

Faculteit Industriële
Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:
elektromechanica

Masterthesis

Ontwerp en productie van snel assembleerbare resonatoren voor modulaire lokaal
resonante metamaterialen

Artjom Knysk

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

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Elke DECKERS

BEGELEIDER :

ing. Kristof STEUVERS

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 snel assembleerbare resonatoren voor modulaire lokaal
resonante metamaterialen***

Artjom Knysh

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

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Elke DECKERS

BEGELEIDER :

ing. Kristof STEUVERS



KU LEUVEN

Woord vooraf

Het afgelopen jaar ben ik bezig geweest met een thesis die mij de mogelijkheid heeft gegeven om zowel het theoretische aspect van trillingsonderdrukking als het praktische aspect van het vervaardigen en onderzoeken ervan te verkennen. De focus lag specifiek op de ontwikkeling van innovatieve lichtgewicht trillings- en geluidsonderdrukkers in de vorm van lokaal resonante metamaterialen (LRM). Deze ervaring heeft niet alleen mijn academische kennis verdiept, maar ook mijn vaardigheden als industrieel ingenieur elektromechanica verder ontwikkeld.

Ik wil mijn dankbaarheid uiten aan iedereen die een rol heeft gespeeld bij het tot stand komen van deze thesis. Allereerst wil ik Elke Deckers en Kristof Steijvers bedanken voor hun begeleiding gedurende het jaar. In het bijzonder ben ik Kristof Steijvers dankbaar; jij was er altijd om mij een helpende hand te bieden en feedback te geven. Verder wil ik Marnick De Vloo en Jochen Bikkembergs bedanken. Jullie waren altijd bereid om bepaalde thema's met mij te overleggen en mee te denken over oorzaken en oplossingen, aangezien jullie een vergelijkbare thesis tot stand brachten.

Ook wil ik al mijn vrienden bedanken voor hun support en het voorzien van de nodige afleiding gedurende het jaar. Ten slotte wil ik mijn familie bedanken, die mij de kans hebben gegeven om deze masteropleiding te volgen en succesvol af te ronden. Met deze woorden van dank en waardering, presenteer ik vol trots deze masterproef, hopend dat het een waardevolle bijdrage zal leveren.

Inhoudsopgave

Woord vooraf	1
Lijst met tabellen	5
Lijst met figuren	8
Verklarende woordenlijst	9
Abstract	11
Abstract in English	13
1 Inleiding	15
1.1 Situering	15
1.2 Probleemstelling	16
1.3 Doelstellingen	16
1.4 Methode	17
1.5 Vooruitblik	17
2 Bronnenstudie	19
2.1 Metamaterialen	19
2.1.1 Lokaal resonante metamaterialen (LRM)	20
2.2 Verbindingstechnieken	22
2.2.1 Snap-fit verbinding	22
2.2.2 Magneetverbinding	24
2.2.3 Schroefverbinding	25
2.3 Fabricagemethoden	26
2.3.1 Fused Deposition Modeling (FDM)	26
2.3.2 spuitgieten (injection moulding)	27
3 Ontwerp van modulaire resonatoren	29
3.1 Inleiding	29
3.2 Design van het resonatorgedeelte	29
3.2.1 Simulatie resultaten	30
3.3 Design van de resonatorverbinding	32
3.3.1 Magneetverbinding	32
3.3.2 Moerverbinding	33
3.3.3 Snap-fit verbinding	33

3.4	Productie van de modulaire resonatoren	35
4	Experimentele validatie modulaire resonatoren	37
4.1	Inleiding	37
4.2	Meetopstelling	37
4.3	Meetresultaten	39
4.3.1	Analyse van resonantiefrequenties per ontwerp	39
4.3.2	Invloed van het soort verbinding op de resonantiefrequentie	40
4.3.3	Invloed van magneetverbinding op resonantiefrequentie	42
4.3.4	Vergelijking tussen alle verbindingen	43
4.3.5	Analyse van lineair gedrag per ontwerp	43
5	Metamateriaal realisatie	47
5.1	Inleiding	47
5.2	Design en realisatie LRM-platen	47
5.2.1	Ontwikkeling modulaire resonatoren voor de LRM-platen	49
5.2.2	Opbouw van de PMMA en stalen LRM-plaat	51
5.3	Experimentele validatie van de LRM-platen	52
5.3.1	Meetopstelling	52
5.3.2	Resultaten kunststoffen LRM-plaat	54
5.3.3	Resultaten stalen LRM-plaat	55
5.3.4	Conclusie	56
6	Besluit en voorstel voor toekomstig onderzoek	57
6.1	Besluit	57
6.2	Voorstel voor toekomstig onderzoek	59
	Literatuurlijst	62
A	Bijlage	63

Lijst van tabellen

3.1	Frequenties per modi voor hoogfrequente en laagfrequente resonatoren	31
3.2	Printinstellingen	35
4.1	Experimentele resonantiefrequenties en variatie voor laagfrequente resonatoren . .	40
4.2	Experimentele resonantiefrequenties en variatie voor laagfrequente resonatoren . .	40
4.3	Spreading in massa per ontwerp en configuratie	40
5.1	Materiaaleigenschappen van gebruikte stalen en PMMA plaat	48
5.2	Bragg-frequenties voor verschillende UC-groottes in een stalen plaat en PMMA-plaat	48
5.3	Vergelijking van resonatorbijdragen per type plaat	51
5.4	Eigenschappen en resultaten per type plaat	56

Lijst van figuren

1.1	Academische LRM-realisaties gerealiseerd via: 3D-printen, thermovormen en spuitgieten van resonatoren	15
2.1	Voorbeelden metamaterialen: a) design met membraan integratie, b) hexagonale hoststructuur	19
2.2	a) Schematische voorstelling van 1DOF- en 2DOF-systeem, b) amplitude en frequentie respons voor systeem met demper en een systeem zonder demper	20
2.3	Belang van plaatsing op subgolflengteschaal	21
2.4	a) Longitudinale golf, b) buiggolf	21
2.5	Invloed van de massa van een TVA op de stopbandbreedte	22
2.6	a) Cantilever snap-fit, b) u-vormige snap-fit	23
2.7	Torsie snap-fit	23
2.8	Annulaire snap-fit	24
2.9	Lokale resonator voor bevestiging aan de hoststructuur	25
2.10	Extruder 3D-printer	26
2.11	Energie absorberende honingraatstructuur vervaardigd uit 3D-printen	27
2.12	Schematische voorstelling spuitgietmachine	28
3.1	Afmetingen: a) laagfrequente resonator, b) hoogfrequente resonator	30
3.2	Modes voor laagfrequent design: a) buigmodi mode 1, b) torsiemodi mode 2, c) axiale mode 3, d) knikmodi mode 4, e) gemengde mode 5	31
3.3	Modes voor hoogfrequent design: a) buigmodi mode 1, b) torsiemodi mode 2, c) knikmodi mode 3, d) gemengde mode 4, e) axiale mode 5	31
3.4	a) Magneetverbinding, b) magneetverbinding detail insert plaats	32
3.5	a) Moerverbinding, b) moerverbinding detail insert plaats	33
3.6	Verhouding van de strain rate in functie van de lengte van de cantilever voor verschillende doorsnedes.	34
3.7	a) Snap-fit mannelijk deel, b) snap-fit vrouwelijk deel	34
4.1	Meetopstelling voor dynamische karakterisatie van modulaire resonatoren.	37
4.2	Opstellingen: a) snap-fit, b) magneet, c) moer	38
4.3	FRF per resonator ontwerp: a) laagfrequent, b) hoogfrequent	39
4.4	FRF van magneetresonator bij variërende onderlaagdikte	42
4.5	Visuele weergave van de spreiding en ligging van W_nmax en W_nmin per design	43
4.6	FRF's onder variërende spanningsniveaus voor respectievelijk laagfrequente en hoogfrequente reeksen per design: a,b) magneetverbinding, c,d) moerverbinding, e,f) snap-fit verbinding	44

5.1	a) Gesimuleerde vorm van de buignode, b) vorm en afmetingen van het resonatorgedeelte	49
5.2	a) Technische tekening van de <i>snap lock pin</i> , b) snap-fit voor PMMA-plaat, c) magneetresonator voor de stalen plaat	50
5.3	FRF van ontwikkelde resonator voor op de LRM-platen	50
5.4	a) PMMA LRM-plaat, b) stalen LRM-plaat	51
5.5	Meetopstelling: 1. Laservibrometer, 2. Tafel, 3. Shaker, 4. Versterker, 5. SCA-DAS met laptop	52
5.6	FRF van de PMMA LRM-plaat	54
5.7	FRF van de stalen LRM-plaat	55

Verklarende woordenlijst

FRF	frequency response function
LRM's	lokaal resonante metamaterialen
MEM	modal effective mass
UC	Unit cell

Abstract

Lokaal resonante metamaterialen (LRM's) zijn structuren die, ondanks hun laag gewicht, trillingen en geluid effectief onderdrukken. Voor snelle in-situ tests zijn modulaire oplossingen nodig, daarom richt deze thesis zich op het onderzoek en de ontwikkeling van modulaire LRM's. Deze modulaire LRM's dienen een montage op een kunststof- en metaalplaat mogelijk te maken.

Na een literatuuronderzoek naar bestaande bevestigingsmechanismen worden verschillende concepten voor kunststof- en metalen platen geselecteerd. Vervolgens worden resonatoren met een geïntegreerde bevestiging ontworpen en ge-3D-print. Deze resonatoren worden experimenteel getest om hun dynamische eigenschappen, zoals resonantiefrequentie en lineariteit, te valideren. Na positieve validatie op resonatorniveau wordt een metamateriaalvalidatie uitgevoerd om het stopbandeffect en de trillingsonderdrukking te bevestigen.

De resultaten tonen aan dat het type verbinding merkbare invloed heeft op de ligging van de resonantiepiek, wat de nadruk legt op de moeilijkheid van het afstemmen van de resonantiefrequentie. Echter, elke verbinding vertoont wel een lineair gedrag. De experimenten op de LRM-platen bevestigen het stopbandeffect wanneer gebruik wordt gemaakt van modulaire resonatoren. Daarnaast vertonen de LRM-platen ook een lineair gedrag waarbij de stopband niet verschuift bij verhoogde excitatie. Hiermee wordt aangetoond dat resonatoren effectief modulair kunnen worden toegevoegd aan structuren.

Abstract in English

Locally resonant metamaterials (LRMs) are structures that, despite their low weight, effectively suppress vibrations and noise. For rapid in-situ tests, modular solutions are necessary; therefore, this thesis focuses on the research and development of modular LRMs. These modular LRMs are designed to enable mounting on plastic and metal plates.

After a literature review of existing fastening mechanisms, various concepts for plastic and metal plates are selected. Resonators with integrated fastening mechanisms are then designed and 3D-printed. These resonators are experimentally tested to validate their dynamic properties, such as resonant frequency and linearity. After positive validation at the resonator level, a metamaterial validation is conducted to confirm the stop-band effect and vibration suppression.

The results show that the type of connection has a noticeable influence on the position of the resonance peak, emphasizing the difficulty of tuning the resonant frequency. However, each connection exhibits linear behavior. The experiments on the LRM plates confirm the stop-band effect when modular resonators are used. Additionally, the LRM plates also exhibit linear behavior, with no shift in the stop-band under increased excitation. This demonstrates that resonators can be effectively added modularly to structures.

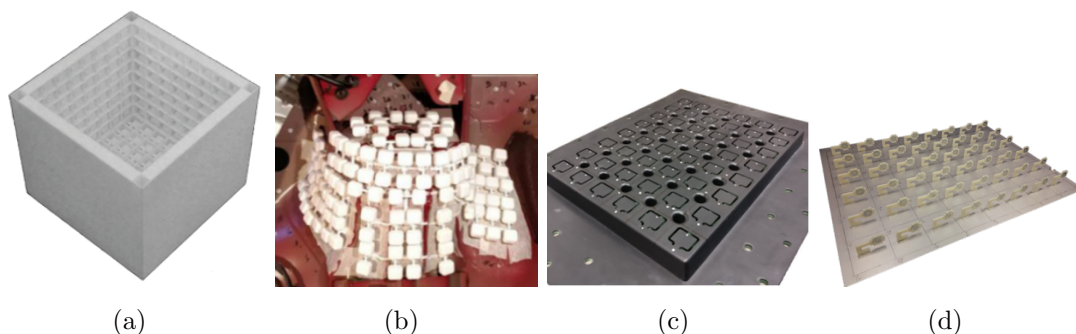
Hoofdstuk 1

Inleiding

De schrijver leidt zijn lezer tot zijn tekst in door zo duidelijk mogelijk de context, de casus, de motieven, de doelen en de methoden van het onderzoek toe te lichten. Na de inleiding moet de lezer een juist beeld hebben van de situatie, de probleemstelling, de doelstelling(en) en de gevolgde werkwijze of methode (zie ook projectopzet).

1.1 Situering

De negatieve impact van menselijke blootstelling aan geluid en trillingen krijgt in de huidige maatschappij steeds meer aandacht. Aangezien conventionele geluids- en trillingsoplossingen vaak zwaar en volumineus zijn, focust het academisch onderzoek zich op innovatieve lichtgewicht trillings- en geluidsonderdrukkers in de vorm van lokaal resonante metamaterialen (LRM). Door het plaatsen van lokaal resonerende elementen op of in een basisstructuur worden afgestemde frequentiebanden van sterke trillings- en geluidsonderdrukking (stopbanden) bekomen. Via verschillende academische demonstratoren (zie figuur 1.1) [1, 2, 3, 4] is het sterke potentieel van LRMs aangetoond. Deze techniek wordt gebruikt in verschillende industrieën, waaronder de voertuig-, ruimtevaart- en machine-industrie. Deze hechten namelijk een groot belang aan lichtgewicht wat resulteert in een mindere CO₂-uitstoot. De robuuste realisatie van LRMs is moeilijk gebleken omdat productietechnieken vaak de uiteindelijk bekomen stopband beïnvloeden.



Figuur 1.1: Academische LRM-realisaties gerealiseerd via: 3D-printen [1], thermovormen [2] en spuitgieten van resonatoren [3]

In de onderzoeksgroep Polymer Processing and Engineering (PPE) aan de KU Leuven op campus Diepenbeek wordt momenteel onderzoek uitgevoerd naar de productie van LRMs via spuitgieten.

Het gebruik van LRMs wordt algemeen beschouwd als interessant in de industrie, maar vanwege de uitdagingen in de productie worden ze zelden of nooit toegepast. Spuitgieten biedt echter een veelbelovende mogelijkheid voor massaproductie van LRMs.

Om LRMs effectief toe te passen op bestaande machines in de industrie, is er behoefte aan snel assembleerbare en modulaire LRM-concepten. Deze benadering vergemakkelijkt niet alleen de integratie van LRMs in bestaande systemen, maar biedt ook de mogelijkheid voor snelle demonstraties op industriële schaal. Dit kan aanzienlijk bijdragen aan het opbouwen van vertrouwen binnen de industrie in de praktische toepassing van LRMs.

Daarom richt deze masterproef zich op het onderzoek naar (spuitgietbare) bevestigingsmechanismen voor resonatoren op modulaire LRMs en de invloed van deze mechanismen op het dynamisch gedrag, zoals de stopbanden. Door deze aspecten te onderzoeken en te verbeteren, kunnen we niet alleen de productie-efficiëntie verhogen, maar ook de acceptatie en implementatie van LRMs in de industrie bevorderen.

1.2 Probleemstelling

Binnen PPE worden verschillende uitdagingen ervaren met betrekking tot de productie van LRMs. Een van de voornaamste uitdagingen is het tijdrovende en arbeidsintensieve proces van het handmatig bevestigen van resonatoren aan metamaterialen, wat niet geschikt is voor massaproductie. Momenteel worden resonatoren vaak vervaardigd met behulp van 3D-printen of spuitgieten, gevolgd door handmatige lijmtoeepassing, wat niet alleen tijdrovend is, maar ook niet schaalbaar is voor massaproductie. Een ander kritisch probleem is het gebrek aan kennis over welke bevestigingsmechanismen überhaupt bruikbaar zijn voor LRMs. Het dynamisch gedrag van alternatieve bevestigingsmechanismen is grotendeels onbekend, wat de ontwikkeling en implementatie van efficiënte productieprocessen belemmert.

Om deze problemen aan te pakken en de overgang naar efficiënte massaproductie van LRMs mogelijk te maken, richt deze masterproef zich op het identificeren en onderzoeken van bruikbare bevestigingsmechanismen voor resonatoren op metamaterialen. Het uiteindelijke doel is om methoden te ontwikkelen waarmee resonatoren lokaal en efficiënt kunnen worden bevestigd, wat de productiesnelheid verhoogt en de schaalbaarheid verbetert.

1.3 Doelstellingen

Het hoofddoel van deze masterproef is het ontwerpen van verschillende verbindingsmechanismen waarmee resonatoren effectief op metamaterialen kunnen worden bevestigd. Dit hoofddoel wordt verder verfijnd in de volgende deeldoelstellingen:

- Onderzoek naar verschillende bevestigingsmechanismen, waaronder de mogelijkheid van integratie van magneten, boutjes, en andere methoden.
- Experimentele karakterisatie van de invloed van het bevestigingsmechanisme op de resonantiefrequenties van de geproduceerde resonatoren.
- Ontwikkeling van een LRM-plaat om de functionaliteit en effectiviteit van de modulaire resonatoren te beoordelen, alsook het analyseren van het stopband-effect.

