



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## Strategies for mechanical metamaterial design

Singh, N.

### Citation

Singh, N. (2019, April 10). *Strategies for mechanical metamaterial design*. *Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/71234>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Leiden University Non-exclusive license](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/71234>

**Note:** To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/71234> holds various files of this Leiden University dissertation.

**Author:** Singh, N.

**Title:** Strategies for mechanical metamaterial design

**Issue Date:** 2019-04-10

# Samenvatting

---

Metamaterialen [1–3], voor het eerst geïntroduceerd in het veld van optica, akoestiek, en elektromagnetisme, zijn zorgvuldig ontworpen materialen op macro-, micro- of nanoschaal, waarvan de fysica wordt bepaald door hun architectuur. Deze architectuur bestaat vaak uit speciaal ontworpen periodiek gerangschikte eenheidscellen. Dit concept, waarbij materiaaleigenschappen worden bepaald door het ontwerp van het materiaal, heeft geleid tot de ontdekking van een aantal niet-triviale materialen met functionaliteiten die de wetten van de fysica lijken te tarten. Een voorbeeld hiervan zijn materialen met een negatieve brekingsindex. Bij mechanische metamaterialen [4–19], een recente ontwikkeling, wordt het idee van ontworpen materialen verder toegepast, wat heeft geleid tot zachte vervormbare materialen met extreme mechanische reacties, en geavanceerde functionaliteiten zoals de programmeerbaarheid van de mechanische respons [20], instelbare controle van responsparameters [13], vorm-transformeerbare materialen [16, 37].

De eigenschappen die een groot deel van de mechanische metamaterialen laten zien op een structureel niveau kunnen worden toegeschreven aan een eindig aantal zachte interne vrijheidsgraden, die het systeem toestaan te deformeren via voorgeprogrammeerde frustratievrije, laag-energetische deformatiepaden in de configuratieruimte [37]. Vaak is het mogelijk zo een laag-energetische deformatie op een ideale manier voor te stellen door een mechanisme dat bestaat uit stijve geometrische eenheden verbonden door dunne zachte verbindingen (3D) of ideale penverbindingen (2D) [18, 38–41]. Deze mechanismen dienen ook als intuïtieve startpunten om materialen te ontwerpen, of materiaalontwerpen aan te passen. Traditionele ontwerpmethoden bestaan vooral uit proberen en testen, en kunnen alleen simpele ontwerp opgaven aan. Daarbij zijn de ontwerpen die hieruit voortkomen vaak periodiek en niet generiek. Om deze complexe ontwerp problemen op te

lossen, bieden computer algoritmen gebaseerd op geïnverteerde strategieën een ‘state of the art’ oplossing [43–51]. Een manier waarop algoritmen gebruikt kunnen worden is door het ontwerpprobleem voor te stellen als een optimalisatieprobleem, waarbij de parameters die het ontwerp bepalen (de design variables) worden geoptimaliseerd om de gewenste respons te bereiken. Een dergelijk geïnverteerd ontwerp voor materialen heeft twee belangrijke voordelen: (i) het optimaliseren van meerdere gewenste eigenschappen is geautomatiseerd, en (ii) er worden meerdere bijna perfecte oplossingen ontdekt die de doelcriteria behoorlijk goed halen, waardoor de ontwerpruimte groter wordt [35].

In dit proefschrift bespreken we nieuwe geïnverteerde ontwerpstrategieën voor 2D mechanische metamaterialen, die kunnen worden gemodelleerd als mechanismen met een vrijheidsgraad bestaande uit polygonen met penverbindingen. We laten zien dat, door optimalisatie van karakteristieke trajecten van deze mechanismen, men generiek metamateriaal kan ontwerpen met een complexe programmeerbare mechanica, atypische energieloze deformaties en vorm-transformeerbaar gedrag.

