

Topologische mechanische metamaterialen

Mechanische metamaterialen zijn macroscopische structuren met ongebruikelijke eigenschappen - zie bijvoorbeeld ons [eerdere artikel](#) waarin Bas Overvelde uitlegde hoe we zulke metamaterialen kunnen “programmeren” zodat ze op de gewenste manier buigen, opvouwen, of juist stijf blijven. In dit artikel gaan we een stapje verder, en bekijken we hoe we de link kunnen leggen tussen mechanische metamaterialen en het wiskundige begrip topologie.

Topologische materialen

Topologie is de wiskundige studie van eigenschappen van een voorwerp of een systeem die niet veranderen als we dat object geleidelijk vervormen. Het bekende voorbeeld is dat van het koffiekopje en de donut: die kun je, omdat ze allebei precies één “gat” hebben, in elkaar vervormen zonder iets te hoeven “breken” of “plakken”. Met een donut en een voetbal lukt dat echter niet - die twee zijn dus topologisch verschillend.



Afbeelding 1. Topologie. Het bekende voorbeeld van een donut en een koffiekop die in elkaar vervormd kunnen worden: beide hebben één “gat”, en zijn dus topologisch equivalent. Afbeelding: [Wikipedia-gebruiker LucasVB](#).

Topologie, en [topologische materialen](#), zijn in de afgelopen vijftien jaar veel door natuurkundigen bestudeerd. Verschillende fases van een systeem kunnen onderscheiden worden door een zogeheten *topologische invariant*: iets dat je niet kan veranderen zonder iets drastisch te doen zoals een symmetrie van het systeem breken. Neem bijvoorbeeld een strook papier waarbij je de uiteinden aan elkaar plakt (afbeelding 2). Je kan vóór het plakken de strook een draai geven; het aantal keren dat je gedraaid hebt staat na het plakken vast en is een topologische invariant. Een papieren rondje zonder draai is dus topologisch anders dan eentje met een halve draai (180 graden) – de zogeheten Möbiusband – of eentje met twee van zulke halve draaien.



Afbeelding 2. Topologische fases van een strook papier. Drie verschillende topologische fases van papieren rondjes. De topologische invariant n is het aantal halve draaien dat de papieren strook is gedraaid voor het vastplakken.

In vaste stoffen bestaan er ook diverse soorten topologische fases, die leiden tot exotische materiaaleigenschappen. Denk hierbij aan eigenschappen als stroomgeleiding, warmtegeleiding, enzovoort. Deze interessante eigenschappen zijn soms ‘beschermd’ door de topologie van het systeem waardoor ze robuust zijn. Zulke eigenschappen hebben allerlei

mogelijke toepassingen voor toekomstige elektronica en zelfs quantumcomputers. Het is ook niet voor niets dat de [Nobelprijs van 2016](#) werd uitgereikt naar de grondleggers van onderzoek naar topologische fases in materialen!

Toch blijft de werking van zulke exotische topologische materialen moeilijk intuïtief te begrijpen. Hierbovenop moeten er vaak ingewikkelde berekeningen en metingen gedaan worden om de exotische eigenschappen überhaupt te kunnen zien. Recent werk in de richting van mechanische metamaterialen hoopt meer licht op topologische eigenschappen te werpen. In de rest van dit artikel geef ik twee voorbeelden van hoe je topologie “eenvoudig” kan zien in de mechanische eigenschappen van metamaterialen.

In één dimensie

Een van de eenvoudigste systemen waar topologie bij komt kijken is een eendimensionale keten van atomen met onverzadigde bindingen, wat wil zeggen dat er elektronen “over” zijn die langs de keten heen en weer kunnen bewegen. Wu-Pei Su, John Robert Schrieffer en Alan Jay Heeger bedachten aan het eind van de jaren 70 een model voor het gedrag van de vrije elektronen in zulke eendimensionale moleculen, en er werd aangetoond dat er in sommige gevallen aan de uiteinden van zo’n molecuul elektronen “vast komen te zitten”: een zogeheten *randtoestand*. Het aantal randtoestanden van de gehele keten is een topologische invariant, die niet kan veranderen zonder de structuur van de keten drastisch te veranderen. Wat er wél kan gebeuren is dat een randtoestand van het ene eind van de keten naar het andere eind getransporteerd wordt.

