

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:
elektromechanica

Masterthesis

Ontwerp en productie van flexibele multi-materiaal metamaterialen met behulp van spuitgieten

Sean Govaerts

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

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Elke DECKERS

COPROMOTOR :

ing. Kristof STEIJVERS

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 productie van flexibele multi-materiaal metamaterialen met behulp van spuitgieten

Sean Govaerts

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

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Elke DECKERS

COPROMOTOR :

ing. Kristof STEUVERS



KU LEUVEN

Woord vooraf

Voor deze masterthesis is er een samenwerking met de Polymer Processing & Engineering onderzoeksgroep aangegaan. Een eerste dank gaat uit naar mijn promotor prof. dr. ir. Elke Deckers en begeleider ing. Kristof Steijvers. Dankzij de hun inzet was het mogelijk de masterthesis af te ronden in een vervroegd programma.

Een algemene dank gaat uit naar het personeel van Polymer Processing & Engineering voor het delen van eigen ervaringen gaande van materiaalkennis tot productietechnieken. Waardoor het versnelde tempo van de thesis haalbaar bleef. Uiteraard verdient ook de volledig groep een erkenning voor het creëren van een aangename werkomgeving.

Graag bedank ik ook prof. Dr. Ir. Johan Baeten voor de flexibiliteit bij het voorbereidend werk in het voorgaand academiejaar. Ook Simon-Pierre Verpoort wil ik bedanken voor de productie van de metalen insert noodzakelijk in het definitieve ontwerp.

Als laatste zou ik graag mijn familie en vrienden bedanken voor de steun gedurende mijn opleiding. Door jullie was het mogelijk mij op mijn studie toe te leggen en deze succesvol af te ronden.

Inhoudsopgave

Woord vooraf	15
Lijst van tabellen	19
Lijst van figuren	21
Verklarende woordenlijst	23
Abstract	25
Abstract	27
1. Inleiding	29
1.1. Situering	29
1.2. Onderzoeksvraag.....	16
1.3. Doelstellingen.....	16
1.4. Materiaal en methode	17
1.5. Vooruitblik	17
2. Literatuurstudie	19
2.1. Socio-economische relevantie	19
2.2. Lokaal resonante metamaterialen	20
2.3. Productie van LRMs a.d.h.v. spuitgietprocessen	21
2.3.1. Spuitgietproces	21
2.3.2. Spuitgietproces voor breedbandige LRMs	22
2.3.3. Materiaal selectie breedbandige LRMs	24
3. Statische materiaalkarakterisatie	25
3.1. Productie van 1K-trekstaven	26
3.1.1. Resultaten 1K-treksterkte	27
3.2. Treksterkte 2K-verbindingen	28
3.2.1. Resultaten 2K-trekstaven.....	29
4. Dynamische materiaalkarakterisatie.....	33
4.1. Resonatorconfiguraties	33
4.2. Numerieke simulatie.....	35
4.3. Opmeten van resonatoren	35
4.4. Resultaten oppervlaktevoorbereiding	36
4.5. Resultaten materiaaldistributie	36
4.6. Resultaten toegevoegde massa's	37
5. Resonatordesign aan de hand van parameteroptimalisatie	39
5.1. Parameteroptimalisatie en productie	39
5.2. Opmeten van LRMs	41
5.3. Resultaten	42
6. Besluit.....	45
Referentielijst	47

Lijst van tabellen

Tabel 1: Specificaties DEMAG IntElect 50/330-100.....	22
Tabel 2: 1K-trekstaven spuitparameters.....	26
Tabel 3: 1K-trekproeven	27
Tabel 4: 2K-trekstaven spuitparameters voor ABS/TPU	28
Tabel 5: Trekproeven 2K Desmopan 487	30
Tabel 6: Trekproeven 2K Desmopan 6064A.....	30
Tabel 7: Trekproeven 2K Desmopan - Desmopan.....	31
Tabel 8: procesparameters resonatoren	33
Tabel 9: Resultaten oppervlaktevoorbereiding.....	36
Tabel 10: Resultaten materiaaldistributie.....	36
Tabel 11: Resultaten toegevoegde massa's.....	37
Tabel 12: Verificatie materiaaleigenschappen	39
Tabel 13: Uiterste limieten binnen parameteroptimalisatie.....	40
Tabel 14: Resultaten geoptimaliseerd resonator design	42

Lijst van figuren

Figuur 1: Voorbeeld LRM plaat met toegevoegde resonator uitgelicht	29
Figuur 2: Effecten van geluidsvervuiling [3]	19
Figuur 3: LRMs gepositioneerd in band [3]	20
Figuur 4: a) Oneindige plaat zonder resonatoren, b) oneindige plaat met resonatoren [7]	20
Figuur 5: Procescyclus van één shot [5]	21
Figuur 6: Insert moulding van resonatoren [4]	22
Figuur 7: Bi-injectie machine [9]	23
Figuur 8: 2K-spuitsieten m.b.v. een halffabricaat [9]	23
Figuur 9: Compatibiliteit kunststoffen [13]	24
Figuur 10: Productie van een 1K-trekstaaf	25
Figuur 11: Productie van een 2K-trekstaaf	25
Figuur 12: 1K-trekproeven	27
Figuur 13: Trekproef Desmopan 487-ABS	29
Figuur 14: Trekproef Desmopan 6064A-ABS	29
Figuur 15: a) Normaal verloop, b) loslaten van verbinding, c) rek voor breuk	29
Figuur 16: TPU-TPU-trekproeven	30
Figuur 17: a) ABS-insert, b) ABS-insert en sluitring	33
Figuur 18: Configuraties invloed zachte component in resonator, blauw = ABS, paars = TPU en groen = sluitring	34
Figuur 19: SOL103, eerste modevorm resonator (160 Hz)	35
Figuur 20: SOL103, tweede modevorm resonator (672 Hz)	35
Figuur 21: Opmeting van resonatoren met een laservibrometer	35
Figuur 22: Configuratie 7, Desmopan 487	37
Figuur 23: Configuratie 8, Desmopan 487	37
Figuur 24: Configuratie 8, Desmopan 6064A	37
Figuur 25: Simulatie van configuratie 8, Desmopan 487	38
Figuur 26: Simulatie van configuratie 8, Desmopan 6064A	38
Figuur 27: FRF van configuratie 8, Desmopan 487	38
Figuur 28: FRF van configuratie 8, Desmopan 6064A	38
Figuur 29: Dimensionering resonator design	40
Figuur 30: Insert uit parameteroptimalisatie	41
Figuur 31: Resonator m.b.v. parameteroptimalisatie	41
Figuur 32: Opmeten van de lege basisstructuur	41
Figuur 33: Opmeting van LRMs	41
Figuur 34: FRF-resonator parameteroptimalisatie	42
Figuur 35: FRF LRM en FRF lege plaat	43

Verklarende woordenlijst

ABS	Acrylonitril-butadieen-styreen
DOF	Degrees of freedom
FRF	Frequency response function
LRM	Lokaal resonante metamaterialen
PP	Polypropyleen
PPE	Polymer Processing and Engineering
Stopbanden	Frequentiegebieden met sterke trillingreducties
TPU	Thermoplastic polyurethaan
Unit cell	Eenheidscel

Abstract in English

Due to stricter emission standards, lightweight structures are increasingly being opted for. However, they typically come with suboptimal vibration and noise characteristics in machinery and logistics. A possible solution for this are locally resonant metamaterials, which obtain a frequency range of strong vibration reduction by adding resonators on a base structure. Unfortunately, these materials are not yet industrial applicable due to their narrow-band characteristics together with the lack of repeatable mass production.

This research aims to design and produce a broadband metamaterial using multi-material injection moulding of hard-soft polymer combinations. Initially, materials are injection moulded and then statically tested for their bonding strength. After this, both the damping and the influence of material distribution on resonator dynamics are investigated. In the final stage, the static and dynamic results are combined to design the wide-band metamaterial using parameter optimization and later produce it with injection moulding.

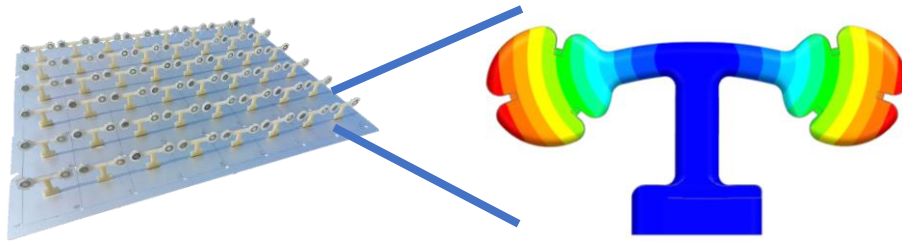
The results show that ABS-TPU-combinations form a strong static adhesion. The dynamic tests show high modal damping, proving the potential for a larger vibration reduction zone. After parameter optimization, a resonator was obtained that leads to a widening of the vibration reduction zone. However, existing deviations between measurements and predictions should be further investigated.

1. Inleiding

1.1. Situering

In de huidige samenleving, anno 2023, is er zelden een moment van stilte. Volgend op CO₂-uitstoot, is omgevingslawaai de op een na grootste vervuiler in West-Europa. Permanent gehoorverlies is dan ook een van de meest voorkomende beroepsziektes in België. Een meetbaar gevolg op één generatie is het verlies van meer dan 1000000 gezonde levensjaren door verkeersgerelateerd geluid [1-2].

Klassieke geluids- en trillingsoplossingen baseren zich vaak op de toevoeging van massa of op het gebruik van een typisch dikke / volumineuze geluidsisolerende laag. Helaas is dit onverenigbaar met een compact lichtgewicht design [3], wat dan weer noodzakelijk is voor een reductie in emissiegassen bij transporttoepassingen. Binnen de Polymer Processing and Engineering (PPE) onderzoeksgroep aan KU Leuven Campus Diepenbeek gebeurt er onderzoek naar de productie van lokaal resonante metamaterialen (LRM) als trillings- en geluidsooplossingen (zie figuur 1).



Figuur 1: Voorbeeld LRM plaat met toegevoegde resonator uitgelicht

Bij deze LRMs worden lokaal resonerende elementen toegevoegd aan of in een basisstructuur op een subgolflengte schaal. Hieruit resulteert een frequentieband met sterk gereduceerde trillingsamplitude, ook wel een stopband genoemd. Deze stopbanden zijn typisch smalbandig. Door het gebruik van verschillende resonatoren binnen één structuur kunnen meerdere stopbanden in een verschillend frequentiegebied bekomen worden. Het toevoegen van zowel massa als demping aan deze resonatoren veroorzaakt een verbreding van de gewenste stopband [4-11].

Concreet onderzoekt de groep hoe deze materialen op commerciële schaal geproduceerd kunnen worden door middel van spuitgiettechnieken. Dit aangezien de LRMs voornamelijk geproduceerd worden doormiddel van 3D-printen. Hierdoor is het mogelijk om complexe geometrieën te construeren en snel prototypes te produceren zonder grote kost, maar dit is niet inzetbaar op grote schaal.

Deze thesis handelt over het gebruik van speciale spuitgiettechnieken zoals 2K- en insert moulding voor de productie van LRMs om de vibro-akoestische prestaties te verbeteren en de produceerbaarheid te verhogen.

1.2. Onderzoekvraag

LRMs [6-14] worden intensief onderzocht als lichtgewicht trillings- en geluidso oplossingen, zoals eerder al vermeld worden prototypes voornamelijk geproduceerd met behulp van 3D printen. Maar deze productietechniek is sterk gelimiteerd in productiesnelheid en introduceert een grootte variabiliteit. In het kader van massaproduceerbare LRMs focust het onderzoek binnen PPE op de productie a.d.h.v. spuitgiettechnieken.

Het spuitgietproces heeft als bijkomend voordeel dat speciale spuitgiettechnieken toestaan om multi-materiaal LRMs te maken. Een eerste proces hiervoor is insert moulding, hierbij wordt een extra massa toegevoegd aan de resonator door middel van een vooraf geplaatst onderdeel in de lege matrix. Dit laat toe om compacte laagfrequente resonatoren te produceren en de stopband te verbreden. Anderzijds kunnen verschillende kunststoffen gecombineerd worden in één resonatordesign via het 2K-spuitgieten. Voornamelijk de combinatie van een stijf en een zacht rubberachtig materiaal biedt interessante mogelijkheden. De toevoeging van het rubberachtig materiaal introduceert demping, wat dan de stopband zal verbreden terwijl de stijve materiaal soort het tunen van de frequentie mogelijk maakt.

