

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:
elektromechanica

Masterthesis

Ontwerp en massaproductie van modulaire paneelstructuren voor effectieve trillingsreductie door middel van spuitgieten

Jochen Bikkembergs
Marnick De Vloo

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

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Elke DECKERS

BEGELEIDER :

ing. Kristof STEIJVERS

ir. Stefan JANSSEN

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen | Agoralaan Gebouw H - Gebouw B | BE 3590 Diepenbeek

Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Agoralaan Gebouw D | BE 3590 Diepenbeek
Universiteit Hasselt | Campus Hasselt | Martelarenlaan 42 | BE 3500 Hasselt



2023
2024

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:
elektromechanica

Masterthesis

Ontwerp en massaproductie van modulaire paneelstructuren voor effectieve trillingsreductie door middel van spuitgieten

Jochen Bikkembergs
Marnick De Vloo

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

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Elke DECKERS

BEGELEIDER :

ing. Kristof STEIJVERS

ir. Stefan JANSSEN



KU LEUVEN

Woord vooraf

Wij hebben de mogelijkheid gekregen om onze masterproef uit te voeren bij de onderzoeksgroep PPE (Polymer Processing and Engineering) van de KU Leuven, gevestigd in het technologiecentrum in Diepenbeek. Het uitvoeren van deze masterproef is een boeiend en uitdagend onderzoek geweest, waarbij we ons hebben verdiept in het ontwerpen van modulaire paneelstructuren voor effectieve trillingsreductie. Onze motivatie van de keuze van deze masterproef kwam voort uit onze interesse in het dempen van geluid en trillingen en het mogelijke potentieel dat deze masterproef kan bieden in onderzoek en industrie.

Het is een waar genoegen geweest om onze eigen kennis en inzichten te delen over dit onderwerp, dat ons gedurende onze studieperiode heeft gefascineerd. We willen graag onze oprechte dank uitspreken aan onze promotor Elke Deckers en dagelijkse begeleiders Stefan Janssen en Kristof Steijvers voor hun voortdurende begeleiding, aanmoediging en constructieve feedback gedurende het hele onderzoeksproces. Hun expertise en toewijding hebben een onschatbare bijdrage geleverd aan de ontwikkeling van deze masterproef. Verder willen we Simon-Pierre Verpoort bedanken voor het advies en het maken van de matrijsinserts in een kort tijdsbestek. Ten slotte willen wij onze familie en vrienden bedanken voor de steun en raad die zij hebben gegeven gedurende de thesis en de studies.

Inhoudsopgave

Woord vooraf	1
Lijst met tabellen	7
Lijst met figuren	10
Verklarende woordenlijst	11
Abstract	13
Abstract in English	15
1 Inleiding	17
1.1 Situering	17
1.2 Probleemstelling	18
1.3 Doelstellingen	19
1.4 Methode	19
1.5 Thesis vooruitblik	20
2 Bronnenstudie	21
2.1 LRM-structuren	21
2.2 Spuitgieten	23
2.2.1 Spuitgietmachine	24
2.2.2 Spuitgietproces	25
2.2.3 Procesparameters	26
2.2.4 Ontwerpregels voor het spuitgieten	27
2.3 Soorten polymeren	27
2.3.1 Thermoplasten polymeren	28
2.3.2 Thermohardende polymeren	29
2.3.3 Selectie polymeren	29
2.4 Soorten verbindingmechanismen	30
2.4.1 Klikverbindingen	30
2.4.2 Schroefverbindingen	32
2.4.3 Lasverbindingen	37
3 Ontwikkeling prototypes	39
3.1 Designvereisten	39
3.2 Conceptkeuze	40

3.2.1	Materiaal eisen klikverbinding	41
3.2.2	Materiaal eisen LRM-structuur	42
3.3	Ontwerpen van prototypes	43
3.3.1	Ontwerpspecificaties cantilever-klikverbinding	43
3.3.2	Ontwerpspecificaties ringvormige klikverbindingen	44
3.4	Ontwikkelde prototypes	45
3.4.1	Enkele cantilever	46
3.4.2	Dubbele cantilever	46
3.4.3	Cilindrische fit	47
3.5	Productie van prototypes	48
3.5.1	FDM karakteristieken eindproduct	48
3.5.2	FDM procesparameters	48
3.5.3	FDM richtlijnen voor printen met ABS	49
3.5.4	FDM productiefouten	50
4	Trillingskarakterisatie	53
4.1	Dynamische Vereisten	53
4.2	Simulaties op het trillingsgedrag	54
4.2.1	Gesimuleerde eigenfrequenties en modevormen	56
4.3	Testopstelling	58
4.4	Meetprocedure	60
4.5	Meetresultaten	61
4.5.1	Vergelijking tussen modulaire panelen en volle equivalente balk	61
4.5.2	Lineariteit	62
4.5.3	Invloed van het losklikken	64
4.5.4	Invloed van de volgorde van de panelen	68
4.6	Conclusie meetresultaten	70
5	Matrijsontwerp	71
5.1	Ontwerpaanpassingen voor het spuitgieten	71
5.2	Matrijsinsertontwerp	72
5.2.1	Cilindrische fit	73
5.2.2	Aanspuiting cilindrische fit	77
5.2.3	Dimensionering ondersnijdings sleuf en bolveren	83
5.2.4	positionering van uitwerppennen	86
5.2.5	Positionering ontluchting	86
5.2.6	Finale matrijsinsert cilindrisch fit	87
5.2.7	Enkele cantilever	89
5.3	Gerealiseerde matrijsinsert cilindrisch fit en spuitgietproduct	90
6	Conclusie en suggesties voor toekomstig onderzoek	93
6.1	Conclusie	93
6.2	Suggesties voor toekomstig onderzoek	94
	Literatuurlijst	100
A	Bijlage - Trillingkaraterisatieproeven lineariteit	101

A.1	Testresultaat enkele cantilever	101
A.2	Testresultaat dubbele cantilever	102
B	Bijlage - Trillingkaraterisatieproeven demontage	103
B.1	Testresultaat enkele cantilever	103
B.2	Testresultaat dubbele cantilever	104
B.3	Testresultaat cilindrische fit	104
C	Bijlage - Trillingkaraterisatieproeven volgorde	105
C.1	Testresultaat enkele cantilever	105
C.2	Testresultaat cilindrische fit	106
D	Bijlage - Datasheet ABS	107

Lijst van tabellen

3.1	Conclusie soorten verbindingen	40
3.2	Legende van tabel 3.3	40
3.3	Vergelijking aspecten polymeren	41
3.4	Vergelijking aspecten kunststoffen voor LRM-structuur	42
3.5	Gebruikte FDM procesparameters voor het printen van ABS	49
4.1	Gesimuleerde eigenfrequenties enkele cantilever	56
4.2	Lineariteit op basis van excitatienivaus 1V en 3V ter hoogte van mode 2	64
4.3	Maximale gemeten variaties in frequentie en amplitude van mode 2 tussen het 0 keer, 1 keer, 2 keer demonteren	66
4.4	Invloed van herhaaldelijke (her)montage van de cilindrische fit tussen 1 en 15 keer te demonteren ter hoogte van mode 1,2 en 3	67
4.5	Invloed van volgorde ter hoogte van mode 2	69
5.1	Simulatieresultaten voor de vullingstijd, maximale caviteitsdruk en spuitietvolume	81
5.2	Procesparameters voor het spuitgieten van de cilindrische fit	90

Lijst van figuren

1.1	Metamateriaal bestaand uit een basisplaat met resonatoren	17
2.1	Eerste zes modevormen van een ingeklemde balk met een centraal gaten patroon .	22
2.2	Stopbandeffect door metamaterialen	23
2.3	Positie resonatoren op subgolflengte	23
2.4	Schematische weergaven spuitgietmachine	24
2.5	Vereenvoudigde weergave injectie-eenheid	24
2.6	Flash spuitgietfout	26
2.7	Polymeerdriehoek classificeert thermoplasten op basis van ketenstructuur, eigen- schappen en kost	29
2.8	Cantilever-klikverbinding fasen (a) intrede, (b) buiging, (c) klemming	30
2.9	Ringvormige klikverbinding	31
2.10	Persverbinding	32
2.11	Vervorming van kunststof rond schroefdraad bij draadvormende schroeven	33
2.12	Draadvormende schroeven	33
2.13	Draadsnijdende schroeven	34
2.14	Ultrasonen, press-in, mold-in en helical coil schroefdraadbussen	34
2.15	Lijmverbindingen belast door trekkrachten, afschuifkrachten, splitsingskrachten en aftrekkkrachten	35
2.16	Vier verschillende ontwerpen van lijmverbindingen	36
3.1	Dimensionering cantilever	43
3.2	Hellingshoeken van de cantilever	44
3.3	Zijaanzicht van de cilindrische fit met links het cilindrisch lichaam dat in de bij- horende bekken rechts vastklikt	44
3.4	Verband tussen dimensionering en krachtenwerking van de cilindrische fit	45
3.5	CAD-model van het enkele cantilever concept.	46
3.6	CAD-model van het dubbele cantilever concept.	46
3.7	CAD-model van het concept met cilindrische fit	47
3.8	2D-tekening van de cilindrische bekken van de cilindrische fit met aanduiding . . .	47
3.9	Parameterbruggen voor de procesparameters van FDM	49
3.10	Printfout kromtrekken	50
3.11	Printfout stringing	51
4.1	Simulatie model modulaire panelen	54
4.2	Convergentie curve van de maximale uitwijking en eigenfrequentie van mode 4 . .	55
4.3	Weergave van de eigenmodes balkstructuur tot 800 Hz	56

4.4	Gesimuleerde FRF van de enkele cantilever met Siemens NX	57
4.5	Testopstelling dynamische proeven	58
4.6	Testopstelling met de shaker en balkstructuur van de enkele cantilever	59
4.7	Testopstelling van de shaker uitgerust met de impedantiesensor	59
4.8	Testresultaat equivalente volle balk van de enkele cantilever	61
4.9	Testresultaat cilindrische fit invloed excitatie-intensiteit	62
4.10	Gemeten excitatiekracht bij de lineariteitsmeting van de cilindrische fit met een spanningsniveau van de shaker op 1V	63
4.11	Invloed van hermontage op de 2de mode: a) enkele cantilever, b) dubbele cantilever c) cilindrische fit	65
4.12	Testresultaat cilindrische fit invloed losklikken	67
4.13	Invloed van volgorde op de 2de mode: a) enkele cantilever, b) cilindrische fit . . .	68
4.14	Scheurvorming enkele cantilever	69
5.1	Aangepast ontwerp van de modulair paneel van de enkele cantilever	71
5.2	Aangepast ontwerp van de modulair paneel van de cilindrische fit	72
5.3	Schematische werking passieve sleuf	73
5.4	Driekernige matrijsconcept cilindrische fit	74
5.5	a) Tweedelige matrijsinsert, b) ondersnijdingssleuf matrijs concept	75
5.6	a) bolveer, b) opbouw bolveer	76
5.7	Aanduiding van de verschillende onderdelen van een koude aanspuittak	77
5.8	Design regels voor een waaieraanspuiting	78
5.9	Doorsnede types koude aanspuittak	79
5.10	Dimensionering aanspuittak	79
5.11	koude aanspuittak met <i>sprue</i> , waaieraanspuiting, baan van de aanspuittak en <i>cold slug wells</i>	80
5.12	Gesimuleerde model van de cilindrische fit met de koude aanspuittak in Moldex3D	81
5.13	Positie van de luchtinsluitingen op de cilindrische fit	82
5.14	Krimp van de cilindrische fit met een schaafactor van vijf	82
5.15	Gerealiseerde ondersnijdingssleuf voor de cilindrische fit	83
5.16	2D-tekening van de cilindrische bekken van de cilindrische fit	84
5.17	Visuele weergave van de ingeklikte bolveer bij een driehoekige groef	84
5.18	Visuele weergave van de openingshoek in de ondersnijdingssleuf	85
5.19	a) Veel gebruikte ontluchting, b) geoptimaliseerde ontluchting	86
5.20	Bewegende matrijsinsert van de cilindrische fit met aanduidingen	87
5.21	Inlegkader van de bolveer	88
5.22	Onderkant van de vaste matrijsinsert	89
5.23	Matrijsinserts van de enkele cantilever: a) matrijsinsert voor in de bewegende matrijshelft, b) matrijsinsert voor in de vaste matrijshelft	89
5.24	Beide matrijshelften met de vervaardigde inserts voor de cilindrische fit en de ondersnijdingssleuven	90
5.25	a) cilindrische fit met koude aanspuittak en ondersnijdingssleuven, b) eindproduct cilindrische fit	91

Verklarende woordenlijst

FDM	<i>Fused deposition modeling</i> (FDM) is een 3D-printingtechnologie waarbij objecten laagsgewijs zijn opgebouwd.
Kruip	Kruip is de langzame vervorming van een materiaal onder constante spanning of belasting, zelfs als de spanning onder de vloeigrens van het materiaal ligt.
LRM	Lokaal resonante metamaterialen (LRM's) zijn speciaal ontworpen materialen die toelaten in een bepaald frequentiegebied een sterke geluids- en trillingsreductie te verkrijgen, zonder veel massatoevoeging.
Matrijscaviteit	De negatieve vorm van het eindproduct dat in een matrijs is ingebouwd, waarin gesmolten materiaal (meestal kunststof of metaal) wordt geïnjecteerd om het eindproduct te vormen.
Modulair	Verwijst naar een ontwerp- of constructiebenadering waarbij verschillende afzonderlijke onderdelen kunnen worden samengevoegd tot één groter geheel.
Ondersnijding	Bij spuitgieten is er sprake van een ondersnijding wanneer de geproduceerde vorm niet uit de matrijs kan worden verwijderd. Dit komt doordat bepaalde delen van de ondersnijding vormgesloten zijn.

Abstract

De toenemende trend naar lichtgewicht ontwerp, gecombineerd met het groeiende besef van de nadelige effecten van geluid en trillingen, vraagt om onderzoek naar nieuwe lichtgewicht geluids- en trillingsoplossingen, zoals lokaal resonante metamaterialen (LRM's). Hoewel spuitgieten potentieel toont voor LRM-massaproductie, zijn voor de productie van grote onderdelen grote en dure spuitgietmachines nodig.

Een mogelijke oplossing is om de LRM's te bouwen uit kleinere modulaire panelen, maar in de literatuur ontbreekt kennis over het dynamische gedrag van modulaire verbindingen. Daarom worden in dit eindwerk mogelijke verbindingconcepten ontworpen en hun effect op de trillingsvoortplanting binnen de modulaire structuur onderzocht.

Na het ontwerpen en evalueren van verschillende verbindingsmogelijkheden zijn prototypes van de meest belovende concepten gefabriceerd met 3D-printen en verbonden tot balkstructuren. Experimenteel werden de trillingsresponsen van de balken gemeten en getest op lineariteit en het effect van her- en demontage, waaruit volgde dat twee concepten potentieel tonen voor gebruik als LRM. Aan de hand van spuitgietsimulaties zijn vervolgens matrijsinserts voor beide concepten ontworpen en is één hiervan gerealiseerd en gebruikt om te spuitgieten. De bevindingen en realisaties uit dit werk leggen een fundering om modulaire LRM-structuren te spuitgieten met dynamisch geschikte verbindingen. Verder onderzoek omvat het monteren van LRM-resonatoren en het dynamisch testen van de modulaire gespuitsgiete plaatstructuur.

Abstract in English

The continuously growing trend towards lightweight design, coupled with the increasing awareness of the adverse effects of noise and vibrations, necessitates research in new lightweight sound and vibration solutions, such as locally resonant metamaterials (LRMs). While injection molding shows potential for LRM mass production, large and expensive injection molding machines are required for the production of large parts.

One possible solution is to construct LRMs from smaller modular panels. However, existing literature lacks knowledge about the dynamic behavior of modular connections. Therefore, in this thesis several potential connection mechanisms are designed and their effect on the vibration propagation within modular structures investigated.

After designing and evaluating various connection possibilities, prototypes of the most promising concepts were fabricated with 3D printing and assembled into beam structures. Experimentally, the vibration responses of the beams were measured and tested for linearity and the effect of assembly and disassembly, revealing that two concepts show potential for use as LRMs. Mold inserts for both concepts were then designed based on injection molding simulations, with one of them realized and used for injection molding. The findings and achievements of this work lay a foundation for injection molding modular LRM structures with dynamically suitable connections. Further research includes adding LRM resonators to the injection-molded panels and dynamically testing these on plate level.

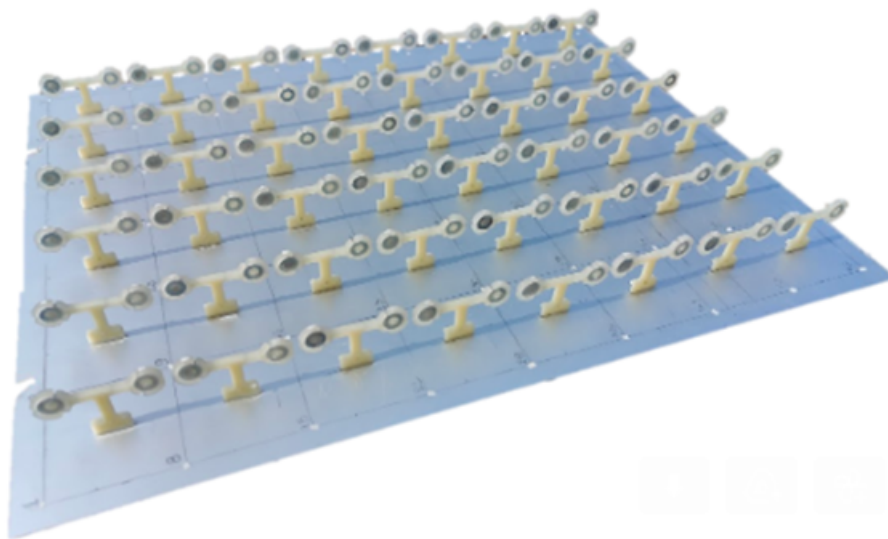
Hoofdstuk 1

Inleiding

1.1 Situering

Geluid en trillingen zijn belangrijke aspecten om te beheersen in veel industrieën, waaronder de lucht- en ruimtevaart, de auto-industrie en de machinebouw. Hoewel geluidsoverlast grotendeels onschadelijk lijkt, kan langdurige blootstelling aan geluid en trillingen uiteenlopende gezondheidseffecten hebben. Zo kan geluidsoverlast leiden tot stress en zelfs chronische aandoeningen zoals een verhoogde bloeddruk en een verhoogd risico op hart- en vaatziekten, waaronder het risico op een hartinfarct. Daarnaast veroorzaakt geluidsoverlast ook leerachterstand bij kinderen doordat geluid negatieve effecten heeft op het begrijpend lezen, geheugen en aandacht. Daarom wordt geluidsoverlast niet alleen beschouwd als een milieulast, maar ook als een bedreiging voor de volksgezondheid[1],[2]. Geluid en trillingen zijn daarom belangrijke aspecten om te beheersen.

De onderzoeksgroep PPE (Polymer Processing and Engineering) van de KU Leuven, gevestigd in het technologiecentrum in Diepenbeek, doet onderzoek naar innovatieve lokaal resonante metamaterialen (LRM's) om op een lichte en effectieve manier geluid en trillingen te onderdrukken. Figuur 1.1 geeft een metamateriaalstructuur weer.



Figuur 1.1: Metamateriaal bestaand uit een basisplaat met resonatoren [3]

Door toevoeging van resonante elementen (resonatoren, vaak voorgesteld als massa-veersystemen) aan een hoststructuur is het mogelijk om hoge geluids- en trillingsonderdrukking te realiseren binnen zowel een hoog- als laagfrequentiegebied. Dit frequentiegebied wordt afgestemd door het design van de resonatoren. In tegenstelling tot klassieke geluids- en trillingsisolatie waarbij vaak veel massa of volume toegevoegd dient te worden, werken deze LRM's op basis van fano-interferentie tussen de hoststructuur en resonatoren [4]. Dit maakt het mogelijk om met een veel lichtere structuur toch effectieve geluids- en trillingsdemping te bereiken. Verder is het belangrijk dat de resonatoren nauwkeurig overeen stemmen met de afmetingen en geometrie van het ontwikkelde ontwerp, dat gekoppeld is aan de te onderdrukken frequentie. Slechts een kleine afwijking als gevolg van een onnauwkeurigheid in het productieproces kan aanzienlijke gevolgen hebben voor de doeltreffendheid van de geluids- en trillingsonderdrukking [5]. Momenteel toont spuitgieten veel potentie om deze structuren nauwkeurig te produceren in grote aantallen. [6]. Maar voor de productie van LRM's voor onderdelen van grote omvang (bv. omkastingen, tussenpanelen, ...) zijn grote en dure spuitgietmachines nodig. Daarom wordt in dit eindwerk onderzocht hoe kleine maar modulaire gespuitsgiete panelen geassembleerd kunnen worden tot één groot paneel en wat de invloed van deze configuratie is op hun geluids- en trillingsisolatie.

1.2 Probleemstelling

In de literatuur zijn al reeds metamaterialen geproduceerd met *additive manufacturing* (AM) en thermoformeren. Echter bevatten deze productieprocessen onauwkeurigheden die de prestaties van de LRM-structuren verminderen. Zo treedt er bij thermoformeren een moeilijk controleerbare verdunning van de platen op, waardoor de stijfheid, massaverdeling en dus het stopbandgedrag van de LRM's sterk worden beïnvloed. AM, anderzijds, vertoont slechte geometrische nauwkeurigheid en anisotropie in de LRM-structuur. Deze onauwkeurigheden en variaties in materiaaleigenschappen leiden tot afwijkingen in het stopbandgedrag. Eén van de processen die wel mogelijk potentieel biedt is het spuitgieten. Het spuitgiet productieproces staat namelijk bekend om zijn nauwkeurig, herhaalbaarheid en robuustheid [6], [7].

Maar voor het spuitgieten van grote metastructuren voor producten van grote omvang zijn grote en dure spuitgietmachines vereist. Deze spuitgietmachines werken met hogere drukken en sluitkrachten dan commerciële spuitgietmachines, vanwege de grote spuitgietvolumes en typisch dunne wanddiktes [8]. Bovendien vereist elke toepassing een andere LRM-structuur met andere afmetingen, en dus ook een nieuwe matrijs. Dit resulteert in verhoogde kosten, aangezien de matrijzen niet alleen moeten worden ontwikkeld, maar ook geproduceerd. Hierdoor is de productie van grote LRM-structuren voor verschillende toepassingen op kleine productieschaal niet rendabel. Ook het onderzoek naar het maken van grotere metamaterialen met spuitgieten wordt gehinderd door deze hoge prijzen. Echter, indien de LRM-structuur uit kleinere modulaire gespuitsgiete panelen kan worden opgebouwd, is slechts één matrijs nodig voor de productie en daalt de kost aanzienlijk. Dit is alleen haalbaar als de verbindingen tussen de kleine modules, de geluids- en trillingsisolatie van de LRM-structuur niet negatief beïnvloeden. Hoewel er al veel toepassingen en literatuur beschikbaar zijn betreffende spuitgietverbindingen tussen panelen of blokken, ontbreekt onderzoek en kennis met betrekking tot het dynamische gedrag van deze verbindingen in verband met de trillingsinteractie tussen de panelen.

1.3 Doelstellingen

De hoofddoelstelling van de masterproef is het ontwerpen en testen van verschillende verbindingsmechanismen voor modulaire paneelstructuren gemaakt met spuitgieten. De gespuitsgiete modulaire panelen moeten hierbij voldoen aan de opgelegde ontwerpregels en restricties van commerciële spuitgietmachines, zoals een maximale wanddikte van vier mm, geleidelijke wanddikteovergang en meer. Daarnaast moet de modulaire LRM-structuur idealiter monteer- en demonteerbaar zijn, zonder dat het de trillingsonderdrukkingseigenschappen negatief beïnvloedt. Daarnaast is kostenefficiëntie van groot belang. Dit betekent dat de omvang en complexiteit van het verbindingsmechanisme moet worden beperkt, zodat het in lijn ligt met de productiemogelijkheden van commerciële spuitgietmachines. Dit omvat ook de beperkingen van complexe vormen en ondersnijdingen die tijdens het spuitgieten moeilijk realiseerbaar zijn. In dergelijke situaties moet de matrijs beweegbare componenten bevatten, zoals glijdende delen, nokken, beweegbare kernen, enz. Deze zijn kostbaar en gevoelig voor beschadiging waardoor de kostprijs van de matrijs aanzienlijk stijgt. Om de kost en productietijd verder te minimaliseren is het wenselijk dat de gespuitsgiete modulaire panelen na het spuitgieten weinig tot geen nabewerkingen vereisen.

In essentie is het hoofddoel van de masterproef om verschillende verbindingsmechanismen te verkennen, ontwikkelen en testen, met als doel de invloed van deze verbindingen op het dynamische gedrag van de paneelstructuren te bepalen.

1.4 Methode

In een eerste fase wordt de literatuur verkend op bestaande verbindingsmechanismen, het spuitgietproces en de bijhorende ontwerpregels en de werking van metamaterialen. Op basis van deze literatuurstudie kunnen verschillende verbindingsmechanismen worden onderzocht en vergeleken, om nadien over te gaan tot de keuze van mogelijks geschikte ontwerpen.

In een tweede fase worden op basis van de inzichten uit de literatuurstudie enkele mogelijke concepten ontworpen en getekend in CAD-software. Deze concepten worden iteratief verbeterd en geproduceerd met *fused deposition modeling* (FDM). Dit is een kostenbesparende aanpak ten opzichte van het rechtstreeks spuitgieten, wat een duur proces is vanwege de ontwikkeling en productie van de verschillende matrijzen voor de prototypes.

De derde fase betreft het dynamisch testen van de FDM-prototypes, waarbij het dynamische gedrag in verband met de voortplanting van trillingen wordt onderzocht. Aan de hand van de testresultaten kan het beste verbindingsmechanisme worden geselecteerd voor het spuitgieten van de modulaire metamateriaalstructuur.

In de vierde fase volgt de ontwikkeling van de matrijsinserts voor het spuitgieten van de ontworpen modulaire panelen. Het ontwerpen van deze matrijsinserts gebeurt op basis van spuitgietsimulaties. Deze simulaties bieden de mogelijkheid om de vulling, krimp, luchtinsluitingen, en de positie van de aanspuiting van het kunststof te bepalen.

De laatste fase omvat het spuitgieten van de modulaire panelen en het vervaardigen van een plaatstructuur.

1.5 Thesis vooruitblik

In **Hoofdstuk 1** wordt de context en motivatie van het onderzoek besproken. Dit wordt gevolgd door een beknopt overzicht van het literatuuronderzoek in **Hoofdstuk 2**, beginnend met een beschrijving van de werking en eigenschappen van LRM-structuren, zoals het stopbandeffect. Vervolgens wordt het spuitgietsproces toegelicht, inclusief een gedetailleerde bespreking van de belangrijkste procesparameters en ontwerpregels. Afsluitend volgt een uitgebreide beschrijving van verschillende bevestigingsmogelijkheden tussen plaatstructuren, waaronder zowel permanente als demonteerbare verbindingen. **Hoofdstuk 3** beschrijft de ontwerpkeuzes van de prototypes en het bijbehorende FDM-proces voor de productie van deze prototypes. In **Hoofdstuk 4** worden de experimentele trillingskarakterisatieproeven en modale simulaties van de verschillende prototypes besproken. Hierbij wordt het trillingsgedrag van de prototypes onderzocht en bepaald in welke mate herhaaldelijk demonteren en monteren hierop invloed heeft. Voor de beste ontwerpen uit hoofdstuk 4 worden in **Hoofdstuk 5** verschillende matrijsconcepten uitgewerkt en gevalideerd aan de hand van spuitgietsimulaties. Vervolgens wordt één matrijsconcept hiervan gerealiseerd en gebruikt voor het spuitgieten van modulaire panelen. Tot slot wordt in **Hoofdstuk 6** de bevindingen van deze thesis aangehaald en worden suggesties voor toekomstig onderzoek besproken.

Hoofdstuk 2

Bronnenstudie

Dit hoofdstuk begint bij het bondig toelichten van het werkingsprincipe van de LRM-structuren, inclusief de daaraan gerelateerde eigenschappen. Vervolgens wordt het spuitgietproductieproces beschreven met de relevante procesparameters en de ontwerpregels verbonden aan het spuitgietproces. Daarna een indicatie van de verschillende polymeren die geschikt zijn voor het spuitgietproces. Ten slotte volgt een overzicht van de meest relevante verbindingstechnieken voor de modulaire panelen.

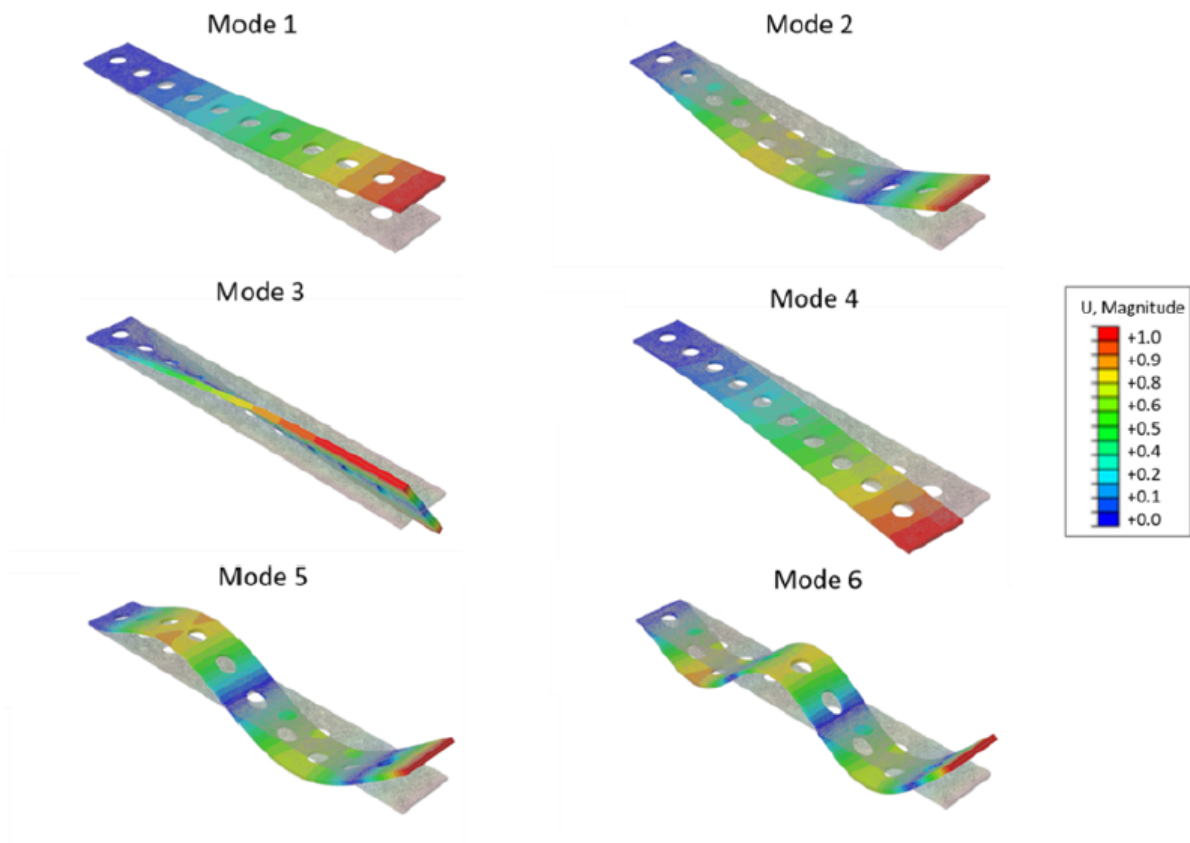
2.1 LRM-structuren

Geluidsonderdrukking gebeurt momenteel hoofdzakelijk op twee manieren: reflectie en absorptie. Bij de eerste manier wordt vaak gebruik gemaakt van zwaardere structuren en specifieke materialen [9]. Geluidsabsorptie vereist daarentegen een absorberende deklaag, waarbij de dikte van deze laag afhankelijk is van de te absorberen frequenties [9]. In veel gevallen neemt de dikte van de absorberende laag drastisch toe naarmate de te absorberen golflengte groter wordt, dus de frequentie afneemt [10]. Recent onderzoek heeft aangetoond dat LRM-structuren, ook wel bekend als vibro-akoestische metamaterialen, potentieel tonen om een hoge geluids- en trillingsreductie te realiseren in het moeilijk-te-onderdrukken laagfrequentiegebied, zonder een noodzaak om veel massa of volume toe te voegen [11].

Een LRM-structuur bestaat uit een hoststructuur waarin periodiek resonatoren zijn geïntegreerd of aan toegevoegd. Het ontwerp van deze resonatoren is typisch afgestemd op het trillingsgedrag van de hoststructuur om een efficiënte trillingsreductie en vervolgens ook geluidsreductie te realiseren. Deze resonatoren kunnen geïntegreerd worden in verschillende hoststructuren zoals omkastingen van machines, tussenpanelen, enzovoort. Maar hierbij is het belangrijk om op te merken dat elk systeem met een andere dynamica dus ook een verschillend trillingsgedrag vertoont. Dit betekent dat verschillende hoststructuren een totaal ander trillingsgedrag kunnen vertonen, waardoor de resonatoren op maat ontworpen dienen te worden. Zodat effectieve geluids- en trillingsisolatie gerealiseerd wordt binnen het frequentiebereik dat de meeste hinder veroorzaakt voor omstanders [12].

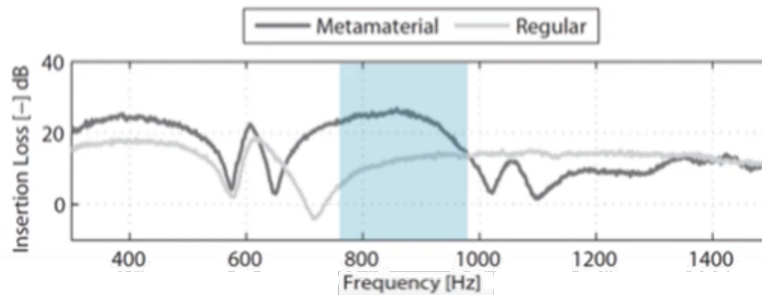
Geluids- en trillingsisolatie wordt bereikt door de beweging van de resonator, wat zorgt voor een energie-wisseling tussen de hoststructuur en de resonator. Hierdoor komt de hoststructuur tot stilstand bij de frequenties waarop de resonator trilt. Het hinderlijk frequentiebereik is afhankelijk

van de dynamica van de hoststructuur en van de externe krachten die op de structuur inwerken en deze doen trillen, ook wel excitatie genoemd. De frequentie van deze excitatie bepaalt namelijk hoe de structuur zal trillen. Bij bepaalde frequenties treedt een versterkte trillingsrespons op, waarbij de structuur heviger gaat trillen dan bij andere frequenties. Deze frequenties worden ook wel resonantiefrequenties genoemd [13]. Het bewegingspatroon waarmee de structuur hierbij trilt, bekend als eigenmodevorm, verschilt ook per resonantiefrequentie [13]. In figuur ?? worden verschillende eigenmodevormen weergegeven van een ingeklemde balk met gaten.



Figuur 2.1: Eerste zes modevormen van een ingeklemde balk met een centraal gaten patroon [14]

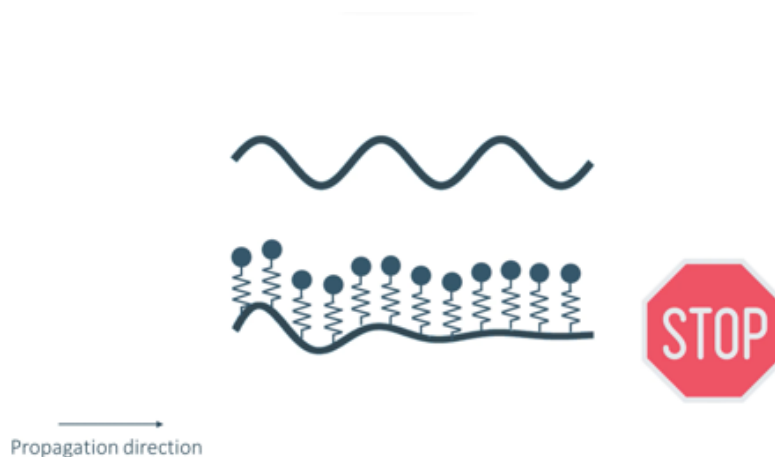
Voor een optimale werking van de LRM's is het noodzakelijk dat de resonatoren nauwkeurig worden ontworpen, zodat hun modevorm bij de eigenfrequentie een loodrechte kracht uitoefent op de hoststructuur. Deze eigenfrequentie van de resonatoren moet hierbij ook overeenstemmen met de frequentie waarbij de hoststructuur hinderlijk trilt en geluid opwekt (voornamelijk bij een resonantiefrequentie)[15]. Hierdoor zullen de trillingen van de resonatoren in het te onderdrukken frequentiegebied in tegenfase worden teruggestuurd naar de hoststructuur, waardoor de globale trillingen in de hoststructuur afneemt. Dit fenomeen staat bekend als het stopbandeffect [12] en wordt weergegeven in figuur 2.2.



Figuur 2.2: Stopbandeffect door metamaterialen [16]

In figuur 2.2 is waarneembaar dat de LRM-structuur en reguliere structuur met gelijkaardige massa's, een groot verschil in geluidsisolatie (in figuur weergegeven als *insertion loss*) vertonen binnen het gekozen frequentiebereik (blauw). De LRM-structuur vertoont hierbij een aanzienlijk betere geluidsisolatie.

Het is echter cruciaal dat er meerdere resonatoren per golflengte geplaatst zijn op de hoststructuur. Anders is het mogelijk dat de resonatoren zich in de buurt van de knooppunten bevinden van de eigenmode van de hoststructuur. Op deze knooppunten vindt er geen trilling plaats, waardoor de resonatoren hierrond weinig tot niet zullen trillen wat resulteert in minimale of geen onderdrukking van trillingen [17]. In figuur 2.3 staat een voorbeeld waarbij de resonatoren onderling op een kleinere afstand van elkaar zijn geplaatst dan de te onderdrukken golflengte.



