Nieuwe akoestische metamaterialen voor golfmanipulatie door onderzoek naar niet-lineariteit

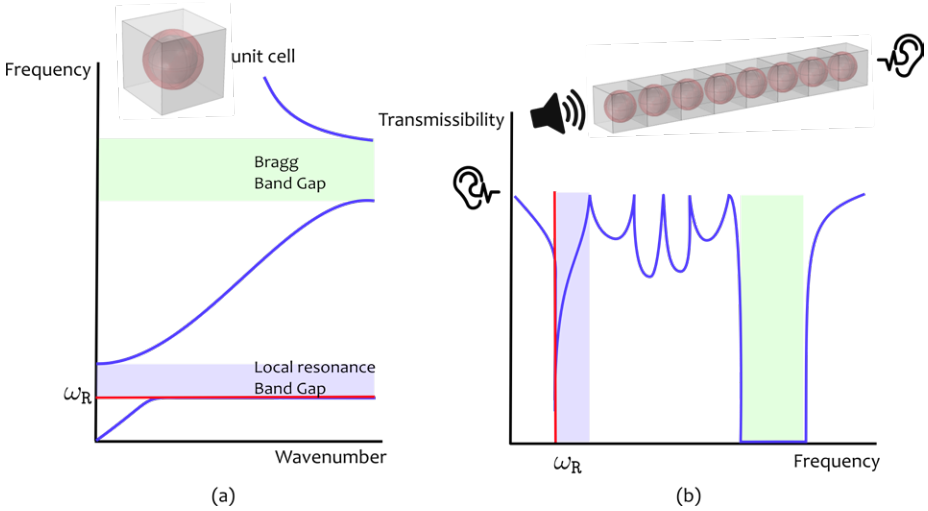
De ontwikkeling van metamaterialen maakt het mogelijk om materialen te ontwerpen met buitengewone eigenschappen die de gebruikelijke limieten overstijgen. In het lineaire dynamische regime hebben metamaterialen al een breed scala aan nieuwe functionaliteiten mogelijk gemaakt, zoals akoestische camouflage, superlenzen en signaalfiltering. Het onderzoeken van niet-lineariteiten heeft de potentie een groot aantal nieuwe mogelijkheden voor metamaterialen op te leveren. Binnen het 4TU.High-Tech Materials-onderzoeksprogramma 'New Horizons in Designer Materials' worden metamaterialen ontwikkeld met niet-lineaire resonante inclusies. De resultaten van dit onderzoek laten nieuwe dynamische eigenschappen zien die af te stellen zijn, die nieuwe mechanismen van geluids- en vibratiedemping mogelijk maken en die een 'mechanische diode' kunnen realiseren. Daarnaast worden efficiënte rekenmodellen ontwikkeld voor een optimale analyse van de ontwerpen van de nieuwe metastructuren.

Zou het mogelijk zijn om akoestische en elastische golven op een rationele manier te manipuleren, door het aanbrengen van een instelbare regeling voor de voortplanting en demping van golven, en door het mogelijk maken van nieuwe functionaliteiten, zoals logische en sequentiële operaties of complexe kwantumberekeningen? Het antwoord is ja, en de recente ontwikkelingen op het gebied van metamaterialen bewijzen dat dit mogelijk is. Metamaterialen zijn gemanipuleerde structuren waarin het ontwerp van een microscopische structuur, of meta-atoom, met specifiek (bijvoorbeeld dynamisch) gedrag aanleiding geeft tot een uitstekende, oproepbare respons van het effectieve medium, meer dan dat van zijn onderdelen, waardoor het mogelijk is om golven te manipuleren. Golfmanipulatie wordt bevorderd door de ongebruikelijke dispersiekarakteristieken van metamaterialen, dat wil zeggen de relatie tussen frequentie en golfgetal van vrije golven die zich voortplanten in een medium, veroorzaakt door 'exotische' effectieve eigenschappen, zoals negatieve effectieve massadichtheid en/of elastische moduli. In het dispersiediagram van metamaterialen kunnen deze kenmerken frequentiezones induceren waarin golven zich niet kunnen voortplanten (de zogenaamde stopbanden). Hierin kunnen negatieve hellingen worden gevonden (dat wil zeggen een negatieve groepsnelheid met positieve fasesnelheid), waarin het mogelijk wordt gemaakt ongebruikelijke reflectie-, transmissie- en absorptiekarakteristieken waar te nemen in de stopbanden en waarin bepaalde doorlaatbanden unieke brekingskarakteristieken laten zien.