Het onderzoek naar bevestigingsmechanismen omvat het verkennen van diverse opties voor zowel hechting op kunststof als op metaal. Daarnaast zal de invloed van het gekozen bevestigingsmechanisme op de resonantiefrequentie worden onderzocht met als doel inzicht te verkrijgen in de dynamische eigenschappen van de verbinding. Door middel van deze experimentele karakterisatie kunnen we niet alleen de effectiviteit van verschillende bevestigingsmethoden evalueren, maar ook eventuele afwijkingen of verstoringen in de resonantiefrequenties detecteren.

1.4 Methode

Deze masterproef start met een literatuurstudie omtrent de realisatie van LRMs en verbindingssystemen. Deze studie omvat een grondig onderzoek naar de mogelijkheden van spuitgieten en de bijbehorende beperkingen, evenals naar bestaande bevestigingsmechanismen die door spuitgieten vervaardigd kunnen worden. Daarnaast wordt aandacht besteed aan de kennis omtrent metamaterialen, met als doel het selecteren van een geschikte bevestigingsmethode voor de resonator.

In samenwerking met de promotoren worden de meest veelbelovende bevestigingsconcepten gemodelleerd in CREO en vervolgens ge3D-print, wat het mogelijk maakt om zowel experimentele tests als simulaties via Siemens NX uit te voeren. Deze tests zijn gericht op het evalueren van de resonantiefrequentie van de resonatoren en het controleren van hun lineair gedrag.

Na deze initiële validatie op resonantorniveau richt deze thesis zich verder op het vervaardigen van een LRM-plaat. Hiermee wordt een validatie gedaan op metaniveau, waarbij het stopbandeffect wordt geanalyseerd en de effectiviteit van de modulaire resonator in een compleet systeem wordt geëvalueerd.

1.5 Vooruitblik

Hoofdstuk 2 presenteert een uitgebreide bronnenstudie rondom metamaterialen, verbindingsmethoden en mogelijke fabricagemethoden. Hoofdstuk 3 richt zich op het ontwerp van modulaire resonatoren. Dit wordt gevolgd door een experimentele validatie van deze ontwerpen in hoofdstuk 4, waarin de dynamische karakterisatie van de resonatoren wordt gepresenteerd. In Hoofdstuk 5 wordt de realisatie van de metamateriaalplaten gedetailleerd beschreven, gevolgd door de resultaten van de validatie op metaniveau. Tot slot biedt Hoofdstuk 6 een conclusie van de bevindingen en aanbevelingen voor toekomstig onderzoek.

Hoofdstuk 2

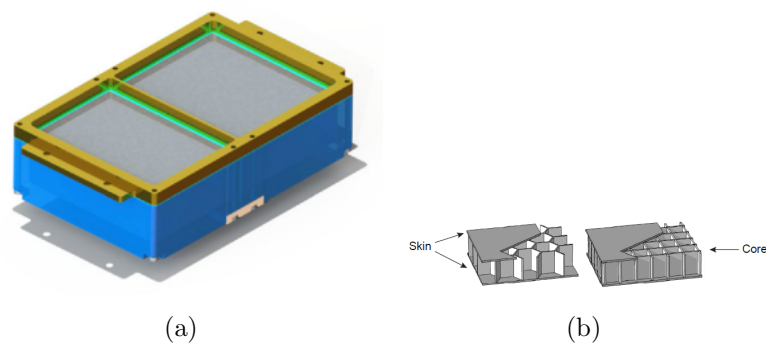
Bronnenstudie

Deze bronnenstudie richt zich eerst op het begrip resonante metamaterialen, met aandacht voor hun werking en toepassingen. Vervolgens worden verschillende verbindingstechnieken onderzocht om een modulaair ontwerp te creëren. Tot slot behandelt deze studie de fabricagemethoden die het meest geschikt zijn voor het ontwerpen van modulaire (LRMs).

2.1 Metamaterialen

Metamaterialen worden gekenmerkt als kunstmatig ontworpen materialen met eigenschappen die niet van nature voorkomen [5]. Deze materialen omvatten een breed scala aan unieke eigenschappen, zoals akoestische, elektromagnetische, optische en mechanische kenmerken, waardoor ze een divers toepassingsgebied hebben [6].

In geluidstoepassingen kunnen metamaterialen worden gebruikt op verschillende manieren, zoals geluidsdemping met een membraan of het omhullen van een resonerende structuur met een hexagonale structuur tussen twee platen. De hexagonale structuur fungeert als een beschermende omhulling rond de resonerende elementen, waardoor hun effectiviteit wordt vergroot en geluidsoverdracht wordt verminderd (figuur 2.1).



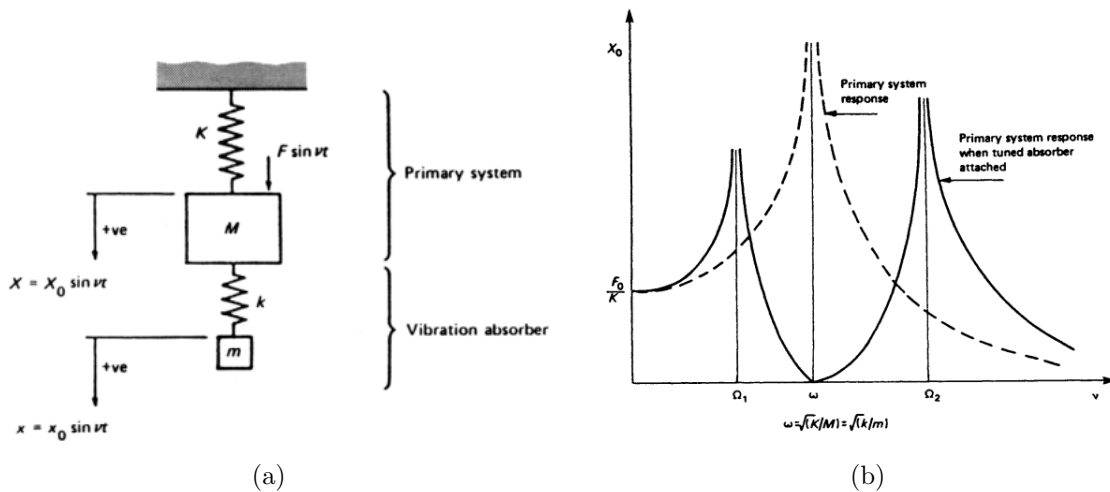
Figuur 2.1: Voorbeelden metamaterialen: a) design met membraan integratie [7], b) hexagonale hoststructuur [8]

2.1.1 Lokaal resonante metamaterialen (LRM)

Lokaal resonante metamaterialen maken gebruik van een essentieel principe: het integreren van een massa-veer-systeem in een structuur. LRM's worden gecreëerd door structurele elementen zoals balken of sferische deeltjes toe te voegen, die hun eigen resonantiefrequenties hebben. Deze resonantiefrequenties kunnen worden afgestemd op specifieke frequentiebereiken voor effectieve trillingsonderdrukking.

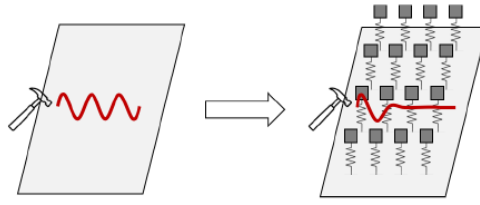
Figuur 2.2a toont schematisch een toegevoegd massa-veer-systeem dat het basis massa-veer-systeem uitbreidt van een systeem met één vrijheidsgraad (1-DOF) naar een systeem met twee vrijheidsgraden (2-DOF). Dit resulteert in twee nieuwe resonantiefrequenties, die beide verschillen van de oorspronkelijke frequentie van het hoofdsysteem, dit is ook weergegeven in figuur 2.2b.

In figuur 2.2b zien we ook dat wanneer de resonantiefrequentie van het hoofdsysteem gelijk is aan de natuurlijke resonantiefrequentie van de demper, de demper een kracht uitoefent op het primaire systeem die gelijk en tegengesteld is aan de opgewekte kracht in het primaire systeem. Hierdoor zal de netto kracht die op het primaire systeem werkt nul zijn, wat resulteert in een verplaatsingsamplitude x_0 van nul [9]. Hierbij moet echter opgemerkt worden dat de demper nauwkeurig moet worden afgesteld om de resonantiefrequentie van het hoofdsysteem effectief te onderdrukken. Dit kan nadelig zijn indien de resonantiepiek van het hoofdsysteem samenvalt met een van de nieuw gecreëerde pieken door het massa-veer systeem. Hierdoor zal het totale systeem zich niet dempen, maar juist een extra excitatie veroorzaken.



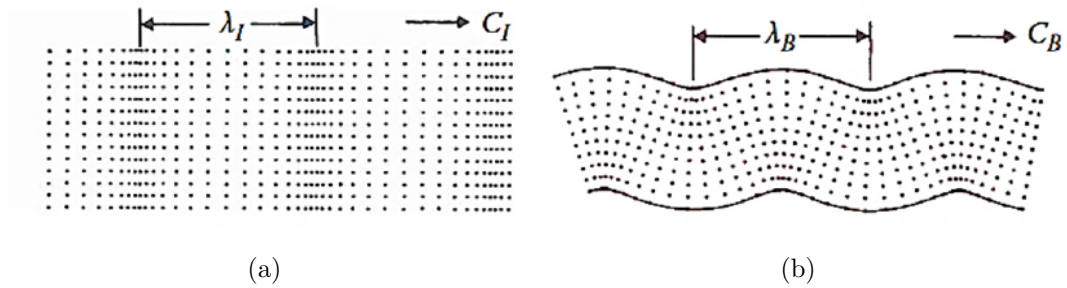
Figuur 2.2: a) Schematische voorstelling van 1DOF- en 2DOF-systeem [9], b) amplitude en frequentie respons voor systeem met demper en een systeem zonder demper [9]

Wanneer een structuur wordt gevuld met resonante elementen, ontstaat een systeem met een bijna onbeperkt aantal vrijheidsgraden. Om effectieve trillingsonderdrukking te bereiken, moeten deze resonatoren op een subgolflengteschaal worden geplaatst. Indien deze resonatoren zich op subgolflengteschaal bevinden, creëren ze frequentiebanden waarin golven zich nauwelijks kunnen voortplanten. Dit effect staat bekend als stopbanden. Figuur 2.3 illustreert hoe de golf door de structuur beweegt en uiteindelijk in amplitude afneemt door de aanwezigheid van de resonatoren.



Figuur 2.3: Belang van plaatsing op subgolflengteschaal [10]

Deze structuren kunnen zowel structurele- als luchtgeluidsgolven dempen. Structurele geluidsgolven ontstaan door trillingen in de structuur zelf, terwijl luchtgeluidsgolven door de lucht worden voortgeplant. Er moet opgemerkt worden dat luchtgeluidsgolven als medium lucht gebruiken en zich zuiver longitudinaal voortplanten (figuur 2.4a) en structurele geluidsgolven als medium een structuur gebruiken en zich zowel longitudinaal als transversaal voortplanten. Deze golven worden ook wel buiggolven genoemd (figuur 2.4b). Deze buiggolf zorgt er ook voor dat er een rotatie mogelijk is in een structuur [11].



Figuur 2.4: a) Longitudinale golf [11], b) buiggolf [11]

Door resonatoren op de juiste schaal te plaatsen, kunnen beide soorten golven effectief worden gedempt. Aangezien deze structuren worden afgestemd op een bepaalde frequentie, worden ze ook wel *tuned vibration absorbers* (TVA's) genoemd. Deze TVA kan worden vergeleken met een massa-veer systeem met één vrijheidsgraad (1-DOF), waarbij de natuurlijke frequentie van het systeem wordt gegeven door formule 2.1. Hierbij is ω_n de natuurlijke frequentie, k de veerstijfheid, en m de massa.

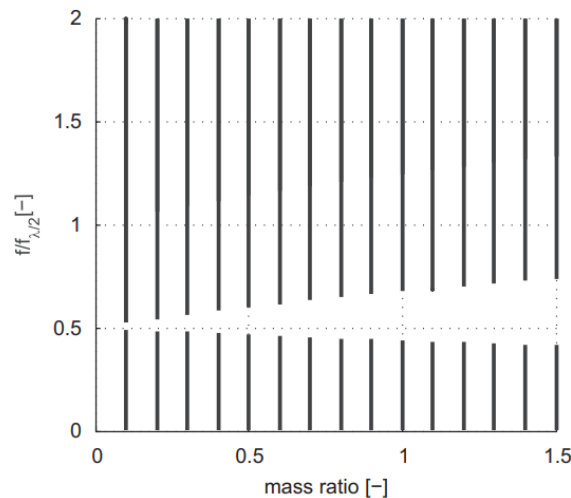
$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.1)$$

Door de massa en/of stijfheid van de structuur te veranderen, kan de natuurlijke frequentie worden afgestemd op de trillingsfrequentie van de invallende golven. Dit zorgt voor een effectieve demping van deze golven.

Er kan ook een analogie worden gemaakt met een massa-veer-dempersysteem. Hierbij zorgt de dempingsfactor voor een verlaging van de natuurlijke frequentie. Deze kan worden berekend met formule 2.2, waarbij ω_d de gedempte natuurlijke frequentie is en c de demping.

$$\omega_d = \sqrt{\omega_n^2 - \left(\frac{c}{2m}\right)^2} \quad (2.2)$$

Het is belangrijk op te merken dat de vorming van een stopband afhankelijk is van verschillende ontwerpfactoren, zoals de hoeveelheid resonatoren, de massa van de resonatoren, en de beschikbare demping. Figuur 2.5 toont hoe het aandeel aan resonatormassa de breedte van de stopband beïnvloedt [12].



Figuur 2.5: Invloed van de massa van een TVA op de stopbandbreedte [12]

2.2 Verbindingstechnieken

Dit hoofdstuk introduceert en onderzoekt verschillende verbindingstechnieken, variërend van boutverbindingen tot moderne innovaties zoals snapfits en magneetverbindingen, elk met zijn eigen toepassingsgebied, voordelen en overwegingen.

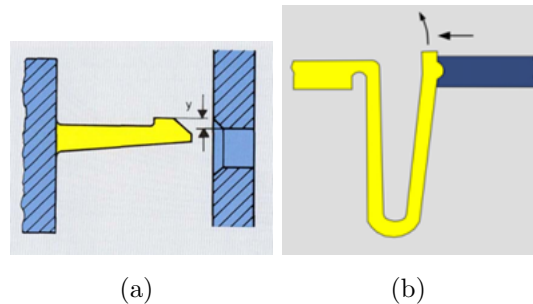
2.2.1 Snap-fit verbinding

Snap-fits bieden een alternatief voor conventionele verbindingstechnieken zoals schroeven of spijkers. Het basisprincipe van elke snap-fit verbinding is eenvoudig: een uitstekend deel van één component, zoals een haak, pen of knop, wordt tijdelijk ingedrukt tijdens het verbindingsproces en haakt vervolgens in een uitsparing (onderuitsnijding) in de bijbehorende component. Na het vasthaken keert de snap-fit terug naar een stressvrije toestand. Afhankelijk van de vorm kan de snap-fit losneembaar of onlosmakelijk zijn. Bij het ontwerpen moet ook rekening worden gehouden met de belasting die de snap-fit moet kunnen dragen, vooral omdat ze voornamelijk worden vervaardigd uit kunststoffen vanwege de benodigde flexibiliteit [13]. Hoewel er talloze ontwerp mogelijkheden zijn, kunnen deze worden teruggebracht tot enkele fundamentele vormen met bijbehorende berekeningsprincipes.

Cantiliver snap-fit

De grootste groep snap-fits bestaat uit de zogenaamde cantilevers. Er zijn talloze ontwerp mogelijkheden waarbij de dwarsdoorsnede varieert van eenvoudige rechthoekige vormen tot complexere geometrieën. Aangezien de voornaamste belasting wordt veroorzaakt door buiging, is het van cruciaal belang om het ontwerp optimaal te maken. Het principe is eenvoudig: een cantilever wordt als het ware in een bijpassende vorm ingedrukt, waarbij hij tijdelijk doorbuigt en zich

vervolgens spanningsvrij in de vorm nestelt. Dit resulteert in een vaste verbinding die nog wel losneembaar is. Dit kan worden bereikt door simpelweg krachtig de cantilever uit de vorm te trekken, of door het gebruik van een hefboommechanisme waardoor deze gemakkelijk buigt en zonder veel kracht uit de vorm kan worden verwijderd [14]. Figuur 2.6a illustreert de cantilever en de U-vormige snap-fit is als het ware een variant op de cantliver (figuur 2.6b).

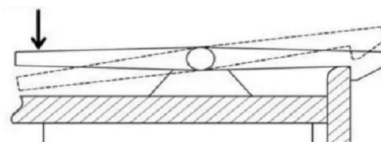


Figuur 2.6: a) cantilever snap-fit [14], b) u-vormige snap-fit [14]

Torsie snap-fit

Torsie snap-fits (figuur 2.7) onderscheiden zich van cantilever snap-fits doordat de vervorming niet wordt veroorzaakt door een buigbelasting, maar door een torsie-deformatie van het draaipunt. In dit geval wordt de torsiebalk blootgesteld aan schuifspanning. De maximale toegestane hoek van verdraaiing wordt beperkt door de toegestane schuifvervorming, die afhangt van de lengte en de straal van de torsiebalk, evenals de specifieke eigenschappen van het materiaal [15].