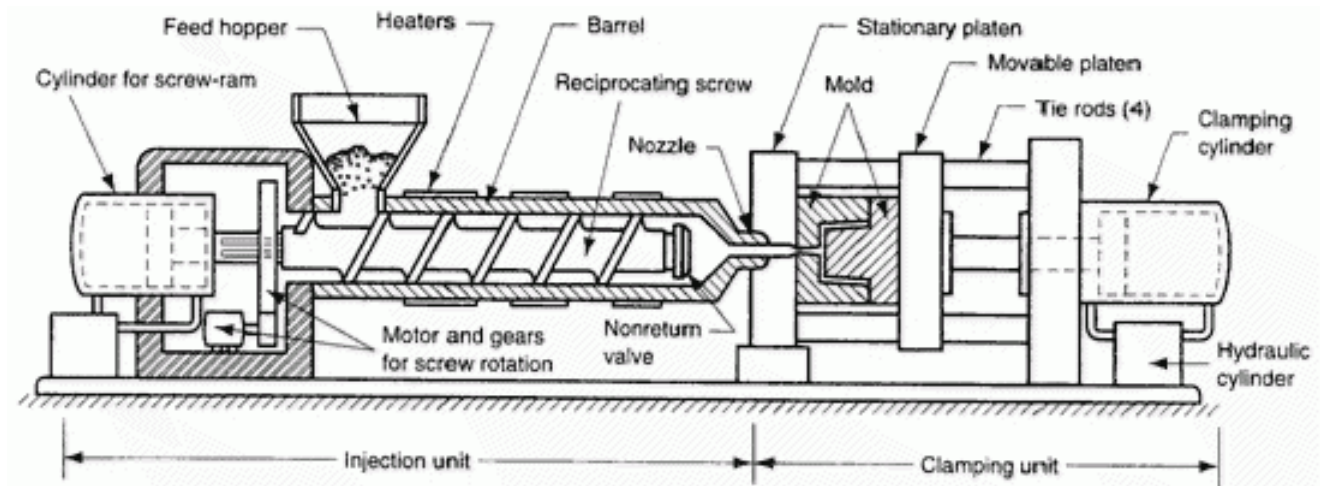
Figuur 2.3: Positie resonatoren op subgolflengte [18]

2.2 Spuitgieten

Het spuitgietproces is een methode voor de massaproductie van kunststofonderdelen en -producten. Dit proces gaat uit van de injectie van gesmolten kunststof in een matrijs voor de vorming van het gewenste eindproduct. De hoge efficiëntie en veelzijdigheid ervan, samen met de hoge nauwkeurigheid, herhaalbaarheid en de mogelijkheid tot complexiteit, maken dit proces geschikt voor diverse toepassingen in verschillende kunststofverwerkende industrieën, waaronder de auto-industrie en de medische sector [19].

2.2.1 S spuitgietmachine

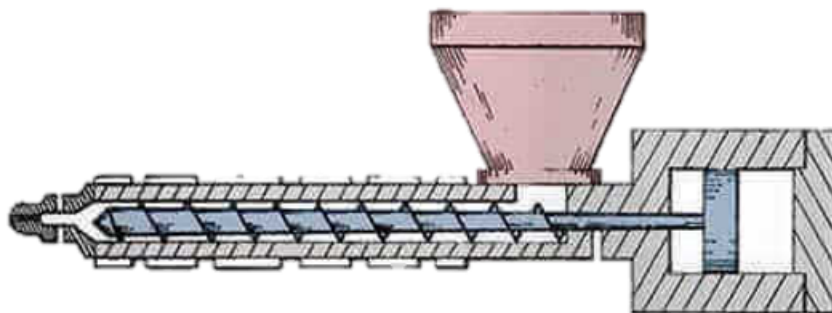
De spuitgietmachine bestaat uit twee hoofdcompartimenten namelijk de sluiteenheid en de injectie-eenheid. Deze twee compartimenten staan weergegeven in figuur 2.4.



Figuur 2.4: Schematische weergaven van een spuitgietmachine [20]

De sluiteenheid heeft als doel twee matrijshelften met hoge kracht tegen elkaar te drukken, namelijk de vaste matrijshelft en de bewegende matrijshelft, om zo de inwendige caviteit te sluiten. Hierbij moet de sluitingskracht over de twee matrijshelften groter zijn dan de druk opgebouwd in de matrijscaviteit [20]. Het sluitingsmechanisme kan op verschillende manieren worden gerealiseerd, namelijk met een lineaire geleiding, knikmechanisme, enzovoort [21].

De injectie-eenheid van een spuitgietmachine dient voor het plastificeren van de kunststof en de vulling van de caviteit. Een vereenvoudigde representatie van deze eenheid is weergegeven in figuur 2.5.



Figuur 2.5: Vereenvoudigde weergave injectie-eenheid [22]

De injectie-eenheid is uitgerust met een plastificeerschroef voor het injecteren van het kunststof en een toevoerbuffer voor de kunststof toevoer naar de plastificeerschroef. Rond de behuizing van de plastificeerschroef zijn verwarmingselementen voorzien voor het verwarmen van het kunststof. De schroef zelf heeft een kern die stapsgewijs toeneemt in diameter en vervolgens constant blijft over een bepaalde afstand. Deze schroef eindigt met een sperring, die de kunststofstroom reguleert [22].

De aandrijvingen van de sluit- en injectie-eenheid zijn onafhankelijk van elkaar en functioneren hydraulisch of elektrisch. Beide aandrijfsystemen bieden specifieke voor- en nadelen, afhankelijk van toepassing en kost [23].

2.2.2 SPUITGIETPROCES

Het spuitgietproces bestaat uit een aantal chronologische stappen die essentieel zijn voor een correcte uitvoer van het spuitgietproces. Echter kunnen verschillende stappen verder onderverdeeld worden in deelstappen, maar in dit hoofdstuk worden alleen de stappen vermeld die in meerdere bronnen consistent zijn genoemd [24]:

- Kunststof voorbereiding,
- Sluiten van de matrijs,
- Inspuiting,
- Koeling,
- Openen van de matrijs,
- Uitwerping.

Het spuitgietproces begint met de **kunststof voorbereiding**, waarbij afhankelijk van het soort polymeer, de kunststofkorrels eerst gedroogd worden. Indien het om een blend gaat van meerdere kunststoffen is een mengproces nodig [25].

Na de kunststofvoorbereiding worden de geselecteerde kunststofkorrels toegevoegd aan de toevoerbuffer. Dit zorgt voor een geleidelijke toevoer van korrels aan de plastificeerschroef, waar de opwarming plaatsvindt. Deze opwarming ontstaat doordat het oppervlak waarlangs de korrels zich verplaatsen afneemt naarmate ze naar voren bewegen. Dit resulteert in wrijving van de korrels onderling en met het oppervlak van de cilinder, wat warmte genereert. Hiernaast genereert een extern verwarmingselement extra warmte dat de resterende korrels doet smelten.

Na de verwarmingszone neemt de hoeveelheid gesmolten polymeer toe voor de plastificeerschroef terwijl deze roterend naar achteren beweegt. De roterende en achterwaartse bewegingen zorgen voor de verdrijving van eventuele lucht die zich tussen de kunststofkorrels bevindt, en dragen bij aan de dosering van gesmolten kunststof voor de plastificeerschroefkop. Eenmaal een voldoende hoeveelheid polymeer zich voor de plastificeerschroef bevindt, volgt de **matrijs sluiting** voorafgaand aan de **inspuiting**. Hierbij wordt het gesmolten kunststof onder hoge druk in de matrijs geïnjecteerd. Dit gebeurt door de voorwaartse beweging van de plastificeerschroef met een vooraf ingestelde constante snelheid. Het voorwaarts gestuwde polymeer kan niet terugvloeien wegens sperring rond de plastificeerschroefkop. Het gesmolten polymeer vloeit in de matrijs en neemt de vorm van de caviteit aan. Nadat de matrijs voor ongeveer 98% is gevuld met gesmolten polymeer, wordt het resterende polymeer dat in overmaat is opgebouwd voor de plastificeerschroef onder een constante druk in de matrijs geperst. Dit wordt ook wel de nadruk genoemd. De nadruk zorgt voor een maximale vulling en de minimalisatie van krimp. De inspuiting stopt zodra de vooraf ingestelde nadruktijd is bereikt of wanneer de aanspuiting volledig is gestold. Gedurende de inspuiting behoudt de matrijs een nagenoeg constante temperatuur door middel van inwendige koelkanalen, waardoor een deel van het polymeer stolt tijdens de inspuiting.

Na het afvriezen van de aansluiting of het verstrijken van de nadruktijd moet het product voldoende afkoelen voor het openen van de matrijs, zodat het zijn vorm behoudt. Dit proces staat bekend als de **koeling** van het product. Na voldoende afkoeling **opent de matrijscaviteit** en wordt het stuk met behulp van uitwerppennen **uitgeworpen**.

2.2.3 Procesparameters

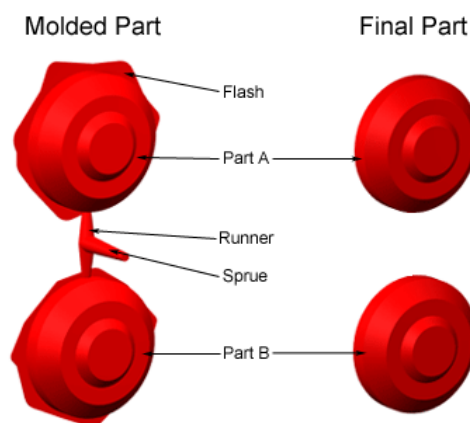
Het spuitgietproces is sterk aanpasbaar door het uitgebreid scala aan instelbare parameters. Vanwege het breed scala worden enkel de basis parameters aangehaald. Dit zijn de [26]:

- Smelttemperatuur,
- Matrijstemperatuur,
- Inspuitsnelheid,
- Nadruk,

Ten eerste de **smelttemperatuur** van het polymeer in de plastificeerschroef. De smelttemperatuur beïnvloedt namelijk elke stap van het spuitgietproces en moet zorgvuldig worden beheerd. Het is cruciaal dat de temperatuur correct is ingesteld, zodat het polymeer grondig smelt en mengt maar niet de kans krijgt om te verbranden [27].

Ten tweede de **matrijs temperatuur**. De temperatuur van de matrijs verwijst naar de temperatuur aan het oppervlak van de matrijs tijdens het spuitgieten. Deze temperatuur blijft ongeveer hetzelfde door middel van de eerder besproken koelkanalen. De matrijstemperatuur oefent een aanzienlijke invloed uit op diverse factoren van het eindproduct, zoals krimp en eventuele spanningsscheuren [27]. Deze factoren zijn echter tevens afhankelijk van de materiaaleigenschappen.

Ten derde de **inspuitsnelheid**. Zoals eerder aangegeven wordt het gedoseerde polymeer initieel onder een constante snelheid ingespoten. De inspuitsnelheid heeft invloed op het vullingsproces van het onderdeel en dus de kwaliteit van het eindproduct [26]. Een fout ingestelde inspuit-snelheid kan leiden tot een breed scala aan mogelijk fouten waaronder onvolledige vulling, onvoldoende gevormde polymeerstroom, *flash*, enzovoort [27]. Een schematische weergave van de spuitgietfout *flash* staat weergegeven in figuur 2.6



Figuur 2.6: Flash spuitgietfout [28]

In figuur 2.6 is waarneembaar dat *flash* zorgt voor een dunne laag kunststof ter hoogte van het

scheidingsvlak. Deze vorming heeft verschillende nadelen, waaronder de noodzaak van extra verwerkingsstappen na het spuitgieten, wat resulteert in een langere productietijd.

Ten vierde de **nadruk**. Nadat de matrijs een vullingsgraad van ongeveer 98% bereikt, schakelt de spuitgietmachine over van een snelheidgestuurde injectie naar een drukgestuurde injectie. Op dit punt worden de laatste procenten onder een bepaalde druk ingespoten om de vulling te maximaliseren en krimp te minimaliseren. Echter, bij een foutief ingestelde druk treden verschillende problemen op, namelijk hoge krimp, *flash*, enzovoort [27].

2.2.4 Ontwerpregels voor het spuitgieten

Om een optimaal eindproduct te garanderen, dienen spuitgietproducten te voldoen aan ontwerp-richtlijnen verbonden aan het spuitgietproces. De belangrijkste staan hieronder aangehaald [29], [30]:

- Lossingshoek,
- Uniforme wanddikte,
- Scherpe randen,
- Ondersnijdingen,

Ten eerste, de **lossingshoek** (*draft angle*). Dit is een conische hoek wat het uitwerpen vergemakkelijkt waardoor de beschadiging van spuitgietproducten bij het uitwerpen beperkt wordt [31].

Ten tweede, de **uniforme wanddikte**. Variatie in wanddikte leidt tot zinkplekken, holten en krommingen in het eindproduct. Deze problemen ontstaan door variërende afkoelsnelheden als gevolg van de niet-uniforme wanddikte [31].

Ten derde, de **scherpe randen**. Scherpe randen in het ontwerp vereisen extra druk om te vullen. Bovendien hebben gespuitschiet scherpe randen meer kans om aan de matrijs te blijven kleven tijdens het uitwerpen, wat resulteert in een verhoogd risico op beschadiging van het gespuitschiet product en de matrijsscaviteit [31].

Ten vierde, de **ondersnijdingen**. Ondersnijdingen zijn zones in het spuitgietproduct die de verwijdering uit de matrijs verhinderen omdat deze zones vormgesloten zijn. Voor het uitwerpen van spuitgietproducten waar ondersnijdingen optreden, is het noodzakelijk dat de matrijs is uitgerust met bewegende componenten zoals glijdende delen, nokken, beweegbare kernen, enz. Deze bewegende componenten maken de vormgesloten zone mogelijk tijdens het spuitgieten en schuiven na het spuitgietproces uit de ondersnijding, zodat het product kan worden uitgeworpen. Dit verhoogt de kost en complexiteit van de matrijs, aangezien deze met verschillende bewegende onderdelen uitgerust moet zijn

2.3 Soorten polymeren

Het spuitgieten is een veelzijdig proces dat toepasbaar in diverse industrieën. Echter zijn er beperkingen in de spuitgietbaarheid van sommige kunststoffen. Daarom wordt in dit deel een aanzet gegeven naar de verschillende polymeerclassen en hun geschiktheid voor spuitgieten.

2.3.1 Thermoplasten polymeren

De polymeerklasse thermoplast is onderverdeeld in twee groepen: amorfe thermoplasten en semi-kristallijne thermoplasten.

Amorfe thermoplasten

Amorfe thermoplasten zijn polymeren met een chaotische rangschikking van polymeerketens. Dit resulteert in een elastische structuur waarbij de ketens gemakkelijk langs elkaar kunnen glijden en zich in één richting kunnen uitlijnen. Daarnaast vertonen amorfe structuren meestal een transparant uiterlijk. Dit komt omdat amorfe structuren minder compact zijn dan de semi-kristallijne thermoplasten, wat resulteert in een betere lichtdoorlatendheid. Het is echter belangrijk om op te merken dat amorfe thermoplasten slechts één overgangstemperatuur hebben, namelijk de glasovergangstemperatuur [32]. Dit is de temperatuur waarbij het polymeer overgaat van een vaste toestand naar een rubberachtige, viskeuze toestand [32]. Een hogere temperatuur tegenover de glasovergangstemperatuur resulteert in een viskeuzer kunststof, wat de vloeijing vergemakkelijkt en lagere drukken vereist voor het spuitgietproces [33]. Echter, deze temperatuurverhoging wordt beperkt door de thermische degradatie van polymeren [34].

Semi-kristallijne thermoplasten

Semi-kristallijne thermoplasten vertonen twee interne fasen, een amorfe en een kristallijne fase. De kristallijne fase is een ordelijke rangschikking van polymeerketens, wat resulteert in een compactere structuur met verminderde rekbaarheid. Semi-kristallijne thermoplasten vertonen kenmerken, zoals de troebelheid van merendeel van deze kunststoffen. Dit fenomeen wordt veroorzaakt door de compacte structuur van polymeerketens, die neigen het licht te verstrooien. Hiernaast hebben semi-kristallijne thermoplasten twee overgangstemperaturen, namelijk de glasovergangstemperatuur en de smelttemperatuur.

Het gedrag van semi-kristallijne thermoplasten bij de glasovergangstemperatuur verschilt significant van dat van amorfe thermoplasten. Bij semi-kristallijne thermoplasten, boven de glasovergangstemperatuur, zijn zowel de amorfe als de kristallijne gebieden in staat om onderling te bewegen. Echter, is het polymeer zachter en beter bewerkbaar maar is het nog niet viskeuze, wat noodzakelijk is voor het spuitgietproces [35].

De smelttemperatuur geeft aan bij welke temperatuur de kristallijne ketens van een polymeer beginnen open te breken en het polymeer dus viskeus wordt. Daarom is het van cruciaal belang dat het semi-kristallijne thermoplasten tijdens het spuitgieten net boven de smelttemperatuur wordt verwarmd. Echter, het polymeer mag niet te ver boven de smelttemperatuur worden verhit, anders kan thermische degradatie optreden [36]. Voor de matrijstemperatuur is het essentieel dat deze boven de glasovergangstemperatuur ligt. Dit zorgt ervoor dat het polymeer voldoende tijd heeft voor de vorming van kristallijne gebieden [37].

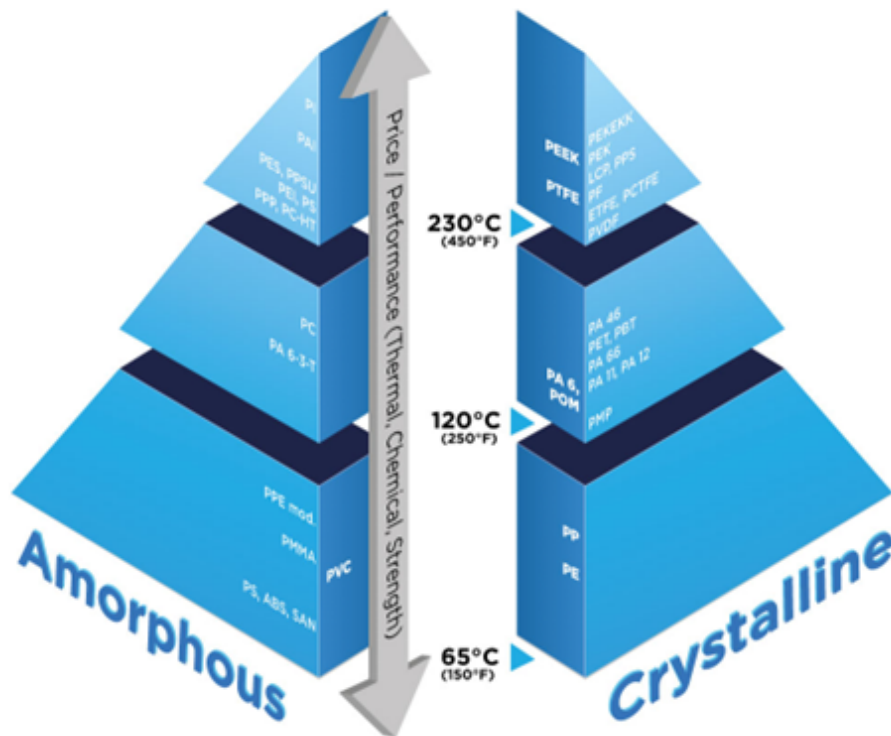
Voor het spuitgieten van beide polymeerstructuren zijn voor- en nadelen en moet er met verschillende factoren rekening worden gehouden. Bij semi-kristallijne materialen is het niet uniform smelten en het niet volledig kristalliseren bij het stollen een aandachtspunt terwijl dit niet het geval is voor amorfe thermoplasten. Amorfe thermoplasten hebben in tegenstelling wel de neiging om aan de matrijs te blijven plakken en hebben meer kans op scheurvorming tijdens het uitwerpen [32].

2.3.2 Thermohardende polymeren

Thermohardende polymeren, vergelijkbaar met amorse thermoplasten, bestaan uit een wirwar netwerk van polymeerketens, maar in dit geval zijn deze ketens op grote schaal met elkaar verbonden door middel van crosslinks (covalente bindingen) [38]. Vanwege het grote aantal crosslinks is het spuitgietproces voor thermoharders complexer dan voor thermoplasten, omdat voor de vorming van een voldoende viskeus polymeer vrijwel alle crosslinks verbroken moeten zijn. Daarom gebeurt het spuitgieten van thermoharders met twee componenten, waarbij één component zich al in de matrix bevindt en de andere component wordt ingespoten. Dit betekent echter niet dat alle thermohardende polymeren geschikt zijn voor spuitgieten. Dit is slechts mogelijk voor een beperkt aantal zoals fenol-, polyesterharsen, enzovoort. Vanwege de uitdagende verwerking van thermoharders worden ze in deze thesis buiten beschouwing gelaten [38].

2.3.3 Selectie polymeren

Vanwege de grote diversiteit aan kunststoffen is het essentieel om een voorselectie uit te voeren, waarbij rekening wordt gehouden met kostenefficiëntie en materiaaleigenschappen. Deze eerste selectie kan gebeuren op basis van een polymeerdriehoek (zie Fig 2.7).



Figuur 2.7: Polymeerdriehoek [39]

De polymeerdriehoek classificeert verschillende thermoplasten op basis van hun ketenstructuur, eigenschappen, verwerkingstemperatuur en kosten.

2.4 Soorten verbindingsmechanismen

De productie van lichte LRM-structuren op basis van modulaire, gespuitsgiete panelen vereist een geschikt verbindingsmechanisme dat de geluids- en trillingsisolatie niet negatief beïnvloedt. Idealiter moet dit verbindingsmechanisme zowel een eenvoudige montage als demontage van de modulaire panelen mogelijk maken. Daarnaast zijn kostenefficiëntie en levensduur belangrijke aspecten om rekening mee te houden. Daarnaast is het cruciaal dat het her- en demonteren geen negatieve invloed mag hebben op het dynamische gedrag van de structuur. Veranderingen in het dynamische gedrag beïnvloed het frequentiebereik en daarmee de effectiviteit van de resonatoren, zoals werd besproken in sectie 2.1.

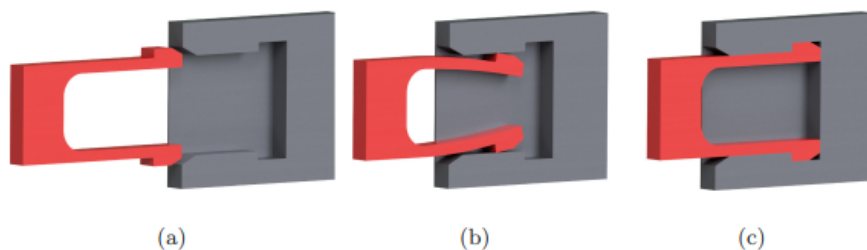
In de literatuur worden verschillende verbindingsmechanismen besproken. Hierbij is het van belang op te merken dat deze verbindingen weliswaar zijn getest op statische verbindingsterkte [40], maar dat er geen gegevens beschikbaar zijn over het dynamische gedrag van de verbindingen. Dit ontbrekende aspect is cruciaal voor om te kunnen valideren of de verbinding gebruikt kan worden voor LRM-structuren. Daarom zal in deze thesis enkele concepten voor paneelstructuren worden uitgewerkt op basis van de meest belovende verbindingsmechanismen en zal het trillingsgedrag van elk concept experimenteel gevalideerd worden. Als volgt worden enkele van de meest voorkomende verbindingsmechanismen uit de literatuur besproken.

2.4.1 Klikverbindingen

Klikverbindingen, ook bekend als *snapfits*, behoren tot de meest gebruikte demonteerbare verbindingen om kunststof onderdelen aan elkaar te bevestigen. Hierbij kunnen componenten geassembleerd en gedemonteerd worden zonder gebruik te maken van eender gereedschap of andere bevestigingsmiddelen. De montage gebeurt door simpelweg twee onderdelen tegen elkaar te drukken waarbij de klikverbindingen zich vastklikken en op hun plaats vergrendeld worden. Dankzij deze eenvoudige montage en demontage tussen panelen of elementen met klikverbindingen, is het gemakkelijk grotere structuren of elementen aan elkaar te bevestigen zonder een extra bewerkingsstap uit te voeren [41].

Cantilever-klikverbinding

Cantilever-klikverbindingen zijn de meest voorkomende vorm van klikverbindingen. Ze zijn eenvoudig te implementeren door hun eenvoudige geometrische vorm. Eveneens kunnen de nodige indrukkrachten tijdens het monteren en uittrekkrachten tijdens het demonteren eenvoudig worden berekend aan de hand van de dimensionering [42]. Figuur 2.8 geeft de werking van een klikverbinding met twee cantilevers weer.

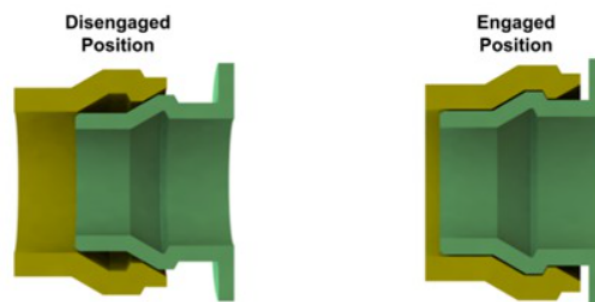


Figuur 2.8: Cantilever-klikverbinding fasen (a) intrede, (b) buiging, (c) klemming [43]

Een cantilever-klikverbinding bestaat uit een uitstekende balk met een uitkraging aan het uiteinde die zich in een bijpassende inkeping van het verbindingscomponent vergrendelt. De montage vindt plaats door de twee componenten tegen elkaar te drukken, waarbij de uitstekende balk tijdelijk elastisch vervormd. Hierdoor kan deze uitkraging worden doorgeschoven in de eindpositie waar het zich vast klikt in de inkeping, wat resulteert in de vergrendeling van beide componenten. Om de twee onderdelen terug van elkaar te scheiden moeten ze met voldoende kracht van elkaar worden getrokken om opnieuw een doorbuiging van de uitstekende balk te veroorzaken, waardoor deze uit de inkeping kan glijden [41]. Deze klikverbinding wordt vooral gebruikt om kunststof onderdelen met elkaar te verbinden maar zijn ook toepasbaar om metalen onderdelen onderling te verbinden, zolang de verplaatsingen binnen het elastische domein van het materiaal blijven [44]. Een eender nadeel van deze verbinding is dat bij langdurige vergrendeling de verbinding kan lossen na verloop van tijd als gevolg van kruip [42].

Ringvormige klikverbinding

Een ringvormige klikverbinding of *annular-snapfit* is een andere bekende klikverbinding waarbij één component is uitgerust van een cirkelvormige of ringvormige pin en het andere component is voorzien met een bijpassende groef. Figuur 2.9 illustreert de werking van deze verbinding.

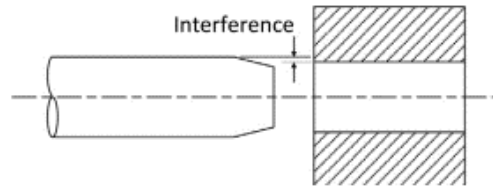


Figuur 2.9: Ringvormige klikverbinding [45]

De twee componenten worden aan elkaar vast gemonteerd door beide tegen elkaar te duwen waarbij de ring onder invloed van de duwkracht zal elastisch vervormen, waardoor deze in de groef klikt. Hierbij ontstaat er een stevige verbinding tussen de twee componenten. Dit type verbinding is geschikt voor zowel kunststof als metalen onderdelen. Niettemin kent het ook enkele nadelen, waaronder een verhoogde spanningsconcentratie en beperkte tolerantie op uitlijning tijdens de montage. Daarnaast kan na verloop van tijd of door overmatig gebruik de pasvorm van deze snapfit verloren gaan als gevolg van kruip. Ringvormige klikverbindingen worden veel toegepast in in de auto- en luchtvaartindustrie, en zijn ook meer en meer terug te vinden in huishoudelijke en elektrische apparaten [46], [47].

Persverbinding

Bij een perspassing is de buitendiameter van de as iets groter dan de binnendiameter van de naaf, wat resulteert in negatieve speling, ook wel interferentie genoemd. Deze interferentie genereert wrijvingskrachten die de twee onderdelen samen houden. Figuur 2.10 geeft dit schematisch weer [48].



Figuur 2.10: Persverbinding [48]

Persverbindingen zijn simpele verbindingen die gebruikt kunnen worden om zowel kunststofonderdelen onderling te verbinden als kunststofonderdelen met metalen onderdelen te verbinden. De uittrekkraft van de persverbinding is onder andere afhankelijk van de interferentie, wrijvingscoëfficiënt en omgevingstemperatuur [48].

Om de insteek of uittrekkraft te verminderen is het mogelijk de as te koelen en/of de naaf te verwarmen, waardoor de interferentie wordt verminderd [48]. Om de uittrekkraft te maximaliseren, moet de hoogst toelaatbare interferentie zonder het overschrijden van de vloeigrens worden gebruikt. Belangrijk om op te merken is dat verschillen in de thermische uitzettingscoëfficiënt tussen de as en de naaf, vooral als deze van metaal is, de interferentie aanzienlijk kunnen verminderen. Daardoor dat veranderingen in de omgevingstemperatuur kunnen leiden tot vermindering van de interferentie- en uittrekkraft. Hiernaast zijn persverbindingen ook gevoelig voor kruip, waardoor de uittrekkraft na verloop van tijd afneemt. Het niveau van de hoeveelheid kruip hangt af van het type polymeer, de aanwezigheid van vulstoffen of additieven, het spanningsniveau en de temperatuur [48].

2.4.2 Schroefverbindingen

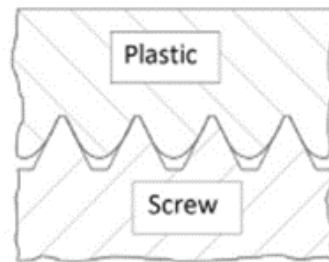
Er zijn diverse bevestigingsmiddelen beschikbaar om kunststoffen te verbinden, waaronder *press-in fasteners* (pluggen), *thread-forming screws* (draadvormende schroeven), *thread-cutting screws* (draadsnijdende schroeven), en *machine screws with threaded inserts* (schroefdraadbussen).

Pluggen

Pluggen hebben elementen die uitsteken vanuit de schacht die tijdens het monteren vervormen en weer terugspringen. Dat helpt om de bevestiging op zijn plaats te houden, maar tijdens demontage raken de uitstekende elementen beschadigd, waardoor de bevestiging niet opnieuw kan worden gebruikt. Pluggen leveren weinig klemkracht, maar ze zijn snel te monteren en eenvoudig te automatiseren [48].

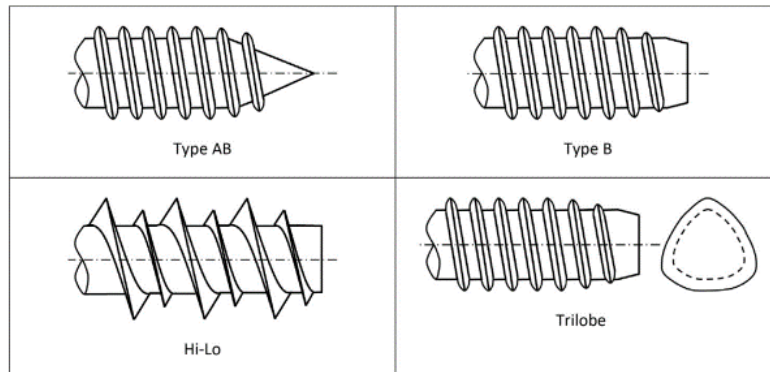
Draadvormende schroeven

Een draadvormende schroef is een zelftappende schroef die bij het monteren materiaal plastisch doet vloeien rond de schroef waardoor via koudvervorming schroefdraad wordt gevormd. Omdat hierbij geen materiaal uit het gat wordt verwijderd, is het essentieel om voldoende ruimte te laten tussen de binnendiameter van de schroef en de binnendiameter van het gat in het kunststof om plaats te bieden aan het verplaatste materiaal. Anders zouden grote interne spanningen kunnen optreden wat kan resulteren in het vroegtijdig falen van de verbinding. Figuur 2.11 geeft de vervorming van het kunststof rond de schroef weer [48].



Figuur 2.11: Vervorming van kunststof rond schroefdraad bij draadvormende schroeven [48]

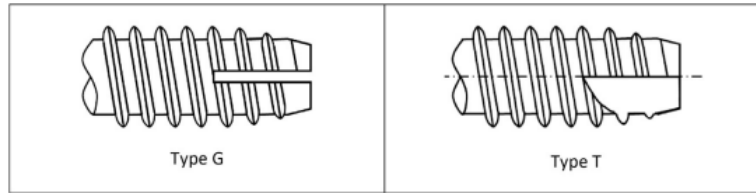
Draadvormende schroeven worden typisch gebruikt voor zachte kunststoffen met een E-modulus van 1,38 GPa of lager [48]. Figuur 2.12 geeft vier typen standaarddraadvormende schroeven weer.



Figuur 2.12: Draadvormende schroeven [48]

Draadsnijdende schroeven

Net zoals draadvormende schroeven zijn draadsnijdende schroeven zelftappende schroeven. De draad van deze schroeven heeft scherpe randen waarmee tijdens het inbrengen van de schroef in het plastic gat, de schroefdraad uit het plastic gat wordt gesneden. Deze schroeven worden gebruikt voor materialen met een E-modulus hoger dan 1,38 GPa [48], maar ook voor versterkte en brosse kunststoffen met een zeer hoge E-modulus waarbij fijnere draden is aanbevolen. Figuur 2.13 toont twee types van standaard draadsnijdende schroeven. Ook is het aanbevolen om een doorloopgat te voorzien of het gat langer te maken dan de schroef om te voorkomen dat snijresten vast komen te zitten, wat tot hoge interne spanningen kan leiden [48].



Figuur 2.13: Draadsnijdende schroeven [48]

Schroefdraadbussen

Schroefdraadbussen worden gebruikt voor verbindingen waarbij herhaalde demontage en hermontage vereist is. De vorige besproken *fastners* zijn hier minder geschikt omdat de plastieke schroefdraden te zwak zijn om meer dan een paar cycli van montage en demontage te weerstaan. Figuur 2.14 geeft vier verschillende soorten schroefdraadbussen weer [48].



Figuur 2.14: Ultrasonische, press-in, mold-in en helical coil schroefdraadbussen [48], [49]

Ultrasonische schroefdraadbussen worden doormiddel van ultrasoonlassen in het product bevestigd. De schroefdraadbus wordt hierbij ondervonden aan ultrasoontrillingen wat leidt tot het verwarmen, smelten of verzachten van het thermoplastische materiaal. Ondertussen wordt de schroefdraadbus in het materiaal gedrukt waarna het ultrasoontrillen stopt en het thermoplastisch materiaal rondom de bus stolt [48], [50].

Helical coil inserts zijn schroefdraadbussen die meteen kunnen worden ingeschroefd in een voorgeapt gat in het kunststof onderdeel. Als alternatief kunnen ook zelftappende schroefdraadbussen met een uitwendige draadvorming of draadsnijdende geometrie worden gebruikt [48].

Press-in schroefdraadbussen worden in het product bevestigd door ze in een voorgeboord gat te duwen, waardoor het kunststof rondom de helicale gekartelde banden stroomt en de schroefdraadbus zich vast in het gat plaatst. Sommige *press-in* schroefdraadbussen hebben uitzettingsgleuven die uitzetten wanneer de schroef erin wordt gedraaid. Bij thermoplastische onderdelen kan ook warmte worden toegepast om het plastic te verzachten waardoor de schroefdraadbus makkelijker en sneller kan worden geplaatst [48].

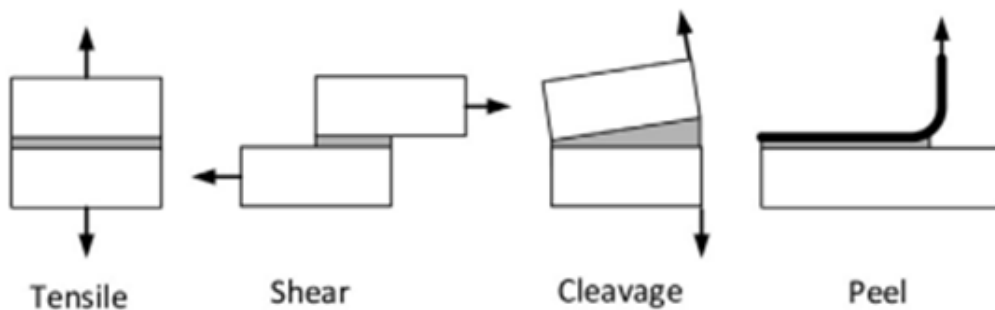
Tenslotte bestaat ook de *mold-in* schroefdraadbus, welke in tegenstelling tot de eerder besproken schroefdraadbussen geen bijkomende nabewerking vereist. Deze schroefdraadbus wordt voorafgaand aan het spuitgietproces in de spuitgietmatrijs geplaatst, waarna het kunststof eromheen wordt geïnjecteerd en stolt tot het eindproduct [50].

Lijmverbindingen

Bij lijmverbindingen worden twee hechteinden aan elkaar gelijmd, waardoor een verbinding met zekere sterkte tussen de onderdelen ontstaat. Thermoharders, thermoplasten en hun composieten kunnen door middel van lijm worden verbonden. Lijmverbindingen zijn echter complex en er bestaan verschillende theorieën/mechanismen over hoe de hechting tot stand komt, waaronder adsorptie, diffusie, elektrostatische aantrekkingskrachten, mechanische vergrendeling, zuur-base-interacties en covalente bindingen. Een combinatie van deze mechanismen is hoogstwaarschijnlijk verantwoordelijk voor de binding. De mate waarin elk bindingsmechanisme optreedt, varieert ook voor verschillende lijmverbindingen. Hierdoor is het zeer complex om de effectieve bindingskracht te berekenen en wordt deze in de meeste gevallen proefondervindelijk bepaald [48], [51], [52].

