkaar.



Vertalen we het begrip van de DOE inputterm naar het voorbeeld van het walsen van staal, dan ontstaat Tabel 9.

Tabel 9: Bepalen van het effect van een DOE inputterm met interactiefactor.

Standard order	A	B	C	Resultaat	Interactie (A · B)
1	Low (-1)	Low (-1)	Low (-1)	12	+1
2	High (+1)	Low (-1)	Low (-1)	10	-1
3	Low (-1)	High (+1)	Low (-1)	9	-1
4	High (+1)	High (+1)	Low (-1)	11	+1
5	Low (-1)	Low (-1)	High (+1)	18	+1
6	High (+1)	Low (-1)	High (+1)	14	-1
7	Low (-1)	High (+1)	High (+1)	15	-1
8	High (+1)	High (+1)	High (+1)	17	+1

9.6.2 Bepalen van het effect van een (de belangrijkste) factor

Zoals beschreven bij 9.6.1, kan de inputterm bepaald worden door het verschil te nemen van het gemiddelde resultaat waarbij de factor *low* is en het gemiddelde resultaat waarbij diezelfde factor *high* is.

Passen we dit toe voor de factor C uit het voorbeeld (gebaseerd op Tabel 9) dan is het resultaat van het effect:

$$\frac{18 + 14 + 15 + 17}{4} - \frac{12 + 10 + 9 + 11}{4} = 5,5$$

9.6.3 Bepalen van het effect van een interactiefactor

Voor het bepalen van de interactiefactor, moet eerst de interactie worden bepaald tijdens het experiment. Dit gebeurt door de betrokken niveaus (cfr. +1 of -1) te vermenigvuldigen met elkaar. Dit wordt in een nieuwe kolom weergegeven in de tabel (Tabel 9). Het effect van de interactie wordt bepaald analoog aan de inputterm. Neem het verschil van het gemiddelde resultaat waarbij de factor *low* is en het gemiddelde resultaat waarbij diezelfde factor *high* is.

Uitgewerkt zoals het voorbeeld is dat:

$$\frac{12 + 11 + 18 + 17}{4} - \frac{10 + 9 + 14 + 15}{4} = 2,5$$

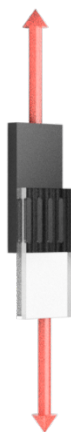
10 TOEPASSEN VAN DESIGN OF EXPERIMENTS OP HET ONDERZOEK

Na een uiteenzetting hoe een DOE algemeen verloopt, volgt nu een beschrijving van de toepassing van een DOE op het onderzoek voor laserlassen van kunststoffen. De volgende paragrafen volgen de routemap die eerder werd gebruikt in 9.4.

10.1 Definiëren van de output(s) van het proces

Een eerste belangrijke parameter is de afschuifsterkte. De afschuifsterkte is uitgedrukt in een kracht per oppervlakte (N/mm^2). Aan de hand van een trekbank¹⁰ die voorhanden is in productie zal deze parameter worden opgemeten. Afbeelding 53 toont de aangrijping van de krachten die optreden in de testsamples.

Een tweede outputparameter tijdens deze DOE, is de breedte van de las. De meting gebeurt aan de hand van een microscoop (met een digitale aflezing) uit productie.



Afbeelding 53: Voorstelling van de aangrijping van de krachten op de trekbank.

10.2 Definiëren van de input(s) van het proces

Na brainstormen zijn er veertien verschillende procesinputs op tafel gelegd. Een oplistijng van mogelijk parameters van het proces:

- Vermogen van de laserbron
- Voortloopsnelheid van de XY-tafel
- Aandrukkkracht van de persluchtcilinder
- Afstand van het focuspunt tot het oppervlak
- Temperatuur van het smeltbad
- Grootte van de spotsize
- Keuze van het basismateriaal
- Keuze van conventionele kunststofplaat of geprinte kunststof
- Invloed van een reiniging voor het laserlassen
- Gebruik van vacuüm bij het lassen
- Beheersing van de afkoelsnelheid

¹⁰ Mecmesin, type: Imperiaal 1000

- Richting van de las
- Tijd van de nadruktijd in de tooling op de testsamples
- ...

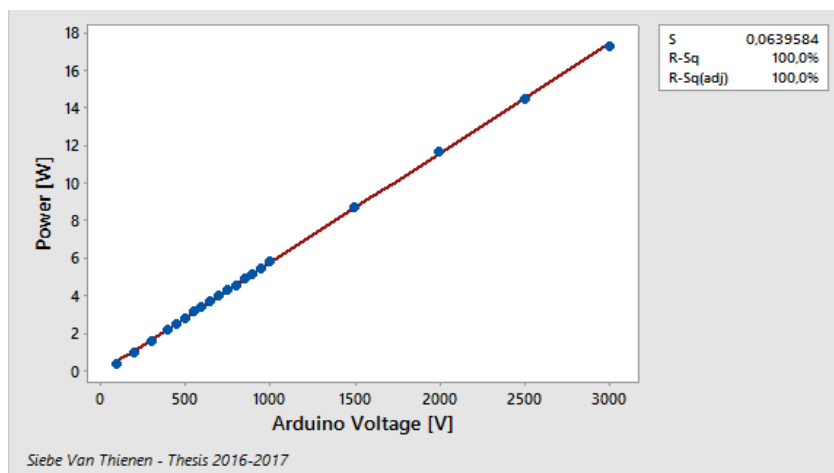
Omwille dat het implementeren van al de opgelijste inputs het aantal testen (nodig voor de DOE) gevoelig doet toenemen, is er een selectie gemaakt van parameters waarvan gedacht wordt de grootste invloed te hebben op de eerder genoemde outputs. Deze parameters voor de DOE zijn:

- Vermogen van de laserbron
- Voortloopsnelheid van de XY-tafel
- Aandrukkraft van de persluchtcilinder
- Afstand van het focuspunt tot het oppervlak

10.2.1 Laservermogen in functie van de aangelegde spanning

Het vermogen van de laserbron kan slechts beperkt ingesteld door een draaiknop. Een accuratere regeling is mogelijk via een externe spanningsregeling. Door achteraan de laserbron een gelijkspanning aan te sluiten en de instelling van de laserbron softwarematig correct te programmeren, kan het vermogen worden geregeld. Om de gewenste spanning aan te leggen aan de laserbron is een Arduino geprogrammeerd zodanig dat een PWM-poort¹¹ de ingestelde spanning uitstuurt. Door deze creatieve oplossing is het vermogen niet meer de input maar wel de stuurspanning. Om nu toch een idee te hebben met welke grootteorde een las wordt aangebracht, is Afbeelding 54 opgesteld. De aangelegde spanning is stelselmatig verhoogd en met een vermogensmeting is het effectieve vermogen van de laser opgemeten in functie van de aangelegde spanning. Hierbij is een duidelijk lineair verband aangetoond tussen effectief vermogen van de laser en de aangelegde spanning.

Een aandachtige lezer merkt op dat in het gebied tussen 100 en 1000 mV een fijnere onderverdeling is gebruikt. Dit is te verklaren omdat dit voornamelijk het werkgebied zal zijn waarbinnen de DOE zal opereren.



Afbeelding 54: Laservermogen in functie van de aangelegde spanning (Meetapparatuur: Ophir, NOVA).

¹¹ Pulsbreedtemodulatie. De Arduino kan een gelijkspanning leveren van 0 tot 5V in stappen van 0,02 V (255 onderverdeling mogelijke).

10.2.2 Voortloopsnelheid van de XY-tafel

De CNC-sturing biedt de mogelijkheid een willekeurig patroon te beschrijven. De snelheid waarmee het patroon zal worden beschreven heeft een zekere invloed op de warmte-inbreng. Om de warmte-inbreng te beperken binnen aanvaardbare grenzen zal de verplaatsingssnelheid gelegen zijn binnen een interval van 1 tot 10 mm/s gedurende het lassen. De reden hiervoor is dat de kunststof niet mag degraderen door een te hoog vermogen bij een te lage verplaatsingssnelheid (te hoge warmte-inbreng) alsook moet er steeds sprake zijn van een verbinding bij een laag vermogen bij een hoge verplaatsingssnelheid. Dit laatste is om bindingsfouten te vermijden.

10.2.3 Aandrukkraft van de cilinder

De tooling is met een persluchtcilinder voorzien die aangesloten is op een druknetwerk doorheen het gebouw. Dit biedt de mogelijkheid de aandrukkraft te laten variëren tussen 0 en 6 bar. Om een luchtspleet te vermijden tussen beide kunststoffen wordt een minimum van 2 bar gehanteerd.

10.2.4 Afstand tot het focuspunt

Voor het bepalen van de optimale focusafstand, is een stuk zwart kunststof gebruikt onder een glasplaat van 4 mm. Op dit stuk zwarte kunststof zijn verschillende lijntjes aangebracht. Eén parameter is bij elke lijntje aangepast, de focusafstand. Door nadien de breedte van elk lijntje op te meten onder een microscoop, is bepaald wat de optimale focusafstand is (de focusafstand horende bij het lijntje met de kleinste breedte). Uit de testen bleek dat 14.6 mm de optimale focusafstand is. Tijdens de DOE zal de focusafstand variëren tussen 14.6 mm \pm 0.1 mm.

10.2.5 Low, mid en high bij het DOE-onderzoek

Tabel 10 toont een overzicht van de grenswaarden voor de geselecteerde procesinputs. Ook zijn in deze tabel *centerpoints* opgenomen. Tijdens een DOE worden enkel *low* en *high* waarden toegepast. Het is niet mogelijk om op basis van slechts twee punten te achterhalen of de curve al dan niet lineair verloopt. Het gebruik van centerpoints, een extra meetpunt tussen *low* en *high*, geeft de mogelijkheid om niet-lineaire effecten te detecteren.

Tabel 10: Grenswaarden en centerpoints van de inputfactoren bij het DOE-onderzoek.

Input	Low	Mid	High
'Laservermogen' Stuurspanning [mV]	100	550	1000
Voortloopsnelheid [mm/s]	1	5,5	10
Aandrukkraft [Bar]	2	4	6
Focusafstand [mm]	13,6	14,6	15,6

10.3 Uitvoeren van het experiment

Het uitvoeren van een DOE met Minitab moet met voldoende voorzichtigheid en in een willekeurige volgorde gebeuren. Belangrijk bij het experiment zijn de gecontroleerde omstandigheden, zodat de spreiding op de procesinputs minimaal zijn. Dit vertaalt zich

naar het streven van stabiele omstandigheden gedurende het experiment, met uitzondering van variaties van de procesinputs.

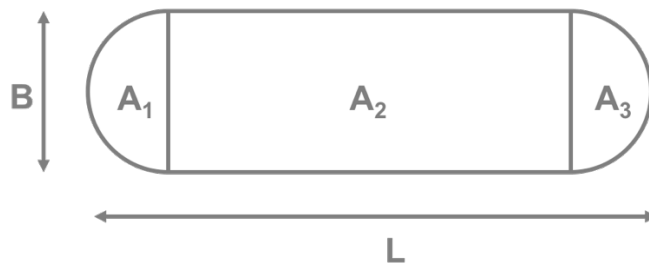
Om problemen door oncontroleerbare variabelen te beperken, voorziet Minitab een willekeurig volgorde voor de uitvoering van het experiment, nl. *Run order*. Om variaties doorheen de tijd te reduceren, voorziet minitab ook de kolom *Blocks*. Het uitvoeren van experimenten in een *block* heeft als doel dat de testen voldoende snel achter elkaar volgen. Indien het experiment niet kan worden uitgevoerd in één keer (bijvoorbeeld: het experiment vereist meerdere dagdiensten na elkaar), kan de keuze gemaakt worden voor meerdere *blocks*.

Afbeelding 55 toont het venster van de DOE in Minitab. Kolom C2 bevat de volgorde voor het uitvoeren van het experiment. Kolommen C5 tot C8 bevatten de procesinputs.

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	P_laser	V_cnc	P_tafel	Focusafstand
1	5	1	1	1	400	1,0	6	14,5
2	45	2	1	1	400	1,0	6	14,7
3	9	3	1	1	400	1,0	2	14,7
4	7	4	1	1	400	10,0	6	14,5
5	2	5	1	1	1000	1,0	2	14,5

Afbeelding 55: Interface van DOE in Minitab van Full Factorial designs.

De testsamples zijn gelast volgens de tabel afkomstig van Minitab. Elke parameter set is uitgevoerd op drie testsamples, telkens uitgevoerd in procesloop. Vervolgens is op elke testsample het bijhorende *Run order* aangebracht om nadien een traceerbaarheid te garanderen. Nadien zijn alle testsamples op de trekbank in het testlabo kapotgetrokken. Tot slot zijn alle lassen individueel opgemeten onder de microscoop. In het werkblad zijn alle lengtes en breedtes van elke las individueel weergegeven. Op basis hiervan is dan een oppervlakte berekend per las, mits een vereenvoudiging zoals weergegeven in Afbeelding 56. Met volgende vereenvoudigde formule aan de hand van de grafische voorstelling is de oppervlakte van elke las bepaald:



Afbeelding 56: Vereenvoudigde voorstelling van het oppervlak van een las.

$$A_{\text{totaal}} = A_1 + A_2 + A_3$$

$$A_{\text{totaal}} = \frac{1}{2} \frac{\pi \cdot d^2}{4} + (L - 2 \cdot B) \cdot B + \frac{1}{2} \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

In het werkblad wordt A_{totaal} bepaald met de gemiddelde lengtes en breedtes per testsample. Vervolgens wordt A_{totaal} vermenigvuldigt met een factor 4 omwille van de vier lassen.

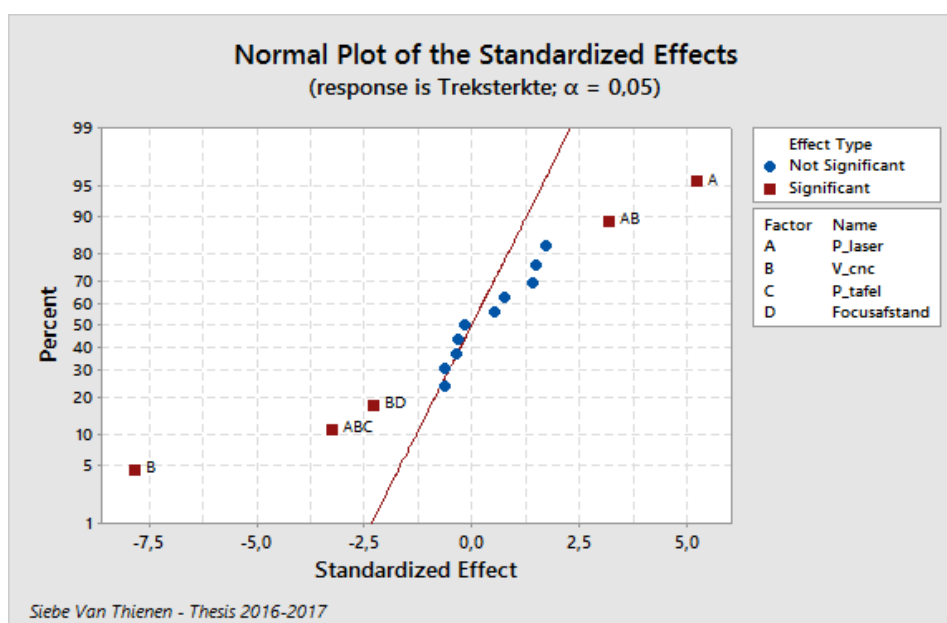
Met de opgemeten treksterkte en de berekende oppervlakte kan nadien de afschuifkracht worden bepaald per testsample.