De introductie van bredere stopbanden aan de basisstructuur mogelijk gemaakt door het 2K-proces voor LRM-productie worden hier verder onderzocht. De samenstelling van meerdere materialen geeft ook de mogelijkheid tot flexibelere assemblagetechnieken van de resonatoren op flexibele en gekromde basisstructuren.

1.3. Doelstellingen

Het potentieel van 2K-spuitgieten voor de productie van LRMs wordt onderzocht. Hierbij is het belangrijk om inzicht te krijgen in zowel de complexiteit van het 2K-proces alsook de invloed van de zachte, gedempte polymeren op de dynamica van de resonatoren. Daarom beoogt dit onderzoek meerdere concrete doelstellingen:

- geschikte materialen selecteren voor mogelijke hard-zacht-combinaties binnen het 2K-spuitgietproces;
- de invloed van het zachte materiaal onderzoeken op de dynamische eigenschappen van resonatoren zoals eigenfrequentie en demping;
- de resulterende statische en dynamische verbindingsterkte bepalen bij verschillende oppervlaktebehandelingen zoals schuren;
- het effect onderzoeken van de hard-zacht materiaaldistributie op de resonatordynamica.
- correlatie onderzoeken van de experimenteel bekomen resonantiefrequenties met eindige-elementen gebaseerde voorspellingen;
- combineren van insert en 2K-spuitgieten om de stopband te verbreden in een demonstrator LRM-realitatie.

1.4. Materiaal en methode

In de eerste fases van dit onderzoek worden verschillende componenten geselecteerd op basis van de spuitgietbaarheid en de mechanische eigenschappen. Dit gebeurt door het produceren en testen van trekstaven om zo een beeld te krijgen van de statische materiaaleigenschappen en eventuele hechting bij de 2K-samples.

Zodra de compatibele materialen geselecteerd zijn worden de dynamische eigenschappen van elk materiaal individueel geanalyseerd. Hiervoor wordt een bestaande matrijs gebruikt om resonatoren te produceren in het zachte materiaal. Met behulp van laservibrometrie wordt vervolgens de eigenfrequentie en dempingsratio bepaald. Deze demping dient in het vervolgonderzoek als input in de eindige-elementensimulaties om de stopband van de LRM-plaat te voorspellen. Hetzelfde proces wordt nadien ook doorlopen voor de hardere materiaalsoorten.

De volgende stap is de combinatie van de verscheidene zachte en harde materialen om de invloed van de materiaaldistributie op de resonatordynamica te achterhalen [15-17]. Hiervoor zal het 2K-proces worden opgesplitst in zijn tweestappen via een insert moulding aanpak. De resonator wordt geproduceerd in de harde materiaalsoort en vervolgens afgeknipt met behulp van een aanslag. Het gewenste deel functioneert als insert bij het zachte materiaal. De hoofdreden hiervoor is de eenvoud van slechts één materiaal te spuiten per keer. Hierdoor is het spuitgietproces eenvoudiger af te stellen. De invloed van de hechting tussen de twee materialen wordt onderzocht door contactvlakken grof en fijn op te schuren, en vervolgens te spuitgieten. Aangezien de oppervlaktebehandeling de binding tussen beide materiaalsoorten mogelijk beïnvloed wordt dit ook experimenteel aangetoond zowel statisch (trekproef) alsook dynamisch (laservibrometrie). Vervolgens zullen de geproduceerde samples met verschillende hard-zachtconfiguraties de invloed van de hoeveelheid flexibel materiaal en locatie op de resonantiefrequentie en demping onthullen.

Op basis van eindige-elementensimulaties wordt de LRM-stopband zo afgesteld om een multi-stopband design te verkrijgen, dat met behulp van de zachte materialen gecombineerd kan worden tot één brede stopband. Het bekomen resonatordesign wordt dan geproduceerd en bevestigd op een plaatstructuur om een LRM te bekomen. Experimentele validatie van de stopbanden gebeurt a.d.h.v. laservibrometrie.

1.5. Vooruitblik

De literatuurstudie geeft een eerste inzicht in metamaterialen, spuitgieten en LRMs en hun plaats in deze thesis. Aan de hand van deze informatie worden de materialen getest op geschikte oppervlaktevoorbereidingen en hun statische verbinding a.d.h.v. trekproeven.

Vervolgens wordt er a.d.h.v. eindige elementensimulaties overschakelt naar de productie van resonatoren in de materiaalsoorten die zich het beste lenen voor deze toepassing. Alle materiaalsoorten worden eerst individueel getest om een referentiewaarde te creëren voor de dempingscoëfficiënt.

Hierna zijn verschillende combinaties gevormd om zo de invloeden van materiaaldistributies te verifiëren alsook de invloed van een asymmetrie. Deze veroorzaakt twee modes die m.b.v. parameteroptimalisatie gecombineerd kunnen worden tot één brede mode.

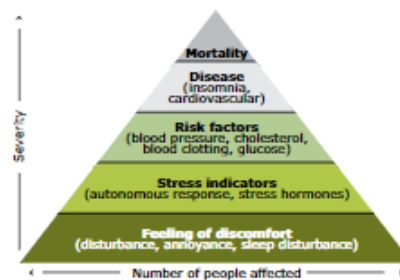
De laatste fase is het monteren en testen van de geoptimaliseerde resonatoren op een basisstructuur. Uit deze metingen zal blijken of de vooropgestelde hypothese van één brede stopband succesvol gerealiseerd is.

2. Literatuurstudie

De literatuurstudie kaart de socio-economische gevolgen van geluidsblootstelling aan gevolgd door het concept van lokaal resonante metamaterialen. Verschillende LRM-realiserings- en productietechnieken maken dit dan ook een state of the art concept.

2.1. Socio-economische relevantie

In een milieubewuste samenleving is de uitstoot van zowel het individu als de industrie een belangrijk thema, beide streven naar een zo laag mogelijke ecologische voetafdruk. Hierdoor worden vaak lichtgewichtoplossingen toegepast, dit doordat het verbruik van voertuigen recht evenredig is met de te verplaatsen massa [18-19]. Een nadelig gevolg hiervan is de verhoogde doorgave van trillingen naar de bestuurder, die bij een zwaarder voertuig onderdrukt waren. Geluidsoverlast is voornamelijk aanwezig in meer stedelijke gebieden, maar is in de laatste jaren ook terug te vinden in natuurgebieden. Figuur 2 is de grafische weergave van het aantal getroffen personen en de ernst van de gevolgen. De figuur toont aan dat de gevolgen sterk uiteenlopend zijn, van ongemak tot sterfte. De ernst van de gevolgen wordt beïnvloed door een persoonlijke factor, niet iedereen is even gevoelig.



Figuur 2: Effecten van geluidsvervuiling [3]

In een samenleving waarin er zelden een moment van stilte is, varieert enkel de intensiteit. De oplossingen voor de ecologische problemen leiden zoals aangegeven tot een technologische contradictie, namelijk het lichtgewichtprobleem. De queeste naar een zo licht mogelijk voertuig zonder een toegeving op comfort te moeten doen.

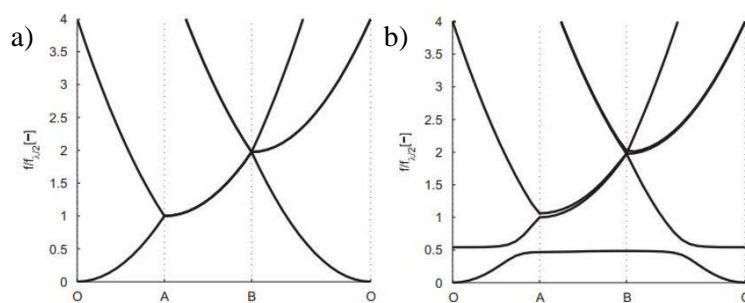
2.2. Lokaal resonante metamaterialen

Door steeds vaker toegepaste lichtgewichtstructuren wordt typisch de trillings- en geluidsonderdrukking verslechterd. Vaak zoekt men a posteriori naar oplossingen, typisch in de vorm van massatoevoeging. Dit is dan weer in contradictie met de emissiereductie en het streven naar een lichtgewichtoplossing. Een ander veel voorkomende oplossing is het toevoegen van geluidsabsorptielagen. Maar dit leidt vaak tot een volumineuze oplossing gezien de schuimlaag dikker moet zijn dan een kwartgolflengte om effectief te functioneren. Een recente oplossing die op een compacte, lichtgewicht manier trillingen kan onderdrukken zijn LRMs. Figuur 3 toont een toegepast voorbeeld van deze LRMs in de banden van een personenvoertuig. Bij deze metamaterialen worden conventionele materialen zo ontworpen dat onconventionele eigenschappen geïntroduceerd worden.



Figuur 3: LRMs geïntegreerd in band [3]

In het geval van LRMs worden lokaal resonerende elementen toegevoegd op een basisstructuur zoals afgebeeld in Figuur 3. Deze staan subgolflengte (in verhouding tot de te onderdrukken golf) geïntegreerd om zo een frequentieband met sterk gereduceerde trillingsamplitude te produceren, ook naar gerefereerd als een stopband. Deze stopbanden worden uitgelegd a.d.h.v. het Bragg scattering theorema wat zich baseert zich op het destructieve Fano-type interferentie principe. Hierbij wordt een trilling in de basisstructuur geannuleerd door de trilling opgewekt m.b.v. de toegevoegde resonator. Figuur 4 geeft een voorbeeld van een stopband voorspeld door het periodisch toevoegen van massa-veersystemen op een plaat [7].



Figuur 4: a) Oneindige plaat zonder resonatoren, b) oneindige plaat met resonatoren [7]

In Figuur 4 wordt de vergelijking gemaakt tussen de dispersiecurves van een oneindige plaat a) zonder en b) met periodiek resonatoren toegevoegd. Deze tonen de lopende golven in het periodisch metamateriaal aan in richting en frequentie. Op Figuur 4 b) zijn er zones met destructieve interferentie, hierbij worden de natuurlijk voorkomende trillingen in de basisstructuur geannuleerd door een in tegenfase opgewekte trilling [7].

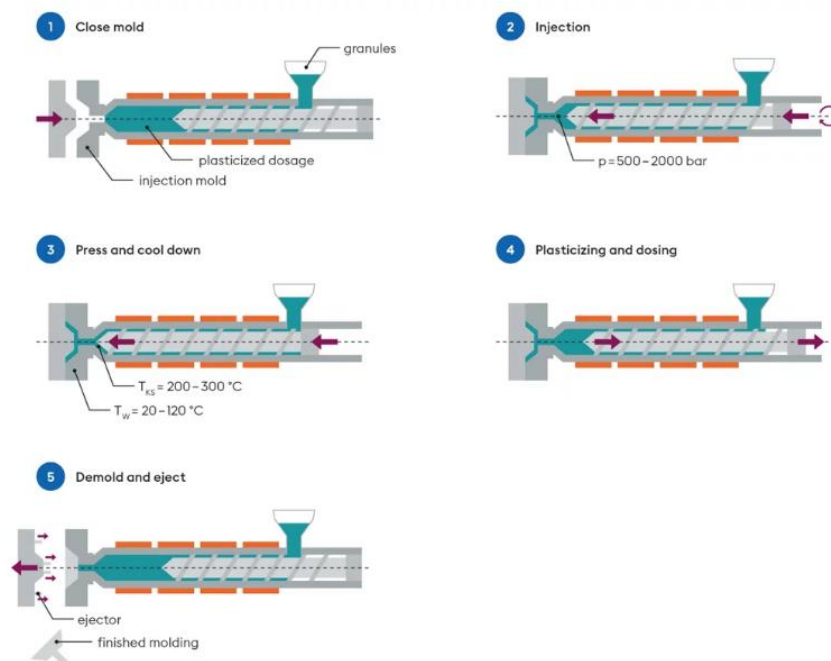
Bij de productie van resonatoren wordt er door complexiteit van het ontwerp vaak op 3D printen gesteund. Dit geeft een snel prototype voor academische validatie, maar massaproductie is moeilijk realiseerbaar met deze techniek. Hiervoor kan spuitgieten een alternatief zijn, dit door de snelle productiemogelijkheden alsook door de consistentie van het eindproduct. Het succes hiervan is dan ook al in voorgaande studies aangetoond [20].

