



OP WEG NAAR EEN ENERGIE- ZUINIGE SPIN- GOLFCOMPUTER

Iedere computerchip produceert warmte. Iedereen die wel eens een laptop op schoot heeft gebruikt, weet dat maar al te goed. Om te voorkomen dat de warmteproductie de chip beschadigt, moet de rekensnelheid worden teruggeschroefd, wat de prestaties natuurlijk niet ten goede komt. Daarom is een computerchip die minder warmte produceert niet alleen energiezuiniger, maar ook sneller. En energiezuinigere computers zijn hard nodig, want computers en datacenters zijn verantwoordelijk voor minstens 5% van het globale energieverbruik.

Alternatieve computers

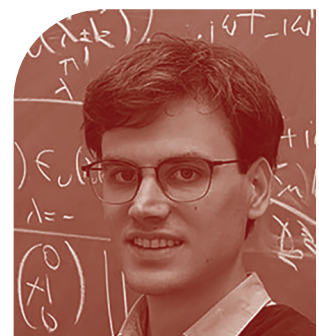
Er is daarom veel interesse in alternatieven voor de conventionele computerchip. Een van de mogelijkheden is het gebruik van spingolven, ook wel magnonen genoemd. Dit zijn uitwijkingen van de microscopische magnetische momenten – de spins – in een magnetisch materiaal, die zich als golven voortbewegen, zoals schematisch weergegeven in figuur 1. Spingolven zijn sinds de jaren dertig van de vorige eeuw uitvoerig theoretisch en experimenteel bestudeerd, maar de focus is de afgelopen jaren verschoven richting spingolftoepassingen. Spingolven kunnen namelijk worden gebruikt om informatie te transporteren en kunnen daardoor geschikte kandidaten zijn om een computer te verwezenlijken. Met een belangrijk voordeel: spingolven vereisen geen elektrische stroom en zijn daarom per definitie energiezuiniger. Maar hier lopen we tegen een probleem aan, want spingolven voldoen niet aan een behoudswet en na enige tijd is de spingolf uitgedoofd. Dit komt doordat bij een botsing van de spingolf, bijvoorbeeld op een imperfectie, een roostertrilling of een andere spingolf, er impulsmoment wordt overgedragen aan het kristalrooster. Dit zorgt ervoor dat de spingolven uitdoven, wat het ontwerpen van een spingolfcomputer bemoeilijkt.

Topologische transporteffecten

Een mogelijke oplossing hiervoor is het gebruiken van spingolven die een topologisch karakter hebben, analoog aan de möbiusband in figuur 2. De topologische objecten zijn nu de banen door het materiaal die de spingolven kunnen volgen. In bepaalde kristalroosters vormen deze banen eenzelfde soort möbiusband [2]. Deze spingolven noemen we dan ook 'topologisch'. Ze hebben de bijzondere eigenschap dat bepaalde botsingen

met andere spingolven niet meer zijn toegestaan en kunnen daardoor over langere afstanden bewegen zonder uit te doven. Dat maakt ze erg interessant om te gebruiken in een mogelijke spingolfcomputer.

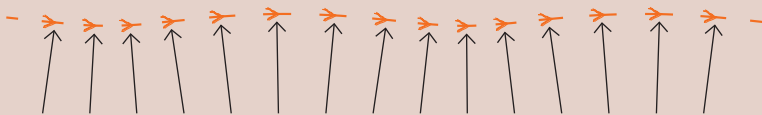
Topologische effecten in spingolfsystemen zijn nog niet experimenteel aangetoond, maar zouden gemeten kunnen worden door het systeem uit evenwicht te brengen en te kijken naar de resulterende respons. Iets minder ingewikkeld gezegd: door een transportexperiment. De magneet begint in evenwicht en nu slaan we aan één zijde de magneet aan, waardoor spingolven ontstaan die zich door de magneet gaan bewegen. Het topologische effect betekent dat de spingolf die wordt aangeslagen niet recht op zijn doel afgaat, maar een rotatie meekrijgt. Intuïtief kan dit worden vergeleken met een tafeltennisspeler, die met een goede backhand het balletje een spin (draaieffect) kan meegeven. Het balletje beschrijft nu niet meer een rechte baan, maar wijkt af naar links of rechts. Analoog hieraan heeft een topologische spingolf een afwijking naar links of rechts. Een eenvoudig experiment – tenminste, eenvoudig om theoretisch te beschrijven – waarmee de topologische eigenschappen te meten zijn, is een vierpuntsmeting, zoals weergegeven in figuur 3. Links worden spingolven aangeslagen en het verschilsignaal van de bovenste en de onderste detector is dan het resultaat van de topologische afwijking. De rechterdetector functioneert hier als referentiesignaal. Dit experiment klinkt wellicht simpel, maar is niet eenvoudig uit te voeren. Dit komt omdat de spingolven continu botsen. Al deze botsingen zorgen ervoor dat de aangeslagen spingolf verstrooid raakt en zo wordt ook de afwijking uitgesmeerd. Om een topologisch effect