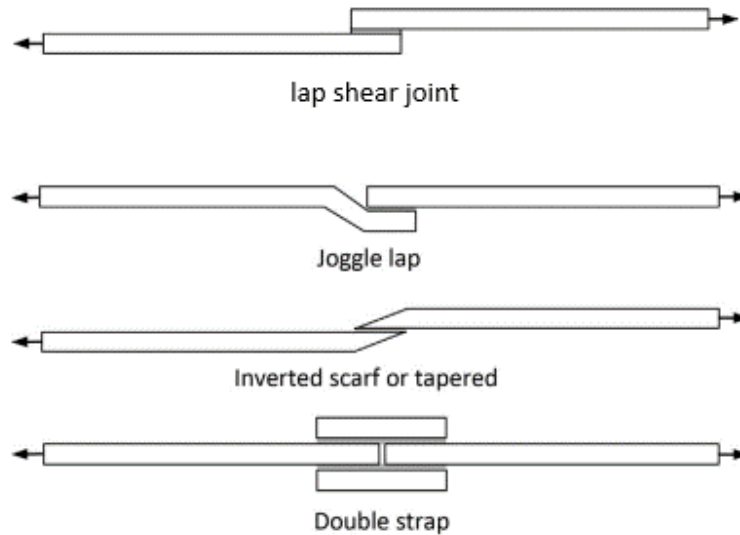
Over het algemeen wordt adsorptie beschouwd als het meest voorkomende en belangrijkste bindingsmechanisme. Het ontstaan van een permanente verbinding wordt toegeschreven aan secundaire moleculaire aantrekkingskrachten, die worden bevorderd door nauw contact tussen de lijm en de hechteinden. Voor een snelle en volledige lijmhechting tussen de te lijmen oppervlakken is het essentieel dat de lijm een lagere viscositeit en oppervlakte-energie bezit in vergelijking met de hechteinden. Zowel thermoplastische kunststoffen als thermoharders kunnen fungeren als geschikte lijmen, maar thermoharders hebben de voorkeur voor de meeste structurele toepassingen vanwege hun lagere viscositeit, hoge gebruikstemperatuur en hoge sterkte en stijfheid [48]. Het lijmproces bestaat uit vier stappen: voorbereiding van het te lijmen oppervlak, het plaatsen van de lijm, het aanbrengen van warmte en/of druk en het uitharden (of afkoelen bij thermoplastische lijmen) van de lijm [48].

Lijmverbindingen kunnen belast worden op trekkrachten, afschuifkrachten, splitsingskrachten en afpelkkrachten. Figuur 2.15 geeft deze belastingsgevallen schematisch weer.



Figuur 2.15: Lijmverbindingen belast door trekkrachten, afschuifkrachten, splitsingskrachten en aftrekkkrachten [48]

In het algemeen zijn lijmverbindingen beter bestand tegen afschuifkrachten dan de drie andere belastingsgevallen. Daarom worden lijmverbindingen ontworpen om de lijm voornamelijk op afschuiving te belasten, terwijl de andere belastingsomstandigheden worden geminimaliseerd. De *lap shear joint* is hier een voorbeeld van [48]. Figuur 2.16 geeft deze verbinding weer.



Figuur 2.16: Vier verschillende ontwerpen van lijmverbindingen [48]

De *lap shear joint* wordt veel toegepast en is eenvoudig te vervaardigen. Een nadeel van deze verbinding is echter de aanwezigheid van spanningsconcentraties aan de uiteinden van de overlap, evenals een buigmoment dat naast hoge schuifspanningen aan de uiteinden van de overlap ook resulteert in aanzienlijke trek- en afschuifspanningen [48].

De andere drie lijmverbindingen kunnen een aantal van deze beperkingen overwinnen. De *joggle lap* elimineert namelijk het buigmoment, terwijl de *inverted scarf or tapered* de spanningsconcentraties aan het uiteinde van de overlap vermindert. Hiernaast is er ook nog de double strap verbinding (De dubbele bandverbinding). Deze verbinding elimineert het buigmoment en vergroot het gewrichtsoppervlak, wat resulteert in veel sterkere verbindingen dan de *joggle lap* [48].

Het is belangrijk om te beseffen dat externe factoren de sterkte van lijmverbindingen kunnen aantasten. Bij sommige thermohardende lijmen kunnen omgevingen met hoge luchtvochtigheid en temperatuur onherstelbare schade veroorzaken. Toch blijft het gebruik van lijmverbindingen in veel gevallen voordelig. Met een goed ontwerp van de verbinding, waarbij stressconcentraties worden geminimaliseerd, zorgt lijm voor een gelijkmatigere belastingsoverdracht. Bovendien voegt lijm, in tegenstelling tot bevestigingsmiddelen, weinig gewicht toe. Met grote verbindingsoppervlakken kan lijm ook zeer hoge belastingen weerstaan [48].

2.4.3 Lasverbindingen

Bij het lassen ontstaat een stevige verbinding doordat de te verbinden oppervlakken worden verhit, waardoor ze verzachten of smelten. Hierdoor zullen beide oppervlakken zich aan elkaar hechten door het spontane optreden van stroming, diffusie en ketenverstrengeling. Na dit proces wordt de verbinding afgekoeld, waardoor deze stolt en zijn sterkte verkrijgt. Lassen kan daarom ook alleen worden toegepast op thermoplastische materialen en thermoplastische composieten en niet op andere kunststoffen. In sommige gevallen kan lassen worden gebruikt om ongelijksoortige thermoplasten met elkaar te verbinden, op voorwaarde dat ze onderling mengbaar zijn [48]. Lassen is een aantrekkelijke en economische verbindingsmethode omdat er geen nieuwe materialen worden geïntroduceerd op het grensvlak, spanningconcentraties kunnen worden geminimaliseerd en hoge belastingen over de verbinding kunnen worden overgebracht. Afhankelijk van het lasproces en de grootte van de onderdelen, is een cyclustijd van een fractie van een seconde tot enkele minuten typisch [48]. Het lasproces kan in vijf stappen worden verdeeld: oppervlaktevoorbereiding, verwarming, persen, diffusie en koeling.

Oppervlaktevoorbereiding omvat gewoonlijk het reinigen of ontvetten, maar kan ook mechanische bewerking inhouden. De mechanische voorbewerkingen zijn soms nodig om het verbindingsgebied voor te bereiden op een specifiek ontwerp, zoals een groef of afschuining, of om de onderdelen eenvoudig recht te maken of ervoor te zorgen dat de lasoppervlakken vlak zijn [48].

Vervolgens worden thermoplastische onderdelen plaatselijk verwarmd ter hoogte van het lasgebied om de aaneen te lassen oppervlakken te verzachten of smelten. Er zijn verschillende oppervlakte verwarmingsmethoden zoals geleiding, convectie of stralingsverwarming [48].

Hierna worden de gesmolten of verzachte oppervlakken samengeperst om de aanwezige asperiteiten (microscopische onregelmatigheden of ruwheden op het oppervlak) te vervormen en om ingesloten gassen te verdrijven, wat resulteert in nauw contact tussen de materialen. Ook is het belangrijk om op te merken dat additieven of versterkingen de effectieve viscositeit van de smelt kunnen verhogen waardoor het lasproces langer duurt [48].

Tenslotte moet de las terug worden afgekoeld waarbij het thermoplastische materiaal opnieuw stolt, wat de las structurele stabiliteit geeft. Gedurende het koelen worden de definitieve kenmerken van de gelaste regio bepaald, samen met de mate van resterende spanningen en vervormingen in de onderdelen [48].

Ten slotte zijn amorfe thermoplasten veel beter te lassen dan semi-kristallijne thermoplasten. Amorfe kunststoffen hebben namelijk geen geordende moleculaire structuren zoals kristallijne gebieden waardoor ze op moleculair niveau beter samen kunnen smelten. Semi-kristallijne kunststoffen daarentegen hebben wel kristallijne gebieden met een scherp smeltpunt. Semi-kristallijne kunststoffen ondergaan geen geleidelijke verzachting bij toenemende temperaturen zoals amorfe kunststoffen, maar behouden hun vaste toestand totdat het smeltpunt overschreden wordt, waarna ze snel veranderen in een viskeuze vloeistof [53].

Hoofdstuk 3

Ontwikkeling prototypes

Ten eerste wordt in dit hoofdstuk nadruk gelegd op de verschillende designvereisten voor de modulaire panelen. Vervolgens wordt een selectie gemaakt van de verschillende besproken verbindingstypen uit de literatuurstudie. Op basis van deze selectie worden de meest interessante verbindingstypes gebruikt voor het ontwerpen van modulaire paneeltjes. Erna wordt een indicatie gemaakt van de mogelijk geschikte kunststoffen voor het vervaardigen van de modulaire panelen waarbij de materiaaleisen voor klikverbindingen en LRM-structuren behandeld worden. Na een materiaalindicatie en de keuze van de verbindingstype, wordt een kort overzicht gegeven van de gevolgde ontwerpspecificaties en de ontwikkelde prototypes. Tot slot wordt kort ingegaan op de procesparameters van *fused deposition modeling* voor de ontwikkeling en het testen van de prototypes.

3.1 Designvereisten

Bij het ontwerpen van de modulaire panelen moet rekening worden gehouden met de monteren en demonteerbaarheid, massaminimalisatie, kostenefficiëntie en spuitgietbaarheid. Het doel is namelijk om de panelen uiteindelijk te kunnen spuitgieten op conventionele spuitgietmachines. Hiervoor is het noodzakelijk dat het ontwerp in lijn ligt met de ontwerpregels van deze spuitgietmachines, zoals een maximale wanddikte van vier millimeter en andere conventies. Deze staan opgesomd in hoofdstuk 2.2.4. Verder is kostenefficiëntie van groot belang, wat inhoudt dat het ontwerp van de verbindingmechanisme moet worden beperkt in complexiteit. Dit omvat ook het vermijden van ondersnijdingen die moeilijk te realiseren zijn met spuitgieten. In dergelijke situaties moet de matrijs beweegbare componenten bevatten, zoals bijvoorbeeld glijdende delen, nokken en beweegbare kernen. Tenslotte moeten de panelen monteren- en demonteerbaar zijn zonder te veel extra productie stappen toe te passen. Hierbij mag de structuur de geluids- en trillingsonderdrukkingseigenschappen van de structuur niet negatief beïnvloeden. Verder is vereist dat de verbindingen voldoende klemkracht veroorzaken, evenals het maximaliseren van het contactoppervlak tussen de panelen en het vermijden van luchtspleten. Ten slotte is het aangeraden dat de verbindingmechanisme zich symmetrisch gedragen, dit zodat het paneel zich uniform gedraagt ongeacht de richting van de aangelegde belasting.

3.2 Conceptkeuze

Voor de productie van lichte LRM-structuren op basis van modulaire gespuitsgiete panelen is het noodzakelijk te voldoen aan de eisen van in het deel 3.1. Met deze vereisten worden de onderzochte verbindingsmechanismen uit de literatuurstudie 2.4 onderling vergeleken. De vergeleken aspecten staan opgesomd en bepaald in tabel 3.1.

Tabel 3.1: Conclusie soorten verbindingen

Type verbinding	Gewicht	Productie	Demonteerbaar	Levensduur
Cantilever-klikverbinding	+	+	+	-
Ringvormige klikverbinding	+	-	+	-
Persverbinding	+	-	+	-
Schroefverbinding	-	-	+	+
Lijmverbinding	+	-	-	-
Lasverbinding	+	-	-	+

Tabel 3.2: Legende van tabel 3.3

Symbool	Gewicht	Productiekost	Demonteerbaar	Levensduur
+	Bijna geen massa toevoeging door de verbinding	Enkel spuitgietkosten	Wel demonteerbaar	Geen verzwakking van de verbinding over tijd
-	Massa toevoeging door de verbinding	Spuitgietkosten + extra bewerkingskosten	Niet demonteerbaar	Verzwakking van de verbinding over tijd

Uit tabel 3.1 valt op dat de twee type klikverbindingen en de persverbinding het beste scoren op de opgestelde criteria. De schroefverbindingen, lijmverbindingen en lasverbindingen scoren minder door hun grotere productiekosten vanwege de extra bewerkingen na het spuitgieten. Daarnaast zijn lijm- en lasverbindingen niet demonteerbaar en zorgen schroefverbindingen voor een ongewenste massa toevoeging. Daarentegen kan massatoevoeging vermeden worden bij klikverbindingen door in de ontwerpfasen zich te focussen op massaminimalisatie. Ook is montage en hermontage mogelijk voor de twee klikverbindingen en de persverbinding. Een nadeel van deze verbindingen is dat ze verzwakken over tijd ten gevolge van kruip. Ook hebben de ringvormige klikverbindingen en persverbindingen een grotere productiekost door de aanwezigheid van ondersnijdingen. Daarentegen bezitten cantilever-klikverbindingen geen ondersnijdingen en liggen de matrijs en dus ook de productiekosten lager voor het spuitgieten van deze verbinding. Er kan worden besloten dat cantilever-klikverbindingen het meest gunstig lijken.

3.2.1 Materiaal eisen klikverbinding

De eigenschappen, levensduur en doeltreffendheid van klikverbindingen zijn sterk afhankelijk van het gebruikte kunststof. Door het brede assortiment aan kunststoffen dat tegenwoordig verkrijgbaar is, is de keuze voor het meest geschikte kunststof afhankelijk van de eisen die verbonden zijn met de toepassing, namelijk een kunststof verbinding wat demontage en hermontage mogelijk maakt. De belangrijkste parameters hiervoor zijn gunstige verwerkbaarheid, voldoende sterkte en stijfheid, lage wrijvingscoëfficiënt en relatief hoge rek [54]. Dit zijn de belangrijkste eigenschappen voor klikverbindingen vervaardigd uit kunststof. Andere belangrijke selectiecriteria voor de keuze van het geschikt kunststof zijn minimale kruipneiging en hoge dimensionale stabiliteit over een relatief breed temperatuurbereik. Afhankelijk van de toepassing moet de kunststof bestand zijn tegen omgevingsinvloeden, zoals vocht om het zwellingseffect te minimaliseren dat vorm- en maatafwijkingen veroorzaakt. De uiteindelijke levensduur en doeltreffendheid van het klikverbinding is nauw verbonden met de aanvaardbare spanning van de geselecteerd kunststof en de dimensionering van het klikverbinding.

Met behulp van de polymeerdriehoek dat beschreven staat in het hoofdstuk literatuurstudie 2.3.3 is een eerste selectie mogelijk van het breed scala aan kunststoffen op basis van de kost en de eigenschappen van de kunststoffen. Daarbuiten zijn er verdere selecties mogelijk door de zo net besproken vereiste eigenschappen voor klikverbinding. De meest voornaamste eigenschappen staan beschreven in tabel 3.3.

Tabel 3.3: Vergelijking aspecten polymeren [55]-[56]

Polymeren	Spuitsgietbaarheid	Krimp [%]	Stijfheid [GPa]	Rek [%]
ABS(acrylonitril-butadien-styreen)	Excellent	0,5 - 0,8	2,21 - 2,62	15,3 - 20,9
PC(polycarbonaat)	Acceptabel	0,5 - 0,7	2,32 - 2,44	110 - 150
PC-ABS(polycarbonaat-acrylonitril-butadien-styreen blend)	Acceptabel	0,5 - 0,8	2,41 - 2,62	50 - 125
PP(polypropyleen)	Excellent	1,4 - 1,96	1,37 - 1,58	52,1 - 232
PS(polystyreen)	Excellent	0,4 - 0,7	3 - 3,5	1,2 - 2,5
HDPE(hoge-dichtheid polyethyleen)	Excellent	1,5 - 4	1,07 - 1,09	1,2 - 2,5
PMMA(polymethylmethacrylaat)	Acceptabel	0,1 - 0,8	2,24 - 3,24	2 - 5,5

De waarden van in tabel 3.3 zijn richtwaarde voor de homogene variatie van de aangehaalde kunststoffen. Omdat door toevoeging van kunststoffen of additieve sommige eigenschappen sterk verbeteren tegenover de basisvorm. Maar doordat de materiaalkeuze een richtlijn is werd enkel rekening gehouden met de homogene gevallen. Voor de PC-ABS blend is een massa percentage van 90% ABS en 10% PC.

De spuitgietbaarheid van de verschillende materialen in tabel 3.3 is geëvalueerd en beschreven met behulp van de commerciële software Granta EduPack. Hierbij worden diverse factoren in overweging genomen, zoals thermische krimp, materiaal viscositeit, degradatie van het materiaal onder invloed van hoge temperaturen, enzovoort.

De krimp van in tabel 3.3 geeft aan dat HDPE en PP minstens dubbel zo groot is als de krimp van de andere kunststoffen. De grotere krimp van HDPE en PP kan leiden tot dimensionale instabiliteit, wat nadelig is voor de precisie en duurzaamheid van de verbindingen.

Voor de stijfheid van de verschillende kunststoffen kan afeleid worden dat deze vergelijkbaar is, echter vertonen PP en HDPE een halvering in stijfheid tegenover ABS, PC, PMMA en PC-ABS. PS daarentegen toont een verhoging van de stijfheid met de helft. Verder is er een aanzienlijk verschil in rek tussen de verschillende kunststoffen. Dit is echter belangrijk omdat vormgesloten verbindingen tot stand komen door een elastische vervorming. Het verbindingmechanisme mag daarom niet breken tijdens deze vervorming en blijft tijdens de vervorming ideaal in de elastische fase.

Uit deze bevindingen van tabel 3.3 lijken de polymeren ABS, PC en de blend PC-ABS het meest interessant.

3.2.2 Materiaal eisen LRM-structuur

Na de bespreking van de vereisten eigenschappen van kunststoffen voor klikverbindingen. Moet het kunststof ook voldoen aan de eigenschappen die de invloeden op het voortplantingsgedrag van trillingen niet of beperkt beïnvloed. De materiaalkeuzes van in de thesis is niet de hoofddoelstelling maar geeft een indicatie van de mogelijke geschikte veel gebruikte kunststoffen voor het spuitgieten van modulaire LRM-hoststructuren.

Een eigenschap die de trillingsvoortplanting beïnvloedt, is de trillingsdissipatie ($\tan \delta$) [57]. Dit is de graad waarbij het materiaal de trillingsenergie omzet naar warmte [58]. Deze waarde wordt voor de drie beste kunststoffen van het deel 3.2.1 vergeleken met staal in tabel 3.4.

Tabel 3.4: Vergelijking aspecten kunststoffen voor LRM-structuur

Materialen	ABS	PC	PC-ABS	Staal
trillings dissipatie ($\tan \delta$)	0,0153 – 0,0181	0,0164 – 0,0172	0,0153 – 0,0166	0,0006 – 0,001

De trillingsdissipatie ($\tan \delta$) van in tabel 3.4 geeft aan in welke mate het materiaal energie dissipeert waaronder omzetting in warmte [58]. Voor LRM's is het belangrijk dat de trillingsvoortplanting niet wordt verstoord, wat betekent dat een zo laag mogelijke waarde voor de trillingsdissipatie gewenst is.

De waarden van in tabel 3.4 duiden aan dat het verschil tussen de verschillende kunststoffen beperkt is. Maar dat de het verschil met staal substantieel is en dus op duid dat de kunststoffen de trillingsvoortplanting meer verhindert dan staal.

Vergelijking van tabel 3.3 en tabel 3.4 toont aan dat er geen duidelijke beste optie is, aangezien de drie verschillende materialen zowel voldoen aan de eisen van de klikverbinding als aan die voor de LRM-structuur. Zoals eerder vermeld is deze vergelijking een indicatie voor een materiaalkeuze die wat zowel geschikt zijn voor de verbindingselementen en LRM-structuren. Dit doordat het materiaal waarmee gespuutgiet word bepaalt is afhankelijk van de aanwezige voorraad aan kunststoffen op het technologie centrum.

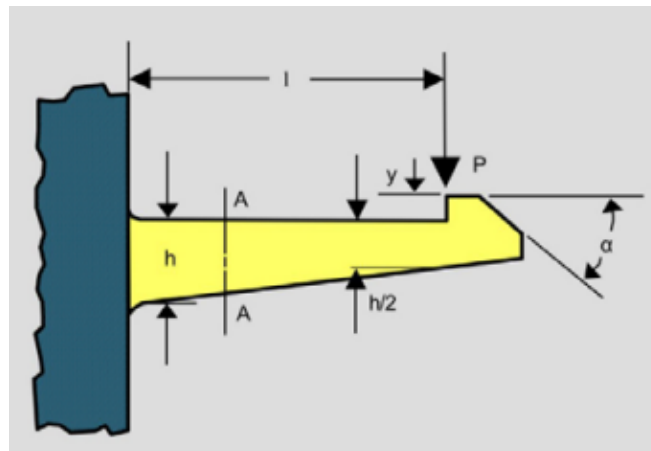
3.3 Ontwerpen van prototypes

Uit het voorgaande hoofdstuk 3.2 is gebleken dat de cantilever-klikverbinding het meest geschikte verbindingsmechanisme is voor de modulaire LRM's. Met deze klikverbindingen kunnen stevige, modulaire verbindingen tussen de panelen gerealiseerd worden, die ook eenvoudig te spuitgieten zijn. Desondanks is er ook onderzoek gedaan naar andere, complexere klikverbindingen die eveneens geschikt lijken en mogelijk een nog stevigere verbinding tussen de panelen kunnen realiseren. Dit om te onderzoeken of deze verbindingen met de nodige aanpassingen in het ontwerp toch relatief makkelijk gespuitsgiet kunnen worden. Dit heeft geleid tot de ontwikkeling van een nieuwe variant van de ringvormige klikverbinding.

Bij het ontwerpen en dimensioneren van deze verbindingen werd in eerste instantie gebruik gemaakt van de literatuur om bestaande ontwerpsspecificaties te kunnen hanteren. Nadien werden de concepten iteratief aangepast om afwijkingen van het 3D-printproces op te vangen en de verbinding beter te laten klikken. De ontwerpsspecificaties van de verschillende verbindingen staan uitgewerkt in hoofdstukken 3.3.1 en 3.3.2.

3.3.1 Ontwerpsspecificaties cantilever-klikverbinding

Voor het ontwerpen van cantilever-klikverbindingen is het aangeraden om de dikte h lineair te laten afnemen zodat de dikte h aan de haak de helft is van de dikte aan de basis. Door deze designspecificatie toe te passen ontstaat er een betere verhouding tussen de spanning en hoeveelheid materiaal over de gehele cantilever [42]. Figuur 3.1 toont de dimensionering de cantilever met deze designspecificatie.

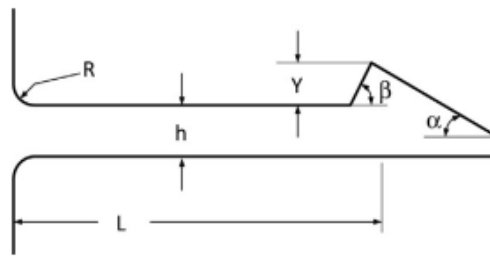


Figuur 3.1: Dimensionering cantilever [42]

Voor het verder dimensioneren van de cantilever is het belangrijk om de nodige doorbuiging bij het monteren en demonteren kleiner te dimensioneren dan de maximale toegestane doorbuiging y . De maximale toegestane doorbuiging is afhankelijk van de vorm en de toelaatbare rek ε van het gebruikte materiaal en kan worden berekend met onderstaande formule 3.1 [42].

$$y = 1,09 * \frac{(\varepsilon * l^2)}{h} \quad (3.1)$$

Andere belangrijke dimensies zijn de hellingshoeken α en β aan het uiteinde van de cantilever getoond in figuur 3.2. Deze bepalen namelijk de vereiste krachten voor het inklikken en uitklikken.



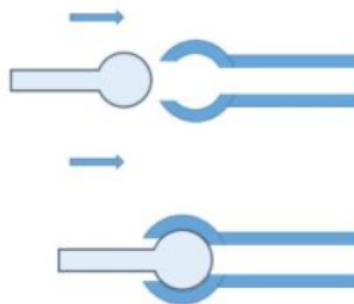
Figuur 3.2: Hellingshoeken van de cantilever [42]

In figuur 3.2 zijn de hellingshoeken met betrekking tot de inklikkracht- en uitklikkracht respectievelijk aangeduid met α en β . Hoe scherper deze hoeken zijn, hoe groter de vereiste inklik- en uitklikkracht [48]. Om een snelle en gemakkelijke montage te garanderen, moet de hellingshoek α worden geminimaliseerd om de inklikkracht te verminderen. De hellingshoek β daarentegen moet bijna 90° zijn om een stevige verbinding te realiseren die niet zomaar losklikt.

3.3.2 Ontwerpspecificaties ringvormige klikverbindingen

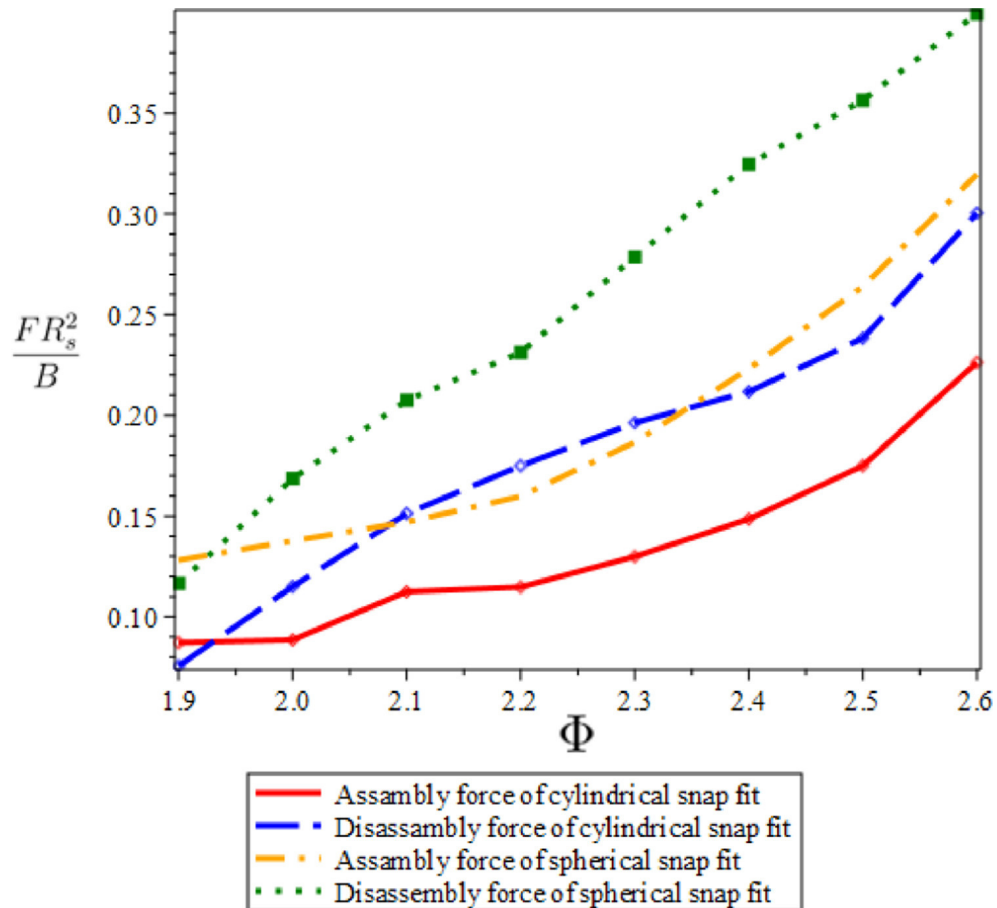
De tweede soort klikverbinding is een variant van de ringvormige klikverbinding, die mogelijk een stevigere verbinding kan realiseren dan de cantilever-klikverbinding. Bij het oorspronkelijke ontwerp van de ringvormige klikverbinding wordt een bolvormige pen vastgeklikt in een bijpassende groef (zie figuur 2.9). Een nadeel hiervan is de complexe ondersnijding van de bolvormige pennen, wat de vervaardiging bemoeilijkt. Daarnaast bestaat de mogelijkheid dat de klikverbinding na montage kan roteren rond zijn as, waardoor extra uitstulpingen en vlakken noodzakelijk zijn om deze rotatie te verhinderen. Bovendien kan de luchtspleet een probleem vormen bij de prototypen.

Door in plaats van een bolvormig lichaam een cilindrisch lichaam over de gehele lengte te gebruiken, treedt geen rotatie op rond de lengterichting, en is de ondersnijding minder complex. Doordat de matrijs vervaardigd dient te worden in de werkplaats van de UCLL, op een 2,5 assige CNC-machine, is het ook belangrijk om complexiteit te beperken wegens de beperkingen van de machine. Figuur 3.3 toont het zijaanzicht van deze verbinding.



Figuur 3.3: Zijaanzicht van de cilindrische fit met links het cilindrisch lichaam dat in de bijhorende bekken rechts vastklikt [59]

Bij het ontwerpen van deze verbinding is het belangrijk dat er rekening wordt gehouden met de uitklikkracht van de verbinding. Deze kracht is minimaal als de verbinding vormgesloten is. Hierbij is de straal van het cilindrisch lichaam gelijk aan de inwendige straal van de klemmende bekken. Echter als de straal van het cilindrisch lichaam groter is, dan vormt zich er een krachtgesloten verbinding. Hierbij wordt een continue drukkracht uitgeoefend op het cilindrisch lichaam. Dit zorgt dan voor een verhoogde inklik- en uitklikkracht. De invloed hiervan staat weergegeven als de rode en blauwe lijnen in figuur 3.4.



Figuur 3.4: Verband tussen dimensionering en krachtenwerking van de cilindrische fit [40]

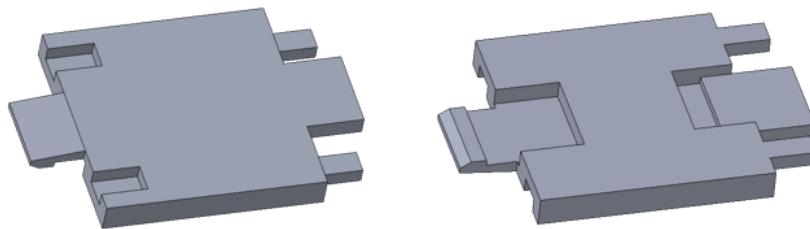
In figuur 3.4 staat de Φ voor de openingshoek in radialen, de B voor de breedte van de verbinding, de R_s voor de inwendige straal en F voor de uitgeoefende kracht [40].

3.4 Ontwikkelde prototypes

Bij het ontwerpen werd besloten om de prototypes van de paneeltjes slechts aan twee zijden te voorzien van een verbindingsmechanisme, waardoor enkel balkstructuren kunnen worden opgebouwd. Deze ontwerpkeuze maakt het 3D-printen van de prototypes aanzienlijk eenvoudiger en sneller. Hiernaast vereisen de dynamische testen nog geen plaatstructuren en zijn balkstructuren voldoende voor de testfase.

3.4.1 Enkele cantilever

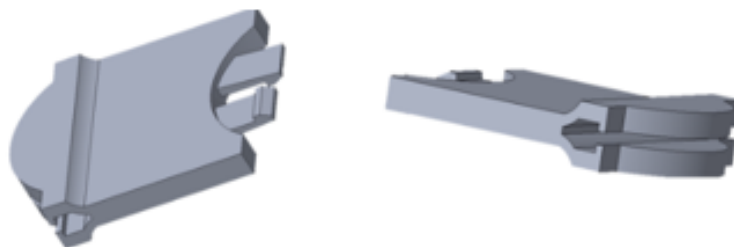
Bij het ontwerpen van de enkele cantilever is vooral gefocust om het ontwerp spuitgiettechnisch simpel te houden en complexe vormen of ondersnijdingen te vermijden. Hierdoor is deze verbinding ook relatief gemakkelijk te spuitgieten. Deze klikverbinding is uitgerust met één centrale cantilever die verantwoordelijk is voor de nodige klemkracht bij assemblage (fig. 3.5). Voor deze cantilever is aan het ander uiteinde een uitsparing voorzien met een extra draagvlak om een groter contactoppervlak te creëren dat zorgt voor grotere stijfheid van de verbinding. Hiernaast is de verbinding ook uitgerust met twee steunbenen, die axiale rotatie tussen de panelen verhinderen. Een eerder nadeel is dat ter hoogte van de uitsparing van de cantilever ondersnijding optreedt. Deze ondersnijding is echter makkelijk te verhelpen door het scheidingsvlak van de matrijzen te verleggen, waardoor het concept relatief eenvoudig te spuitgieten blijft. Een nadeel van deze verbinding is het niet symmetrisch zijn van de kracht werking uitgeoefend door de cantilever waardoor de richting van de aangelegde kracht een andere effect heeft op het gedrag van de plaatstructuur.



Figuur 3.5: CAD-model van het enkele cantilever concept.

3.4.2 Dubbele cantilever

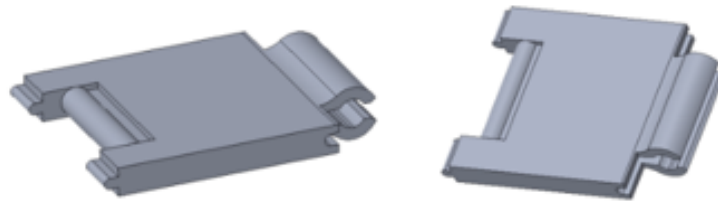
De tweede ontworpen klikverbinding is de Dubbele cantilever (fig. 3.6). Deze klikverbinding klikt zich vast aan de hand van twee cantilevers. Dit ontwerp is iets complexer dan het ontwerp van de enkele cantilever, maar biedt mogelijk een beter connectie doordat de verbinding zowel langs boven als onder vast klikt. Hierdoor zullen de panelen zich in een plaatstructuur meer uniform gedragen, ongeacht de richting van de aangelegde kracht. Een nadeel van deze verbinding is dat het moeilijker spuitgietbaar is omwille van de ondersnijding van de gleuf. Hiervoor zou de matrijs moeten worden uitgerust met een extra bewegende sleuf.



Figuur 3.6: CAD-model van het dubbele cantilever concept.

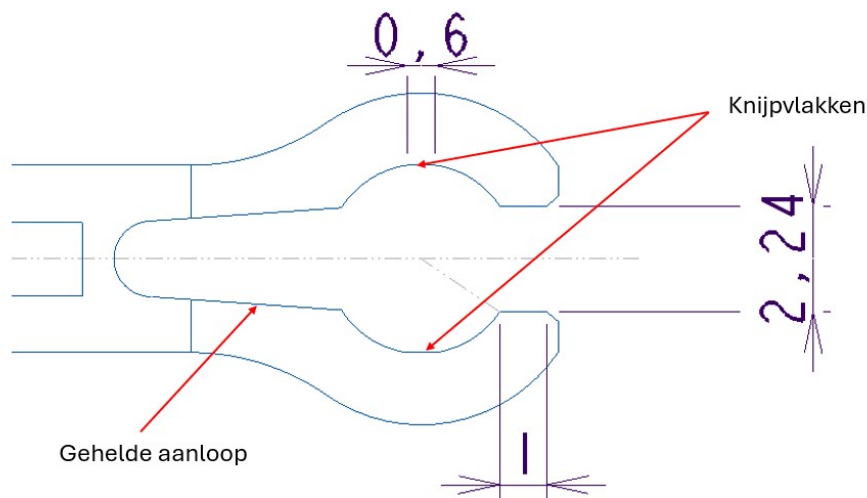
3.4.3 Cilindrische fit

De derde klikverbinding is de cilindrische fit (fig. 3.7). In tegenstelling tot de vorige twee verbindingen is dit geen cantilever-klikverbinding maar een variant van de cilindrische klikverbinding. Bij het ontwerpen van dit concept lag de focus voornamelijk op het bereiken van een zo groot mogelijke klemkracht en contactoppervlak tussen de panelen waarbij er minder nadruk werd gelegd op het spuitgiettechnisch eenvoudig houden van het ontwerp. Deze klikverbinding is aan één zijde uitgerust met twee ronde bekken die zich bij montage vastklikken rond het cilindrisch lichaam van de andere zijde. Deze krachtgesloten verbinding zorgt voor de nodige klemkracht en zorgt voor een zo groot mogelijk contactoppervlak tussen de panelen. Hiernaast zijn aan weers kanten van het cilindrisch lichaam extra uitstulpingen voorzien om axiale rotatie tussen de panelen te verhinderen. Een voordeel van deze verbinding ten opzichte van de vorige twee concepten is het grotere contactoppervlak tussen de panelen, wat mogelijk resulteert in een beter dynamisch gedrag voor het gebruik als LRM. Maar het nadeel van deze verbinding is dat het omwille van de ondersnijding van de gleuf moeilijker spuitgietbaar is.



Figuur 3.7: CAD-model van het concept met cilindrische fit

Voor de vorm en grootte van de cilindrische bekken is gekozen om een binnenstraal te gebruiken die gelijk is aan de buitenstraal van het cilindrische lichaam. Dit voorkomt dat de in- en uitdrukkrachten van de verbinding te groot worden door het grote contactoppervlak. Er zijn echter wel twee knijpvlakken toegevoegd aan de binnenstraal van de cilindrische bekken zodat de verbinding krachtgesloten is. Dit staat weergegeven in figuur 3.8.



Figuur 3.8: 2D-tekening van de cilindrische bekken van de cilindrische fit met aanduiding

Deze knijpvlakken zorgen voor een krachtgesloten verbinding tussen de elementen en een in- en uitdrukkracht die acceptabel is voor de toepassing. Daarnaast is in plaats van de rechte aanloop naar de cilindrische bekken zoals in figuur 3.3 een gehelde aanloop (fig. 3.8) gekozen om spanningsconcentraties te verminderen.

3.5 Productie van prototypes

De productie van de prototypes is uitgevoerd met behulp van *fused deposition modeling* (FDM), ook bekend als 3D-printen. Deze additieve productiemethode wordt veel toegepast voor het vervaardigen van prototypes. De principiële werking van FDM houdt in dat het eindproduct laag per laag opgebouwd wordt. De procesparameters voor FDM omvatten typisch zaken als laagdikte, spuitmondtemperatuur, printsnelheid en vullingsdichtheid, die allemaal een significante invloed hebben op de kwaliteit en eigenschappen van het geproduceerde onderdeel. De bepaling van deze parameters gebeurt door middel van parameterbruggen. Hierbij wordt per procesparameter een reeks bruggen geprint. De productie van de prototypes gebeurt met de 3D-printer Ultimaker S3.

3.5.1 FDM karakteristieken eindproduct

Door de opbouw van FDM-producten in lagen is de stijfheid en taaiheid van het eindproduct aanzienlijk beïnvloed door de printrichting, wat vereist dat deze richting wordt afgestemd op de verwachte belasting. Deze afhankelijkheid kan echter beperkend zijn, aangezien het printen van cirkelvormige of hellende oppervlakken leidt tot zichtbare treden en mogelijk invloed heeft op de functionele prestaties van de structuur. Het verminderen van de laagdikte kan de imperfecties verminderen, maar in sommige gevallen blijft het een beperkende factor, met name bij het testen van vaste passing.

Naast geometrische herhaalbaarheid zijn er andere factoren die van invloed zijn op de representativiteit van de proeven, zoals de gewichtsverdeling. Deze verdeling is sterk afhankelijk van de spuitmondtemperatuur, printsnelheid en het materiaal. Daarom is het cruciaal dat de ingestelde parameters zoals beschreven in de sectie 3.5.2 nauwkeurig worden toegepast [60].