2.3. Productie van LRMs a.d.h.v. spuitgietprocessen

Doordat LRMs een veelbelovende oplossing bieden voor het stijgend geluidsprobleem is massaproductie een volgende stap. Voor een kleinschalige testfase is *additive manufacturing* voldoende, voor grootschalige applicaties is deze techniek een langdurig proces. Dit samen met de mogelijkheid tot insert en 2k-spuitgieten geeft de voorkeur aan het spuitgietenproces. [20]

2.3.1. Spuitgietproces

De spuitgietmachine bestaat uit 2 hoofdcomponenten, namelijk de injectie- (1) en de sluiteenheid (2) afgebeeld in Figuur 5.



Figuur 5: Procescyclus van één shot [5]

In dit diagram worden de stappen van de procescyclus schematisch afgebeeld. Gedurende de eerste fase wordt de grondstof gesmolten, hierbij beweegt de roterende schroef naar achteren. Waardoor er een homogene substantie met een vast volume voor elke shot gedoseerd wordt.

Om steeds een goed eindproduct te kunnen garanderen wordt deze grondstof, vaak in de vorm van granulaat of pellets, gedroogd in overeenstemming met de datasheet. De matrijs sluit waardoor de gesmolten kunststof enkel de vorm van het gewenste product kan innemen. Vervolgens gebeurt de daadwerkelijke injectie, hierbij beweegt de schroef naar voor om zo het gedoseerde volume te injecteren. Om de volledige vulling van het eindproduct te garanderen wordt er een bepaalde nadruk behouden nadat de caviteit 95% gevuld is. Het voordeel hiervan is dat eventuele krip gecompenseerd wordt totdat

de aanspuittak volledig stolt en zo het injectieproces beëindigt. Aangezien de schroef afgesloten is door de bevroren aanspuittak kan er opnieuw gedoseerd worden.

In de laatste stap opent de matrijs na een vooropgestelde koeltijd om zo het product te kunnen uitwerpen met behulp van de uitwerppennen. Hierna wordt de cyclus vanaf de eerste stap herhaald.

Afhankelijk van materiaal- en productkeuze zijn bepaalde uitvoeringen beter dan andere, natuurlijk speelt de beschikbaarheid en gebruikte parameters ook een rol. Deze masterthesis is uitgevoerd op een DEMAG IntElect 50/330-100 met de bijbehorende specificaties vermeld in Tabel 1.

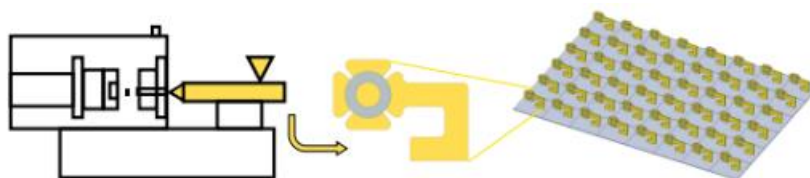
Tabel 1: Specificaties DEMAG IntElect 50/330-100

Klemkracht [kN]	500
Max. matrijs oppervlakte [mm]	490 x 500
Duwkracht uitwerpers [kN]	25
Slaglengte [mm]	260
Injectiedruk [bar]	2005
Schroefslag [mm]	105
Schroefdiameter [mm]	25

2.3.2. Spuitgietproces voor breedbandige LRMs

Naast het conventioneel spuitgietproces, bieden twee speciale, multi-materiaal spuitgietprocessen (insert en 2K-spuitsieten) de mogelijkheid om de designvrijheid en de LRM-stopband te vergroten

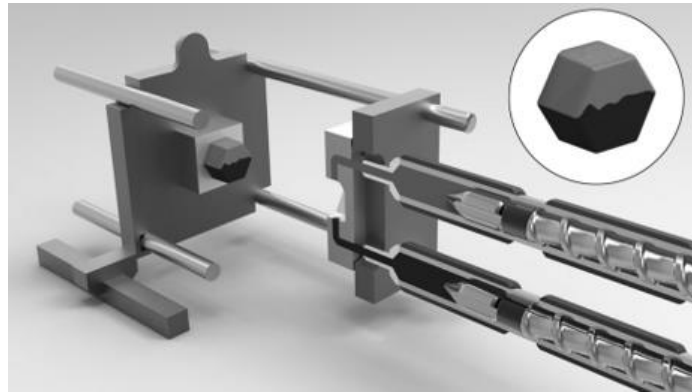
Om de LRM massa te verhogen moet de effectief resonerende massa (modale massa) van de resonator worden vergroot. In de literatuur worden daarvoor vaak bouten en/of moeren handmatig toegevoegd in de resonatormassa's [5], [7], [20]. Dit is tijdsintensief en niet geschikt voor massaproductie. Als alternatief biedt insert moulding de mogelijkheid om geconcentreerde massa's toe te voegen in de productie tijdens de procescyclus. In een voorgaande masterproef worden bijvoorbeeld sluitringen toegevoegd in de resonatoren via insert moulding [20]. Voordat de matrijs sluit, wordt de sluitring in de caviteit geplaatst. Vervolgens wordt het gesmolten kunststof eromheen gespoten, hierdoor wordt het functionele deel opgenomen in het eindproduct. Dit verhoogt de te exciteren massa met nog steeds de lichte materiaalkeuze voor de resonatorstructuur [4], [6-7], [20]. Verder is aangetoond dat de stopbandfrequentie hierdoor efficiënt verlaagd kan worden, zonder de stopbandbreedte te verlagen [8]. Figuur 6 is een grafische weergave van gespoten resonatoren waarbij de toegevoegd massa in zijn geheel werd aangepast.



Figuur 6: Insert moulding van resonatoren [4]

Voor grootschalige toepassingen waarbij de toegevoegde massa relatief gezien klein is t.o.v. de basisstructuur zou dit een mogelijke oplossing zijn.

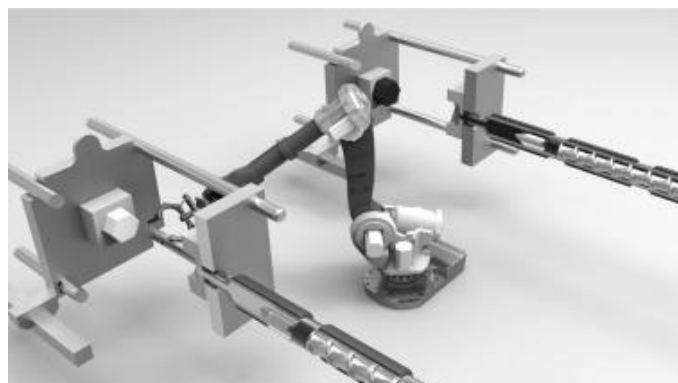
Meerdere materialen gebruiken voor het efficiënt tunen van dichtheid en demping lokaal in de resonatoren is een andere mogelijkheid voor het verbreden van de stopband van een resonator. Hiervoor is het twee component (2K) spuitgieten een veelbelovende techniek. Dit geeft de mogelijkheid om kunststoffen met verschillende dichtheid, stijfheid of demping met elkaar te combineren in één LRM-design. Voor 2K-spuitgieten zijn er verschillende opstellingen mogelijk, de Polymer Processing & Engineering group hebben zelf twee opties in hun machinepark. De eerste variant is de bi-injectie machine in Figuur 7.



Figuur 7: Bi-injectie machine [9]

Figuur 7 is bevat een schematische weergave waarin het duidelijk wordt dat er twee schroeven aangesloten zijn op één caviteit. De injectie sequentie is productafhankelijk, maar zowel gelijktijdig als ook beurtelings injecteren is mogelijk bij deze opstelling. Een voordeel is de efficiëntie van twee aparte schroeven zonder dat er een halffabricaat geproduceerd wordt [21-23].

Helaas heeft voorgaande opstelling een verhoogde complexiteit door het aantal betrokken procesparameters, namelijk de aanwezigheid van twee schroeven, het al dan niet gelijktijdig injecteren alsook de matrijsparameters. Een alternatief hierop is techniek zichtbaar in Figuur 8.



Figuur 8: 2K-spuitgieten m.b.v. een halffabricaat [9]

Hierbij wordt een halffabricaat uit de machine gehaald en in een andere gezet om daar het tweede type kunststof eromheen te spuiten. Deze techniek biedt het voordeel dat beide kunststoffen apart gespoten worden, natuurlijk is de compatibiliteit van het materiaal van groter belang bij deze techniek.

2.3.3. Materiaal selectie breedbandige LRMs

Om een goed eindproduct te kunnen produceren is een goede verbinding tussen beide materialen essentieel. Bij kunststof-kunststof verbindingen wordt dit voornamelijk gerealiseerd door adhesiekrachten. Dit zijn de krachten tussen de twee materialen, een exacte verklaring voor dit fenomeen is echter niet definitief uit te leggen aan de hand van één theorie. Maar eerder een samenkomst van:

- adsorptie, het vormen van intermoleculaire bindingen tussen beide materialen;
- onderlinge diffusie van de polymeerketens;
- chemische verbindingen door het vormen van nieuwe covalente of ion bindingen;
- mechanisch bindingen door de designkeuze [24].

Hieruit zijn polarisatie en diffusie de meest invloedrijke fenomenen voor de vorming van een chemisch sterke verbinding. Deze verbindingsmechanismen zijn voor de meeste basismaterialen al getest en gecategoriseerd in Figuur 9 [25].

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

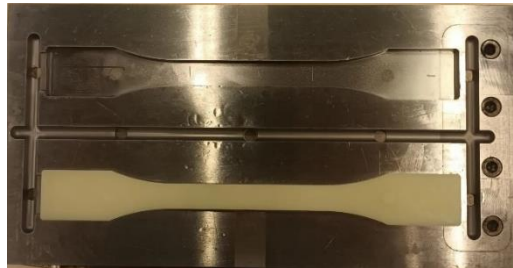
Figuur 9: Compatibiliteit kunststoffen [13]

In deze thesis zal 2K-s spuitgieten gebruikt worden om het potentieel van hoger gedempte materialen in resonatoren te onderzoeken. Hiervoor zal thermoplastisch polyurethaan (TPU) als tweede component gebruikt worden, gecombineerd met een standaard thermoplast. Uit de tabel blijkt dat dit goed hecht met ABS vandaar ook de keuze voor deze combinatie. In de voorgaande thesis van Spelmans, N. werd er voornamelijk gewerkt met ABS, hierdoor is de resonantiefrequentie voor deze resonatoren in ABS al gekend [6].

3. Statische materiaalkarakterisatie

Voordat er een dynamische test wordt uitgevoerd geven de statische materiaaleigenschappen een verificatie van de Young's modulus en hechtingssterkte. Hierbij wordt er enkel rekening gehouden met de reële elasticiteitsmodulus zonder mogelijke invloeden van de verliesmodulus [26]. Voor de productie van de trekstaven worden steeds de ISO-normen gerespecteerd i.v.m. de gebruikte dimensies en testopzet [27]. Hierdoor is het mogelijk bekomen waardes met de datasheets te vergelijken om zo in de volgende fases accurate simulaties op te stellen.

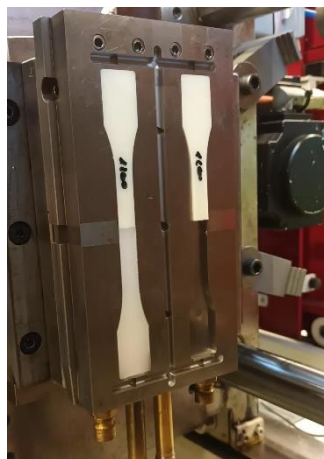
Voor de productie van de trekstaven bestaand uit één materiaalsoort (1K) worden er per productiecyclus beide caviteiten van de matrijs gevuld met één materiaalsoort. Om een gecontroleerde test setup te garanderen worden er voor deze metingen enkel samples uit de eerst caviteit gebruikt, zie Figuur 10.



Figuur 10: Productie van een 1K-trekstaaf

Door steeds gebruik te maken van dezelfde caviteit is er geen gevoeligheid aan verschillen in eigenschappen door het gebruik van samples uit verschillende caviteiten. Dit in combinatie met vijf trekproeven per materiaalsoort beperkt eventuele uitschieters door het productieproces.

