

# Data, data, data

**Een groot deel van onze digitale data is opgeslagen op magnetische informatiedragers. Nieuwe ontwikkelingen in het veld van de spintronica kunnen leiden tot toekomstige opslagmedia die de snelheid van flashgeheugens met de capaciteit en stabiliteit van harde schijven combineren. In mijn proefschrift heb ik de wisselwerking tussen spinstromen en magnetisatiedynamica bestudeerd. Hier beschrijf ik hoe we symmetrie-argumenten kunnen gebruiken om te voorspellen welke krachtmomenten er in systemen met spin-baan-koppeling kunnen voorkomen.** Erik van der Bijl

Iedere minuut wordt er honderd uur aan filmpjes geüpload naar YouTube [1]. Of het nu de 1,8 miljard keer bekeken Gangnam Style van Psy is of een grappige kat, al deze filmpjes moeten ergens worden opgeslagen. Alsof dat nog niet genoeg is, wordt, zoals we sinds kort weten, door overheidsdiensten ook nog eens opgeslagen wie waar en wanneer naar al deze filmpjes kijkt. In 2010 werd de mondiale jaarlijkse informatieproductie geschat op 1200 exabytes ( $1200 \cdot 2^{60}$  bytes). En dat terwijl de totale productie in 2002 nog op 2 exabytes werd geschat [2]. Deze exponentiële toename komt niet doordat we als mensheid zo veel creatiever geworden zijn maar puur door de technologische vooruitgang die het opslaan van informatie zeer goedkoop heeft gemaakt. In mijn proefschrift bestudeer ik processen die een grote rol kunnen gaan spelen in de volgende generatie opslagmedia.

## Magnetische opslag

Een groot deel van alle digitale informatie staat opgeslagen op harde schijven. Op een harde schijf is de informatie opgeslagen in een magnetisch materiaal. De nullen en enen worden gerepresenteerd door de oriëntatie van de magnetisatie. Bijvoorbeeld wanneer de magnetisatie in figuur 1 naar boven wijst, representeert zij een één en wanneer zij omlaag wijst een nul. Typische domeinen meten een paar honderd nanometer in de radiale richting van de schijf en tientallen nanometers in de leesrichting. De voordelen van harde schijven zijn dat informatie bewaard blijft wanneer het apparaat is uitgeschakeld en een hoge informatiedichtheid voor relatief lage kosten.

De overgang tussen twee magnetische domeinen wordt een domeinwand genoemd. Het blijkt mogelijk te zijn om door middel van stroompulsen de domeinwanden door de magneet te bewegen [3, 4]. Dit verschijnsel zou in de toekomst kunnen leiden tot een geheugenmodule waarbij niet het magnetisch materiaal beweegt, zoals in een harde schijf, maar waarbij de domeinen en dus de informatie zelf met snelheden van 100 m/s door de magneet racen. Dit type geheugen is als racetrackgeheugen gepatenteerd door IBM. Het zou de voordelen van harde schijven combineren met lees- en schrijfsnelheden die aangetroffen worden in geheugens gebaseerd op

transistors en de kosten per opgeslagen bit nog verder verlagen.

## Spin transfer torque

In mijn proefschrift laat ik zien dat de natuurkunde achter het racetrackgeheugen met een simpel model begrepen kan worden. In dit model wordt de magneet beschreven door twee deelsystemen: een magnetisatie-richting die veroorzaakt wordt door gelocaliseerde elektronen en mobiele elektronen die voor de stroomgeleiding zorgen. De magnetisatie en het intrinsieke magnetisch moment van de mobiele elektronen zijn gekoppeld. Het gevolg van de koppeling is dat het systeem de laagste energie heeft wanneer de magnetisatie en het moment van de elektronen parallel zijn. Wanneer het moment van de elektronen niet parallel is aan de magnetisatie-richting, zal het een precessiebeweging uitvoeren. Het intrinsieke magnetische moment van elektronen wordt veroorzaakt door hun spin; het intrinsieke impuls-moment van de elektronen. Door de koppeling van magnetisatie en elektronspin zal een elektrische stroom door een magneet gepolariseerd zijn, met de spinpolarisatie parallel aan de magnetisatie.