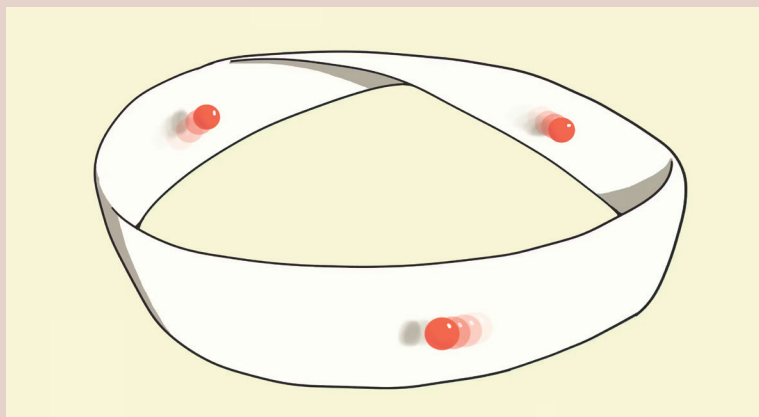
Pieter Gunnink voltooide zijn studie technische natuurkunde aan de Universiteit Twente in 2019. Zijn promotieonderzoek met een focus op niet-evenwichtstoestanden in topologische spingolfsystemen rondde hij af in 2023 aan het Instituut voor Theoretische Fysica van de Universiteit Utrecht onder begeleiding van Rembert Duine. Sindsdien werkt hij als postdoc aan de Johannes Gutenberg Universiteit in Mainz, Duitsland.
pgunnink@uni-mainz.de

MAGNONICS

Het gebruik van spingolven in magnetische materialen om informatie te verwerken wordt *magnonics* genoemd [1]. Hierbij zijn spingolven de informatiedragers. Het is daarmee mogelijk om de klassieke elektronische computer een-op-een na te bouwen, waarbij de spingolven de rol van bits spelen – een 1 of een 0. Het is alleen moeilijk om de spingolven zo te manipuleren zodat er berekeningen mee kunnen worden uitgevoerd. Een mogelijk alternatief is om gebruik te maken van het golfkarakter van de spingolven. Hiermee representeren de spingolven geen bits meer, maar is de informatie opgeslagen in de structuur van de golf. Bepaalde wiskundige computeroperaties zijn hiermee zeer efficiënt uit te voeren, zoals de Fouriertransformatie. Ook is het mogelijk om spingolven in te zetten voor neuro-morfische computers – waarmee het brein wordt nagebootst. Hier zijn op een efficiënte manier neurale netwerken mee door te rekenen. De huidige revolutie in kunstmatige intelligentie, die mede mogelijk is gemaakt door grote neurale netwerken, heeft deze onderzoeksrichting natuurlijk een oppepper gegeven. Deze alternatieve invalshoeken worden ook wel onconventioneel rekenen genoemd, omdat er geen bits meer aan te pas komen zoals in conventionele computerchips. Ook al is deze techniek flink sneller voor bepaalde operaties zoals een neuraal netwerk of een Fouriertransformatie, het is wel moeilijker om alle functies van een computer na te bootsen. Onconventionele rekenmethodes zullen dus waarschijnlijk hun toepassing vinden als specialistische circuits, die bepaalde taken van een conventioneel elektronisch computercircuit overnemen. Is de snelheidswinst echter voldoende dan is het gebruik natuurlijk interessant.



Figuur 1. Een spingolf bestaat uit afwijkingen van de individuele spins (zwarte pijlen) in een magneet, die zich als een golf door het materiaal bewegen.



Figuur 2. Een möbiusband, gemaakt door de uiteinden van een papieren strook met elkaar te verbinden, nadat het ene uiteinde 180° gedraaid is. Een möbiusband heeft maar één zijde: een balletje dat begint te rollen over de band komt vanzelf terug op zijn beginpositie, maar heeft wel alle kanten van het papier geraakt. Bij een gewone papieren strip is dit niet mogelijk en dus zijn deze twee voorwerpen topologisch gezien verschillend. Bron: vrij naar Sketchplanations.com.

te zien moeten de spingolven dus worden gemeten op een zeer korte afstand, omdat ze dan nog maar weinig botsingen hebben ondergaan.