3.5.2 FDM procesparameters

Zoals de alinea hierboven staat vermeld is het FDM-proces sterk configureerbaar en is het belangrijk dat de procesparameters correct ingesteld zijn zodat de prototypes met een hoge nauwkeurigheid en reproduceerbaarheid worden geproduceerd, waarbij de geometrie en afmetingen nauwkeurig overeenkomen met het CAD-model. Leveranciers van het print materiaal geven de procesparameterwaarden in een bereik. Dit omdat de optimale parameterwaarden verschillend is per printer en printomgeving. Daarom worden voor de printsnelheid, spuitmondtemperatuur en ventilatorsnelheid parameterbruggen gebruikt om hun optimale instelwaarden experimenteel te bepalen voor de gebruikte printer. Deze parameters werden verkozen doordat dit belangrijke parameters zijn in het FDM-proces maar ook omdat de ultimaker software een aantal parameterbruggen voorgeprogrammeerd heeft waardoor de keuze beperkt is. Deze parameterbruggen bestaande uit verschillende "leggers", waarbij elke legger geprint is met een andere waarde voor de betreffende procesparameter. De leggers die er visueel het beste uitziet, heeft de optimaal ingestelde waarde voor de parameter. De parameterbruggen van de betreffende parameters staan weergegeven in figuur 3.9.



Figuur 3.9: Parameterbruggen voor de procesparameters van FDM

De beste resultaten voor de betreffende parameters in figuur 3.9 staan opgesomd in tabel 3.5.

Tabel 3.5: Gebruikte FDM procesparameters voor het printen van ABS

Procesparameter	Instelwaarde
Printsnelheid [mm/s]	50
Spuitmondtemperatuur [°C]	220
Ventilatorsnelheid [%]	100
Bedtemperatuur [°C]	90
Opvulpatroon	Triangles
Opvullingsgraad [%]	30

De parameters in tabel 3.5, die niet direct zijn vastgesteld met behulp van parameterbruggen, zoals de bedtemperatuur, opvulpatroon en opvullingsgraad zijn iteratief vastgesteld of in het geval van het opvulpatroon werd de stevigste patroon verkozen bij een opvulling van 30% [61]. Het evaluatiecriterium van het iteratieproces was gericht op het produceren van een prototypes die zo reproduceerbaar mogelijk is. Dit impliceert dat kromtrekken, gewichtsverdeling en geometrische imperfecties gelijkmatig en beperkt moeten blijven.

3.5.3 FDM richtlijnen voor printen met ABS

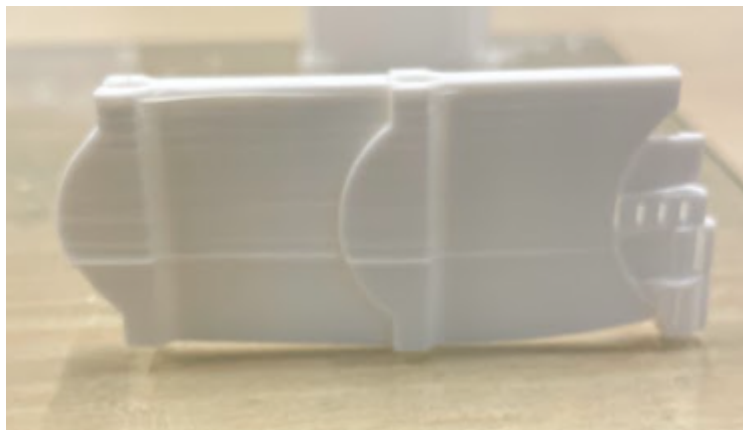
Naast de besproken procesparameters zijn er bepaalde richtlijnen en maatgevingen voor het FDM-printen van klikverbindingen uit ABS. Zo moet de afstand tussen elementen die in elkaar moeten schuiven een speling van minstens 0,4 millimeter hebben tussen de oppervlakken van de verschillende elementen. Deze aanzienlijke speling is noodzakelijk vanwege de neiging van ABS om krom te trekken. Daarnaast is het kleinste detail maximaal 0,3 millimeter groot, wat beperkingen kan opleggen aan kleine onderdelen en vlakgroottes. Voor de wanddikte wordt een minimale waarde van 1,2 millimeter aanbevolen voor ABS. Het is belangrijk om deze richtlijnen [62] te volgen voor het succesvol printen van de prototypes in ABS.

3.5.4 FDM productiefouten

Gedurende het 3D-printen van de verschillende concepten en iteraties op het ontwerp traden diverse fouten op. Het meest voorkomende probleem was het sterk kromtrekken van de rechtop geprinte prototypes (fig. 3.10). Dit kromtrekken wordt veroorzaakt door de ongelijkmatige afkoeling van de printlagen. Zo kwam het kromtrekken vooral vanonder voor, omdat deze lagen langzamer afkoelden door het verwarmde printbed tegenover de lagen erboven. Dit resulteert in het kromtrekken naar boven.

Om dit probleem te verminderen, kan de omgevingstemperatuur verhoogd worden of de printer geklimatiseerd worden. Echter, waren deze oplossingen niet toepasbaar vanwege de open bovenkant van de Ultimaker S3 waardoor klimatisatie bijna onmogelijk was. Een andere oplossing is het aanbrengen van een sterke adhesie op het printbed, zodat de onderste lagen stevig vast blijven zitten. Dit werd gedaan bij elke print en hielp bij tot een beter resultaat maar het kromtrekken trad nog steeds op.

Ten slotte bleek de meest effectieve oplossing het sequentieel printen van de onderdelen te zijn. Dit houdt in dat elk onderdeel volledig wordt afgeprint voordat aan het volgende onderdeel wordt begonnen, waardoor de afkoeling tussen lagen minimaal is. Het nadeel van deze methode is echter dat minder onderdelen tegelijk op het printbed geplaatst kunnen worden, omdat de printkop de eerder geprinte onderdelen kan omstoten tijdens het printen van een nieuw onderdeel.



Figuur 3.10: Printfout kromtrekken

Een andere fout die soms voorkwam, was stringing. Deze fout treedt op door een slechte kalibratie van het printbed of door een te klein startoppervlak voor de supportstructuur. Hierdoor breekt een deel van de geprinte structuur af, waardoor de volgende printlaag geen geschikte basis heeft om zich aan te hechten.

De fout door slechte kalibratie werd opgelost door de afstand tussen de printkop en het printbed nauwkeurig te kalibreren. Het afbreken van de supportstructuur werd verholpen door het aantal lijnen in de onderste supportprintlaag te verhogen. Figuur 3.11 toont een print met stringing.



Figuur 3.11: Printfout stringing

Een andere fout die optrad, was een hoge variatie in het gewicht tussen dezelfde onderdelen. Dit is cruciaal voor de modulaire plaatjes, aangezien een grote afwijking kan leiden tot een vertekend beeld van de dynamische proeven, omdat het trillingsgedrag van de structuur afhankelijk is van de massa. De parameters die invloed hebben op het gewicht van een FDM-geprint onderdeel zijn de spuitmondtemperatuur en de printsnelheid, waarbij vooral de printsnelheid een grote invloed heeft op de consistentie van het gewicht [60]. Daarom werd er gekozen om de printsnelheid aan te passen. De printsnelheid werd hierbij verlaagd van 70 mm/s naar 50 mm/s, wat afweek van de optimale snelheid zoals aangegeven door de parameterbruggen, maar nog steeds voldoende is. Deze aanpassing had een positieve invloed op de consistentie van het gewicht van de geprinte panelen, waardoor verdere aanpassingen aan de spuitkoptemperatuur of printsnelheid niet nodig was.

Hoofdstuk 4

Trillingskarakterisatie

Na de ontwikkeling en productie van de prototypes met FDM, worden deze prototypes onderworpen aan trillingskarakterisatieproeven. Het doel van de deze proeven is om de invloed van de klikverbindingen op het trillingsgedrag van de structuur vast te stellen. Hiervoor wordt voor elk concept een balkstructuur opgebouwd, bestaande uit zes modulaire panelen. Maar vooral eer deze trillingskarakterisatieproeven worden besproken, worden eerst de vereiste dynamische eigenschappen overlopen waaraan de ontwikkelde prototypes moeten voldoen om geschikt te zijn voor gebruik in LRM's. Daarna wordt er ingegaan op uitgevoerde eindige elementen simulaties van de modulaire balkstructuren, die inzicht geven in het te verwachten trillingsgedrag. Nadien worden trillingskarakterisatieproeven toegelicht, waarbij de proefopstelling, de meetprocedure en de meetresultaten worden aangehaald. De uitvoering van de trillingskarakterisatieproeven gebeurde in het geluid- en trillingslabo van het Departement Werktuigkunde van de KU Leuven in Heverlee.

4.1 Dynamische Vereisten

Het beoogde doel is om met de ontworpen modulaire panelen uiteindelijk modulaire LRM's te produceren. Hierbij zullen resonatoren op de modulaire panelen worden toegevoegd die typisch getuned zijn op een specifieke eigenmode van het systeem die sterk bijdraagt aan de geluidsafstraling. Daarbij is het belangrijk dat de dynamica en dus ook de trillingsrespons met de eigenmodes van het systeem niet negatief beïnvloed wordt door de modulaire klikverbindingen. Zo mag het in- en uitklikken van de verbindingen bij her- en demontage, de dynamica van het systeem niet veranderen. Indien dit wel het geval zou zijn, zou na her-of demontage de vooraf getunede resonatoren niet meer nauwkeurig zijn afgestemd op de te onderdrukken eigenmode van het systeem waardoor de geluids- en trillingsonderdrukking aanzienlijk verslechterd. Daarnaast is het belangrijk dat het trillingsgedrag binnen de modulaire structuur lineair is. Hieraan zijn twee voorwaarden verbonden. De eerste voorwaarde is dat de amplitude waarmee de structuur trilt zich proportioneel schaalt met de excitatie waarmee de structuur wordt geëxciteerd. De tweede voorwaarde is dat de eigenmodes niet van frequentie veranderen ongeacht de grootte van excitatie. Dit lineaire trillingsgedrag is essentieel voor de toepasbaarheid van de structuren in metamateriaal structuren. Namelijk, door de proportionele schaling van de amplitude waarmee de structuur trilt, zal de geluids- en trillingsonderdrukking altijd even effectief zijn ongeacht de grootte van de excitatie. Ook de voorwaarde dat de frequenties van de eigenmodes van het

systeem constant moet blijven is essentieel. Dit waarborgt de nauwkeurige afstemming van de resonatoren op de te onderdrukken eigenmode, waardoor effectieve trillingsonderdrukking mogelijk blijft zonder nodige herconfiguratie van de resonatoren.

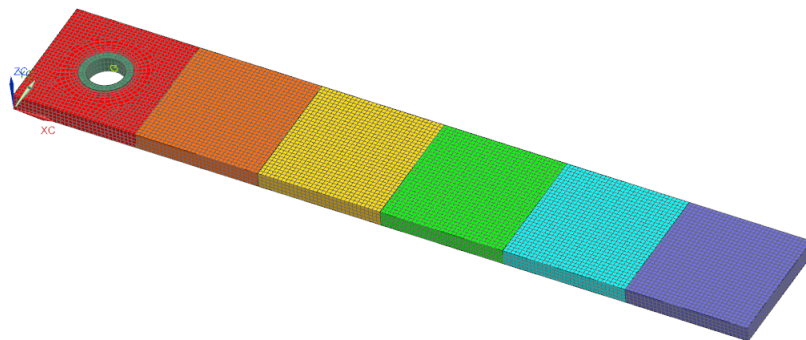
4.2 Simulaties op het trillingsgedrag

Voorafgaand aan de dynamische proeven worden eerst eindige elementen simulaties uitgevoerd om meer inzicht te krijgen bij welke frequenties eigenmodes voorkomen en met de bewegingsvorm van de modes. Deze simulaties werden uitgevoerd met Siemens NX. Hierbij werden vereenvoudigde modellen van de balkstructuren van de drie concepten gesimuleerd met *solution 103*, ook wel bekend als de Normale Modes/Eigenwaarde Analyse en met *solution 108*, bekend als de Frequentie Respons Functie (FRF).

Solution 103 biedt de mogelijkheden om de verschillende modevormen en bijbehorende eigenfrequenties te bepalen. Hiermee kan ook een schatting worden gemaakt van het meetbereik voor de trillingskarakterisatieproeven, zodat ten minste drie buigmodes in de Y-richting gemeten worden.

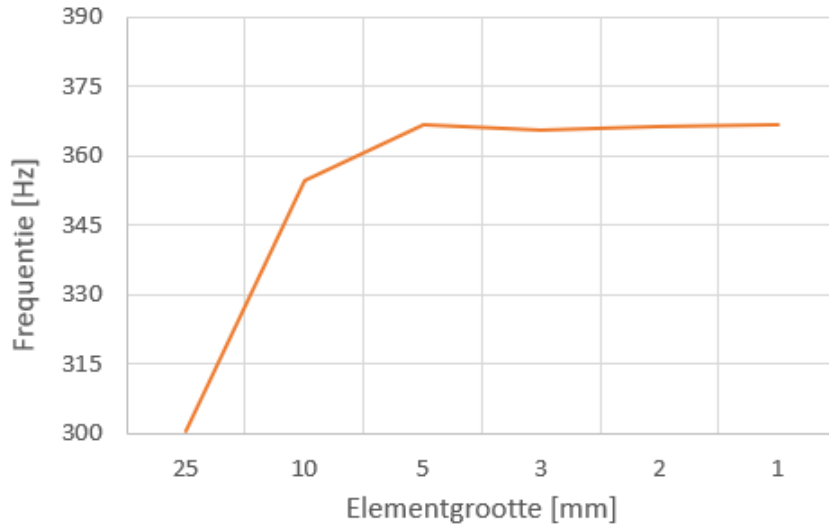
De te simuleren balkstructuren zijn vereenvoudigd tot modulaire balken met dezelfde dichtheid en massa als de FDM geprinte concepten. Bovendien zijn de verbindingen tussen modulaire panelen oneindig stijf beschouwd tegenover elkaar. Dit is echter een vereenvoudiging van de modulaire klikverbindingen omdat in werkelijkheid deze niet oneindig stijf zijn. Echter, aangezien de stijfheid invloed heeft op de dynamica, kunnen de gesimuleerde eigenfrequenties afwijken van de werkelijke eigenfrequenties van de modulaire balken.

Voor de simulatie van *solution 103* werd de modulaire balk van in figuur 4.1 gesimuleerd.



Figuur 4.1: Simulatie model modulaire panelen

De elementen die voor de simulatie zijn gebruikt, zijn kwadratisch hexaëdrische 3D-elementen met een elementgrootte van drie millimeter. De elementgrootte werd bepaald door middel van een convergentie analyse van de eigenfrequentie van eigenmode 4. De convergentiecurve staat weergegeven in figuur 4.2.



Figuur 4.2: Convergentie curve van de maximale uitwijking en eigenfrequentie van mode 4

Voor de materiaaleigenschappen van de structuur zijn de ABS-eigenschappen uit de materiaalbibliotheek van Siemens NX gebruikt. Maar voor elke modulaire plaat is het soortelijk gewicht aangepast naar dat van de FDM-plaatjes.

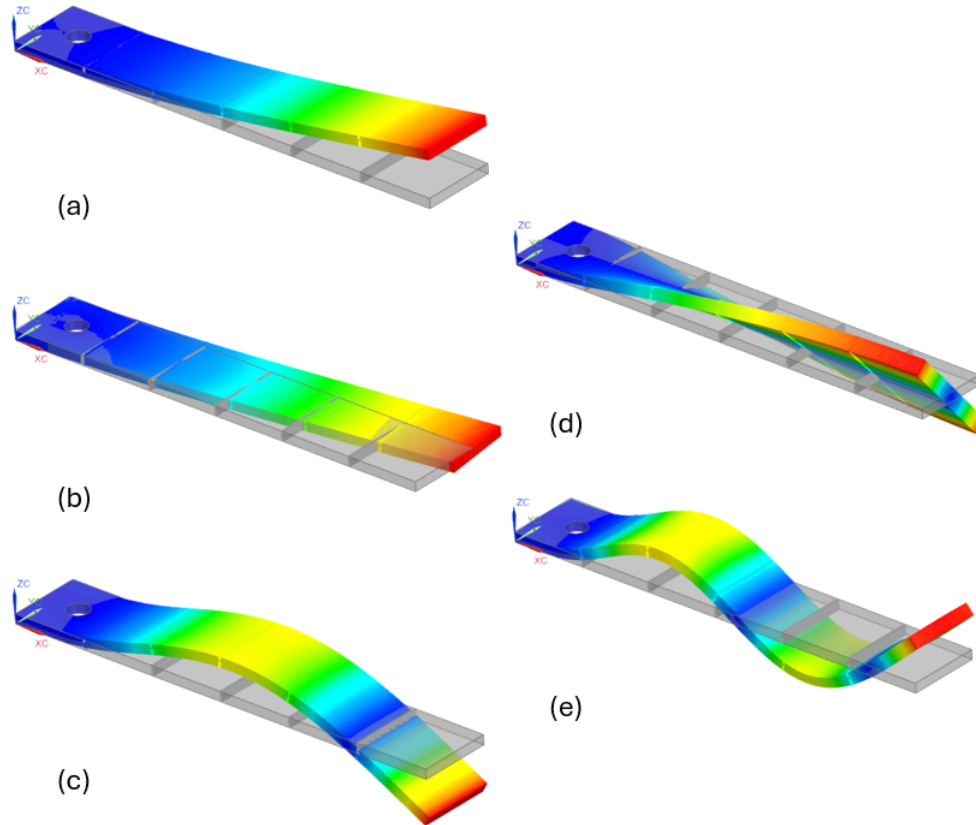
Voor de randvoorwaarden van de simulatie is een *fixed constraint* aangebracht op het oppervlak van het donkergroene gebied in figuur 4.1. Dit simuleert de boutverbinding van de modulaire plaat aan de excitatie bron in het labo.

De *solution 108* werd uitgevoerd om inzicht te krijgen in het verloop van de FRF's van de balken. Hierbij werd de verplaatsing op het uiteinde van de blak over de input verplaatsing op het cirkeloppervlak van de groene eenheidscel gesimuleerd in functie van de frequentie. De gesimuleerde waarden bieden een ideaal beeld van de FRF van de structuur, vergelijkbaar met *solution 103*, waarbij de verbindingen in Siemens NX oneindig stijf werden verondersteld. In werkelijkheid zal er echter een zekere mate van variatie optreden als gevolg van de gemaakte vereenvoudigingen.

De simulatie van *solution 108* wordt uitgevoerd met hetzelfde model als bij *solution 103*, zoals weergegeven in figuur 4.1. Hierbij worden dezelfde elementen en materiaaleigenschappen gebruikt. Het enige verschil zit in de randvoorwaarden. Hierbij moet een vorm van excitatie geïnitieerd worden, wat in de uitgevoerde simulatie neerkomt op een aangelegde verplaatsing van één millimeter in het cirkel oppervlak van de rode eenheidcel. De frequentie van deze aangelegde excitatie varieerde lineair van 0 tot 800 Hz.

4.2.1 Gesimuleerde eigenfrequenties en modevormen

De bewegingsvormen van de eigenmode van een balkstructuur zijn staande golven die in verschillende richtingen zicht voortplanten, namelijk de longitudinale, transversale en rotationele richting [63]. De eerste 5 modes van de gesimuleerde balken staan weergegeven in figuur 4.3 waarbij de letters a, c en e buigmodes aan tonen in de transversale z-richting. Letter b toont een buigmode in de transversale y-richting en letter d toont een torsiemode rond de longitudinale x-richting.



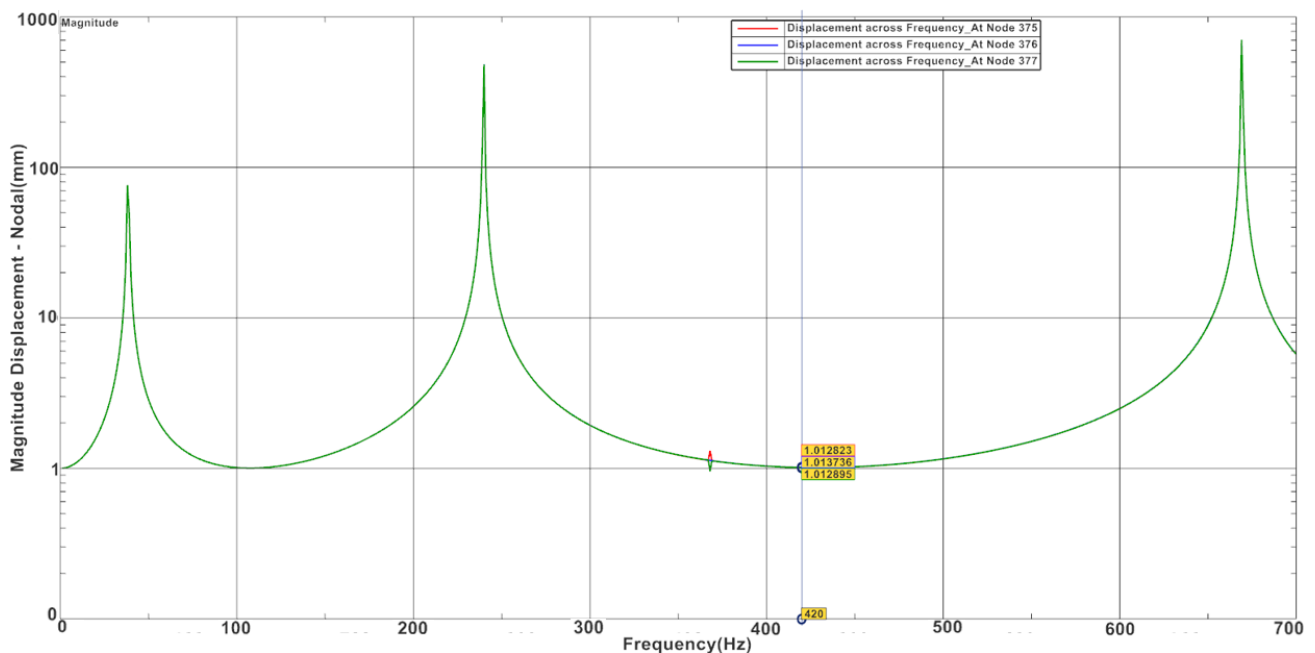
Figuur 4.3: Weergave van de eigenmodes balkstructuur tot 800 Hz

Na een beknopte samenvatting over de verschillende vormen van de eerste vijf optredende eigenmodes van een balkstructuur, staan de gesimuleerde waarden van de overeenkomende eigenfrequenties en eigenmodes van de enkele cantilever opgesomd in tabel 4.1. Alleen de waarden van de enkele cantilever worden beschreven, omdat de verschillen met de andere concepten klein is vanwege het geringe verschil in soortelijk gewicht, maar ook vanwege de vereenvoudigde weergave van de verbindingen door balkvormige lichamen.

Tabel 4.1: Gesimuleerde eigenfrequenties enkele cantilever

Frequentie [Hz]	Eigenmode vorm	Equivalent figuur 4.3
39,0	transversale mode in de z-richting	a
230,6	transversale mode in de y-richting	b
242,3	transversale mode in de z-richting	c
373,2	longitudinale mode in de x-richting (torsiemode)	d
677,0	transversale mode in de z-richting	e

De gesimuleerde waarden in tabel 4.1 bieden inzicht in de frequenties waarop de eigenmode optreden. Echter door vereenvoudigen gaan de waarden niet overeenkomen met de gemeten waarden, zoals eerder vermeld. Bovendien zullen de modevormen bij hogere frequenties meer afwijken vanwege de grootte van de elementen. Dit komt doordat een nauwkeurige representatie van een sinusgolf in een FEM-simulatie minstens zes tot tien elementen per golflengte vereist. Aangezien de golflengte afneemt bij stijgende frequenties moet de corresponderende element grootte afnemen. Dit resulteert in aanzienlijke rekentijden terwijl de simulatie werd uitgevoerd voor een richtwaarde van de eigenfrequentie. Daarom werd een convergentie analyse uitgevoerd voor de bepaling van de elementgrootte bij de vierde eigenmode van de balkstructuur (373 Hz). Ten slotte toont de simulatie aan dat er onder de 700 Hz drie eigenmodes in de Y-richting optreden, waardoor het frequentie meetbereik van de proeven ingesteld kan worden van 0 tot 800 Hz. Dit bereik is een overschatting van de gesimuleerde waarde, maar houdt rekening met het feit dat de experimentele metingen kunnen afwijken van de simulaties wegens de verschillende vereenvoudigingen in het simulatie model. De gesimuleerde FRF van de modulaire enkele cantilever staat weergegeven in figuur 4.4



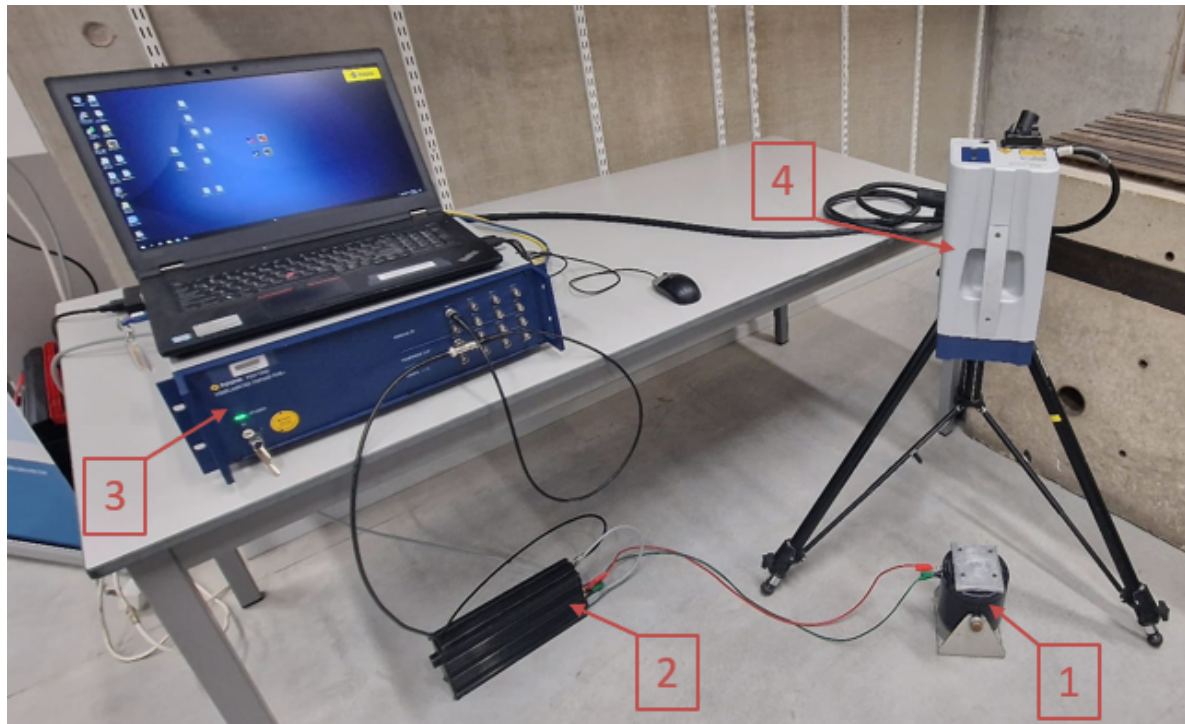
Figuur 4.4: Gesimuleerde FRF van de enkele cantilever met Siemens NX

In figuur 4.4 is waarneembaar dat in vereenvoudigde simulaties de FRF een vloeiend verloop heeft waarbij de drie eigenfrequenties van de meetbare eigenmodes staan aangegeven als de drie pieken in de figuur.

4.3 Testopstelling

Het doel van de trillingskarakterisatieproeven is om de invloed van de klikverbindingen op het trillingsgedrag van de structuur vast te stellen. Hiervoor wordt voor elk concept een balkstructuur opgebouwd, bestaande uit zes modulaire panelen. Vervolgens kan het trillingsgedrag van elk paneel individueel gemeten worden.

Idealiter zouden de modulaire panelen met de klikverbindingen hetzelfde trillingsgedrag moeten vertonen als dit van een volle equivalente balk. De testopstelling voor de trillingskarakterisatieproeven staat weergegeven in figuur 4.5.

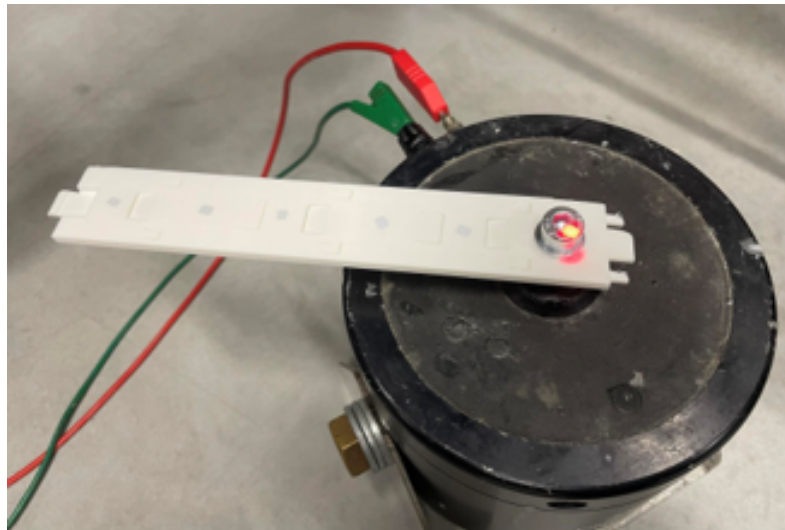


Figuur 4.5: Testopstelling dynamische proeven

In figuur 4.5 staat het nummer één voor de *shaker*, die zorgt voor een geïnduceerde trillingen binnen een vooraf ingesteld frequentiebereik dat is bepaald door de FEM-simulaties in het deel 4.2.1. De *shaker* doorloopt het frequentiebereik op een willekeurige wijze, om eventuele dynamische fouten die kunnen optreden bij het chronologisch doorlopen van het frequentiebereik te corrigeren. De amplitudes van de trillingen die door de *shaker* worden opgewekt, zijn afhankelijk van de ingestelde spanning van de versterker, aangeduid met nummer twee in figuur 4.5. Deze geïnduceerde trillingen van de *shaker* worden overgedragen op de balkstructuur, waarbij met een laser vibrometer (nummer vier in figuur 4.5), de response wordt opgemeten. Het is echter belangrijk op te merken dat de laser vibrometer alleen de respons in de richting van de invallende laserstraal meet, wat neerkomt op een loodrechte meting op het oppervlak van de *shaker* in de meetopstelling.

De signalen van de versterker en de laser vibrometer worden ingelezen met behulp van de *data acquisition module* (DAQ), aangeduid als nummer drie in figuur 4.5. Tenslotte verwerkt de DAQ-systeem de signalen en stuurt deze door naar de computer waarmee met Siemens Testlab de metingen visueel weergegeven worden.

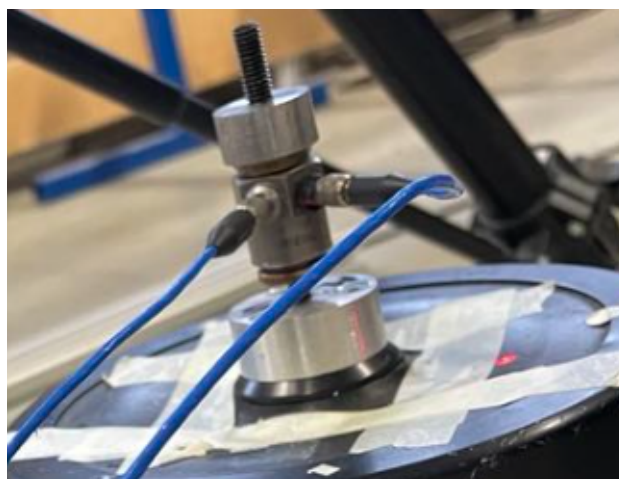
De bevestiging van de balkstructuur op de *shaker* gebeurt door middel van een boutverbinding. Hierbij wordt de bout handvast vastgedraaid op de *shaker*, zoals geïllustreerd in figuur 4.6.



Figuur 4.6: Testopstelling met de shaker en balkstructuur van de enkele cantilever

Op de balkstructuur in figuur 4.6 zijn kleine grijze stickers waarneembaar. Deze stickers zijn stukjes retroreflecterende tape, wat ervoor zorgt dat de invallende laserstralen terugkaatsen naar de lichtsensor van de laser vibrometer.

Echter voor het correct uitvoeren van de lineaire proeven moet de *shaker* voorzien zijn van een impedantiesensor. Deze sensor meet de uitgeoefende kracht van de *shaker* op de balkstructuur. Dit is belangrijk omdat de aangestuurde spanning naar de *shaker* niet per se lineair schaalt met de uitgeoefende kracht van de *shaker* op de balkstructuur. Deze niet-lineaire schaling is niet belangrijk voor de andere proeven omdat de aangestuurde spanning constant blijft. Hierdoor werd de impedantiesensor enkel gebruikt voor de lineariteitstesten. De meetopstelling met de impedantiesensor staat weergegeven in figuur 4.7.



Figuur 4.7: Testopstelling van de shaker uitgerust met de impedantiesensor

Figuur 4.7 toont de opstelling van de impedantiesensor gemonteerd op de *shaker* via een schroefverbinding. Deze sensor meet zowel de kracht als acceleratie waarmee de *shaker* exciteert.

4.4 Meetprocedure

Om een gegronde conclusie te kunnen trekken over welke klikverbinding dynamisch voldoet voor gebruik als LRM wordt voor elke verbinding eerst gemeten of de trillingsrespons lineair is. Het lineair trillingsgedrag van de prototypes wordt getest door de excitatie van de *shaker* te verhogen om te bepalen of de amplitude van de FRF proportioneel schaalt met de aangelegde grootte van de excitatiekracht. Hiernaast is het belangrijk dat de eigenfrequenties bij hogere excitaties niet verschuift maar constant blijft. De excitatiekrachten en trillingsresponsen van de balken worden hiervoor gemeten bij een spanningsniveau van de *shaker* van 1, 2 en 3 volt.

Vervolgens wordt gemeten of (her)montage enige invloed heeft op de trillingsrespons. De paneel-jtes worden hiervoor na één, twee en vijftien keer te demonteren gemeten.

Daarnaast wordt gemeten of de volgorde van de modulaire panelen de resultaten beïnvloedt. Deze metingen maken het mogelijk om eventuele onregelmatigheden in de resultaten toe te wijzen aan afwijkingen tussen de panelen en dus ook de onnauwkeurigheid van het 3D-printen. Hierbij worden de modulaire panelen losgeklikt en in een willekeurige volgorde terug gemonteerd tot een balkstructuur. Het is dus belangrijk om op te merken dat deze metingen niet alleen de invloed van de volgorde representeren maar ook de invloed van het één keer losklikken meenemen.

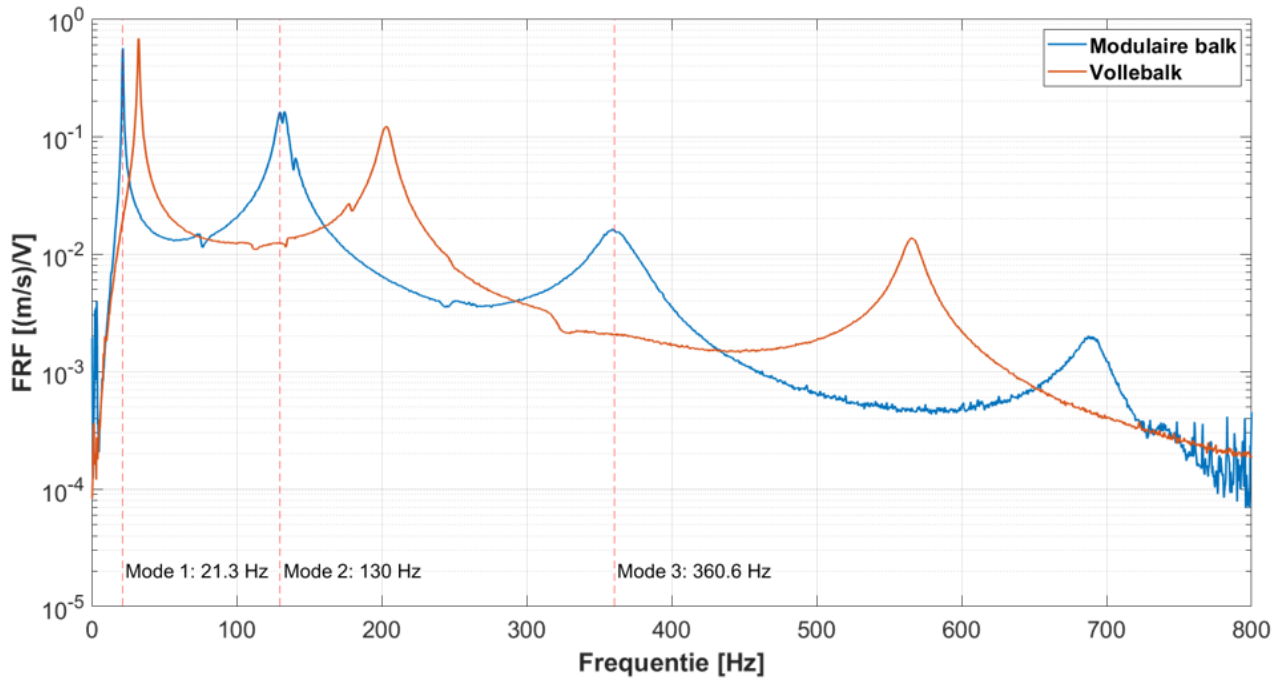
Tenslotte is het interessant om te achterhalen in welke mate de klikverbindingen het trillingsgedrag beïnvloeden ten opzichte van een volle equivalente balk. Daarom wordt een bijkomende meting uitgevoerd op een massieve geprinte balkstructuur die een gewichtsverschil heeft van 2% tegenover de vastgeklikte modulaire balk.

De meetgegevens van tijdens de trillingskarakterisatie worden vervolgens verwerkt en geanalyseerd met behulp van Siemens Testlab en een MATLAB-script.

4.5 Meetresultaten

4.5.1 Vergelijking tussen modulaire panelen en volle equivalente balk

De mate waarmee de modulaire verbindingen het trillingsgedrag beïnvloeden ten opzichte van een equivalente volle balk werd gemeten door de FRF's van beide te plotten: die van de enkele cantilever met een equivalente volle balk en die van de enkele cantilever met een modulaire balk. Dit staan weergegeven in figuur 4.8.