Wanneer we nu een stroom door twee aangrenzende magnetische domeinen met verschillende magnetisatie-richtingen beschouwen, dan verandert de spinpolarisatie van die stroom van parallel aan de magnetisatie-richting

112

Erik van der Bijl promoveerde begin 2014 op het proefschrift *Spin currents and magnetization dynamics in multilayer systems*. Momenteel werkt hij op de afdeling radiotherapie van het Antoni van Leeuwenhoek, waar hij zich bezighoudt met de planning van bestralingssplannen. Daarnaast is hij redactielid van het NTVN.



erikvdbijl@gmail.com

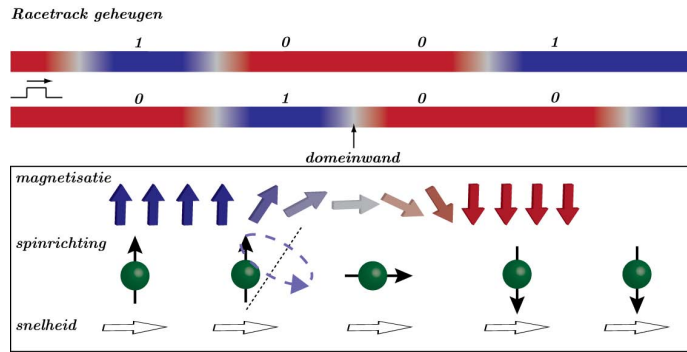
van de eerste magneet naar parallel aan die van de tweede, zoals geïllustreerd in figuur 1. De veranderende spinpolarisatie betekent dat het spinimpulsmoment dat door de stroom wordt meegevoerd verandert. Omdat het impulsmoment van het totale systeem behouden is, volgt dat het impulsmoment geassocieerd met de magnetisatie een even grote maar tegengestelde verandering moet ondergaan. Deze verandering van impulsmoment betekent dat er

een krachtmoment op de magnetisatie werkt. Dit krachtmoment – dat geïnduceerd wordt door een stroom – wordt een *spin transfer torque* genoemd. Op microscopische schaal wordt de spin transfer torque veroorzaakt door de componenten van de spinpolarisatie loodrecht op de richting van de magnetisatie. In een homogene magneet wijzen de spins van alle elektronen gemiddeld in de richting van de magnetisatie en dus zijn er geen loodrechte componenten en geen krachtmomenten. De loodrechte componenten van de polarisatie ontstaan wanneer de magnetisatierichting verandert als functie van de positie. In figuur 1 is dit geïllustreerd bij het tweede elektron van links. Een klein verschil tussen de spinrichting en de lokale magnetisatierichting leidt tot precessie om magnetisatierichting van de spin. Dit heeft een loodrechte component van de spinpolarisatie tot gevolg.

### Spin-baan-koppeling

Naast de spin transfer torque is er in bepaalde systemen ook een krachtmoment op een homogene magnetisatierichting waargenomen [5]. Een mogelijke verklaring voor dit krachtmoment is een spinpolarisatie veroorzaakt door spin-baan-koppeling van de elektronen.

Spin-baan-koppeling wordt in deze systemen veroorzaakt door het breken van een inversiesymmetrie langs een bepaalde as. Dit wil zeggen dat het systeem er verschillend uitziet wanneer het wordt gespiegeld in het vlak loodrecht op die as. Typisch bestaan de magnetische systemen die experi-



**Figuur 1** Illustratie van het voorgestelde racetrackgeheugen. Digitale informatie wordt gerepresenteerd door de richting van de magnetisatie. Door een stroompuls schuiven alle domeinwanden, en dus de informatie, in dezelfde richting. Daaronder een uitvergroting van een domeinwand en een elektron met de lokale spinrichting en snelheid. De precessie van de spinrichting rond de lokale magnetisatierichting leidt tot de loodrechte componenten die de *spin transfer torques* veroorzaken. Deze hebben tot gevolg dat de domeinwanden met de elektronen mee bewegen.

menteel bestudeerd worden uit verschillende gestapelde laagjes. Wanneer de laagjes die het magnetische laagje omringen van verschillende materialen of dikte zijn, is de inversiesymmetrie in de richting van stapelen gebroken. Een voorbeeld hiervan is het systeem in figuur 2 dat bestaat uit een stapeling van aluminiumoxide, kobalt en platina.

Langs de as van de asymmetrie kan in deze materialen een elektrisch veld bestaan. Voor de elektronen, die met een bepaalde snelheid door het materiaal bewegen, heeft dit veld een, door inductie veroorzaakte, magnetische component. Dit magnetische veld koppelt aan de spinrichting van de elektronen zoals ook de magnetisatie dat doet. Uit de details van de berekeningen volgt dat het door spin-baan-koppeling geïnduceerde magnetische veld (gele pijlen in figuur 2) loodrecht staat zowel op de bewegingsrichting van de elektronen, als op de as waarlangs de symmetrie gebroken is.

Spin-baan-koppeling kan dus geïnterpreteerd worden als de koppeling tussen de spin en een magnetisch veld die afhangt van de snelheid van het elektron. Wanneer een stroom door de magneet wordt aangelegd, is er een netto-snelheid van de elektronen. Dit leidt, door de bovengenoemde koppeling, tot een component van de spinpolarisatie in de richting van het door spin-baan-koppeling geïnduceerde veld (gele stippelijijn in figuur 2). Wanneer het geïnduceerde veld en de magnetisatierichting niet parallel zijn, resulteert dit in componenten van de spinpolarisatie loodrecht op de

richting van de magnetisatie. Het krachtmoment veroorzaakt door deze component wordt een *spin-orbit torque* genoemd.