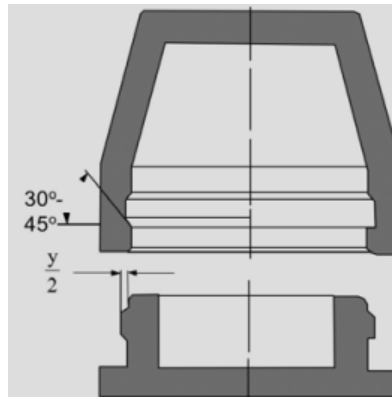
Bovendien is het een verwijderbare snap-fit, wat betekent dat het mechanisme op dezelfde manier vergrendeld en ontgrendeld kan worden als bij een cantilever snap-fit verbinding. Het toegevoegde veiligheidskenmerk is de veertorsie, waardoor het sluitsysteem gemakkelijk te bedienen is en zorgt voor een eenvoudige en bruikbare verbinding [15].



Figuur 2.7: Torsie snap-fit [15]

Annulaire snap-fit

Annulaire snapverbindingen (figuur 2.8) zijn een handige manier om twee rotatiesymmetrische onderdelen met elkaar te verbinden. Ze worden gekenmerkt door een cirkelvormige kraal die in een bijbehorende uitsparing grijpt. In vergelijking met de twee voorgaande besproken types ervaren annulaire snapverbindingen spanningen langs meerdere assen. Het werkingsprincipe is als volgt: de ring van de verbinding wordt uitgezet vanwege de duwkracht die wordt uitgeoefend, waarna deze in de kraal grijpt van het bijbehorende onderdeel. Hoewel deze verbinding geschikt is voor toepassingen met hoge belastingen vanwege de gelijkmatige spanningsverdeling in annulaire vormen, bestaat er toch een kans op losraken van de snapverbinding na overmatig gebruik of na verloop van tijd [15].

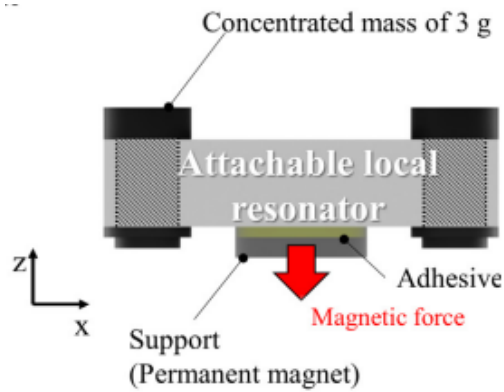


Figuur 2.8: Annulaire snap-fit [15]

2.2.2 Magneetverbinding

Magneten zijn voorwerpen die magnetische velden produceren en metalen aantrekken zoals ijzer, nikkel en kobalt. Dit fenomeen ontstaat door de uitlijning van magnetische domeinen, ook wel bekend als Weiss-gebieden, binnen ferromagnetische materialen, waarbij de meeste of alle domeinen in dezelfde richting worden geordend om een sterk magnetisch veld te creëren. Magnetische eigenschappen kunnen worden geïnduceerd in materialen door magnetisatie via wrijving met een magneet, blootstelling aan een magnetisch veld, of door het passeren van een elektrische stroom erdoorheen. Na het magnetiseren blijft er een zeker restmagnetisme over, dat bekend staat als het remanente magnetisme, wat resulteert in de permanente magnetische eigenschappen van de magneet [16].

Belangrijk om op te merken is het fenomeen van demagnetisatie dat optreedt bij magneten. Dit gebeurt door verschillende factoren, waaronder hitte, impact, conflicterende magnetische velden en AC-stromen. Wanneer permanente magneten worden blootgesteld aan verhoogde temperaturen, raken de magnetische domeinen verstoord, wat leidt tot demagnetisatie. Ook fysieke schokken en verlies van volume kunnen de magneten beïnvloeden, waardoor hun magnetische eigenschappen verminderen. Bovendien kunnen externe magnetische velden en AC-stromen de magneten beschadigen [17]. Het gebruik van magneten heeft eerder zijn potentieel laten zien in [18], waarbij veerplaten fungeerden als resonatoren en werden bevestigd aan een hoststructuur met behulp van permanente magneten (figuur 2.9). Dit project onderzoekt het gebruik van LRM op paneelstructuren in auto's om geluids- en trillingsreductie te verkrijgen. De studie koos voor magnetische verbindingen vanwege hun vermogen om snel configuraties van de veerplaten te wijzigen, zonder dat er bewerkingen op de hoststructuur hoefden te worden uitgevoerd [18].



Figuur 2.9: Lokale resonator voor bevestiging aan de hoststructuur [18]

Enkele conclusies met betrekking tot de magnetische verbindingen in het onderzoek waren onder meer dat magneten de werking van elektronische componenten in de buurt kunnen beïnvloeden wanneer ze worden gebruikt. Ook werd vastgesteld dat door het toevoegen van magneten de stijfheid en massa van de resonator veranderden. Deze veranderingen moeten worden overwogen bij het voorspellen van de stopbanden, en voor massaproductie zijn aanpassingen aan het ontwerp nodig. Ondanks deze uitdagingen en bevindingen bleek het systeem effectief te werken, met een aanzienlijke vermindering van geluid en trillingen. Daarom kan worden geconcludeerd dat de toepassing van een magneetverbinding in de praktijk succesvol is gebleken [18].

2.2.3 Schroefverbinding

Schroefverbindingen vormen een van de meest gebruikte mechanische verbindingsmethoden. Ze maken gebruik van een schroef (of bout) en een moer, of worden direct in de structuur gedraaid. Het principe is eenvoudig: de schroefdraad op de schroef zorgt voor een stevige verbinding tussen twee componenten. De meeste schroefverbindingen zijn demonteerbaar, wat ideaal is indien er een demontage mogelijkheid moet bestaan.

Voordelen van schroefverbindingen zijn onder meer de eenvoudige demontage en assemblage, en de stevige mechanische klemming die ze bieden. Dit maakt ze zeer geschikt voor herhaalde montage/demontage en voor toepassingen waarbij de verbinding nauwkeurig moet worden afgesteld.

Er zijn echter ook nadelen. Door trillingen kunnen schroefverbindingen na verloop van tijd losraken, wat de structurele integriteit kan verminderen. Daarom is het belangrijk om bij trillingsgevoelige toepassingen gebruik te maken van extra zekeringen, zoals schroeven met weerhaken of borgmoeren. Bovendien kan het tappen van schroefdraad in de structuur bij niet-zelftappende schroeven extra kosten met zich meebrengen [19].

2.3 Fabricagemethoden

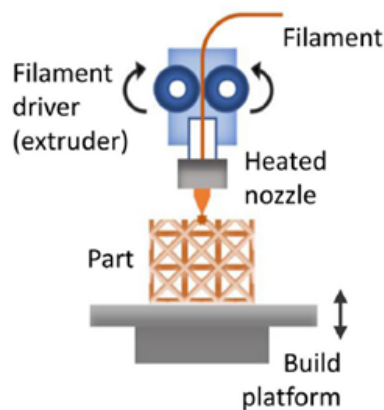
In deze masterproef worden twee fabricagemethoden onderzocht: 3D-printen met behulp van Fused Deposition Modeling (FDM) en spuitgieten, inclusief insert moulding. Deze methoden zijn geselecteerd vanwege hun specifieke voordelen en toepassingen die ze bieden in het productieproces van modulaire resonatoren. Beide technieken hebben unieke eigenschappen die ze geschikt maken voor verschillende fasen van het ontwerp- en productieproces, variërend van prototypeontwikkeling tot massaproductie. 3D-printen met FDM-technologie wordt specifiek ingezet vanwege de flexibiliteit bij het snel vervaardigen van complexe vormen tijdens de ontwerpfase van deze masterproef. Dit stelt ons in staat om snel te itereren en ontwerpaanpassingen efficiënt door te voeren. Spuitgieten, inclusief insert moulding, wordt vervolgens besproken vanwege het vermogen om op een economisch efficiënte wijze over te schakelen naar massaproductie.

De volgende secties zullen elk van deze fabricagemethoden in detail bespreken, met inbegrip van hun operationele principes, toepassingen, en de voor- en nadelen die ze bieden in de context van deze masterproef.

2.3.1 Fused Deposition Modeling (FDM)

Fused Deposition Modeling (FDM) is een vorm van additieve productie waarbij een driedimensionaal object laag voor laag wordt opgebouwd. Dit proces gebruikt thermoplastische filamenten die na verhitting nauwkeurig worden afgezet om de gewenste vormen te creëren.

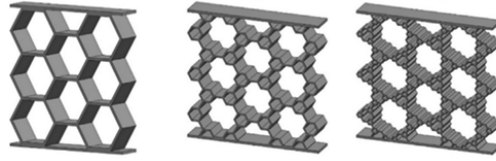
Figuur 2.10 illustreert het werkingsprincipe van de extruder in FDM-technologie. Eerst wordt het polymeer, in de vorm van een filament op een spoel, aangevoerd naar de extruder. Het filament wordt vervolgens verhit tot net onder het smeltpunt van het materiaal. Dit verandert het polymeer in een plastische staat, waarin het nauwkeurig kan worden gedeponereerd. De extruder fungeert hierbij als een doseerder en brengt het gesmolten polymeer laag voor laag aan op het printbed om een 3D-structuur te vormen [20].



Figuur 2.10: Extruder 3D-printer [20]

De laatste jaren heeft 3D-printen zich bewezen als een efficiënte methode voor het vervaardigen van mechanische, thermische en akoestische metamaterialen. Voor de ontwikkeling van Local Resonant Metamaterials (LRM) biedt 3D-printen voordelen vanwege de mogelijkheid om complexe geometrieën met hoge precisie te realiseren en de interne structuur nauwkeurig te controleren.

In Figuur 2.11 zien we een voorbeeld van een mechanische energieabsorberende honingraatstructuur, vervaardigd via 3D-printen uit koolstofvezelversterkt polymeermateriaal. Binnen deze basisstructuur kunnen resonatoren worden geplaatst om een LRM te creëren. Deze resonatoren kunnen vrij worden ontworpen om optimale akoestische prestaties te behalen binnen specifieke frequentiebereiken, terwijl de mechanische eigenschappen van het sandwichpaneel behouden blijven. Het enige vereiste is dat ze een resonantiemodus hebben [21], [22].



Figuur 2.11: Energie absorberende honingraatstructuur vervaardigd uit 3D-printen [21]

Dankzij voortdurende ontwikkelingen in 3D-printtechnologieën en materialen kunnen onderzoekers geluidsabsorberende metamaterialen ontwerpen met innovatieve eigenschappen.

2.3.2 Spuitgieten (injection moulding)

Spuitgieten is een essentieel proces in de massaproductie van kunststofonderdelen en producten vanwege de eenvoud en efficiëntie van het proces. Hierbij wordt een polymeer, vaak in de vorm van korrels, in een matrijs geïnjecteerd om nauwkeurige vormen te produceren. In plaats van volledig te smelten, worden thermoplastische materialen in een viskeuze toestand gebracht, zodat ze nauwkeurig in de matrijs kunnen worden gedrukt.

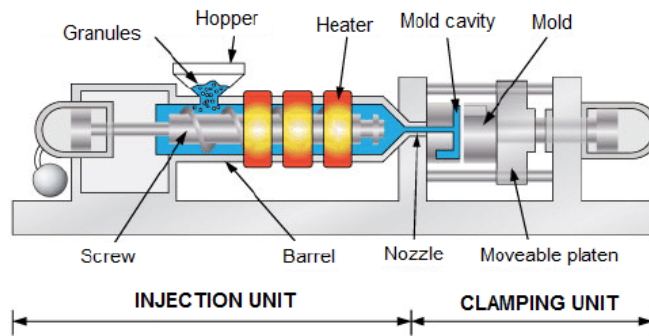
Spuitgieten, een essentieel proces in de massaproductie van kunststofonderdelen en producten. De reden hierachter ligt bij de eenvoud van het proces. Het is een methode waarbij gesmolten kunststof in een matrijs wordt geïnjecteerd om nauwkeurige vormen te produceren. Dit proces, bekend om zijn efficiëntie en precisie, is hierbij dus een geschikt proces voor diverse sectoren, waaronder de auto- en medische industrie.

Opbouw van spuitgietmachine

De spuitgietmachine bestaat uit twee hoofdcomponenten: de injectie-eenheid en de klem-eenheid, zoals geïllustreerd in Figuur 2.12.

De injectie-eenheid bevat een trechter waarin kunststofkorrels worden toegevoerd. Deze korrels worden door een schroefplunjer naar een verwarmd gedeelte gevoerd, waar ze smelten. Kunststoffen die in dit proces gebruikt worden, zijn typisch amorf, waardoor ze van een vaste naar een viskeuze, vloeibare staat overgaan. Zodra de vereiste hoeveelheid gesmolten kunststof en de benodigde druk zijn bereikt, injecteert de schroef het materiaal in de matrijs. Na de injectie wordt de kunststof nagedrukt om krimp tijdens het koelen te compenseren en kristallisatie te bevorderen.

De klem-eenheid omvat de matrijs, die uit beweegbare en stationaire delen bestaat. Hoge krachten worden toegepast om de matrijs gesloten te houden tijdens het injectieproces, wat nodig is om de krachten die door de geïnjecteerde kunststof worden uitgeoefend te compenseren [23], [24].



Figuur 2.12: Schematische voorstelling spuitgietmachine [24]

Toepassing van spuitgieten bij de productie van LRMs

Het spuitgieten proces biedt aantrekkelijke mogelijkheden voor het produceren van resonatoren. Ten eerste staat spuitgieten bekend om zijn efficiëntie en hoge doorvoersnelheid, wat resulteert in kortere productietijden en lagere kosten indien er grote aantallen worden gemaakt. Dit aspect maakt het bijzonder geschikt voor massaproductie. Een ander voordeel is de veelzijdigheid van spuitgieten in ontwerpopties. Het proces maakt het mogelijk om complexe geometrieën en structuren te realiseren, waardoor een breed scala aan resonatoren met verschillende vormen en eigenschappen kan worden geproduceerd om aan specifieke prestatie-eisen te voldoen. Hierdoor kunnen op maat gemaakte resonatoren worden gemaakt die optimaal zijn afgestemd op de beoogde toepassingen van LRMs. Ook zijn er tal van software's beschikbaar op de markt zoals Moldex3D die het mogelijk maken om de off-design prestaties te verminderen door rekening te houden met de effecten van het spuitgietproces [3].

Hoofdstuk 3

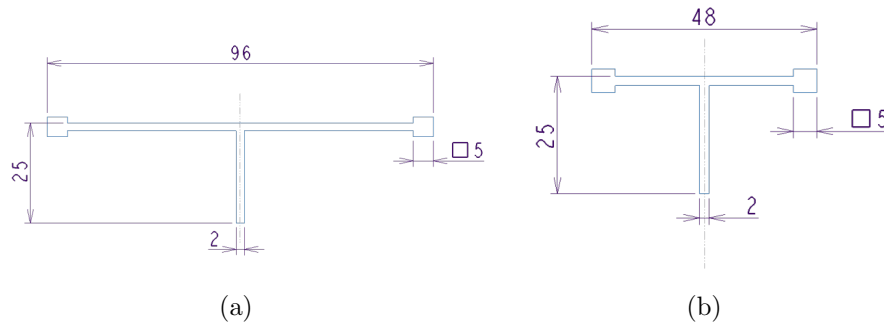
Ontwerp van modulaire resonatoren

3.1 Inleiding

In de voorgaande literatuurstudie zijn mogelijke verbindingen besproken die relevant zijn voor deze thesis. Het hoofddoel van dit onderzoek was het ontwikkelen van een verbinding op een resonator die geschikt is voor zowel een metalen plaat als een kunststof plaat. In samenspraak met de promotor zijn drie verbindingstypes gekozen voor verdere ontwikkeling: een magneetverbinding, een moerverbinding en een snapfit-verbinding. Dit hoofdstuk richt zich op de ontwikkeling van zowel het resonatordeel als het verbindingsgedeelte voor het realiseren van een modulaire resonator. De ontwikkelde resonatoren worden dynamisch gesimuleerd met Siemens NX om inzicht te krijgen in hun dynamica. Voor de productie wordt gebruikgemaakt van 3D-printen. In het volgende hoofdstuk zullen de modulaire resonatoren experimenteel worden getest om hun resonantiefrequenties en lineair gedrag te valideren.

3.2 Design van het resonatorgedeelte

In samenspraak met de promotor zijn uiteindelijk drie ontwerpen geselecteerd voor onderzoek: een magneetverbinding, een moerverbinding en een snapfit-verbinding. Voor elk ontwerp worden zowel een laagfrequente als een hoogfrequente resonator ontwikkeld. Dit maakt het mogelijk om de prestaties en eigenschappen van de ontwerpen te vergelijken en te evalueren over verschillende frequenties. Voor het ontwerp van de resonator is gekozen voor een *cantliver beam* resonator. Hieronder geeft figuur 3.1 de ruwe afmetingen weer voor zowel de laagfrequente als de hoogfrequente resonator. De dikte ervan bedraagt 5 mm. De streefresonantiefrequentie voor het ontwerp van de laagfrequente versie lag tussen 100-200 Hz, terwijl voor de hoogfrequente versies een bereik van 500-600 Hz werd nagestreefd. Om te bepalen of het ontwerp aan deze eisen voldeed, werden simulaties uitgevoerd met behulp van Siemens NX. Hierbij werden geleidelijk aan de afmetingen van de *cantliver beam* verhoogd totdat resonantie binnen het gewenste bereik werd vastgesteld.