Zoals er al werd aangehaald in de literatuurstudie is de verbinding tussen beide materiaalsoorten van essentieel belang voor de functionaliteit van de resonator. Om dit op voorhand al te kunnen testen zijn er 2K-trekstaven geproduceerd (Figuur 11).



Figuur 11: Productie van een 2K-trekstaaf

Hiervoor worden de ABS-trekstaven doormidden gezaagd met behulp van een vaste aanslag zichtbaar in de rechter caviteit. Om vervolgens hier de TPU tegen te spuiten zoals aangetoond in de linker caviteit van Figuur 11.

De oppervlaktebehandeling heeft een grote invloed op de hechting tussen beide materialen. Om dit ook experimenteel te kunnen aantonen zijn er steeds per ABS-TPU-combinatie 15 samples voorzien met volgende oppervlaktebehandelingen op het contactvlak:

- vijf stuks opgeschuurd met grid 1200 schuurpapier;
- vijf stuks opgeschuurd met grid 40 schuurpapier;
- vijf stuks met een Z-verbinding.

Dit maakt het mogelijk om zowel de invloed van de gebruikte grid alsook *shear* en *tensile stress* te analyseren aan de hand van de Z-verbinding.

Verder zijn ook TPU-TPU-combinaties getest voor een eventuele latere toepassing waarbij een flexibele montage noodzakelijk is.

Om de juiste TPU-variant te bepalen is er beroep gedaan op de vakkennis van Covestro. Dit Duitse bedrijf is een internationale speler in de kunststofwereld. Op hun aanraden en in samenspraak met ing. Kristof Steijvers zijn volgende varianten gekozen:

- Desmopan 9385D, deze harde TPU als een alternatief voor de stijve ABS-structuur;
- Desmopan 487, een TPU met gemiddelde stijfheid;
- Desmopan 6064A, de meest flexibele TPU-variant.

Covestro heeft deze drie materiaalsoorten ter beschikking gesteld als steun voor deze thesis. De drie soorten zullen in combinatie met elkaar en met ABS onderzocht worden op hechting en potentieel binnen LRMs.

3.1. Productie van 1K-trekstaven

Voor het correct instellen van de procesparameters wordt de datasheet geraadpleegd. De smelt- en matrijstemperatuur zijn van belang aangezien bij een te koud aggregaat de matrijs slechts deels zal vullen, te hoog zorgt dan weer voor *flashing*. Verder zorgt een te koude matrijs voor het vroegtijdig stollen van het vloeifront, wat wederom leidt tot een incompleet eindproduct. Tabel 2 geeft de gebruikte parameters voor de productie van de 1K trekstaven weer.

Tabel 2: 1K-trekstaven spuitparameters

Parameters	ABS	Desmopan 9385D	Desmopan 487	Desmopan 6064A
Inspuitsnelheid [mm/s]	175	5	20	30
Nadruktijd [s]	12	10	15	25
Nadruk [Bar]	770	1050	750	540
Koeltijd [s]	35	30	35	35
Tegendruk [Bar]	100	50	100	100
Schroef terug [mm]	95	93	98	99
Schroef stop [mm]	92	90	95	96
Omschakelpunt [mm]	15	20	20	20
Smelt temperatuur [C°]	230	220	210	210
Matrijs temperatuur [C°]	70	30	30	30

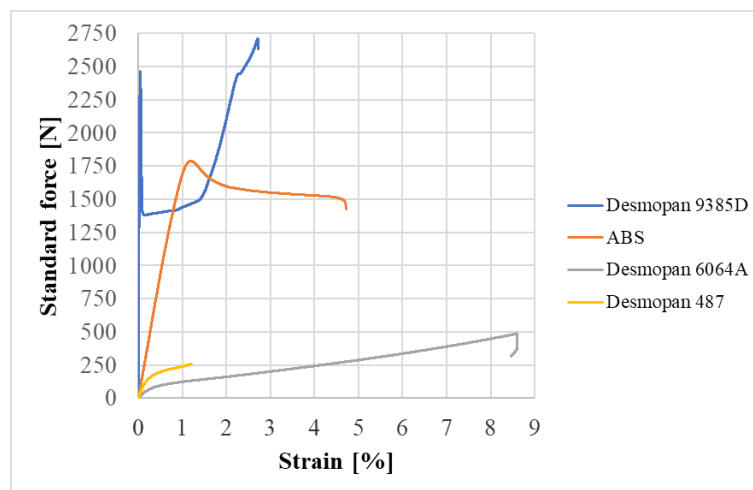
Deze waarden zijn enkel voor een stabiel proces van toepassing. Ook de selectie van een andere machine of matrijs beïnvloedt de vereiste parameters. De datasheet waarden zijn een basis voor deze instellingen, die door middel van teststukken zijn geoptimaliseerd om zo een volwaardig mogelijk eindproducten af te leveren.

3.1.1. Resultaten 1K-treksterkte

Alle materiaalsoorten zijn eerst als 1K-trekstaven gespoten, hierdoor ontstaat er een betrouwbare referentiewaarde voor de 2K-testen. Voor elk van de vijf individuele trekproeven per materiaalsoort zijn de berekende elasticiteitsmoduli aan de hand van de gemeten waardes en bijbehorende treksterktes terug te vinden in Tabel 3. De grafische output van de trekbank is zichtbaar in Figuur 12.

Tabel 3: 1K-trekproeven

	Desmopan			
	ABS	9385D	487	6064A
E-modulus	E [MPa]	E [MPa]	E [MPa]	E [MPa]
1	2015	1749	45,7	17,0
2	2102	2328	46,1	17,1
3	2080	1597	46,2	16,3
4	2080	1561	46,1	16,5
5	2067	1530	46,6	16,7
GEM	2069	1700	46,1	16,7
STDEV	9	33	0,3	0,3
Datasheet	2030	2020	60	7
Treksterkte	Breuk [N]	Breuk [N]	Breuk [N]	Breuk [N]
1	1448	2633	256,7	167,7
2	1425	2867	257,1	132,9
3	1385	2623	257,1	131,5
4	1453	2207	258,2	172,2
5	1446	1854	257,1	317,2
GEM	1431	2437	257,2	184,3
STDEV	28	403	0,6	76,7



Figuur 12: 1K-trekproeven

Verder komen de gemeten waardes sterk overeen met de datasheets, enkel bij de TPU-varianten zijn er afwijkingen te vinden na het incalculeren van de standaarddeviatie. Deze zijn mogelijk te verklaren door de temperatuurafhankelijke eigenschappen van deze materiaalsoort. Maar de vooropgestelde hypothesen in verband met flexibiliteit worden hier wel al meteen bevestigd.

ABS wat in de datasheets de hoogste E-modulus heeft in verhouding tot de geteste TPUs toont slechts een kleine rek voordat het breekt. De curve van Desmopan 9385D vertoont een verloop gelijkaardig aan ABS en lijkt ook meer vervormingsverstevingingen te ondergaan, zichtbaar in de stijgende trekcurve naarmate de proef breuk benaderd.

Desmopan 487 en 6064A worden onderworpen aan een steeds hogere belasting totdat breuk optreedt. De verkregen rek bij Desmopan 6064A is ook groter dan de afstand tussen beide klemmen in de trekbank. Om toch tot breuk te rekken werd het teststuk dieper in de klauwen geplaatst hierdoor kon er enkel rek plaatsvinden tussen de 2 referentiepunten besproken in de ISO-normen.

Een laatste conclusie komt uit de gemeten treksterkte bij breuk, zoals verwacht zijn deze bij ABS en desmopan 9385D aanzienlijk hoger dan bij Desmopan 487 en 6064A. Dit doordat de rubberachtige aard van deze varianten wat resulteert in een hogere rek.

3.2. Treksterkte 2K-verbindingen

Voor het produceren van de 2K-trekstaven zijn de gebruikte parameters van de 1K-trekstaven overgenomen, met uitzondering van het ingespoten volume. Aangezien de te vullen caviteit gehalveerd is door de ABS-insert wordt ook het vereiste volume gehalveerd. De optimalisatie van deze parameter is uitgevoerd door de productie van teststukken. De gebruikte procesparameter zijn terug te vinden in Tabel 4.

Tabel 4: 2K-trekstaven spuitparameters voor ABS/TPU

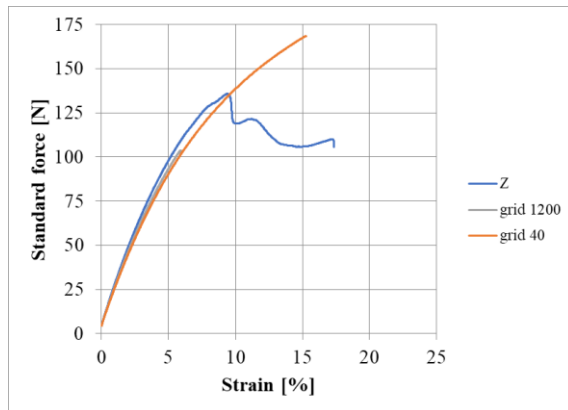
Parameter	2K Desmopan 9385D	2K Desmopan 487	2K Desmopan 6064A
Inspuitsnelheid [mm/s]	5	20	30
Nadruktijd [s]	5	15	15
Nadruk [Bar]	1050	750	550
Koeltijd [s]	30	35	35
Tegendruk [Bar]	250	250	250
Schroef terug [mm]	50	100	100
Schroef stop [mm]	67	68	68
Omschakelpunt [mm]	64	65	65
Smelt temperatuur [C°]	20	20	20
Matrijs temperatuur [C°]	220	210	210
Inspuitsnelheid [mm/s]	30	30	30

Uit deze waarden lijkt het vereiste volume bij alle varianten hetzelfde te zijn. Een belangrijke opmerking is dan ook het verschil in massapolster, wat gehalveerd wordt bij de zachtere Desmopan 6064A t.o.v. Desmopan 487.

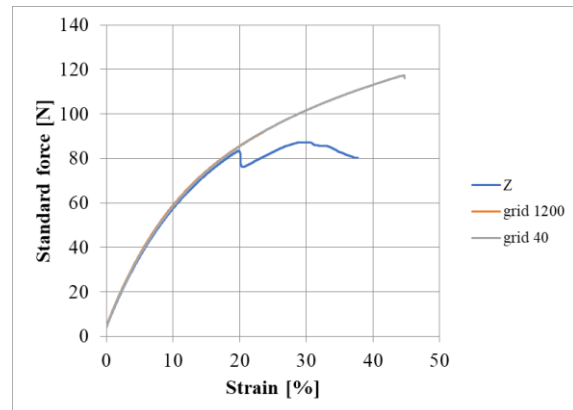
Het belang van doorspuiten komt sterk aan bod bij deze verbinding. Als goede gewoonte worden de machines op het einde van een productierun doorspoten met PP. Het voordeel hiervan is de lage smelttemperatuur wat eventuele problemen met gestolde kunststof in de hotrunners van de matrijs voorkomt. Helaas zorgt diezelfde PP ervoor dat de TPU een brosse verbinding maakt, daardoor is het belangrijk om eerst Desmopan 487 door de matrijs te spuiten en vervolgens pas Desmopan 6064A. Dit doordat Desmopan 6064A de minder viskeuze PP niet verwijderd krijgt.

3.2.1. Resultaten 2K-trekstaven

Een eerste opmerking is het gebrek aan combinaties van Desmopan 9385D met ABS. De hechting tussen beide was onvoldoende om de trekstaven in één geheel uit de matrijs te verwijderen. Het verder vervolgen van deze combinatie was dan ook niet noodzakelijk. Figuur 13 en Figuur 14 geven de TPU-ABS-combinaties weer toegepast volgens de drie vermelde oppervlaktevoorbereidingen.



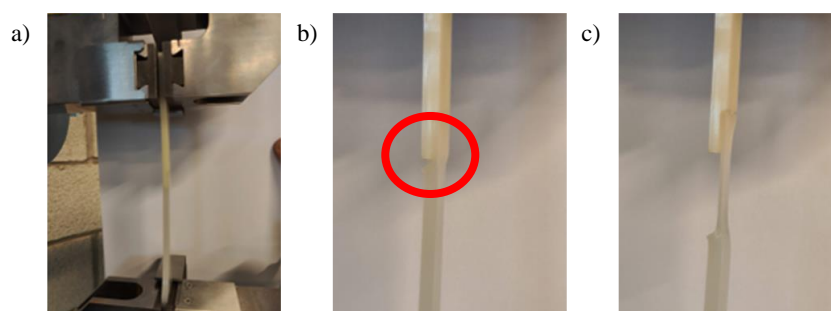
Figuur 13: Trekproef Desmopan 487-ABS



Figuur 14: Trekproef Desmopan 6064A-ABS

Hieruit blijkt dat het ruwer opschuren van de contactoppervlakten in een betere hechting resulteert, wat correspondeert met de literatuurstudie. De ruwere grid zorgt voor diepere krassen wat het hechtingsoppervlak vergroot en voor een verhoogde warmteflux zorgt. Wat de onderlinge diffusie van polymeerketens bevordert, ABS benadert zijn smeltpunt en hecht daardoor beter met de TPU [27].