In het begin van de jaren 90 motiveerde het succes van fotonische kristallen voor elektromagnetische golfmanipulatie de ontwikkeling van fononische kristallen. Dit zijn periodieke structuren met contrasterende materialen en/of geometrieën die stopbanden induceren door destructieve golfinterferentie, het zogenaamde Bragg-verstrooiingsfenomeen. Het werk van Liu e.a. (1) was erg belang-

rijk, het toonde aan dat gelokaliseerde resonanties subgolflengtestopbanden kunnen induceren, dat wil zeggen in het regime van golflengten die significant groter zijn dan de dimensies van de eenheidscel. Het materiaal van Liu was de eerste realisatie van het zogeheten lokaal resonant metamateriaal met een negatieve effectieve massadichtheid. Figuur 1 laat schematisch het typische dispersiediagram en de transmissiegrafiek voor Liu's materiaal zien. Hierbij is enkel 1D-periodiciteit en longitudinale golfvoortplanting meegenomen. Akoestische metamaterialen met negatieve effectieve elastische moduli zijn een paar jaar later gerealiseerd met behulp van een reeks van Helmholtz's resonatoren. Hierdoor is de mogelijkheid ontstaan om elasto-akoestische materialen met negatieve brekingsindex te ontwikkelen, die worden gebruikt voor het ontwerpen van akoestische lenzen en akoestische camouflageapparaten. Daarnaast is een breed scala aan functionaliteiten voor akoestische metamaterialen voorgesteld, zoals filteren, fasemanipulatie en absorptie.

Alle bovengenoemde studies en gerelateerde functionaliteiten zijn alleen ontworpen met het oog op een lineair dynamisch regime. Wat zou er gebeuren als materialen in een niet-lineair regime worden geplaatst? In het verleden werden niet-lineaire statische en dynamische regimes in mechanische structuren bij het ontwerp vermeden, vanwege het complexe gedrag als gevolg van de niet-lineariteit. De opkomst van metamaterialen is een nieuw voorbeeld waarin niet-lineaire verschijnselen worden beschouwd als een kans om nieuwe en buitengewone functionaliteiten mogelijk te maken. De 'snap-through'-instabiliteit geïnduceerd door knik is bijvoorbeeld gebruikt bij het ontwerp van zachte actuatoren die met een grote output reageren op een kleine input (2). Bi-stabiele structuren zijn gebruikt om energie op een gecontroleerde manier vrij te geven, waardoor voortplanting van solitaire overgangsgolven in één richting over willekeurige lange afstanden mogelijk wordt (3). Daarnaast zijn hogere orde harmonische golven, die ontstaan als gevolg van golfvoortplanting in een niet-lineair medium, gebruikt voor het omzetten van eigentoestanden (4) en om ongebruikelijke reflectie-effecten te veroorzaken (5).

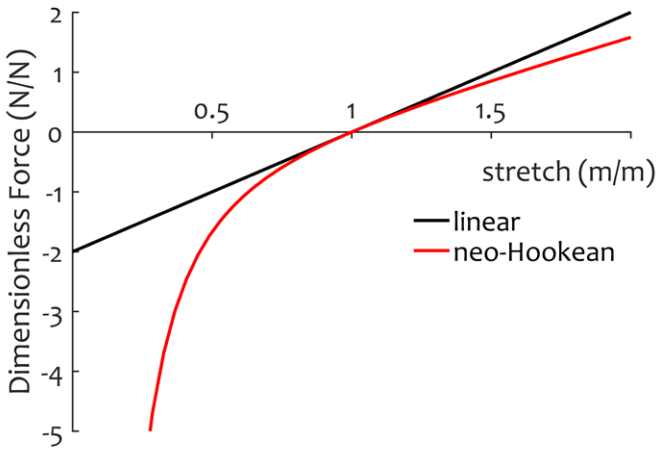


Figuur 1: Basiskenmerken van metamaterialen (met 1D-periodiciteit en longitudinale golfvoortplanting): (a) dispersiediagram op basis van de analyse van de eenheidscel, (b) bijbehorende transmissibiliteitsplot (ω_R is de lokale resonantiefrequentie)