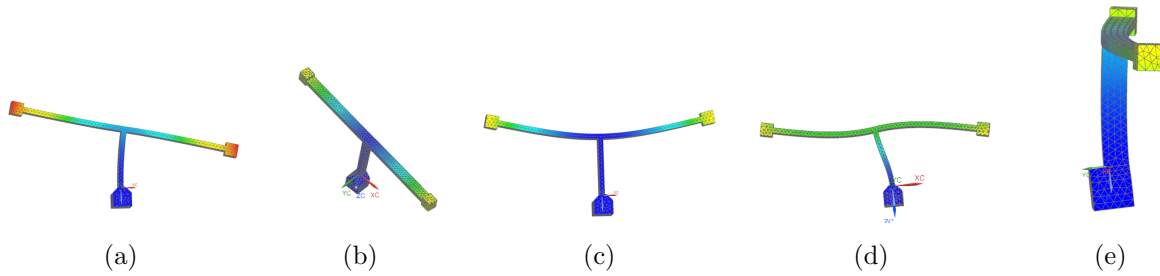
Figuur 3.1: Afmetingen: a) laagfrequente resonator, b) hoogfrequente resonator

3.2.1 Simulatie resultaten

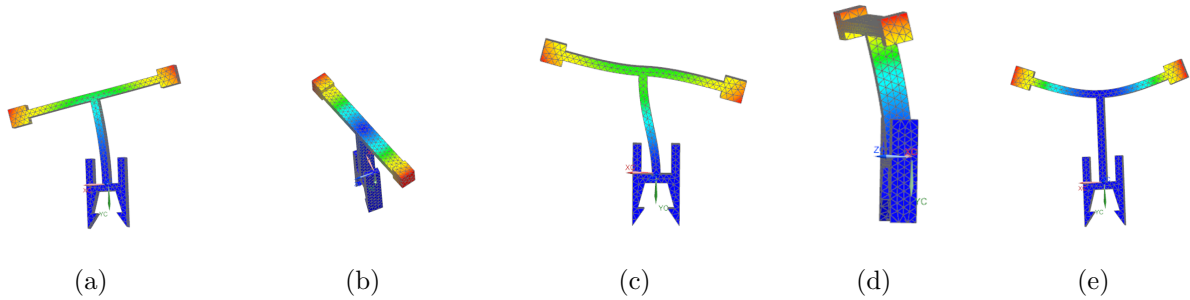
De resultaten van deze simulaties, evenals het gehanteerde simulatie model en de instellingen, worden nu verder in detail bekeken. Als eerste wordt in Siemens NX een modale analyse uitgevoerd met behulp van Solution 103 Real Eigenvalues. Ook wordt er een extra oplossing opgevraagd om de modale effectieve massa te berekenen. Solution 103 biedt een gedetailleerd overzicht van elke mogelijke modi in het ontwerp. Elke modi heeft een eigenfrequentie, die de frequentie aangeeft waarop de structuur natuurlijk oscilleert wanneer deze wordt verstoord of geëxciteerd. Het verschil tussen de modi ligt in de modale verplaatsing of vorm, evenals de bijbehorende frequentie. Bovendien toont de *modal effective mass* hoeveel massa van de structuur actief is in elke modi. Dit helpt te bepalen hoeveel massa van de structuur bijdraagt aan de dynamische respons in de verschillende richtingen (x, y, z). De simulatieresultaten van de resonantiefrequenties worden vervolgens ook vergeleken met de verkregen experimentele waarden.

Zowel voor het hoogfrequent als laagfrequent design wordt een simulatie uitgevoerd. Eerst wordt een mesh gecreëerd met 3D-tetraëder-elementen met tien knooppunten. Vervolgens worden randvoorwaarden toegepast waarbij wordt vastgelegd dat het onderoppervlak van de verbinding in geen enkele richting kan bewegen. Voor de snap-fit is dit lichtjes anders; hierbij worden de binnenste vlakken die aangrijpen op het bijbehorende opzetstuk beschouwd als het onderoppervlak. Vervolgens wordt het materiaal ABS toegewezen. Na het uitvoeren van de simulaties is vastgesteld welke soort vervorming optreedt in de resonator. Deze vervormingen waren enerzijds hetzelfde voor de hoogfrequente en anderzijds voor de laagfrequente designs ongeacht het soort verbinding dat aan het resonerend deel bevestigd is. Dit komt mede door de randvoorwaarde die is aangelegd. Figuur 3.2 geeft de verschillende vervormingspatronen weer voor laagfrequente designs. Figuur 3.3 geeft de verschillende vervormingspatronen weer voor hoogfrequente designs. Deze kunnen onderverdeeld worden in de volgende soorten trillingsmodi:

- Buigmodi: Bij buigmodi buigt of vervormt de structuur, meestal langs een bepaalde richting of as.
- Torsiemodi: Torsiemodi doen zich voor wanneer de structuur draait of torsieert rond een as.
- Axiale modi: Axiale modi treden op wanneer de structuur uitzet en samentrekt langs zijn lengteas.
- Knikmodi: Knikmodi ontstaan wanneer de structuur instabiel wordt en begint te knikken.
- Gemengde modi: Gemengde modi zijn een combinatie van buig-, torsie- en axiale trillingen.



Figuur 3.2: Modes voor laagfrequent design: a) buigmodi mode 1, b) torsiemodi mode 2, c) axiale mode 3, d) knikmodi mode 4, e) gemengde mode 5



Figuur 3.3: Modes voor hoogfrequent design: a) buigmodi mode 1, b) torsiemodi mode 2, c) knikmodi mode 3, d) gemengde mode 4, e) axiale mode 5

Als laatste geeft onderstaande tabel 3.1 de resultaten weer van de bijhorende frequentie bij elke mode. Na het uitvoeren van de convergentie is vastgesteld dat zowel de laagfrequente als de hoogfrequente designs dezelfde frequenties voor elke mode bekomen. Dit is logisch gezien de opgelegde randvoorwaarden, aangezien telkens het resonant gedeelte hetzelfde is.

Tabel 3.1: Frequenties per modi voor hoogfrequente en laagfrequente resonatoren

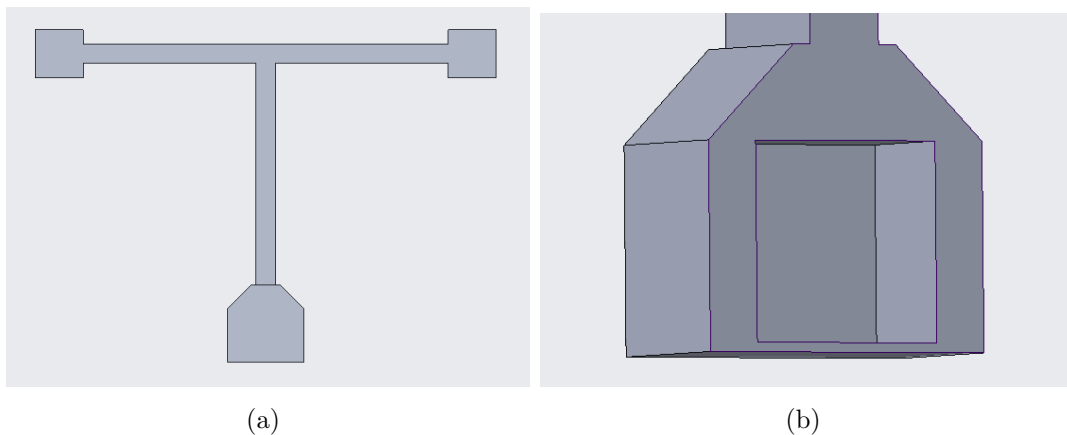
Modes	Laagfrequente resonator (Hz)	Hoogfrequente resonator (Hz)
Mode 1	66.56	148.81
Mode 2	82.38	211.34
Mode 3	154.7	478.78
Mode 4	257.74	480.72
Mode 5	286.43	558.74

3.3 Design van de resonatorverbinding

Na de ontwikkeling van het resonant gedeelte wordt vervolgens het verbindingsgedeelte uitgewerkt. Zoals eerder vermeld, zijn er voor dit onderdeel drie concepten gekozen. In deze sectie wordt er uitgebreid besproken hoe elk van deze concepten is ontwikkeld.

3.3.1 Magneetverbinding

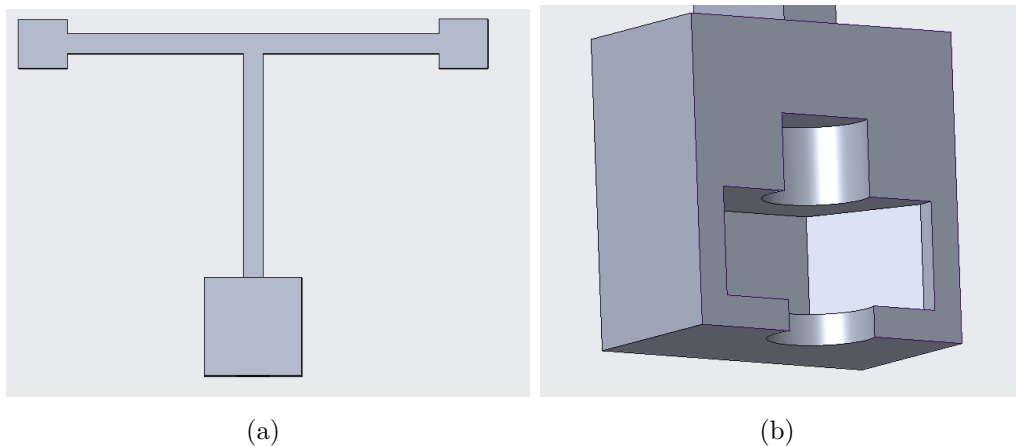
Voor het realiseren van de magneetverbinding, die geschikt is voor gebruik met magnetische metalen platen, is aan de basis van de resonator een kubusvormige structuur toegevoegd. In deze kubus is een holte gemaakt waarin de magneet kan worden geplaatst. Dit is mogelijk door gebruik te maken van de *pause at height* functie die beschikbaar is op de meeste printers. Met deze functie kan de printer op een bepaalde hoogte worden gestopt, waarna de magneet wordt ingebracht voordat het printen wordt hervat. Er zijn twee varianten van de magneetverbinding geprint: een hoogfrequente en een laagfrequente. Binnen de hoogfrequente variant is een subcategorie gemaakt op basis van de dikte van de onderste laag van de resonator. Hierbij zijn resonatoren vervaardigd met een laagdikte van zowel 0.2 mm als 0.5 mm aan de onderkant van de resonator. Dit is gedaan om te onderzoeken of de aantrekkingskracht van de magneet invloed heeft op de dynamica van de resonator. In figuur 3.4 worden de 3D-ontwerpen van de magneetresonator weergegeven.



Figuur 3.4: a) Magneetverbinding, b) magneetverbinding detail insert plaats

3.3.2 Moerverbinding

Voor de ontwikkeling van de moerverbinding, die zowel geschikt is voor gebruik met kunststof- als metalen platen, is een soortgelijke methode toegepast als bij de magneetverbinding. Dit proces maakt gebruik van de *pause at height*-functie beschikbaar op de meeste 3D-printers. Tijdens het printproces wordt de print tijdelijk onderbroken om de moer te positioneren, waarna de print voortgezet wordt om de moer volledig te omhullen met het printmateriaal. Deze techniek zorgt voor een sterke en betrouwbare verbinding. Er zijn twee sets geprint, elk met drie resonatoren: een met een hoge frequentie en een met een lage frequentie. De resulterende ontwerpen worden weergegeven in figuur 3.5.



Figuur 3.5: a) Moerverbinding, b) moerverbinding detail insert plaats

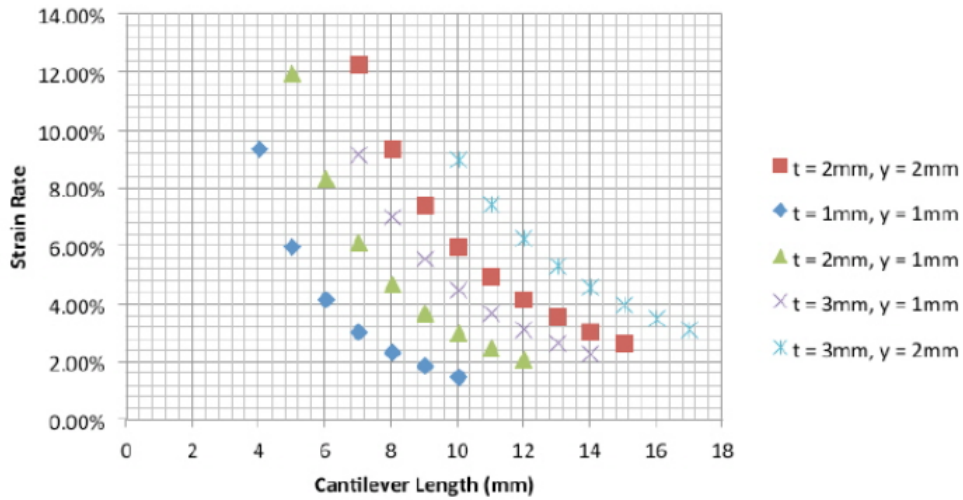
3.3.3 Snap-fit verbinding

Bij de ontwikkeling van de snap-fit verbinding voor een kunststofplaat is gekozen voor het cantilever snap-fit model, dat bekend staat om zijn eenvoudige fabricage en betrouwbare montage. Voor het ontwerp van deze verbinding zijn de gangbare industriële cantilever snap-fit design-regels toegepast, die vaak geformuleerd zijn in formules en grafieken. Dit vergemakkelijkt de berekeningen, aangezien de snap-fit vergelijkbaar is met een balk [25].

Een van de belangrijkste uitdagingen bij het ontwerpen was het bepalen van de juiste stress- en strainniveaus bij de wortel van de cantilever om spanningsconcentraties te minimaliseren en mogelijke breukpunten te voorkomen. Volgens literatuurbronnen wordt aanbevolen om waar mogelijk hoeken af te ronden om de kans op breuk te minimaliseren. Verder is rekening gehouden met de hoek ten opzichte van de verticale as; deze is lichtjes schuin opgesteld om een afneembare snap-fit mogelijk te maken. Er is ook een hefboomeffect toegevoegd om de cantilever buigzaam te maken en zo de afleesbaarheid te vergemakkelijken [25].

Daarnaast is er rekening gehouden met de materiaalkeuze; in dit geval zijn de resonatoren vervaardigd met ABS, dat een acceptabele strain rate waarde heeft tussen 20-40%. Deze waarde zal sterk afhangen van de manier waarop de *cantilever* geprint wordt. Onderstaande figuur 3.6 geeft de verhouding van de strain rate in functie van de lengte van de cantilever weer, voor verschillende doorsneden. Hierbij is waar te nemen dat, indien de doorsnede kleiner wordt, er een veel kleinere strain rate waarneembaar is. Hieruit kan gesteld worden dat indien er niet voldaan wordt aan de benodigde strain waarde, de doorsnede vergroot kan worden om een acceptabele strain waarde te behalen.

Strain vs Cantilever Length for Rectangular Cross Sections



Figuur 3.6: Verhouding van de strain rate in functie van de lengte van de cantilever voor verschillende doorsnedes.

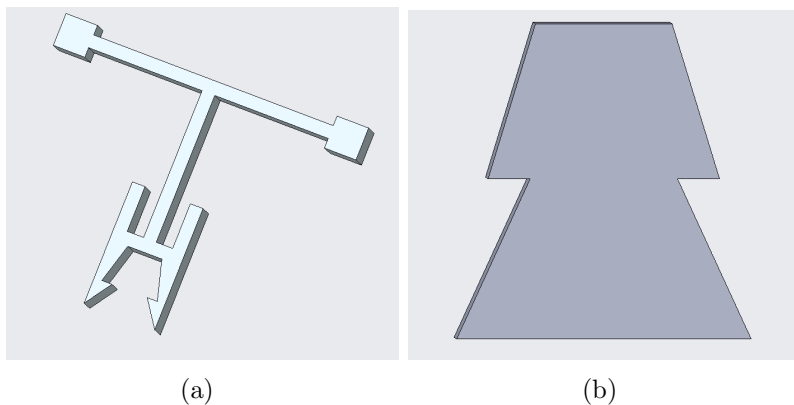
De strain waarde kan als volgt worden berekend (formule 3.1):

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (3.1)$$

Hierbij is E de elasticiteitsmodulus in [MPa] en σ de stress in [MPa]. De strain ϵ kan ook gedefinieerd worden als (formule 3.2):

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3.2)$$

Hierbij is ΔL de verandering in lengte en L_0 de oorspronkelijke lengte. Aangezien er nu aan de onderkant meer dikte is voorzien, zal daar ook de mogelijkheid tot aangelegde kracht hoger kunnen zijn, alsook de totale vervorming kan hoger zijn [25]. Voor de strain acceptabel te houden is uitgegaan van deze bevindingen en iteratief de doorsnede verhoogd en gekeken wanneer er na het losklikken en vastklikken nergens scheurvorming optreedt. Onderstaande figuur 3.7 geeft het uiteindelijke ontwerp weer van de *cantilever* snap-fit.



Figuur 3.7: a) Snap-fit mannelijk deel, b) snap-fit vrouwelijk deel

3.4 Productie van de modulaire resonatoren

Alle drie de ontwerpen die zijn geselecteerd, zijn gemodelleerd in Creo en vervolgens vervaardigd met behulp van Fused Deposition Modeling (FDM). Dit proces vereiste een grondige benadering om te bepalen hoe de resonatoren het beste konden worden geprint om consistente resultaten te verkrijgen die representatief zouden zijn voor de testen die later zouden worden uitgevoerd op de geprinte stukken.