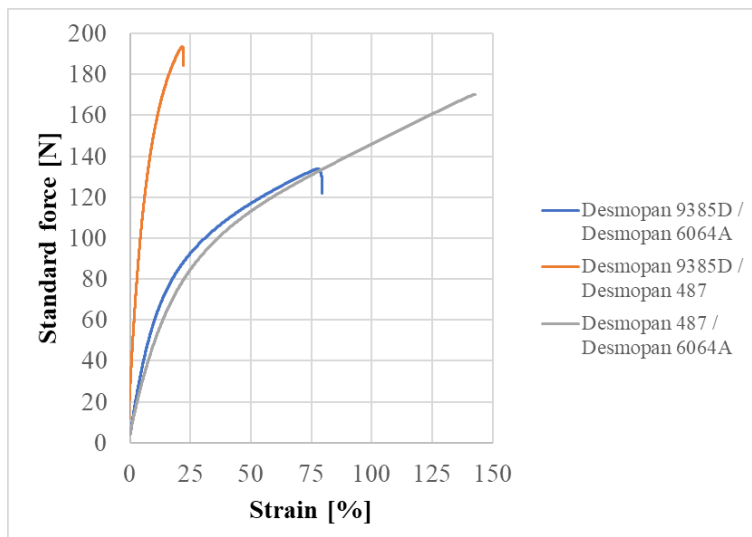
De trekcurves van deze 2K-samples volgen de start van de 1K-samples. Wat correspondeert met de literatuur waar een ideale verbinding wordt beschreven door het overhouden van 60% van de treksterkte van de zwakste component. Dit doordat het ABS-gedeelte van de sample vrijwel geen vervorming ondergaat en de rek zich zal manifesteren in de meest flexibele component totdat de hechting tussen beide breekt. Enkel het vergroten van het contactoppervlak geeft zonder extra behandeling geen voordeel, dit wordt duidelijker aan de hand van Figuur 15.



Figuur 15: a) Normaal verloop, b) loslaten van verbinding, c) rek voor breuk

Deze figuur verduidelijkt de trekcurve van een Z-verbinding. In eerste instantie volgt deze de opgeschuurde verbindingen a), dit totdat de verbinding omcirkeld in b) breekt. Het verdere verloop is te verklaren door de combinatie van de rek en het lossen van de dwarsverbinding c).

De hechting van TPU op TPU wordt in Figuur 16 geanalyseerd.



Figuur 16: TPU-TPU-trekproeven

De literatuur indiceert dat een TPU-TPU-combinatie een sterke hechting vormt doordat de materiaaleigenschappen gelijkaardig zijn. Dit wordt hier dan ook bevestigd. In Tabel 5 tot Tabel 7 is een overzicht van de uitgevoerde trekproeven om zo een betere vergelijking te kunnen maken tussen materiaalcombinaties, de oppervlaktebehandelingen en ook de invloed van trek- en schuifsterkte.

Tabel 5: 2K-trekproeven Desmopan 487

Trekproef	ABS_TPU487_40 Breuk [N]	ABS_TPU487_1200 Breuk [N]	ABS_TPU487_Z Breuk [N]
1	169	104	136
2	130	151	131
3	141	137	119
4	144	162	135
5	161	147	140
GEM	149	140	132
STDEV	16	22	8

Tabel 6: 2K-trekproeven Desmopan 6064A

Trekproef	ABS_TPU6064A_40 Breuk [N]	ABS_TPU6064A_1200 Breuk [N]	ABS_TPU6064A_Z Breuk [N]
1	117	92	87
2	109	89	83
3	123	98	87
4	107	89	97
5	120	90	74
GEM	115	91	85
STDEV	67	34	8

Tabel 7: 2K-trekproeven Desmopan - Desmopan

Trekproef	TPU487_TPU6064A Breuk [N]	TPU487_TPU9385 Breuk [N]	TPU9385_TPU6064A Breuk [N]
1	170	227	144
2	180	215	122
3	173	184	127
4	174	214	151
5	169	223	142
GEM	173	213	137
STDEV	4	17	12

Deze metingen sluiten nauw aan bij the literatuurstudie. Ten eerste wordt een betere hechting tussen dezelfde materiaalsoort bevestigd. Desondanks het hier over verschillende TPU-varianten gaat hechten deze nog steeds beter aan elkaar dan de ABS-TPU-combinaties. Dit krijgt dan ook de voorkeur voor verdere testen afhankelijk van het frequentiebereik waarin deze resonatoren zich bevinden.

Verder wordt de invloed van oppervlaktebehandelingen ook meteen duidelijk. Ongeacht de TPU-variant een oppervlaktebehandeling met grid 40 leidt tot de beste hechting. Hierbij wordt er ongeveer 60% van de treksterkte van de zwakste component behouden, wat uit de literatuur de perfecte 2K-binding blijkt te zijn [27].

De extra invloed van de schuifsterkte in een Z-verbinding is verwaarloosbaar t.o.v. de treksterkte. Er is een grotere rek aanwezig dan bij de 1200 grid, maar de uiteindelijke treksterkte is nog steeds lager dan bij een 40 grid oppervlaktebehandeling.

4. Dynamische materiaalkarakterisatie

Om de dynamische materiaaleigenschappen van de resonatoren te bepalen zijn verschillende resonator configuraties geproduceerd. Vervolgens opgemeten en geverifieerd met een simulatie van desbetreffende configuratie.

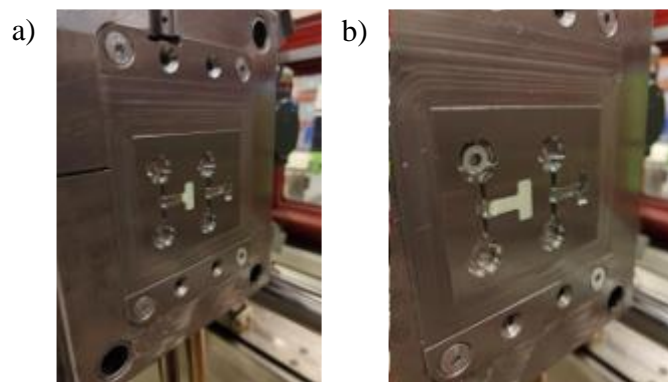
4.1. Resonatorconfiguraties

De eerste dynamische testen worden uitgevoerd op resonatoren opgemaakt uit één materiaalsoort. Hiervoor zijn de volgende procesparameters gebruikt, deze keer vertrekkend van de trekstaven productie en vervolgens itereren totdat de resonatoren een volwaardig eindproduct zijn.

Tabel 8: procesparameters resonatoren

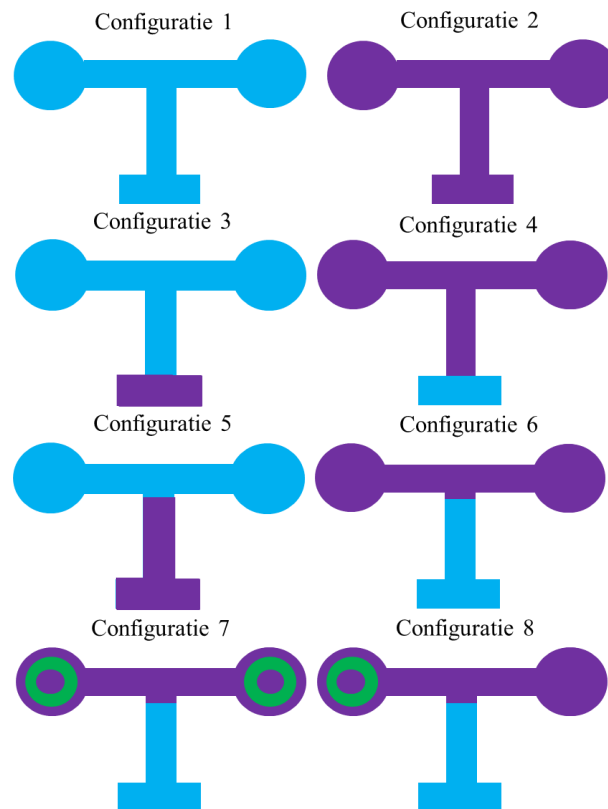
Parameter	Desmopan		
	ABS	487	6064A
Inspuitsnelheid [mm/s]	200	100	50
Nadruktijd [s]	5	10	10
Nadruk [Bar]	450	300	300
Koeltijd [s]	35	20	20
Tegendruk [Bar]	50	100	50
Schroef terug [mm]	16	15	19
Schroef stop [mm]	14	10	17
Omschakelpunt [mm]	10	10	10
Smelt temperatuur [C°]	230	210	210
Matrijs temperatuur [C°]	70	30	30

Wegens de slechte hechting met ABS in combinatie met de slechte spuitbaarheid van Desmopan 9385D is er geopteerd niet verder te gaan met deze variant. ABS leent zich beter naar spuitgietbaarheid toe en dus ook massaproductie. Deze materiaalsoort wordt gebruikt als de ruggengraat van de resonatoren om zo een stijve resonator te bekomen. Voor de verdere 2K-samples worden de ABS-resonatoren afgezaagd met behulp van een vaste aanslag, de gewenste delen dienen vervolgens als een insert bij de injectie van de flexibelere TPU (Figuur 17).



Figuur 17: a) ABS-insert, b) ABS-insert en sluitring

In Figuur 17 a) is enkel de ABS-insert aanwezig, in b) zijn ook de extra massa's (sluitringen) aanwezig om zo de modale massa van de resonator te verhogen. Verder verschillen de dimensies van de ABS-insert, waardoor het mogelijk is om de invloed van de zachte component op de dynamische eigenschappen van de resonator te bepalen. Figuur 18 geeft de gebruikte configuraties hiervoor weer.



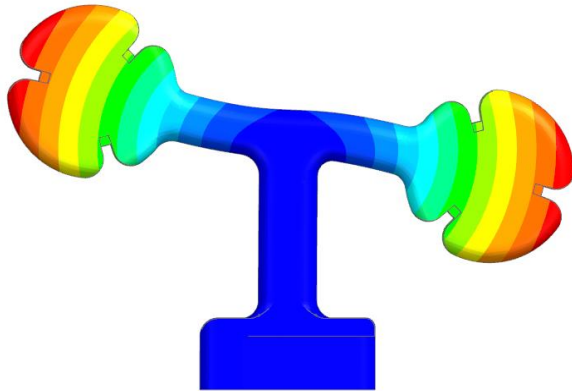
Figuur 18: Configuraties invloed zachte component in resonator, blauw = ABS, paars = TPU en groen = sluitring

Configuratie 1 en 2 bestaan volledig uit ABS en TPU, vervolgens is er steeds een combinatie van een korte voet (configuratie 3 en 4) of een lange voet (configuratie 5 en 6) gemaakt. Configuratie 4 zal ook dienen voor het verifiëren van de oppervlaktebehandelingen. Als laatste is er de combinatie gemaakt van configuratie 6 samen met de extra massa's in 7 en 8. Voor deze massa's zijn sluitringen gebruikt met een gemiddelde massa van 275,7 mg en standaarddeviatie van 8,7 mg. Dit alles in de hoop twee individuele modes op te meten in een voldoende hoog frequentiebereik die nadien kunnen worden samengevoegd tot 1 verbrede resonantiepiek.