Figuur 4.8: Testresultaat equivalente volle balk van de enkele cantilever

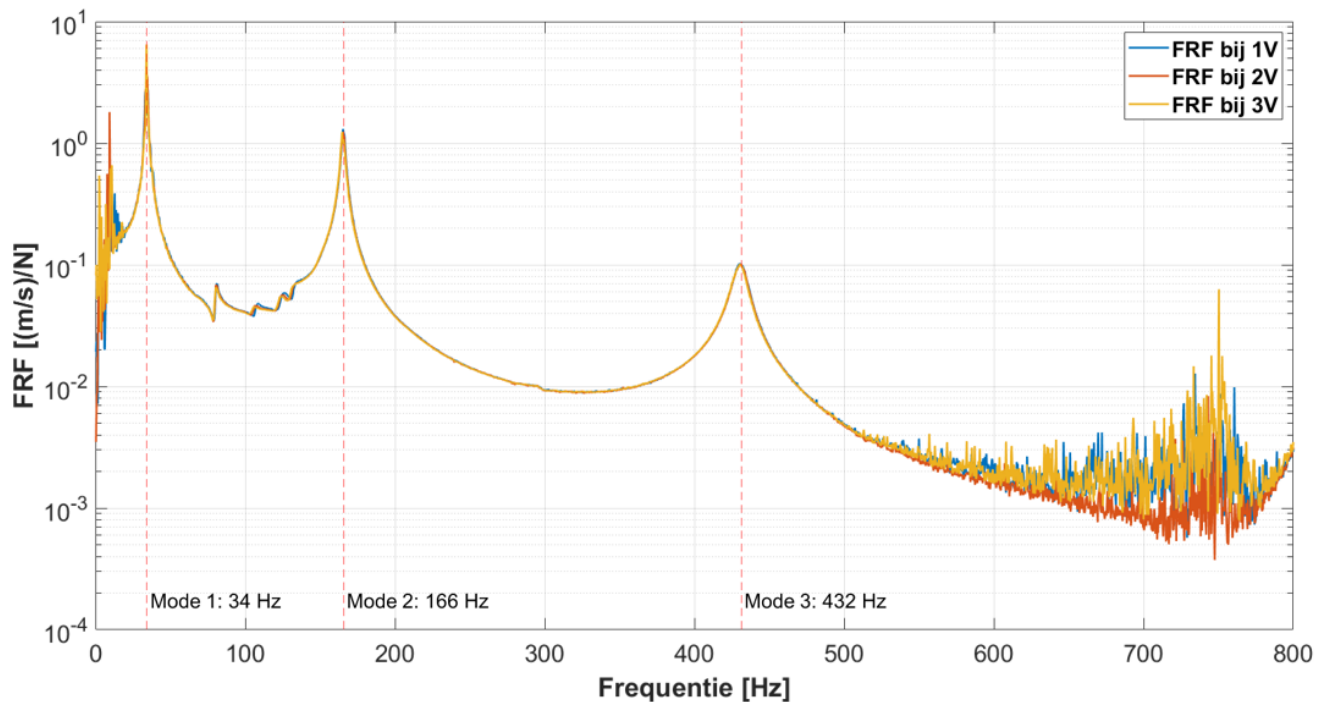
In figuur 4.8 is waarneembaar dat de eigenfrequenties van de volle balk hoger liggen dan de eigenfrequenties van de modulaire balkstructuur. Dit komt overeen met de verwachtingen omdat de equivalente volle balk stijver is dan de modulaire balkstructuur. Het verschil in stijfheid kan toegewezen worden aan de klikverbindingen. Het verband tussen de stijfheid en de eigenfrequenties staat weergegeven in formule 4.1.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.1)$$

Uit formule 4.1 is afleidbaar dat een daling van de stijfheid een verhoging van de eigenfrequentie veroorzaakt. Aangezien beide balken dezelfde massa hebben, komt dit overeen met de meetresultaten waarbij de eigenfrequenties van de stijvere volle balk hoger liggen dan die van de modulaire balk.

4.5.2 Lineariteit

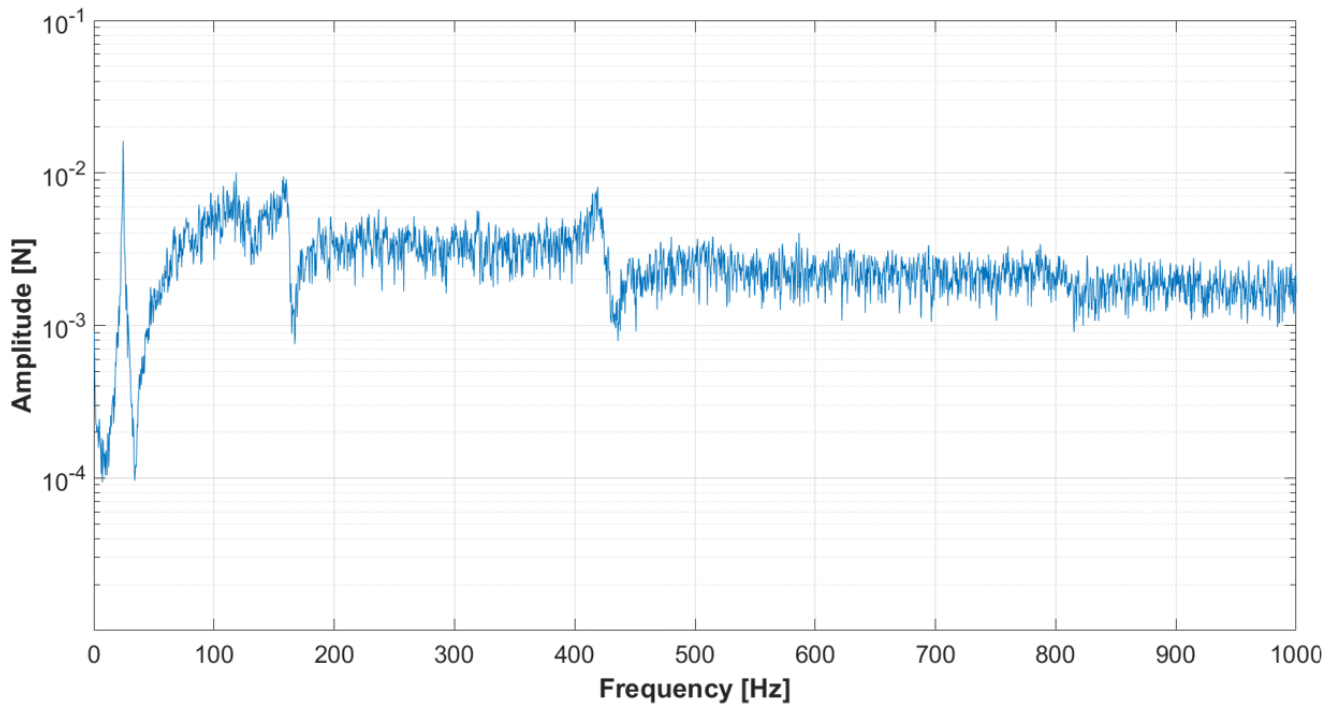
De gemeten FRF's van de verschillende excitatieniveau's van de cilindrische fit staan weergegeven in figuur 4.9. Hierbij zijn de drie FRF's proportioneel geschaald met de excitatiekracht.



Figuur 4.9: Testresultaat cilindrische fit invloed excitatie-intensiteit

In figuur 4.9 valt op dat de FRF's en eigenmodes goed overeenkomen. Enkel ter hoogte van de eerste mode is er een verschil merkbaar. Verder is tussen de eerste en tweede eigenmode een kleine piek gemeten. Deze piek is afkomstig van de transversale mode in de Z-richting die ook in de deel figuur 4.3b van de simulatie waarneembaar is. Deze mode werd gemeten doordat de balk niet perfect loodrecht stond ten opzichte van de laser vibrometer. Hierdoor werd een kleine loodrechte verplaatsing waargenomen.

Echter is er rond de meetdata van de eerste 30 Hz en bij de hogere frequenties vanaf 500 Hz ruis op te merken. De ruis bij de eerste 30 Hz kan verklaard worden door een lage uitgeoefende excitatiekracht bij deze frequenties. Figuur 4.10 geeft de excitatiekracht weer bij de meting van de lineariteit van de cilindrische fit.



Figuur 4.10: Gemeten excitatiekracht bij de lineariteitsmeting van de cilindrische fit met een spanningsniveau van de shaker op 1V

In figuur 4.10 wordt waargenomen dat in het lage frequentiegebied van 0 tot 18,6 Hz een aanzienlijk lagere excitatiekracht wordt geregistreerd. Vervolgens neemt de excitatiekracht toe en wordt een piek bereikt bij 24,4 Hz. Na deze piek daalt de excitatiekracht, resulterend in een nieuw minimum op 34,1 Hz, wat overeenkomt met de eerste mode van de structuur. Deze afname in gemeten excitatiekracht kan worden toegeschreven aan de reactiekrachten van deze mode, die de excitatiekrachten tegengaan en doen afnemen. Dit fenomeen is ook waarneembaar bij de tweede en derde modes. Hiernaast is waarneembaar dat de frequentiegebieden met een lage excitatiekracht overeenkomen met de gebieden waar een zekere mate van ruis in de gemeten FRF optreedt. Deze ruis wordt vermoedelijk veroorzaakt door een te laag ingangssignaal (excitatiekracht), waardoor het uitgangssignaal (beweging in de z-as) minder significant wordt ten opzichte van storingen, resulterend in meer ruis.

Daarnaast is de ruis waarneembaar vanaf 500 Hz ook toe te wijzen aan een slechte signaal-ruisverhouding. Bij deze hoge frequenties trilt de balkstructuur namelijk met een kleinere amplitude waardoor dit gemeten signaal minder significant is ten opzichte van storingen, wat resulteert in de waargenomen ruis.

De FRF's van de lineariteit van de enkele cantilever en dubbele cantilever zijn te raadplegen in bijlage A. Hieruit blijkt dat beide een lineair trillingsgedrag vertonen, zoals de behandelde cilindrische fit waarbij de FRF's zich proportioneel schalen met de excitatiekracht en de eigenmodes niet in frequentie verschuiven.

Om met volledige zekerheid te kunnen zeggen of de prototypes daadwerkelijk lineair zijn wordt er dieper ingegaan op de meetresultaten ter hoogte van de tweede mode in tabel 4.2. Hierbij worden de FRF's van de excitatieniveaus van 1V en 3V met elkaar vergeleken om te controleren of het verschil in excitatieniveau geen verschuiving van de eigenfrequenties veroorzaakt en of de

amplitude van de FRF's proportioneel schaalt met de aangelegde grootte van de excitatie.

Tabel 4.2: Lineariteit op basis van excitatienivaus 1V en 3V ter hoogte van mode 2

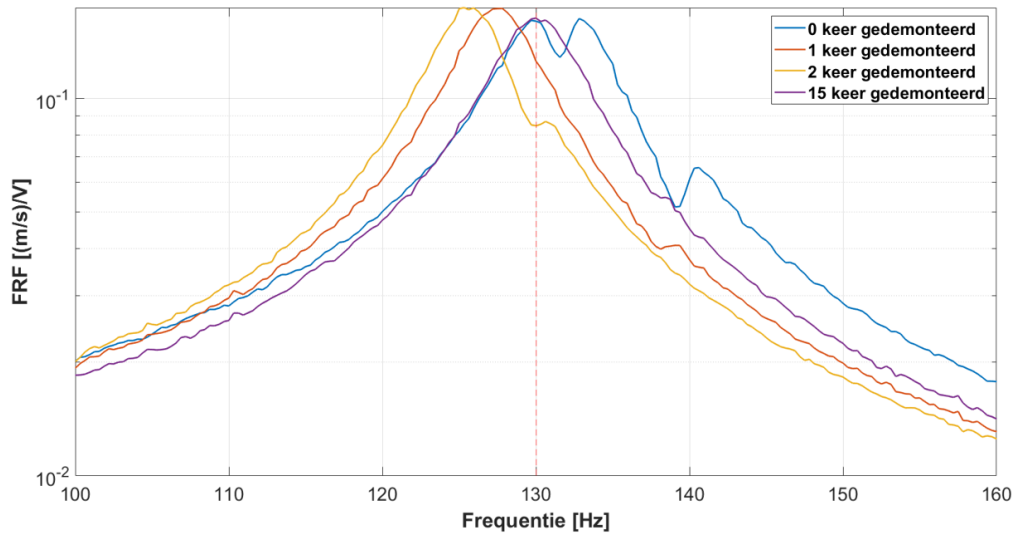
Prototype	Enkele cantilever	Dubbele cantilever	Cilindrische fit
Vershil in absolute frequentie [Hz]	0,01	2,41	0,33
Procentueel verschil in frequentie [%]	0,01	1,93	0,20
Vershil in absolute amplitude [(m/s)/N]	0,24	0,39	0,07

Uit de gegevens in tabel 4.2 blijkt dat het verschil in excitatieniveau tussen 1V en 3V voor de drie prototypes slechts een minimale verschuiving veroorzaakt in de frequenties van de tweede mode, aangezien deze nagenoeg constant blijven. Bovendien is het verschil in amplitude eveneens verwaarloosbaar klein. Op basis hiervan kan geconcludeerd worden dat alle drie de typen verbindingen een lineair trillingsgedrag vertonen. Ondanks de variabiliteit van de modulaire panelen door het 3D-printen, presteren ze al vrij goed. De verwachting is dat dit met spuitgieten alleen maar zal verbeteren.

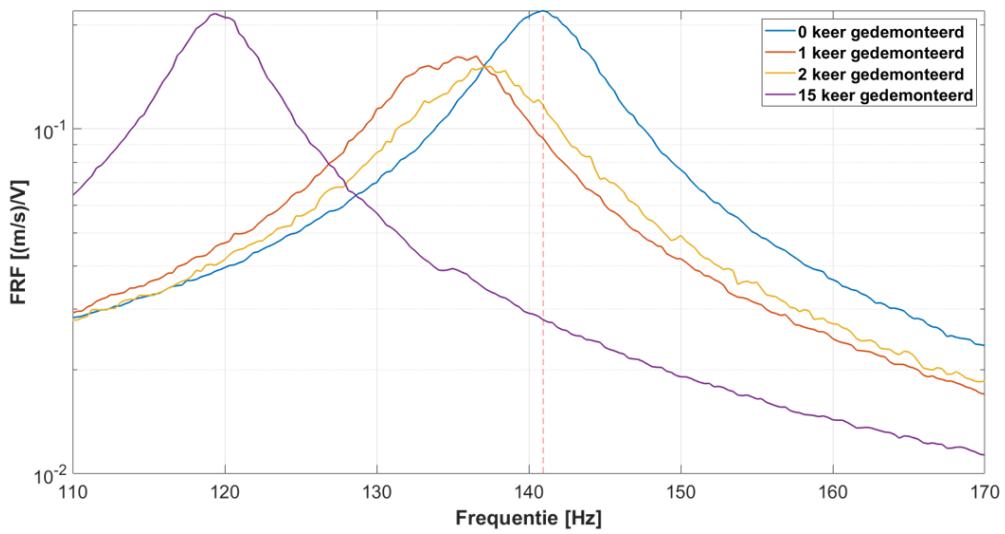
4.5.3 Invloed van het losklikken

In ideale omstandigheden zou het trillingsgedrag van de verbinding onafhankelijk zijn van het herhaaldelijk monteren en demonteren. Het is van belang dat de eigenfrequenties constant blijven, evenals dat de amplitudes van de modes constant blijven.

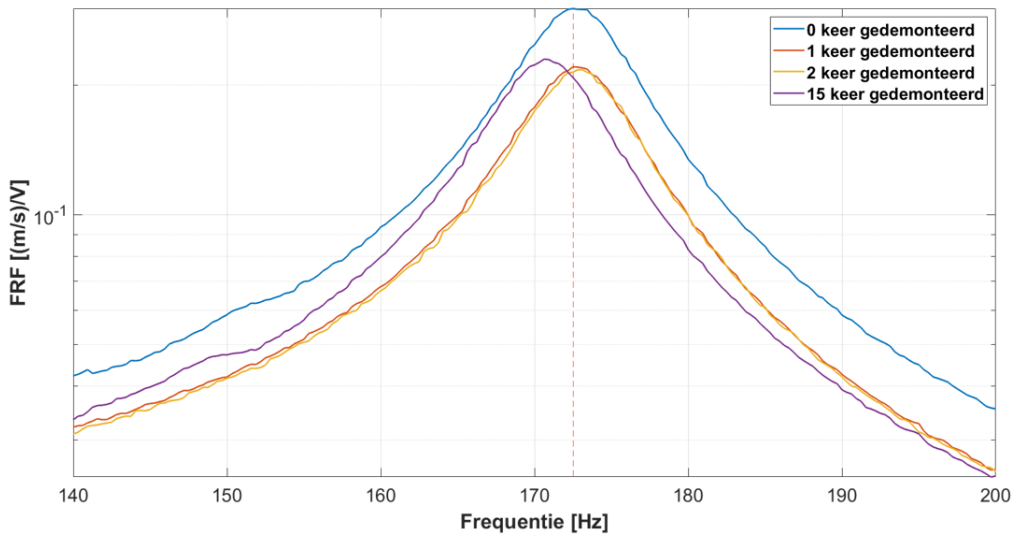
Uit de metingen blijkt dat herhaaldelijk monteren en demonteren enige invloed heeft op het trillingsgedrag voor al de drie prototypes. Vooral het trillingsgedrag van de balkstructuur met de dubbele cantilever verbindingen vertoont sterke afwijkingen na herhaaldelijke hermontage. Figuur 4.11 geeft de gemeten FRF's van de tweede mode voor de drie prototypes weer. De volledige gemeten FRF's van prototypes zijn te raadplegen in de bijlage B.



(a)



(b)



(c)

Figuur 4.11: Invloed van hermontage op de 2de mode: a) enkele cantilever, b) dubbele cantilever c) cilindrische fit

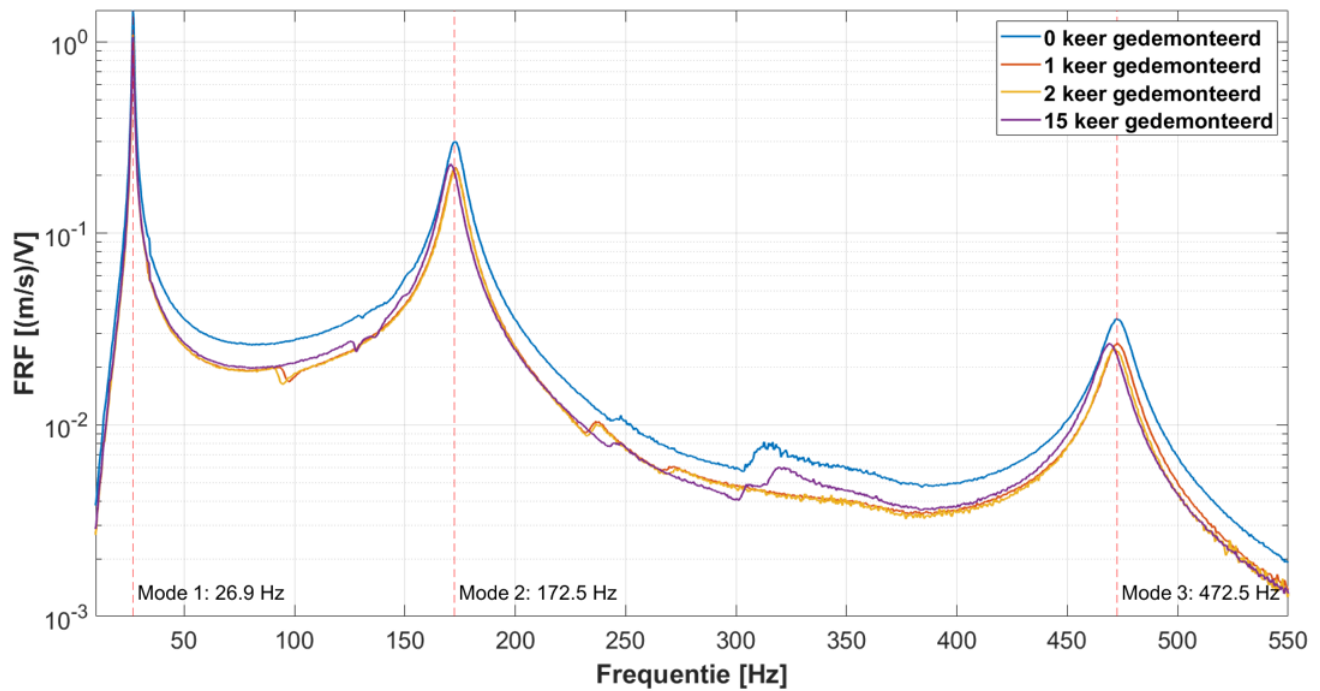
Uit figuur 4.11 valt op dat de FRF's van de balkstructuur met de dubbele cantilever zeer sterk in frequentie verschoven zijn na herhaaldelijke hermontage. De FRF's van de twee andere concepten vertonen daarentegen een veel kleinere verschuiving in frequentie. Zo hebben de gemeten FRF's van de enkele cantilever onderling een variatie van rond de 5 Hz. Hierbij is wel een dubbele piek op te merken in de mode, van de curve voor het demonteren (0 keer gedemonteerd). Dit is echter niet gewenst en kan negatieve effecten hebben op de effectiviteit van de trillingsonderdrukking bij het gebruik als LRM. Dit fenomeen treed daarentegen niet op bij de metingen van de cilindrische fit. De cilindrische fit vertoont daarnaast nauwelijks een verschuiving van de mode in frequentie. Hierbij is wel op te merken dat na de eerste keer de modulaire balkstructuur te demonteren, de FRF in amplitude daalde, terwijl na verdere (her)montage de amplitude constant bleef.

De maximale gemeten variaties in frequentie en amplitude van de tweede mode staan per concept weergegeven in tabel 4.3.

Tabel 4.3: Maximale gemeten variaties in frequentie en amplitude van mode 2 tussen het 0 keer, 1 keer, 2 keer demonteren

Prototype	Enkele cantilever	Dubbele cantilever	Cilindrische fit
Vershil in absolute frequentie [Hz]	6,6	21,9	1,9
Procentueel verschil in frequentie [%]	5,0	15,5	1,1
Vershil in amplitude [(m/s)/N]	0,04	0,06	0,08

In tabel 4.3 is waarneembaar dat mode 2 bij de modulaire balkstructuur van de dubbele cantilever verbinding een frequentie verschuiving van 21,9 Hz optreedt, wat dit type verbinding minder geschikt maakt voor modulaire LMR's. Deze verschuiving is namelijk veel te groot en verhindert de zekerheid dat de vooraf getunede resonatoren nog na hermontage nauwkeurig afgestemd zullen zijn op de te onderdrukken mode. Ook de variatie van 6,6 Hz voor de enkele cantilever is relatief groot. De balkstructuur met de cilindrische fit daarentegen vertoont slechts een verschuiving van 1,9 Hz, wat zeer beperkt is en geen probleem vormt voor het gebruik als LRM. De balkstructuur van de cilindrische fit toont daarbij de beste resultaten en een minimale invloed van de herhaaldelijke uitgevoerde (her)montage. Wel viel op dat na de eerste keer losklikken en opnieuw monteren van de panelen, de FRF in amplitude daalde, terwijl na verdere (her)montage de amplitude constant bleef. Dit fenomeen trad op over het gehele gemeten frequentiebereik en is te zien in figuur 4.12.



Figuur 4.12: Testresultaat cilindrische fit invloed losklikken

In figuur 4.12 is waarneembaar dat hermontage van de modulaire structuur bijna geen invloed heeft op het trillingsgedrag eens het één keer is losgeklikt. Enkel na de eerste hermontage is een daling in amplitude van de FRF gemeten. Dit betekent dat, na het één keer hermonteren, de dynamica van de verbindingen verandert

Tabel 4.4 toont de verschuiving in frequentie en amplitude van de cilindrische fit voor de drie modes tussen één keer demonteren en 15 keer demonteren.

Tabel 4.4: Invloed van herhaaldelijke (her)montage van de cilindrische fit tussen 1 en 15 keer te demonteren ter hoogte van mode 1,2 en 3

Prototype eigenmode	Cilindrische fit		
	mode 1	mode 2	mode 3
Vershil in absolute frequentie [Hz]	0,01	2,19	2,19
Procentueel verschil in frequentie [%]	0,01	1,27	0,46
Vershil in absolute FRF [(m/s)/N]	0,030	0,013	0,002
Procentueel verschil in FRF [%]	2,7	5,8	6,6

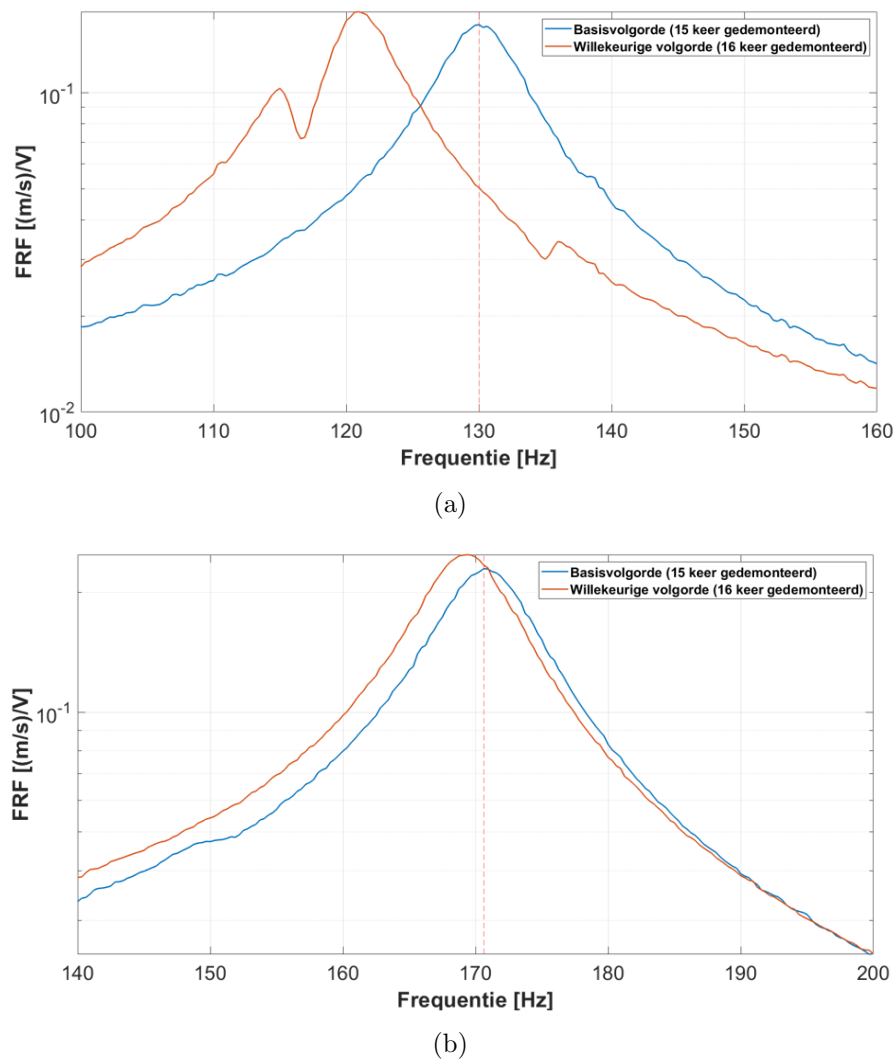
In tabel 4.4 is te zien dat de frequentie van de eerste mode bijna constant blijft en dat de frequenties bij de tweede en derde mode nauwelijks verschuiven. Bovendien valt op dat de amplitudes van de modes nauwelijks veranderen. Of de daling in amplitude na een eerste keer demonteren ook zal optreden indien de panelen worden geproduceerd met spuitgieten in plaats van 3D-printen is niet zeker. Echter zou dit niet problematisch zijn als dit ook zou optreden bij de gespuitsgiete panelen. Aangezien na verdere (her)montage het trillingsgedrag nauwelijks nog wordt beïnvloedt, is het perfect mogelijk om resonatoren te ontwerpen die afgestemd zijn op de stabiele FRF's van de panelen na de eerste hermontage. Wat de verbindingen nog steeds inzetbaar maakt voor gebruik als LRM's.

Al bij al kan geconcludeerd worden dat de cilindrische fit het beste presteert van de drie type verbindingen. De FRF's van de dubbele cantilever worden daarentegen sterk beïnvloedt door hermontage, wat aangeeft dat deze verbinding het minst geschikt is als hoststructuur voor modulaire metamaterialen. Daarom zal de verbinding in het verdere verloop van de thesis niet verder behandeld worden. Wat de enkele cantilever betreft, zorgde herhaaldelijke hermontage voor een zekere afwijking in het trillingsgedrag maar beperkter dan de dubbele cantilever. Daarom wordt voor dit prototype de metingen, waarbij de modulaire panelen in willekeurige volgorde zijn geplaatst overlopen. Deze metingen maken het mogelijk om eventuele onregelmatigheden in de resultaten toe te wijzen aan afwijkingen tussen de panelen en dus ook de onnauwkeurigheid van het 3D-printen.

4.5.4 Invloed van de volgorde van de panelen

Ten slotte wordt de invloed van de volgorde van de panelen op de structuur beoordeeld. Figuur 4.13 geeft de gemeten FRF's van de tweede mode voor de balkstructuren van de enkele cantilever en de cilindrische fit. De volledige gemeten FRF's van prototypes zijn te raadplegen in de bijlage C.

De gemeten FRF's staan respectievelijk weergegeven in figuur 4.13



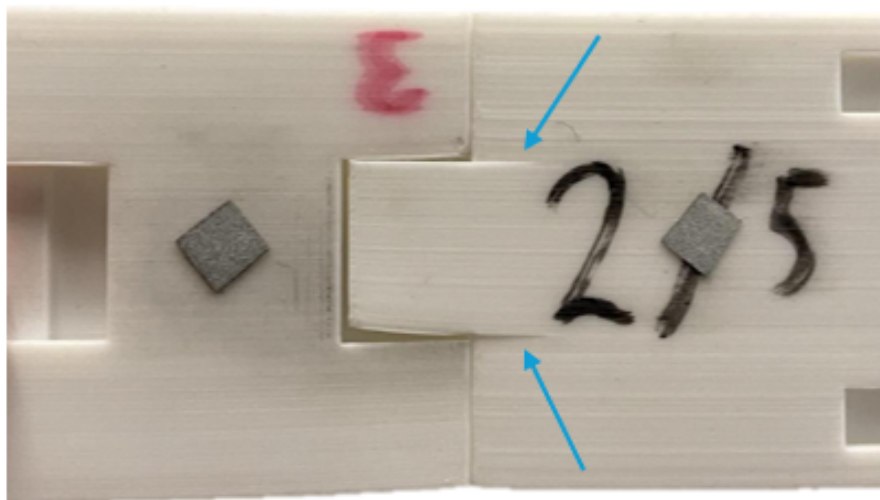
Figuur 4.13: Invloed van volgorde op de 2de mode: a) enkele cantilever, b) cilindrische fit

In figuur 4.13 is waarneembaar dat na het wisselen van de volgorde van de panelen de FRF van de enkele cantilever aanzienlijk verandert, terwijl het verschil in de gemeten FRF's van de cilindrische fit minimaal is. Tabel 4.5 geeft de verschuiving in frequentie en amplitude van mode 2.

Tabel 4.5: Invloed van volgorde ter hoogte van mode 2

Prototype	Enkele cantilever	Cilindrische fit
Vershil in absolute frequentie [Hz]	9,1	1,3
Procentueel verschil in frequentie [%]	7,0	0,7
Vershil in absolute FRF [(m/s)/V]	0,04	0,04
Procentueel verschil in FRF [%]	23,3	15,9

In tabel 4.5 is te zien dat voor de balkstructuur met de cilindrische fit, mode 2 slechts een minimale verandering in frequentie en amplitude ondergaat na het wisselen van de volgorde van de panelen. Deze kleine verandering is toe te wijzen aan de variatie tussen de panelen door de onnauwkeurigheid van het 3D-printen. Voor de balkstructuur met de enkele cantilever is er daarentegen wel een grote verandering waarneembaar. Zo is de frequentie van mode 2 met 9,1 Hz afgenomen na het wisselen van de volgorde van de panelen. Deze grote verschuiving in frequentie suggereert dat bepaalde modulaire panelen het gedrag sterk beïnvloeden. Echter werd er na de metingen twee scheuren opgemerkt in één van de modulaire panelen van dit prototype. Deze scheuren worden weergegeven in figuur 4.14.



Figuur 4.14: Scheurvorming enkele cantilever

In figuur 4.14 is waarneembaar dat langs weerszijden van de cantilever scheuren zijn ontstaan. Het is onbekend wanneer deze scheuren precies zijn ontstaan en de invloed hiervan op de metingen. Het is echter mogelijk dat de verbinding beter had gepresteerd tijdens de metingen als deze scheuren niet waren opgetreden. Daarnaast is op te merken dat de scheuren zich tussen twee printlagen vormen, wat puur afhankelijk is van het 3D-printproces. Waarschijnlijk zouden deze scheuren niet zijn opgetreden bij gespuitsgiete panelen.

4.6 Conclusie meetresultaten

Er kan geconcludeerd worden dat de modulaire balkstructuur met de cilindrische fit verbindingen het beste presteert. Echter is de complexiteit van dit prototype voor spuitgieten mogelijk niet haalbaar binnen de onderzoeksgroep PPE en de productiemogelijkheden in de werkplaats van de UCLL. Daarom is besloten om ook verder te gaan met de enkele cantileververbinding, aangezien deze veel gemakkelijker te spuitgieten is. Ondanks dat dit prototype iets minder gunstige resultaten vertoont, lijkt het nog steeds potentieel te bieden voor modulaire gespuitsgiete panelen voor gebruik als LRM. Zo is het belangrijk om op te merken dat deze metingen zijn uitgevoerd op 3D-geprinte prototypes, die vanwege de slechte geometrische nauwkeurigheid en anisotropie beperkingen hebben. Daarentegen is spuitgieten een veel nauwkeurigere en robuustere productie-techniek waarbij de verwachtingen zijn dat de uiteindelijke gespuitsgiete panelen beter zullen presteren.

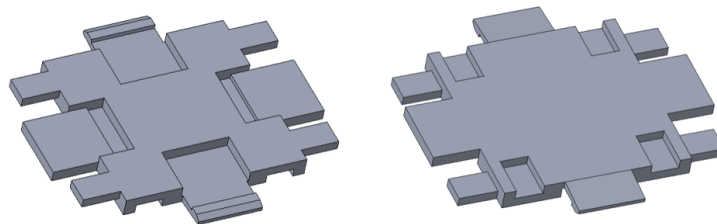
Hoofdstuk 5

Matrijsontwerp

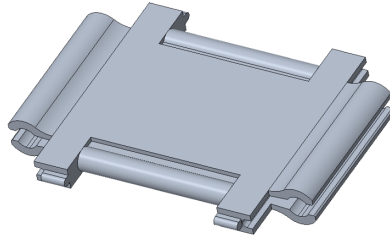
Uit de dynamische proeven is vastgesteld dat de cilindrische fit het beste presteert. Echter, is deze verbinding veel complexer om te spuitgieten en mogelijk niet te realiseren binnen de onderzoeksgroep PPE. De enkele cantileververbinding daarentegen lijkt veel makkelijker te spuitgieten en vergt op het eerste zicht slechts een eenvoudig matrijsconcept. Ondanks dat dit prototype iets minder gunstige resultaten vertoont, lijkt het nog steeds potentieel te bieden voor modulaire gespuitsgiete panelen voor gebruik als hoststructuur van LRM's. Daarom is ervoor gekozen om beide concepten verder uit te werken tot matrijsconcepten met het doel om in eerste instantie de cilindrische fit te spuitgieten. Indien dit matrijsconcept niet haalbaar blijkt te zijn om te produceren binnen de onderzoeksgroep, kan worden overgestapt op het eenvoudiger matrijsontwerp van de enkele cantilever.

5.1 Ontwerpaanpassingen voor het spuitgieten

Het uiteindelijke doel is om plaatstructuren te realiseren van modulaire gespuitsgiete panelen. Tot nu toe zijn de panelen echter slechts ontworpen met een verbindingmechanisme aan twee zijden, wat resulteert in de mogelijkheid om alleen balkstructuren op te bouwen. De panelen moeten daarom worden herontworpen zodat deze zich langs elke zijde kunnen vastklikken. Figuren 5.1 en 5.2 geven de herontworpen modulaire panelen van de twee soorten klikverbindingen weer.



Figuur 5.1: Aangepast ontwerp van de modulair paneel van de enkele cantilever



Figuur 5.2: Aangepast ontwerp van de modulair paneel van de cilindrische fit

In de modellen van in figuren 5.1 en 5.2 is aan sommige spuitgiettechnische aspecten voldaan, zoals een maximale wanddikte van vier millimeter en een geleidelijke overgang in wanddikte. Echter is er geen rekening gehouden met afrondingen en lossingshoeken. Deze aspecten zijn cruciaal voor zowel de levensduur van de matrijs als de integriteit van het eindproduct na het uitwerpen, zoals aangegeven in het deel 2.2.4.

Voor de lossingshoek is verkozen deze te variëren tussen de vlakken in de bewegende- en vaste matrijshelft, om de meegaande beweging van de modulaire panelen met de bewegende matrijshelft te bevorderen. Hiervoor moet de lossingshoek in de bewegende matrijshelft kleiner zijn dan die in de vaste matrijshelft, zodat de panelen minder geneigd zijn in de vaste matrijshelft te blijven plakken bij het openen van de matrijs. Daarom is respectievelijk een hoek van $0,8^\circ$ en 1° gebruikt [64].

Vervolgens moeten de uitwendige hoeken van de panelen, waarvan de negatieve hoeken in de matrijsinserts niet freesbaar zijn, worden afgerond. Voor zowel de enkele cantilever als de cilindrische fit is het belangrijk dat de panelen in de vier hoekpunten met een zo klein mogelijke straal worden afgerond. Een minimale afronding hier is van uiterst belang om de luchtspleet tussen de gemonteerde panelen te minimaliseren. De kleinst mogelijke afronding licht vast door de kleinste freesdiameter beschikbaar in de werkplaats, wat neerkomt op een diameter van één millimeter en dus een afronding van een halve millimeter.

De overige afrondingen zijn niet functioneel waardoor de grote van de afrondingen zijn bepaald met het oog op het productiegemak in de werkplaats. Hierbij is gekozen voor afrondingen met een straal van één of anderhalve millimeter te gebruiken.

5.2 Matrijsinsertontwerp

Na het herontwerpen van beide prototypes, zodat deze voldoen aan de spuitgiettechnische vereisten en geschikt zijn voor modulaire plaatstructuren, dienen de matrijsconcepten te worden ontwikkeld. Hierbij zijn de verwerkingsmogelijkheden van de werkplaats de belangrijkste aandachtspunten.