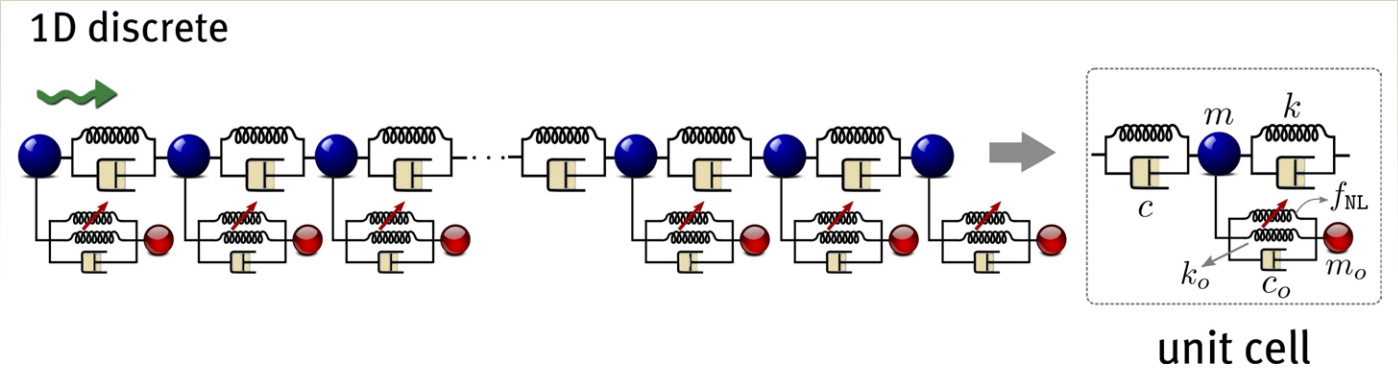
Binnen het 4TU.High-Tech Materials-onderzoeksprogramma worden krachtige lokaal resonante metamaterialen ontwikkeld door de niet-lineariteiten van de interne resonante microstructuren te onderzoeken. Tot nu toe zijn er slechts weinig studies die het effect van niet-lineariteit in resonante aanhechtingen die periodiek in een gastheermateriaal zijn verdeeld, hebben onderzocht. Bovendien zijn conventionele strategieën om het dynamische gedrag van dergelijke niet-lineaire metamaterialen te simuleren rekenkundig duur (bijvoorbeeld transiënte directe numerieke simulaties) of de simulaties worden beperkt tot eenvoudige modellen (bijvoorbeeld met behulp van meerdere schalen, of de 'harmonic balance method'). Het doel van het 4TU.High-Tech Materials-onderzoeksproject is tweeledig: (i) het ontrafelen van fysieke verschijnselen veroorzaakt door niet-lineariteiten in de microstructuur van lokaal resonante metamaterialen en (ii) het ontwikkelen van efficiënte rekenmodellen voor hun analyse.

Nieuwe dynamische kenmerken

Hyper-elastische en visco-elastische materialen worden veel gebruikt in structurele verbindingen die functioneren als elastische veren en/of dempers. Sinds het eerste ontwerp van een lokaal resonant metamateriaal zijn rubberen

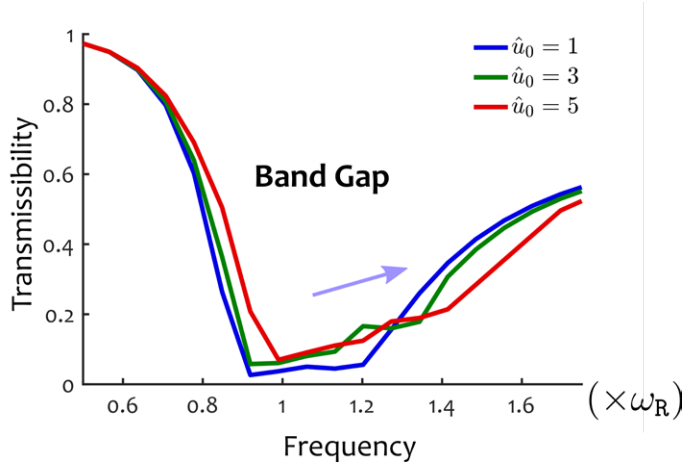


Figuur 2: Lineaire en niet-lineaire (neo-Hookean) lokale interactiekrachten versus rek in lokaal resonante metamaterialen



