



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Non-Abelian metamaterials: emergent computing and memory

Singh, A.

Citation

Singh, A. (2023, September 28). *Non-Abelian metamaterials: emergent computing and memory*. *Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3642534>

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/1887/3642534>

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

Samenvatting

Het onderzoek in dit proefschrift betreft de niet-lineaire, sequentiegevoelige respons van mechanische metamaterialen. Metamaterialen zijn vormen van *designer matter* waarvan de eigenschappen (optisch, akoestisch, mechanisch, topologisch, enz.) die van natuurlijke materialen overtreffen [86, 87]. Met name mechanische metamaterialen hebben geavanceerde eigenschappen, zoals stijfheid, elasticiteit, samendrukbaarheid en vormverandering [22]. We maken gebruik van ze door ze mechanisch te activeren, d.w.z. door dergelijke materialen te duwen, trekken, draaien, buigen of afschuiven. Deze acties worden gezamenlijk actuaties genoemd.

De meeste vroege voorbeelden van dergelijke metamaterialen betroffen het gebruik van slechts een enkele activeringsplaats om een enkele geavanceerde functionaliteit te verkrijgen [7, 8, 33]. Later werden metamaterialen met meerdere activeringsplaatsen ontwikkeld die meerdere functionaliteiten konden vertonen door verschillende combinaties van deze plaatsen te activeren [40, 71, 88]. Deze nieuwere metamaterialen zijn echter niet ontworpen om gevoelig te zijn voor de volgorde waarin de actuaties plaatsvinden. Stelt u bijvoorbeeld een metamateriaal voor met twee locaties, A en B. Nu activeert u het in de volgorde A eerst, B tweede. Vervolgens activeert u het in de volgorde B eerst, A tweede. De respons van een traditioneel metamateriaal zou in beide gevallen hetzelfde zijn. Het maakt alleen uit welke plaatsen u activeert, niet de volgorde waarin u dat doet. Dit wordt een *Abelse respons* genoemd [89].

Maar waarom geven we überhaupt om sequentie? Maakt het uit in het echte leven? Jazeker! Laten we ons voorstellen dat het wachtwoord van uw smartphone 1234 is. Om de telefoon te ontgrendelen, moet u de cijfers in een specifieke volgorde invoeren: 1 als eerste, 2 als tweede, 3 als derde en 4 als vierde. Als u in plaats daarvan dezelfde cijfers invoert, maar in een iets andere volgorde, bijvoorbeeld 1243, wordt de smartphone niet geopend. In feite is sequentie, of volgorde, een fundamenteel concept in de biologie (bijvoorbeeld eiwitvouwing), computers (bijvoorbeeld informatieverwerking), robotica (bijvoorbeeld voortbeweging) en vele andere gebieden die essentieel zijn voor de menselijke beschaving.

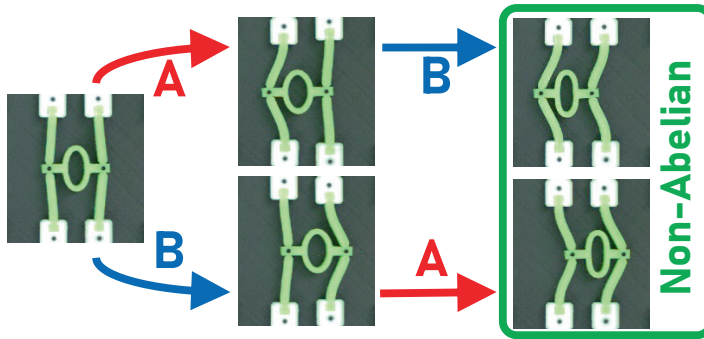


Figure 1: **Sequentiegevoelige respons in een niet-Abelse eenheidscel.** Deze eenheidscel heeft twee activeringsplaatsen, balk A aan de linkerkant en balk B aan de rechterkant. De respons van een eenheidscel is verschillend voor de activeringssequenties AB (eerst A, dan B) en BA (eerst B, dan A).

In dit proefschrift ontwikkelen en bestuderen we een metamateriaal dat sequentiegevoelig is. We noemen het een *niet-Abels mechanisch metamateriaal*. Het materiaal krijgt mechanische invoer en produceert een uitvoer die gevoelig is voor de volgorde van de invoer. Dit metamateriaal is opgebouwd uit bouwstenen die we *niet-Abelse eenheidscellen* noemen (Figure 1). Hoofdstuk 1 introduceert het idee van sequentiegevoelig gedrag en niet-Abelse respons in de context van mechanische metamaterialen. Terwijl de hoofdstukken 2-5 zich uitsluitend richten op de niet-Abelse eenheidscel, richten de hoofdstukken 6-8 zich op niet-Abelse metamaterialen die zijn samengesteld uit meerdere eenheidscellen.

In hoofdstuk 2 introduceren we een eenheidscel waarvan de vervorming gevoelig is voor de volgorde van de actuatietoestand. Door de eenheidscel te modelleren als een netwerk van lineaire veren, ontwikkelen we een gestandaardiseerd activeringsprotocol dat ons helpt om het niet-Abelse gedrag expliciet te karakteriseren. We laten zien dat een enkele eenheidscel drie verschillende gedragingen, of *regimes*, afhankelijk van de hoeveelheid actuatietoestand.