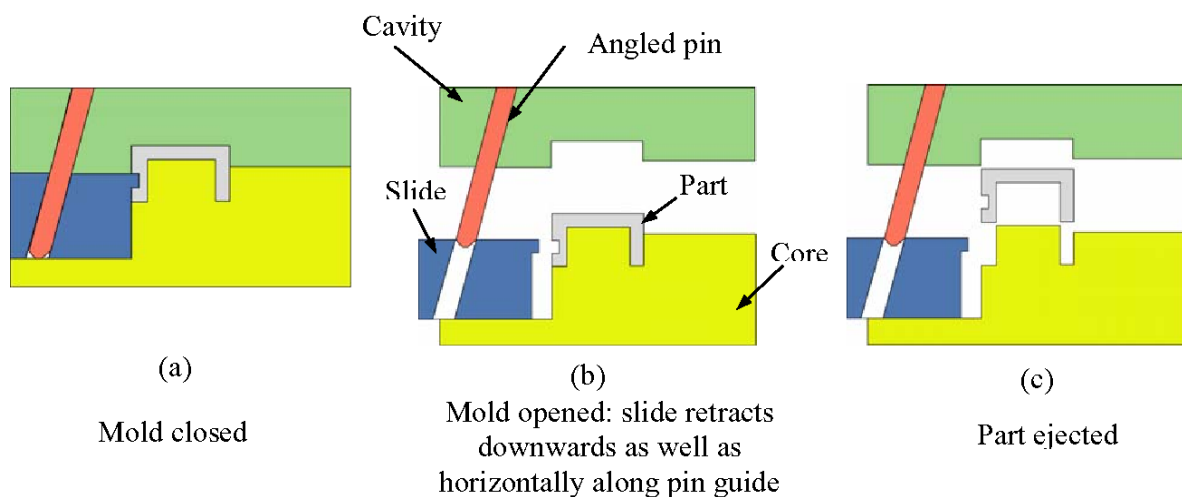
De werkplaats beschikt uitsluitend over klassieke verspaningsmethodes, zoals 2,5-assig frezen, boren- en draaibewerkingen. Deze bewerkingen beïnvloeden de complexiteit en de diepte van bepaalde onderdelen, evenals de afrondingen van de componenten. Hierdoor moeten de afmetingen en vormen van de onderdelen zodanig worden ontworpen dat ze compatibel zijn met de beschikbare verspaningstechnieken, zonder de functionele eisen van de modulaire panelen te beïnvloeden.

Deze ontwerpbeslissingen zijn afgestemd met de verantwoordelijke van de werkplaats om ervoor te zorgen dat de productie efficiënt verloopt en zonder complicaties.

Bij de ontwikkeling van de matrijsconcepten werd aanvankelijk geen rekening gehouden met de positie en baan van de aanspuiting en de locaties van de uitwerppennen. Eerst moest een haalbaar concept worden ontwikkeld in overleg met de verantwoordelijke van de werkplaats om de produceerbaarheid van het concept te garanderen. Na bevestiging van de haalbaarheid werden de spuitgiettechnische aspecten, zoals de positionering van de aanspuiting en de locaties van de uitwerppennen, geïntegreerd in het matrijsconcept. Deze gefaseerde aanpak waarborgt zowel de technische uitvoerbaarheid als de functionaliteit van het eindproduct.

5.2.1 Cilindrische fit

In figuur 5.2 van het 4-zijdige cilindrische fit zijn twee ondersnijdingen waarneembaar, namelijk de holtes tussen de twee vrouwelijke cilindrische bekken. Deze ondersnijding zorgt niet alleen voor meer complexiteit in het design van de matrijsinsert, maar ook voor hun productie. De ondersnijding kan zoals eerder vermeld verwezenlijkt worden door passieve of actieve sleuven die hydraulische of mechanische aangestuurd zijn. Een voorbeeld van een passieve sleuf staat weergegeven in figuur 5.3.

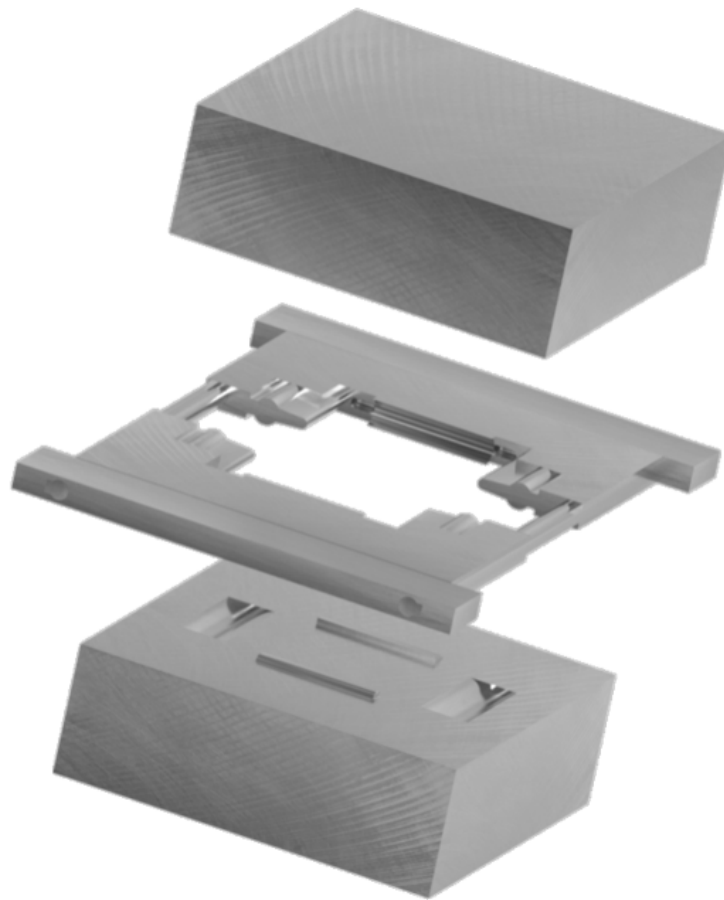


Figuur 5.3: Schematische werking passieve sleuf [65]

In dit voorbeeld is er een uitstekende gehelde pen bevestigd in de vaste matrijshelft (groen gekleurd). Op het moment dat de matrijs gesloten is bevindt deze pen zich in de gehelde holte van een sleuf (blauw gekleurd) op de bewegende matrijshelft (geel gekleurd). Deze sleuf is uitgerust met een veer. Tijdens het openen van de matrijshelften zal deze pen uit deze sleuf schuiven waardoor de sleuf uit de ondersnijding van het gespuitsgiete product schuift omwille van de pen beweging en de veer. Hierdoor kan het spuitgietproduct zonder problemen uitgeworpen worden. Wanneer de twee matrijshelften terug sluiten zal de gehelde pen terug in de verende sleuf schuiven, waardoor de sleuf de ondersnijding terug sluit [65]. Het werken met een passieve sleuf om ondersnijdingen te verhelpen zorgt dat het proces vol continu kan lopen bij een relatief lage prijs toevoeging en zonder extra vereiste aansturing en aandrijvingen [66].

In tegenstelling tot passieve sleuven worden actieve sleuven aangestuurd door een externe aandrijving, hetzij hydraulische of elektrisch [66]. Hierdoor kan de ondersnijding worden gelosten door middel van een aangedreven cilinder. Dit biedt verschillende voordelen ten opzichte van passieve pennen, waaronder een kleinere inbouwruimte en een onafhankelijke beweging van de sleuf [67]. Anderzijds hebben actieve sleuven ook een aantal nadelen. Zo is er de noodzaak van extra aansluitingen voor hydraulische of elektrische systemen in de matrijshelften, wat de complexiteit van de matrijsontwerpen verhoogt. Daarnaast leiden de kosten voor aangedreven cilinders tot een aanzienlijke stijging van de kosten in vergelijking met passieve sleuven [67].

Actieve en passieve sleuven zijn in diverse vormen beschikbaar, maar vormen niet de enige methode voor het verhelpen van een ondersnijding. Een alternatieve benadering is het gebruik van meerdere matrijshelften. Een concept voor de cilindrische fit, gebaseerd op dit principe, is weergegeven in figuur 5.4.



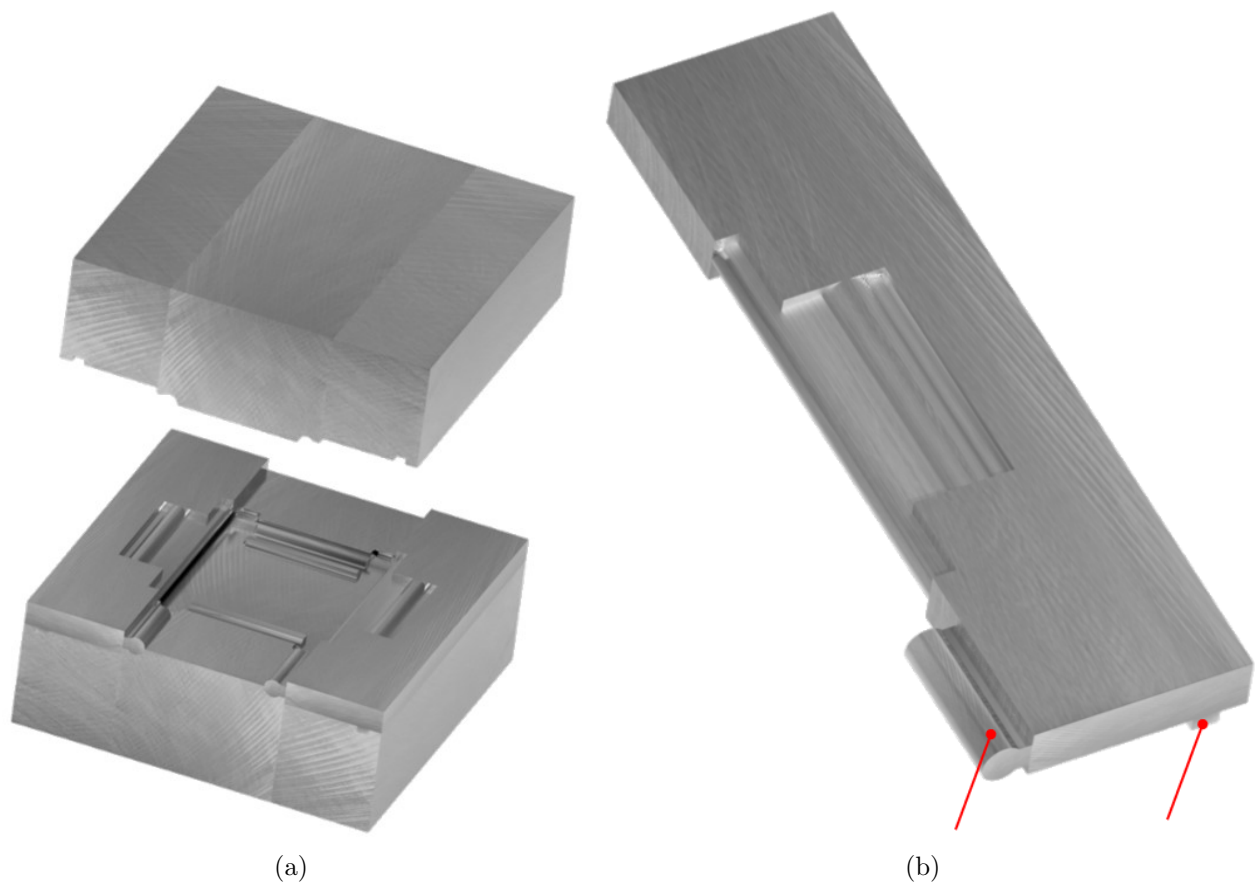
Figuur 5.4: Driekernige matrijsconcept cilindrische fit

De ondersnijding van de cilindrische fit is geïntegreerd in de middelste kern van de driekernige matrijs, zoals weergegeven in figuur 5.4. Echter, de driekernige matrijs is niet realiseerbaar binnen de matrijshuizen van het Technologiecentrum. Dit komt doordat het Technologiecentrum werkt met modulaair opgebouwde matrijzen die gebruikmaken van matrijsinserts. Deze inserts maken het mogelijk om dezelfde matrijs te gebruiken voor de vervaardiging van verschillende producten. Rekening houdend met deze werkwijze, is hetzelfde principe toegepast op de concepten in deze thesis.

Bij zowel de sleuven als de driekernige matrijshelften wordt de verwijdering van de ondersnijdingssleuven gerealiseerd door een laterale beweging van de sleuven of de middelste matrijshelft. Echter, tijdens het spuitgietproces krimpt het spuitgietstuk wat doorgaans geen problemen vormt, tenzij het materiaal rond specifieke onderdelen krimpt, zoals bij de cilindrische fit bij de vrouwelijke bekken. Door deze krimp zet de kunststof zich vast rond de ondersnijdingssleuf, wat nadelig kan zijn voor de laterale beweging van de sleuven en de driekernige matrijs. Dit kan leiden tot scheurvorming in de vrouwelijke cilindrische bekken, wat een cruciaal onderdeel is van de cilindrische fit. Een lokale verzwakking kan resulteren in een slechte verbinding en een inconsistente reproduceerbaarheid.

Om de integriteit van de cilindrische bekken te behouden en de reproduceerbaarheid van de cilindrische fit te waarborgen. Is een mogelijke oplossing het uitklikken van de cilindrische fit uit de ondersnijdingssleuven. Hoewel dit een extra bewerking vereist, is het noodzakelijk om de structurele integriteit van de cilindrische bekken te behouden. Deze oplossing wordt verder behandeld en uitgewerkt in deze thesis.

Door de hierboven besproken werkwijze van de matrijsinsert bij de onderzoeksgroep PPE en het principe van het uitklikken van de ondersnijdingssleuf uit de cilindrische fit, moet het matrijsconcept een tweedelige matrijs zijn. Deze matrijs moet voorzien zijn van ondersnijdingssleuven die samen met de cilindrische fit worden uitgeworpen. Er is verkozen om de scheidingslijn in het midden van de cilindrische fit te plaatsen. Een eerste versie van dit ontwerp is weergegeven in figuur 5.5.

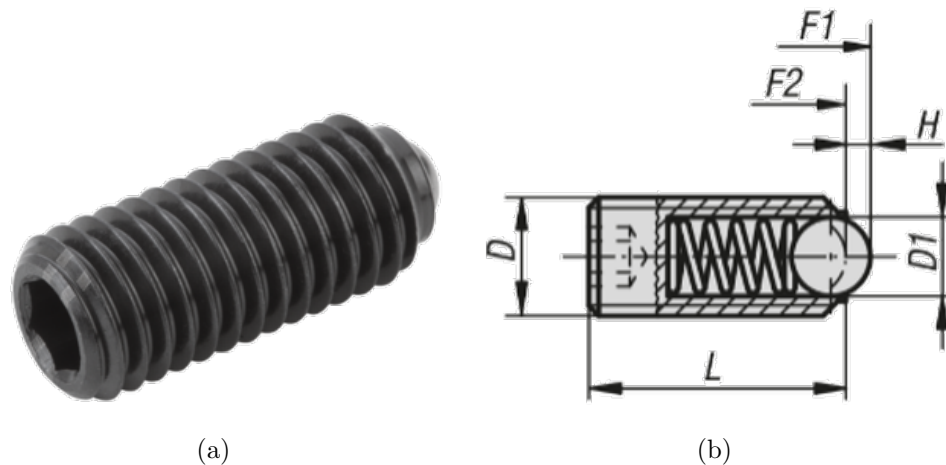


Figuur 5.5: a) Tweedelige matrijsinsert, b) ondersnijdingssleuf matrijs concept

In figuur 5.5b zijn de ondersnijdingssleuven van de eerste conceptversie van de tweedelige matrijsinsert zichtbaar. De aanslagen aangeduid in het rood (fig. 5.5a) zorgen voor de positionering van de ondersnijdingssleuven in de matrijsinserts.

Een belangrijk aspect waarmee nog geen rekening werd gehouden bij dit matrijsontwerp, is het gedrag van de twee ondersnijdingssleuven met het gespuitsgiete paneel tijdens het openen van de matrijs. Aangezien de uitwerppennen zich in de bewegende matrijshelft bevinden, is het noodzakelijk dat de ondersnijdingssleuven met het gespuitsgiete paneel in de bewegende matrijshelft blijven zitten bij het openen van de matrijs. Echter, bij dit ontwerp is het niet gegarandeerd dat deze zullen meekomen met de bewegende matrijshelft en niet in de vaste matrijshelft zullen blijven zitten bij het openen van de matrijs. Deze onzekerheid is problematisch voor de uitwerpfase, waarin zowel het gespuitsgiete paneel als de twee ondersnijdingssleuven moeten worden uitgeworpen. Om ervoor te zorgen dat de ondersnijdingssleuven en het gespuitsgiete paneel in de bewegende matrijsinsert blijven, bij het openen van de matrijs, zijn twee verschillende opties bedacht.

In eerste instantie kan de positie van de ondersnijdingssleuf worden vastgelegd met behulp van een conische passing in de bewegende matrijshelft. Deze methode heeft echter het nadeel dat de exacte kracht die nodig is om de component in de bewegende matrijs te houden moeilijk te bepalen is vanwege de grote variëteit aan variabelen die hierop van invloed zijn. Hiervoor werd in overleg met de expert in de werkplaats een alternatieve oplossing uitgedacht om de ondersnijdingssleuven in de bewegende matrijshelft te bevestigen, waarbij de positioneerkracht variabel kan worden ingesteld. Hierbij wordt gebruikt gemaakt van bolveren waarvan de uitgeoefende kracht eenvoudig kan worden aangepast door ze aan of los te schroeven. De betreffende bolveren die hiervoor worden gebruikt, zijn weergegeven in figuur 5.6.



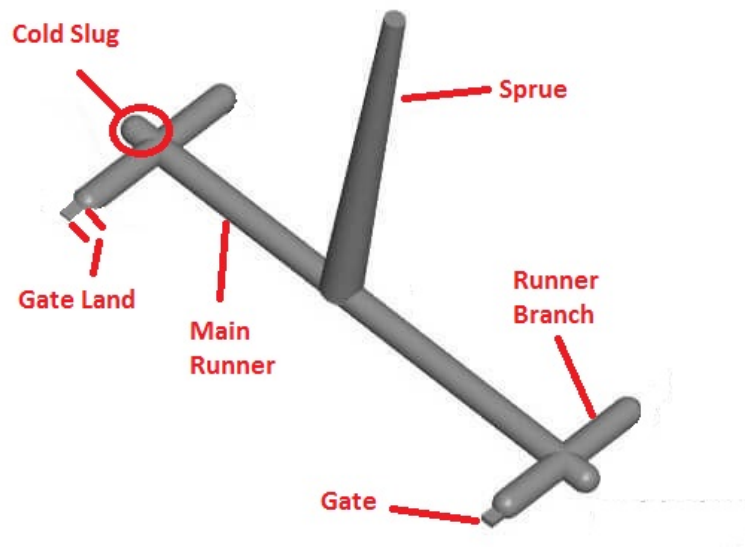
Figuur 5.6: a) bolveer, b) opbouw bolveer

Met behulp van de bolveren kan de positie van de ondersnijdingssleuven in de bewegende matrijshelft worden gewaarborgd, terwijl de uitwerping van de ondersnijdingssleuven en cilindrische fit mogelijk blijft. De bolveren zijn ontwikkeld om bij een bepaalde kracht terug te veren, waardoor de ondersnijdingssleuven worden losgelaten.

Nu de basis van dit matrijsconcept uitgedacht is, is het mogelijk om dit concept verder in detail uit te werken. Hiervoor zijn eerst spuitgietsimulatie uitgevoerd voor de bepaling van verschillende spuitgieteigenschappen, waaronder het aanspuittype en de spuitgietsparameters in het deel 5.2.2. Dit wordt gevolgd door een bespreking van de realisatie van de ondersnijdingssleuf en de bijbehorende bolveren in deel 5.2.3. Ten derde wordt de uitwerping van de cilindrische fit behandeld in deel 5.2.4. Gevolg door de dimensionering en posities van de ontluchting in het deel 5.2.5. Daarna een bespreking over de dimensionering van de matrijsinsets voor de cilindrische fit in het deel 5.2.6. Ten slotte wordt een overzicht gegeven van de gerealiseerde matrijsinsets met de spuitgietsproducten in deel 5.3.

5.2.2 Aanspuiting cilindrische fit

Voor het spuitgieten van de cilindrische fit is een matrijs voorzien met een koude aanspuiting. Hierdoor zal aan elk gespuitsgiete paneel een koudeaanspuittak bevestigd zijn, die naderhand verwijderd moet worden. Figuur 5.7 illustreert een voorbeeld van een koude aanspuittak.



Figuur 5.7: Aanduiding van de verschillende onderdelen van een koude aanspuittak [68]

Het is belangrijk dat de aanspuittak goed wordt ontworpen om ervoor te zorgen dat de panelen tijdens het spuitgieten volledig gevuld worden en dat het proces efficiënt verloopt. Daarom zal de aanspuittak eerst worden gedimensioneerd aan de hand van ontwerpregels uit de literatuur en vervolgens worden gecontroleerd met behulp van spuitgietsimulaties.

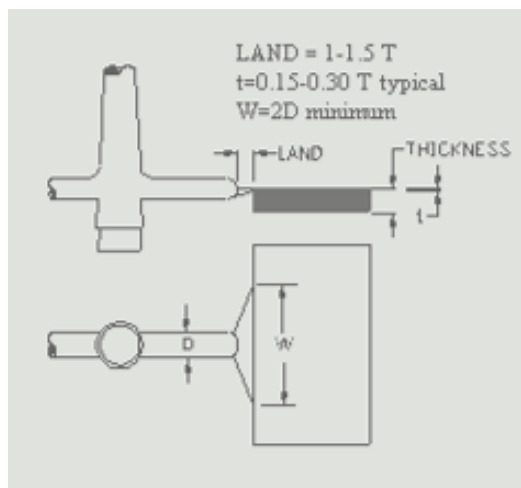
Ontwerpen van de aanspuiting

De aanwezigheid van een aanspuittak is ongunstig vanwege de noodzaak van machinale verwijdering na het spuitgieten, wat resulteert in langere productietijden. Bovendien vereisen toepassingen van modulaire LRM's bij grote omkastingen een aanzienlijk aantal modulaire panelen, waardoor de extra bewerkingsstap beter vermeden wordt.

Echter als de doorsnede van de aanspuiting (gate in figuur 5.7) lokaal aan het spuitgietstuk wordt vernauwd, is het mogelijk de aanspuittak af te breken van het spuitgietproduct. De onderzoeksgroep adviseert op basis van ervaring een vernauwing hoogte van 0,6 millimeter voor het spuitgieten van ABS.

Voor het aanspuitingstype is gekozen voor een waaieraanspuiting voor de cilindrische fit. Een waaieraanspuiting heeft over de gehele lengte een constante dwarsdoorsnede, terwijl de hoogte van de doorsnede geleidelijk afneemt tot een lokale vernauwing. Deze constante dwarsdoorsnede resulteert in een continue kunststofstroom, een gelijkmatige vulling van de matrijscaviteit en een verminderde afschuifstress aan de aanspuitlocatie. Hierbij is het essentieel dat de aanspuiting niet op een functioneel oppervlak plaatsvindt. Dit voorkomt dat het ruwe oppervlak van de afgebroken koude aanspuittak interfereert met het negatief waarin het oppervlak moet passen. De enige brede oppervlakte die niet interfereert met andere oppervlakken is het uiteinde van de cilindrische lichamen, waardoor deze locatie het meest geschikt is voor de aanspuiting.

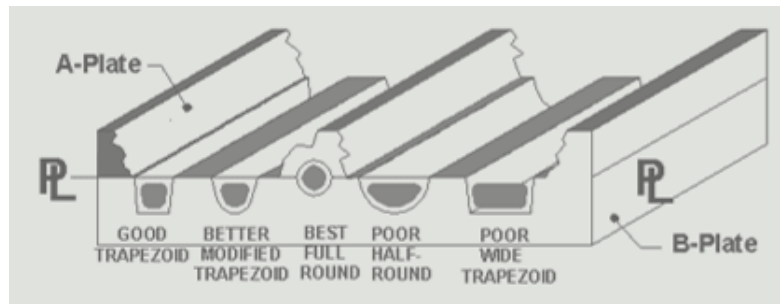
De design regels voor de waaieraanspuiting staan aangegeven in figuur 5.8.



Figuur 5.8: Design regels voor een waaieraanspuiting [69]

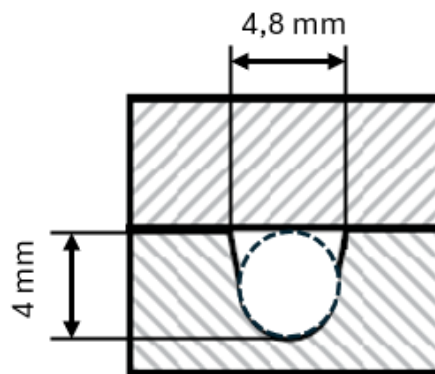
De breedte W van de waaieraanspuiting moet minimaal twee keer de dikte van D van de aanspuittak bedragen. De richtwaarde voor deze dikte D is 1 tot 1,2 keer de dikte van het spuitgietproduct [69]. Aangezien het te spuitgieten paneel 4 mm dik is, wordt een dikte D van 4,8 millimeter gekozen. Dit resulteert in een minimale waaieraanspuitings breedte van 9,6 millimeter. Na het vaststellen van deze minimale breedte is ervoor gekozen om zoveel mogelijk gebruik te maken van de breedte van het aanspuitoppervlak (de mannelijke verbinding). Dit resulteerde uiteindelijk in een breedte van 18,5 millimeter voor de waaieraanspuiting.

Voor het bepalen van de vorm van de aanspuittak (*Runner branch* in figuur 5.7) is figuur 5.9 gebruikt.



Figuur 5.9: Doorsnede types koude aanspuittak [69]

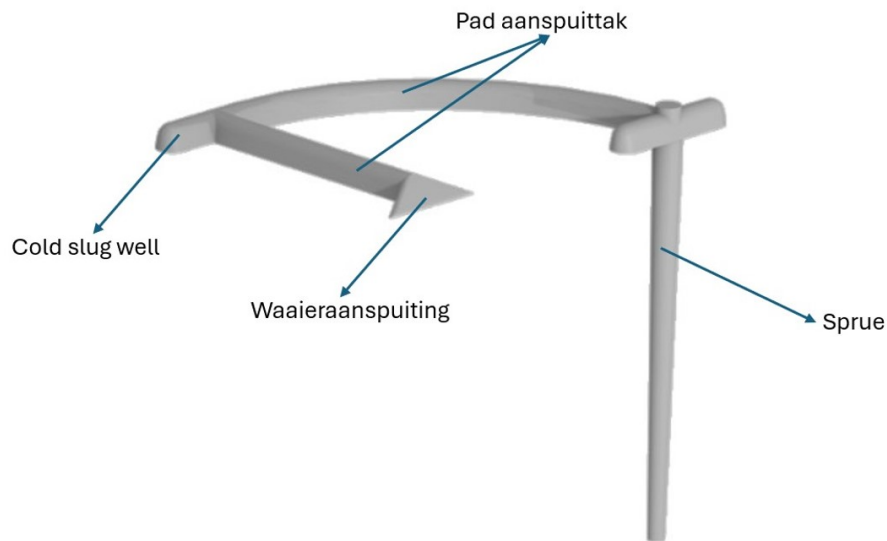
In figuur 5.9 is waarneembaar dat de meest optimale vorm voor een aanspuittak volledig rond is. Deze vorm is echter ongewenst vanwege de noodzaak van twee aparte freesbewerkingen in zowel de vaste als de bewegende matrijsinsert. Het is daarnaast voordeliger om de aanspuittak in de bewegende matrijsinsert te plaatsen. Hierdoor zal namelijk de aanspuittak de neiging hebben om met de bewegende matrijshelft mee te bewegen tijdens het openen van de matrijs, waardoor deze eenvoudig mee kan worden uitgeworpen. Zoals aangegeven in figuur 5.9, is de aangepaste trapeziumvorm, die ook volledig in de bewegende matrijshelft gelegd kan worden, één van de betere aanspuit verlopen en daarom gekozen voor de aanspuittak van de cilindrische fit. De dimensionering van de aanspuittak is weergegeven in figuur 5.10.



Figuur 5.10: Dimensionering aanspuittak [70]

De baan van de aanspuittak is afhankelijk van de mogelijke posities voor de uitwerppennen en de plaatsing van de andere elementen zoals de cilindrische fit, bolveren en ondersnijdings sleuven. Voor een optimaal verloop van de baan is het essentieel dat het zo continu mogelijk is om spanningsconcentraties te beperken. Bovendien moeten er uitstulpingen aanwezig zijn om de koude prop op te vangen. Deze koude prop ontstaat in de neus van de spuitgieteenheid doordat de spuitneus tegen de gekoelde matrijs aan ligt, waardoor de kunststof vooraan in de neus afkoelt en begint te stollen. Deze koude prop wordt vervolgens mee gespoten, wat kan leiden tot afwijkingen in het spuitgietproduct en in het slechtste geval zelfs het aanspuitpunt kan blokkeren [71], [72]. Het opvangen van deze koude prop is dus cruciaal.

Deze koude prop kan worden opgevangen door middel van een uitstulping, ook wel *cold slug well* genoemd, te voorzien net voor de tak van de waaieraanspuiting. De *sprue*, waaieraanspuiting, baan van de aanspuittak en *cold slug well* staan aangeduid en weergegeven in figuur 5.11.

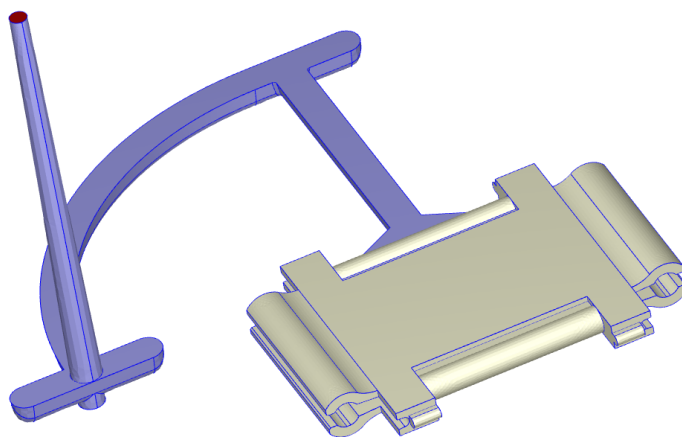


Figuur 5.11: koude aanspuittak met *sprue*, waaieraanspuiting, baan van de aanspuittak en *cold slug wells*

De coniciteit van de *sprue* van in figuur 5.11, is afhankelijk van de inspuittbus. De lengte van de *sprue* komt overeen met de afstand tussen de spuitneus en het scheidingsvlak van de matrijsinserts. Zowel de baan van de aanspuittak als de aanspuiting liggen in de bewegende matrijsinsert, wat zoals eerder vermeld de kans vergroot dat de cilindrische fit en aanspuittak meebeweegt met de bewegende matrijsinsert.

Spuitgietsimulaties

Na de bepalingen van de aanspuittak van de cilindrische fit is het mogelijk om spuitgietsimulaties uit te voeren. Deze simulaties bieden inzicht in diverse spuitgietsparameters, waaronder de vulgraad, posities van luchtinsluitingen, maximale druk in de caviteit, nadruktijd en kromtrekking. Het is echter belangrijk te benadrukken dat de simulaties slechts een benadering vormen, aangezien niet de volledige matrijs mee gesimuleerd wordt. De spuitgietsimulaties werden uitgevoerd met Moldex3D waarvan de gesimuleerde cilindrische fit, aanspuiting, aanspuittak en *sprue* staan weergegeven in figuur 5.12.



Figuur 5.12: Gesimuleerde model van de cilindrische fit met de koude aanspuittak in Moldex3D

In figuur 5.12 zijn de *sprue* en aanspuittak weergegeven in blauw en gedefinieerd als *cold runner* in de Moldex3D-software. De cilindrische fit is weergegeven in beige en gedefinieerd als *part*. De toegepaste mesh voor zowel de *cold runner* als het *part* heeft een grootte van 0,5 millimeter en het gesimuleerde materiaal is ABS NovodurP2X. Dit materiaal sluit het best aan bij de materiaal eigenschappen van de ABS aanwezig op het Technologiecentrum.

De matrijs en bijbehorende koelkanalen zijn niet meegenomen in de simulatie, zoals eerder vermeld. De complexe matrijs is vereenvoudigd tot een model met dezelfde afmetingen als de gebruikte matrijs. Hierbij is de temperatuur van de vereenvoudigde matrijs ingesteld op 60 graden Celsius, zoals aangegeven in de datasheet van het betreffende ABS. De temperatuur van de smelt, eveneens bepaald uit de datasheet, is ingesteld op 240 graden Celsius. De datasheet is te raadplegen in bijlage D. De spuitgietsparameters die met behulp van de simulatie zijn bepaald, staan opgesomd in tabel 5.1.

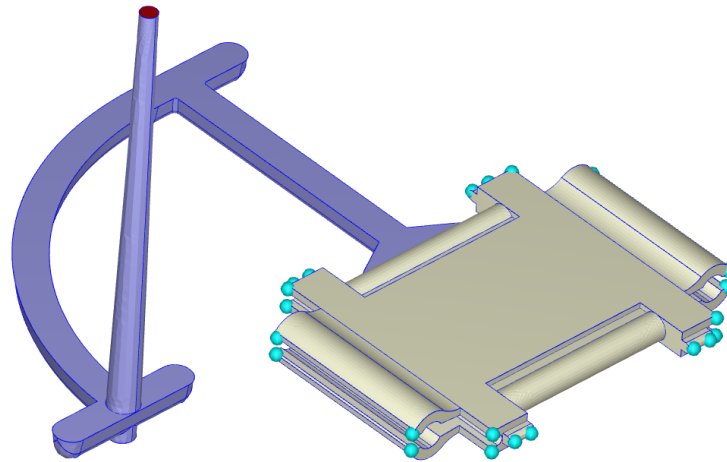
Tabel 5.1: Simulatieresultaten voor de vullingstijd, maximale caviteitsdruk en spuitietvolume

Spuitgietsparameters	Simulatieresultaten
Vullingstijd [s]	0,22
Spuitgietsvolume [cm ³]	9,21
Afviestijd aansputing [s]	5,77

In de spuitgietsimulatie werd het spuitgietsproduct mooi egaal en volledig gevuld, waaruit kan worden geconcludeerd dat de aanspuittak met de waaieraansputing goed gedimensioneerd zijn. De hierbij gesimuleerde vullingstijd van in tabel 5.1 is de tijd die nodig is om het product voor 98% te vullen bij een constante inspuitsnelheid. Het spuitgietsvolume is de hoeveelheid kunststof vereist voor het volledig vullen van de cilindrische fit inclusief de *sprue* en koude aanspuittak. Dit volume verschilt echter van het daadwerkelijke volume kunststof dat gedoseerd wordt tijdens de doseerfase, aangezien er altijd een bepaalde hoeveelheid kunststof aanwezig moet zijn in de schroef voor het nadrukken.

De afviestijd van de waaieraansputing is bepaald aan de hand van de *molten core*-analyse in Moldex3D, die visualiseerde de resterende vloeibare kunststof in het onderdeel en is dus aangevend in verband met het afvriezen van de aansputing

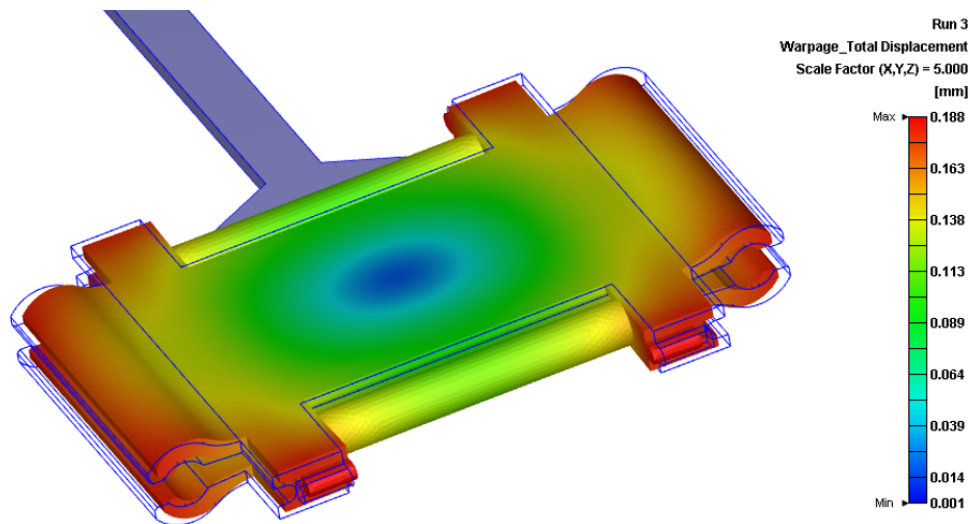
Daarnaast zijn de posities van de luchtinsluitingen cruciaal voor het voorzien van ontluchting in de matrijsinserts. Deze posities zijn aangeduid met blauwe bollen in figuur 5.13.



Figuur 5.13: Positie van de luchtinsluitingen op de cilindrische fit

De dimensies en vorm van de ontluchting zijn verder uitgewerkt in het deel ??.

De *Totale displacement* parameter in Moldex3D geeft een beeld van de vervorming en krimp van de cilindrische fit na het spuitgieten en afkoelen tot kamertemperatuur, zoals weergegeven in figuur 5.14.



Figuur 5.14: Krimp van de cilindrische fit met een schaalfactor van vijf

In figuur 5.14 is een schaalfactor van vijf toegepast om de vervorming duidelijker zichtbaar te maken ten opzichte van de blauwe contour van de basisversie. Hieruit blijkt dat de krimp egaal is en voornamelijk optreedt bij de borgingsuitstulping aan de hoeken van het paneel en aan de cilindrische bekken. De maximale krimp is ook beperkt en bedraagt 0,19 millimeter.

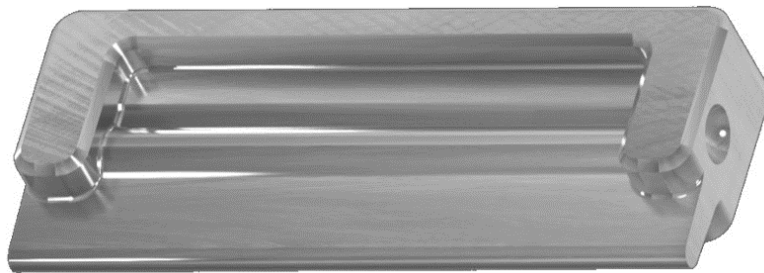
5.2.3 Dimensionering ondersnijdings sleuf en bolveren

Uit de eerste iteraties van het matrijsconcept is een conceptueel idee ontstaan waarbij in de insert van de bewegende matrijshelft twee ondersnijdings sleuven worden bevestigd doormiddel van bolveren die naderhand mee met het gespuitsgiete product kunnen worden uitgeworpen. Dit maakt het mogelijk om de cilindrische fit in zijn geheel te spuitgieten en zonder complicaties uit te werpen. Echter is er nog geen diepgaande aandacht besteed aan de dimensionering en positionering van de bolveren en ondersnijdings sleuven. Deze aspecten worden behandeld in dit hoofdstuk.