10.4 Analyse van de treksterkte

Afbeelding 57 toont grafisch de significante termen bij het DOE-onderzoek met de treksterkte als procesoutput. Hieruit blijkt dat

- het laservermogen,
- de voortloopsnelheid van de CNC,
- de interactie tussen het laservermogen en de CNC-voortloopsnelheid,
- de interactie tussen de focusafstand en de CNC-voortloopsnelheid en
- de interactie tussen het laservermogen, de voortloopsnelheid en de aandrukkracht van de perscilinder

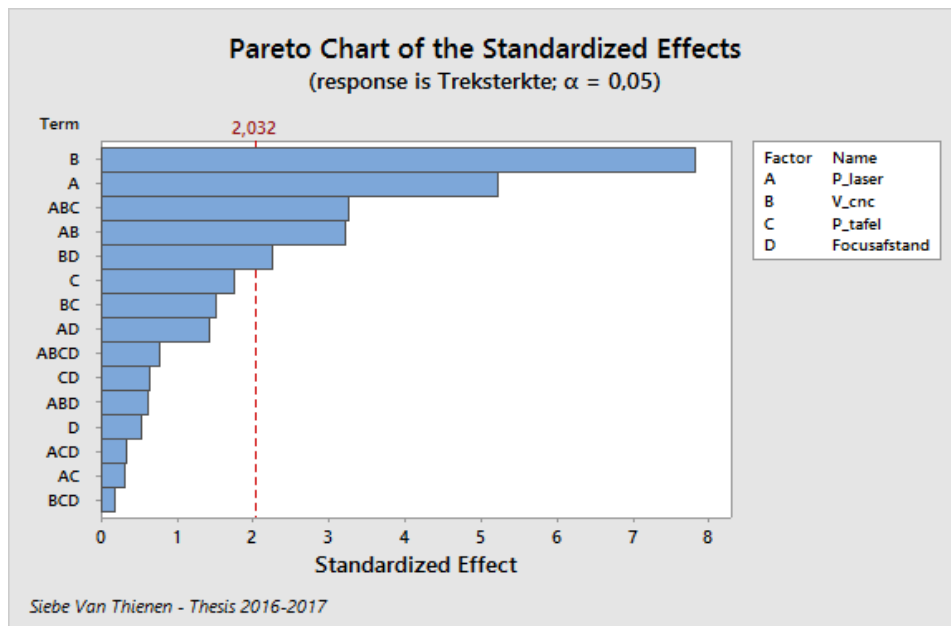
van belang zijn bij het laserlassen van kunststoffen.



Afbeelding 57: Normale waarschijnlijkheidsplot met als significante termen het laservermogen, de voortloopsnelheid van de CNC, de interactie tussen het laservermogen en de CNC-voortloopsnelheid, de interactie tussen de focusafstand en de CNC-voortloopsnelheid en tot slot de interactie tussen het laservermogen, de voortloopsnelheid en de aandrukkracht van de perscilinder.

Afbeelding 58 bevestigt de eerder opgesomde significante termen op de *output*. Elk van de termen overschrijdt de drempelwaarde. Ook leren beide afbeeldingen onder andere dat de aandrukkracht en de focusafstand individueel geen noemenswaardige invloed hebben op de treksterkte.

Minitab vergelijkt de t-waarden van elke term met de drempelwaarde. Indien de drempelwaarde overschreven wordt, dan is de term statistisch significant alsook zal de resulterende p-waarde laag zijn. Voorwaarde voor deze methode is het gebruik van replica. Voor elke instelling moeten meerdere testsamples getest worden. In dit onderzoek werden per parameterset drie samples gelast en getest.



Afbeelding 58: Pareto diagram met als significante termen het laservermogen, de voortloopsnelheid van de CNC, de interactie tussen het laservermogen en de CNC-voortloopsnelheid, de interactie tussen de focusafstand, het laservermogen en de CNC-voortloopsnelheid en tot slot de interactie tussen de voortloopsnelheid en de focusafstand.

Afbeelding 59 toont de kritische informatie bij de analyse met Minitab. Een term met een p-waarde lager dan 0.05 heeft een statistisch significant effect op de output. Ook deze opgesomde informatie geeft elke term alsook de interactie van de termen weer. De p-waarde op de eerste regel mag worden genegeerd. Dit is geen reële procesinput. De T-waarde was eerder ook al grafisch weergegeven in Afbeelding 57.

Net zoals bij regressie, is ook bij DOE een hoge determinatiecoëfficiënt (*R-kwadraat*) representatief voor een grote invloed op de procesoutput. Ook is er een *R-kwadraat(pred)*. Die reflecteert hoe goed het model procesresultaten kan voorspellen op basis van historische data.

Merk op dat een negatief coëfficiënt zich vertaalt naar een daling van de treksterkte bij een toenemende term of interactie van termen.

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant		570,8	13,8	41,26	0,000
P_laser	144,8	72,4	13,8	5,23	0,000
V_cnc	-216,3	-108,2	13,8	-7,82	0,000
P_tafel	48,5	24,2	13,8	1,75	0,089
Focusafstand	14,8	7,4	13,8	0,53	0,597
P_laser*V_cnc	88,8	44,4	13,8	3,21	0,003
P_laser*P_tafel	-8,4	-4,2	13,8	-0,30	0,764
P_laser*Focusafstand	39,6	19,8	13,8	1,43	0,162
V_cnc*P_tafel	41,7	20,8	13,8	1,51	0,141
V_cnc*Focusafstand	-62,6	-31,3	13,8	-2,26	0,030
P_tafel*Focusafstand	-17,6	-8,8	13,8	-0,64	0,528
P_laser*V_cnc*P_tafel	-89,9	-45,0	13,8	-3,25	0,003
P_laser*V_cnc*Focusafstand	-16,9	-8,5	13,8	-0,61	0,545
P_laser*P_tafel*Focusafstand	-9,3	-4,6	13,8	-0,33	0,740
V_cnc*P_tafel*Focusafstand	-4,8	-2,4	13,8	-0,17	0,863
P_laser*V_cnc*P_tafel*Focusafstand	21,2	10,6	13,8	0,77	0,448
Ct Pt		-70,7	57,0	-1,24	0,224

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
95,8480	78,65%	68,61%	51,97%

Afbeelding 59: Outputwindow van het DOE-onderzoek.

Vergelijking 1 geeft de formule voor het bepalen van de treksterkte aan de hand van alle termen en de interactie tussen deze termen. Belangrijk is dat bij de voorspelling rekening gehouden wordt met de *lower* en *higher* grens. Buiten deze grenzen kan een correcte voorspelling niet gegarandeerd worden.

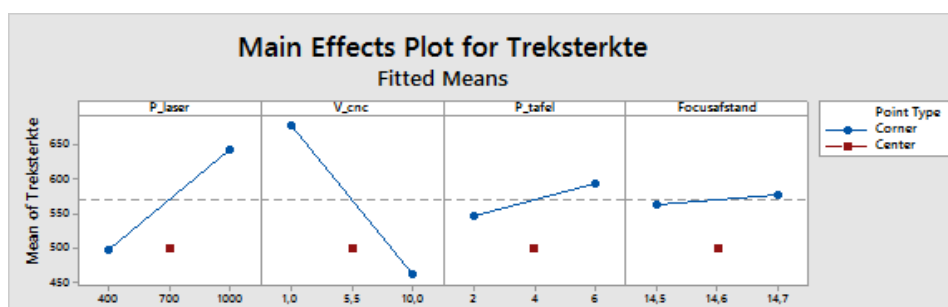
Minitab maakt een onderscheid in *coded* en *uncoded units*. Hiermee wordt aangegeven of de parameters die worden gebruikt als hun werkelijke waarde of als *low* en *high*, nl. -1 resp. 1.

Vergelijking 1: Regressievergelijking voor de treksterkte volgens het DOE-onderzoek.

Regression Equation in Uncoded Units

$$\begin{aligned}
 \text{Treksterkte} = & 14772 - 32,1 P_{\text{laser}} - 1490 V_{\text{cnc}} - 2629 P_{\text{tafel}} - 950 \text{Focusafstand} \\
 & + 3,31 P_{\text{laser}}*V_{\text{cnc}} + 4,37 P_{\text{laser}}*P_{\text{tafel}} + 2,18 P_{\text{laser}}*\text{Focusafstand} \\
 & + 455 V_{\text{cnc}}*P_{\text{tafel}} + 95 V_{\text{cnc}}*\text{Focusafstand} + 176 P_{\text{tafel}}*\text{Focusafstand} \\
 & - 0,590 P_{\text{laser}}*V_{\text{cnc}}*P_{\text{tafel}} - 0,220 P_{\text{laser}}*V_{\text{cnc}}*\text{Focusafstand} \\
 & - 0,293 P_{\text{laser}}*P_{\text{tafel}}*\text{Focusafstand} - 30,2 V_{\text{cnc}}*P_{\text{tafel}}*\text{Focusafstand} \\
 & + 0,0393 P_{\text{laser}}*V_{\text{cnc}}*P_{\text{tafel}}*\text{Focusafstand} - 70,7 \text{Ct Pt}
 \end{aligned}$$

Het effect van elke individuele term is weergegeven in Afbeelding 60. Deze weergave is handig voor het begrijpen van de invloed van elke term op de procesoutput. Dit leert ons dat een toename van het laservermogen, de aandrukkraft en in geringe mate de focusafstand een verhoging teweegbrengt van de treksterkte.



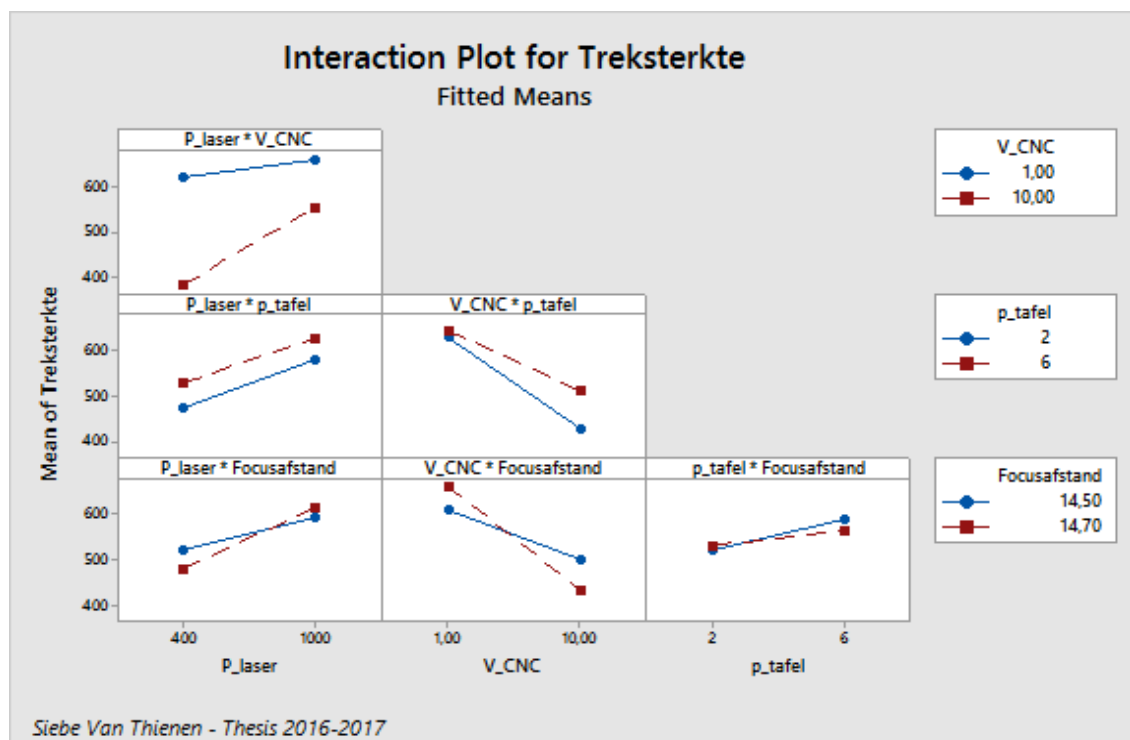
Afbeelding 60: Invloed van de individuele termen op de procesoutput.

Afbeelding 61 toont meerdere interactieplots. Een interactieplot laat zien welk effect de wijziging van de instellingen van één factor heeft op een andere factor. Aangezien een interactie hoofdeffecten kan vergroten of verkleinen, is de evaluatie van interacties extreem belangrijk. Indien de lijnen van een interactie tussen twee inputs niet evenwijdig is, duidt dit erop dat er sprake is van een zekere interactie. Enkele conclusie zijn:

Op de eerste rij, bij een toenemend laservermogen zal de treksterkte meer toenemen bij een lage voortloopsnelheid dan bij een hoge voortloopsnelheid. Echter zal bij een hoge voortloopsnelheid de absolute waarde van de treksterkte hoger gelegen zijn.

Op de tweede rij links lopen de lijnen evenwijdig dus is er geen interactie tussen het laservermogen en de aandrukkracht. Echter is er wel een interactie tussen de aandrukkracht en de voortloopsnelheid. Bij een hogere voortloopsnelheid, neemt de treksterkte sneller af bij een lagere aandrukkracht.

De eerste kolom van de onderste rij leert dat bij een focusafstand van 14.5 mm de treksterkte minder varieert maar bij het hoogste laservermogen de treksterkte lager gelegen is in vergelijking met een focusafstand van 14.7 mm. In de tweede kolom is de interactie weergegeven tussen de voortloopsnelheid en de focusafstand. De treksterkte neemt bij een toenemende voortloopsnelheid sneller af bij een grotere focusafstand en bij het hoger gelegen vermogen is de treksterkte lager ten opzichte van een focusafstand van 14.5 mm. Als laatste is er nog de interactie tussen de aandrukkracht van de tafel en de focusafstand. Bij een toenemende aandrukkracht stijgt de treksterkte meer als de focusafstand 14.5 mm bedraagt.



Afbeelding 61: Invloed van de interactie van twee termen op de procesoutput.

10.4.1 Verfijnen van het model

Indien bij de eerste grondige analyse blijkt dat sommige inputfactoren niet significant zijn, kan de DOE herhaalt worden zonder deze inputfactoren. Het uitvoeren van dit proces verfijnt het model.

Bij de vorige volledige analyses bleken volgende termen in significant te zijn:

- het laservermogen,
- de voortloopsnelheid van de CNC,
- de interactie tussen het laservermogen en de CNC-voortloopsnelheid,
- de interactie tussen de focusafstand en de CNC-voortloopsnelheid en
- de interactie tussen het laservermogen, de voortloopsnelheid en de aandrukkracht van de perscilinder.

Nu kan de analyse (niet het experiment) herhaald worden voor de significante inputfactoren. Het resultaat is weergegeven in Afbeelding 62. Ook de functie voor een voorspelling te maken van het model is vereenvoudigd.

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
95,0511	72,83%	69,13%	64,03%

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		570,8	13,7	41,61	0,000	
P_laser	144,8	72,4	13,7	5,28	0,000	1,00
V_cnc	-216,3	-108,2	13,7	-7,88	0,000	1,00
P_laser*V_cnc	88,8	44,4	13,7	3,24	0,002	1,00
V_cnc*Focusafstand	-62,6	-31,3	13,7	-2,28	0,027	1,00
P_laser*V_cnc*P_tafel	-89,9	-45,0	13,7	-3,28	0,002	1,00
Ct Pt		-70,7	56,6	-1,25	0,218	1,00

Afbeelding 62: Outputwindow van het verfijnde model met als inputfactoren enkel de significante termen.

Vergelijking 2: Regressievergelijking voor de treksterkte volgens het verfijnde DOE-onderzoek

Regression Equation in Coded Units

$$\text{Treksterkte} = 570,8 + 72,4 P_{\text{laser}} - 108,2 V_{\text{cnc}} + 44,4 P_{\text{laser}} * V_{\text{cnc}} - 31,3 V_{\text{cnc}} * \text{Focusafstand} - 45,0 P_{\text{laser}} * V_{\text{cnc}} * P_{\text{tafel}} - 70,7 \text{ Ct Pt}$$

Belangrijk bij gebruik van de regressievergelijking (zowel voor het volledige als voor het verfijnde DOE-onderzoek) zijn de onvermijdelijke begrenzingsen. Het model geeft enkel de mogelijkheid om een gemiddelde output (in dit geval de treksterkte) te voorspellen bij gegeven inputs. Anders gezegd, de werkelijke waarde van de treksterkte zullen afwijken van de voorspelde treksterkte omwille van de procesvariatie.