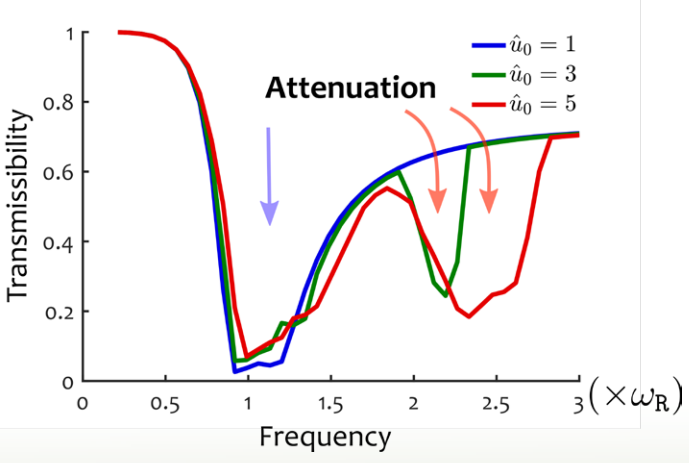
Figuur 3: Eendimensionaal model van een metamateriaal met niet-lineaire interne resonatoren

coatings gebruikt om de zachtheid te bieden die vereist is om de zware inclusie in het gastheermateriaal te laten resoneren. In dat werk en in talrijke andere werken geïnspireerd door het interne resonantieverschijnsel waarbij rubber als koppelingselement is gebruikt, is de analyse echter beperkt gebleven



Figuur 4: Amplitude-afhankelijke transmissie van een niet-lineair lokaal resonant metamateriaal: het begin van afstelbaarheid

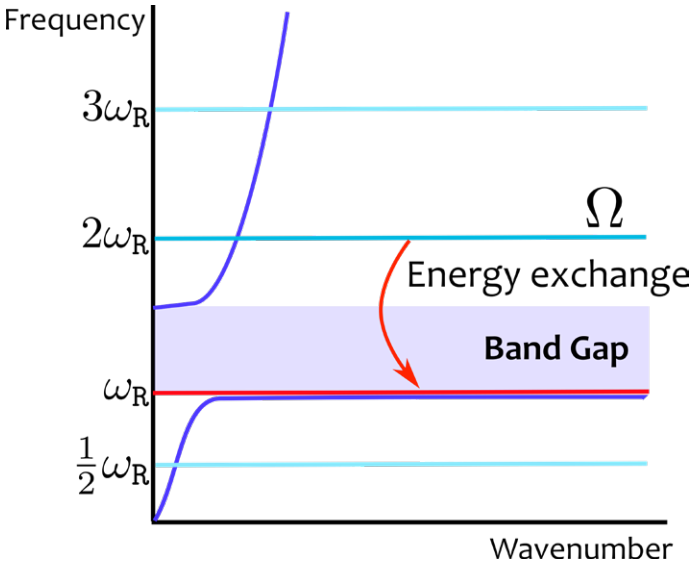
tot het lineaire regime van kleine oscillaties. In het kader van het 4TU.High-Tech Materials-onderzoeksproject ligt de focus op het niet-lineaire dynamische regime van hyper-elastische materialen, gekenmerkt door hun asymmetrische materiaalgedrag in druk en compressie.



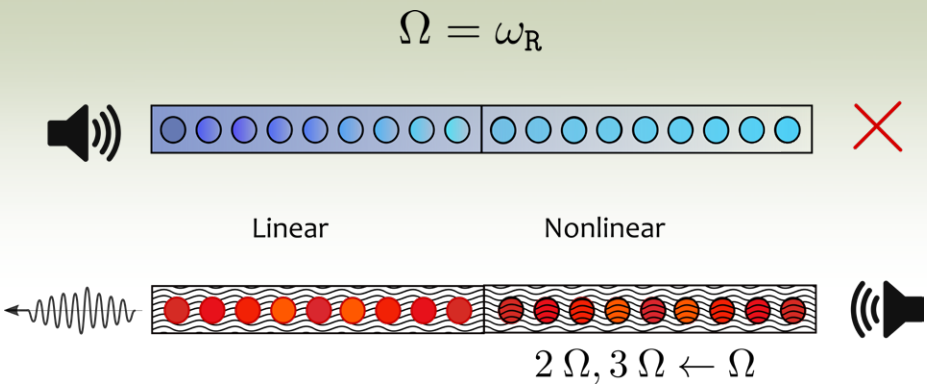
Figuur 5: Transmissieanalyse van een niet-lineair lokaal resonant metamateriaal met een tweede dempingszone