Bepaling en dimensionering van bolveren en ondersnijdings sleuf

De bolveren voor het waarborgen van de positionering van de ondersnijdings sleuven in de matrijsinsert van de bewegende matrijshelft zijn koopdelen. Deze bolveren zijn te verkrijgen in verschillende afmetingen. Ook zijn voor elke afmetingen twee typen bolveren verkrijgbaar, één met een sterke veer die een grotere duwkracht kan uitoefenen en één met zwakkere veer en dus een lager duwkracht [73]. In eerste instantie is het belangrijk om na te gaan welk inbouwruimte beschikbaar is in de matrijsinsert voor de bolveren. Op basis hiervan kan het bolveertype met juiste afmetingen gekozen worden, waarna een keuze gemaakt moet worden tussen de sterke en zwakke veer voor het waarborgen van de ondersnijdings sleuven.

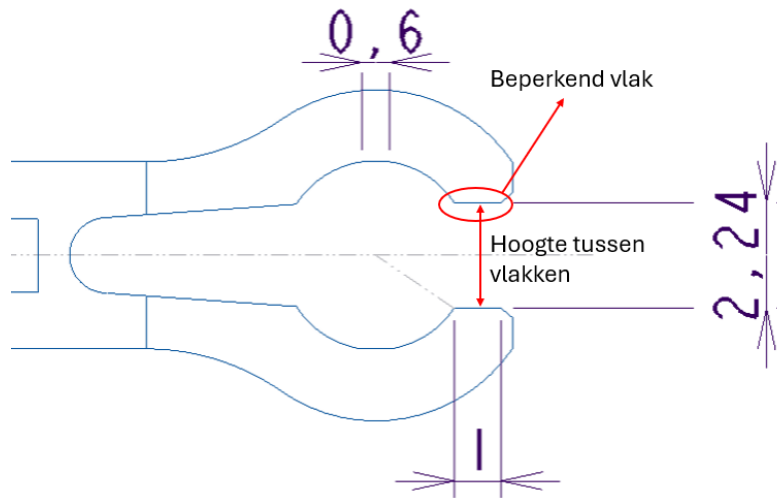
Voor de inbouwruimte zijn de beperkende factoren de dikte en breedte van de matrijsinserts, evenals de dikte van de ondersnijdings sleuven. De ondersnijdings sleuven moeten namelijk het profiel aannemen van de ondersnijding. Het is wel echter mogelijk om de sleuf in de lengte groter te dimensioneren dan de lengte van de ondersnijding zodat enkel het middelste deel van de sleuf het profiel moet aannemen van de ondersnijding terwijl de buitenste wanden in hoogte groter gedimensioneerd kunnen worden waardoor er meer contactoppervlak aanwezig is voor het aangrijpen van de bolveren. Figuur 5.15 geeft het CAD-model van de ondersnijdings sleuf weer.



Figuur 5.15: Gerealiseerde ondersnijdings sleuf voor de cilindrische fit

De ondersnijdings sleuven zullen gewaarborgd worden in de matrijs aan de hand van de eerder besproken bolveren. Hiervoor zal er zowel aan het linker- als rechterzijvlak van elke ondersnijdings sleuf een bolveer in de matrijsinsert voorzien worden zodat de ondersnijdings sleuven hier makkelijk tussen geklikt kunnen worden. De ondersnijdings sleuven moeten hiervoor aan de linker- en rechterzijvlak voorzien worden van een bolvormige groef zodat de bolveren correct kunnen aangrijpen op de ondersnijdings sleuven en het vastklikken hierop mogelijk maakt. Deze bolvormige groef is ook te zien op het rechterzijvlak van de ondersnijdings sleuf in figuur 5.15. De mogelijke grootte van deze groeven en dus ook de mogelijke grootte van de bolveren zijn afhankelijk van de hoogte van de ondersnijdings sleuven. De dimensionering hiervan is te bepalen

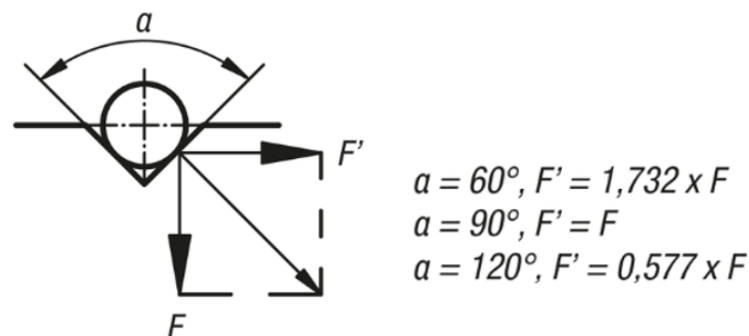
aan de hand van de diepte van het één-millimetervlak, aangeduid in figuur 5.16. Dit vlak vereist een frees met een diameter van één millimeter, die in de werkplaats een maximale snijdiepte van drie millimeter heeft. De maximale hoogte van de ondersnijdingssleuf wordt dus bepaald door deze snijdiepte van de frees en de afstand tussen de vlakken, wat resulteert in een hoogte van 8,24 millimeter.



Figuur 5.16: 2D-tekening van de cilindrische bekken van de cilindrische fit

De volledige hoogte kan echter niet worden benut voor de bolvormige groef voor de bolveer, omdat er aan de boven- en onderkant van de ondersnijdingssleuf voldoende materiaal moet zijn om te voorkomen dat het materiaal afscheurt bij herhaaldelijk in- en uitklikken. Deze overwegingen leiden tot de keuze van een M6 bolveer.

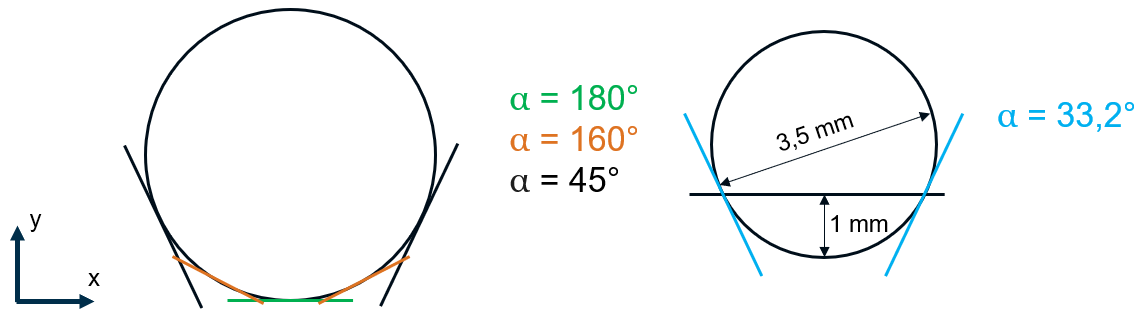
Nu de grootte van de bolveren bepaald is, moet er een keuze gemaakt worden tussen het type met een zwakke of sterke veer. Om deze keuze te kunnen maken is het nodig om een idee te hebben welke veer, welke drukkracht uitoefent en welke kracht vereist is voor het inklikken van de ondersnijdingssleuven. Echter is in de datasheet de kracht berekening gegeven voor de in- en/of uitklikkracht bij driehoekige groeven. Dit staat weergegeven in figuur 5.17 en in formule 5.2.3.



Figuur 5.17: Visuele weergave van de ingeklikte bolveer bij een driehoekige groef [73]

$$Fx = \frac{Fy}{\tan(\alpha/2)}, d\alpha \quad (5.1)$$

In formule 5.2.3 staat F_x voor de nodige inklikkracht en/of uitklikkracht voor de bolveer. De parameter F_y staat voor de krachtwerking uitgeoefend door de veer waarbij deze volledig is aangeschroefd en een maximale duwkracht uitoefent. Deze kracht staat aangegeven als F in figuur 5.17 en is gelijk aan 9 Newton voor het type met de zwakke veer en 21 Newton voor het type met de sterke veer. De parameter α in formule staat voor de openingshoek van de hoekige groef. Echter zullen in de ondersnijdingsleuven bolvormige groeven gefreesd worden waarin de bolveren kunnen klikken. De openingshoek α is hierbij niet meer constant maar varieert met de kromming van groef. Dit wordt visueel weergegeven in figuur 5.18.



Figuur 5.18: Visuele weergave van de openingshoek in de ondersnijdingssleuf

Uit de figuur 5.18 is waarneembaar dat indien de volledige helft van de bolveer in de overeenstemmende groef zal worden geklikt, de openingshoek varieert van 0° tot 180° . Echter is de maximale inklikdiepte van de bolveer beperkt tot één millimeter door de limitaties van de leverancier. De overeenstemmende bolvormige groeven in de ondersnijdingssleuven zullen daarom ook met slechts 1 millimeter worden uitgefreesd. De corresponderende waarde voor de openingshoek varieert dan van $33,2^\circ$ tot 180° . Hiermee kan vervolgens een nieuwe formule 5.2 worden opgesteld waarmee de inklikkracht en/of uitklikkracht per bolveer berekend kan worden..

$$F_x = \int_{33,2^\circ}^{180^\circ} \frac{F_y}{\tan(\alpha/2)}, d\alpha \quad (5.2)$$

De M6 bolveer met de zwakke veer en die met de sterke veer kunnen respectievelijk een maximale duwkracht F_y genereren van 9 N en 28 N. Dit invullen in formule 5.2 geeft een inklikkracht F_x van 70,2 Newton voor de sterke veer en 22,6 Newton voor de zwakke veer. Maar aangezien beide ondersnijdingssleuven elk met twee bolveren worden gewaarborgd moet deze berekende kracht nog maal 2 worden gedaan. Dit geeft dat bij gebruik van de bolveren met de sterke veer, een duwkracht van 140,4 N nodig is om de ondersnijdingssleuven vast te klikken en bij de bolveren met de zwakke veren een duwkracht van 45,2 N nodig is. In eerste instantie lijken de bolveren met de zwakke veer een betere optie wegens gemakkelijkere inklikking zonder al te veel kracht te moeten uitoefenen. Echter, indien deze montagekracht toch te zwak blijkt te zijn doordat, tijdens het inspuiten van het kunststof tijdens het spuitgietproces de ondersnijdingssleuven loskomen, moet er worden overgeschakeld naar de bolveren met de sterke veer.

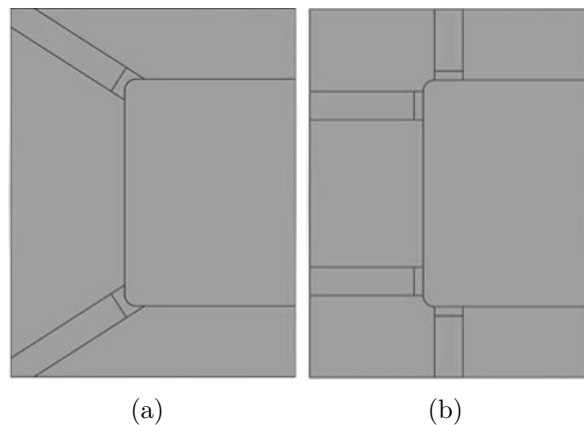
5.2.4 positionering van uitwerppennen

Voor de positionering van de uitwerppennen voor de cilindrische fit is het essentieel dat de uitwerping geen vervorming veroorzaakt en dat de fit gelijkmatig wordt uitgeworpen zonder door het stuk te duwen. Bovendien moet met de posities van de uitwerppennen rekening worden gehouden met de locatie van de koelkanalen en de al reeds bestaande uitwerpposities in de matrijs.

Voor de uitwerping van de aanspuittak en de *sprue* zijn uitwerppennen met een diameter van vier millimeter voorzien. Dit vergemakkelijkt de uitwerping van de *sprue* en aanspuittak. Bij de uitwerping van de cilindrische fit en de ondersnijdingssleuf moeten beide onderdelen simultaan en gelijkmatig uitgeworpen worden, zodat er geen vervorming zal optreden. Hiervoor zijn centraal op de cilindrische fit vier uitwerppennen voorzien. Daarnaast zijn er per sleuf twee uitwerppennen voorzien die zich zo dicht mogelijk bij de positie van de bolveren bevindt, wat een effectieve uitwerping verzekert. Daarnaast is er ter hoogte van het midden van elke ondersnijdingssleuf nog één uitwerppen voorzien die op het cilindrische bekken van de cilindrische fit duwt en helpt om het paneel in zijn geheel mee met de ondersnijdingssleuf uit te werpen. De uitwerppennen op de cilindrische fit en de ondersnijdingssleuf hebben een diameter van twee millimeter, wat resulteert in een kleinere indrukmarkering op het eindproduct. Aangezien het aantal uitwerppennen op de cilindrische fit voldoende is, hoeft de diameter van de uitwerppennen niet groter te zijn, aangezien grotere diameters meer markering achterlaten [74].

5.2.5 Positionering ontluchting

Voor de positionering van de ontluchting worden bestaande richtlijnen uit de literatuur gevolgd, zoals weergegeven in figuur 5.19.



Figuur 5.19: a) Veel gebruikte ontluchting, b) geoptimaliseerde ontluchting [75]

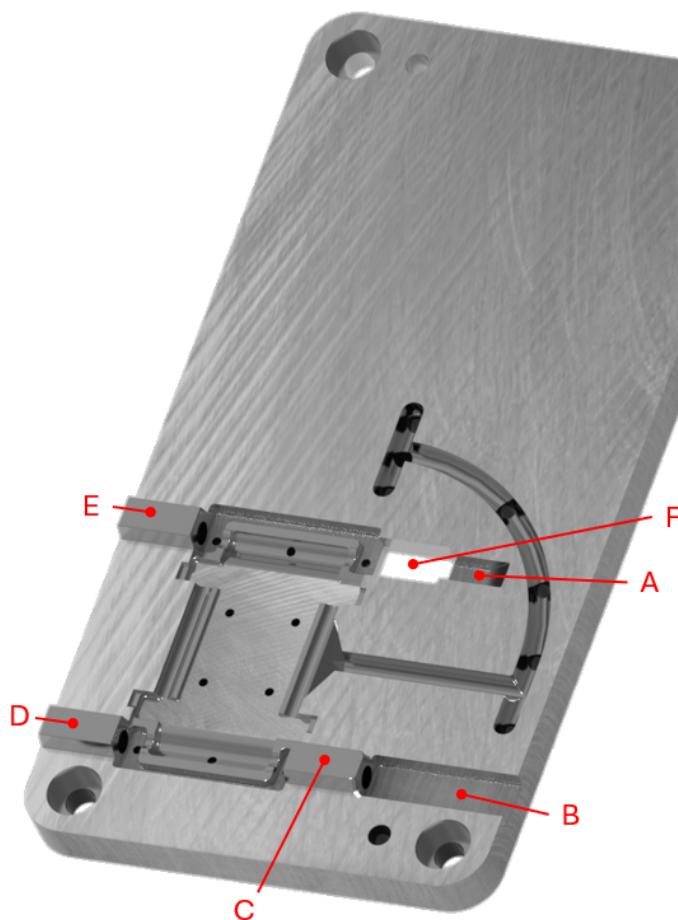
In figuur 5.19a is waarneembaar dat de ontluchting rechtstreeks gebeurt op de hoekpunten. Dit is nadelig voor de levensduur van het ontluchtungskanaal vanwege de variatie in ontluchtingslengte tussen het midden en de buitenkant van de kanalen, wat leidt tot hogere slijtage. In figuur 5.19b vindt de ontluchting net na en voor de afronding plaats, wat gunstiger is doordat dit op meerdere punten gebeurt en de ontluchtingsafstand per kanaal gelijk is. Daarnaast is het voordeliger de ontluchting over een grotere lengte plaatsen waar luchtinsluitingen optreden [75]. Het is echter niet altijd mogelijk aan deze eisen te voldoen vanwege de vorm en positie van onderdeel in de matrijshelft, zoals de baan van de aanspuittak.

Voor de ontluchting van de cilindrische fit is figuur 5.13 gebruikt om de luchtinsluitingen te bepalen. Hierbij is waarneembaar dat alle luchtinsluitingen optreed aan en rond de cilindrische bekken. Hierdoor is dit een interessante plaats om ontluchtingen te voorzien.

De ontluchting wordt gerealiseerd door de speling tussen de ondersnijdingssleuf en het negatief waarin de sleuf past. Dit door de beperkingen in de werkplaats, waar alleen een 2,5-assige CNC-machine beschikbaar is, kan de Z-as hoogte niet nauwkeurig worden ingesteld. Er wordt dus voor gezorgd dat de ondersnijdingssleuf en het negatief goed op elkaar passen, hoewel dit niet ideaal is. Hierdoor zorgt dit ervoor dat ingesloten lucht kan ontsnappen, waardoor extra ontluchting niet nodig is. De speling tussen de ondersnijdingssleuf en het negatief is echter beperkt zodat er geen kunststof tussen stroomt.

5.2.6 Finale matrijsinsert cilindrisch fit

De bewegende matrijsinsert van de cilindrische fit is weergegeven in figuur 5.20.

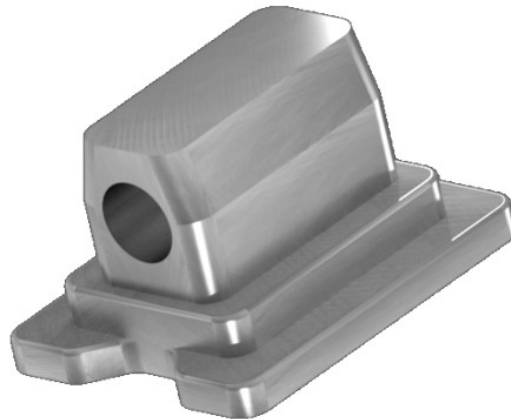


Figuur 5.20: Bewegende matrijsinsert van de cilindrische fit met aanduidingen

De voorziene uitsparing voor het vastdraaien van de bolveren zijn aangeduid met de letters A en B in figuur 5.20. Uitsparing B loopt over de volledige lengte voor productiegemak maar ook voor de produceerbaarheid van de bevestigingsgaten van de bolveren, waarover meer in de volgende alinea. Uitsparing A loopt daarentegen niet over de gehele lengte zoals sleuf B, vanwege de baan van de aanspuittak, wat dit verhindert.

Daarnaast zijn drie uitstulpingen (C, D en E) weergegeven, die dienen voor de bevestiging van de bolveren. De uitsparing B voor uitstulping C is bedoeld voor het tappen en boren van schroefdraad voor de bevestigingsschroef van de bolveren. Deze uitsparing was noodzakelijk omdat het niet mogelijk was om vanuit uitstulping D naar C te boren of schroefdraad te tappen vanwege de negatieve vorm van de ondersnijdingssleuf tussen de twee uitstulpingen. Daarom moesten deze bewerkingen aan de andere kant worden uitgevoerd. Echter, voor de bolveer op positie F is dit niet mogelijk vanwege de baan van de aanspuiting.

Om dit op te lossen, is voor holte F een inlegkader ontworpen dat door middel van een perspassing in de matrijsinsert wordt geschoven. Hierdoor kan het gat afzonderlijk worden geboord en getapt. Het inlegkader is weergegeven in figuur 5.21.



Figuur 5.21: Inlegkader van de bolveer

In figuur 5.21 is een uitsparing waarneembaar op het onderste vlak. Deze uitsparing is voorzien zodat de uitwerppen, voor het uitwerpen van de ondersnijdingssleuf, zo dicht mogelijk bij de bolveer kan worden geplaatst zonder te worden belemmerd.

Daarnaast is in figuur 5.20 waarneembaar dat er geen uitwerppen zijn voorzien in de baan naar de aanspuiting, omdat deze baan zich ter hoogte van een koelkanaal bevindt. Dit is opgelost door de *cold slug well* door te trekken, waardoor hierop een uitwerppen geplaatst kan worden. Bovendien worden er dicht bij de aanspuiting op de cilindrische fit twee uitwerppen geplaatst, zodat de baan langs beide kanten wordt uitgeworpen, waardoor de aanspuiting mee uitgeduwd wordt.

Ten slotte in figuur 5.22 staat de matrijsinsert van de vaste matrijshelft weergegeven.

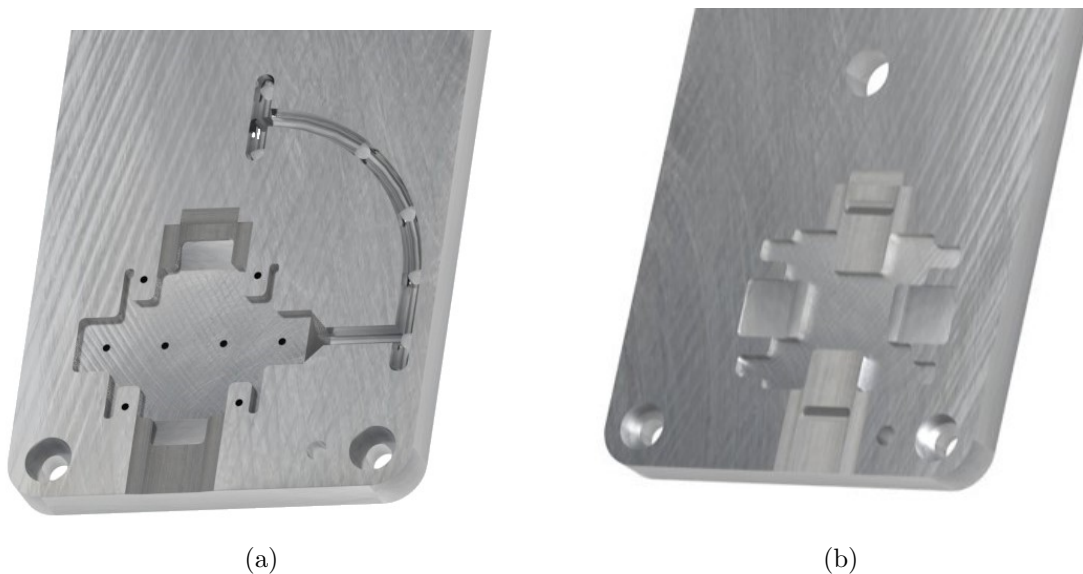


Figuur 5.22: Onderkant van de vaste matrijsinsert

In figuur 5.22 is waarneembaar dat de uitsparingen van de pockets voor de bolveren en de ondersnijdingssleuven uitgelijnt zijn om het productieproces te vereenvoudigen.

5.2.7 Enkele cantilever

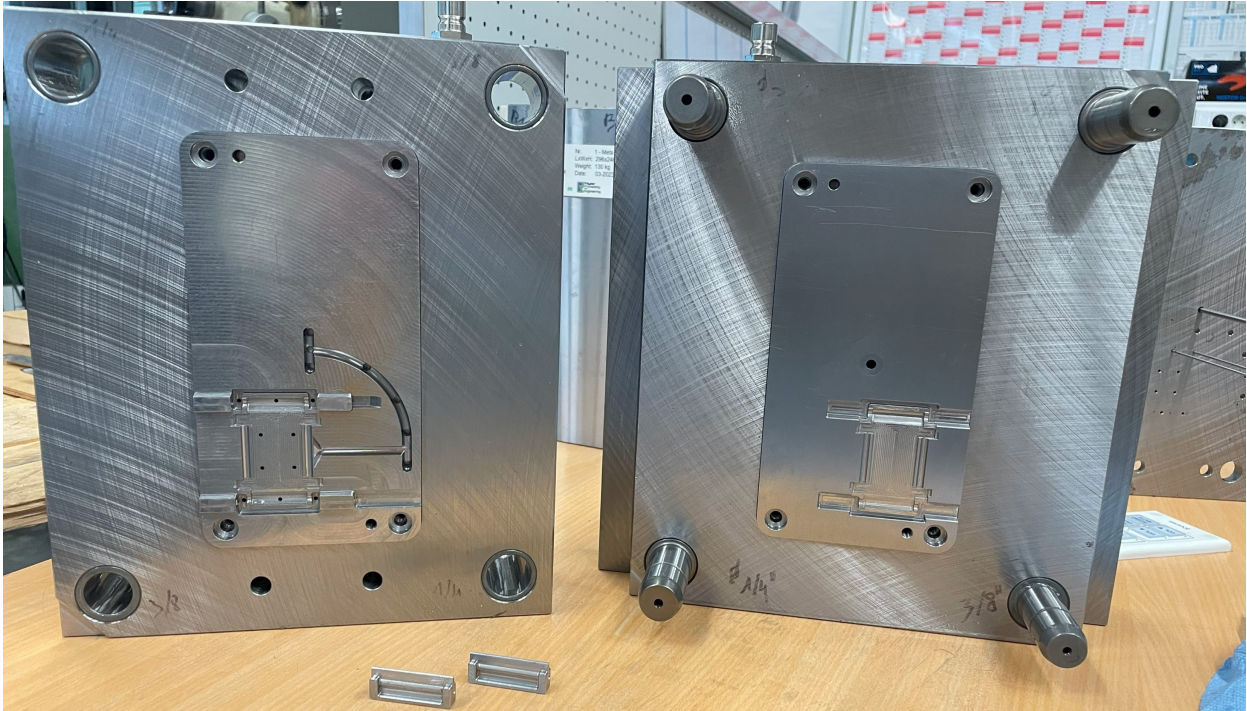
Bij het ontwerpen van de matrijsinserts moet er ook ondersnijding worden weggewerkt. Deze ondersnijding treed namelijk ter hoogte van de inkepingen voor de cantilevers. Om deze ondersnijding weg te werken moet het scheidingsvlak van de matrijs ter hoogte van deze ondersnijding verspringen. Verder zijn er echter geen extra nodige aanpassingen of elementen nodig zoals dit wel het geval is bij de matrijsinserts van de cilindrische fit. Dit maakt dit matrijsontwerp veel eenvoudiger en sneller te produceren. Voor het dimensioneren van de aanspuittak en het positioneren van de uitwerppennen zijn dezelfde werkwijzen gevolgd als bij de ontwerpen van de cilindrische fit. Figuur 5.23 geeft de ontworpen matrijsinserts voor de enkele cantilever weer.



Figuur 5.23: Matrijsinserts van de enkele cantilever: a) matrijsinsert voor in de bewegende matrijshelft, b) matrijsinsert voor in de vaste matrijshelft

5.3 Gerealiseerde matrijsinsert cilindrisch fit en spuitgietproduct

Uiteindelijk na uitgebreid overleg met de verantwoordelijke van de werkplaats betreffend de haalbaarheid van de matrijsinserts is besloten om de matrijsinserts van de cilindrische fit te realiseren. De matrijshelften met de gerealiseerde inserts van de cilindrische fit en de ondersnijdingssleuven staan weergegeven in figuur 5.24.



Figuur 5.24: Beide matrijshelften met de vervaardigde inserts voor de cilindrische fit en de ondersnijdingssleuven

De procesparameters van de spuitgietmachine voor het spuitgieten van de cilindrische fit staan opgesomd in tabel 5.2.

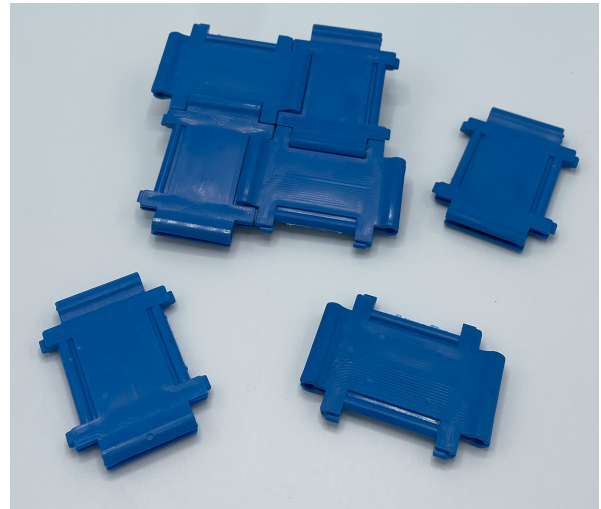
Tabel 5.2: Procesparameters voor het spuitgieten van de cilindrische fit

Spuitgietprocesparameters	Procesparameters
Nadruktijd [s]	5
Koelingstijd [s]	15
Vullingstijd [s]	0,81
Inspuitsnelheid [mm/s]	10
Nadruk [MPa]	200
Schroef doseer lengte [mm]	36

De cilindrische fit met koude aanspuittak en ondersnijdingssleuven na het spuigietproces staan weergegeven in figuur 5.25a. Het eindproduct de cilindrische fit staat weergegeven in figuur 5.25b.



(a)



(b)

Figuur 5.25: a) cilindrische fit met koude aanspuittak en ondersnijdingssleuven, b) eindproduct cilindrische fit

Hoofdstuk 6

Conclusie en suggesties voor toekomstig onderzoek

6.1 Conclusie

In deze thesis is onderzoek gedaan naar het modulaire opbouwen van LRM-hoststructuren uit kleine gespuitsgiete panelen. De modulaire LRM-structuur moet idealiter monteer- en demonteerbaar zijn zonder dat de trillingsonderdrukkingseigenschappen negatief worden beïnvloedt. Hierbij is het belangrijk dat de omvang en complexiteit van het verbindingsmechanisme beperkt blijven, zodat deze binnen de productiemogelijkheden van commerciële spuitgietmachines valt. Dit omvat ook de beperkingen van complexe vormen en ondersnijdingen die moeilijk te realiseren zijn tijdens het spuitgieten. Om de kosten en productietijd verder te minimaliseren, is het wenselijk dat de gespuitsgiete modulaire panelen na het spuitgieten weinig tot geen nabewerkingen vereisen.

Na een literatuurstudie naar reeds bestaande klikverbindingen, werden drie type paneelstructuren ontworpen die voldeden aan de reeds aangehaald criteria. Hiervan zijn twee concepten ontworpen met een cantileverklikstelsel, namelijk de enkele- en dubbele cantilever. De belangrijkste voordelen van de enkele cantilever zijn de beperkte complexiteit, terwijl dit voor de dubbele cantilever de verhoogde robuustheid en een symmetrische klemming zijn. Het derde concept werd ontworpen op basis van een ringvormig klikverbinding, genaamd de cilindrische fit. Deze heeft het voordeel van een groot contactoppervlak en eveneens een symmetrische klemming.

Vervolgens zijn prototypes van deze concepten gefabriceerd met 3D-printen en verbonden tot balkstructuren. Om te bepalen of deze concepten dynamisch geschikt zijn voor modulaire LRM-structuren, zijn dynamische karakterisatieproeven uitgevoerd. Met behulp van een laser vibrometer werden de trillingsresponsen van de balken opgemeten en beoordeeld op lineariteit en het effect van her- en demontage. Uit de testen volgt dat al de drie prototypes een lineair trillingsgedrag vertonen. Echter tonen de prototypes wel verschil in de mate waarmee hun trillingsgedrag wordt beïnvloedt door her- en demontage. De FRF's van de dubbele cantilever worden sterk beïnvloedt door hermontage, wat aangeeft dat deze verbinding het minst geschikt is als hoststructuur voor modulaire metamaterialen. Wat de enkele cantilever betreft, zorgde herhaaldelijke hermontage voor een zekere afwijking in het trillingsgedrag maar beperkter dan de dubbele cantilever. De cilindrische fit presteerde het beste van de drie prototypes waarbij het trillingsgedrag nauwelijks

werd beïnvloedt. Na verder onderzoek werden echter twee scheuren in één van de modulaire panelen van de enkele cantilever vastgesteld. Wanneer deze scheuren precies zijn ontstaan en wat de invloed hiervan is op de metingen, is niet bekend. Scheurvorming zal echter onwaarschijnlijk zijn bij het spuitgieten van het prototype, door de verhoogde nauwkeurigheid en robuustheid van de productietechniek. Daarom werd voor zowel de enkele cantilever als de cilindrische fit de matrijsinserts ontworpen, waarvan enkel de matrijsinsert van de cilindrische fit is gerealiseerd voor het spuitgieten.

In het matrijsontwerp werden spuitgietsimulaties gebruikt voor het ontwerp van de aanspuiting waarbij de vulling, krimp en luchtinsluitingen werden gevalideerd. De aanwezige ondersnijdingen in het cilindrische fit concept werden verholpen door verwijderbare ondersnijdingsleuven te ontwerpen die met terugverende kogels werden gewaarborgd. Dit maakte het mogelijk om een groot aantal panelen succesvol te spuitgieten en vervolgens een modulaire plaatstructuur op te bouwen.

Het onderzoek naar de dynamische invloed van verbindingssystemen toont aan dat de cilindrische fit-concept geschikt kan zijn voor gebruik in LRM-hoststructuren. Eveneens resulteert uit dit eindwerk een gerealiseerde matrijsinsert en gespuitsgiete modulaire paneeltjes met dit type verbinding, ondanks de aanwezige ondersnijding en complexiteit. Dit eindwerk biedt een solide basis voor verder onderzoek naar gespuitsgiete LRM-structuren en draagt bij aan de versterking en versnelling van de ontwikkeling richting lichte, massaproduceerbare en effectieve oplossingen voor geluids- en trillingsbeheersing.

6.2 Suggesties voor toekomstig onderzoek

Verder onderzoek omvat het testen van de gerealiseerde modulaire plaatstructuur op het dynamisch gedrag, waaronder trillingsvoortplanting en geluidsisolatie. Indien deze testen gunstig resultaten vertonen, wordt aanbevolen de hoststructuur te voorzien van resonatoren om de doeltreffendheid van de trillingsonderdrukking te bepalen. Daarnaast kan de verandering in dynamisch gedrag van de verbindingen over tijd worden onderzocht door het optreden van kruip in het polymeer. In de thesis werden de de panelen enkel in ABS gespuitsgiet. Verder is het mogelijk om dieper onderzoek uit te voeren naar verschillende materialen met betrekking tot de prestaties van de klikverbindingen en de trillingsdissipatie eigenschap. Ten slotte kan de plaatstructuur worden aangevuld met hoekpunten om een volledig gesloten omkasting te vervaardigen.

Literatuurlijst

- [1] „Effecten van geluid,” RIVM, 16 juni 2021.[Online].Available: <https://www.rivm.nl/geluid/over-geluid/effecten-van-geluid>. [Geopend: 12 oktober 2023].
- [2] W. H. Organization *et al.*, *Burden of disease from environmental noise: Quantification of healthy life years lost in Europe*. World Health Organization. Regional Office for Europe, 2011.
- [3] S. Govaerts, ”Ontwerp en productie van flexibele multi-materiaal metamaterialen met behulp van spuitgieten”, Masterpoef, PPE, KU Leuven, Diepenbeek, België, 2019.
- [4] C. Goffaux, J. Sánchez-Dehesa, A. L. Yeyati, P. Lambin, A. Khelif, J. Vasseur, and B. Djafari-Rouhani, “Evidence of fano-like interference phenomena in locally resonant materials,” *Physical review letters*, vol. 88, no. 22, pp. 3–4, 2002.
- [5] e. Deckers, c. Claeys, s. Ahsani, f. Alves Pires, r. Boukadia, m. Clasing Villanueva, and e. a. Cool, vanessa, “Locally resonant vibro-acoustic metamaterials: applications at ku leuven,” 2021-10-08.
- [6] K. Steijvers, C. Claeys, L. Van Belle, and E. Deckers, “Incorporating manufacturing process simulations to enhance performance predictions of injection moulded metamaterials,” *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, vol. 11, no. 6, pp. 2617–2629, 2023.
- [7] K. Steijvers, C. Claeys, W. Desmet, P. Eyckens, L. Van Belle, and E. Deckers, “On the potential of injection moulding for the production of locally resonant metamaterials,” in *Proceedings of the 26th International Congress of Mechanical Engineering*, pp. 1–9, COBEM 2021 COBEM 2021 26th International Congress of Mechanical Engineering, 2021.
- [8] „How do you calculate injection pressure,” Zetarmold, 19 Mei 2022. [Online]. Available: <https://zetarmold.com/calculate-injection-pressure/>. [Geopend 2 Oktober 2023].
- [9] „Soundproofing vs sound absorbing – explaining the difference,” Acoustical Surfaces, 28 December 2023. [Online]. Available: <https://www.acousticalsurfaces.com/blog/soundproofing/soundproofing-vs-sound-absorbing>. [Geopend 1 Mei 2024].
- [10] „Akoestische correctie van de lokalen,” Gids duurzame gebouwen, 18 Februari 2019. [Online]. Available: <https://tinyurl.com/akoestischelokalen>. [Geopend 1 april 2024].
- [11] S. Janssen, L. Van Belle, N. G. R. de Melo Filho, W. Desmet, C. Claeys, and E. Deckers, “Improving the noise insulation performance of vibro-acoustic metamaterial panels through multi-resonant design,” *Applied Acoustics*, vol. 213, p. 109622, Oct. 2023.

- [12] C. C. Claeys, K. Vergote, P. Sas, and W. Desmet, “On the potential of tuned resonators to obtain low-frequency vibrational stop bands in periodic panels,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 332, no. 6, pp. 1418–1436, 2013.
- [13] A. Bower, Y. Qi, Yuri Bazilevs. Dynamics and Vibrations. (2022, 2de semester). EN40 Dynamics and Vibrations. Brown, Engeland: Brown University.
- [14] X. Du, Y. Zhou, L. Li, C. Persson, and S. J. Ferguson, “The porous cantilever beam as a model for spinal implants: Experimental, analytical and finite element analysis of dynamic properties,” *Mathematical Biosciences and Engineering*, vol. 20, no. 4, pp. 6273–6293, 2023.
- [15] I.-L. Chang, Z.-X. Liang, H.-W. Kao, S.-H. Chang, and C.-Y. Yang, “The wave attenuation mechanism of the periodic local resonant metamaterial,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 412, pp. 349–359, 2018.
- [16] KU Leuven Mecha(tro)nic System Dynamics (LMSD), Leuven, België. Vibroacoustic performance of locally resonant metamaterials with damping. (21 aug. 2019). Geraadpleegd: 20 februari 2024. [Online video]. Beschikbaar: <https://www.youtube.com/watch?v=xZR0OsflSust=73s>.
- [17] L. Van Belle, C. Claeys, E. Deckers, and W. Desmet, “Implications of nonsub-wavelength resonator spacing on the sound transmission loss predictions of locally resonant metamaterial partitions,” *Journal of Vibration and Acoustics*, vol. 143, no. 4, p. 044503, 2021.
- [18] KU Leuven Mecha(tro)nic System Dynamics (LMSD), Leuven, België. Vibroacoustic performance of locally resonant metamaterials with damping. (9 mrt. 2020). Geraadpleegd: 20 februari 2024. [Online video]. Beschikbaar: <https://www.youtube.com/watch?v=DPbPjo3du5Q>.
- [19] „The outline of injection molding,” Polyplastics, [Online]. Available: <https://www.polyplastics.com/en/support/mold/outline/:text=Injection>
- [20] „Injection Molding Explained,” Manufacturing Solutions Group, [Online]. Available: <https://manufacturingsolutionsgroup.com/injection-molding-explained/>. [Geopend 5 november 2023].
- [21] S. Ranjan, “Clamping system of injection moulding,” Mar. 2018. [Online]. Available: <https://polymeracademy.com/various-clamping-system-in-injection-moulding/>. [Geopend 26 Mei 2024].
- [22] „Cases you need to know in plastic injection molding,” Abbey Vietnam, [Online]. Available: <https://manufacturingsolutionsgroup.com/injection-molding-explained/>. [Geopend 6 december 2023].
- [23] „Injection moulding: electric vs. hydraulic, Fanuc” [Online]. Available: <https://www.fanuc.eu/be/en/roboshot/injection-moulding-electric-vs-hydraulic>. [Geopend 26 Mei 2024].
- [24] „The outline of injection molding, Polyplastic” [Online]. Available: <https://www.polyplastics.com/en/support/mold/outline/>. [Geopend 25 Mei 2024].
- [25] “Mold manufacturing, plastic moulding and 3D printing services, Thriam.” [Online]. Available: <https://tinyurl.com/4j9wuvwz>. [Geopend 27 Mei 2024].

