

## Wetenschap in wonderland : over nanometers en femtoseconden in technologisch perspectief

**Citation for published version (APA):**

Koopmans, B. (2004). *Wetenschap in wonderland : over nanometers en femtoseconden in technologisch perspectief*. Technische Universiteit Eindhoven.

**Document status and date:**

Gepubliceerd: 01/01/2004

**Document Version:**

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

**Please check the document version of this publication:**

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

**General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

[www.tue.nl/taverne](http://www.tue.nl/taverne)

**Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

[openaccess@tue.nl](mailto:openaccess@tue.nl)

providing details and we will investigate your claim.

**TU/e**

technische universiteit eindhoven

Intreerede  
16 april 2004

prof.dr. B. Koopmans

# wetenschap in wonderland

over nanometers en  
femtoseconden in  
technologisch perspectief

/ faculteit technische natuurkunde

---

Intreerede

Uitgesproken op 16 april 2004  
aan de Technische Universiteit Eindhoven

# wetenschap in wonderland

over nanometers en  
femtoseconden in  
technologisch perspectief

prof.dr. B. Koopmans

# Wonderland

Alice did not feel encouraged to ask any more questions about it: so she turned to the Mock Turtle, and said: "What else had you to learn?" "Well, there was Mystery," the Mock Turtle replied, counting off the subjects on his flappers, –"Mystery, ancient and modern, with Seography: then Drawling –the Drawling-master was an old conger-eel, that used to come once a week: *he* taught us Drawling, Stretching, and Fainting in Coils."

*the Mock Turtle's story*

tekst<sup>1</sup>: *Alice in Wonderland*, Lewis Carroll

Muziek<sup>2</sup>: Bill Bruford



## **Mijnheer de Rector Magnificus, dames en heren,**

Een stukje inspirerende onderwijsvernieuwing als begin. Dat leek me wel gepast in het kader van de lopende onderwijsdiscussies. Daarbij zal het betreffende muziekfragment bij weinigen onder u een gevoel van herkenning hebben opgeroepen. Het boek waarop het stuk is geïnspireerd, bij des te meer. Alice' reis door Wonderland beantwoordt aan generieke behoeftes van zowel kinderen als volwassenen. Een ieder hier in de zaal zal dat beamen. Het bevrijdende gevoel eens niet geregeerd te worden door de geldende wetten van de reguliere wereld om ons heen. Niet gehinderd door deze regels een nieuwe wereld te mogen scheppen waarin niets onmogelijk lijkt. Daartoe, desgewenst, een alternatieve logica in het leven roepend. De fantasie in de vrijloop laten. Maar toch uitkomend op een intern consistent wereldbeeld. Net wetenschap – zal ik betogen.

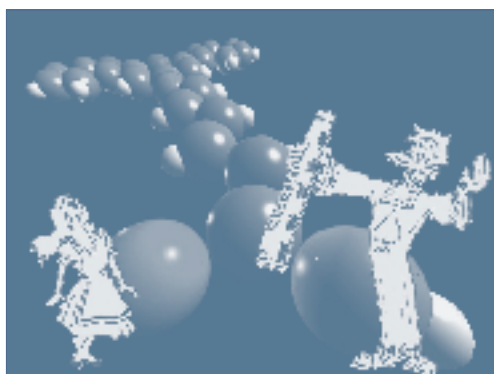
In haar reis door Wonderland raakt het zevenjarige meisje Alice regelmatig gefrustreerd. Haar eerste ervaringen met de schijnbare 'onlogica' in het land dat zij betreedt zijn confronterend. Het duurt enige tijd aler zij de additionele mogelijkheden ervan leert waarderen. Maar gaandeweg doorziet zij de nieuwe structuren, de alternatieve regelmaat, en verwerft zij het vermogen voorheen onbekende gereedschappen te beheersen. Zo leert zij naar believen te krimpen en te groeien. De gewenste proportie aan te nemen door het knabbelen van exact de juiste dosis paddestoelen, voorzien van het bordje 'eet mij'.

In mijn oratie neem ik u mee op een reis door een ander wonderbaar land. In deze reis wordt u begeleid door een moderne Alice. Samen met deze Alice krimpen we van onze reguliere lengte, een meter of twee, tot een duizendste ervan, een millimeter. Zo zien we een fruitvliegje recht in de ogen. Maar, kleiner en kleiner, gaan we, tot wederom een duizendste daarvan, een micrometer. We hebben dan de typische afmeting aangenomen van een bacterie, terwijl we opkijken tegen de flatgebouwen om ons heen die menselijke cellen heten. Maar nogmaals reduceren we onze afmetingen met een factor duizend,



tot eenduizendste micrometer, oftewel de ‘nanometer’ – en dan nog ietsje verder tot een paar tiende daarvan. Aldus hebben we het formaat aangenomen van een enkel atoom. Vanuit dit perspectief van de elementaire bouwsteen der materie kijken we vol verwondering om ons heen. Functionele macromoleculen en eiwitten torenen huizenhoog boven ons uit. Virussen als een imposant rotsmassief. Zelfs het nietige fruitvliegje heeft het formaat aangenomen van onze aarde!