Als eerste stap werden de benodigde instellingen vastgesteld, waaronder de printsnelheid, spuitmondtemperatuur en ventilatorsnelheid, om een optimale printkwaliteit te bereiken. Dit werd bereikt door middel van een zorgvuldige kalibratieprocedure, waarbij een 'kalibratietoren' werd geprint. Deze toren bood de mogelijkheid om de optimale instellingen te bepalen voor het specifieke printmateriaal en de printerconfiguratie die werd gebruikt. Het belang van deze kalibratieprocedure kan niet worden overschat, aangezien het nalaten hiervan kan leiden tot imperfecties in de prints, wat resulteert in geometrisch incorrecte ontwerpen. De verkregen instellingen voor de print zijn samengevat in tabel 3.2.

Tabel 3.2: Printinstellingen

Instelparameter	Instelwaarde
Opvulling	100 procent
Opvullingspatroon	zigzag
Bedtemperatuur	90 graden
Ventilatorsnelheid	100 procent
Spuitgietmond temperatuur	220°C
Printprofiel	Engineering fine 0.1mm Printkop: AA0.2

Hoofdstuk 4

Experimentele validatie modulaire resonatoren

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk ondergaan de ontwikkelde modulaire resonatoren een dynamische karakterisatie. Hierbij wordt onderzocht of het gedrag van de resonatoren consistent is en lineair is. Ook wordt de ligging van de resonantiefrequenties nauwkeurig bekeken. Eerst wordt de meetopstelling uitgelegd, waarna de resultaten worden besproken. Verder wordt ook een vergelijking gemaakt met de waarden verkregen uit de simulaties die in het vorige hoofdstuk zijn besproken.

4.2 Meetopstelling

Figuur 4.1 geeft de meetopstelling weer die gebruikt wordt om de resonatoren bekomen door 3D-printen dynamisch te karakteriseren.



(a) 1. laservibrometer, 2. SCADAS met laptop, 3. shaker

(b) weergave plaatsing impedantiekop op 3.

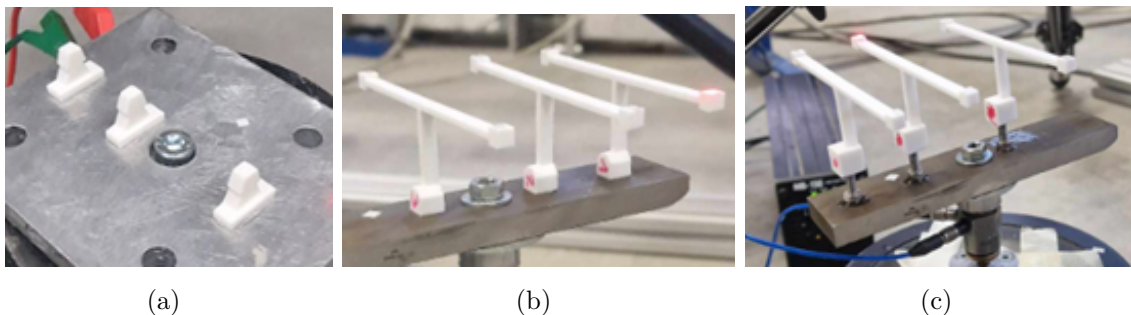
Figuur 4.1: Meetopstelling voor dynamische karakterisatie van modulaire resonatoren.

Allereerst wordt een Polytec PSV 500 laservibrometer gebruikt voor het meten van de snelheid waarmee het uiteinde van de resonator beweegt. Deze vibrometer wordt nauwkeurig gepositioneerd met behulp van een driepoot, zodat deze loodrecht op de resonator staat. De excitatiebron in de proefopstelling is een elektromagnetische shaker die dient om trillingen op te wekken in de resonatoren. Daarnaast is er een impedantiekop (figuur 4.1b) bevestigd aan de shaker die de kracht meet. Het aansturen van de shaker gebeurt via een signaal dat op twee manieren kan worden versterkt: direct via de draaiknop op de versterker of door het aanpassen van het voltage via de software. Voor deze tests is gekozen om de versterking via de software aan te passen naar respectievelijk 1-2-3 volt voor een nauwkeuriger resultaat, terwijl de versterkingsfactor op de versterker zelf op een standaardwaarde is ingesteld.

Vervolgens worden de resultaten verkregen uit de vibrometer, samen met de metingen van de impedantiekop, door de Scadas (Supervisory Control and Data Acquisition System) samengevoegd en naar de computer gestuurd voor verdere analyse. Hier wordt de FRF (frequentieresponsiefunctie) opgesteld, die het verband tussen de output (snelheid) en input (kracht) weergeeft over het gemeten frequentiebereik. De belangrijkste instellingen die zijn gehanteerd in de software zijn onder andere een resolutie van 312.5 mHz en een white noise-golfvorm.

Proefopstelling

Voor elk van de concepten is een aangepaste proefopstelling gehanteerd, figuur 4.2 geeft deze weer. Voor het snap-fit concept, afgebeeld in figuur 4.2a, is het vrouwelijke deel vastgelijmd op een metalen plaat, die vervolgens met een moer aan de impedantiekop is bevestigd. Voor het magnetische verbindingconcept, afgebeeld in figuur 4.2b, is een stalen plaat aan de impedantiekop bevestigd, zodat de magnetische resonatoren eenvoudig kunnen worden geplaatst. Ten slotte, in figuur 4.2c, wordt het schroefverbinding-concept weergegeven, waarbij de moeren vastgelijmd worden op de stalen plaat waar vervolgens de resonatoren op komen te staan.



Figuur 4.2: Opstellingen: a) snap-fit, b) magneet, c) moer

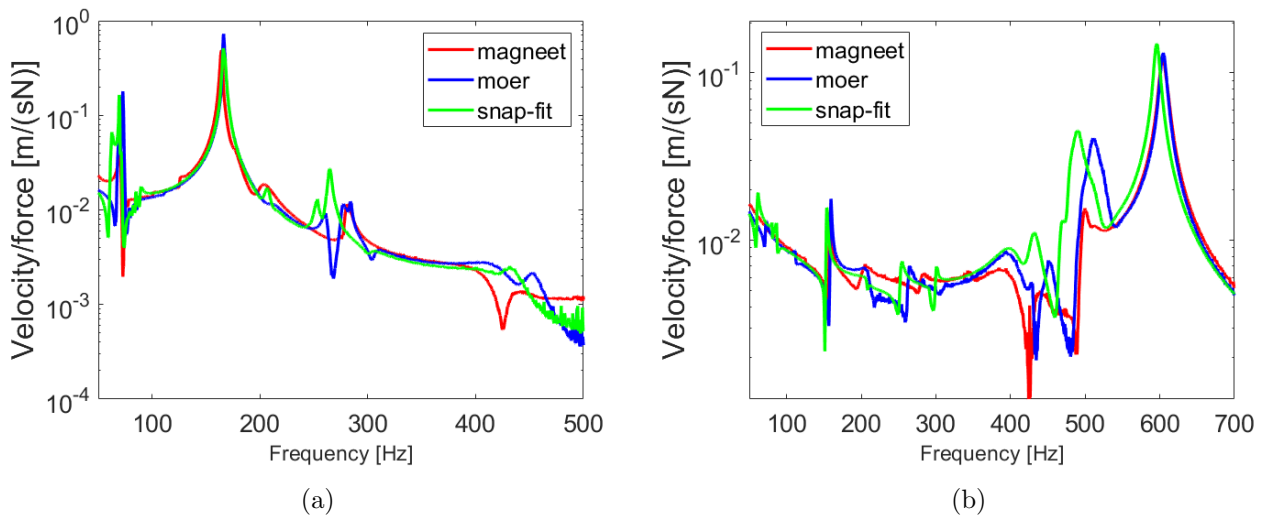
4.3 Meetresultaten

Voor elk verbindingstype zijn er twee sets van drie resonatoren vervaardigd, een voor hoge frequenties en een voor lage frequenties. Daarnaast is voor de magnetische resonator een extra set geproduceerd met een dünnere laagdikte aan de onderzijde om de invloed van magnetische aantrekking te onderzoeken.

De testprocedure omvat het uitvoeren van drie metingen per set resonatoren, waarbij spanningsniveaus van 1, 2 en 3 volt toegepast worden op de shaker. De beoordeling van de resultaten zal gebeuren op basis van de verkregen FRF's, waarbij specifiek wordt gekeken naar verschuivingen van de resonantiepieken per type design alsook de optredende modi. Om de lineariteit te toetsen, wordt er gekeken of de verkregen FRF's onder verschillende spanningsniveaus van 1, 2 en 3 volt op elkaar liggen. Indien dit het geval is, is de verhouding van de versnelling van de uiteinden van de resonatoren op de aangelegde kracht hetzelfde, wat duidt op lineariteit.

4.3.1 Analyse van resonantiefrequenties per ontwerp

Als eerste wordt er gekeken naar welke modes er per ontwerp geëxciteerd worden. Figuur 4.3a toont de FRF van de laagfrequente ontwerpen, terwijl figuur 4.3b de FRF van de hoogfrequente ontwerpen weergeeft.



Figuur 4.3: FRF per resonator ontwerp: a) laagfrequent, b) hoogfrequent

Er is waarneembaar dat voor de laagfrequente resonatoren bij elke verbinding vier modes optreden. Duidelijk zichtbaar is de mode rond 165 Hz, die de hoogste resonantiepiek vertoont. Dit kan geïdentificeerd worden als mode 3 voor het laagfrequente ontwerp, zoals eerder gesimuleerd in paragraaf 3.2.1. Deze mode is ook degene die doelbewust geëxciteerd wordt in de proefopstelling. De afwijking ten opzichte van de gesimuleerde waarde is ongeveer 16 Hz.

Bij de hoogfrequente ontwerpen zijn grotere verschillen in de verlopen waarneembaar. De mode rond 510 Hz komt bij de magneetverbinding nauwelijks tot stand, terwijl deze bij de snap-fit en moer duidelijk een piek vertoont. Deze kan worden gelinkt aan mode 4. Tevens is voor alle drie de ontwerpen een mode rond 600 Hz duidelijk waarneembaar. Er kan gesteld worden dat deze mode de gezochte mode is die doelbewust geëxciteerd wordt, hierbij wordt mode 5

toegewezen aan de waarde rond 600 Hz. Deze heeft een afwijking van 42 Hz ten opzichte van de gesimuleerde waarde. Alle verkregen FRF's toonden een consistent verloop aan van optredende modes, met eventuele lichte fluctuaties in de duidelijkheid waarmee ze zich uiten. Verder wordt alleen gefocust op de zuiver op-en-neergaande mode die ook doelbewust is geëxciteerd.

4.3.2 Invloed van het soort verbinding op de resonantiefrequentie

Om te bepalen welke invloed de verbinding heeft op de resonantiefrequentie, wordt er eerst gekeken naar de variaties in de resonantiepieken binnen elke set vervaardigde resonatoren. Onderstaande tabel 4.1 en tabel 4.2 tonen de spreiding van de laagst en hoogst waargenomen resonantiefrequentie (W_n) voor elke set resonatoren. Daarnaast wordt er onderzocht of de resonatoren binnen een set dezelfde massa bezitten (tabel 4.3). De spreiding in massa wordt berekend als het verschil tussen de maximale en minimale massa gedeeld door de gemiddelde massa, uitgedrukt in procenten.

Tabel 4.1: Experimentele resonantiefrequenties en variatie voor laagfrequente resonatoren

Soort verbinding	Laagste W_n [Hz]	Hoogste W_n [Hz]	Spreiding [Hz]
Magneet 0,5	164,05	165,88	1,83
Moer	164,99	166,43	1,44
Snap-fit	163,16	167,32	4,16

Tabel 4.2: Experimentele resonantiefrequenties en variatie voor laagfrequente resonatoren

Soort verbindin	Laagste W_n [Hz]	Hoogste W_n [Hz]	Spreiding [Hz]
Magneet 0,5	596,47	600,39	3,92
Magneet 0,2	599,3	608,43	9,13
Moer	597,64	604,88	7,24
Snap-fit	592,12	596,11	3,99

Tabel 4.3: Spreiding in massa per ontwerp en configuratie

Configuratie	Massa's [g]	Gemiddelde massa [g]	Spreiding (Max - Min) [g]	Spreiding %
Magnet Hoog 0.2	2.218, 2.209, 2.195	2.207	0.023	1.04%
Magnet Laag	2.789, 2.71, 2.697	2.732	0.092	3.37%
Magnet Hoog 0.5	2.188, 2.209, 2.176	2.191	0.033	1.51%
Moer Hoog	2.371, 2.43, 2.443	2.415	0.072	2.98%
Moer Laag	2.921, 2.966, 2.81	2.899	0.156	5.38%
Snap-fit Hoog	1.379, 1.378, 1.358	1.372	0.021	1.53%
Snap-fit Laag	1.929, 1.935, 1.916	1.927	0.019	0.99%

Uit de gegevens in tabel 4.1 en tabel 4.2 kan geconcludeerd worden dat de hoogfrequente designs over het algemeen een grotere spreiding vertonen, met uitzondering van de snap-fit verbindingen.

Verder is waarneembaar dat de magneetverbinding met een lagere onderlaagdikte, wat resulteert in een sterkere magnetische kracht, over het algemeen hogere resonantiefrequenties vertoont. Echter, deze vertoont ook de grootste spreiding, namelijk 9,13 Hz. Er kan gesteld worden dat de sterkte van de magneetverbinding zeker invloed heeft op de ligging van de resonantiefrequentie. De spreiding is ook toe te schrijven aan verschillen in de massa van de resonatoren, wat een gevolg is van fabricagevariaties door middel van FDM. Echter, er is geen duidelijk verband zichtbaar dat de ontwerpen met de grootste spreiding in massa ook de grootste spreiding in resonantie vertonen (tabel 4.3). De oorzaak achter de lichte spreiding is daarom aan meerdere factoren toe te schrijven. Onder andere de afwijkingen die gepaard gaan met de fabricage met FDM, gezien het resonant deel lichtjes kan kromtrekken of krimpen, wat deze lichte afwijkingen veroorzaakt. Ook de nauwkeurigheid van het printen van de verbinding speelt een rol, met name de onderlaagdikte van de magneet en de lichte afwijkende toleranties op de snapfit.

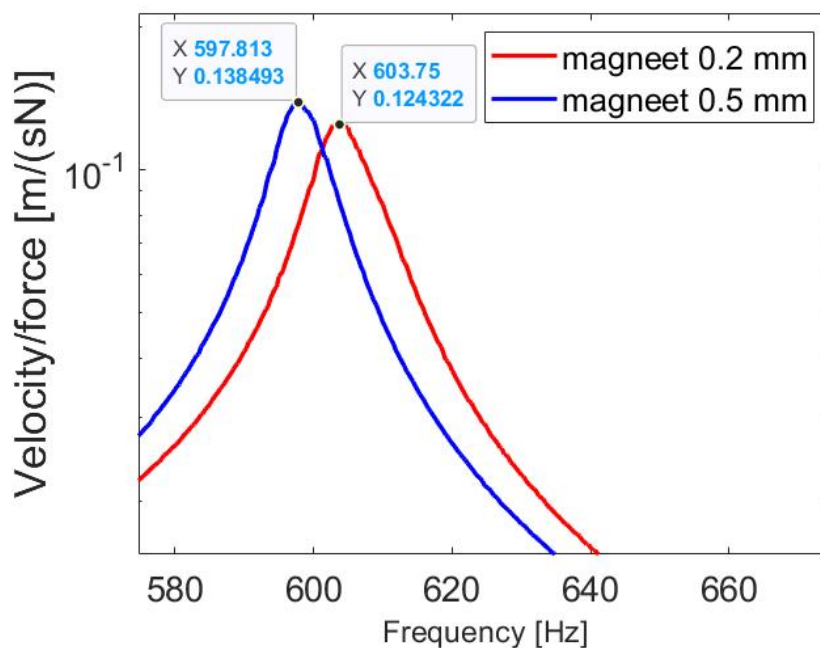
Gezien elke set van resonatoren een gelijkaardig verloop in de FRF toont en slechts een lichte spreiding vertoont in W_n , is besloten voor de visualisaties van de FRF's de gegevens te nemen van de centraal geplaatste resonator, tenzij anders vermeld.

4.3.3 Invloed van magneetverbinding op resonantiefrequentie

Uit tabel 4.1 en tabel 4.2 is al gebleken dat de kracht van de magnetische verbinding invloed heeft op de ligging van de resonantiefrequentie. Zoals in de literatuur besproken, kan een resonator vergeleken worden met een massa-veer systeem. Formule 4.1 geeft weer hoe de natuurlijke eigenpulsatie wordt berekend voor een massa-veersysteem.

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

Hierbij zijn de belangrijkste factoren de stijfheid van de veer en de massa van het systeem. Na het wegen van alle magnetische resonatoren wordt er een frequentieresponsfunctie (FRF) geplott voor een magneetresonator met een onderlaagdikte van 0,2 mm en een met een onderlaagdikte van 0,5 mm, die dezelfde massa hebben. Figuur 4.4 toont deze FRF.