Het is echter ook mogelijk om de diffusie van spingolven te meten (zie kader *Spingolfdiffusie*). In deze situatie kijken we juist naar wat er gebeurt na heel veel botsingen. Tussen die botsingen in bewegen de topologische spingolven zich zoals we hebben beschreven en hebben dus een afwijking naar links of rechts. We kunnen ons daarom het volgende experiment voorstellen. Eerst wordt lokaal de concentratie spingolven verhoogd. Door diffusie spreidt deze verhoging zich als een olievlek uit over de rest van het systeem, wat kan worden gemeten in een vierpuntopstelling. Wij hebben laten zien dat het topologisch karakter van spingolven zich vertaalt in een meetbaar verschil tussen de bovenste en onderste detector [3].

Niet-evenwichtstoestand

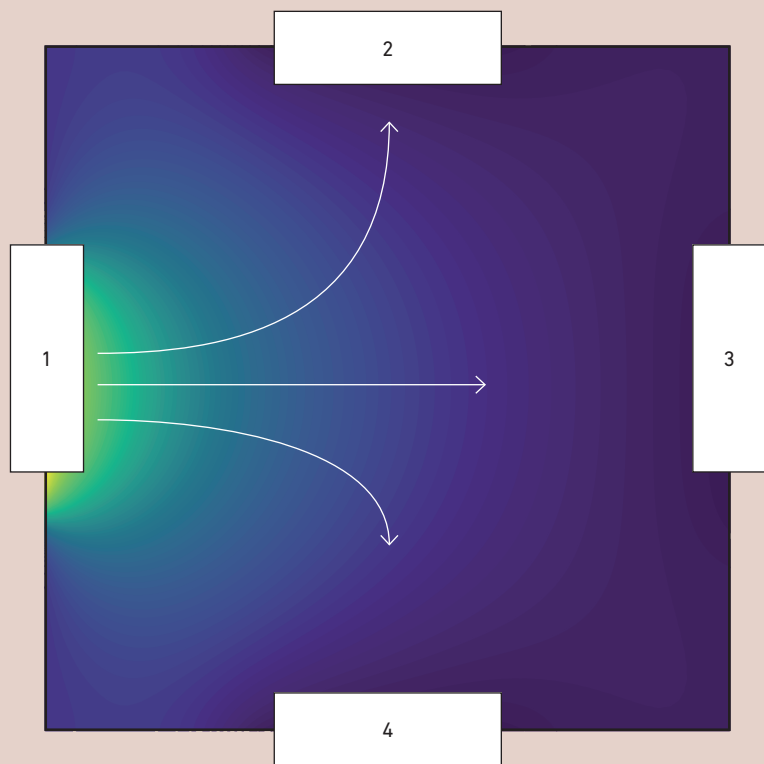
Er is nog een verbazingwekkend effect geassocieerd met de topologische spingolven, naast de rotatie zoals hierboven beschreven. Dit topologische effect – dat voor het eerst ontdekt werd in elektronensystemen – heeft een nogal contra-intuïtieve uitwerking: er ontstaan op de randen van het systeem extra toestanden. Deze randtoestanden hebben een bijzondere eigenschap, want het is niet mogelijk ze te vernietigen door op de rand een stukje materiaal weg te halen. Dit is in schril contrast met gewone spingolftoestanden die zich midden in het materiaal bevinden, want deze worden verstrooid door een missend stukje materiaal en andere onzuiverheden. Een topologische randtoestand beweegt zich er echter gewoon omheen en is dus zeer robuust. We noemen dit dan ook de topologische bescherming. Er is echter een probleem: in de meeste materialen die mogelijk topologische spingolvmaterialen zijn, bevinden de topologische spingolven zich op hoge frequenties, rond de terahertz (10^{12} Hz). Dat maakt het erg moeilijk om met ze te werken en topologische spingolven zijn daarom