10.5 Analyse van de breedte en de lengte van de las

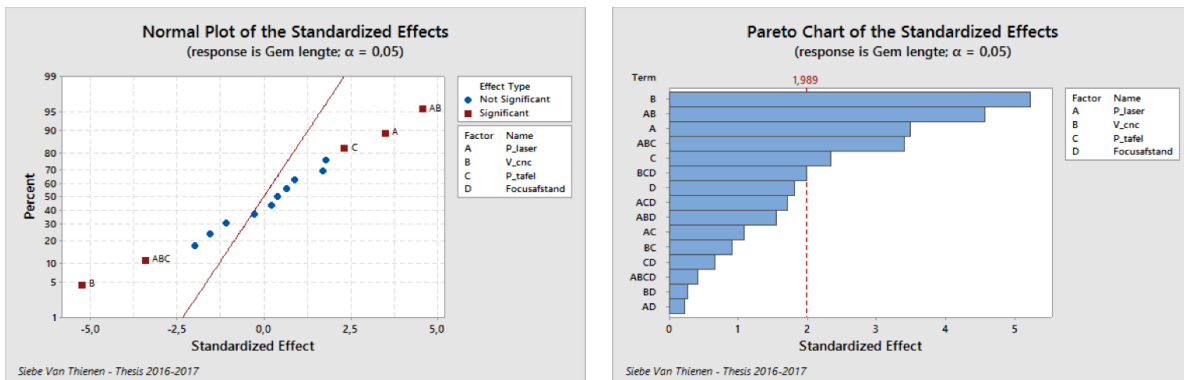
Afbeelding 63 en Afbeelding 64 tonen voor de gemiddelde lengte (resp. breedte) van de las het waarschijnlijkheidsplot en het Pareto diagram. Hieruit is af te leiden dat volgende termen een significante invloed hebben op de gemiddelde lengte van de las op het testsample:

- de voortloopsnelheid van de CNC,
- de interactie tussen het laservermogen en de CNC-voortloopsnelheid,
- het laservermogen,
- de interactie tussen de focusafstand, het laservermogen en de CNC-voortloopsnelheid en
- de aandrukkracht.

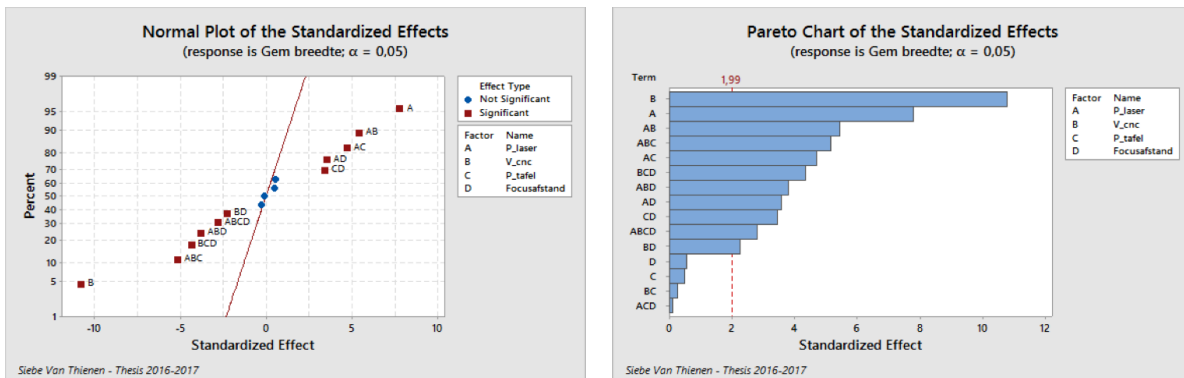
Door het wijzigen van een van bovenstaande parameters, kan de gemiddelde lengte van de las worden gewijzigd. Andere (interacties tussen) parameters vertonen geen noemenswaardige invloeden op de gemiddelde lengte van de las.

Bij de analyse van de gemiddelde breedte (Afbeelding 64) van de las is er een sterk verschil waar te nemen. Hier zijn bijna alle parameters en interacties van belang. Enkel de volgende interactie en/of termen zijn niet van belang:

- de focusafstand,
- de aandrukkracht,
- de interactie tussen de voortloopsnelheid en de aandrukkracht en
- de interactie tussen het laservermogen, de aandrukkracht en de focusafstand.



Afbeelding 63: Normale waarschijnlijkheidsplot (links) en Pareto diagram (rechts) van de gemiddelde lengte van de las. Bijhorende significante termen zijn de voortloopsnelheid van de CNC, de interactie tussen het laservermogen en de CNC-voortloopsnelheid, het laservermogen, de interactie tussen de focusafstand, het laservermogen en de CNC-voortloopsnelheid en tot slot de aandrukkracht.



Afbeelding 64: Normale waarschijnlijkheidsplot (links) en Pareto diagram (rechts) van de gemiddelde breedte van de las. Bijhorende niet-significante termen zijn de focusafstand, de aandrukkracht, de interactie tussen de voortloopsnelheid en de aandrukkracht en tot slot de interactie tussen het laservermogen, de aandrukkracht en de focusafstand.

Het opmeten van de lengte en de breedte van alle lassen is gebeurd met een microscoop met digitale aflezing van het merk JENA, type Large Toolmakers Microscope.

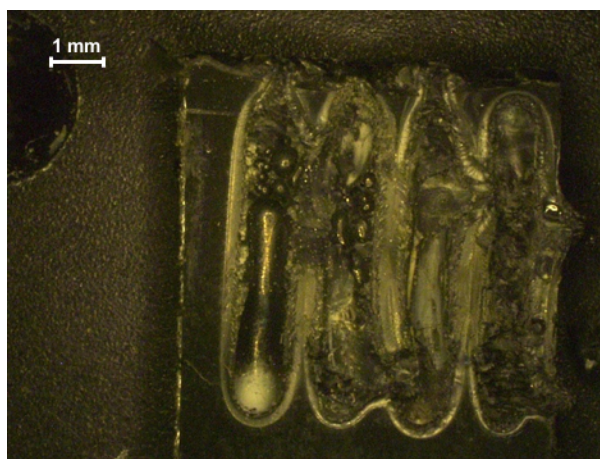
Verder is er geen onderzoek gedaan naar de breedte en de lengte van de las. Dit korte onderzoek en de bijhorende analyse dienen als een beperkte achtergrondkennis voor het interpreteren van een las. Indien gewenst kan nadien een verder onderzoek gedaan worden naar deze eigenschappen van de las.

10.5.1 Invloed van de positie in de aandrukplaat

Gedurende het onderzoek is steeds gelet op de volgorde van de testsamples in de tooling. Nadat alle testresultaten bekend zijn, is een *Two-Way Anova* (gepaarde) analyse uitgevoerd op de beschikbare data. Hiermee wil het onderzoek nagaan of de volgorde van de testsamples een invloed heeft. Vertoont de eerste sample van een reeks van drie systematisch hogere (of lagere) treksterktes. Heeft de aandruktijd tijdens het afkoelen een noemenswaardig effect? Op deze vragen geeft de analyse een resultaat. Uit de analyse blijkt dat het derde (laatste gelaste) sample systematisch een lagere treksterkte vertoont. Een hypothese voor deze bevinding is aan kortere afkoeltijd onder inklemming bij het laatste sample ten opzichte van de overige twee andere samples. Bij het afkoelen van de andere samples blijft de nadruktijd langer aanwezig. Bij het lassen van het laatste samples werd de procesdeur nagenoeg meteen geopend en de druk van de tooling gelaten. Een andere - minder waarschijnlijke hypothese - is een onvolkomenheid in de het glas of in de uitneembare plaat van de tooling. Mogelijk treedt hierdoor een andere krachtenverdeling op in het derde sample. Door deze test te doen, is geweten dat er wel degelijk een verschil is tussen de volgorde van de samples.

10.6 Aanvullende bevindingen

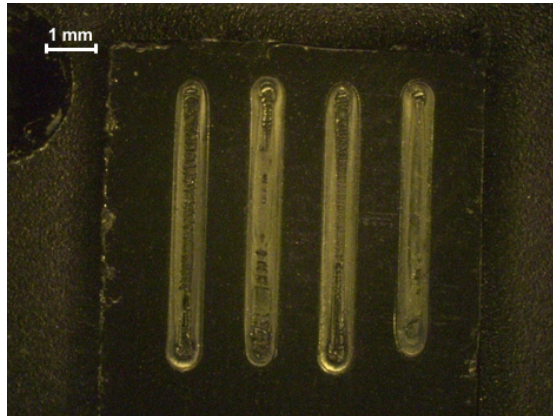
Meteen na het lassen van de testsamples en het beproeven op de trekbank, werden enkel bevindingen opgemerkt. Testsamples gelast op hoog vermogen met een lage voortloopsnelheid vertonen een sterke las maar een verzwakt basismateriaal. De testsamples met deze lasparameters braken niet op de verbinding tussen het transparante en het zwarte materiaal maar hier begaf het zwarte basismateriaal het. Een mogelijke verklaring hiervoor is het gebruik van een zeer hoge warmte-inbreng op het absorberende materiaal waardoor de microstructuur van het zwarte basismateriaal veranderd en verzwakt. Het basismateriaal brak bij een treksterkte ver onder de nominale treksterkte. Het lassen met te hoge warmte-inbreng (resp. hoog laservermogen en lage voortloopsnelheid) kan dus best vermeden worden. Afbeelding 65 toont een voorbeeld van deze bevinding.



Afbeelding 65: Testsample waarbij het absorberende basismateriaal degradeert en de oorspronkelijke treksterkte verliest.

Ook vertonen hoge vermogens in het algemeen diepe inbrandingen waardoor lokaal geen verbinding tot stand komt. Enkel de zone naast de diepe inbranding maakt verbinding tussen beide materialen. Dit kon worden waargenomen onder de microscoop tijdens het opmeten van de individuele afmetingen van de lasverbindingen, Afbeelding 66 geeft hier een voorbeeld van. Wellicht kan dit worden verklaard door de lagere temperatuur in het absorberende materiaal. Best kan de energiedensiteit van de laserbundel verlaagd worden om diepe, ongewenste inbrandingen te vermijden.

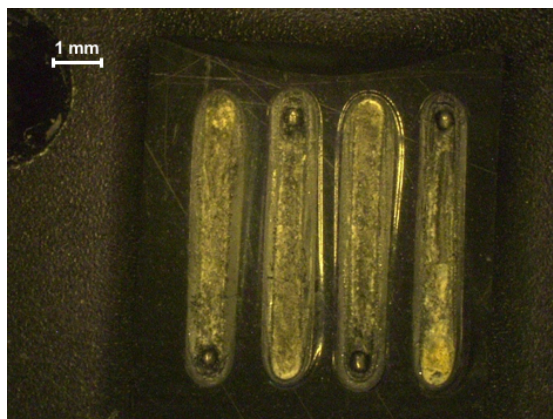
Later is een verklaring gevonden voor de kanaalvorming in het midden van de las. Bij het opmeten van het profiel van de laserbundel, vertoont de bundel in het midden van de spot de hoogste energiedichtheid. Door het hoog vermogen, wordt in het absorberende materiaal een hoge temperatuur opgewekt. Wanneer deze temperatuur te sterk stijgt, zal de kunststof gaan degraderen en zal er geen verbinding tussen de transparante en de zwarte kunststof vormen. In 11.6 is het profiel van de laserbundel volledig beschreven.



Afbeelding 66: Testsample gelast met hoog laservermogen en lage voortloopsnelheid waardoor in het midden van de las een groef ontstaat die geen verbinding veroorzaakt tussen beide basismaterialen.

Vele testsamples met een hoge afschuifsterkte (niet allemaal) werden bekomen door een laag vermogen en een hoge snelheid. Een verklaring hiervoor kan gevonden worden bij het beter onder controle houden van de maximale toegelaten temperatuur voor het vermijden van degradatie van de kunststof.

Ook vertonen vele samples *pinholes*¹². Afbeelding 67 geeft een sample waarbij de pinholes duidelijk waar te nemen zijn. Het nadeel van dit fenomeen is de reductie van contactoppervlak. Hierdoor neemt het totale hectoppervlak lichtjes af.



Afbeelding 67: Testsample dat pinholes vertoont in het absorberende kunststof.

Afbeelding 65, Afbeelding 66 en Afbeelding 67 zijn opgemeten op een digitale microscoop van het merk Keyence, type VHX-600.

¹² Putvormig profiel dat een las vertoont aan het begin van de lasnaad.

11 STATISTISCHE MODELLEN

Na het afronden van de DOE, kan met dezelfde data nog meer gedaan worden. Met behulp van enkele statistische modellen worden alle mogelijke combinaties van de laserinstelling gekozen en hun bijhorende treksterkte voorspeld. Dit maakt het mogelijk een optimum te bepalen. Ook biedt het statistisch model de mogelijkheid om de treksterkte bij elke instelling te vergelijken.

Een linearisatie bij DOE zorgt voor een beperkte benadering van de voorspellingsformule. Beter is het voorspellen met een formule waarbij ook niet-lineaire functies mogelijk zijn. Daarom is in dit hoofdstuk gezocht naar een statisch model (dat niet lineair is) om een betere benadering van de voorspellingsformule te bekomen.

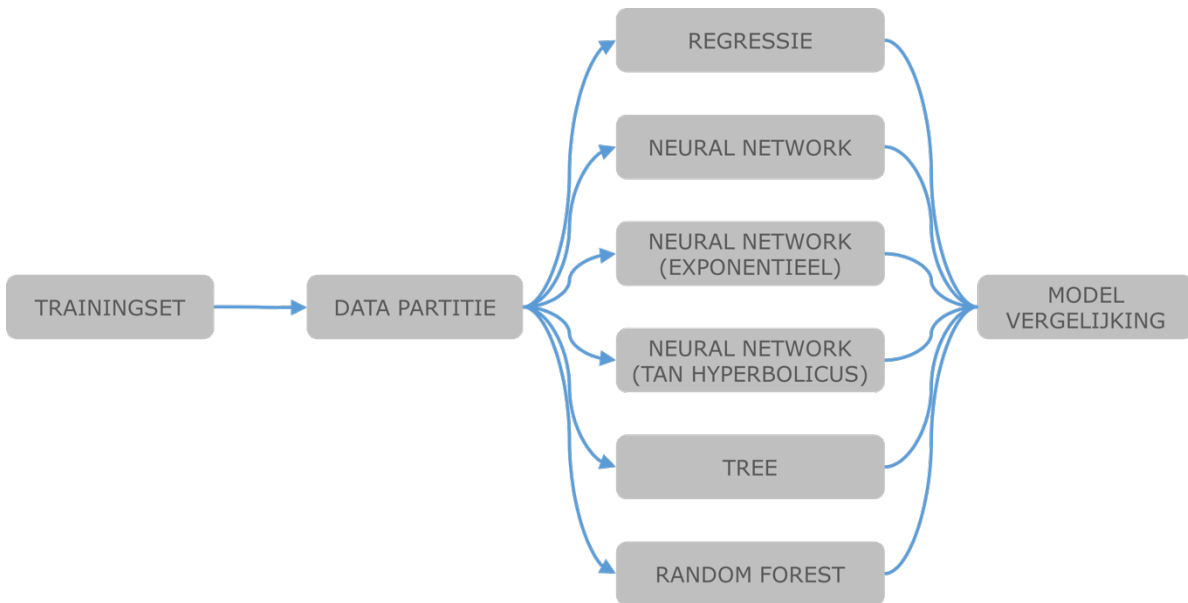
11.1 Verschillende modellen

Door meteen veel modellen te kiezen bij de start, kan al snel gezocht worden welke modellen effectief goed functioneren en welke minder goed aansluiten bij het werkelijk proces. Afbeelding 68 geeft alle stappen weer die de input data met de testresultaten doorloopt bij de analyse. De input data functioneert als trainingset voor elk individueel model.