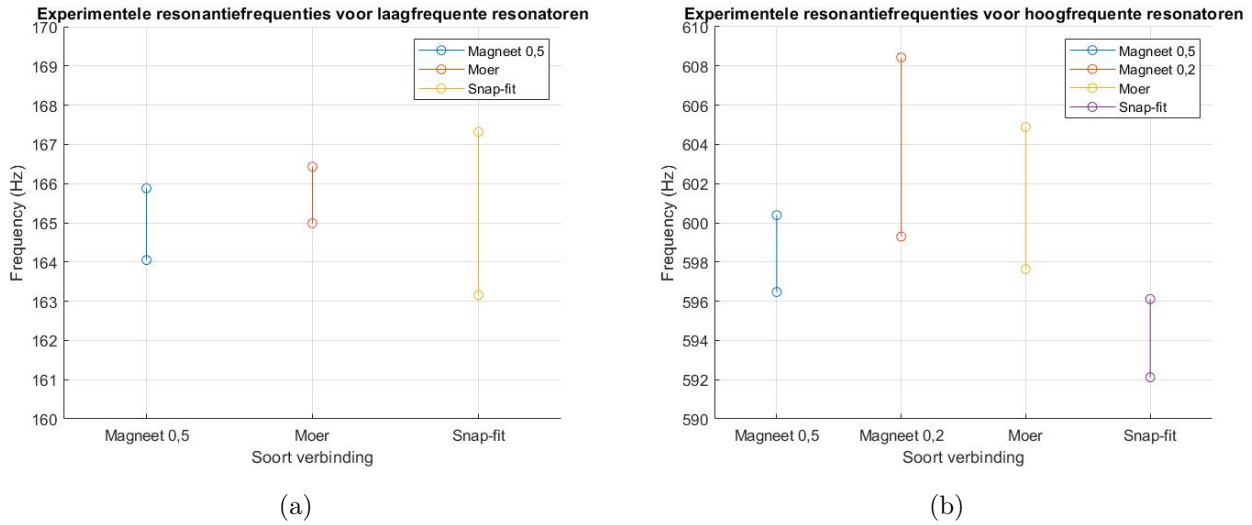


Figuur 4.4: FRF van magneetresonator bij variërende onderlaagdikte

Uit figuur 4.4 is duidelijk te zien dat vermindering van de onderlaagdikte leidt tot een hogere resonantiefrequentie. Door formule 4.1 te beschouwen, kan gesteld worden dat: uitgaande van het ideale geval van een massa-veer systeem, deze resonantieverschuiving door de verhoogde stijfheid van de verbinding komt.

4.3.4 Vergelijking tussen alle verbindingen

Uit tabel 4.1 en tabel 4.2 zijn twee grafieken opgesteld. Op de x-as wordt de soort verbinding weergegeven, terwijl op de y-as de bijhorende frequentiewaarde van W_{nmax} en W_{nmin} word weergegeven. Hiermee wordt ook de spreiding visueel zichtbaar.

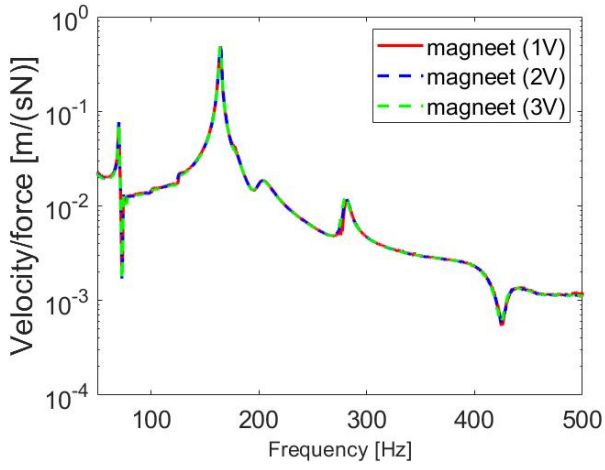


Figuur 4.5: Visuele weergave van de spreiding en ligging van W_{nmax} en W_{nmin} per design

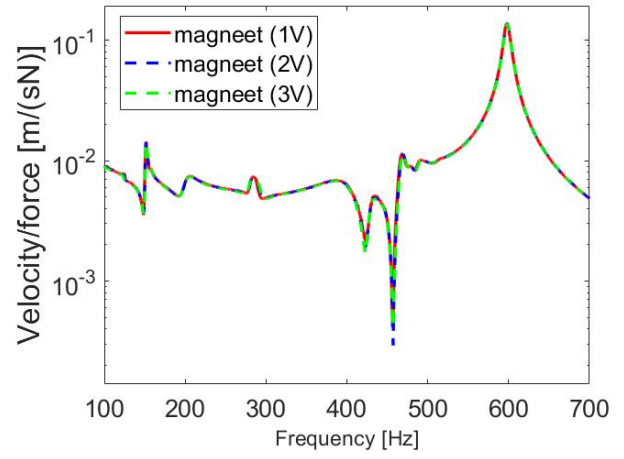
Er kan duidelijk gesteld worden dat het soort verbinding bijdraagt aan de dynamische respons. De magnetische verbindingen, vooral die met een lagere onderlaagdikte (0,2 mm), tonen een significante verhoging in de hoogste resonantiefrequenties (tot 608,43 Hz) vergeleken met die met een dikte van 0,5 mm (tot 600,39 Hz). De spreiding in de resonantiefrequenties voor de magneet met 0,2 mm onderlaagdikte is opmerkelijk hoog (9,13 Hz). Dit kan wijzen op de optredende variaties tijdens het 3D-printen, wat de magnetische interactie met de metalen plaat beïnvloedt en aldus invloed heeft op de stijfheid. De moerverbinding vertoont een minder extreme spreiding (tot 7,24 Hz) voor de hoogfrequente versie en ook een hoogste resonantiewaarde van 604,88 Hz. Dit wijst op een vergelijkbare stijfheid als de magnetische verbinding, geldend voor zowel de laag- als hoogfrequente versies. De snap-fit verbindingen vertonen de grootste spreiding in de laagfrequente ontwerpen (tot 4,16 Hz) en ook aanzienlijk lagere resonantiewaarden voor zowel de laag- als hoogfrequente versies. Dit kan liggen aan het feit dat dit een minder star verbindingstype is door de aanwezige speling die een snap-fit met zich meebrengt. De spreiding daarentegen geeft aan dat indien er variaties plaatsvinden die invloed hebben op de flexibiliteit en stijfheid van de snap-fit deze minder voorspelbaar wordt.

4.3.5 Analyse van lineair gedrag per ontwerp

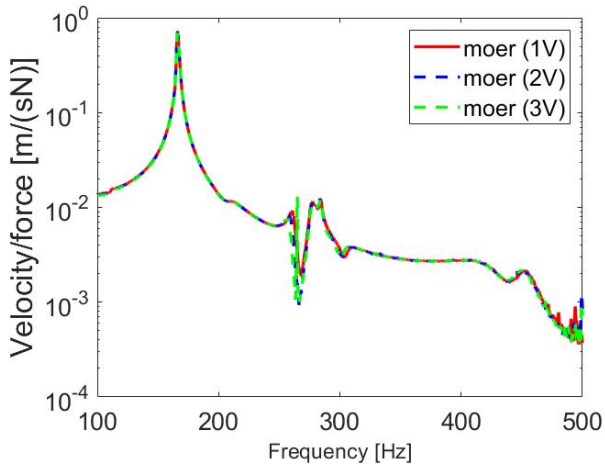
In deze sectie wordt de lineariteit per ontwerp onderzocht. Om over lineariteit te kunnen spreken, dient de FRF bij verschillende aangelegde voltages aan de shaker hetzelfde verloop te tonen. Bovendien mag er geen verschuiving van de resonantiepiek optreden, omdat een dergelijke verschuiving duidt op een onvoorspelbare verbinding onder verschillende spanningscondities. Zoals eerder aangehaald, is op de y-as van de FRF de verhouding van de versnelling tot de aangelegde kracht geplotted. Deze verhouding zou constant moeten zijn om te kunnen spreken van een lineaire respons. Figuur 4.6 toont achtereenvolgens de FRF's met variërende spanningsniveaus voor zowel de hoogfrequente als de laagfrequente versie van elk verbindingstype.



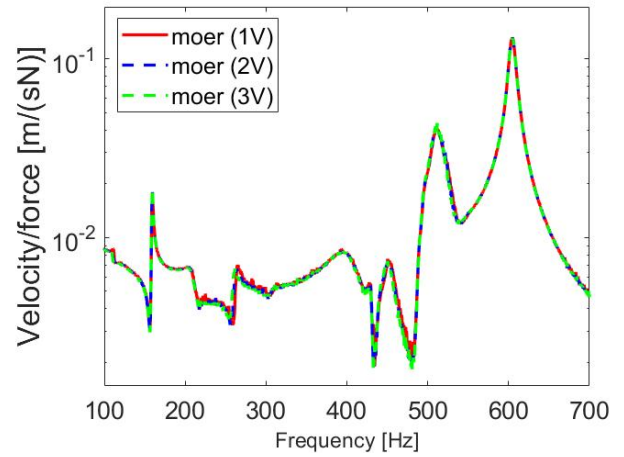
(a)



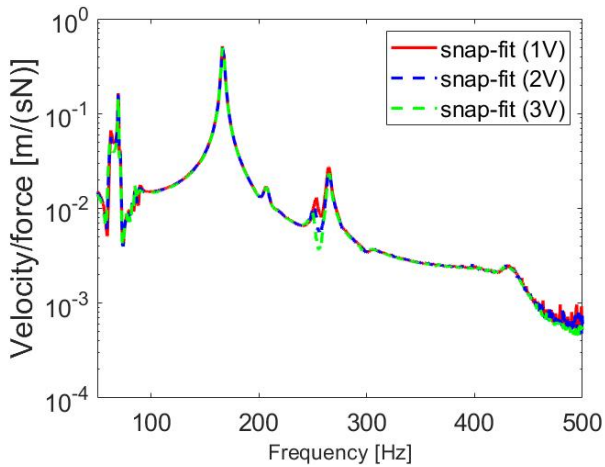
(b)



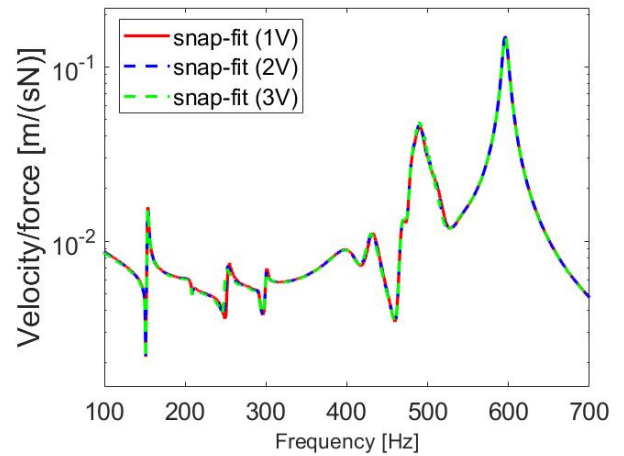
(c)



(d)



(e)



(f)

Figuur 4.6: FRF's onder variërende spanningsniveaus voor respectievelijk laagfrequente en hoogfrequente reeksen per design: a,b) magneetverbinding, c,d) moerverbinding, e,f) snap-fit verbinding

Indien specifiek gekeken wordt naar de op-en-neer gaande mode voor zowel de hoogfrequente als laagfrequente designs, kan uit Figuur 4.6 geconcludeerd worden dat er bij geen enkel ontwerp sprake is van een verschuiving van de resonantiepiek, noch van een verhoging van de amplitude bij variërende inputvoltages. Dit duidt op een lineair gedrag van de modulaire resonatoren. Bij nadere analyse van de volledige respons blijkt dat, naarmate de verbinding als minder stijf wordt beschouwd, er een licht afwijkend verloop waarneembaar is in de andere geëxciteerde modes, zowel qua amplitude als frequentie. Deze minimale fluctuaties kunnen grotendeels toegeschreven worden aan het 3D-printproces of aan de aard van de verbinding. Aangezien de laag-op-laag afzetting anisotropische eigenschappen veroorzaakt en aangezien deze modes een complexere modevorming vertonen, kan dit de oorzaak zijn van deze fluctuaties.

Samengevat kan geconcludeerd worden dat de modulaire resonatoren lineair gedrag vertonen op resonatorniveau.

Hoofdstuk 5

Metamateriaal realisatie

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de realisatie van metamateriaalplaten besproken. Het vorige hoofdstuk toonde aan dat modulaire resonatoren effectief bleken te zijn op resonatorniveau. Om echter daadwerkelijk metamateriaal te creëren, moeten deze resonatoren op een hoststructuur worden aangebracht. De nadruk in dit hoofdstuk ligt op het ontwerp van de LRM-platen en de validatie ervan op metaniveau.

5.2 Design en realisatie LRM-platen

Voor de realisatie van een metamateriaalplaat zijn hoofdzakelijk twee componenten nodig: een hoststructuur en resonatoren. Resonatoren worden toegevoegd aan de hoststructuur, wat resulteert in een lokaal resonant metamateriaal. Dit leidt tot de onderdrukking van trillingen binnen de structuur door de aanwezige resonatoren. Zoals besproken in het literatuuronderzoek, leidt deze configuratie tot het ontstaan van zogenaamde stopbanden, waarbinnen trillingsonderdrukking plaatsvindt door de interactie tussen de resonatoren.

Om effectieve trillingsonderdrukking te realiseren, moeten de resonatoren op een subgolflengteschaal worden geplaatst; bij grotere afstanden tussen de resonatoren vindt er nauwelijks tot geen onderdrukking plaats. Het doel van deze thesis was het ontwerpen van twee modulaire resonatoren: een voor plaatsing op een metalen structuur en een voor een kunststofstructuur. Om te garanderen dat de resonatoren effectief op subgolflengte staan, wordt gebruikgemaakt van de Bragg-interferentielimietfrequentie voor buiggolven in een equivalent oneindig periodieke plaat. De berekening van de Bragg-frequentie wordt weergegeven in de onderstaande formule 5.1 [10].

$$f\left(\frac{\lambda}{2}\right) = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{t^2 E}{12(1-\nu^2)\rho}} \quad (5.1)$$

Hierbij staat L voor de lengte van de *unit cell* in meters, welke de afstand tussen de resonatoren weergeeft. De dikte van de plaat wordt aangegeven met t , E geeft de elasticiteitsmodulus, ν de Poisson's ratio, en ρ de dichtheid van de plaat. Door formule 5.1 toe te passen wordt de $f\left(\frac{\lambda}{2}\right)$ (Bragg frequentie) bekomen. Deze geeft de maximale frequentie waarbij gegarandeerd een

stopband waarneembaar is. Aangezien hogere frequenties gepaard gaan met kortere golflengtes, die een volledige golflengte kunnen afleggen binnen de afstand L , zullen de aanwezige resonator geen effectieve onderdrukking van de golf kunnen realiseren bij frequenties hoger dan deze Bragg-frequentie. Dit is een belangrijk aspect dat in acht moet worden genomen bij het ontwerpen van de resonatoren en de plaatsing ervan. Deze moeten namelijk een resonantiefrequentie vertonen die lager is dan de Bragg frequentie.

Voor het daadwerkelijke ontwerp van de LRM-plaat wordt eerst berekend wat de Bragg-frequentie zal zijn voor drie afmetingen van de unit cell (UC), namelijk 4 cm x 4 cm, 5 cm x 5 cm en 6 cm x 6 cm. Hierbij is gekozen voor een PMMA-plaat en een stalen plaat. Onderstaande tabel 5.2 geeft voor elke plaat de materiaaleigenschappen weer, en tabel 5.2 geeft de berekende Bragg-frequenties voor de drie verschillende UC-afmetingen.

Tabel 5.1: Materiaaleigenschappen van gebruikte stalen en PMMA plaat

Eigenschap/Materiaal	Stalen plaat	PMMA-plaat
Plaat afmetingen (mm)	360 x 300 x 1	600 x 300 x 2
Dikte t (m)	0.001	0.002
Poisson's ratio ν	0.3	0.375
Dichtheid ρ (kg/m ³)	7850	1180
Elasticiteitsmodulus E (Pa)	2.1×10^{11}	2.9×10^9

Tabel 5.2: Bragg-frequenties voor verschillende UC-groottes in een stalen plaat en PMMA-plaat

UC-grootte	Bragg frequentie staal [Hz.]	bragg frequentie PMMA [Hz.]
4 cm x 4 cm	1536.61	958.53
5 cm x 5 cm	983.43	613.46
6 cm x 6 cm	682.94	426.01

Uit Tabel 5.2 blijkt dat de Bragg-frequentie toeneemt naarmate de UC-lengte afneemt. Er is gekozen om met een UC van 6 cm te werken, wat resulteert in een waarde van 426.01 Hz voor de PMMA-plaat en 682.94 Hz voor de stalen plaat. Op de PMMA-plaat zullen 50 UC's aanwezig zijn en 30 UC's op de stalen plaat.

