



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## Hysterons and pathways in mechanical metamaterials

Ding, J.

### Citation

Ding, J. (2023, May 31). *Hysterons and pathways in mechanical metamaterials*. *Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3619565>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/3619565>

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

---

# SAMENVATTING

---

Mechanische metamaterialen zijn zorgvuldig ontworpen materialen waarvan de eigenschappen worden bepaald door de structuur, niet door samenstelling. Dit maakt het mogelijk om materialen te ontwerpen met praktische en nuttige eigenschappen die niet in de natuur voorkomen, maar maakt het ook mogelijk om metamaterialen te creëren om complexe fysieke verschijnselen in detail te bestuderen en te beheersen.

In dit proefschrift ontwikkelen we metamaterialen om de sequentiële, complexe respons van gefrustreerde materialen die cyclisch aangedreven worden te bestuderen. In veel gevallen is het mogelijk om dit soort systemen te modelleren als een verzameling van zogenaamde hysteronen. Deze bistabiele elementen schakelen hun interne status  $s$  om van '0' naar '1' wanneer de lokale aandrijving het bovenschakelveld  $\varepsilon^+$  overschrijdt, en schakelen van '1' naar '0' wanneer de aandrijving onder het onderschakelveld  $\varepsilon^-$  valt. Cruciaal is dat we  $\varepsilon^- < \varepsilon^+$  nemen, zodat er een hysteretisch gebied is, waarbinnen een geschiedenis-afhankelijke toestand zogenaamde geheugeneffecten codeert.

In dit proefschrift presenteren we twee strategieën om hysteronen te creëren in 'holaire metamaterialen', d.w.z. quasi-tweedimensionale metamaterialen die een vierkant patroon van cirkelvormige gaten hebben. Ten eerste creëren we hysteronen door de frustratie tussen lokale defecten en holaire structuren te gebruiken, en ten tweede gebruiken we de frustratie tussen concurrerende vervormingen van holaire metamaterialen.

In Hoofdstuk 2 van dit proefschrift demonstreren we de strategie van het creëren van hysteronen door zogenaamde defect kolommen in een biholair metamateriaal (twee verschillende gat groottes) te plaatsen. Als gevolg van een competitie tussen de initiële kromming van de defect kolom en de globale (rotatie) vervorming van het biholaire metamateriaal, kan onder cyclische compressie de defect kolom bundel zowel naar rechts of naar links buigen onder verhoogde compressie, en kan de defect kolom hysteretisch schakelen tussen deze twee toestanden. Daarom fungeert de defect kolom als een hysteron, en we laten zien hoe de bovenste en onderste schakelvelden van deze op defecten gebaseerde hysteronen kunnen worden gecontroleerd.

In hoofdstuk 3 bestuderen we de toestanden, overgangen en paden van metamaterialen die drie op defecten gebaseerde hysteronen bevatten, zowel experimenteel als numeriek. We brengen de evolutie van de hysteronen in kaart met transitiegrafieken die de paden van een bepaald systeem onder cyclische compressie compleet karakteriseren. We controleren de transitiegrafieken door de defect kolommen te varieëren en gericht te ontwerpen. Vervolgens laten we zien dat we door het kantelen van een van de randen van het systeem, wat een ruimtelijke gradiënt in de mate van compressie oplevert, de transitiegrafieken van een enkel systeem kunnen instellen. Ten slotte tonen we subtiele wrijvingseffecten aan die de paden verder beïnvloeden, wat extra vrijheidsgraden onthult. Ons werk vormt het eerste voorbeeld van rationeel gecontroleerde, mechanische hysteron-gebaseerde paden die experimenteel kunnen worden waargenomen.

In hoofdstuk 4 introduceren we een strategie om emergente hysteronen te creëren in gefrustreerde materialen. In het bijzonder gebruiken we de competitie tussen twee verschillende, symmetriegerelateerde vervormingspatronen (patronen A en B) in biholaire metamaterialen. Deze competitie is in het verleden gebruikt om een programmeerbare mechanische respons te realiseren door het materiaal in horizontale richting vast te klemmen en in verticale richting samen te drukken. Hier gebruiken we soortgelijke klemming om systemen te creëren met twee en drie emergente hysteronen. We focussen op samples met twee hysteronen en laten zien dat we de trajecten kunnen afstemmen, door zowel het instellen van de klemmen als

het varieëren van de hoeveelheid kanteling aan de randen. Onze paden wijzen op significante interacties tussen de hysteronen, en door de precieze schakelvelden te meten, kunnen we sommige interactiecoëfficiënten nauwkeurig meten. Deze interacties leiden tot lawines waarbij meerdere hysteronen (bijna) gelijktijdig van toestand veranderen. We verkennen daarnaast een grotere sample waarin we drie hysteronen kunnen inbedden, en laten zien dat dergelijke systemen een grote verscheidenheid aan niet-triviale paden kunnen vertonen.

In hoofdstuk 5 onderzoeken we de evolutie van monoholair metamaterialen onder compressie. We gebruiken computersimulaties om nauwkeurig de eerste onstabiele deformatie mode van deze samples te bepalen, en vinden dat de pariteit (even/oneven) van het aantal rijen en kolommen gaten een sterke invloed heeft op de instabiliteit — even aantal rijen en/of kolommen leveren over het algemeen concurrentie op tussen domeinen van modus A en B, gescheiden door een domeinwand. Door de symmetrie tussen de modi te breken, door middel van lokaal kleinere of grotere gaten, kunnen we modus A of B lokaal initiëren. Door meerdere defecte gaten te gebruiken, kunnen we de frustratie in het sample controleren, er we laten zien dat dit een aanzienlijk effect op de mechanische eigenschappen heeft, en kan leiden tot instabiliteiten.

Bijelkaar genomen opent het werk in dit proefschrift nieuwe wegen om de complexe paden in gefrustreerde materialen te bestuderen door gebruik te maken van rationeel ontworpen, gefrustreerde metamaterialen.