In hoofdstuk 3 realiseren we experimenteel de rubber eenheidscel door middel van Computer Aided Design, 3D-printen en gieten, en ontwikkelen we een geautomatiseerd apparaat om actuatietoestand-experimenten uit te voeren. Door middel van zorgvuldig ontworpen experimenten karakteriseren we het niet-Abelse gedrag van deze eenheidscel en observeren we de drie gedragingen, of regimes, zoals voorspeld in Hoofdstuk 2. Onze experimentele bevindingen komen uitstekend overeen met het numerieke veernetwerkmodel en tonen de haalbaarheid van

niet-Abelse metamaterialen aan.

In hoofdstuk 4 demonstreren we de informatieverwerkingsmogelijkheden van de niet-Abelse eenheidscel door twee equivalente representaties te introduceren, de *Finite State Machine* en het *digitale elektronische circuit*. Concreet stellen we vast dat de eenheidscel een eenvoudige mechanische computer is die informatie kan verwerken met behulp van Booleaanse logica. We stellen ook vast dat de eenheidscel één *bit* informatie kan opslaan door aan te tonen dat deze gelijkwaardig is aan een *set-reset (SR) latch*, de fundamentele bouwsteen van digitaal geheugen.

In de hoofdstukken 2-4 hebben we ons beperkt tot homogene aandrijvingen van de eenheidscel: $\delta_A = \delta_B$, waarbij δ_A en δ_B de hoeveelheid actuatie van respectievelijk balk A en balk B aangeven. In hoofdstuk 5 breken we deze symmetrie door verschillende δ_A - en δ_B -waarden toe te staan wanneer beide balken worden geactiveerd. Dit stelt ons in staat om vier aanvullende "inhomogene" gedragingen waar te nemen, twee *Abelse regimes* en twee *niet-Abelse regimes*, naast de drie eerder waargenomen "homogene" gedragingen. Deze waarneming valideert het breken van symmetrie als een relatief eenvoudige strategie om de programmeerbaarheid van de niet-Abelse eenheidscel uit te breiden.

In de hoofdstukken 2-5 hebben we ons gericht op geïsoleerde niet-Abelse eenheidscellen. In hoofdstuk 6 verankeren we dergelijke eenheidscellen in een lange *niet-Abelse keten*. We onderzoeken de reactie van de ketting op actuaties langs twee aangrenzende activeringsplaatsen en onderzoeken het gedrag ervan voor een bereik van δ -waarden. We definiëren ook de *niet-Abelse afstand*, een karakteristieke lengteschaal die dergelijke niet-Abelse metamaterialen regelt.

In Hoofdstuk 7 bestuderen we numeriek een niet-Abels metamateriaal dat is samengesteld uit vier verticale balken en onderzoeken we de respons op activeringssequenties waarbij alle vier balken betrokken zijn. Met behulp van een recursief algoritme en een gerichte grafiekrepresentatie laten we zien dat het metamateriaal kan worden geprogrammeerd om een breed scala aan gedragingen te vertonen door de hoeveelheid aandrijving δ af te stemmen. Om de complexe respons te begrijpen, introduceren we het concept van *two-loops*: subgrafieken die de respons van het metamateriaal laten zien voor twee actieve activeringsplaatsen en twee passieve (vast gekozen actuatie) afstemmingsplaatsen. Vervolgens observeren we numeriek acht topologisch verschillende klassen van two-loops. Ten slotte laten we zien dat het geheugen van het metamateriaal kan worden versterkt door de koppeling tussen de balken af te stemmen.

Geleid door de numerieke waarnemingen uit hoofdstuk 7, in hoofdstuk 8 vo-

eren we experimenten uit aan het vier-balk metamateriaal en observeren een breed scala aan two-loop gedragingen. Opvallend is dat we nieuwe klassen van two-loops waarnemen die verder gaan dan die in onze numerieke waarnemingen, met name met drie stabiele toestanden voor één enkele actuatievoer. Deze waarneming suggereert dat het mogelijk is om meerdere *bits* informatie in metamaterialen te coderen met slechts twee actieve activeringsplaatsen.

Dergelijke metamaterialen kunnen worden gebruikt voor een reeks toepassingen, waaronder, maar niet beperkt tot, *mechanische berekeningen* en *mechanische cryptografie*. Hoewel we in dit proefschrift voorbeelden van computing hebben laten zien, hebben we ook een Europees patent aangevraagd voor een mechanisch cryptografisch apparaat gebaseerd op onze niet-Abels metamateriaal. Cryptografie vereist een slot-en-sleutelmechanisme voor codering en decodering. Er bestaan in de literatuur al mechanische slot-en-sleutelmechanismen op basis van metamaterialen [71, 88]. Echter zijn ze niet sequentiegevoelig. Ze ontgrendelen wanneer ze worden voorzien van een vaste combinatie van mechanische ingangen. Onze eenheidscel kan daarentegen dienen als basis voor een slot-en-sleutelmechanisme dat alleen wordt ontgrendeld wanneer een vaste combinatie van mechanische invoer wordt geleverd in een *specifieke volgorde*. Dit nieuwe sequentiegevoelige slot-en-sleutelmechanisme dient als een ideale basis om een mechanisch cryptografisch apparaat te implementeren, waarvan de details te vinden zijn in onze patentaanvraag.