Om overfitting te voorkomen, wordt de input data in een tweede stap gesplitst in een training en validatie data set. De training data set wordt gebruikt om het statistisch model te trainen, de validatie data set wordt gebruikt om het trainen tijdig te stoppen om zo overfitting¹³ te voorkomen. Er worden zes modellen getraind op basis van de gesplitste input data. Modeltraining – en het gebruik van de achterliggende algoritmes – gebeurt aan de hand van SAS Enterprise Miner, software die geschikt is voor data mining en data analyse.

Tot slot zullen alle modellen vergeleken worden en zal het beste model genomen worden om daarmee verder te analyseren.

¹³ Overfitting treedt op indien een model te complex is, bijvoorbeeld door te veel parameters ten opzichte van het aantal observaties.



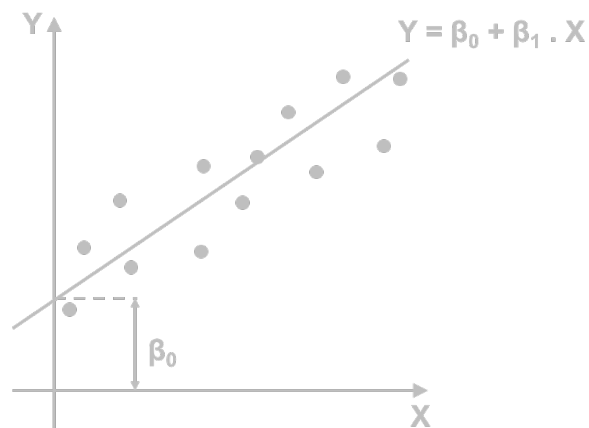
Afbeelding 68: Statistische modellen voor de uitgebreide analyse van de testresultaten.

11.1.1 Regressie

Lineaire regressie is ongetwijfeld de meest gebruikte techniek om een continue doelvariabele te modelleren. Afbeelding 69 toont een algemene voorstelling van lineaire regressie. Het algemene functievoorschrift van lineaire regressie luidt:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X$$

Een lineaire regressielijn wordt geschat zodanig dat de gemiddelde absolute fout zo klein mogelijk is, en dus de *goodness of fit* zo groot mogelijk is.

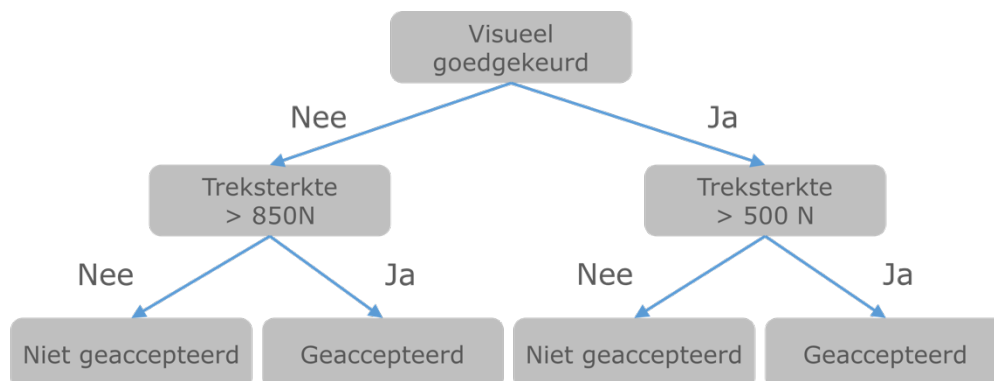


Afbeelding 69: Voorstelling van lineaire regressie met het algemeen functievoorschrift.

11.1.2 Beslissingsbomen

Beslissingsbomen (of decision trees) zijn recursieve-partitie-algoritmen (RPA's) die een boomachtige structuur vormen die patronen vertegenwoordigen in een onderliggende data set. Afbeelding 70 toont een mogelijke, fictieve beslissingsboom relevant voor het onderzoek. Hierbij vindt eerst een visuele controle plaats. Indien het resultaat van de

controle positief is, dan wordt de treksterkte opgemeten. Hierbij zal de testsample worden geaccepteerd als de treksterkte hoger gelegen is dan 500 N. Anders wordt het resultaat van de trekproef als negatief beoordeeld. Indien de visuele controle negatief was maar de treksterkte toch meer als 850 N bedraagt, zal het testsample toch worden aanvaard.



Afbeelding 70: Voorbeeld van een beslissingsboom relevant voor het onderzoek van het eindwerk.

Het bovenste knooppunt is het knooppunt dat een testconditie specificeert, waarvan de uitkomst overeenkomt met een tak die tot een intern knooppunt leidt. De eindknooppunten van de boom wijzen de classificaties aan en worden ook aangeduid als de stopknooppunten. In de literatuur zijn veel algoritmes voorgesteld om besluitbomen te bouwen. Enkele voorbeelden zijn CART, CHAID etc. Hier wordt verder niet dieper op in gegaan. Deze algoritmen verschillen in hun manier om de belangrijkste beslissingen om een boom te bouwen, te beantwoorden:

- **Splitting decision:** Welke variabele wordt gesplitst tegen welke waarde,
- **Stopping decision:** Wanneer moet je stoppen met het toevoegen van knooppunten aan de boom,
- **Assignment decision:** Welke klasse (bijvoorbeeld geaccepteerd of niet geaccepteerd) om aan een stopknooppunt toe te wijzen.

Meestal is de Assignment decision het meest makkelijk te maken, aangezien men typisch naar de meerderheidsklasse in het stopknooppunt kijkt om de beslissing te nemen. Dit idee wordt ook aangeduid als winner-take-all learning. De overige twee beslissingen zijn minder eenvoudig te maken.

In volgende twee paragrafen zijn twee mogelijke manieren voor een beslissing van een bouw uit te bouwen, kort uitgelegd.

11.1.2.1 Splitting decision

Om de splitsingsbeslissing te kunnen beantwoorden, moet men het begrip onzuiverheid of chaos definiëren. Denk bijvoorbeeld aan de drie datasets van Afbeelding 71, elk met positieve (lege bollen) en negatieve (gevulde bollen) observaties. Minimale onzuiverheid vindt plaats wanneer alle observaties positief of negatief zijn. Maximale onzuiverheid vindt plaats als men hetzelfde aantal positieve en negatieve observaties heeft (middelste dataset). Beslissingsbomen zullen nu richten op het minimaliseren van de onzuiverheid in de gegevens. Optimalisatie van onzuiverheid wordt vaak gedaan door middel van het Gini criterium of Entropy.



Afbeelding 71: Voorbeeld datasets voor het bepalen van onzuiverheden aan de hand van splitting decision.

11.1.2.2 Stopping decision

De derde beslissing heeft betrekking op het stopcriterium. Als de boom blijft splitsen, wordt het zeer gedetailleerd met bladknooppunten die slechts een paar waarnemingen bevatten. In het meest extreme geval heeft de boom één bladknooppunt per observatie en komt deze als zodanig perfect in de gegevens. Door dit te doen begint de boom de spreiding in de data te passen, ook wel overfitting genoemd. Met andere woorden, de boom is te complex geworden en heeft het spreidingspatroon of de trend in de gegevens niet correct gemodelleerd. Als zodanig zal het slecht veralgemenen naar nieuwe ongeziene gegevens. Om dit te voorkomen, worden de gegevens opgesplitst in een training set en een validatie set. De training set wordt gebruikt om de splitsingsbeslissing te maken. De validatie set is een onafhankelijke steekproef, die bestemd is om de foutclassificatiefout te monitoren, als de boom groeit. Een veelgebruikte splitsing is een 70 procent training set en 30 procent validatie set.

11.1.3 Random Forest

De techniek van Random Forest werd voor het eerst geïntroduceerd door Breiman (2001). Het creëert een set van beslissingsbomen als volgt:

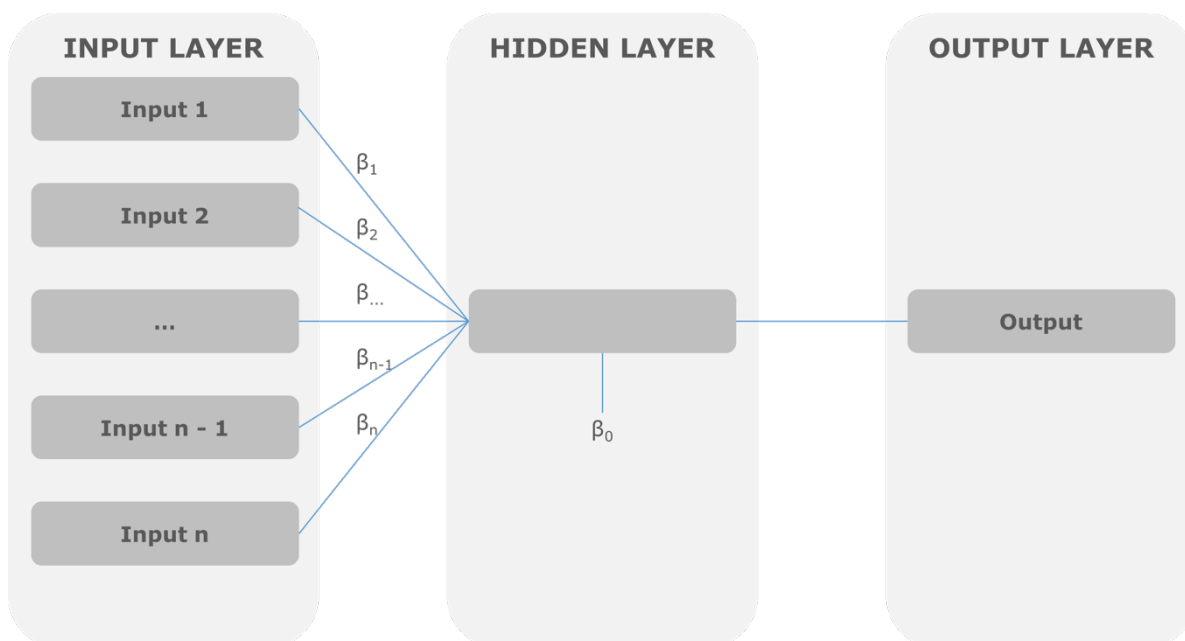
- 1) Gegeven een dataset met n waarnemingen en N variabelen.
- 2) m = voorgedefinieerde constante
- 3) Voor $t = 1, \dots, T$
 - a) Neem een willekeurige opstartproef met n observaties.
 - b) Bouw een beslissingsboom waarbij voor elk knooppunt van de boom een willekeurig selectie van de variabelen gemaakt wordt waarop de splitsingsbeslissing moet worden gebaseerd.
 - c) Splits het knooppunt met die variabele die minimale onzuiverheid oplevert.
 - d) Train de boom zonder stopbeslissingen en zonder prunen.

Over het algemeen, wordt m bepaald 1, 2 of $(\log_2(N) + 1)$. *Random forest* kan worden gebruikt met zowel classificatiebomen als regressiebomen. Belangrijk in deze benadering is het verschil tussen de basismodellen. Dit zijn de individuele beslissingsbomen die deel uitmaken van de *random forest*. Elke beslissingsboom wordt getraind op basis van een willekeurige training set, willekeurige set van variabelen en een willekeurige keuze tussen deze variabelen bij het splitsen van een knooppunt. De kracht van *random forests* ligt dus in de multi-dimensionaliteit van de individuele basismodellen. Door het samenvoegen van de diversiteit van de basismodellen wordt een geheel gevormd, met name het *random forest*, dat superieur is in prestatie in vergelijking met de enkelvoudige modellen.

11.1.4 Neuraal Netwerk

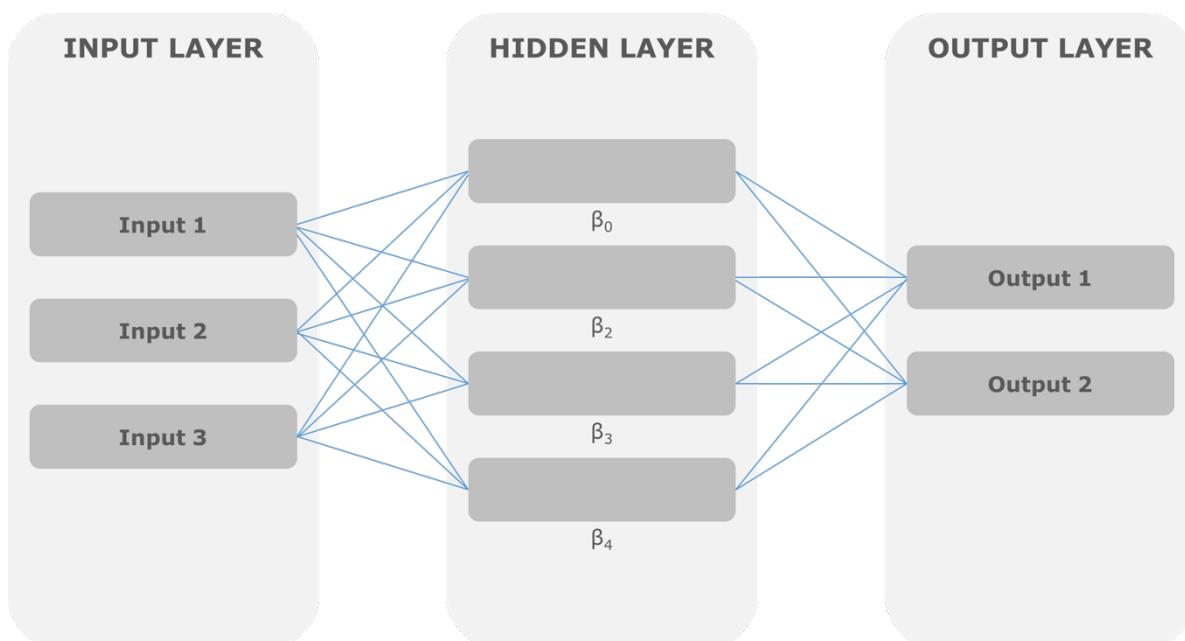
Neurale netwerken (*Neural Network*) zijn geïnspireerd op de wiskundige representaties van het functioneren van de menselijke hersenen. Hoewel dit misschien aantrekkelijk lijkt, ziet een ander realistischer perspectief neurale netwerken als generalisaties van bestaande statistische modellen.

Het model kan voorgesteld worden volgens Afbeelding 72. Het verwerkingselement of het neuron in de middelste laag (hidden layer) voert in principe twee handelingen uit: het neemt de inputs ($x_1, x_2 \dots$) en vermenigvuldigt ze met de gewichten (β_i – waarbij i overeenkomt met input x_i - die de voorspellingsterm in neurale netwerken genoemd wordt) en zet dit dan om in een niet-lineaire (of soms lineaire) transformatiefuncties. In zijn eenvoudigste vorm, is de transformatiefunctie een regressie. Meestal wordt er geopteerd voor een sigmoid of hyperbolische tangens transformatiefunctie



Afbeelding 72: Voorstelling van een Neural Network.

Dit principe kan ook veralgemeend worden naar *Multilayer Perceptron (MLP) Neural Network* door meer lagen en neuronen toe te voegen, zoals getoond in Afbeelding 73.



Afbeelding 73: Algemene opbouw van een Multilayer Perceptron (MLP) Neural Network.