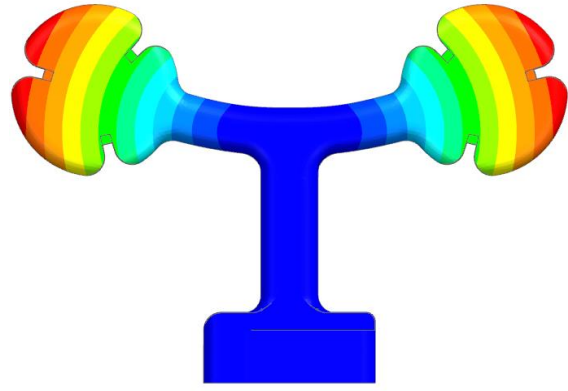
Bij insert moulding dient de meest rigide component als de insert gebruikt te worden, voor deze configuraties is dat steeds ABS. Afhankelijk van waar in de resonator dit zich bevindt wordt een andere caviteit gebruikt in de matrijs. Dit door de verschillende locatie waar het gesmolten aggregaat de caviteit ingaat bij het productieproces.

4.2. Numerieke simulatie

Voordat een ontwerp in productie gaat zijn de dynamische eigenschappen ervan gesimuleerd op basis van de datasheet m.b.v. Siemens NX. Hiervoor wordt er per materiaalsoort een mesh gegenereerd voor de FEM-simulatie (Figuur 19 en Figuur 20). Vervolgens wordt een SOL103 of SOL111 toegepast om de FRF van de structuur te bepalen. Uit de metingen van 1K-resonatoren wordt de gemiddelde demping per materiaalsoort bepaald en gebruikt voor een verbeterde simulatie.



Figuur 19: SOL103, eerste modevorm resonator (160 Hz)



Figuur 20: SOL103, tweede modevorm resonator (672 Hz)

Figuur 19 geeft de eerste *out-of-plane* van een ABS-resonator simulatie weer, deze wordt slechts beperkt opgemeten door de loodrechte excitatie van de proefopstelling. Figuur 20, de tweede modevorm, daarentegen geeft een duidelijke resonantiepiek bij de metingen en is dan ook de focus voor verdere designkeuzes.

De excitatie van de resonator gebeurt op de bodem van de resonatorvoet. Om te voorkomen dat de resonator zich vrij kan bewegen binnen de simulatie worden de overige vrijheidsgraden van de voet gefixeerd waardoor enkel de overige structuur kan bewegen.

4.3. Opmeten van resonatoren

Voor het uitmeten van de resonatoren is een PSV-500 laservibrometer (Figuur 21) gebruikt. Op basis van het Dopplereffect wordt de frequentie bepaald door het verschil tussen de uitgaand en de inkomende straal.



Figuur 21: Opmeting van resonatoren met een laservibrometer

Het aantal metingen wordt gehalveerd als er beroep kan worden gedaan op de symmetrie van de resonator. Bij een onbalans aanwezig door eventuele extra massa's of andere structuren worden beide zijdes van de resonator opgemeten. Hiervoor is er steeds een reflecteren sticker toegevoegd op het meetpunt om zo een optimale reflectie van de laser te bekomen. De toegevoegde massa hiervan is verwaarloosbaar.

Net zoals in de simulatie wordt de voet van de resonator ingeklemd en geëxciteerd langs onder. Hiervoor is er in de voorgaande thesis een vaste opstelling gemaakt die het mogelijk maakt om 16 resonatoren per keer uit te meten [6].

4.4. Resultaten oppervlaktevoorbereiding

Voor het testen van de hechtingsterkte tussen beide materialen zijn 2 grids geselecteerd, namelijk 40 en 1200 grid schuurpapier. De resultaten van deze testen zijn terug te vinden in Tabel 9.

Tabel 9: Resultaten oppervlaktevoorbereiding

Configuratie	f sim [Hz]	f [Hz]	STDEV	ζ [%]	STDEV
Configuratie 4, Desmopan 487, grid 40	165	151	7	8	1
Configuratie 4, Desmopan 487, grid 1200	165	132	3	10	1

Net zoals bij de trekstaven geeft grid 40 een betere hechting. Desondanks de simulaties niet 100% overeenstemmen met de realiteit geven deze wel een indicatie naar de te verwachten waardes. Aangezien de resonantiefrequentie van de resonator met oppervlaktebehandeling grid 40 beter correspondeert met de simulatie, gecombineerd met de resultaten van hoofdstuk 3.2.1 krijgt deze oppervlaktebehandeling de voorkeur voor de productie van de verdere samples.

4.5. Resultaten materiaaldistributie

In Tabel 10 zijn de gemiddeldes voor de materiaaldistributietesten opgesomd, bij deze testen zijn configuratie 1 tot 6 gebruikt. Ook zijn er testen uitgevoerd op Desmopan 6064A om zo ook de invloed van elasticiteit op resonantiefrequentie te bepalen.

Tabel 10: Resultaten materiaaldistributie

Configuratie	f sim [Hz]	f [Hz]	STDEV	ζ [%]	STDEV
Configuratie 1	1088	1205	7	1	0
Configuratie 2, Desmopan 487	165	140	2	11	1
Configuratie 2, Desmopan 6064A	61	90	2	14	2
Configuratie 3, Desmopan 487	1180	1082	30	4	1
Configuratie 4, Desmopan 487	165	151	7	8	1
Configuratie 5, Desmopan 487	835	874	21	7	1
Configuratie 6, Desmopan 487	168	146	5	9	1

Bij Desmopan 487 toont configuratie 1 en 2 dat een hogere Young's modulus correspondeert met een hogere resonantiefrequentie. In een ideaal massaveer-systeem bevindt de Young's modulus zich onder het wortelteken, hieruit is de correlatie met de frequentie te bepalen.

Configuratie 3 en 4 indiceren dat het materiaal aanwezig in de voet van de resonator weinig tot geen invloed heeft op de resonantiefrequentie. Deze is volledig ingeklemd in de bevestigingsplaat wat de bewegingsvrijheid sterk beperkt.

Configuratie 5 en 6 tonen aan dat bij een stijvere materiaalsoort in de dwarsbalk de resonator zich hoger frequent gedraagt. Veder is de geïntroduceerde demping bij een flexibele dwarsbalk (configuratie 6) hoger t.o.v. de stijve configuratie 5. Hieruit is af te leiden dat het materiaal aanwezig in de dwarsbalk van de resonator de grootste invloed heeft op de uiteindelijke frequentie en het eventueel samenkomen van de modes. Deze configuratie is dan ook geselecteerd voor het testen van de toegevoegde massa's.

Resonatoren uit Desmopan 6064A resulteren in een hogere demping t.o.v. Desmopan 487. Het is dan ook nuttig om configuratie 7 en 8 uit beide materiaalsoorten te produceren en testen. Het is wel belangrijk om de zeer lage resonantiefrequentie van deze materiaalsoort op te merken. Uit de verdere testen moet nog blijken of het toepassingsgebied van de resonatoren nog relevant is voor deze thesis.

4.6. Resultaten toegevoegde massa's

Zoals aangetoond in hoofdstuk 4.5 zijn de volgende resonatoren geproduceerd om de invloed van toegevoegde massa aan het resonator ontwerp te onderzoeken. Enkel voor Desmopan 487 is naast een asymmetrische massa ook een symmetrische toegevoegd. De geproduceerde resonatoren zijn zichtbaar in Figuur 22 tot Figuur 24.



Figuur 22: Configuratie 7, Desmopan 487



Figuur 23: Configuratie 8, Desmopan 487



Figuur 24: Configuratie 8, Desmopan 6064A

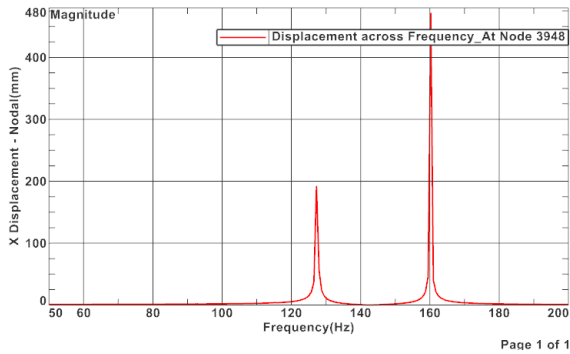
Deze resonatoren zijn wederom dynamisch opgemeten m.b.v. de laservibrometer, vervolgens zijn de metingen geanalyseerd en geeft Tabel 11 de gemiddelde waarden weer. Een belangrijke opmerking hiervoor is de asymmetrie van configuratie 8. Hierdoor is het noodzakelijk om zowel de zijde met (M) en zonder (Z) extra massa op te meten.

Tabel 11: Resultaten toegevoegde massa's

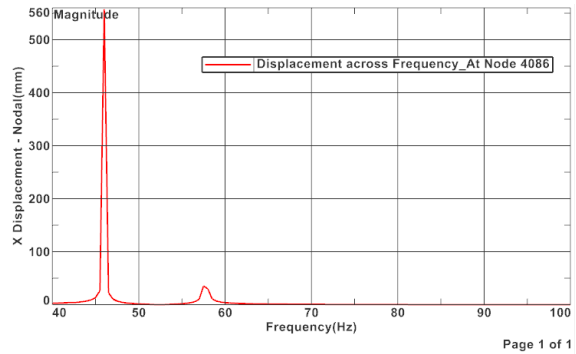
Configuratie	f sim [Hz]	f [Hz]	STDEV	ζ [%]	STDEV
Configuratie 7, Desmopan 487	142	108	2	9	1
Configuratie 8, Desmopan 487, M	127	128	2	8	0
Configuratie 8, Desmopan 487, Z	160	127	2	12	2
Configuratie 8, Desmopan 6064A, M	47	58	3	72	87
Configuratie 8, Desmopan 6064A, Z	57	81	3	15	3

Als eerste is het verschil tussen beide TPU-varianten op te merken, Desmopan 6064A geeft een zeer lage resonantiefrequentie. Hierdoor is deze materiaalsoort desondanks de hogere demping niet geschikt voor de laatste fase. Dit doordat metingen van lagere frequenties weinig interesse opwekken voor deze masterproef.

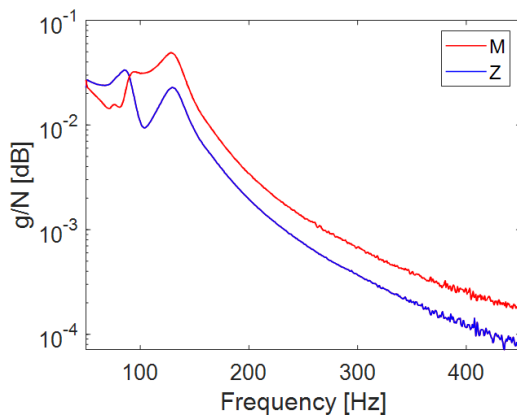
Configuratie 7 met Desmopan 487 heeft een hogere frequentie, maar door de aanwezige symmetrie is er slechts één mode aanwezig bij dit ontwerp. Hierdoor zal er ook met deze configuratie niet worden verder gewerkt. De hypothese is dat er door de asymmetrie tussen beide zijdes twee resonantie pieken ontstaan die in de basisstructuur door designoptimalisatie worden samengebracht tot één brede piek. Dit wordt wel bevestigd in configuratie 8, wat ook verduidelijkt is in Figuur 25 tot Figuur 28.



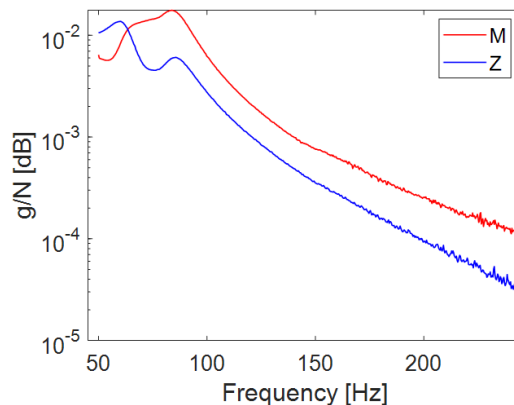
Figuur 25: Simulatie van configuratie 8, Desmopan 487



Figuur 26: Simulatie van configuratie 8, Desmopan 6064A



Figuur 27: FRF van configuratie 8, Desmopan 487



Figuur 28: FRF van configuratie 8, Desmopan 6064A

In zowel de simulatie alsook de opgemeten FRFs zijn er 2 duidelijke resonantiepieken zichtbaar. Ook is er een verbreding aan de zijde met sluitring al aanwezig zowel bij Desmopan 6064A als bij Desmopan 487. Dit indiceert de mogelijkheid om beide modes te combineren tot één brede. Voor de volgende en ook laatste fase is een grotere splitsing van beide resonante frequenties alsook een bereik tussen 100 en 300Hz gewenst. Hierdoor wordt er geopteerd voor een ander resonatorontwerp.