Afstelbaarheid

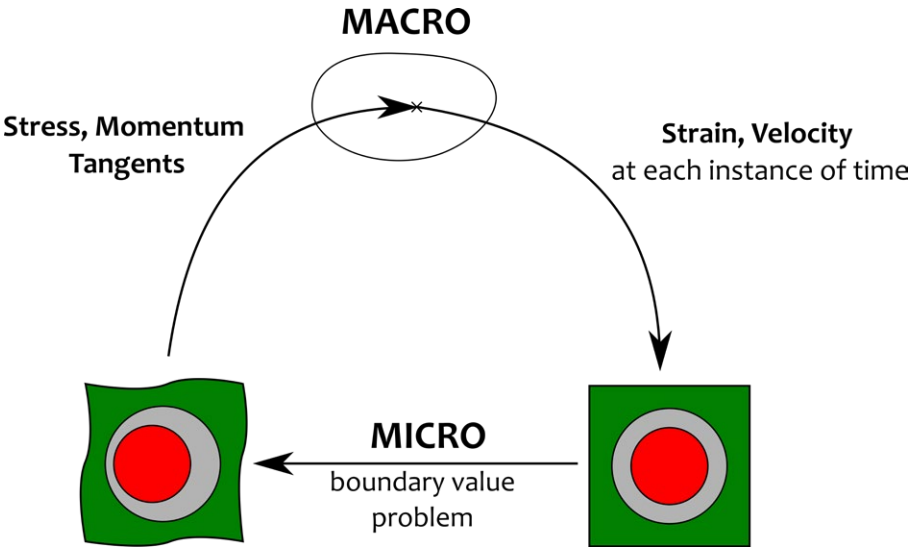
Het niet-lineair materiaalgedrag van rubberachtige materialen wordt gekenmerkt door een rekafhankelijke elasticiteitsmodulus, dat bijvoorbeeld wordt beschreven door een neo-Hookean materiaalmodel, geïllustreerd in figuur 2. Dit veroorzaakt een amplitude-afhankelijke frequentieverschuiving van akoestische en optische golftoestanden, en dus van de stopband. Deze eigenschap van niet-lineaire materialen maakt niet-lineaire fononische kristallen en lokaal resonante metamaterialen afstelbaar, omdat de transmissie/reflectie-eigenschappen van deze materialen kunnen worden gewijzigd door de ingangsamplitude te veranderen. Numerieke golfvoortplantingsanalyse van een eendimensionaal lokaal resonant metamateriaal (figuur 3) met lokale interactie gegeven door een onsamendrukbaar neo-Hookean materiaalmodel toont een frequentieverschuiving van de stopband naar hoge frequenties met de toename van de ingangsgolfamplitude (zie figuur 4). Hoewel een asymmetrisch materiaalmodel is beschouwd, dat wil zeggen versoepeling in uitrekking en verstijving bij compressie, is het verstijvingseffect sterker, wat het kenmerk van deze metamaterialen verklaart.



Figuur 6: Schema van het mechanisme verantwoordelijk voor de tweede dempingszone met energie-uitwisseling als gevolg van 'autoparametric resonance'



Figuur 7: Niet-reciprook gedrag van een systeem samengesteld uit lineaire en niet-lineaire lokaal resonante metamaterialen die in serie verbonden zijn en onderworpen aan een frequentie $\Omega \approx \omega_R$



Figuur 8: Schema van dynamische numerieke homogenisatie geïmplementeerd om transiënte analyse van niet-lineair metamateriaal uit te voeren