“Nanoland”



De moderne Alice zal ons deelgenoot maken van de alternatieve logica –in dit geval zal ik liever van fysica spreken– die heerst binnen deze miniaturwereld. De wereld, die ik Nanoland had kunnen noemen, wordt geregeerd door de wetten van de Nanofysica. U zult kennis maken met de gereedschappen waarmee we deze nanowereld kunnen aanschouwen, en zelfs in staat zijn deze atoom-voor-atoom op te bouwen.

Daarnaast zullen technieken hun intrede doen waarmee de tijd lijkt ingevroren. In Nanoland blijkt zelfs de snelheid van het licht te temmen. Op deze wijze zijn we in staat processen te volgen die zich onmetelijk snel afspelen. Processen zoals het ontstaan van een chemische binding binnen een molecuul, of de tollende beweging van het magnetische moment van individuele atomen. Dit soort processen vastleggen op film. Daartoe hebben we een camera nodig die vele triljoenen beeldjes per seconde verwerkt, dat wel.

Ook in de roman van Lewis Carrol speelt *tijd* een belangrijke rol. Zoals op de fameuze ‘tea party’ waar de klokken van het gezelschap stilstaan. Tja, en dan blijft het immer vier uur in de middag – ‘tea time’ dus. Het is een voorbeeld van logica die ons vanuit onze alledaagse belevingswereld absurd voorkomt. Echter, het wordt ‘normaal’ wanneer geplaatst binnen het nieuwe perspectief. Zodra we ons van de alternatieve logica bewust zijn, gaat een wereld aan mogelijkheden open. Waarin plotseling plaats is voor een oneindige rijkheid aan nieuwe functionaliteit. De klassieke Alice leert croquet spelen met flamingo’s als clubs en opgerolde egels als ballen. De moderne Alice zal ons een ander spel demonstreren. Een spel met individuele atomen als bal, en een ‘STM-tip’ –ik zal later uitleggen wat dat is– als club.

In deze intrede zal ik eerst een beeld schetsen van de uitdagingen van *Nanoscience* in het algemeen. Vanuit dat perspectief volgt een persoonlijke visie op het huidige en toekomstige onderzoek binnen onze groep in Eindhoven. Over unieke expertise, uitdagingen, kansen en ook een beetje –vergeeft u mij– over mijn dromen. In deze benadering staat de interactie tussen drie doelstellingen, *klein*, *snel* en *functioneel*, centraal. Mogelijk heeft u deze drie in mijn introductie reeds herkend.

Naast de boeiende fysica, zal ik de rol van dit onderzoek binnen de maatschappij, de relatie met het onderwijs en de interactie met het bedrijfsleven kort belichten. Deze aspecten staan momenteel in het middelpunt van een heftig politiek en publiek debat. Het gaat er dan nog wel niet zo boud aan toe als in het oorspronkelijke Wonderland. Daar heerste immers een koningin die een ieder die haar pad kruiste letterlijk een kopje kleiner wilde maken. Maar roerige tijden in Nanoland zijn het zeker.

Bovenal zal ik proberen tenminste een fractie van mijn enthousiasme en fascinatie met u, mijn publiek, te delen. Fascinatie voor natuurkundig onderzoek in het algemeen, en voor het opereren op nanometerschaal in het bijzonder. Ik zal tevreden op deze middag kunnen terugkijken als een ieder de zaal verlaat met de gedachte die Alice bekwam bij haar ontwaken:

“*what a wonderful dream it had been*”.

Na deze algemene introductie, zal ik in het komende deel het onderzoeksgebied afbakenen en drijvende krachten identificeren. Daarmee wordt een kader geschapen voor een meer persoonlijk getint vervolg.