5. Resonatordesign aan de hand van parameteroptimalisatie

Het doel is om een LRM te maken met een breedbandige stopband in een frequentiebereik van 100-300 Hz, gebruikmakende van multi-materiaal metamaterialen en de inzichten verworven in voorgaande hoofdstukken.

- ABS aanwezig in de dwarsbalk zorgt voor een hogere resonantiefrequentie terwijl TPU deze verlaagt, maar wel demping toevoegt.
- Desmopan 487 introduceert demping in de resonator zonder te resulteren in een zeer lage resonantiefrequentie.
- Een asymmetrie in de resonator leidt tot 2 modes, die mogelijks gecombineerd kunnen worden door demping toe te voegen

Voor de optimalisatie van de materiaaldistributie zijn er een oneindig aantal verschillende combinaties mogelijk. Om dit proces te kunnen stroomlijnen is er beroep gedaan op parameteroptimalisatie. Hierbij wordt uiteindelijk een resonator gesimuleerd die zich binnen het gewenste frequentie bereik van 100 tot 300Hz bevindt en waarbij het verschil in resonantiefrequenties maximaal 100 Hz is. Dit is naar schatting het te overbruggen frequentiebereik m.b.v. de demping geïntroduceerd door Desmopan 487.

Voor het toevoegen van voldoende massa is er voor dikkere sluitringen geopteerd die zijn afgedraaid zodat deze als insert gebruikt kunnen worden. De uiteindelijk toegevoegde massa bedraagt 528,3 mg (STDEV = 6,1 mg) per sluitring. Deze zijn toegevoegd aan beide zijdes van de resonator. Asymmetrie wordt bekomen door ook ABS in verschillende diktes in de dwarsbalk te injecteren. Een minimale doorgang van 1.5 mm dient wel gerespecteerd te worden om een volledige vulling bij de TPU-injectie te garanderen.

Na het opmeten van de resonantiefrequentie van de individuele resonatoren worden alle resonatoren op een basisstructuur bevestigd m.b.v. een lijm op basis van cyanoacrylaat. Als laatste stap van deze thesis wordt de plaat uitgemeten en geanalyseerd.

5.1. Parameteroptimalisatie en productie

De voornaamste reden voor parameteroptimalisatie is de snelle feedback desondanks het oneindige aantal mogelijkheden. Deze methode past automatisch alle parameters aan in het resonatordesign, waarna de mesh volgt en de eigenmodes berekend worden. Door het uitvoeren van een groot aantal simulaties wordt de gevoeligheid van de resonantiefrequentie aan de designparameters (Figuur 29) berekend waarna het algoritme evalueert naar het beste design voor bepaalde objectieven.

Aangezien deze masterproef zich niet focust op de simulatie van metamaterialen, maar echter wel de productie ervan is er voor dit proces gesteund op de expertise van begeleider ing. Kristof Steijvers. Het instellen en gebruiken vergt ervaring met de gebruikte tools wat onrealistisch zou zijn om gedurende deze korte periode te bekomen. Hiervoor is het echter wel cruciaal dat de ingevoerde parameters de realiteit zo dicht mogelijk benaderen. Tabel 12 geeft een vergelijking weer tussen de verschillende Young's moduli opgemeten in de verschillende fases.

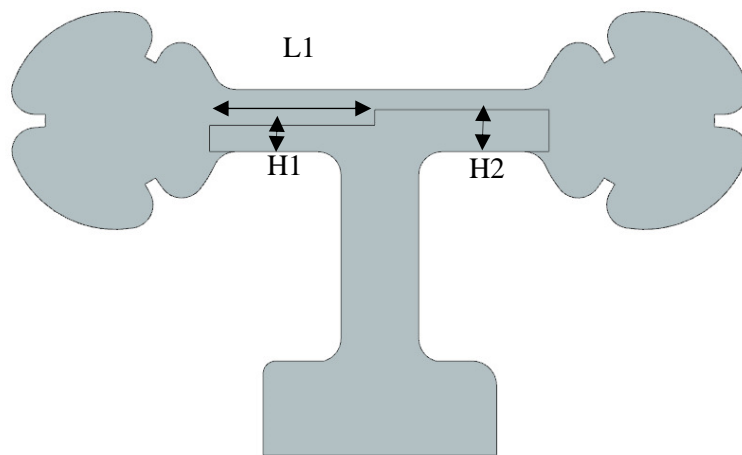
Tabel 12: Verificatie materiaaleigenschappen

	Dynamische eigenschappen				Statische eigenschappen			
	E [MPa]	ρ [kg/m ³]	f [Hz]	ζ [%]	E [MPa]	ρ [kg/m ³]	f [Hz]	ζ [%]
Desmopan 487	43	1210	140	11	46	1210	99	0
ABS	27467	1040	1205	01	0	1040	1046	0

De Young's moduli voor de ABS en TPU worden aangepast naar gelang de resonantiefrequentie in configuratie 1 en 2. Hierdoor is het mogelijk om voor verdere simulaties de meest accurate materiaaleigenschappen te gebruiken. Met behulp van deze vernieuwde parameters worden er aan de hand van de begrenzings opgelegd in Tabel 13 mogelijke oplossingen bepaald voor de dimensies zichtbaar in Figuur 29.

Tabel 13: Uiterste limieten binnen parameteroptimalisatie

	Min	Standaard	Max	$\left\{ \begin{array}{l} 0,1 \leq H1 + H2 \leq 3 \\ 250 \text{ Hz} \leq f1 \leq 600 \text{ Hz} \\ 225 \text{ Hz} \leq f2 \leq 750 \text{ Hz} \\ 40 \text{ Hz} \leq f2 - f1 \leq 100 \text{ Hz} \end{array} \right.$
H1 [mm]	0,5	0,78	3	
H2 [mm]	0,5	1,6	3	
L1 [mm]	0,5	8,1	21,5	



Figuur 29: Dimensionering resonatordesign

Na het runnen van deze simulaties en vervolgens selecteren van realistische uitkomsten is er geopteerd voor de volgende dimensies:

- H1 = 0.78mm;
- H2 = 1.33mm;
- L1 = 6.93 mm.

Hierbij is er een verschil van 97 Hz aanwezig tussen beide modes (184 Hz en 281 Hz). Volgens de hypothese van deze masterproef is het mogelijk om deze twee modes te combineren door de geïntroduceerde demping van de TPU-variant.

Aan de hand van deze gegevens is een insert (Figuur 30) geproduceerd in de werkplaats van de UCLL te campus Diepenbeek. Hierbij is het cruciaal om de caviteit volledig af te sluiten. Het ABS-halffabricaat van deze stap dient zelf als insert bij de injectie van Desmopan 487. Dit samen met vooraf vermelde sluitringen leiden tot het definitieve resonator ontwerp zichtbaar in Figuur 31.



Figuur 30: Insert uit parameteroptimalisatie



Figuur 31: Resonator m.b.v. parameteroptimalisatie

Hiervan zijn er 42 resonatoren geproduceerd en individueel opgemeten m.b.v. een laservibrometer. De gebruikte testsetup hiervoor is identiek aan die besproken in hoofdstuk 4.3. Dit maakt het mogelijk om nadien de stopbanden aanwezig in de LRM te refereren naar de resonantiefrequentie van de individuele resonator.

5.2. Opmeten van LRMs

Voor het opmeten van de stopbanden geïntroduceerd in de basisstructuur wordt deze zo vrij mogelijk opgehangen. Dit wordt bekomen door de aluminiumplaat op te suspenderen aan twee koorden die vervolgens bevestigd zijn aan een frame. Deze plaat wordt geëxciteerd door een shaker te bevestigen aan de achterzijde met een impedantiekop ertussen. Hierdoor is het mogelijk om ook de shakerkracht op te meten en zo de input (shakerkracht) te delen door de output (snelheid) wat resulteert in een FRF.

Deze basisplaat is opgedeeld in een periodieke *unit cells* die kleiner moeten zijn dan de golflengte van de resonator wat voor dit ontwerp vierkanten van 50x50 mm betekent. In eerste instantie wordt een lege basisstructuur (Figuur 32) opgemeten om nadien alle resonatoren te verlijmen in het midden van elk vierkant (Figuur 33) en de meting opnieuw uit te voeren.



Figuur 32: Opmeten van de lege basisstructuur



Figuur 33: Opmeting van LRMs

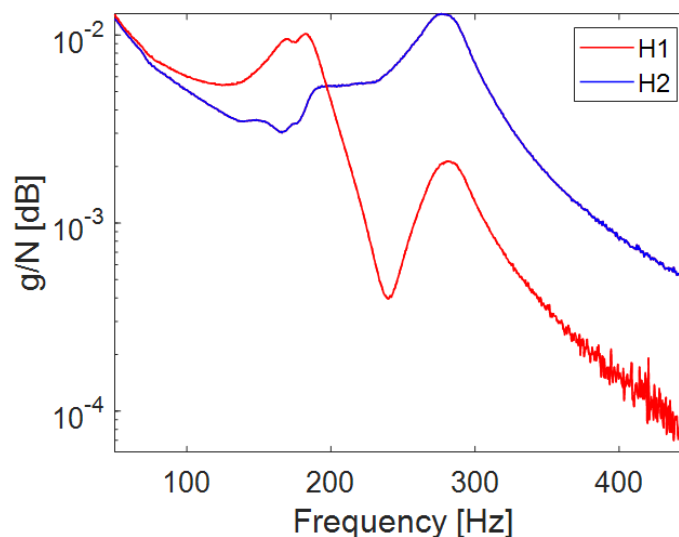
Zoals zichtbaar op Figuur 32 wordt er opnieuw een laservibrometer gebruikt voor de opmetingen. Dit betekent dat er op de hoeken van elk unit cell een reflecterende tape geplaatst moeten worden om een goede reflectie van de laservibrometer te garanderen.

5.3. Resultaten

Er zijn in deze fase 42 resonatoren individueel opgemeten, het aantal noodzakelijk voor de montage op de basisstructuur. Wederom zijn de gemiddeldes van deze metingen opgesomd in Tabel 14 en Figuur 34.

Tabel 14: Resultaten geoptimaliseerd resonatordesign

Configuratie	f sim [Hz]	f [Hz]	STDEV	ζ [%]	STDEV
Parameteroptimalisatie	184	181	7	5	1
	281	278	9	8	2

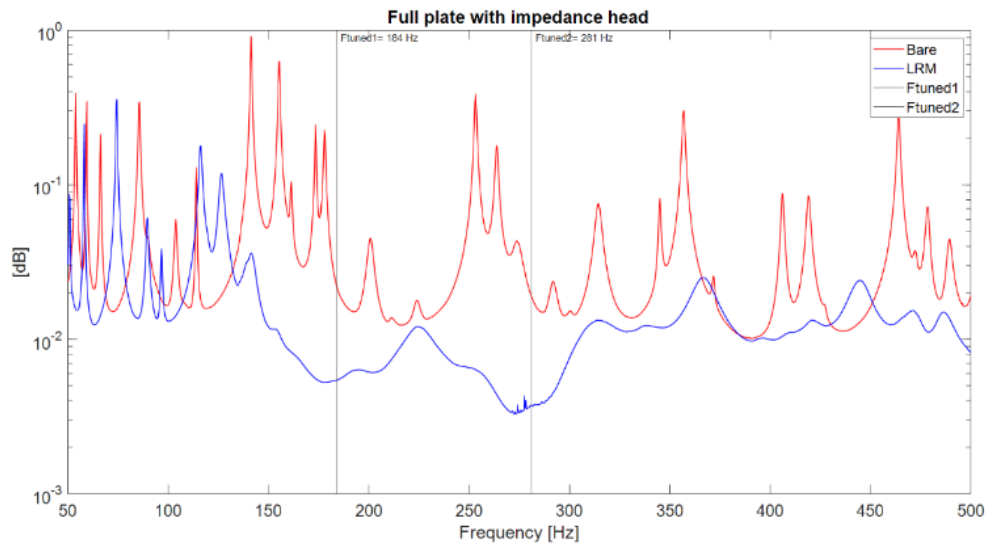


Figuur 34: FRF-resonator parameteroptimalisatie

Het corrigeren van de Young's modulus a.d.h.v. de dynamische metingen heeft de correlatie tussen simulatie en realiteit gunstig beïnvloed. Voor een verdere optimalisatie dient de invloed van de hechting grondiger onderzocht moeten worden. Zoals al aangetoond in hoofdstuk 3.2.1 is het produceren van een 100% hechting vrijwel onmogelijk. Het toepassen van ook een mechanische verbinding kan de hechting verbeteren, maar hiervoor is een complexe matrijs noodzakelijk.

