

University of Groningen

## Thermoelectric effects in magnetic nanostructures

Bakker, Frank Lennart

**IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.**

*Document Version*

Publisher's PDF, also known as Version of record

*Publication date:*

2012

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

*Citation for published version (APA):*

Bakker, F. L. (2012). *Thermoelectric effects in magnetic nanostructures*. s.n.

### Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

### Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

*Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.*

---

## Samenvatting

Het transport van negatief geladen elektronen in vaste-stof nanostructuren (ook wel devices genoemd) is essentieel voor het functioneren van diverse elektrische apparaten en in het bijzonder voor moderne computers. Wanneer een spanning wordt aangelegd tussen twee punten op een metallische geleider, beginnen de vrije elektronen te bewegen in de richting van de positieve pool. Dit leidt tot een stroom van lading (een elektrische stroom). Ten gevolge van het enorme aantal elektronen dat beschikbaar is voor geleiding in metallische systemen beweegt zo'n wolk van elektronen zich slechts heel langzaam door het materiaal, met een fractie van een millimeter per seconde voor alledaagse stromen. Desalniettemin is de gemiddelde snelheid van een enkel elektron erg groot, ongeveer een fractie van de lichtsnelheid ( $c = 300.000.000$  m/s). Dit grote contrast wordt veroorzaakt door de grote hoeveelheid botsingen die elektronen onderling hebben en maakt het systeem diffuus. Zo'n systeem gedraagt zich als een gas is, een elektronengas. Als in plaats van een spanning een temperatuurverschil wordt aangelegd tussen de twee uiteinden van een geleider, dan draagt het elektronengas bij aan het transport van energie (warmte) door de geleider. Warme elektronen kunnen hun energie overdragen aan naastgelegen (koudere) elektronen tijdens botsingen en op deze manier een warmtestroom veroorzaken, zonder dat elektronen zich daadwerkelijk fysiek verplaatsen van het ene uiteinde naar het andere. Omdat zowel ladingstransport als warmte-transport eigenschappen van het elektronengas zijn, is het niet verbazingwekkend dat er een interactie bestaat tussen beide vormen van transport. Deze interactie wordt thermo-elektriciteit genoemd en beschrijft het opwekken van een spanning ten gevolge van het aanleggen van een temperatuurverschil (Seebeck effect) en het omgekeerde effect, verwarmen of koelen door middel van ladingstromen (Peltier effect).

Naast lading en energie, bezitten elektronen nog een derde eigenschap: de elektronenspin of kortweg spin. Deze kwantummechanische spin beschrijft het impulsmoment dat wordt geassocieerd met het elektron. Omdat een elektron zowel een spin als een lading heeft, gedraagt het zich als een magneetje met een intrinsiek magnetisch moment. Het transport van elektronen impliceert dus automatisch een stroom van magnetisch moment, ook wel spinstroom genoemd. Indien de richtingen van al deze magnetische momenten volledig willekeurig georiënteerd zijn, heeft een ladingstroom geen spinstroom tot gevolg. Dit is echter niet het geval in magnetische materialen waar het merendeel van de elektronenspins in dezelfde richting wijzen en samen de magnetisatie vormen. Een ladingstroom in een magnetisch materiaal leidt daarom wél tot het transport van spin, oftewel magnetisme. Indien deze stroom vervolgens in een naastgelegen niet-magnetisch metaal terechtkomt, neemt het zijn magnetisch moment mee. Hierdoor kunnen effectief spins geïnjecteerd worden en wordt het niet-magnetisch metaal dus licht magnetisch. Zulke spins kunnen in metalen maar over zeer korte afstanden (enkele honderden nanometers) overleven, waarna een relaxatie mechanisme zorgt voor het verdwijnen van deze niet-evenwichtssituatie. Het onderzoek naar dit soort effecten is daarom alleen mogelijk in nanostructuren. De relatie tussen lading en spin heeft geleid tot het ontstaan van het onderzoeksveld van spin-gebaseerde elektronica (afgekort: spintronica). Het gebruik van de spin in plaats van de lading voor het verwerken en opslaan van informatie biedt nieuwe mogelijkheden en creëert functionaliteit voor toekomstige spintronica devices die voorheen niet bestond.

Dit proefschrift beschrijft de fundamentele interacties tussen de drie vormen van transport (lading, warmte en spin) in magnetische nanostructuren opgebouwd uit metallische elementen. Het beschreven werk is een onderdeel van een breder onderzoeksgebied dat spin-caloritronica wordt genoemd. Deze onderzoeksrichting bestudeert de koppeling tussen warmte- en spintransport in verschillende materialen, variërend van metalen tot ferromagnetische isolatoren. De spin-caloritronische experimenten die worden behandeld in dit proefschrift zijn gebaseerd op de spinafhankelijkheid van de reguliere thermo-elektrische effecten, zoals bijvoorbeeld het Seebeck en Peltier effect. Voor de beschrijving van het transport in spintronische devices worden de elektronen in het algemeen opgesplitst in twee transportkanalen. Een spin-up kanaal voor de elektronenspins die in de richting van de magnetisatie wijzen en een spin-down kanaal voor de elektronenspins die tegengesteld aan de magnetisatie gericht zijn. Spins die niet collineair georiënteerd zijn met de magnetisatie, kunnen slechts voor zeer korte tijd overleven en worden daarom meestal niet meegenomen in de beschrijving. Over het algemeen heeft het spin-up kanaal een grotere geleiding in ferromagnetische materialen, omdat dit kanaal meer elektronen bevat dan het spin-down kanaal. Wij hebben experimenteel aangetoond dat