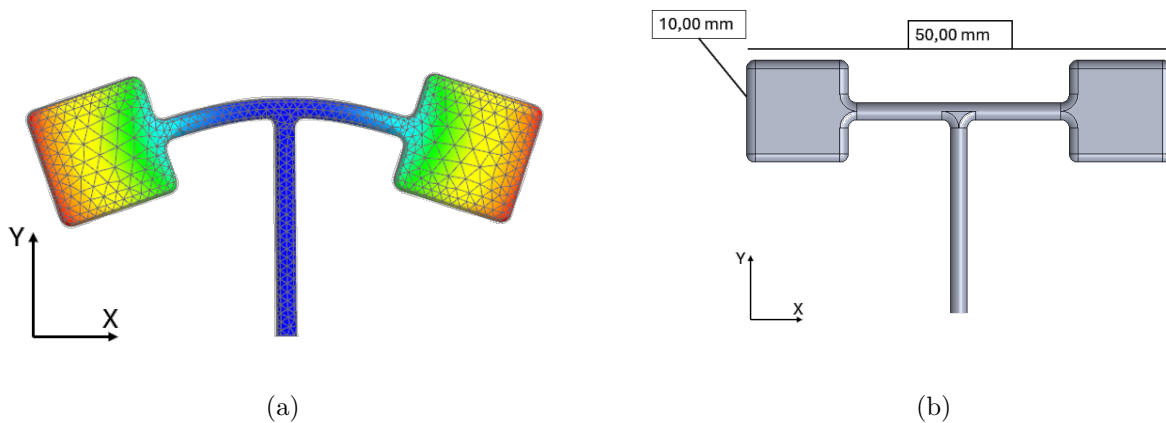
In de volgende sectie wordt besproken welke verbindingen zijn gekozen voor elke plaat en hoe de ontwikkeling van de resonator heeft plaatsgevonden.

5.2.1 Ontwikkeling modulaire resonatoren voor de LRM-platen

In dit deel worden twee modulaire resonatoren ontwikkeld die aan specifieke voorwaarden moeten voldoen, hieronder opgesomd:

- De grootte van de resonator mag maximaal 5 cm breed zijn om in de UC te passen.
- De resonator vertoont een resonantiefrequentie van ongeveer 300 Hz.
- Het totale aandeel aan massa van resonatoren op de plaat moet minimaal 10% bedragen.

Om aan deze voorwaarden te voldoen, werd gebruikgemaakt van dezelfde methodologie als besproken in Hoofdstuk 3.2. De simulaties werden uitgevoerd met Siemens NX, waarbij ook rekening werd gehouden met het verhogen van de 'model effective mass' (MEM) in de y-richting. MEM verwijst hier naar de hoeveelheid van de totale massa van de resonator die bijdraagt aan die specifieke trillingsmode. Specifiek wordt gekeken naar de buigmode die loodrecht op de structuur optreedt; Figuur 5.1b illustreert dit. De afmetingen van het resonatorgedeelte staan weergegeven in Figuur 5.1b.



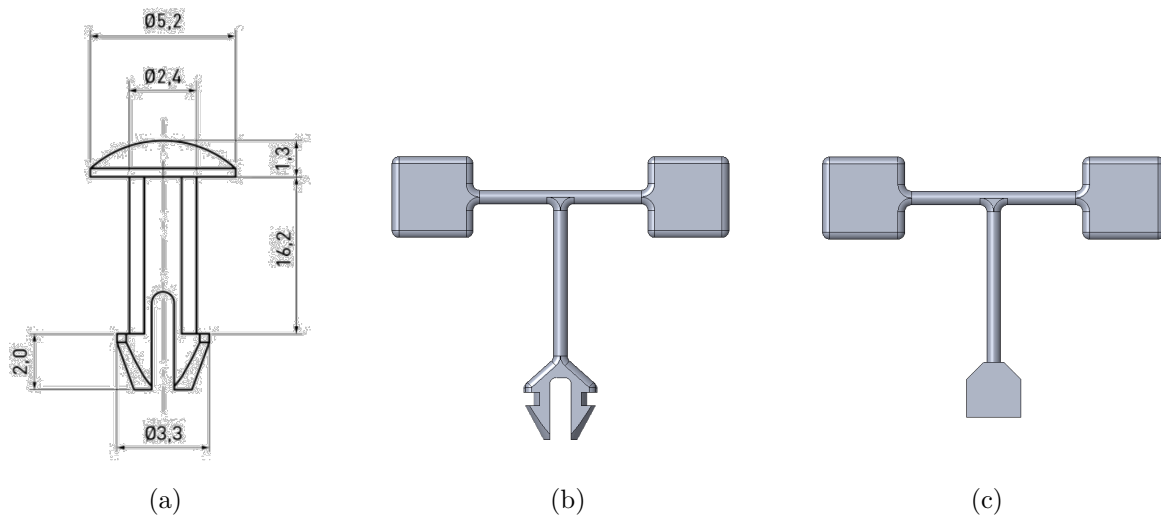
Figuur 5.1: a) Gesimuleerde vorm van de buigmode, b) vorm en afmetingen van het resonatorgedeelte

De gesimuleerde resonantiefrequentie voor de buigmode bedroeg 288.25 Hz. De MEM voor deze mode in de y-richting was 1.37 gram.

Ontwikkeling van de verbinding

Voor de verbinding werd gekozen voor een snapfit-verbinding voor de PMMA-plaat en een magneetverbinding voor de stalen plaat. Het concept van de magneetverbinding werd overgenomen uit paragraaf 3.2.1, terwijl het snapfit-concept werd aangepast. Er werd gekozen voor een snap-fit die ingrijpt in een gat van 8 mm. Omdat dergelijke snapfits al bestaan en ook wel *Snap lock pins* worden genoemd, werd een bestaande snapfit van de markt gebruikt als voorbeeld voor het ontwerpen van de verbinding [26]. Figuur 5.2a toont de bijbehorende technische tekening van de *Snap lock pin* [26]. De afmetingen van de technische tekening werden aangepast en vervolgens is iteratief te werk gegaan; de snap verbinding werd telkens opnieuw geprint en getest, aangezien het ontwerp lichtjes moest worden aangepast om in een plaatdikte van 2 mm te passen. De verbinding werd als geslaagd beschouwd wanneer de resonator zich nauwelijks vrij kon bewegen.

Onderstaande figuur 5.2b toont de ontwikkelde modulaire resonatoren met de snap-fit verbinding, en figuur 5.2c toont de magneetresonator.



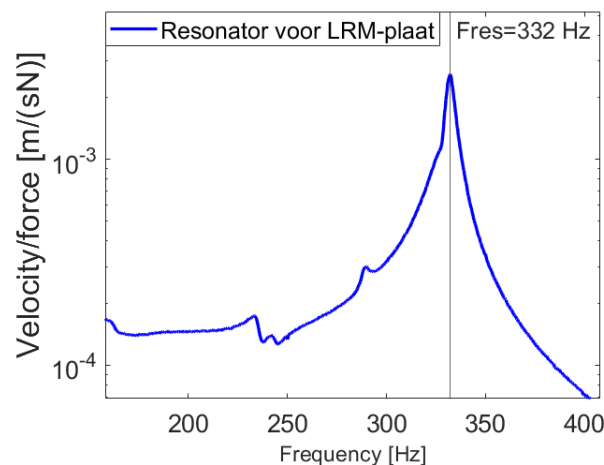
Figuur 5.2: a) Technische tekening van de *snap lock pin* [26], b) snap-fit voor PMMA-plaat, c) magneetresonator voor de stalen plaat

Productie modulaire resonatoren

De modulaire resonatoren zijn vervaardigd met behulp van FDM. Dit proces is uitgebreid beschreven in Sectie 3.4 van de thesis. Voor dit deel van de thesis werd echter een andere printer gebruikt, namelijk de Bambu Lab X1 Carbon. De printinstellingen waren ook licht gewijzigd, met name werd een laagdikte van 0.08 mm gehanteerd en een volledige opvulling toegepast.

Dynamische validatie modulaire resonatoren

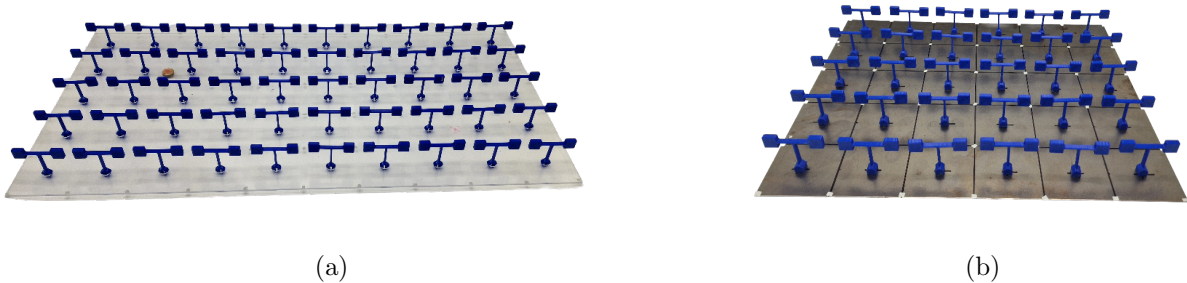
Met behulp van de eerder besproken meetopstelling in paragraaf 4.2 werd ook deze resonator getest op zijn resonantiefrequentie. Deze experimentele verkregen resonantiefrequentie van de buigmode bedroeg 332 Hz. figuur 5.3 geeft de verkregen FRF weer.



Figuur 5.3: FRF van ontwikkelde resonator voor op de LRM-platen

5.2.2 Opbouw van de PMMA en stalen LRM-plaat

De opbouw van de platen omvatte verschillende stappen, waarbij technieken zoals lasercutten voor de PMMA-plaat werd toegepast om nauwkeurig 50 gaten met diameter 8 mm op de plaat te verkrijgen. Alsook een markering tot waar de UC loopt. Voor de stalen plaat werden de UC's afgetekend met behulp van een lat en stift. De opgebouwde platen met resonatoren aan worden getoond in figuur 5.4.



Figuur 5.4: a) PMMA LRM-plaat, b) stalen LRM-plaat

Vervolgens wordt een vergelijkende tabel opgesteld (tabel 5.3), die het procentuele aandeel aan resonatormassa en aandeel aan modale massa illustreert per plaattype. Deze waarden worden berekend ten opzichte van de totale massa van de plaat inclusief de resonatoren.

Tabel 5.3: Vergelijking van resonatorbijdragen per type plaat

Plaattype	Aantal resonatoren	Aandeel resonator-massa (%)	Aandeel modale massa (%)
PMMA	50	19.59%	12.97%
Staal	30	10.11%	4.36%

Uit Tabel 5.3 en figuur 5.3 blijkt dat aan de vooraf opgestelde ontwerpdoelstellingen is voldaan (sectie 5.2.1). Hierbij is het totale aandeel aan massa van resonatoren op de plaat minimaal 10% en de opgemeten resonantiefrequentie bedraagt 332 Hz.

5.3 Experimentele validatie van de LRM-platen

Deze sectie beschrijft hoe de dynamische karakterisatie van de ontwikkelde LRM-platen is uitgevoerd en wat de resultaten waren van deze tests. Het primaire doel is om te onderzoeken of er daadwerkelijk een stopband optreedt binnen de structuur van de platen als gevolg van de geïntegreerde modulaire resonatoren. Bovendien wordt ook geanalyseerd of de stopband en de platen een lineair gedrag vertonen.

Eerst wordt de gebruikte meetopstelling gedetailleerd beschreven. Vervolgens worden de resultaten van de experimentele tests besproken.

5.3.1 Meetopstelling

De onderstaande figuur 5.5 toont de meetopstelling die gebruikt is voor de dynamische karakterisatie van de LRM-platen.



Figuur 5.5: Meetopstelling: 1. Laservibrometer, 2. Tafel, 3. Shaker, 4. Versterker, 5. SCADAS met laptop

Voor de meetopstelling wordt de Polytec PSV-500 laservibrometer horizontaal geplaatst op een driepoot. Dit stelt ons in staat om bij elke hoekpunt van de UC op de plaat de versnelling te meten. De LRM-plaat wordt opgehangen met behulp van twee touwtjes die elk aan een elastiek bevestigd zijn die vervolgens aan een steunpoot hangt. Dit garandeert dat de platen vrije randvoorwaarden ervaren, wat essentieel is voor deze metingen.

De shaker wordt geplaatst op een tafel met een aanzienlijke massa. Deze kan als een rigide structuur beschouwd worden en zal de metingen van de LRM-platen niet beïnvloeden. Aan de shaker wordt een impedantiekop bevestigd die de kracht opmeet. Om de trillingen van de shaker

naar de plaat over te brengen, is deze verbonden met een metalen staaf. Op de LRM-platen wordt een bijpassend opzetstuk gelijmd waarin de staaf wordt geschoven en bevestigd. De hoogte van de LRM-plaat is zo ingesteld dat de staaf horizontaal staat en de plaat vrij kan trillen. Het signaal voor het aansturen van de shaker wordt doorgegeven via een versterker die op factor één is ingesteld. De verhoging van de versterking gebeurt in de software zelf. De resultaten uit de vibrometer en impedantiekop, alsook de aangelegde versterking aan de shaker, worden verwerkt door het SCADAS (Supervisory Control and Data Acquisition System). Deze gegevens worden vervolgens naar de computer gestuurd voor verdere verwerking en visualisatie.

Meetprocedure

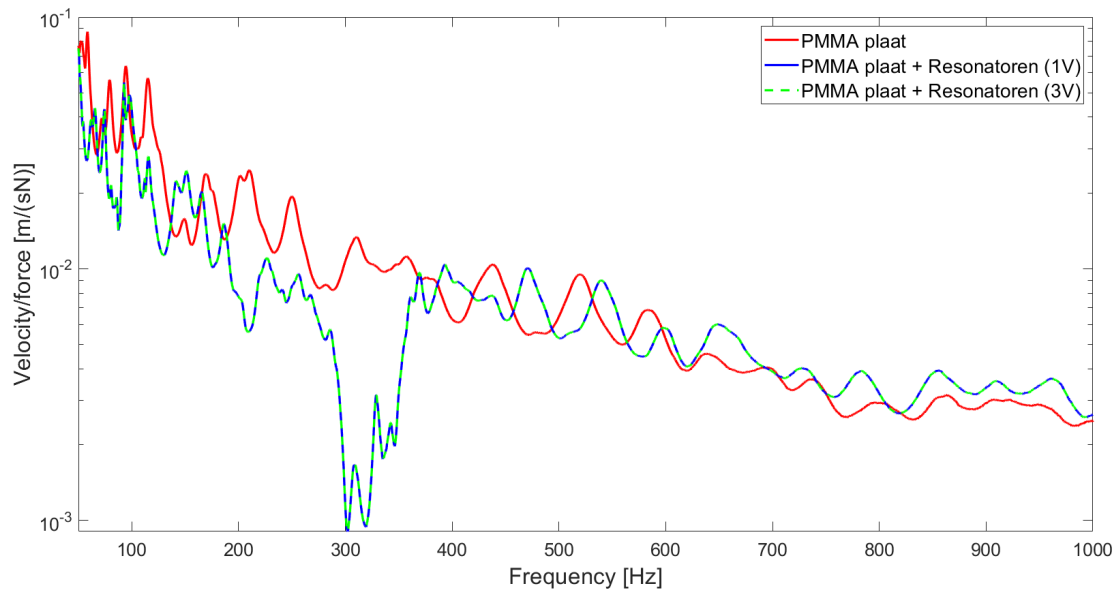
De platen worden zoals eerder besproken opgehangen met behulp van twee touwtjes die elk aan een elastiek zijn bevestigd, wat resulteert in een vrije ophanging. Vervolgens wordt op elk hoekpunt van iedere UC een meting uitgevoerd, zowel voor de lege plaat als voor een plaat met resonatoren. Bij de opstelling met resonatoren wordt ook een extra meting uitgevoerd met een verhoogde excitatie door de shaker om het lineaire gedrag te toetsen.

De verkregen FRF's van ieder meetpunt worden vervolgens in de software Simcenter Testlab 17 verwerkt. Hierbij worden alle FRF's van elk meetpunt per meting opgeteld en een gemiddelde waarde genomen. Hierdoor verkrijgt men een samengestelde FRF die het gedrag van de gehele plaat vertegenwoordigt. Voor verdere analyse wordt deze samengestelde FRF gebruikt in plaats van de FRF's van de afzonderlijke meetpunten.

De volgende sectie behandelt de resultaten die verkregen zijn tijdens de metingen voor iedere plaat.

5.3.2 Resultaten kunststoffen LRM-plaat

Onderstaande figuur 5.6 geeft de samengestelde FRF's weer voor de PMMA-plaat. De rode curve geeft de FRF voor de lege PMMA-plaat. De blauwe curve toont de FRF voor de PMMA-plaat met resonatoren bij een excitatie van 1V, en de groene curve bij een excitatie van 3V.