- [26] R. Ye, “Injection molding parameters, 3erp,” Nov. 2023. [Online]. Available: <https://www.3erp.com/blog/injection-molding-parameters/>. [Geopend 26 Mei 2024].
- [27] „Injection Molding Process Parameters,” Advanced Plastiform, [Online]. Available: <https://advancedplastiform.com/injection-molding-process-parameters/>. [Geopend 5 oktober 2024].
- [28] „Flash Lines,” Topworks Plastic Mold, 3 juli 2016. [Online]. Available: <https://www.plasticmoulds.net/flash-lines.html>. [Geopend 8 november 2023].
- [29] “Design rules voor kunststof spuitgieten, Metron technics.” [Online]. Available: <https://www.kunststof-spuitgieten.be/design-rules-voor-kunststof-spuitgieten/>. [Geopend 27 Mei 2024].
- [30] P. Kraan, “10 Slimme Ontwerpregels voor Succesvol Spuitgieten, Flinq plastics,” jan 2023. [Online]. Available: <https://flinqplastics.nl/ontwerpregels-spuitgieten/>. [Geopend 27 Mei 2024].
- [31] „Ensure Injection Molding Designs are Production-Ready With This Checklist,” SyBridge Technologies, 27 januari 2021. [Online]. Available: <https://sybridge.com/injection-molding-designs-production-ready/>. [Geopend 17 november 2023].
- [32] „Thermoplastics 101,” UBQ, 25 november 2022. [Online]. Available: <https://www.ubqmaterials.com/blog-post/thermoplastics/>. [Geopend 24 november 2023].
- [33] L. Satin and J. Bílik, “Impact of Viscosity on Filling the Injection Mould Cavity,” *Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology*, vol. 24, Sept. 2016.
- [34] B. R. d. Alvarenga, D. E. Moseson, R. L. Carneiro, and L. S. Taylor, “Impact of Polymer Type on Thermal Degradation of Amorphous Solid Dispersions Containing Ritonavir,” *Molecular Pharmaceutics*, vol. 19, pp. 332–344, Jan. 2022.
- [35] A. Shrivastava, “1 - Introduction to Plastics Engineering,” in *Introduction to Plastics Engineering* (A. Shrivastava, ed.), Plastics Design Library, pp. 1–16, William Andrew Publishing, Jan. 2018.
- [36] S. Melito, „Polypropylene Injection Molding,” Fictiv, 21 maart 2023. [Online]. Available: <https://www.fictiv.com/articles/polypropylene-injection-molding>. [Geopend 22 Mei 2024].
- [37] M. Sepe, „The importance of melt & Mold Temperature,” Plastic Technology, 27 december 2022. [Online]. Available: <https://www.ptonline.com/articles/the-importance-of-melt-mold-temperature>. [Geopend 23 Mei 2024].
- [38] „Spuitgieten,” AWA Molding, [Online]. Available: <https://www.awamolding.nl/spuitgieten>. [Geopend 2 december 2023].
- [39] „Engineering Polymers,” Nylacast, [Online]. Available: <https://www.nylacast.com/engineering-polymers>. [Geopend 15 december 2023].
- [40] X.-L. Guo and B.-H. Sun, “Assembly and disassembly mechanics of a spherical snap fit,” *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, vol. 13, no. 1, p. 100403, 2023.

- [41] C. Klahn, D. Singer, and M. Meboldt, “Design guidelines for additive manufactured snap-fit joints,” *Procedia CIRP*, vol. 50, pp. 264–269, 2016.
- [42] s.n., *Joints for Plastics*, 1ste ed. Pittsburg, Amerika: Bayer MaterialScience LLC, 2013. [Online]. Beschikbaar: <https://tinyurl.com/snapboekfits>.
- [43] F. Radil, R. Adámek, B. Dobossy, and P. Krejčí, “Robotic snap-fit assembly with success identification based on force feedback,” in *International Conference on Modelling and Simulation for Autonomous Systems*, pp. 145–157, Springer, 2019.
- [44] J. Alric, A. Desrochers, and J.-F. Béland, “Design, optimization and testing of extruded aluminium profiles assembled by mechanical snap-fit,” in *Structures*, vol. 41, pp. 836–848, Elsevier, 2022.
- [45] „Snap Fit Joints: Types, Benefits, And Best Practices,” WayKen, 24 maart 2023. [Online]. Available: <https://waykenrm.com/blogs/snap-fit-joints/>. [Geopend 25 november 2023].
- [46] „A Comprehensive Guide to Effective Snap Fit Design,” AT-Machining, 2 juli 2023. [Online]. Available: <https://at-machining.com/snap-fit-design/>. [Geopend 26 november 2023].
- [47] Jasonxue, „De Ultieme Gids Voor Torsie-Snapverbindingen,” ETCN, 6 september 2023. [Online]. Available: <https://china-maching.com/nl/de-ultieme-gids-voor-torsie-snapverbindingen/>. [Geopend 11 november 2023].
- [48] A. Benatar, “26 - Plastics Joining,” in *Applied Plastics Engineering Handbook (Second Edition)* (M. Kutz, ed.), Plastics Design Library, pp. 575–591, William Andrew Publishing, second edition ed., 2017.
- [49] „Helicoil Thread Inserts,” SOFS, [Online]. Available: <https://www.rivet.com.my/helicoil-thread-inserts>. [Geopend 9 februari 2024].
- [50] „Adding inserts to injection molded parts,” Basilius, 11 maart 2020. [Online]. Available: <https://www.basilius.com/blog/adding-inserts-to-injection-molded-parts/>. [Geopend 10 februari 2014].
- [51] M. D. Bukhari, G. A. Gohar, A. Akhtar, S. Ullah, M. Akram, J. Abid, and H. Raza, “Adhesion theories and effect of surface roughness on energy estimation and wettability of polymeric composites bonded joints: a-review,” *VW Applied Sciences*, vol. 2, no. 1, pp. 74–86, 2020.
- [52] S. Ebnesajjad, “Introduction and adhesion theories,” in *Handbook of Adhesives and Surface Preparation*, pp. 3–13, Elsevier, 2011.
- [53] „Welding Amorphous vs. Semi-Crystalline Plastics,” Trinetics Group, [Online]. Available: <https://trineticsgroup.com/knowledge-base/welding-amorphous-vs-semi-crystalline-plastics/>. [Geopend 10 februari 2024].
- [54] M. SEIDL, J. HABR, J. B. L. BEHALEK, and P. LENFELD, “Optimization of snap-fit designs with rapid prototype technology support,” *MM Science Journal*, 2015.
- [55] „Injection Molding Material Selection Guide,” Proto Labs, [Online]. Available: <https://www.protolabs.com/resources/guides-and-trend-reports/thermoplastic-material-selection-for-injection-molding/>. [Geopend 1 februari 2024].

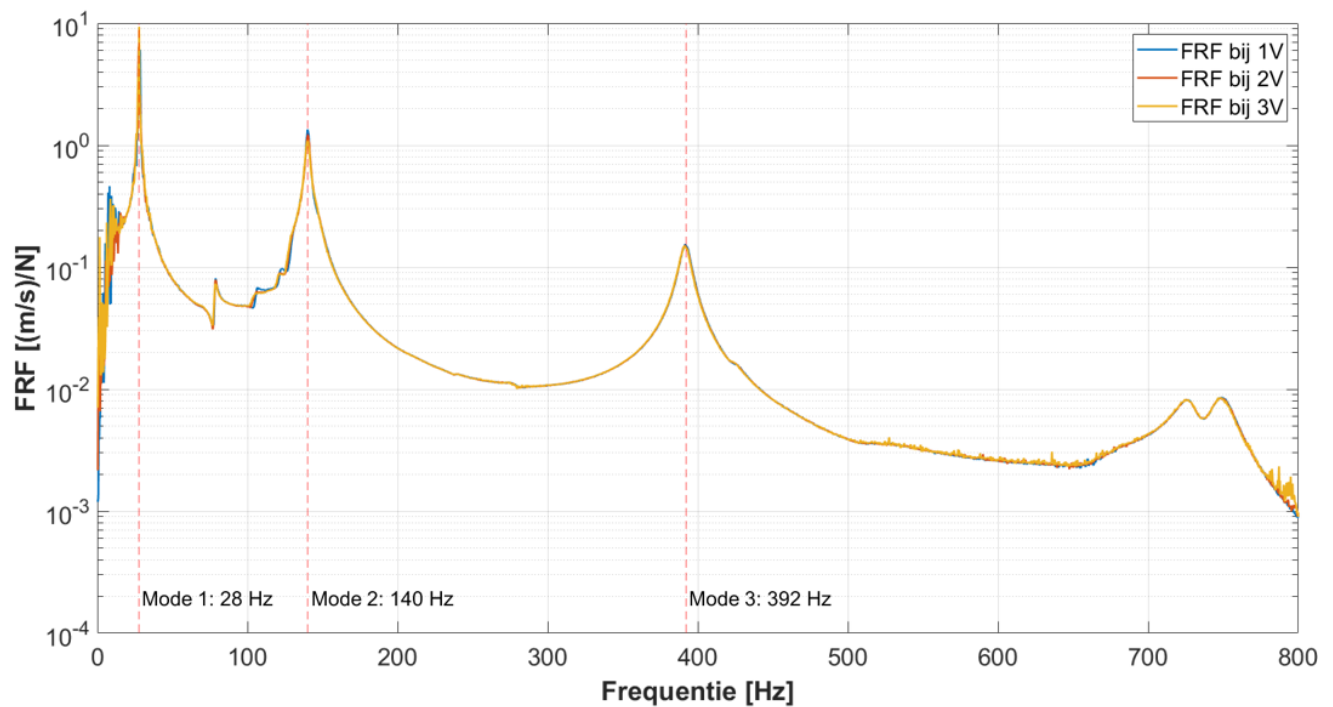
- [56] „Injection Moulding Materials Selection Guide,” Xometry, 23 januari 2023. [Online]. Available: <https://xometry.eu/en/injection-moulding-materials-selection-guide/>. [Geopend 3 februari 2024].
- [57] “Linkedin, how can you select materials and components to reduce vibrations and noise in mechanical systems?.” [Online]. Available: <https://www.linkedin.com/advice/3/how-can-you-select-materials-components-reduce-vibrations>. [Geopend 28 Mei 2024].
- [58] D. Rambacher, “Sorbothane, what is the Tan Delta for Damping Material?,” Feb. 2015. [Online]. Available: <https://tinyurl.com/mre46rjy>. [Geopend 27 Mei 2024].
- [59] „The Ultimate Guide To Design Snap Fitting!,” Worthy Hardware, 31 Maart 2023. [Online]. Available: <https://www.worthyhardware.com/news/snap-fitting/>. [Geopend 12 Mei 2024].
- [60] N. Vidakis, M. Petousis, N. Mountakis, A. Moutsopoulou, and E. Karapidakis, “Energy Consumption vs. Tensile Strength of Poly[methyl methacrylate] in Material Extrusion 3D Printing: The Impact of Six Control Settings,” *Polymers*, vol. 15, Feb. 2023.
- [61] B. Goldschmidt, „Cura Guide to the Best Infill Patterns,” All3DP, 2024. [Online]. Available: <https://all3dp.com/2/cura-infill-patterns-all-you-need-to-know/>. [Geopend 19 Oktober 2023].
- [62] „3D printing ABS design guide,” i.materialise, 2024. [Online]. Available: <https://tinyurl.com/imaterialiseprintingabs>. [Geopend 22 Oktober 2023].
- [63] I.-L. Chang, “Molecular dynamics investigation of carbon nanotube resonance,” *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, vol. 21, no. 4, p. 045011, 2013.
- [64] S. Melito, „ABS Injection Molding,” Fictiv, 2 Januari 2023. [Online]. Available: <https://www.fictiv.com/articles/abs-injection-molding-material-properties-and-processing-considerations: :text=Like>
- [65] „Consider the Advantages of the 2-Step Slider Mold Injection,” Tip-Top, 22 Juli 2021. [Online]. Available: <https://www.tiptopmolds.com/consider-the-advantages-of-a-2-step-slider-mold-injection/>. [Geopend 21 Mei 2024].
- [66] J. Lau, „Undercuts in plastic injection molding,” Ecomolding, 2 Maart 2019. [Online]. Available: <https://www.injectionmould.org/2019/04/19/undercuts/>. [Geopend 21 Mei 2024].
- [67] „Alt Method of Actuating Injection Mold Core Pulls and Slides,” Moldmaking Technology, 2 Januari 2011. [Online]. Available: <https://www.moldmakingtechnology.com/articles/alternative-method-of-actuating-injection-mold-core-pulls-and-slides>. [Geopend 22 Mei 2024].
- [68] „Gates and Runners For Plastic Injection Molding,” Xcentric, 2015. [Online]. Available: <https://xcentricmold.com/gates-and-runners/>. [Geopend 17 Mei 2024].
- [69] „Injection Molding: Mold Design,” Avient, 24 Mei 2024. [Online]. Available: <https://www.avient.com/products/thermoplastic-elastomers/tpe-knowledge-center/injection-molding-guide/injection-molding-mold-design>. [Geopend 25 Mei 2024].

- [70] B. Kim, S. Lee, and H. Kwon, "Determination of injection conditions for astm flexural specimen using injection molding analysis," *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng*, vol. 30, no. 3, pp. 212–217, 2021.
- [71] J. Henz, „Don't Forget the Cold Slug Well," *Plastics Technology*, 23 September 2013. [Online]. Available: <https://www.ptonline.com/articles/dont-forget-the-cold-slug-well>. [Geopend 22 Mei 2024].
- [72] J. Worth, „Scary Plastic Part Defects and How to Avoid Them," *Rodongroup*, 30 Oktober 2014. [Online]. Available: <https://www.rodongroup.com/blog/bid/99262/plastic-injection-molding-101-common-plastic-part-defects>: :text=Cold
- [73] „Verende drukstukken met binnenzeskant en kogel, staal," *Kipp*, 2024. [Online]. Available: <https://www.kippcom.nl/nl/producten/BEDIENDELEN/Verende-drukstukken-borgpennen-vergrendelpennen-sluitgrendels/Verende-drukstukken/Verende-drukstukken-met-binnenzeskant-en-kogel-staal/p/agid.1250>. [Geopend 5 Juni 2024].
- [74] "Ejector Pins and Their Uses in Injection Molding Process - WayKen," Nov. 2022. Section: Rapid Tooling. [Online]. Available: <https://waykenrm.com/blogs/ejector-pins-injection-molding/> [Geopend 2024 Mei 29].
- [75] J. Fattori, „Where and How to Vent Injection Molds: Part 3," *Plastics Technology*, 1 Mei 2019. [Online]. Available: <https://www.ptonline.com/articles/where-and-how-to-vent-injection-molds-part-3>. [Geopend 2024 Mei 21].

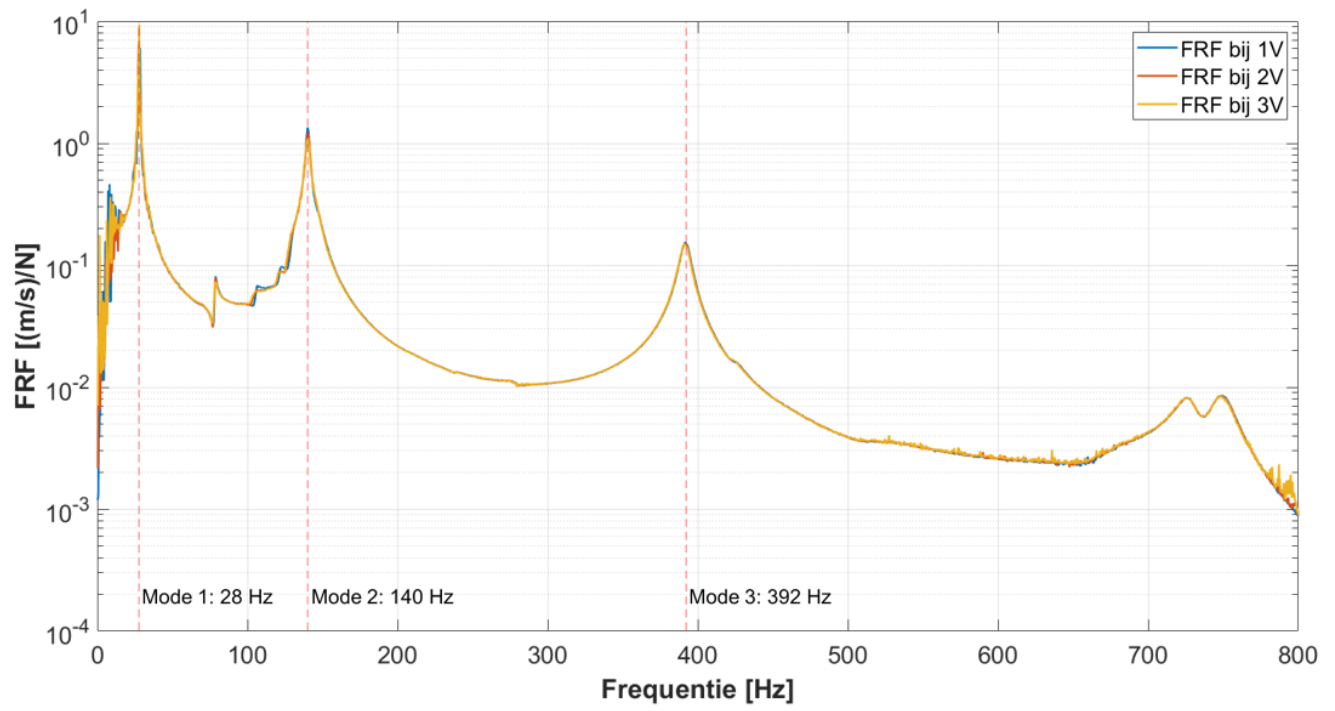
Bijlage A

Bijlage - Trillingkaraterisatieproeven lineariteit

A.1 Testresultaat enkele cantilever



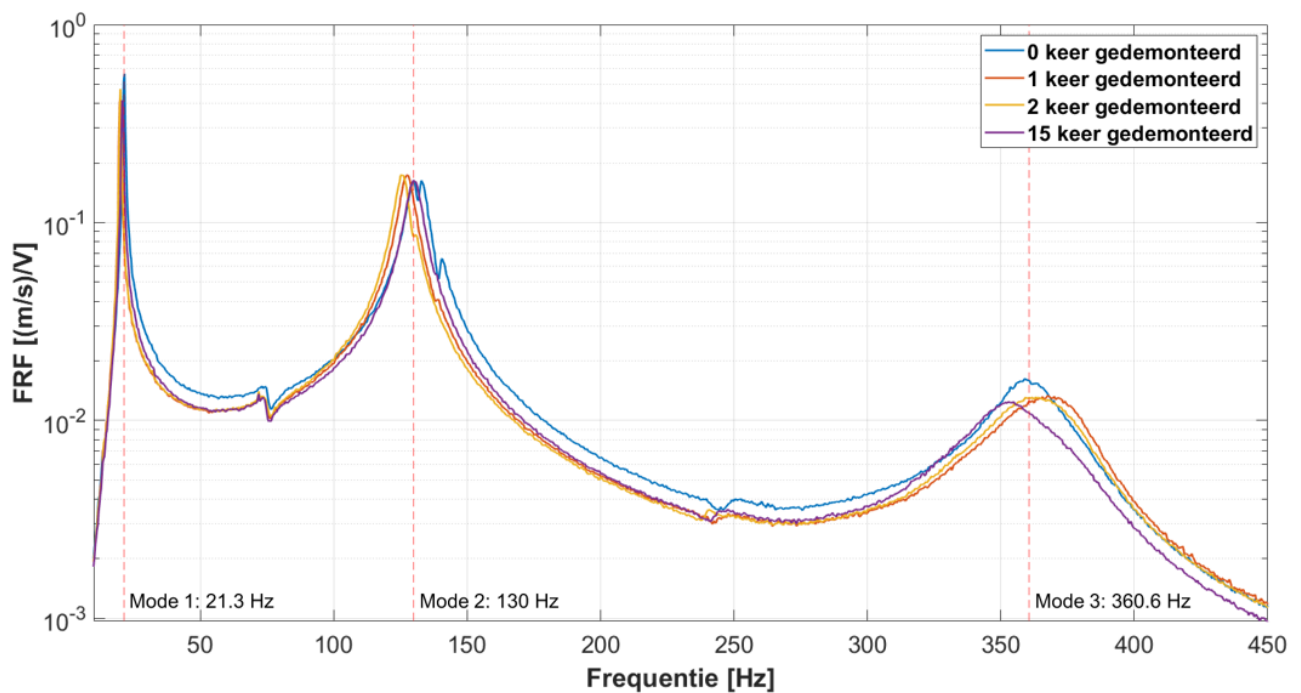
A.2 Testresultaat dubbele cantilever



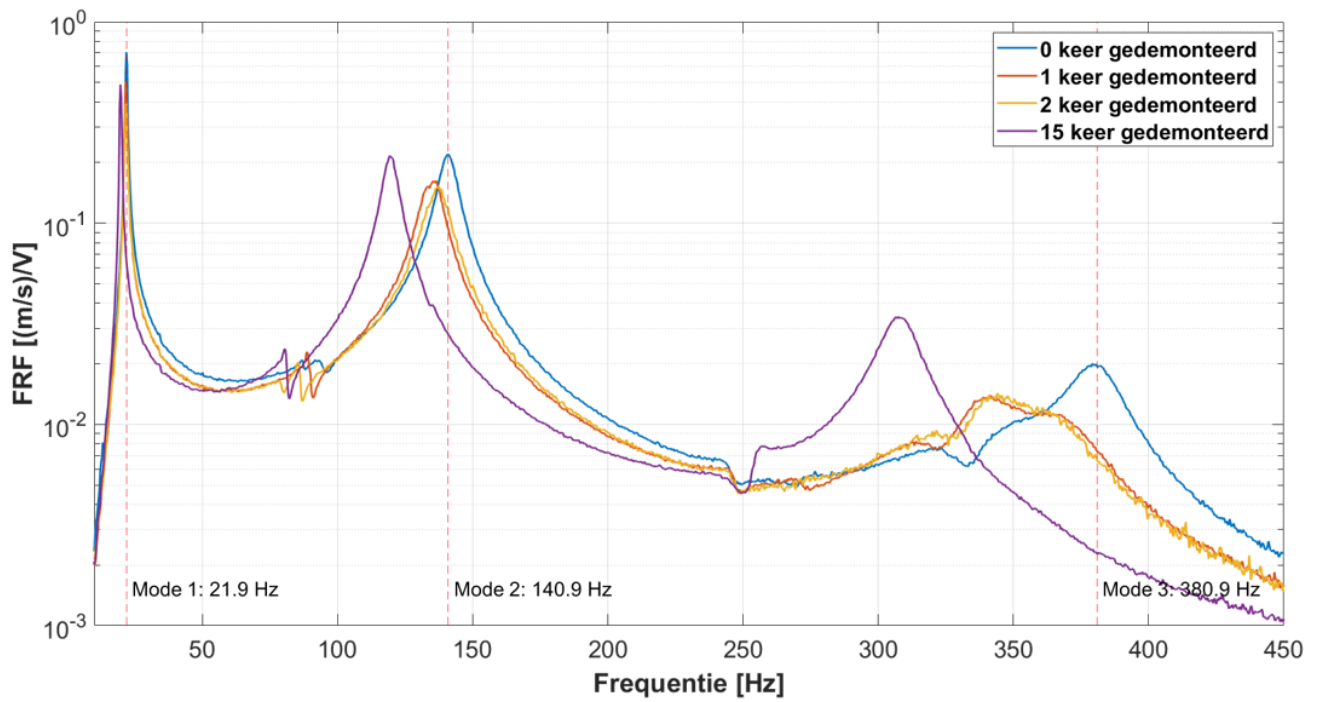
Bijlage B

Bijlage - Trillingkaraterisatieproeven demontage

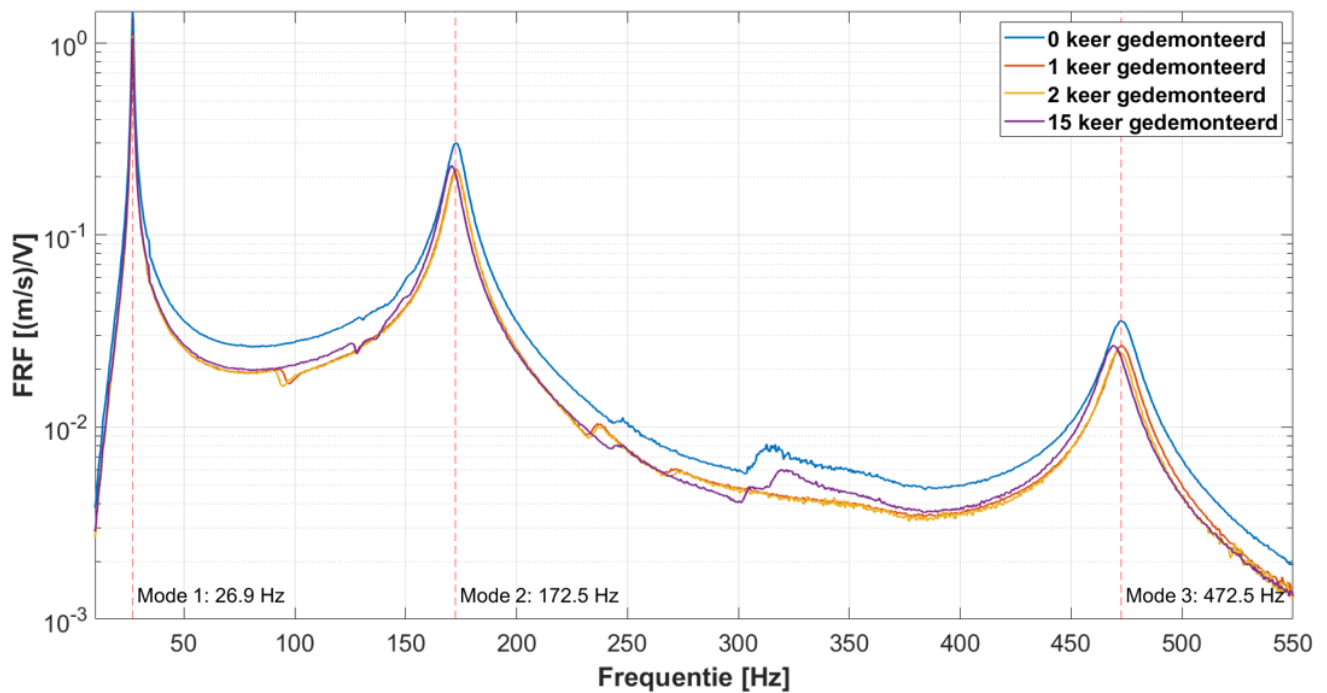
B.1 Testresultaat enkele cantilever



B.2 Testresultaat dubbele cantilever



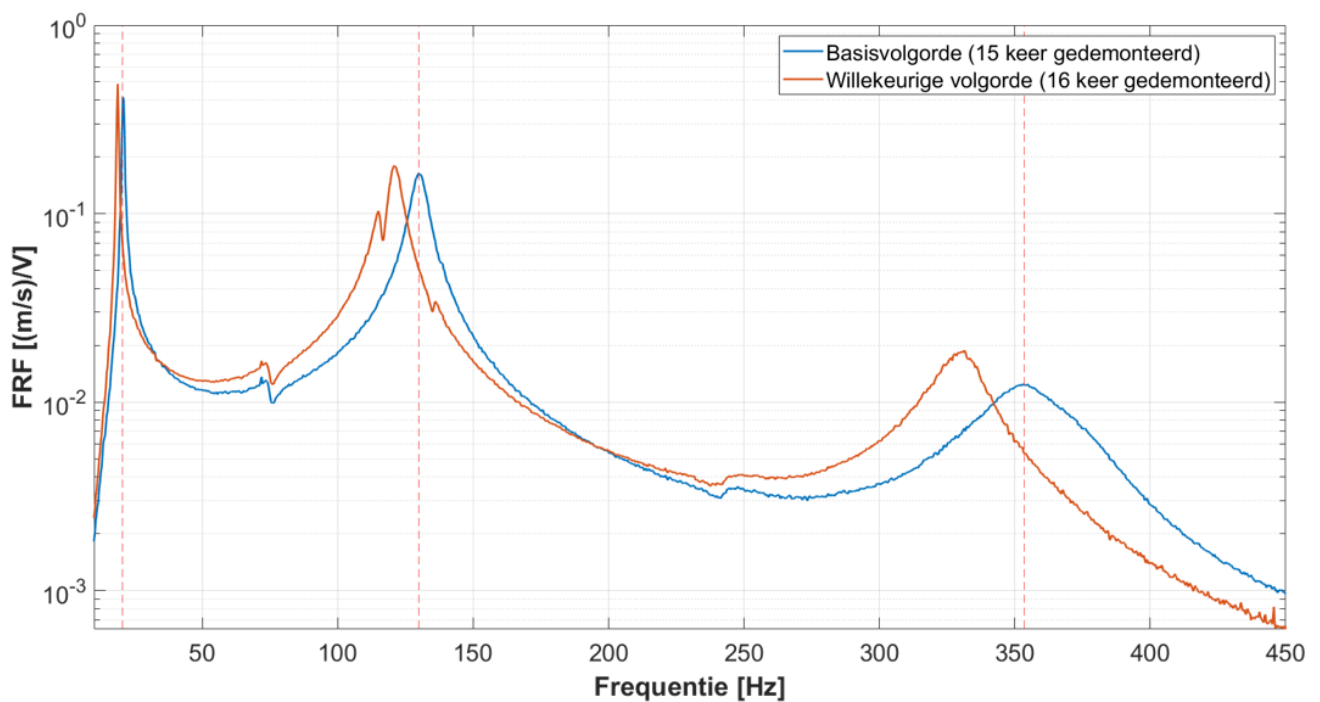
B.3 Testresultaat cilindrische fit



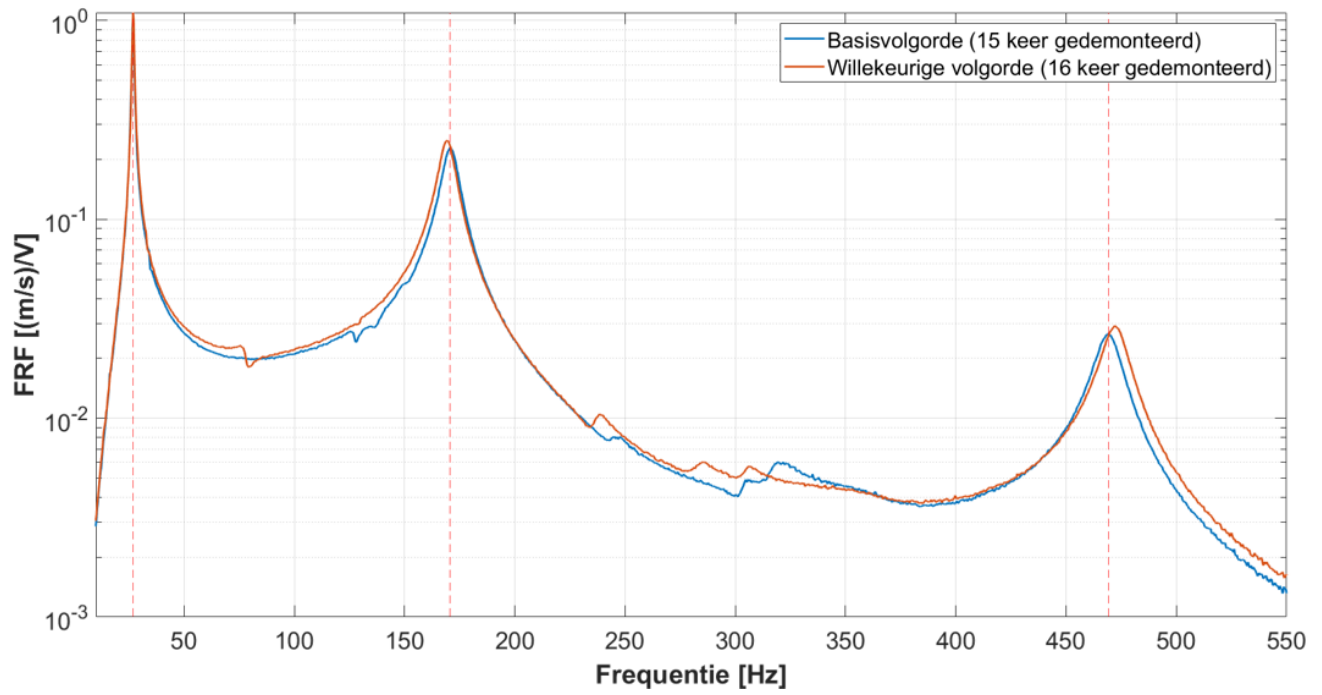
Bijlage C

Bijlage - Trillingkaraterisatieproeven volgorde

C.1 Testresultaat enkele cantilever



C.2 Testresultaat cilindrische fit



Bijlage D

Bijlage - Datasheet ABS

Lustran® ABS / Novodur®				Injection molding grades			
				General-purpose grades			
Typical Properties	Test Conditions	Units	Standards	Novodur P2L-AT	Novodur P2X	Novodur P2H-AT	Novodur P3H-AT

Rheological properties

C Melt volume-flow rate	220 °C; 10 kg	cm ³ / (10 min)	ISO 1133	45	31	37	12
C Molding shrinkage, parallel		%	ISO 294-4	0.4 - 0.6	0.4 - 0.6	0.4 - 0.6	0.4 - 0.7
C Molding shrinkage, normal		%	ISO 294-4	0.4 - 0.6	0.4 - 0.6	0.4 - 0.6	0.4 - 0.7

Mechanical properties (23 °C/50 % r.h.)

C Tensile modulus	1 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	2700	2600	2500	2500
C Yield stress	50 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	45	45	44	48
C Yield strain	50 mm/min	%	ISO 527-1,-2	2.1	2.2	2.1	2.4
Stress at break	50 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2				
Strain at break	50 mm/min	%	based on ISO 527-1,-2	> 15	> 15	>15	> 15
C Charpy impact strength	23 °C	kJ/m ²	ISO 179-1eU	70	100	100	180
C Charpy impact strength	-30 °C	kJ/m ²	ISO 179-1eU	70	80	80	90
C Charpy notched impact strength	23 °C	kJ/m ²	ISO 179-1eA	10	15	16	20
C Charpy notched impact strength	-30 °C	kJ/m ²	ISO 179-1eA	4	7	7	11
Izod notched impact strength	23 °C	kJ/m ²	ISO 180-1A	10	16	16	18
Izod notched impact strength	-30 °C	kJ/m ²	ISO 180-1A	4	7	7	10
Flexural modulus	2 mm/min	MPa	ISO 178	2550	2450	2400	2400
Flexural strength	2 mm/min	MPa	ISO 178	72	75	70	71
Ball indentation hardness		N/mm ²	ISO 2039-1	120	115	110	105

Thermal properties

C Temperature of deflection under load	1,80 MPa	°C	ISO 75-1,-2	92	94	92	92
C Temperature of deflection under load	0,45 MPa	°C	ISO 75-1,-2	96	97	96	96
C Vicat softening temperature	50 N; 50 °C/h	°C	ISO 306	96	97	95	96
C Coefficient of linear thermal expansion, parallel	23 to 55 °C	10 ⁻⁴ /K	ISO 11359-1,-2	0.9	0.9	0.9	0.9
C Burning behavior UL 94 (1.6 mm)	1.6 mm	Class	UL 94	HB	HB	HB	HB

Electrical Properties (23 °C/50 % r.h.)

C Relative permittivity	100 Hz	-	IEC 60250	3.1	3.1	3	3.1
C Relative permittivity	1 MHz	-	IEC 60250	3	2.9	2.9	2.9
C Dissipation factor	100 Hz	10 ⁻⁴	IEC 60250	80	60	55	60
C Dissipation factor	1 MHz	10 ⁻⁴	IEC 60250	80	80	90	80
C Volume resistivity		Ω • m	IEC 60093	1E+13	1E+13	1E+13	1E+13
C Surface resistivity		Ω	IEC 60093	1E+15	1E+15	1E+15	1E+15
C Electric strength	1 mm	kV/mm	IEC 60243-1	31	36	34	33
C Comparative tracking index CTI	Solution A	Rating	IEC 60112	600	600	600	600

Other properties (23 °C)

C Density	-	kg/m ³	ISO 1183	1050	1050	1050	1050
-----------	---	-------------------	----------	------	------	------	------

Processing conditions for test specimens

C Injection molding-Melt temperature	-	°C	ISO 294	240	240	240	240
C Injection molding-Mold temperature	-	°C	ISO 294	70	70	70	70
C Injection molding-Injection velocity	-	mm/s	ISO 294	240	240	240	240

Further Information

Processing: Brochure: Processing for the injection molder (Order no.: KU 11822 e)
Brochure: Properties and Processing (Order no.: KU 13002 e)

NB = No break
 Global Grades

C These property characteristics are taken from the CAMPUS® plastics data bank and are based on the international catalogue of basic data for plastics according to ISO 10350 (Plastics Acquisition and Presentation of Comparable Single-Point Data, 1993).

For comprehensive, up-to-the-minute information,
see our Internet website
<http://plastics.bayer.com>
and our CD-ROM
"The World of Bayer Engineering Plastics"
(Bestell-Nr.: KU 51100 d;e;fr)