Parametrische demping

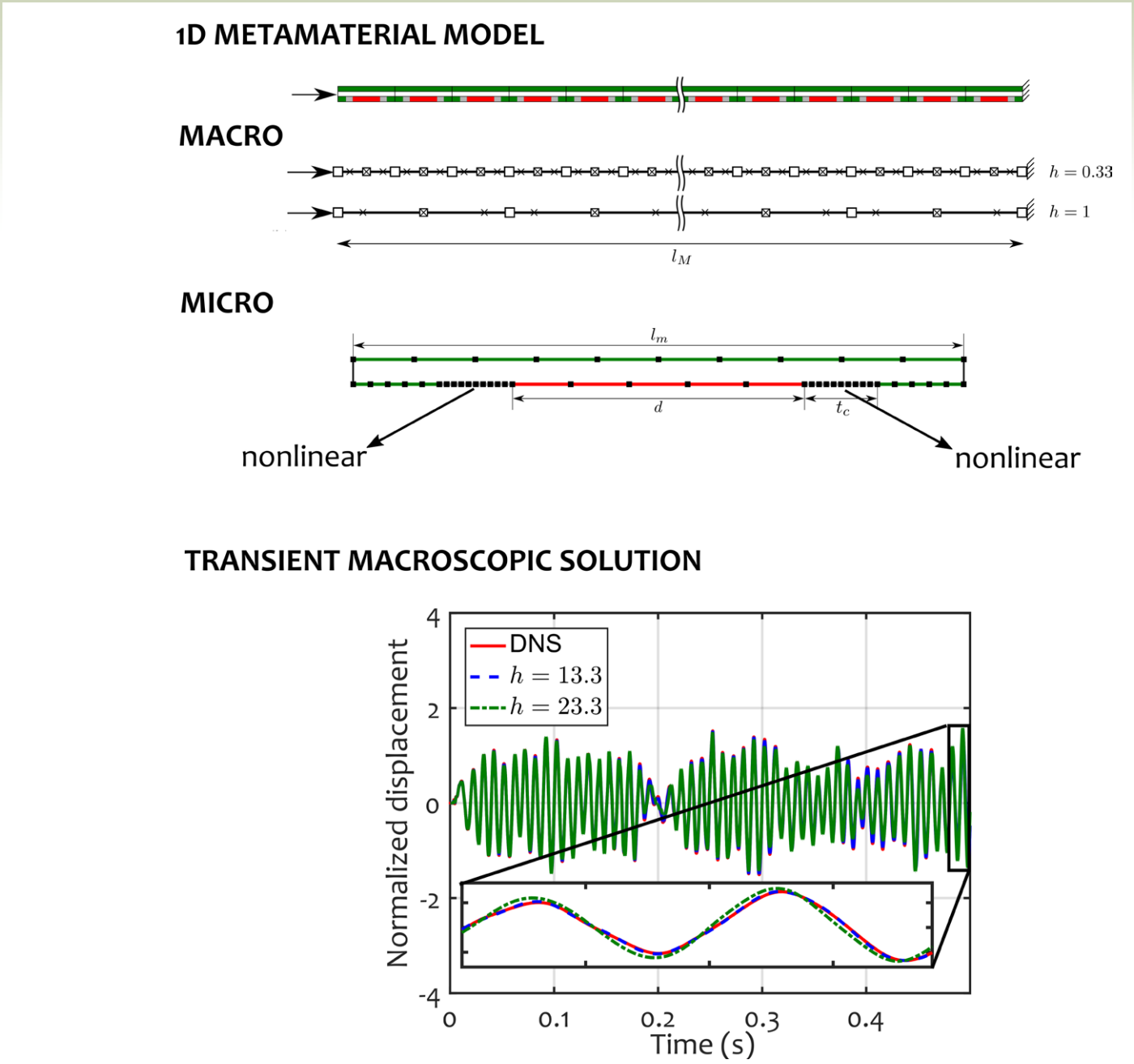
In de dynamische analyse van het metamateriaal met niet-lineaire en asymmetrische lokale interactie van het neo-Hookean-type, werd een tweede dempingszone (of transmissieval) waargenomen bij voldoende hoge ingangsamplituden (zie figuur 5). Semi-analytische analyse met behulp van de methode van meerdere schalen is uitgevoerd en toonde aan dat er energie-uitwisseling tussen de primaire eigentoestand van de voortplantingsgolf en een subharmonische eigentoestand kan optreden boven een bepaalde kritische ingangsamplitude. Dit verklaart het nieuwe verschijnsel, dat te wijten is aan de zogenaamde 'autoparametric resonance' op het niveau van de microstructuur (6). Boven een bepaald energieniveau wordt de primaire eigentoestand van de voortplantingsgolf met het frequentie-golfgetal (Ω,μ) onstabiel en wordt energie overgedragen naar de uitwijkgolftoestand bij de halve sub-harmonische frequentie van de primaire ingangsfrequentie (1⁄2)Ω (zie figuur 6). Dit brengt de respons van de oscillator naar zijn resonantiefrequentie. De aard van dit verschijnsel suggereert dat naar verwachting vergelijkbare dempingszones worden veroorzaakt onder specifieke omstandigheden, niet alleen voor een 2:1 frequentieverhouding. Dit nieuwe mechanisme om demping te induceren door het samenspel tussen niet-lineariteit en lokale resonantie is inherent af te stellen en biedt nieuwe mogelijkheden voor golfmanipulatie in het subgolflengte regime.