**Hoofdstuk 2** – In het tweede hoofdstuk van dit proefschrift beginnen we met een fysische aanpak, erop gericht de vier geobserveerde regimes van een lateraal beperkt, quasi-2D, bipolair vlak [20] kwalitatief te modelleren. Hier gebruiken we een mechanisme met een vrijheidsgraad dat bestaat uit rechthoeken verbonden door penverbindingen - een zacht mechanisme. Nadat we hebben bevestigd dat dit inderdaad lukt, laten we zien dat experimenteel geobserveerde mechanische regimes ook geometrisch verkregen kunnen worden. Het belangrijkste resultaat van dit hoofdstuk, gebaseerd op een geometrische analyse, is een strategie om op een rationele manier mechanische metamaterialen te ontwerpen voor verscheidene responses die door confinement worden gecontroleerd. Het belangrijkste idee is dat verschillende types equilibria die zich ontwikkelen als de controleparameter (horizontale confinement in dit geval) gevarieerd wordt, gestuurd kunnen worden door het traject van het onderliggende mechanisme. Als we in ons zachte mechanisme torsieveren toevoegen aan de verbindingen zien we kwalitatieve overeenstemming met [70] in termen van hoe de kritische waarden van de horizontale spanning die de regimes scheiden veranderen als de dikte van de connector vergroot wordt. Als laatste gebruiken we het zachte mechanisme om het geval te begrijpen waarin aangrenzende gaten in

---

het bipolaire vlak bijna van gelijke grootte zijn, en laten we mathematisch zien dat in deze limiet de vier regimes ontstaan uit het ontvouwen van een imperfecte hooivorkbifurcatie.

**Hoofdstuk 3** – In het derde hoofdstuk beginnen we met de vraag welke generieke systemen van speciaal ontworpen quadrilateralen met penverbindingen perfecte of benaderde mechanismen kunnen vormen. Het doel hiervan is het ontwerpen van een generiek maar flexibel 2D mechanisch metamateriaal gebaseerd op deze mechanismen die een lage energie deformatiemode laten zien, terwijl normaal wordt verwacht dat deze rigide zijn. We laten zien dat dit probleem kan worden aangepakt door te zoeken naar een optimaal ontwerp van een precursor mechanisme met een vrijheidsgraad, zodat het overeenstemt met een specifieke doelcurve die de interne deformatie karakteriseert. We gebruiken hier ook een geïnverteerde strategie, waarbij we dit interpreteren als optimalisatieprobleem, en kort gezegd optimaliseren we de ontwerpparameters zodat ze overeenstemmen met de doelcurve. We gebruiken een zoek-algoritme dat geïnspireerd is op voedselzoekende vogelzwermen — Particle Swarm Optimization (PSO) [60, 90, 91] — om de optimalisatie te verwezenlijken. We laten zien dat de hyperparameter instelling van de PSO een kritische rol speelt in de kwaliteit van de oplossing, de distributie van de oplossing en het lokale of globale zoekgedrag van de zwerm. PSO ontdekt een overvloed van ontwerpen die een hoge kwaliteit van benaderende mechanismen geven, terwijl het structureel lijkt alsof ze rigide zijn. We bewijzen dat het waarschijnlijk is dat voor oplossingen van hoge kwaliteit de PSO gevangen is in diepe lokale minima, terwijl dit niet het geval is voor oplossingen van lage kwaliteit. Tenslotte hebben we, gebaseerd op deze mechanismen, met 3D printers eenheidscellen gefabriceerd uit metamaterialen die een zachte modus laten zien, en stellen we een methode voor om deze eenheidscellen te rangschikken in reguliere betegelingen met behoud van de originele zachte modus.

**Hoofdstuk 4** – In het vierde hoofdstuk testen we een cruciale eigenschap van elk geautomatiseerd geïnverteerd materiaal ontwerp, namelijk het in staat zijn om meerdere doeleigenschappen te optimaliseren. Meer specifiek optimaliseren we voor verschillende doelcurves van het precursor mechanisme, teneinde: *(i)* de prestaties van ons model versus de algemene complexiteit van de input curves statistisch te correleren en *(ii)* bovenop

## SAMENVATTING

---

de computer-ontworpen mechanismen bi- en tri-stabiele eenheidscellen te fabriceren en deze te rangschikken zodat zij multi-stabiel gedrag laten zien. Hiermee creëren we nieuwe voorbeelden van 2D vorm-transformerende mechanische metamaterialen.