Men zou kunnen verwachten dat de ondergrens van het interessegebied dat ik vandaag beschrijf, wordt bepaald door de typische afmeting van een individueel atoom, enkele tienden van een nanometer. Echter, voor het ontwerpen van functionele en manipuleerbare entiteiten zijn per definitie ensembles van meerdere atomen noodzakelijk. Dergelijke functionele eenheden kunnen op complementaire wijze tot stand komen. Enerzijds via de synthese van complexe macromoleculen of supra-moleculaire structuren – een chemische benaderingswijze. Anderzijds via het artificieel modifieren van materialen tot op atomaire of nanometerschaal – een fysische benaderingswijze.

De chemische en fysische benaderingswijze hebben een typische lengteschaal van 1-100 nanometer gemeen. Zie hier het domein van de *Nanotechnologie* en *Nanoscience*. *Nanotechnologie*, gericht op de engineering van nieuwe materialen en devices voor implementatie in krachtiger, energiezuiniger of compactere producten. *Nanoscience*, strevend naar fundamenteel begrip van nieuwe processen en principes die optreden in de functionele nanostructuren.

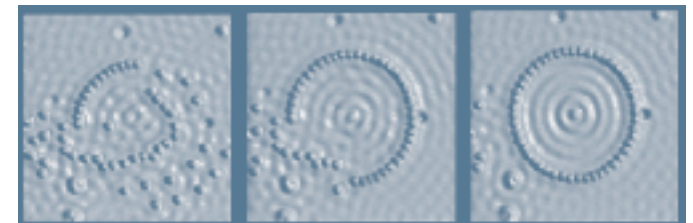
De definitie van nanoscience en -technologie bevat een aantal intrinsieke spanningsvelden, die enerzijds een eenduidige definitie bemoeilijken, maar anderzijds hun multidisciplinaire karakter benadrukken: *Bottom-up* (d.w.z. atoom-voor-atoom synthese) vs. *top-down* (d.w.z. reductie van grotere eenheid tot nanostructuur). Enerzijds, het gebruik van *zelfassemblage* door slechts de algemene condities te optimaliseren om een spontane assemblage op nanoschaal te stimuleren. Anderzijds, het *individueel adresseren* van nano-elementen en het creëren van artificiële structuren op atomaire schaal.

De techniek die vanuit het laatst gestelde oogpunt op meest directe wijze de ontwikkeling van de huidige nanotechnologie heeft mogelijk gemaakt is de zogenaamde *scanning tunneling microscope* – STM. Voor de ontwikkeling ervan, begin jaren tachtig, ontvingen Ernst Ruska, Gert Binnig en Heinrich Röhler van IBM Zürich de Nobelprijs (1986) voor de fysica.

De STM bestaat uit een ragfijne metallische tip uitmondend in een enkel atoom. Gepositioneerd op een afstand van ongeveer een nanometer van een preparaat, ontstaat een eindige kans dat elektronen door de isolerende vacuümbarrière breken, van tip naar preparaat. Dit zogenaamde ‘tunnelen’ van de elektronen kent geen analogie binnen het klassieke Newtoniaanse wereldbeeld. Een correcte beschrijving op atomair niveau vereist kennis van de zogenaamde kwantummechanica – een essentieel gereedschap voor de nanowetenschapper.

Onder invloed van een aangelegde spanning ontstaat een ‘tunnelstroom’ die op extreem snelle –exponentiële– wijze toeneemt bij nadering van de tip tot het preparaat. In de praktijk scant men de tip op een kleine afstand over het oppervlak. Daarbij wordt continu de hoogte dusdanig bijgesteld dat de stroom constant blijft. Hiertoe moet boven een atoom de tip een fractie worden teruggetrokken, en tussen twee atomen weer worden neergelaten. Door resulterende hoogteverschillen uit te zetten als functie van laterale positie ontstaat een atomair landschap.

Constructie van cirkel bestaande uit individuele ijzeratomen op een koperoppervlak met een STM<sup>3</sup>



Elke lichtvlek op een dergelijke weergave vertegenwoordigt één enkel atoom. Een fantastische prestatie, maar de mogelijkheden reiken verder. Op basis van een lokale stroom- vs. spanningsmeting kan in principe per atoom de elektronische toestand en aard van de chemische

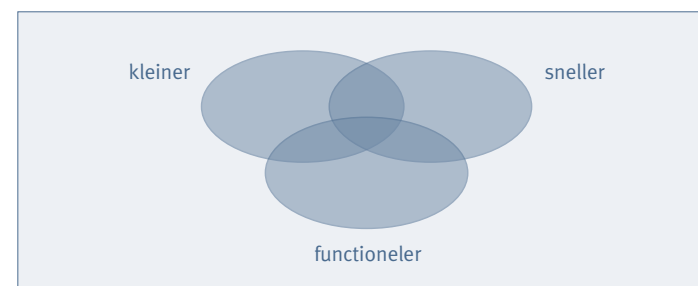
bindingen worden blootgelegd. Zelfs is STM niet gedoemd de rol te blijven vervullen van een passieve waarnemer. Individuele atomen en/of moleculen kunnen worden opgepikt met de tip en elders worden gedeponeerd. Of als een bal door een hockeystick worden voortgeduwd dan wel meegetrokken. Aldus worden structuren atoom-voor-atoom opgebouwd. Alice in Wonderland. Croquet op nanoschaal.