Niet-reciprociteit

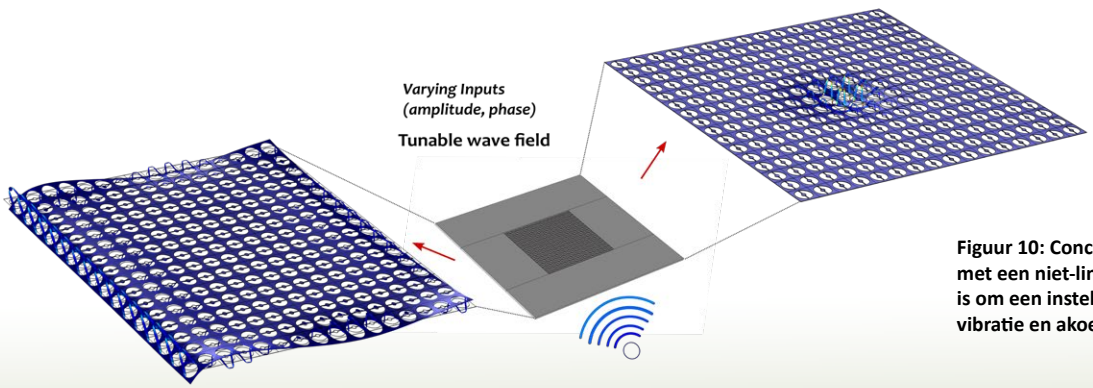
De integratie van niet-lineariteiten vormt een manier voor het ontwerpen van materialen waarbij golftransmissie richtingsafhankelijk is (niet-reciproke materialen) en biedt nieuwe mogelijkheden voor de regeling van geluid en trillingen. In het kader van dit 4TU. High-Tech Materials-onderzoeksproject is een structuur ontworpen die bestaat uit twee verschillende metamaterialen, zoals weergegeven in figuur 7. Een metamateriaal met lineair resonerende inclusies (aan de linkerkant) is in serie gekoppeld met een metamateriaal met niet-lineaire resonerende inclusies (aan de rechterkant). Het ontworpen systeem werkt als een mechanische diode en biedt een niet-reciproke reactie rond een bepaalde frequentie $\Omega = \omega_R$. Als de excitatiebron zich aan de linkerkant bevindt, wordt er geen golf naar het rechteruiteinde verzonden. Maar als de bron aan de rechterkant staat, wordt er wel een golfsignaal naar links verspreid. Dit is een resultaat van het genereren van een harmonische frequentie door het niet-lineaire metamateriaal. Dit systeem zou kunnen worden gebruikt in oplossingen voor onder meer signaalverwerking, beeldvorming en sensortechnologie.

Transiënte analyse via numerieke homogenisatie

Naast de nieuwe kenmerken veroorzaakt door niet-lineariteit in metamaterialen, zijn er efficiënte manieren nodig om transiënte voortplantingsanalyse van golven uit te voeren op structuren met een eindige afmeting. Homogenisatiemethoden, dat wil zeggen een klasse van meerschalige methoden gebaseerd op het nemen van gemiddelden, zijn krachtige hulpmiddelen bij de analyse van composietmaterialen en kunnen worden toegepast op de lokaal resonante metamaterialen om twee hoofdredenen. Ten eerste komen de buitengewone kenmerken van metamaterialen voort uit de effectieve eigenschappen van het composietmateriaal en niet van de losse bestanddelen ervan. Ten tweede is de belangrijkste eigenschap van de lokaal resonante metamaterialen hun subgolflengte-kenmerk, waardoor ze geschikt zijn voor homogenisatie. Onlangs zijn zowel analytische als numerieke

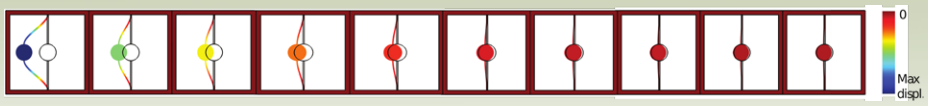


Figuur 9: 1D niet-lineair metamateriaal geanalyseerd via numerieke homogenisatie en directe numerieke simulaties. Het volledig probleem, de macro- en de microschaal worden getoond. Een typische oplossing is afgebeeld voor twee niveaus van de hoeveelheid homogenisatie h. Een goede overeenstemming met de oplossing van de conventionele directe numerieke simulatie (DNS) kan worden waargenomen (8)



