



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## Complex pathways in multistable matter

Meulblok, C.M.

### Citation

Meulblok, C. M. (2026, September 9). *Complex pathways in multistable matter*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/4309337>

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/1887/4309337>

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

# Samenvatting

## Hoofdstuk één

Materialen worden vaak gezien als passieve objecten die eenvoudig vervormen wanneer ze worden ingedrukt of uitgerekt. Toch gedragen sommige complexe materialen zich op veel verrassendere manieren: ze reageren niet alleen op krachten, maar kunnen ook op de *geschiedenis* van die krachten. Zulke geheugeneffecten onderscheiden ze fundamenteel van gewone materialen. Zelfs vertrouwde materialen zoals rubber of bepaalde metalen kunnen dergelijk geschiedenisafhankelijk gedrag vertonen, wat laat zien dat de fysica heel rijk en breed is.

## Hoofdstuk twee

Sommige complexe materialen reageren niet alleen op duwen of samendrukken, maar onthouden ook de volgorde en locatie van die actuaties. In dit hoofdstuk onderzoeken we wat er gebeurt wanneer zulke materialen op meerdere plaatsen en in verschillende volgordes worden geactueerd. Met behulp van een chain-like metamateriaal als modelsysteem laten we zien dat de respons niet alleen afhangt van waar en hoeveel vervorming wordt aangebracht, maar ook van de precieze volgorde. Het indrukken van bijvoorbeeld twee punten in een bepaalde volgorde kan leiden tot een volledig andere vorm dan wanneer dezelfde actuaties in omgekeerde volgorde wordt uitgevoerd (een *non-Abelian response*). Daarnaast kan het materiaal in de ene volgorde geleidelijk vervormen, terwijl het in een andere volgorde plotseling ‘popt’ (een *mixed-mode response*).

Om zulk actuaties-padafhankelijk gedrag te verklaren, identificeren we fundamentele bouwstenen van deze responsen, de zogenoemde *ancestor-descendant-sibling* triplets. Daarnaast maken we gebruik van graafgebaseerde representaties om deze padafhankelijke geheugeneffecten te beschrijven. Verder introduceren we een methode om de overweldigende complexiteit die ontstaat bij veel inputs te vereenvoudigen en beheersbaar te maken, waardoor het systeem beter te interpreteren, classificeren en ontwerpen is.

Naast de fysica laten we zien dat dit padafhankelijke gedrag kan functioneren als een vorm van natuurlijke berekening. Door actuaties als “inputs”

---

en de resulterende toestanden als “outputs” te beschouwen, kan het materiaal elementaire logische operaties uitvoeren en informatie opslaan, vergelijkbaar met een computercircuit. Opmerkelijk is dat één enkel materiaal meerdere mogelijke “circuits” kan bevatten, die kunnen worden omgeschakeld door de sterkte of locatie van de input aan te passen. Dit suggereert dat complexe materialen gebruikt kunnen worden voor nieuwe vormen van berekening direct in materie (*in-materia computing*) en werpt tegelijkertijd licht op hoe zulke materialen informatie opslaan en verwerken.

### Hoofdstuk drie

Wanneer materialen herhaaldelijk en cyclisch worden vervormd, komen ze doorgaans terecht in een eenvoudig herhalend patroon, bekend als een *limit cycle*. Sommige wanordelijke of gefrustreerde materialen vertonen echter exotischer gedrag, zoals lange *transients* (waarbij vele vervormingscycli plaatsvinden voordat een *limit cycle* wordt bereikt) of *multi-periodic limit cycles* (waarbij het herhalende patroon zelf uit meerdere cycli bestaat). Deze gedragingen zijn nog slecht begrepen, moeilijk te modelleren en lastig te reproduceren in ontworpen materialen. Om dit aan te pakken introduceren we *togglers*—een fundamentele eenheid die intrinsiek multi-periodiek is met periode twee. We laten zien dat collecties van interacterende *togglers* lange transients en grotere periodes kunnen vertonen (ook periode drie). We betogen dat *togglers* deel uitmaken van een bredere hiërarchie van bouwstenen, naast spins en hystérons, die samen een kader vormen voor het begrijpen, modelleren en ontwerpen van deze exotische gedragingen in gefrustreerde materialen. Deze hiërarchische benadering opent nieuwe strategieën voor het creëren van slimme materialen, met mogelijke toepassingen in zachte robotica, adaptieve structuren en mechanische berekening.

### Hoofdstuk vier

*Snap-through*-mechanismen zijn fundamenteel in de natuur, technologie en ook voor *togglers*. Bij geknikte balken wordt *snap-through* vaak veroorzaakt door een enkele duwer die de lengteas van de balk moet kruisen, wat beperkt hoe en wanneer de instabiliteit optreedt. In dit hoofdstuk introduceren we een duwer met twee contactpunten die *snap-through* eerder mogelijk maakt, waarbij de instabiliteit optreedt voordat de duwer de lengteas bereikt. Deze eigenschap is cruciaal voor de *togglers* van hoofdstuk drie. We gebruiken een modale-expansiebenadering om deze nieuwe klasse van *snap-through*-mechanismen te analyseren. Vervolgens laten we zien hoe de afstand tussen de duwer en de middellijn van de balk op het moment van *snap-through* kan worden gemaximaliseerd. Samen openen deze resultaten nieuwe mogelijkheden voor kwalitatieve en kwantitatieve controle over het *snap*-gedrag van geknikte balken, met potentiële toepassingen in mechanische sensoren, actuatoren en

---

metamaterialen.

## Hoofdstuk vijf

Sterk multistabiele materialen kunnen enorme hoeveelheden informatie opslaan en worden vaak gemodelleerd als een verzameling bistabiele elementen, oftewel *material bits*. Onafhankelijke controle over deze bits is cruciaal, maar bestaande methoden vereisen ofwel lokale en individuele toegang tot elk bit, of trage, meerstaps globale protocollen. In dit hoofdstuk introduceren we daarom *dynamic control*, een strategie die onafhankelijke manipulatie van bits mogelijk maakt via één enkele globale aandrijving, waarbij zowel de invoer als de snelheid waarmee deze verandert worden benut. We demonstreren dit op een roterend mechanisch platform, waarbij vijf material bits voldoende zijn om alle 26 letters van het alfabet te coderen met behulp van eenvoudige protocollen van één cyclus. Naast mechanische systemen is deze aanpak ook toepasbaar op vloeistoffen, elektronica en zachte robotica, en biedt daarmee mogelijkheden voor slimme, op afstand programmeerbare systemen.