Verder zijn er in Figuur 34 twee duidelijke modes zichtbaar op 97 Hz van elkaar zoals voorspeld in de simulatie. Wat de mogelijkheid geeft om beide modes samen te voegen in de LRM door zowel de aanwezigheid van demping in de resonatoren alsook de spreiding op de resonantiefrequentie tussen de individuele resonatoren.

Ook het opmeten van de LRM geeft een gunstig uitzicht voor de toepassingsmogelijkheden van deze methode bij trillingreducties. Figuur 35 geeft de concluderende FRF van deze thesis weer.



Figuur 35: FRF LRM en FRF lege plaat

In deze grafiek zijn er twee FRFs zichtbaar, waarbij de rode de lege basisstructuur weergeeft en de blauwe de LRM. Verder zijn de verticale lijnen de te verwachten resonator eigenmodes van 184 en 281 Hz. Bij deze frequenties zijn twee stopbanen zichtbaar, deze zijn naar links verschoven wat correspondeert met de opgemeten resonantiefrequenties van de individuele resonatoren in Tabel 14. Deze stopbanden geven een trillingsreductie zone weer van 200 Hz (150 - 350 Hz) t.o.v. de lege basisstructuur, maar er is helaas geen sprake van een volledige samenvoeging. Hiervoor liggen de modes net iets te ver uit elkaar. In het hogere frequentiegebied is er nog steeds een afvlakking van de resonantiepieken merkbaar door de geïntroduceerde demping. Dit toont het potentieel aan dat bij een verder geoptimaliseerd ontwerp een volledige samenvoeging mogelijk is.

6. Besluit

Het is essentieel om zowel aan gewichtsbesparing te doen zonder toegevingen te maken op comfort in de huidige veeleisende samenleving. De literatuurstudie toonde het potentieel van LRMs voor toekomstige trillingreducties al aan. Verder leent spuitgieten zich sterk voor massaproductie.

Het designproces begint bij de materiaalselectie, hieruit blijkt dat een ABS-TPU-combinatie een goede chemische verbinding maakt. Voor deze masterproef is er in samenspraak met Covestro geopteerd voor Desmopan 6064A, Desmopan 487 en Desmopan 9385D. De sterk varieerde hardheid en flexibiliteit van deze selectie leidt tot een brede scope voor verdere metingen.

Uit de literatuur blijkt dat er in een ideale situatie 60% van de treksterkte van de zwakste component wordt behouden bij het 2K-injecteren van een eindproduct. Zoals verwacht liggen de combinaties van ABS en Desmopan 6064A of 487 dicht bij deze optimale waarde. Vooral het schuren met een ruwere grid (40) bevordert de ABS-TPU hechting. Maar Desmopan 9385D geeft ongeacht de voorbereiding een zeer slechte verbinding, hierdoor wordt er niet met deze component verder gewerkt.

De dempingskarakteristieken van Desmopan 6064A en 487 zijn opgemeten in een dynamische testsetup met behulp van de PSV-500 laservibrometer. Hieruit blijkt dat beide materiaalsoorten damping introduceren in de resonator. Bij Desmopan 6064A is de dempingscoëfficiënt echter wel groter t.o.v. Desmopan 487. De dynamische metingen bevestigen ook voorgaande conclusie van een betere hechting bij een grovere grid (40) voor de oppervlaktebehandeling van de contactvlakken. Door de materiaaldistributie aan te passen is het mogelijk de resonator te tunen voor zowel een specifieke frequentie alsook dempingscoëfficiënt. Helaas blijkt hieruit ook dat het gebruik van Desmopan 6064A in de resonator resulteert in een zeer lage resonantiefrequentie, waardoor er geopteerd is voor Desmopan 487. Het introduceren van een asymmetrie in deze resonatoren veroorzaakt twee meetbare modes die samen te voegen zijn tot één brede mode. Dit samen met een hoger frequentiebereik en goede spuitgietbaarheid zorgt ervoor dat ABS-Desmopan 487-combinatie als vertrekpunt is geselecteerd voor het ontwerp van een breedbandige LRM.

Hierbij is de hypothese dat beide modes verenigbaar zijn tot één brede mode. Die nadien zichtbaar is in de FRF van het metamateriaal als één brede stopband waarin een gereduceerde trillingsrespons aanwezig is. Door parameteroptimalisatie toe te passen wordt een resonatorontwerp bekomen dat zich tussen 180 en 280 Hz bevindt en een verschil van 97 Hz heeft tussen beide modes. Voor de productie van deze resonator is een metalen insert ontworpen om zo de ABS-insert herhaalbaar te kunnen produceren. De opgemeten FRF correspondeert sterk met de simulaties, maar de invloed van damping moet nog verder onderzocht worden. Het potentieel van breedbandige LRMs geproduceerd m.b.v. spuitgietechnieken is echter wel duidelijk aangetoond door de 200 Hz reductiezone (150 - 350 Hz).

Voor een volgend onderzoek is het dan ook aangeraden zich te focussen op het frequentiebereik tussen beide modes. Verder heeft Desmopan 6064A ook het potentieel om grotere frequentieverschillen te laten samenkomen door de hogere dempingscoëfficiënt. Hiervoor is een volledig nieuw resonator design noodzakelijk. Dit betekent dus ook een nieuwe caviteit. Een laatste insteek voor een volgende versie zijn de flexibelere applicatiemogelijkheden door het multi-materiaal ontwerp.

Referentielijst

- [1] C. Nugent, “Noise in Europe 2014,” European Environment Agency. Accessed: Jan. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/publications/noise-in-europe-2014>
- [2] Meng Y. Shirley, “A few words from Dr. Y. Shirley Meng, the new Editor-in-Chief of MRS Energy & Sustainability,” *MRS Energy and Sustainability*, vol. 6, no. 1. Springer Nature, Dec. 01, 2019. doi: 10.1557/mre.2019.14.
- [3] F. Fahy and P. Gardonio, *Sound and Structural Vibration*, 2nd ed. Amsterdam: Amsterdam; London: Elsevier/Academic, 2007. doi: 10.1016/B978-0-12-373633-8.X5000-5.
- [4] F. Alves Pires, M. Wandel, C. Thomas, E. Deckers, W. Desmet, and C. Claeys, “Improving the sound transmission loss of an aircraft ceiling panel by locally resonant metamaterials,” *SAE mobilus*, 2022.
- [5] L. Sangiuliano, “Resonant Metamaterial Design for Structure-Borne Noise Mitigation: Design Approaches Applied to Automotive Use Cases,” *Resonant Metamaterial Design for Structure-Borne Noise Mitigation Design Approaches Applied to Automotive Use Cases*. KU Leuven. Faculty of Engineering Science, Leuven, 2021.
- [6] N. Spelmans, “Compacte, laagfrequente lokaal resonante metamaterialen met behulp van insert moulding: productie, simulatie en validatie (eindwerk),” Gezamenlijke opleiding Industriële Ingenieurswetenschappen UHasselt & KU Leuven, Diepenbeek, 2022.
- [7] 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,” *J Sound Vib*, vol. 332, no. 6, pp. 1418–1436, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.jsv.2012.09.047.
- [8] 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, COBEM 2021* COBEM 2021 26th International Congress of Mechanical Engineering, 2021.
- [9] J. Yu, S. Wang, C. Nerse, G. Lee, and K.-J. Chang, “Mass production applicable locally resonant metamaterials for NVH applications Acoustic Metamaterial,” Montreal: International Congress on Sound and Vibration, 2019. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/339781157>
- [10] M. Bopp and A. Albers, “Vibroacoustic metamaterials as add-on solution for noise reduction in existing housing structures DFG SPP 2187,” Institute of Noise Control Engineering of the United States, 2023. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/364994676>
- [11] 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,” *J Sound Vib*, vol. 332, no. 6, pp. 1418–1436, 2013, doi: 10.1016/j.jsv.2012.09.047.
- [12] C. Goffaux *et al.*, “Evidence of Fano-like interference phenomena in locally resonant materials,” *Phys Rev Lett*, vol. 88, no. 22, pp. 225502/1-225502/4, 2002, doi: 10.1103/PhysRevLett.88.225502.
- [13] C. Claeys, N. G. Rocha de Melo Filho, L. Van Belle, E. Deckers, and W. Desmet, “Design and validation of metamaterials for multiple structural stop bands in waveguides,” *Extreme Mech Lett*, vol. 12, pp. 7–22, 2017, doi: 10.1016/j.eml.2016.08.005.
- [14] L. D’Alessandro, R. Ardito, F. Braghin, and A. Corigliano, “Low frequency 3D ultra-wide vibration attenuation via elastic metamaterial,” *Sci Rep*, vol. 9, no. 1, p. 8039, 2019, doi: 10.1038/s41598-019-44507-6.

- [15] C. B. Lin, Z. C. Chang, H. C. Hsueh, and W. C. Wang, "Effect of chemical roughening on adhesive strength of aluminium flake doped ABS/PC overmoulded with SEBS," *Plastics, Rubber and Composites*, vol. 41, no. 8, pp. 350–357, Oct. 2012, doi: 10.1179/1743289811Y.0000000034.
- [16] P. Le Mouellic *et al.*, "Thermomechanical behaviour and interface of overmoulded soft thermoplastic vulcanizate elastomers," *Materials*, vol. 14, no. 19, Oct. 2021, doi: 10.3390/ma14195704.
- [17] M. V. Candal, A. Gordillo, O. O. Santana, and J. J. Sánchez, "Study of the adhesion strength on overmoulded plastic materials using the essential work of interfacial fracture (EWIF) concept," *J Mater Sci*, vol. 43, no. 15, pp. 5052–5060, Aug. 2008, doi: 10.1007/s10853-008-2667-1.
- [18] E. Zervas and C. Lazarou, "Influence of European passenger cars weight to exhaust CO2 emissions," *Energy Policy*, vol. 36, no. 1, pp. 248–257, Jan. 2008, doi: 10.1016/j.enpol.2007.09.009.
- [19] B. Xu and B. Lin, "Factors affecting CO2 emissions in China's agriculture sector: Evidence from geographically weighted regression model," *Energy Policy*, vol. 104, pp. 404–414, 2017, doi: 10.1016/j.enpol.2017.02.011.
- [20] K. Steijvers *et al.*, "MASS-MANUFACTURABLE COMPACT LOW-FREQUENCY LOCALLY RESONANT METAMATERIALS VIA INSERT INJECTION MOULDING," Prague: IIAV C IIAV CZECH s.r.o., Jul. 2023.
- [21] Brinkmann S. Verbesserte, "Vorhersage der Verbundfestigkeit von 2-Komponenten-Spritzgiessbauteilen (eindwerk)," RWTH AACHEN UNIVERSITY, Aachen, 1996.
- [22] H.-P. Heim, *Specialized injection molding techniques*. in PDL handbook series. Oxford: Elsevier, 2016.
- [23] F. Mieth and M. Tromm, "Multicomponent Technologies," in *Specialized Injection Molding Techniques*, Elsevier Inc., 2016, pp. 1–51. doi: 10.1016/B978-0-323-34100-4.00001-8.
- [24] W. Six, F. Desplentere, A. Van Bael, and J. De Keyzer, "Prediction of interphase strength in 2K injection molding of thermoset rubbers and thermoplastics (eindwerk)," KU Leuven. Faculty of engineering technology, Brugge, 2020.
- [25] Zetar, "Compat-Chart." Accessed: Jan. 16, 2024. [Online]. Available: <https://zetarmold.com/two-shot-molding-material-compatibility/>
- [26] D. Montalvão, R. A. L. D. Cláudio, A. M. R. Ribeiro, and J. Duarte-Silva, "Experimental measurement of the complex Young's modulus on a CFRP laminate considering the constant hysteretic damping model," *Compos Struct*, vol. 97, pp. 91–98, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.compstruct.2012.10.050.
- [27] C. Van den Wyngaert, F. Desplentere, and W. Six, "Investigation of bond strength in thermoplastic overmoulded products supported by numerical simulations (eindwerk)," KU Leuven. Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen, Brugge, 2017.