Figuur 10: Conceptueel schema van een apparaat met een niet-lineair metamateriaal dat in staat is om een instelbaar golfveld te genereren voor vibratie en akoestische controle

homogenisatieschema's uitgebreid om micro-inertie op te nemen en complexe transiënte interacties mogelijk te maken. Wanneer complexe microstructuren gedetailleerd moeten worden gemodelleerd, kunnen numerieke homogenisatieschema's worden gebruikt. Deze zijn doorgaans ook efficiënter dan de conventionele directe numerieke simulaties. In 2013 hebben Pham e.a. (7) het klassieke numerieke homogenisatieschema uitgebreid om micro-dynamica op te nemen. De numerieke implementatie was op dat moment echter beperkt tot een lineair elastisch lokaal resonant metamateriaal. In het kader van het 4TU.High-Tech Materials-onderzoeksprogramma werd het dynamische numerieke homogeniseringsschema met microscopische niet-lineariteiten, schematisch weergegeven in figuur 8, geïmplementeerd en werden transiente numerieke simulaties uitgevoerd (8). Voor de validatie hiervan werd een eendimensionale versie van Liu's lokaal resonant metamateriaal gekozen en de dynamica van het niet-lineaire metamateriaal werd beoordeeld onder vrije golfvoortplanting en transiënte structurele dynamische analyse van een eindige structuur (zie figuur 9). De resultaten bleken accuraat te zijn en tegelijkertijd is de simulatietijd aanzienlijk korter in vergelijking met de conventionele directe numerieke simulaties.



Figuur 11: Mechanisch prototype van een niet-lineair metamateriaal dat een parametrische demping kan veroorzaken

Op weg naar een nieuw metamateriaalontwerp

Het uiteindelijke doel van dit 4TU.High-Tech Materials-onderzoeksproject is het ontwerpen van een lokaal resonant metamateriaal, dat subgolflengtemanipulatie laat zien met de nieuwe kenmerken veroorzaakt door lokale niet-lineariteiten en het realiseren van een daadwerkelijke toepassing in vibratie/akoestische signaalfiltering (figuur 10). Daartoe wordt het eerste mechanische prototype ontworpen en zal het numeriek en experimenteel worden getest (zie figuur 11). In dit eerste prototype zal het niet-lineaire effect dat verantwoordelijk is voor parametrische demping worden veroorzaakt door geometrische niet-lineariteit binnen de lokale resonator. Dit levert een 'proof of concept' op. Het biedt daarnaast de mogelijkheid numerieke homogenisatie toe te passen op een complexer niet-lineair metamateriaalmodel.

Delen van dit onderzoek zijn uitgevoerd in het kader van het 4TU.High-Tech Materials-onderzoeksprogramma 'New Horizons in Designer Materials' (www.4tu.nl/htm).

Priscilla B. Silva[a], Tim van Nuland[a], Thijs S. van Loon[a], Valentina Zega[a], Michael J. Leamy[b], Marc G. D. Geers[a] en Varvara G. Kouznetsova[a]

a - Mechanics of Materials Group, Department of Mechanical Engineering
Eindhoven University of Technology
Eindhoven, The Netherlands

b - George W. Woodruff School of Mechanical Engineering
Georgia Institute of Technology
Atlanta, GA, USA

E-mail:
p.brandao.silva@tue.nl
v.g.kouznetsova@tue.nl

De projectpagina is hier te vinden:
https://www.4tu.nl/htm/en/new-horizons/metamaterials/

Referenties:

1 - Zhengyou Liu e.a., 'Locally Resonant Sonic Materials,' Science 289, nr. 5485 (8 september 2000): 1734–36.

2 - Jordan R. Raney e.a., 'Stable Propagation of Mechanical Signals in Soft Media Using Stored Elastic Energy,' Proceedings of the National Academy of Sciences 113, nr. 35 (2016): 9722–27.

3 - Neel Nadkarni e.a., 'Unidirectional Transition Waves in Bistable Lattices,' Physical Review Letters 116, nr. 24 (13 juni 2016): 244501.

4 - R. Ganesh en Stefano Gonella, 'Experimental Evidence of Directivity-Enhancing Mechanisms in Nonlinear Lattices,' Applied Physics Letters 110, nr. 8 (20 februari 2017): 84101.

5 - Xinxin Guo e.a., 'Manipulating Acoustic Wave Reflection by a Nonlinear Elastic Metasurface,' Journal of Applied Physics 123, nr. 12 (28 maart 2018): 124901.

6 - Priscilla B. Silva e.a., 'Emergent Subharmonic Band Gaps in Nonlinear Locally Resonant Metamaterials,' ingediend, 2018.

7 - K. Pham, V.G. Kouznetsova, en M.G.D. Geers, 'Transient Computational Homogenization for Heterogeneous Materials under Dynamic Excitation,' Journal of the Mechanics and Physics of Solids 61, nr. 11 (november 2013): 2125–46.

8 - Tim van Nuland e.a., 'Transient Analysis of Nonlinear Locally Resonant Metamaterials via Computational Homogenization,' ingediend, 2018.