Deze algemene voorstelling bevat één input laag, één verborgen laag en één output laag. De verborgen laag functioneert in wezen als een extractor door de inputs te combineren

met functies die vervolgens worden aangeboden aan de outputlaag om de optimale voorspelling te maken. De verborgen laag heeft een niet-lineaire transformatiefunctie $f()$ en de outputlaag is een lineaire transformatiefunctie. De meest populaire transformatiefuncties (ook wel *squashing*, *activatiefuncties* genoemd) zijn:

- Logistische $f(z) = \frac{1}{1+e^{-z}}$ (tussen 0 en 1)
- Hyperbolische tangens $f(z) = \frac{e^z - e^{-z}}{e^z + e^{-z}}$ (tussen -1 en +1)
- Lineair $f(z) = z$ (tussen $-\infty$ en $+\infty$)

Hoewel de activatiefuncties theoretisch kunnen verschillen per neuron, worden ze typisch voor elke laag vastgelegd.

Typisch zal men de hyperbolische tangens activatiefunctie gebruiken in de verborgen laag. In termen van verborgen lagen hebben theoretische werken aangetoond dat neurale netwerken met één verborgen laag universele benaderingen zijn die in staat zijn om elke functie te benaderen naar elke gewenste mate van nauwkeurigheid op een compact interval. Alleen voor discontinue functies (bijvoorbeeld een zaagtandpatroon) of in een diepe leercontext, kan het zinvol zijn om meer verborgen lagen uit te proberen. Merk echter op dat deze complexe patronen zelden voorkomen in de praktijk.

Neurale netwerken kunnen zeer complexe patronen en beslissingsgrens in de gegevens modelleren en zijn zo zeer krachtig. Net als bij beslissingsbomen zijn ze zo krachtig dat ze zelfs de spreiding (of ruis) in de trainingsdata kunnen modelleren, wat zeker moet worden vermeden. Een manier om deze overfitting te vermijden is door gebruik te maken van een validatieset op een soortgelijke manier als bij beslissingsbomen. De trainingsset wordt hier gebruikt om de gewichten β te schatten en de validatieset is opnieuw een onafhankelijke dataset die gebruikt wordt om te bepalen wanneer de training moet stoppen. (Baesens B. , 2014) (Baesens, Van Vlasselaer, & Verbeke, 2015)

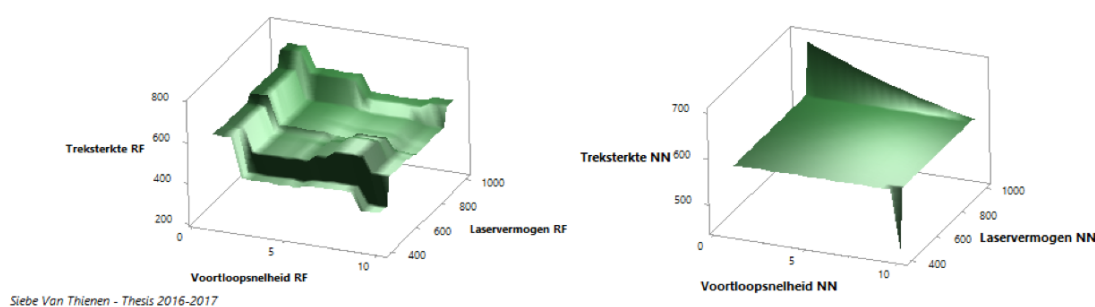
11.2 Selectie van het juiste model

Tabel 11 toont de statistische resultaten per model. Op basis van dit overzicht blijkt dat Random Forest en Neural Network de beste benadering geven voor de 99 testresultaten afkomstig van de testen. De gemiddelde kwadratische fout (average squared error) wordt gebruikt als selectiecriteria. Hoe lager deze fout, hoe beter het model de observaties kan benaderen. Merk op dat de Random Forest (HPDMForest) de laagste fout vertoont, gevolgd door de beslissingsboom (HPTree) en het Neuraal Netwerk met transferfunctie (HPNNA2). De analytische modellen zijn gebouwd met SAS Enterprise Miner.

Indien de treksterkte in functie van de voorloopsnelheid en het laservermogen wordt voorgesteld - voor de meest aannemelijke statistische modellen - ontstaan de driedimensionale plots in Afbeelding 74, gebaseerd op 15 903 mogelijke instellingen van de laser. Random Forest vertoont een complexere vorm dan het Neural Network. Maar bij het bestuderen van beide afbeeldingen, valt het op dat er een overeenkomstige trend in zit. De rechteronderhoek vertoont een duidelijk minimum in treksterkte, het omgekeerde is ook waar te nemen, er is een goed waarneembaar maximum in de linkerbovenhoek. Ook toont dit aan dat beide modellen een andere methode gebruiken aangezien het resultaat niet exact gelijk is. Het vertoont wel een overeenkomstige trend.

Tabel 11: Statistische resultaten van elk individueel statistisch model.

Selected Model ▲	Predecessor Node	Model Node	Model Description	Train: Target Variable	Target Label	Selection Criterion: Train: Average Squared Error	Train: Average Squared Error	Train: Divisor for ASE	Train: Maximum Absolute Error	Train: Sum of Frequencies	Train: Root Average Squared Error	Train: Sum of Squared Errors
	HPTree	HPTree	HP Tree	Treksterkte	Treksterkte	5417.289	5417.289	99	251.7	99	73.60224	536311.6
	HPNNA2	HPNNA2	HP Neural (...)	Treksterkte	Treksterkte	6287.34	6287.34	99	266.8653	99	79.29275	622446.7
	HPNNA	HPNNA	HP Neural (...)	Treksterkte	Treksterkte	6718.198	6718.198	99	261.3913	99	81.96461	665101.6
	HPNNA3	HPNNA3	HP Neural (...)	Treksterkte	Treksterkte	9304.947	9304.947	99	269.4222	99	96.46215	921189.8
	HPReg	HPReg	HP Regres...	Treksterkte	Treksterkte	11354.67	11354.67	99	385.6564	99	106.5583	1124112
Y	HPDMForest	HPDMForest	HP Forest	Treksterkte	Treksterkte	4473.989	4473.989	99	273.7301	99	66.88788	442924.9



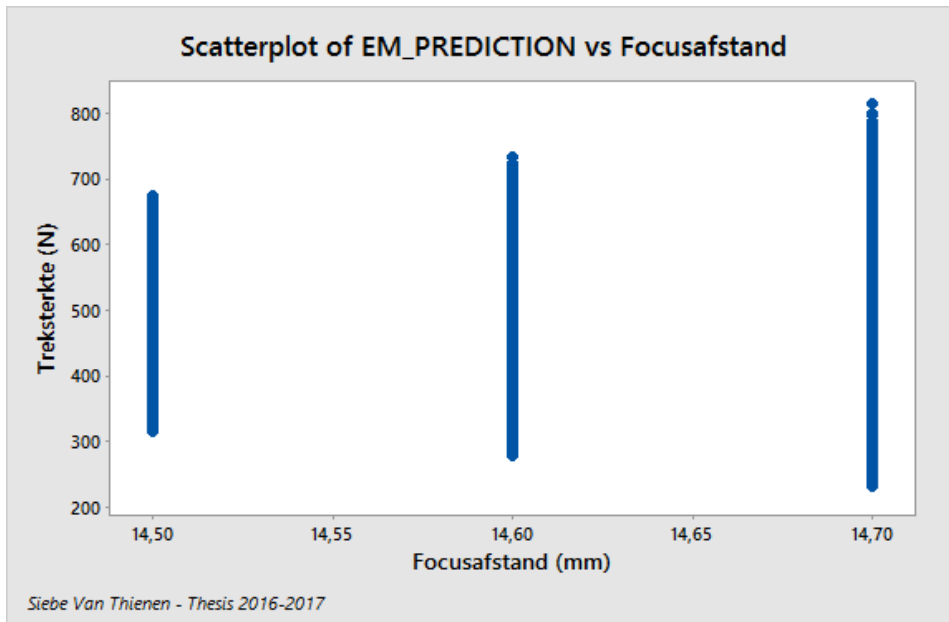
Afbeelding 74: Driedimensionale plot van de voorspelde treksterkte van plaatmateriaal met *Random Forest* (links) en *Neural Network* (rechts) in functie van het laservermogen en de voortloopsnelheid.

11.3 Optimalisatie van de laserparameters

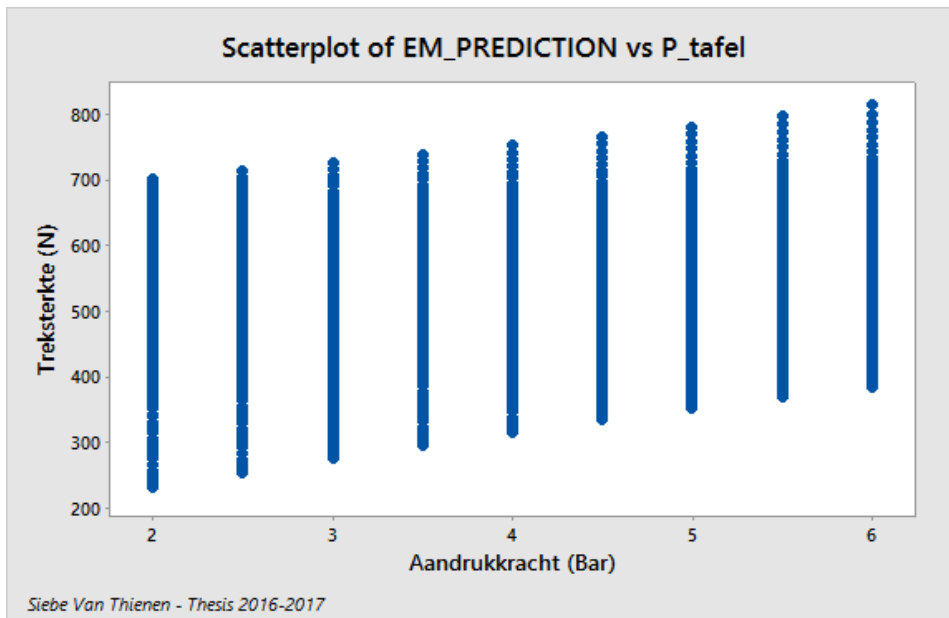
Eenmaal de DOE is uitgevoerd en de significante parameters bekend zijn, kan gezocht worden naar de optimale instelling voor het lassen van kunststof. Als eerst worden de niet-significante parameters gekozen in functie van de treksterkte. Afbeelding 75 toont de spreiding van alle treksterktes per instelling van de focusafstand. Een focusafstand van 14,5 mm resulteert in de kleinere variatie van de treksterkte voor elke mogelijke instelling. Om die reden zal verder een focusafstand van 14,5 mm worden gehanteerd. Een nadeel van deze instelling is dat de treksterkte niet maximaal zal zijn. Er is bewust gekozen om de processpreiding meer prioriteit te geven dan de treksterkte.

Een andere parameter met een beperkte invloed is de aandrukkracht. Als vaste werkdruk is gekozen voor 6 bar. Dit resulteert in een aandrukkracht van 754 N. De keuze van de aandrukkracht van de tooling is gebeurd op basis van Afbeelding 76. De spreiding bij elke instelling van de aandrukkracht is nagenoeg identiek. Daarom is gekozen voor de aandrukkracht die resulteert in de grootste treksterkte, namelijk 6 bar.

Nadat de aandrukkracht en de focusafstand vastliggen, kunnen alle combinaties tussen laservermogen en voortloopsnelheid uitgetest worden. In totaal zijn er 15 903 mogelijke combinaties mogelijk voor het instellen van laser.



Afbeelding 75: Spreiding van de treksterkte in functie van de focusafstand van de laser.



Afbeelding 76: Spreiding van de treksterkte in functie van de aandrukkraft van de tooling.

11.4 Invloed van het materiaal

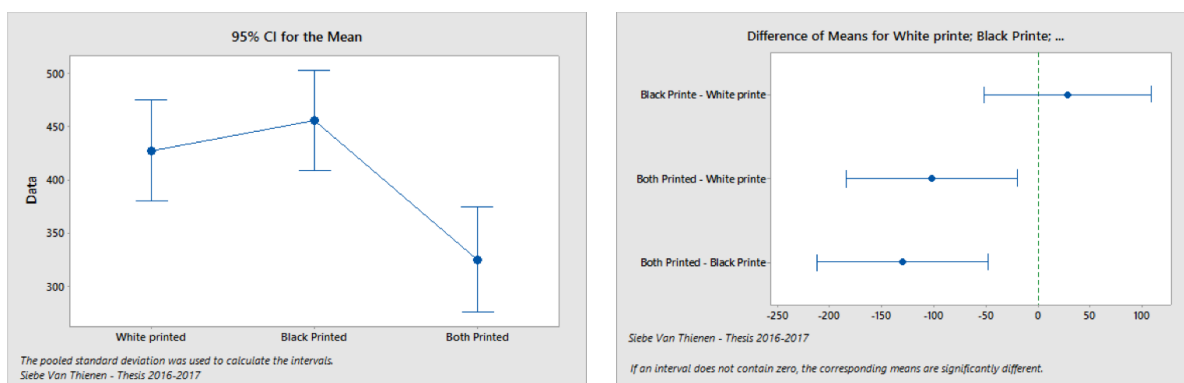
Bij het lassen van samples met telkens een van beide kunststoffen in geprinte toestand alsook beide kunststoffen in geprinte toestand, is gekeken naar de invloed van de fysische toestand van het materiaal. Wat is de invloed van een geprint materiaal en welke invloed heeft dit op de treksterkte, welk van beide materialen krijgt de voorkeur om te printen of is er geen verschil. Deze vragen worden in deze paragraaf behandeld.

Als uitgangspunt is begonnen van een vaste parameterset waarbij een kwalitatieve las het resultaat was. Vervolgens is telkens een van beide materiaal geprint. Nadien zijn beide materialen vervangen door een geprinte versie.

Met een variantieanalyse (Analysis of Variance, kortweg ANOVA) wordt gekeken of er een significant verschil is wanneer een van beide materiaal zich in een geprinte toestand bevindt.

Afbeelding 77 (links) toont aan dat er geen significant verschil is wanneer het zwarte of het transparante materiaal aan een conventionele kunststof wordt gelast. Wel is er een significant verschil wanneer beide materialen zich in een geprinte toestand bevinden. De resulterende treksterkte is hierbij opmerkelijk lager. De hoogste treksterkte opgemeten, indien beide materialen worden geprint, ligt lager dan de laagste treksterkte opgemeten indien één van beide materialen geprint is. Indien de mogelijkheid er is om te kiezen welk materiaal geprint kan worden, ligt de voorkeur bij het zwarte, absorberende materiaal. Hierbij zal de resulterende treksterkte hoger liggen dan bij het printen van het transparante materiaal.

Afbeelding 77 (rechts) is het vergelijk gemaakt tussen de verschillende mogelijke combinaties met de Tukey's test. Hieruit volgt dat een zwart of een transparant materiaal op een conventioneel materiaal geen grote verschillen geeft. Wel is er duidelijk verschil tussen beide geprint ten opzichte van één van beide geprint.



Afbeelding 77: Tukey's test voor de invloed van het materiaal na te gaan. Links de treksterkte in functie van de fysische toestand van het testmateriaal. Rechts het vergelijk tussen één geprint materiaal en beide geprinte materialen.