Om duidelijker te maken wat er hier aan de hand is zie je in de video hieronder hoe het mechanische equivalent hiervan werkt. Zo kan je zien dat er een randtoestand bestaat, die ook nog eens door de keten kan bewegen terwijl de rest van de keten stijf blijft. Aan het einde van de video zie je ook dat, net zoals wanneer je over de oppervlakte van een Möbiusband zou “rondlopen”, je ook hier meerdere keren moet rondgaan voordat je eindigt op hetzelfde punt – dezelfde toestand – waarmee je begonnen was.

Video 1. Randtoestanden. Randtoestanden in een eendimensionaal mechanisch metamateriaal.

Randtoestanden met een richting

Het eendimensionale systeem hierboven is natuurlijk betrekkelijk eenvoudig, maar randtoestanden komen ook vaak voor in topologische systemen met meer dimensies. In een tweedimensionale [topologische isolator](#) bestaat er bijvoorbeeld een stroom van ‘spin up’-elektronen (grosfweg: elektronen die “rechtsom tollen”) in één richting om de rand heen, en een stroom van “linksom tollende” ‘spin down’-elektronen in de tegenovergestelde richting. Er wordt dus netto geen lading verplaatst zoals in normale stroomgeleiding, maar er stroomt wel een zogeheten [spinstroom](#).

Deze spinstromen blijken maar in één richting te kunnen lopen, en als er een defect in de rand zit, lopen ze daar gewoon omheen. Het is jammer dat we de elektronen en hun spin niet direct kunnen zien bewegen, maar gelukkig kunnen we metamaterialen bouwen waar we niet naar stroomgeleiding, maar geleiding van beweging kijken. Zo hebben onderzoekers een metamateriaal gebouwd van gyroscopen (tolletjes), en laten ze zien dat er in hun gekozen configuratie een randtoestand kan worden gemaakt (een “aangeslagen” toestand) die altijd in dezelfde richting rond gaat, net zoals de spinstromen in tweedimensionale topologische isolatoren. Deze toestand blijft ook echt gelokaliseerd aan de rand van het systeem, en in het midden kan je zien dat er niets beweegt. De onderzoekers hebben zelfs een paar gyroscopen weggehaald (onder in de video) om te laten zien dat de randtoestand hier gewoon omheenloopt, net zoals die dat in een topologische isolator zou doen.

Video 2. Een mechanische spinstroom. De kleuren geven aan welke tolletjes er sterk tollen. De lokatie van die sterk tollende toestand loopt in één richting rond langs de rand van het systeem.

Hoe nu verder?

Deze twee voorbeelden laten alleen het begin van een heel nieuw onderzoeksgebied zien: dat van *topologische* mechanische metamaterialen. Het ontwerpen van zulke metamaterialen lijkt misschien alleen maar leuk knutselwerk, maar zulke mechanische versies van ingewikkelde quantummechanische effecten bieden belangrijk inzicht in de werking van zaken die we niet direct kunnen zien. Daarnaast kunnen slim ontworpen (topologische) mechanische metamaterialen allerlei praktische toepassingen hebben. Zo kunnen we met behulp van mechanische [topologische defecten](#) precies kiezen waar een

materiaal als eerste buigt of instort, en waar het juist stevig is. Ook kan een structuur waar bewegingen worden beperkt tot de randen natuurlijk heel handig zijn voor bijvoorbeeld schokdemping. Kortom: we staan aan het begin van een erg interessant onderzoeksgebied!