eenzelfde benadering ook opgaat voor thermo-elektrische effecten. Het blijkt zo te zijn dat in een magnetisch materiaal de twee spin kanalen beide een ander Seebeck en Peltier coëfficiënt hebben. Hierdoor kunnen spin-thermoelektrische effecten plaatsvinden zonder dat er een ladingstroom nodig is. Wanneer een temperatuurgradiënt wordt aangelegd tussen de twee uiteinden van een ferromagneet wordt een spinstroom gegenereerd, die wordt gedreven door het verschil in de Seebeck coëfficiënten voor spin-up en spin-down. Deze spinstroom is een pure spinstroom wat betekent dat er geen ladingstroom mee geassocieerd is. De spinstroom kan bijvoorbeeld worden toegepast als een thermische bron voor spins in toekomstige spintronische devices. Omgekeerd hebben we laten zien dat een spinstroom die wordt geïnjecteerd in een magnetisch materiaal kan leiden tot een warmtestroom, gedreven door de spin-afhankelijke Peltier coëfficiënt. Dit principe biedt nieuwe functionaliteit in de vorm van magnetisch programmeerbare verwarming en koeling met behulp van spinstromen.

Naast spin-afhankelijke thermo-elektrische effecten zijn de reguliere Seebeck en Peltier effecten op de nanoschaal een interessant studie object. Op zeer korte lengteschalen werken klassieke fysische modellen vaak niet meer door de toenemende invloed van kwantummechanische effecten op de nanoschaal. We hebben daarom experimenteel het Seebeck en Peltier effect onderzocht in magnetische en niet-magnetische nanostructuren en dit vergeleken met numerieke computersimulaties. Het blijkt dat, ondanks het feit dat de grootte van onze devices nagenoeg de vrije padlengte van de elektronen benadert, het systeem nog steeds goed beschreven wordt door de klassieke vergelijkingen voor lading- warmtetransport. Daarnaast hebben we aangetoond dat thermo-elektrische effecten verantwoordelijk zijn voor de spin-onafhankelijke spanningen die vaak aanwezig zijn in metingen van magnetische nanostructuren, bijvoorbeeld in niet-lokale spinleppen. De numerieke simulaties die zijn uitgevoerd bestaan uit 3D eindige-elementen berekeningen waarbij gebruik is gemaakt van een diffuus transportmodel gebaseerd op de wetten van Ohm en Fourier. Voor de spin-afhankelijke thermo-elektrische effecten is dit model uitgebreid naar een twee (spin) kanalen model.

De tot dusver besproken effecten zijn allemaal stationair, ze variëren niet in de tijd. Het ompolen van de magnetisatie of de precessionele beweging van de magnetisatie zijn echter dynamische effecten. De stabiele precessie van de magnetisatie van een ferromagneet wordt ook wel ferromagnetische resonantie genoemd en dergelijke effecten maken nieuwe spintronische concepten mogelijk. Het overbrengen van het impulsmoment van een niet-magnetisch metaal naar een naastgelegen ferromagneet (spin-injectie genoemd) leidt tot een impulsmoment op de magnetisatie van de ferromagneet en kan uiteindelijk ferromagnetische resonantie veroorzaken. Andersom kan een precederende magnetisatie spins in een naastgelegen niet-

magnetisch metaal pompen, vergelijkbaar met een spin-batterij. In dit proefschrift is het experimentele werk gefocust op de koppeling tussen magnetisatiedynamica en warmte, een ander deelgebied van spin-caloritronica. De warmtegeneratie ten gevolge van de demping gedurende ferromagnetische resonantie is bestudeerd en gemeten met thermo-elektrische technieken. Deze nieuwe techniek voorziet in een alternatieve methode voor het karakteriseren van ferromagnetische resonantie in een materiaal en is zowel toepasbaar in geleidende als niet-geleidende media.

De meerwaarde van deze spin-caloritronische effecten ligt, ten opzichte van reguliere thermo-elektrische effecten, in het gemak van het controleren van de magnetische textuur op de nanoschaal. Dit biedt daarom een sterk gelokaliseerde en programmeerbare controle over warmtestromen en zou bruikbaar kunnen zijn voor het genereren van thermo-elektrische energie of voor koeling. De gemeten effecten zijn echter nog steeds erg klein en zijn nog ver weg van directe toepassingen. Desalniettemin zouden nieuwe ontwikkelingen binnen dit onderzoeksveld gecombineerd met het verkennen van nieuwe materialen op een dag kunnen leiden tot de implementatie van spin-caloritronica in onze dagelijkse elektronische apparatuur.