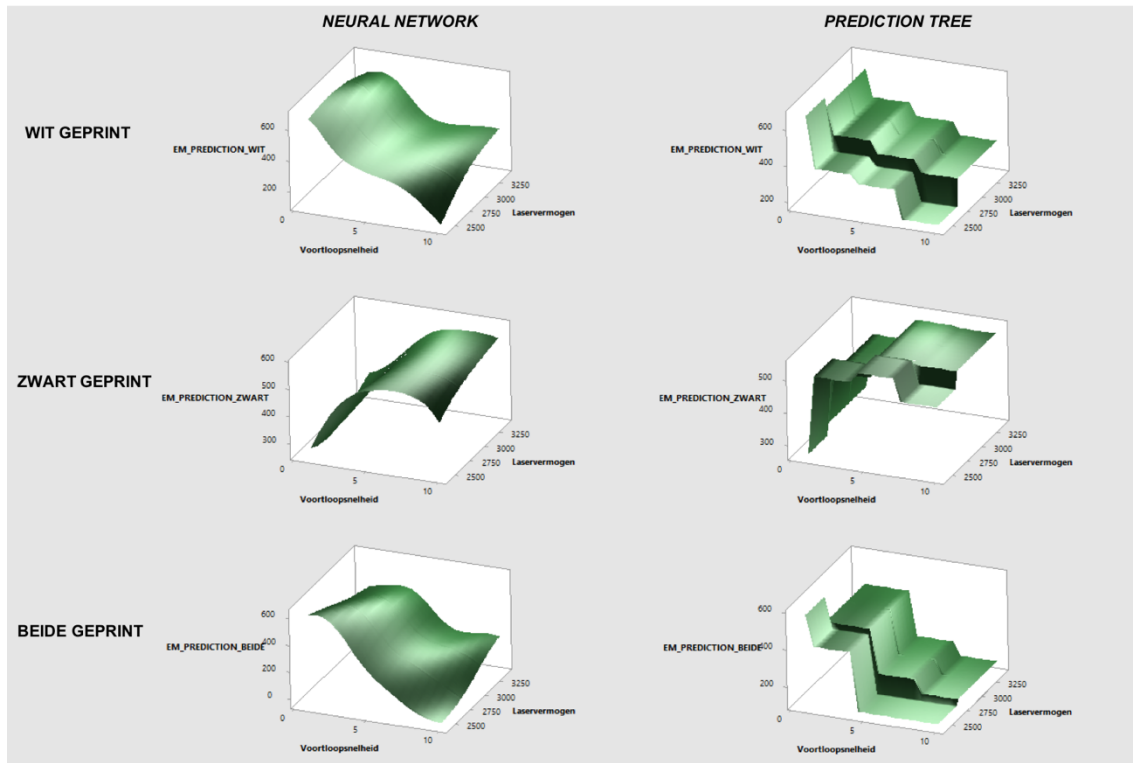
Om kort samen te vatten: de sterkste verbinding komt tot stand als beide materialen geëxtrudeerd zijn, de zwakste verbinding treedt op als beide materialen in geprinte vorm voorkomen. Indien een combinatie van beide is vereist, dan krijgt zwart als geprint materiaal de voorkeur.

11.5 Selectie van de lasparameters per combinatie

Na een overzicht te hebben van alle invloeden van alle lasparameters, de invloed van het materiaal en een optimalisatie in het algemeen, is het belangrijk ook een idee te hebben wat er verandert wanneer één of beide materialen geprint wordt. Om een geargumenteerde basis te vormen, zijn opnieuw testsamples gelast waarbij de lasparameters optimaal zijn, met verschillende materiaalcombinaties.

Afbeelding 78 toont het resultaat van een voorspelling na het doorlopen van de statistische modellen. Links op deze afbeelding is de voorspelling met *Neural Network* te zien, rechts aan de hand van de beslissingsboom (Prediction Tree). Er is een onderverdeling gemaakt voor elk type geprint materiaal. Dit kan een wit, zwart of een combinatie van beide geprinte materialen zijn. Ook bij deze driedimensionale plot zijn de gelijkenissen herkenbaar maar is er ook nog een duidelijk verschil waarneembaar. De verklaring hiervoor ligt echter bij het beperkt aantal meetresultaten alsook bij de werkwijze van elk statistisch model. De weergave van het zwart geprint materiaal is opvallend, deze vertoont een afwijkend

verloop. Hierbij neemt de treksterkte toe met afnemende voortloopsnelheid, het tegenovergestelde wat eerder altijd werd waargenomen. Uiteraard moet niet enkel gekeken worden naar het hoogste resultaat van treksterkte, maar ook naar een goed lasuiterlijk. Dit gebeurt via het aftoetsen van verschillende mogelijke laserinstellingen met aansluitend een visuele controle.



Afbeelding 78: Driedimensionale plot van de voorspelde treksterkte voor elke materiaalcombinatie met het Neural Network (links) en het Prediction Tree (rechts) in functie van het laservermogen en de voortloopsnelheid.

(Brook, 2010) (Goos & Bradley, 2011) (Minitab, 2016) (Verheyen, 2016-2017)

11.6 Verklaring voor het verhoogde vermogen

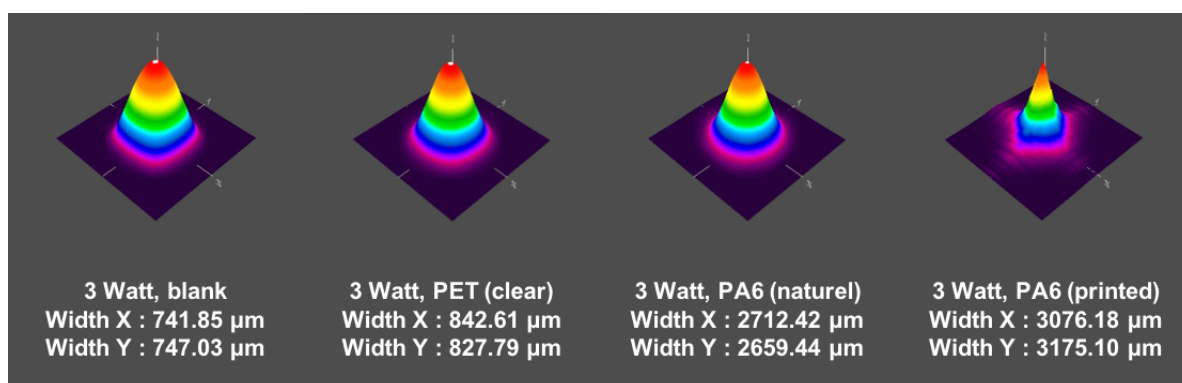
Een diodelaser heeft een Gaussisch bundelprofiel. Het is vergelijkbaar met de klokvorm bij een normaalverdeling uit de statistiek. Bij dit soort bundelprofielen wordt de bundeldiameter w gedefinieerd als $1/e^2$ -diameter. Dit is de diameter waarbij de energie-intensiteit gezakt is tot $1/e^2$ (ca. 13.5 %) van de energie-intensiteit in het midden van de bundel. (RP Photonics Consulting GmbH, 2007)

Opmerkelijk is het hoger vermogen dat nodig is voor het lassen van geprint materiaal. Een verklaring voor dit fenomeen is gevonden door de vorm en de grootte van de laserbundel op te meten nadat de laserbundel doorheen het materiaal ging. Afbeelding 79 toont van links naar rechts de oorspronkelijke laserbundel (Gaussisch bundelprofiel), vervolgens de laserbundel die door PET is gegaan, de laserbundel doorheen natuurlijk polyamide en tot slot de laserbundel doorheen geprint polyamide. De meting is telkens gebeurt bij een vermogen van 3 watt. Onder elke driedimensionale voorstelling is ook de breedte van de laserbundel weergegeven in X- en Y-richting. PET beïnvloedt de laserbundel slechts beperkt. De vorm is meer afgerond en de breedte in X- en Y-richting nemen met ruwweg 10 % toe. Wanneer de laserbundel doorheen natuurlijk PA6 gaat, blijft nu de vorm van de laserbundel onveranderd maar neemt de breedte in beide richtingen toe met ongeveer 360 %. Tot slot is ook nagegaan wat er gebeurt als de laserbundel doorheen geprint PA6 gaat. Hierbij is het profiel van de laserbundel sterk vervormt. Het meest opvallende hierbij is dat

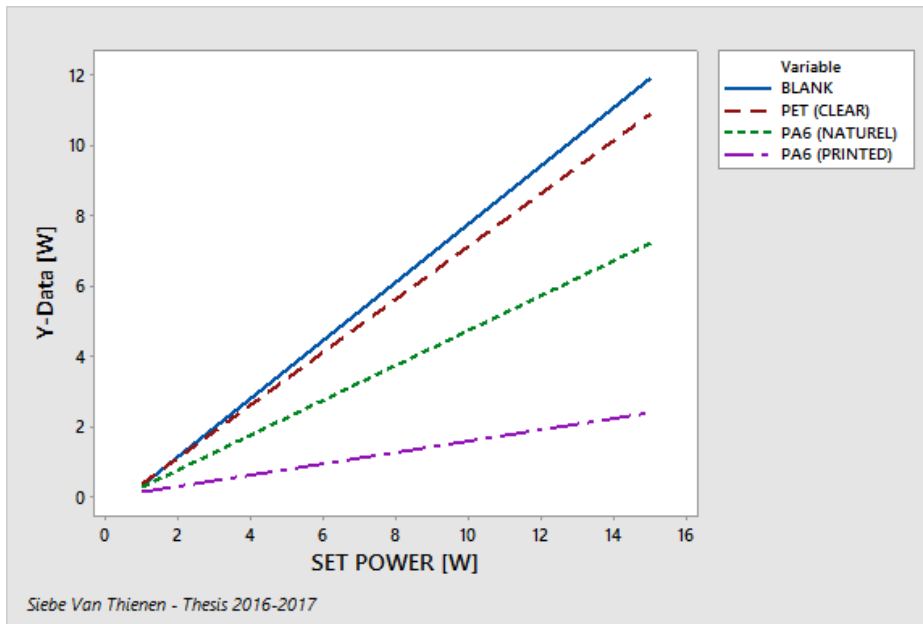
de kegelvorm verdwijnt. In de X- en Y-richting zijn er merkelijk afbuigingen van de laserbundel. Dit is de richting waarin de verschillende lagen bij het printen zijn georiënteerd. De dimensies in X- en Y-richting nemen ongeveer met 420 % toe.

Doordat de laserbundel zo sterk varieert in afmetingen, wijzigt ook de energiedensiteit. Door de afnemende energiedensiteit, zal ook de opgewekte warmte in het zwarte, absorberende materiaal dalen. Om dezelfde hoeveelheid warmte te ontwikkelen, is dus een hoger vermogen vereist van de initiële laserbundel. Een verdubbeling van de diameter resulteert in een afname van de energiedensiteit met een factor vier, bij een constant vermogen. Een bijkomstige opmerking, de keuze van het transparante materiaal bepaalt deels de breedte van de bekomen las door de respectievelijke breedte van het profiel van de laserbundel.

Afbeelding 80 toont het vermogen van de laserbundel opgemeten na het passeren van een kunststof. In de horizontale as is het vermogen uitgezet dat is ingesteld op de laser. Op de verticale as is het vermogen weergegeven per kunststof. Wanneer het vergelijk gemaakt wordt met het vermogen van de initiële laserbundel en de laserbundel na het passeren van de kunststoffen, is het resultaat dat het vermogen afneemt met ongeveer: 10 % bij PET, 40 % bij polyamide in plaatvorm en 80 % bij polyamide in geprinte toestand. Het dalende vermogen kan worden verklaard door het reflecteren en absorberen van het vermogen door de respectievelijke kunststof. Algemeen wordt verondersteld dat reflectie een grootteorde van 5 tot 15 % van het vermogen inneemt. Het geprint materiaal vertoont de grootste afname in vermogen. Een mogelijke verklaring hiervoor is de combinatie van reflectie, absorptie en diffuse verspreiding door de geprinte textuur.



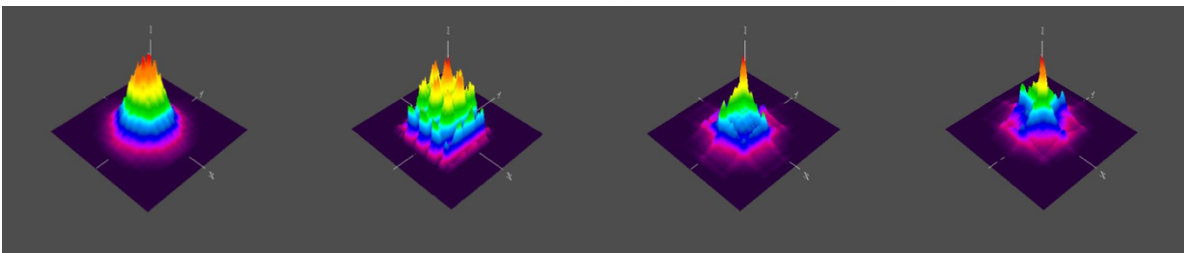
Afbeelding 79: Driedimensionale weergave van de laserbundel van de zuivere laserbundel en doorheen transparante PET, natuurlijk PA6 en geprint PA6 [Meetapparatuur: NanoScan Photon NS2-PYR0/9/5-STD].



Afbeelding 80: Vermogencurves opgemeten zonder kunststof, met transparante PET, PA6 (naturel) in plaatvorm en in geprinte vorm (Meetapparatuur: Ophir, NOVA).

11.7 Afwijking van de laserbundel door PWM-sturing

Bij het in kaart brengen van de laserbundel is er een effect aan het licht gekomen dat plaatsvindt wanneer de laser wordt gestuurd door de Arduino. Afbeelding 81 geeft enkele afwijkende laserbundels weer, afkomstig door de PWM-sturing. Doordat een Arduino enkel 0 of 5 V kan plaatsen op zijn uitgang, kan via PWM eender welke spanning bekomen worden door 5 V in blokvorm op de uitgang te plaatsen. Een nadeel hiervan is dat de laser niet meer continue werkt, maar eerder gepulst. Dit vormt bij het lassen van kunststof niet meteen een probleem omwille van de thermische inertie van de kunststof. Echter kan dit wel problemen vormen wanneer materialen met een hoge thermische geleidbaarheid worden gebruikt. Hierdoor ontstaan fluctuaties in de temperatuur. Dit moet in het achterhoofd gehouden worden bij verdere onderzoeken.



Afbeelding 81. Afwijkingen van driedimensionale vorm van de laserbundel door de PWM-sturing van de Arduino.

12 TOEPASSING VOOR DE INDUSTRIE

In dit hoofdstuk wordt alle kennis van het onderzoek toegepast op één praktische toepassing. Dit voorbeeld kan tevens dienen als demonstratiesample voor het laserlabo om aan mogelijk potentiële klanten aan te tonen dat de techniek beheerst wordt. Het ontwerp van het demosample verwijst meteen naar het symbool voor lasers.

12.1 Ontwerp

De demonstratiesample – afgebeeld op Afbeelding 82 - bestaat uit een geprinte nylon (Polyamide of PA6) die de complexe structuur bevat. Vervolgens wordt hierop een transparante PET met een gelijke buitencontour op aangebracht. Merk op dat er nu sprake is van een heterogene verbinding. Eerder in dit onderzoek was er altijd sprake van een verbinding homogene verbinding (verbinding van tweemaal hetzelfde basismateriaal). Met behulp van een CAD-systeem is de contour gegenereerd die de laser moet beschrijven. In de tooling worden beide onderdelen aangebracht en met de nodige aandrukkracht tegen elkaar gedruwd. Belangrijk is een goed uitlijnen van beide onderdelen. Indien de lasercontour niet samenvalt met de geprinte contour, zal de correcte verbinding niet tot stand komen. Hiervoor is gebruik gemaakt van een andere CNC-sturing. Daarbij gebeurt de inklemming van beide kunststoffen op een draaitafel zodat de uitlijning met een microregeling kan gebeuren.



Afbeelding 82: Praktische toepassing van TTLW met een geprint nylon en een transparante PET in het CAD-pakket (links) en het werkelijke resultaat na het lassen (rechts).

12.2 Implementatie van de technologie in een praktische toepassing

Met Additive Manufacturing is het zwarte onderdeel geprint. Hiermee wordt aangetoond dat complexe componenten eenvoudig en snel met (bijvoorbeeld) een 3D-printer kunnen worden geproduceerd. De eenvoudige transparante component – in deze implementatie een driehoekige vorm - wordt met de conventionele productiemethodes tot stand gebracht. Deze implementatie bevat alle technieken gecombineerd in een praktische toepassing. Afbeelding 82 (links) toont het eindresultaat van de geprinte component uit de 3D-printer gelast op een geëxtrudeerde PET kunststofplaat.