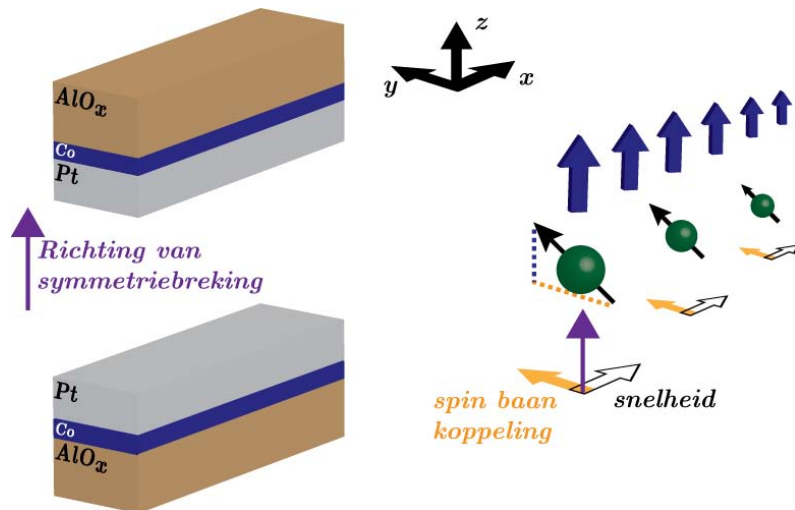
### Symmetrie

In mijn proefschrift laat ik zien dat wanneer er zowel spin-baan-koppeling als een positieafhankelijke magnetisatierichting is, er veel meer krachtmomenten op de magnetisatie werken dan alleen de bovengenoemde spin transfer torque en spin-orbit torque. Dit doe ik

op twee manieren, de eerste is door een analyse van de symmetrieën van het systeem. De tweede manier is gebaseerd op een berekening aan de hand van het hierboven geïntroduceerde model. Hier zal ik de eerste methode toelichten.

We hebben gezien dat krachtmomenten geïnduceerd worden door componenten van de spinpolarisatie loodrecht op de magnetisatierichting. Wanneer er geen spin-baan-koppeling is, zijn we bij de beschrijving van het systeem vrij om de richtingen van de magnetisatie en spins gezamenlijk willekeurig te draaien ten opzichte van de coördinaten in ons laboratorium. De relatieve oriëntatie van de magnetisatie en spins verandert hierdoor niet waardoor de krachtmomenten gelijk blijven.

Alle krachtmomenten die we voor dit systeem op grond van het bovenstaande argument mogen opschrijven moeten dus onafhankelijk zijn van onafhankelijke rotaties van de laboratoriumcoördinaten en van de magnetisatie- en spinrichtingen. Een aangelegd elektrisch veld  $E$  en de verandering van de magnetisatierichting  $\nabla_m$  draaien met de coördinaten van het laboratorium mee. Dit betekent dat de enig mogelijke krachtmomenten die eerste orde zijn in de verandering van de magnetisatierichting en het elektrische veld gegeven worden door  $\tau \propto (E \cdot \nabla)m + \beta m \cdot (E \cdot \nabla)m$ , waar  $\beta$  een constante is die de verhouding tussen deze twee krachtmomenten bepaalt. Onafhankelijke rotaties laten de relatieve orientatie van het elektrisch veld en de verandering



**Figuur 2** Links een systeem waar het magnetische kobalt tussen laagjes platina en aluminiumoxide zit. De blauwe pijlen geven de magnetisatie-richting weer. Een spiegeling langs de z-as laat duidelijk zien dat de symmetrie gebroken is. Dit zorgt voor een magnetisch veld geïnduceerd door de spin-baan-koppeling, geïllustreerd door de gele pijl, loodrecht op de richting van symmetriebreking en bewegingsrichting. De spinpolarisatie wijst in de richting van het gecombineerde veld van de magnetisatie en het veld dat is ontstaan door de spin-baan-koppeling. Het gevolg is een loodrechte component van de spinpolarisatie die voor een krachtmoment zorgt.

van de magnetisatie-richting ongewijzigd en de krachtmomenten roteren zo hetzelfde als de magnetisatie onafhankelijk van de geometrie van het substraat en de stroomrichting. Dit zijn de reactieve en dissipatieve spin transfer torques. Het dissipatieve krachtmoment, dat evenredig met  $\beta$  is in bovenstaande vergelijking, kan ook met het in de voorafgaande secties geïntroduceerde model gevonden worden. Naast de precessiebeweging moet dan ook de relaxatie naar de magnetisatie-richting worden toegevoegd aan de bewegingsvergelijking van de spin. De magnetische energie gaat dan verloren in bijvoorbeeld roostervibraties.