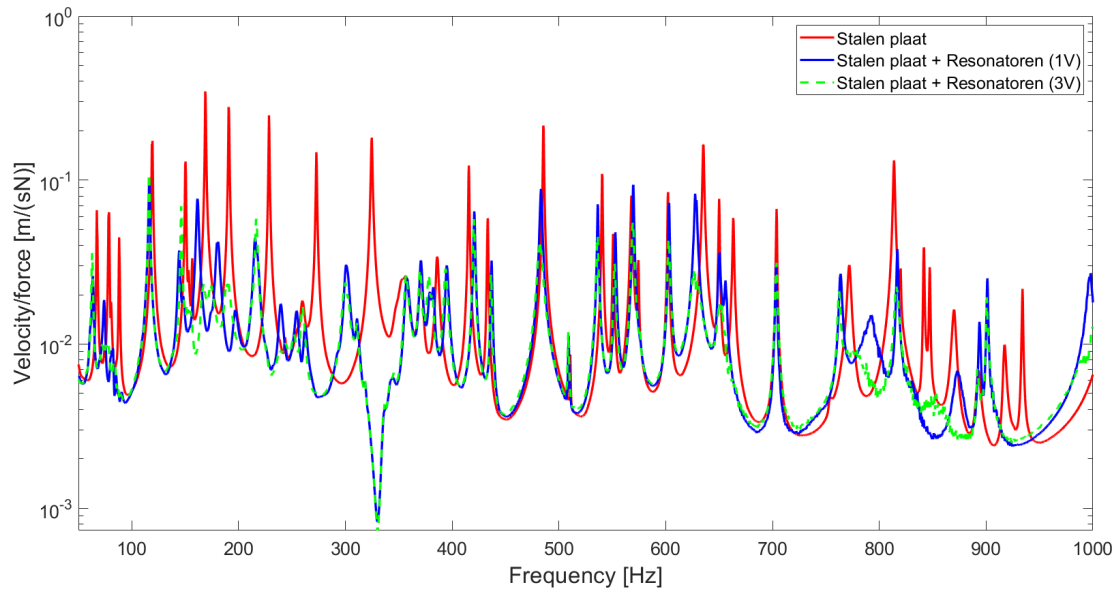
Figuur 5.6: FRF van de PMMA LRM-plaat

Uit figuur 5.6 is waarneembaar dat het verloop van de rode curve, die de lege PMMA-plaat vertegenwoordigt, een relatief vlakke respons heeft met minder steile pieken. Dit duidt erop dat de PMMA-plaat van nature al een dempend effect bezit. Door het toevoegen van de resonatoren (blauwe en groene curve) is waarneembaar dat er een zone is met sterke amplitudevermindering van ongeveer 257 Hz tot 369 Hz. Dit vertegenwoordigt de stopband.

Bij verhoging van de excitatie naar 3 V (groene curve) blijft de respons van de PMMA-plaat hetzelfde, wat duidt op lineariteit. Dit betekent dat de dempingseigenschappen van de PMMA-plaat met resonatoren aan consistent blijven bij verschillende excitatieamplitudes, wat aangeeft dat de snap-fit verbindingen van de resonatoren stevig en betrouwbaar zijn.

5.3.3 Resultaten stalen LRM-plaat

Onderstaande figuur 5.7 geeft de samengestelde FRF weer voor de stalen plaat. De rode curve vertegenwoordigt de FRF voor de lege stalen plaat. De blauwe curve toont de FRF voor de opstelling met resonatoren bij een excitatie van 1 V, en de groene curve bij een excitatie van 3 V.



Figuur 5.7: FRF van de stalen LRM-plaat

Uit figuur 5.7 is waarneembaar dat de rode curve veel steile pieken vertoont die de resonanties vertegenwoordigen. Deze zijn zeer spits en duiden op weinig tot geen dempend effect door de plaat zelf. De plaat met magneetresonatoren vertoont een stopband van ongeveer 300 Hz tot 357 Hz.

Indien gekeken wordt naar het verschil bij een excitatie van 1 V en 3 V, kan worden geconcludeerd dat er non-lineariteiten optreden in het gebied van 750-900 Hz. Deze kunnen worden verklaard door de loskomende verbinding bij deze hoge frequenties. In de stopband zelf is er geen merkbaar verschil tussen een excitatie bij 1 V en 3 V; in dit gebied gedraagt de plaat met resonatoren zich volkomen lineair.

5.3.4 Conclusie

Om een globale conclusie te maken worden alle geobserveerde en berekende waarden samengevat in Tabel 5.4. Deze tabel biedt de eigenschappen en resultaten van de PMMA- en stalen platen, waarmee we de effectiviteit van de resonatoren op een hoststructuur kunnen beoordelen. Tevens wordt de amplitude waarde herrekend naar dB met formule 5.2.

$$\text{Amplitude (dB)} = 20 \times \log_{10}(\text{Amplitude}) \quad (5.2)$$

Tabel 5.4: Eigenschappen en resultaten per type plaat

	PMMA	Staal
Resonatormassa (%)	19.59%	10.11%
Modale massa (%)	12.97%	4.36%
Start stopband (Hz)	257	300
Einde stopband (Hz)	369	357
Breedte van Stopband (Hz)	112	57
Amplitude waarde begin stopband (dB)	-39.5	-32.9
Amplitude waarde einde stopband (dB)	-60.6	-62.3
Amplitude reductie absoluut (dB)	21.1	29.4

PMMA-plaat

Uit Tabel 5.4 kan worden geconcludeerd dat PMMA natuurlijke dempingseigenschappen bezit wat resulteert in een lagere startwaarde van de amplitude als een vlakker verloop van de FRF. Indien we kijken naar de lineariteit en hierbij de samengestelde FRF van 1 V en 3 V vergelijken, is een lineair verloop doorheen heel het spectrum waarneembaar, wat wijst op een zeer stijve verbinding. De ondergrens die bereikt wordt, ligt op -60.6 dB. Bovendien verschuift de stopband niet bij hogere excitatie.

Stalen plaat

De stalen plaat toont een diepere amplitude reductie van 29.4 dB, wat aantoont dat de dempende eigenschappen van de resonatoren ook bij een lager aandeel modale massa aanzienlijk kunnen zijn. Bij hogere frequenties zijn echter non-lineariteiten waargenomen bij de stalen plaat met magneetresonatoren, voornamelijk bij een aangelegde spanning van 3 V. Dit kan te wijten zijn aan het feit dat de resonatoren op deze hogere frequenties los beginnen te trillen van de plaat. Dit fenomeen werd ook tijdens de meting zelf geobserveerd, waarbij een sterk trillend geluid van de magneten op de plaat hoorbaar was. Dit benadrukt het belang van het verbindingstype. Ook bij de stalen plaat verschuift de stopband niet bij hogere excitatie, wat wijst op consistente dempingseigenschappen.

Hoofdstuk 6

Besluit en voorstel voor toekomstig onderzoek

6.1 Besluit

Deze thesis richt zich op de ontwikkeling van modulaire resonatoren voor lokaal resonante metamaterialen (LRM). Door resonatoren modulair aan een structuur te bevestigen, wordt enerzijds snelle in-situ testen mogelijk gemaakt en anderzijds het proces van implementatie in de industrie aanzienlijk vereenvoudigd en mogelijk versneld.

Vooraf zijn er drie doelstellingen opgesteld. Ten eerste dient een bevestigingsmechanisme ontwikkeld te worden dat montage op zowel metalen als kunststof structuren mogelijk maakt. Vervolgens moet de invloed op de dynamica van de resonator geanalyseerd worden wanneer gebruik wordt gemaakt van een modulaire bevestigingsmethode. Na positieve validatie op resonatorniveau vindt er een validatie op metaniveau plaats. Hiervoor worden twee LRM-platen vervaardigd om de functionaliteit en effectiviteit van de modulaire resonatoren in een volledig systeem te beoordelen.

Om deze doelstellingen te behalen, zijn drie verbindingen (magneetverbinding, moerverbinding en snap-fit verbinding) geïntegreerd in twee resonatorconcepten, namelijk een laagfrequente ($W_n = 155$ Hz) en een hoogfrequente variant ($W_n = 558$ Hz). Hierbij kunnen de magneet- en moerverbindingen functioneren als bevestiging voor metalen structuren, terwijl de snap-fit en moerverbinding geschikt zijn voor bevestiging op kunststof structuren. Deze modulaire resonatoren zijn vervolgens vervaardigd met 3D-printen en ondergingen een experimentele dynamische analyse om de ligging van de resonantiefrequenties na te gaan, evenals het lineair gedrag.

De belangrijkste bevindingen uit de experimentele dynamische analyse waren als volgt:

- Hoe stijver de verbinding zich gedraagt, hoe hoger de W_n .
- De spreiding van W_n is hoger bij hoogfrequente designs in vergelijking met laagfrequente designs.
- Alle verbindingstypes vertoonden een lineair gedrag bij toenemende excitatie door de shaker.

De invloed van de stijfheid werd onder meer gevalideerd door de onderlaagdikte van de mag-

neetverbinding te variëren, aangezien dit resulteert in een sterkere aantrekking. Hierbij steeg de resonantiefrequentie (W_n) met 5,94 Hz. De magneet- en moerverbinding vertoonden een gelijkaardige stijfheid en de snap-fit een aanzienlijke lagere.

Bij hoogfrequente designs bleek er een aanzienlijke hogere spreiding van W_n te ontstaan. Dit kan te danken zijn aan meerdere factoren, waaronder de fabricage door FDM, alsook dat hogere frequenties gepaard gaan met kleinere verplaatsingen en hierbij de verbinding de factor is die de hogere spreiding introduceert. De moer en magneet bevinden zich namelijk als een losse insert in de resonator. Deze vertoonden ook de grootste spreiding: namelijk 9,13 Hz voor de magneet en 7,24 Hz voor de moer. Bij laagfrequente designs bedroeg de spreiding voor de magneet 1,83 Hz en voor de moer 1,44 Hz. De spreiding voor de snap-fit bedroeg bij beide designs ca. 4 Hz, wat duidt op een continue lichte aanwezigheid van een fout. Alle verbindingen vertoonden wel een lineair gedrag bij verhoging van de excitatie aan de shaker.

Om vervolgens de modulaire resonatoren in een volledig systeem te beoordelen, ondergaan twee metaplaten, namelijk een PMMA-plaat met snap-fit resonatoren en een stalen plaat met magnetische resonatoren, een experimentele dynamische analyse. Hierbij wordt gekeken of er een stopband aanwezig is en of deze zich lineair gedraagt onder verhoogde excitatie. De belangrijkste bevindingen waren als volgt:

- De PMMA-plaat vertoonde een lineair gedrag over het volledige spectrum tot 1000 Hz. Hierbij was er een stopband waarneembaar met een breedte van 112 Hz. rond de verwachte waarde van 332 Hz. Deze stopband verschoof ook niet bij hogere excitatie.
- De stalen LRM-plaat vertoonde ook een lineair gedrag zonder verschuiving van de gevormde stopband. Deze stopband had een breedte van 57 Hz. en bevond zich ook rond de verwachte waarde van 332 Hz. Wel waren er non-lineariteiten waarneembaar bij frequenties boven de 750 Hz.

Er kan gesteld worden dat integratie van modulaire resonatoren op platen effectief zorgt voor trillings- en geluidsreductie. De stopbanden waren duidelijk zichtbaar en verschoven ook niet bij verhoogde excitatie, wat duidt op een lineair gedrag. Wel moet er opgemerkt worden dat er non-lineariteiten kunnen ontstaan indien de verbinding lichtjes loskomt. Dit fenomeen was waarneembaar bij de magneetresonatoren op de stalen plaat bij frequenties boven de 750 Hz.

Alle vervaardigde verbindingen kunnen ook geproduceerd worden met behulp van spuitgieten. Dit zal niet alleen massaproductie mogelijk maken, maar ook de variaties in W_n beperken door de nauwkeurigere en consistentere fabricagemogelijkheden die spuitgieten met zich meebrengt.

6.2 Voorstel voor toekomstig onderzoek

Verder onderzoek zou zich kunnen richten op een nauwkeurigere vervaardiging van modulaire resonatoren. Hiervoor kan de spuitgiettechniek gebruikt worden. Vervolgens moeten deze getest worden met inachtneming van dezelfde stijfheid waarmee de resonator op de structuur is gemonteerd, om te zien of er nog steeds een variatie op de resonantiefrequentie (W_n) plaatsvindt.

Daarnaast zijn de verbindingen in dit onderzoek niet volledig geoptimaliseerd en slechts gangbare concepten zijn uitgewerkt om de invloed van de verbinding te testen. Toekomstig onderzoek kan zich richten op het optimaliseren van deze verbindingen naar stijfheid toe, of daadwerkelijk een verbinding voor een bepaalde *use-case* scenario uitwerken.

Er moet ook onderzocht worden wat de invloed is op de resonatoren wanneer deze na verloop van tijd aan een structuur worden toegevoegd, aangezien materiaalvermoeiing en slijtage in de verbinding door trillingen kunnen optreden. Dit kan mogelijk zorgen voor een verschuiving van de stopband.

Een ander belangrijk aspect dat nog niet is onderzocht, is wat er gebeurt bij hogere versterkingen, aangezien er tot nu toe alleen gewerkt is met maximaal 3 volt op de shaker. Ook moet onderzocht worden wat er gebeurt bij hogere frequenties. Is een modulair systeem alleen effectief bij lage frequenties, of ook bij frequenties van 1000 Hz en hoger? Aangezien deze frequenties gepaard gaan met zeer kleine verplaatsingen, kan het zijn dat hiervoor een alternatief moet worden gezocht dat werkt als een modulaire verbinding.

Literatuurlijst

- [1] C. Claeys, E. Deckers, B. Pluymers, and W. Desmet, “A lightweight vibro-acoustic metamaterial demonstrator: Numerical and experimental investigation,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 70-71, pp. 853–880, 3 2016.
- [2] L. Sangiuliano, C. Claeys, E. Deckers, J. D. Smet, B. Pluymers, and W. Desmet, “Reducing Vehicle Interior NVH by Means of Locally Resonant Metamaterial Patches on Rear Shock Towers,” *SAE Technical Paper Series*, 2019.
- [3] K. Steijvers, C. Claeys, L. V. Belle, and E. Deckers, “Incorporating manufacturing process simulations to enhance performance predictions of injection moulded metamaterials,” *Journal of Vibration Engineering and Technologies*, vol. 11, pp. 2617–2629, 9 2023.
- [4] N. G. de Melo Filho, C. Claeys, E. Deckers, and W. Desmet, “Realisation of a thermoformed vibro-acoustic metamaterial for increased stl in acoustic resonance driven environments,” *Applied Acoustics*, vol. 156, pp. 78–82, 12 2019.
- [5] R. Ghatak and A. Gorai, “Metamaterials: Engineered materials and its applications in high frequency electronics,” *Encyclopedia of Materials: Electronics*, vol. 1-3, pp. 419–440, 1 2023.
- [6] L. T. Govindaraman, A. Arjunan, A. Baroutaji, J. Robinson, and A. G. Olabi, “Metamaterials for energy harvesting,” *Encyclopedia of Smart Materials*, pp. 522–534, 1 2022.
- [7] J. Killeen, I. Davis, J. Wang, and G. J. Bennett, “Fan-noise reduction of data centre telecommunications’ server racks, with an acoustic metamaterial broadband, low-frequency sound-absorbing liner,” *Applied Acoustics*, vol. 203, 2 2023.
- [8] C. C. Claeys, B. Pluymers, P. Sas, and W. Desmet, “Design of a resonant metamaterial based acoustic enclosure,”
- [9] C. Beards, “The vibrations of systems having more than one degree of freedom,” *Engineering Vibration Analysis with Application to Control Systems*, pp. 88–140, 1 1995.
- [10] S. Janssen, L. V. Belle, N. G. R. d. M. 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, 2023.
- [11] I. Muhammad, “Virtual building acoustics: Auralization with contextual and interactive features,” *Virtual Building Acoustics: Auralization with Contextual and Interactive Features*, pp. 1–220, 12 2022.
- [12] C. C. Claeys, K. Vergote, P. Sas, and W. Desmet *Journal of Sound and Vibration*, vol. 332, pp. 1418–1436, 3 2013.

- [13] “A snap joints/general • common features • types of snap joints • comments on dimensioning b cantilever snap joints • hints for design calculations • permissible undercut • deflection force, mating force • calculation examples c torsion snap joints • deflection • deflection force d annular snap joints • permissible undercut • mating force • calculation example e both mating parts elastic f symbols,”
- [14] “A snap joints/general • common features • types of snap joints • comments on dimensioning b cantilever snap joints • hints for design calculations • permissible undercut • deflection force, mating force • calculation examples c torsion snap joints • deflection • deflection force d annular snap joints • permissible undercut • mating force • calculation example e both mating parts elastic f symbols,”
- [15] “Snap fit joints: 5 tips for fasteners design guide.”
- [16] “How electromagnets work — howstuffworks.”
- [17] “Top causes of demagnetization of permanent magnets — dura magnetics.”
- [18] J. Jung, H.-G. Kim, S. Goo, K.-J. Chang, and S. Wang, “Realisation of a locally resonant metamaterial on the automobile panel structure to reduce noise radiation,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 122, pp. 206–231, May 2019.
- [19] YOUR-NAME, “Advantages and disadvantages of bolted joints.”
- [20] J. U. Surjadi, L. Gao, H. Du, X. Li, X. Xiong, N. X. Fang, and Y. Lu, “Mechanical metamaterials and their engineering applications,” *Advanced Engineering Materials*, vol. 21, 3 2019.
- [21] L. Wu, J. Xue, X. Tian, T. Liu, and D. Li, “3d-printed metamaterials with versatile functionalities,” *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*, vol. 2, p. 100091, 9 2023.
- [22] C. Claeys, B. Pluymers, P. Sas, and W. Desmet, “Design of a resonant metamaterial based acoustic enclosure,” 2014.
- [23] R. Ye, “Anatomy of a plastic injection molding machine: Hopper, screw, clamping unit & more,” July 2022.
- [24] R. Svečko, D. Kusić, T. Kek, A. Sarjaš, A. Hančič, and J. Grum, “Acoustic Emission Detection of Macro-Cracks on Engraving Tool Steel Inserts during the Injection Molding Cycle Using PZT Sensors,” *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 13, no. 5, pp. 6365–6379, 2013. Place: Switzerland Publisher: MDPI AG.
- [25] “How to design snap fit components - core77.”
- [26] “Snap lock pin slp-1 polyamid 66 natural ul94-v2 e70062 — snap lock pin slp-1 polyamid 66 natural ul94-v2 e70062 — snap-lock pins — plastic quick fasteners — fastening technology — products.”

Bijlage A

Bijlage