BESLUIT VAN DE THESIS

Door dit onderzoek zijn nu de belangrijkste kritische parameters van het laserlassen van 3D-geprinte kunststoffen - specifiek voor overlapverbindingen - in kaart gebracht. Er is onderzocht wat de kenmerkende parameters zijn voor het optimaliseren van de treksterkte.

Dit onderzoek toont aan dat bij het lastransmissielassen het invallende vermogen op de zwarte, absorberende kunststof belangrijk is. Om de temperatuur van de kunststof binnen aanvaardbare grenzen te houden, is een lasersturing uitgewerkt die een ingestelde temperatuur waarborgt door het laservermogen continu bij te regelen. Voor het voortdurend opmeten van de temperatuur is gebruik gemaakt van een pyrometer, een contactloze temperatuurmeter. Voor een nauwkeurige positionering van de pyrometer is een tooling ontworpen. De gebruikte pyrometer heeft als nadeel niet door glas te kunnen meten, hierdoor is de pyrometer maar beperkt gebruikt in dit onderzoek. Het is mogelijk om met diezelfde lasersturing een constant laservermogen te genereren voor het lassen van identieke testsamples.

Voor een stabiele, robuuste uitvoering van het lasproces is een universele tooling ontworpen voor het goed inklemmen van de testsamples. Het universele karakter is gewaarborgd doordat slechts één component moet worden vernieuwd bij een nieuw type testsample.

Eenmaal het lasproces voldoende onder controle is, is met *Design of Experiments* de invloed van alle procesparameters nagegaan, alsook de interactie tussen alle procesparameters. Dit onderzoek toont voornamelijk aan dat het laservermogen, de voortloopsnelheid en een interactie tussen beide de belangrijkste kritische parameters zijn. Verder zijn de aandrukkracht en de focusafstand optimaal gekozen voor de kleinst mogelijke spreiding.

Nadat de kritische parameters gekend zijn, is de testdata doorheen verschillende statistische modellen gehaald. Na een grondige analyse bleek dat *Random Forest*, *Neural Network* en *Prediction Tree* de meest passende voorspelling geven voor de treksterkte. Elk model heeft voor alle mogelijke lasparameters de treksterkte voorspeld. Door deze gegenereerde voorspellingen grafisch weer te geven, is het optimum zichtbaar. Dit optimum blijkt steeds te liggen bij een hoog laservermogen en een lage voortloopsnelheid. Een combinatie van een hoge treksterkte met een visueel goed uiterlijk bepalen in dit onderzoek een kwalitatieve overlapverbinding. Als later het optimum gezocht moet worden voor andere kunststoffen, volstaat het invoeren van de nodige testdata om het bijhorende optimum te bepalen.

Enkele belangrijke bevindingen in dit onderzoek zijn:

- de aandrukkracht is liefst voldoende hoog voor een gunstige spreiding, ook de aandruktijd mag niet te klein zijn. De kunststof moet voldoende zijn afgekoeld,
- een kleinere spotgrootte heeft een kleinere spreiding in treksterkte tot gevolg,
- Zowel het bundelprofiel als de breedte van de bundel nemen toe wanneer een geprint kunststof wordt gebruikt,
- een geprint kunststof vereist drie keer meer vermogen voor een lasverbinding dan een conventioneel geëxtrudeerde kunststof,
- een lasverbinding tussen geëxtrudeerde plaatmateriaal heeft nog steeds de hoogste treksterkte,
- als één component geprint moet worden, krijgt de zwarte, absorberende de voorkeur omdat deze resulteert in de hoogste treksterkte.

Alle kennis is op het einde van het onderzoek gebundeld voor een implementatie van de technologie. Deze toepassing combineert de technieken waarvoor het laserlassen van 3D-

geprinte kunststof een voordeel biedt. Een complexe vorm – geproduceerd via *Additive Manufacturing* – die verbonden wordt met een eenvoudige conventionele geëxtrudeerde plaat.

BIBLIOGRAFIE

allthat3d. (2016). *3D Printer Filament Types Guide of 2016*. Opgeroepen op Oktober 31, 2016, van allthat3d: <https://www.allthat3d.com/3d-printer-filament/>

Arduino. (sd). *Getting Started with the Arduino TFT Screen* . Opgeroepen op Februari 15, 2017, van Arduino: <https://www.arduino.cc/en/Guide/TFT>

Arduino. (sd). *TFT Library*. Opgeroepen op Februari 16, 2017, van Arduino: <https://www.arduino.cc/en/Reference/TFTLibrary>

B.V., U. (2016). *Ultimaker Materials*. Opgeroepen op November 15, 2016, van Ultimaker: <https://ultimaker.com/en/products/materials>

Baesens, B. (2014). Analytics in a big data world. In B. Baesens, *The Essential Guide to Data Science and its Applications* (p. 256). John Wiley & Sons.

Baesens, B., Van Vlasselaer, V., & Verbeke, W. (2015). *Fraud Analytics, Using descriptive and social network techniques*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.

Baeten, J. Automatisering: Regeltechniek. In J. Baeten, *Hoofdstuk 7 : De klassieke regelaars* (pp. 1-17). Leuven: KU Leuven.

Beauregard, B. (2011, April 15). *Improving the Beginner's PID – Sample Time* . Opgeroepen op Februari 20, 2017, van Project Blog: <http://brettbeauregard.com/blog/2011/04/improving-the-beginner's-pid-sample-time/>

Beauregard, B. (2016, december 19). *PID library - the basics*. Opgehaald van Arduino Playground : <http://playground.arduino.cc/Code/PIDLibrary>

Brook, Q. (2010). In Q. Brook, *Lean Six Sigma & The complete Toolbox Guide for all Lean Six Sigma Practitioners* (Third Edition ed., pp. 191-211). Hampshire, United Kingdom: Opex Resources LTD.

Comnes, B., & La Rosa, A. (2013). *Arduino PID Example Lab*. Portland: Portland State University.

GmbH, O. (2013). *Operators Manual*. Berlijn: Optris GmbH.

Goos, P., & Bradley, J. (2011). In *Optimal Design of Experiments - A Case Study Approach*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.

Huysman, P. (2016, September 18). Laserlabs Philips Lighting krijgen doorstart als Absolom ProLab. *Made in Kempen* .

Infraroodexpert. Principe van Infraroodverwarming . *Toepassing : Principe van Infraroodverwarming* . Infraroodexpert, Antwerpen, België.

Janis Research Company. (2016). *Window Transmission Curves*. Opgeroepen op November 4, 2016, van Janis: <http://www.janis.com/Products/AccessoriesandAncillaryEquipment/WindowTransmissionCurves.aspx>

Keller HCW, G. (2001-2016). *Principles of Non-Contact Temperature Measurement*. Opgeroepen op Oktober 19, 2016, van Keller MSR: <http://www.keller-msr.com/application/principles-infrared-temperature-measurement.php>

LPKF, Laser & Electronics. (2016). *Laser Plastic Welding - Design Guidelines Manual, Version 4.0*. Tualatin: LPKF Laser & Electronics.

Minitab. (2016). *Getting started with Minitab 17*. Opgeroepen op Februari 27, 2017, van Minitab 17: https://www.minitab.com/uploadedFiles/Documents/getting-started/Minitab17_GettingStarted-en.pdf

National Instruments Corporation. (2014). *How Do I Convert PID Parameters From Gain to Time?* Opgeroepen op Februari 20, 2017, van National Instruments: <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/6E76EC47B831FAED86256E4E007347DC>

Optris GmbH. (2015). *Applications*. Opgeroepen op Oktober 21, 2016, van Optris - Infrared thermometers: http://www.optris.com/applications?file=tl_files/pdf/Downloads/Zubehoer/IR-Basics.pdf

Optris. (sd). *Innovative Infrared Technology*. Opgeroepen op Oktober 19, 2016, van Infrared Basics, Basis Principles of non-contact temperature measurements: http://www.optris.com/applications?file=tl_files/pdf/Downloads/Zubehoer/IR-Basics.pdf.

Optris. (2016). *Operators Manual*. Optris - Infrared Thermometers.

Prof. dr. ir. van Waterschoot, T. (sd). *Meet- en regeltechniek | Les 7 : De klassieke regelaars*. Opgeroepen op Februari 2017, 2017, van Esat: http://homes.esat.kuleuven.be/~tvanwate/courses/mr/1415/MR_slides_07_klassieke_regelaars.pdf

RP Photonics Consulting GmbH. (2007, 07 11). *Beam Radius*. Opgeroepen op 05 19, 2017, van RP Photonics Encyclopedia: https://www.rp-photonics.com/beam_radius.html

Ultimaker. (2017). *Technical data sheet Nylon*. Ultimaker.

Van Mol, R. (2015). Additive manufacturing. In R. Van Mol, *Materiaaltechnologie deel II* (pp. 2-4). Geel, België.

Verheyen, J. (2016-2017). Onderzoeksmethodologie Design of Experiments [DOE]. In J. Verheyen. Sint-Katelijne-Waver, België: Technologicampus De Nayer.

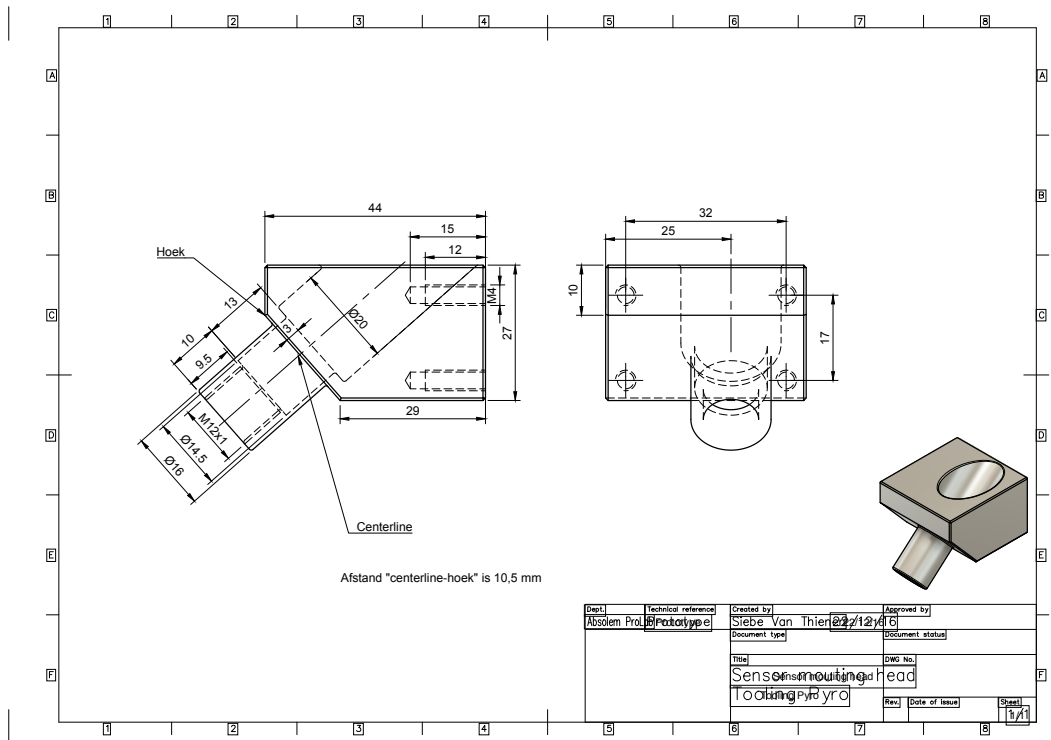
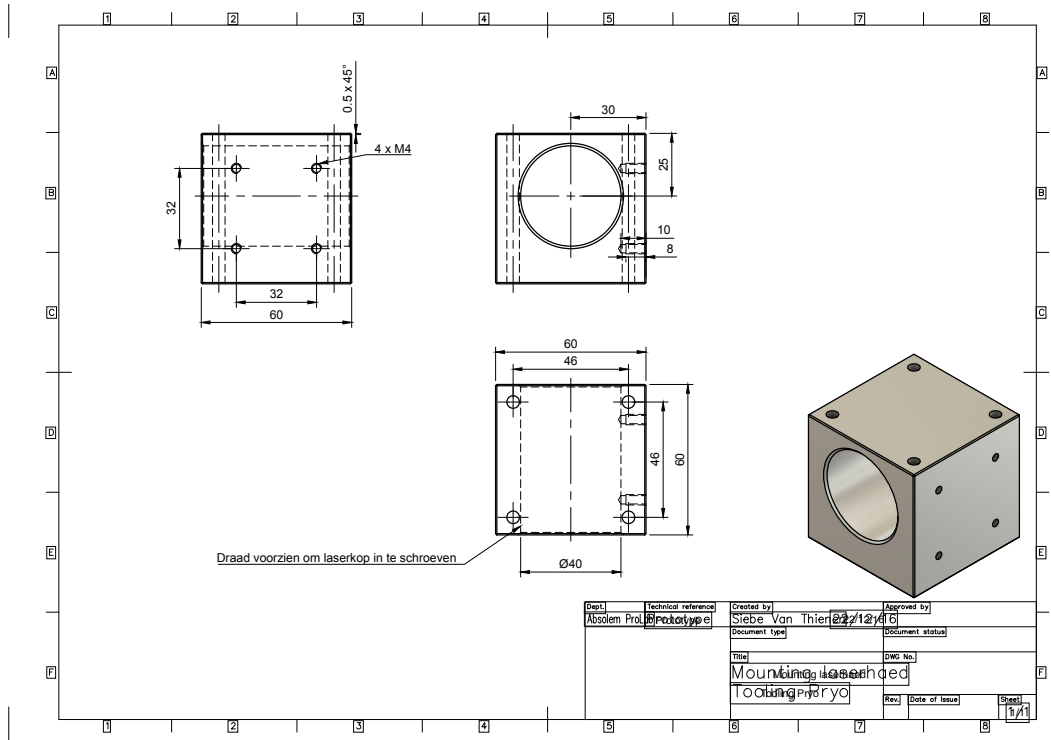
VINK NV. (2001). *Kunststofposter NL*. Vink NV.