ook nog niet direct gemeten. Om toch de topologische spingolven te kunnen gebruiken hebben we een mogelijke strategie voorgesteld om ze te verlagen in frequentie [5]. Hierbij kunnen we gebruikmaken van een handige eigenschap van spingolfsystemen: ze zijn makkelijk extern te beïnvloeden. Dat maakt het mogelijk om een niet-evenwichtstoestand te ontwerpen, waarbij de spins in tegen-gestelde richting ten opzichte van een extern magneteveld staan. Normaal gesproken zouden in zo'n situatie de spins zich omdraaien om parallel aan het externe veld te gaan staan. Door middel van een extern krachtmoment op de spins – in dit geval uitgeoefend door een metallische laag – is het echter mogelijk om deze situatie te stabiliseren, resulterend in laagfrequente topologische spingolven. Dit is tekenend voor spingolfsystemen: deze bijzondere niet-evenwichtstoestanden zijn relatief gemakkelijk te realiseren omdat spingolfsystemen eenvoudig te manipuleren zijn, in dit geval door een metallische laag. Opvallend genoeg blijft de topologische bescherming intact in deze niet-evenwichtstoestand, een belangrijk resultaat in de zoektocht naar nieuwe manieren om topologische spingolven te manipuleren.

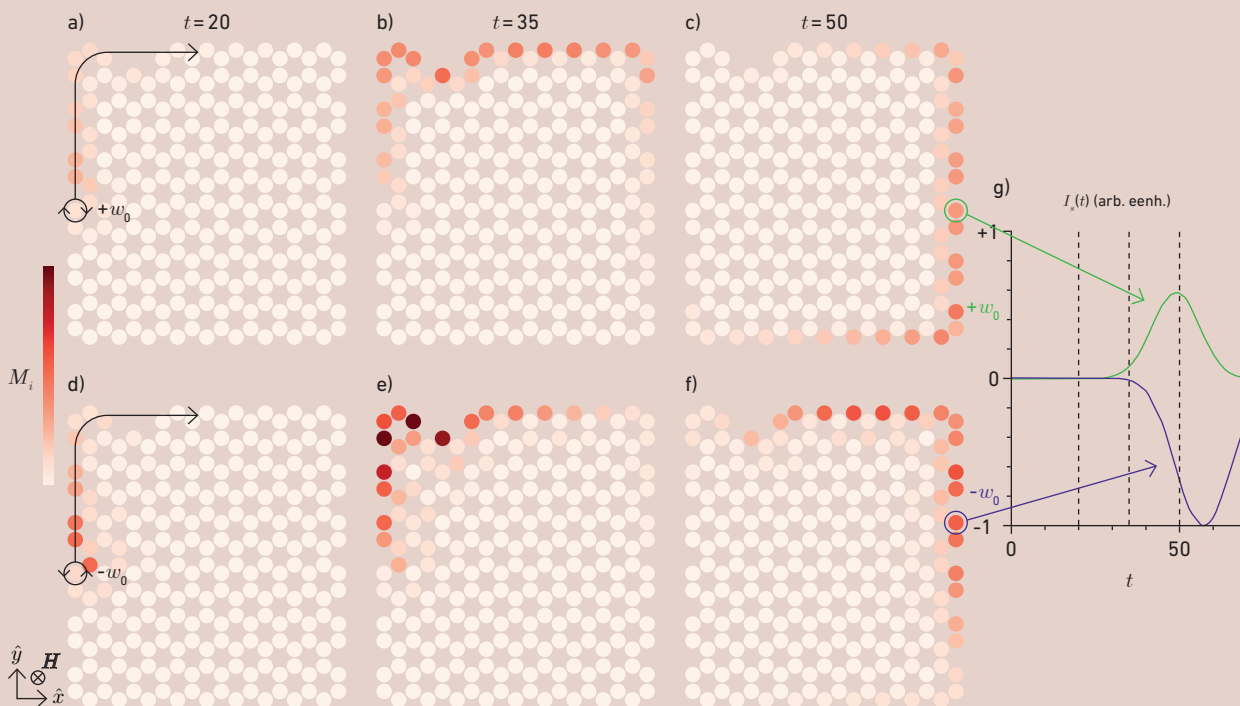
De niet-evenwichtstoestand leidt tot nog een ander opvallend resultaat. Het blijkt dat er nu in één systeem topologische spingolven met een positieve en een negatieve frequentie simultaan kunnen bestaan. Een negatieve frequentie betekent hier dat de individuele spins tegen de klok in draaien, in plaats van met de klok mee zoals bij een positieve frequentie. Beide spingolven hebben nog steeds dezelfde topologische eigenschappen, dus ze bewegen allebei over de rand en zijn topologisch beschermd. We laten dit zien in figuur 4, met een simulatie van twee spingolven met positieve (bovenste rij) en negatieve (onderste rij) frequentie. Een mogelijke toepassing van deze positieve en negatieve frequentie spingolven zou als bits in een spingolfscomputer kunnen zijn, waarbij de positieve en negatieve frequentie een 1 en een 0 representeren.