### Extra mogelijkheden

Als er spin-baan-koppeling is, hebben we niet meer de vrijheid om de magnetisatie en spinrichtingen onafhankelijk van ons laboratorium te draaien. Dit komt doordat de geïnduceerde spinpolarisatie niet langer alleen gekoppeld is aan de magnetisatie-richting maar ook expliciet aan de bewegingsrichting van de elektronen, zie figuur 2. Daarom moet een draaiing van magnetisatie- en spinrichtingen in dit geval altijd gecombineerd worden met een gelijke draaiing van het assenstelsel in het laboratorium. De eisen aan de mogelijke krachtmomenten zijn nu veel minder strict, omdat ze alleen onder een totale rotatie van het systeem gelijk moeten

blijven. Wanneer de magnetisatie-richting niet positieafhankelijk is, zijn er twee mogelijke krachtmomenten die lineair in het elektrisch veld en de sterkte van de spin-baan koppeling zijn. Deze worden gegeven door  $\tau \propto m \cdot (E \cdot z) + \beta' m \cdot (E \cdot z) \cdot m$ , waar  $z$  de as van symmetriebreking is en een constante is die de verhouding tussen de reactieve en dissipatieve spin-orbit torques weergeeft.

Deze krachtmomenten waren al bekend. Maar wanneer er naast spin-baan-koppeling ook een positieafhankelijke magnetisatie is, dan vinden we in de eerste orde van de sterkte van de spin-baan-koppeling al veertien extra mogelijke krachtmomenten naast de vier krachtmomenten die hierboven beschreven zijn. Deze krachtmomenten hangen af van het elektrische veld, de verandering van de magnetisatie en de richting van symmetriebreking. Ook voor al deze extra krachtmomenten geldt dat ze in paren van reactieve en dissipatieve krachtmomenten voorkomen. Deze paren worden steeds gevormd door een toegestaan krachtmoment en het vectorproduct tussen dit krachtmoment en de magnetisatie-richting.

De relatieve sterkte van alle krachtmomenten kan niet door middel van symmetrie-overwegingen bepaald worden. Uit berekeningen aan de hand van het model van magnetisatie-richting gekoppeld aan de spin van de elektronen kan de sterkte van de

krachtmomenten bepaald worden. En daaruit weer het effect op de beweging van domeinwanden.

De berekeningen laten zien dat de domeinwandsnelheid als functie van het elektrische veld kwalitatief behoorlijk kan verschillen. Dit is afhankelijk van de relatieve sterkte van alle door ons voorspelde krachtmomenten. Het is nu wachten op metingen die uitsluitend kunnen geven welke combinatie van krachtmomenten de stroomgeïnduceerde beweging van de domeinwand het beste beschrijft.

### Toepassing

Om de domeinwanden door de magnetische draden te laten racen zijn behoorlijke stroomdichtheden nodig. Deze zijn zo groot dat zelfs op nanoschaal de draden behoorlijk verhit worden door Ohmse dissipatie. Daarom hebben we ook het effect van temperatuurgradiënten op de krachtmomenten bestudeerd.

Het blijkt een behoorlijke uitdaging om thermische effecten in systemen met spin-baan-koppeling uit te rekenen. Wanneer we de lineaire respons van een systeem willen uitrekenen als functie van een temperatuurgradiënt lopen we tegen een term aan die zich onfysisch gedraagt. In de limiet dat de temperatuur naar nul gaat zou er een oneindig krachtmoment zijn en thermisch geïnduceerde stroom gaan lopen. In mijn proefschrift bestudeer ik de oorsprong van deze term en laat ik zien hoe de berekening hersteld kan worden.

Het is spannend of de extra krachtmomenten experimenteel aangetoond kunnen worden en of het racetrackgeheugen de geheugentechnologie van de toekomst gaat worden.

### Referenties

- 1 [www.youtube.com/yt/press/statistics.html](http://www.youtube.com/yt/press/statistics.html).
- 2 *Special report: Managing Information, The Economist*, februari 2010.
- 3 J.C. Slonczewski, *Current-driven excitation of magnetic multilayers*. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **159**, L1 (1996).
- 4 L. Berger, *Emission of spin waves by a magnetic multilayer traversed by a current*, *Phys. Rev. B* **54**, 9353 (1996).
- 5 I.M. Miron et al., *Perpendicular switching of a single ferromagnetic layer induced by in-plane current injection*, *Nature* **476**, 189 (2011).