BIJLAGE 1: ONTWERPTEKENING TOOLING PYROMETER

Parts List				
Item	Qty	Part Number	Description	Material
1	1	Baseplate v1		Aluminum
2	1	Mounting laserhaed v6		Aluminum
3	1	Left Plate 2.0 v22		Aluminum
4	1	Newport M-DS40 series XY v1		Steel
5	1	Laserhead v14		Aluminum
6	1	Sensing Head v5		Aluminum
7	1	Sensor mouting head version 2 v19		Aluminum

Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
Assolem Pro.	Prototyppe	Siebe Van Thier	22/12/16
		Document type	Document status
		Title	DWG No.
		TOOLING- PYRO OPTICS CT-122	
		Rev.	Date of issue
			Sheet
			1/1

Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
Assolem Pro.	Prototyppe	Siebe Van Thier	22/12/16
		Document type	Document status
		Title	DWG No.
		Left Plate	
		Tooling Pyro	
		Rev.	Date of issue
			Sheet
			1/1

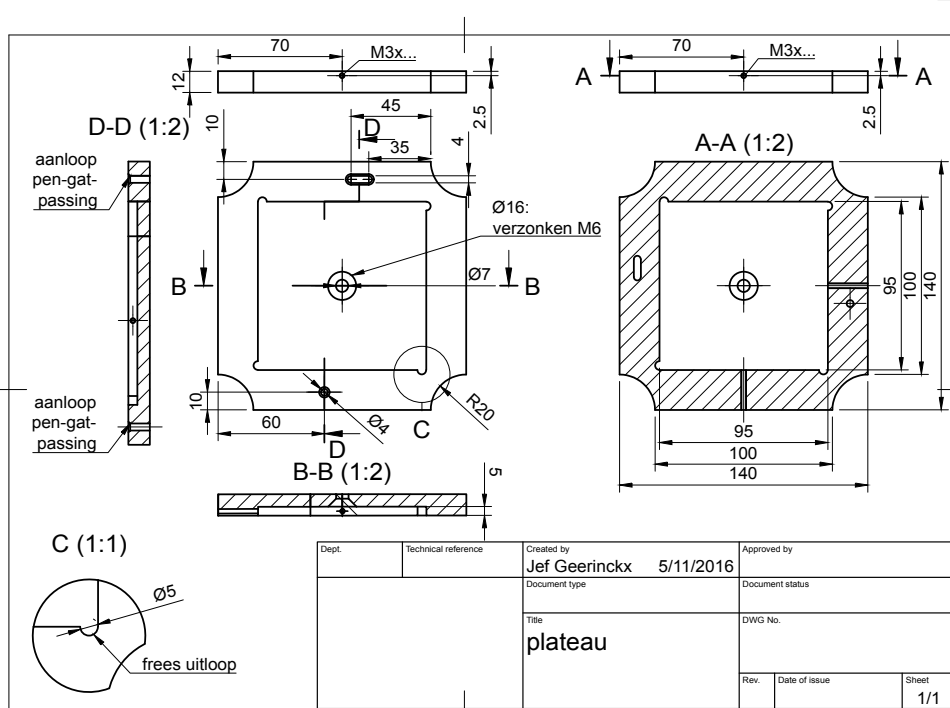
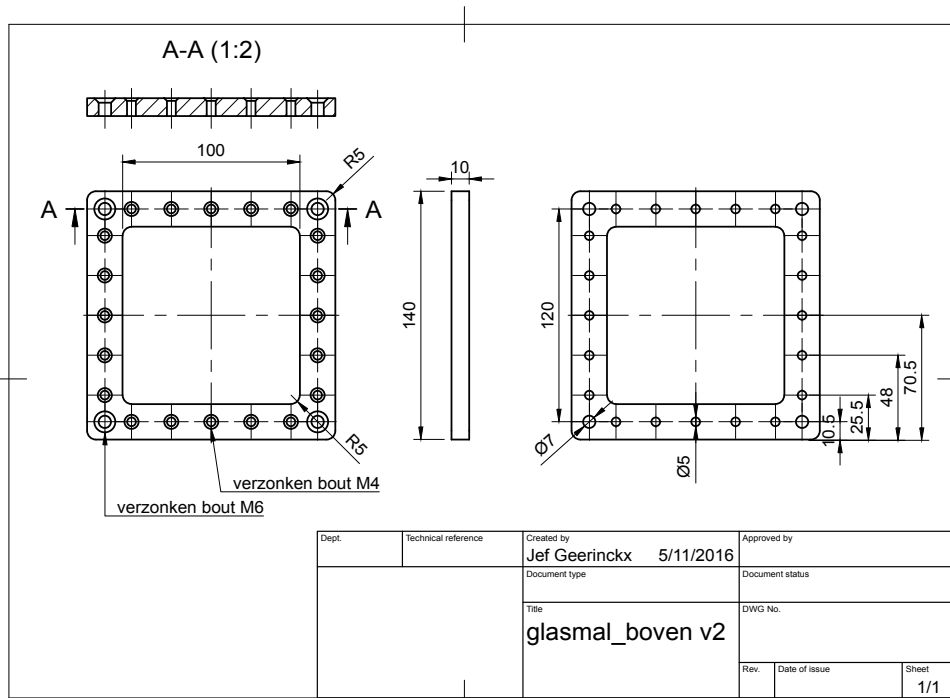


BIJLAGE 2: ONTWERPTEKENING TOOLING LASERLASSEN

6	1	Tooling_glas v8		
5	4	Geleidingskolom v9		Steel
4	1	Plateau v4 v16		Steel
3	1	2061_FK-M6 v3		Steel
2	1	156543_ADVU-40-20-P-A v4		Steel
1	1	Baseplate tooling v9		Aluminium

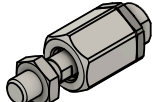
Item	Qty	Part Number	Description	Material
Parts List				
Dept.	Technical reference	Created by	Approved by	
		Siebe Van Thienen 16/11/16		
		Document type	Document status	
		Title	DWG No.	
		Assembly small cilinder		
		Rev.	Date of issue	Sheet
				1/1

Dept.	Technical reference	Created by	Approved by	
		Jef Geerinckx 5/11/2016		
		Document type	Document status	
		Title	DWG No.	
		glasmaal_onder		
		Rev.	Date of issue	Sheet
				1/1



Bus mag verwijderd worden. Enkelhet binnendeel nodig. Rechtstreeks monteren op de plateau

M8 aanpassen naar M6

Dept.	Technical reference	Created by Siebe Van Thienen 14/11/16	Approved by
		Document type	Document status
		Title FK-M8 self-aligning rod coupler	DWG No.
		Rev.	Date of issue
			Sheet 1/1

M6

A (2:1)

20

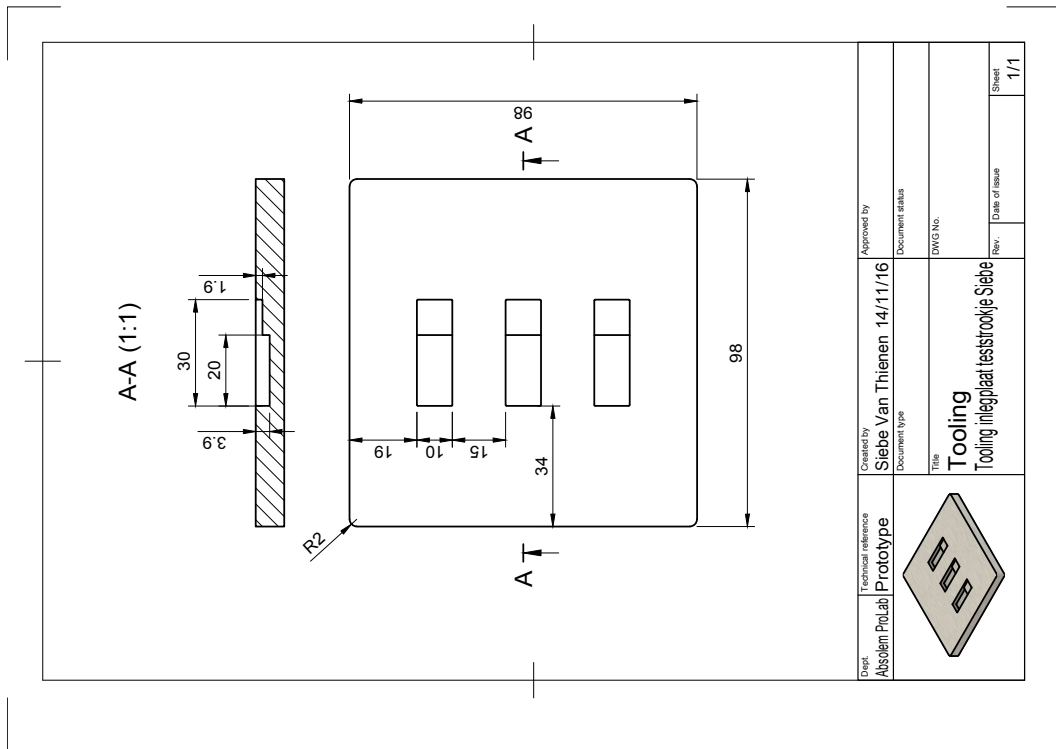
2 x 45°

A

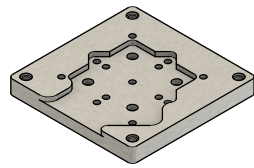
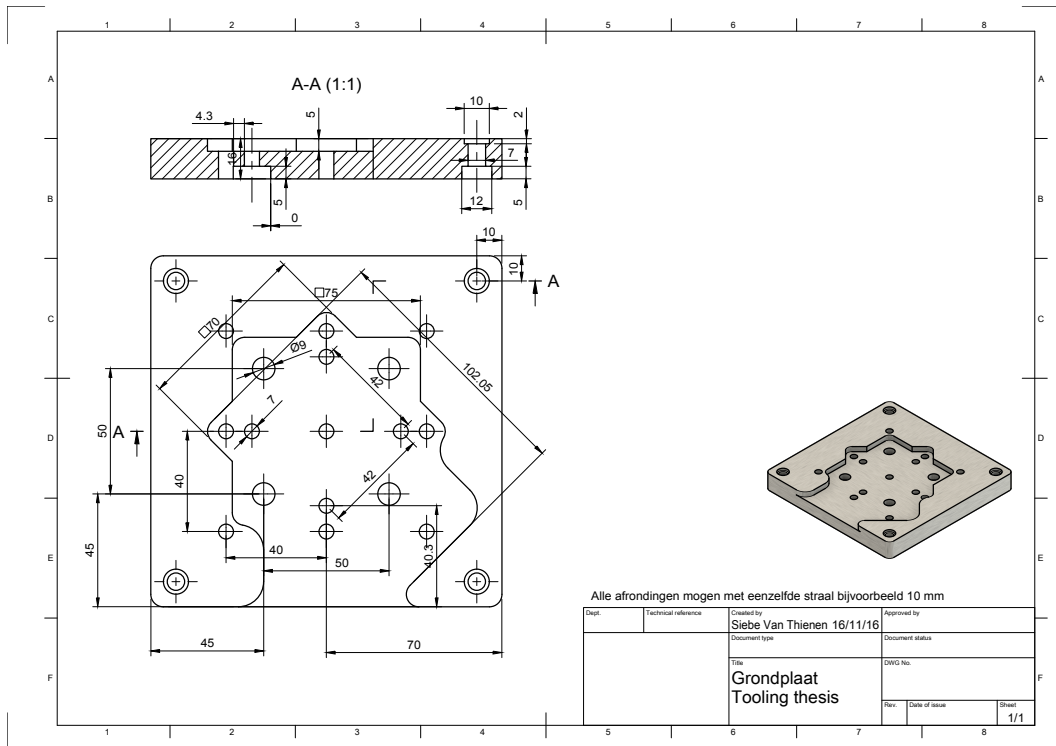
141

10

Dept. Absolam ProLab	Technical reference	Created by Siebe Van Thienen 6/11/16	Approved by
		Document type Prototype	Document status
		Title Geleidingskolom Tooling kunststoflassen	DWG No.
		Rev.	Date of issue
			Sheet 1/1



Dept. Absolom Polylab	Technical reference Prototype	Created by Siebe Van Thienen 14/11/16	Approved by	Document status	DWG No.	Date of issue	Sheet
							1/1
		Title Tooling Tooling inlegplaat teststrookje Siebe					
		Rev.	Date of issue				



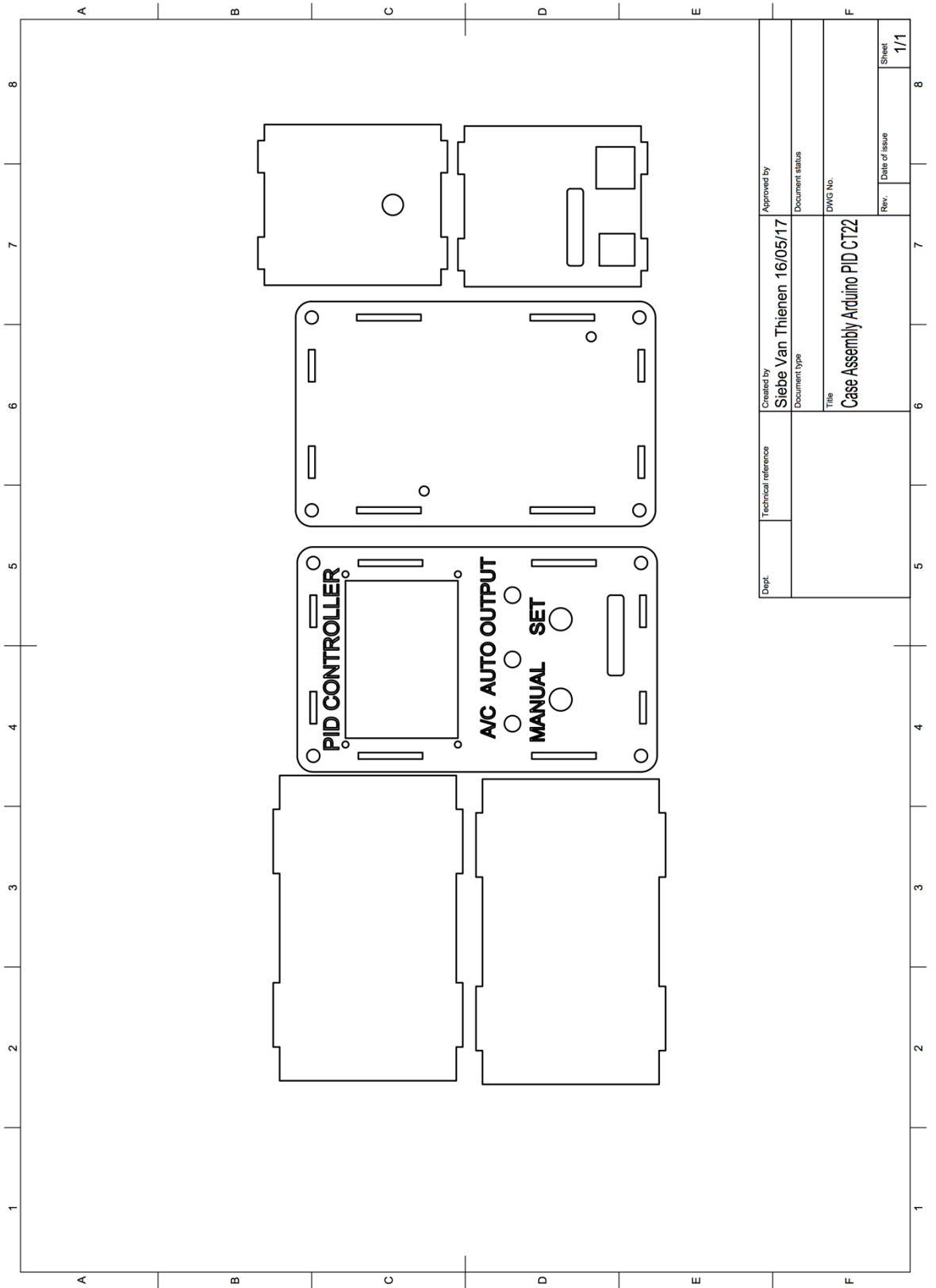
Alle afrondingen mogen met eenzelfde straal bijvoorbeeld 10 mm

Dept.	Technical reference	Created by Siebe Van Thienen 16/11/16	Approved by
Title Grondplaat Tooling thesis		DWG No.	Date of issue
			Sheet 1/1

BIJLAGE 3: SPECIFICATIES ROFIN DILAS 30 WATT

TECHNICAL DATA - ROFIN DILAS 30 Watt		
Optical output power	P_{opt}	30 W
Guaranteed		0 – 30 W
Range		$\pm 2 \%$
Stability		
Wave Length	λ	808 nm \pm 10 nm
Fiber Connection		HP-SMA 905 For fiber with three standing fiber tips
Fiber	\emptyset	$\geq 400 \mu\text{m}$
	N.A.	0.22
Processing optics		
Focal lengths	f	100 mm
Spot size	\emptyset	0.6 mm
Working distance	@	92 mm
Operating voltage	U	240 V $\pm 10 \%$
Frequency	F	50/60 Hz
Power consumption	S	500 V
Dimensions (W x D x H)	19°-industrial standard housings	
DF x03	450 mm x 440 mm x 3HE (~ 150 mm)	
CS241	450 mm x 440 mm x 3HE (~ 100 mm)	

BIJLAGE 5: ONTWERPTEKENING CASE ARDUINO



FACULTEIT INDUSTRIËLE INGENIEURSWETENSCHAPPEN
TECHNOLOGIECAMPUS DE NAYER
Jan De Nayerlaan 5
2860 SINT-KATELIJNE-WAVER, België
tel. + 32 15 31 69 44
iiw.denayer@kuleuven.be
iiw.kuleuven.be



LID VAN **ASSOCIATIE
KU LEUVEN**