SPINGOLFDIFFUSIE

Voor typische spingolfsystemen zijn de meest voorkomende botsingen juist die botsingen met andere spingolven, waarbij het totale aantal spingolven behouden blijft, maar wel energie wordt uitgewisseld [4]. Dat betekent dat een spingolf heel vaak botst met een groot aantal andere spingolven, voordat het botst op iets anders. Vanuit de statistische thermodynamica weten we dat hierbij de spingolven een thermische distributie aannemen. Op een korte tijdschaal wordt de energie dus constant genivelleerd. Maar omdat het totaal aantal spingolven behouden blijft, kan er wel diffusie plaatsvinden. Een lokaal hoge concentratie spingolven kan zich zo verspreiden over het systeem. De diffusie kan over lange afstanden plaatsvinden en wordt niet beperkt door de botsingen van de spingolven, wat een groot voordeel is.



Figuur 3. Een voorstel voor een experimentele vierpuntsmeting, waarmee de topologische afwijking van de spingolven te meten is. Op plek 1 worden spingolven geïnjecteerd, waarna deze gemeten worden op plekken 2, 3 en 4. Als er een verschil tussen 2 en 4 wordt gemeten dan komt dat door de topologische afwijking van de spingolven. De detectie op plek 3 functioneert als een referentiesignaal. De kleurschaal geeft de lokale concentratie spingolven weer en de kleurschakeling betekent dus dat er diffusie plaatsvindt.



Figuur 4. Het aanslaan van een spingolf met positieve (a-c) en negatieve (d-f) frequentie ω_0 . De kleurschaal in de panelen geeft de lokale sterkte van de spingolf weer op drie opeenvolgende tijden. Het laatste paneel (g) geeft de rotatierichting van een spin op de rand weer, die wisselt van richting afhankelijk van of we een positieve of negatieve frequentie gebruiken.

Toekomst

Het veld van topologische spingolven staat feitelijk nog maar in de kinderschoenen. Een belangrijke stap is het experimenteel realiseren van een spingolfsysteem met topologische randtoestanden. Met een dergelijk systeem kunnen een aantal belangrijke voorspellingen van de theorie getoetst worden, zoals de topologische bescherming. Is er een topologisch spingolfsysteem gevonden, dan is de volgende stap het realiseren van nieuwe niet-evenwichtstoestanden. We hebben een voorbeeld gegeven van wat er theoretisch mogelijk is, maar er zijn nog veel meer niet-evenwichtstoestanden met interessante effecten, bijvoorbeeld periodiek aangedreven systemen. Hierdoor kunnen we ook meer leren over het samenspel van topologie en niet-evenwichtseffecten, iets wat maar beperkt mogelijk is in andere systemen, zoals fotonische of akoestische systemen. Al deze kennis

“Al deze kennis zou zich uiteindelijk kunnen vertalen in een praktische toepassing: een energiezuinige spingolfcomputer, mede mogelijk gemaakt door topologische spingolven.”

zou zich uiteindelijk kunnen vertalen in een praktische toepassing: een energiezuinige spingolfcomputer, mede mogelijk gemaakt door topologische spingolven.

REFERENTIES

1 A.V. Chumak et al., *Advances in Magnetism Roadmap on Spin-Wave Computing*, IEEE Transactions on Magnetism **58**, 0800172 (2022).

2 X.S. Wang en X.R. Wang, *Topological Magnonics*, J. Appl. Phys. **129**, 151101 (2021).
 3 P.M. Gunnink, R. A. Duine en A. Rückriegel, *Theory for electrical detection of the magnon Hall effect induced by dipolar interactions*, Phys. Rev. B **103**, 214426 (2021).
 4 L.J. Cornelissen, K.J.H. Peters, G.E.W. Bauer, R.A. Duine en B.J. van Wees, *Magnon spin transport driven by the magnon chemical potential in a magnetic insulator*, Phys. Rev. B **94**, 014412 (2016).
 5 P.M. Gunnink, J.S. Harms, R.A. Duine en A. Mook, *Zero-frequency chiral magnonic edge states protected by non-equilibrium topology*, Phys. Rev. Lett. **131**, 126601 (2023).