Later kom ik terug op nog recentere ontwikkelingen –varianten, of op STM gelijkende principes– die ons in staat stellen met steeds grotere perfectie te meten aan een immer breder spectrum van functionele eigenschappen. Hier switch ik van het onderzoeksinstrument naar de applicatie, en wel aan de hand van de revolutie binnen de ICT – de informatie- en communicatietechnologie.

Binnen de ICT hebben we reeds decennia lang kunnen waarnemen dat het aantal transistors per oppervlakte-eenheid op een computerchip toeneemt met een factor twee per twee jaar. De kenmerkende structuren op een chip zijn daarbij geëvolueerd van 2µm in 1984, 400 nm in 1994, tot 80 nm tegenwoordig. Als we deze wetmatigheid doortrekken naar de toekomst voorspelt dit 15 nm in 2014 en 3 nm in 2024. Het lijkt uitgesloten dat dergelijke dichtheden nog met de huidige siliciumgebaseerde technieken te halen zijn. Maar zijn er alternatieven? Een transistor van een paar nanometer is niet groter dan een flink organisch molecuul. Zou elektronica op basis van moleculaire schakelingen ontwikkeld kunnen worden? Dit zijn vragen waar onderzoekers zich wereldwijd op gestort hebben. Enerzijds de evolutie van huidige (siliciumgebaseerde) technieken naar kleinere lengteschalen. Anderzijds de revolutie naar geheel nieuwe principes, zoals implementatie van een moleculaire vorm van elektronica.

Tot zover heb ik de trend naar ‘kleiner en kleiner’ benadrukt. Echter, vanuit toepassingsperspectief is een hogere informatiedichtheid alleen interessanter als de toename van de verwerkingssnelheid gelijke tred kan houden. Daarnaast heerst vanuit fysisch perspectief het verlangen de dynamica van de processen op nanometerschaal beter te leren begrijpen. Aldus betoog ik dat ‘kleiner’ en ‘sneller’ intrinsiek bij elkaar horen. Beide aspecten krijgen echter pas hun ultieme waarde wanneer benaderd vanuit een functionele insteek. Grote uitdagingen bestaan in het creëren van een verbeterde functionaliteit en een integratie van

complementaire functies bij verdergaande miniaturisatie. Op chipniveau betekent dit integratie van de siliciumtechnologie met complementaire processtappen. Lab-on-a-chip voor chemische analyses op nanoschaal. Geïntegreerde biosensoren voor biomedische toepassingen. *Kleiner, sneller en functioneler.*



# Nanomagnetisme & spintronica

In het volgende deel van mijn rede zal ik nader ingaan op deze drie aspecten, vanuit een gemeenschappelijk wetenschappelijk en technologisch perspectief: fysica en applicaties van structuren met een steeds grotere functionaliteit, een steeds hogere capaciteit en snellere toegang. Ik zal mij beperken tot een specifiek thema binnen de nanotechnologie, aangeduid als: 'Nanomagnetisme en Spintronica'. Hierin zijn veel van mijn toekomstplannen in te delen, maar ook is het een schoolvoorbeeld van hoe nieuwsgierigheidgedreven fundamenteel onderzoek hand in hand kan gaan met technologische ontwikkelingen.

## Over functies en toepassingen

We maken in dit onderzoeksgebied gebruik van een specifieke eigenschap van elektronen. De elektronen, in het bijzonder de banen waarin zij rond de atoomkernen door het materiaal bewegen, bepalen nagenoeg alle eigenschappen van die materie: de mechanische eigenschappen, optische eigenschappen, elektrisch transport, et cetera.

Naast een negatieve lading hebben elektronen ook een klein magnetisch moment. Dat magnetische moment is het gevolg van het feit dat elektronen om hun as kunnen draaien en is daarom de 'spin' van het elektron genoemd. Een formele beschrijving in termen van de kwantummechanica stelt dat het elektron in exact twee toestanden kan voorkomen – één met spin op en één met spin neer, waarbij het linksom dan wel rechtsom draait.

In een brok magnetische materie ordenen zich de individuele spins volgens een zeker patroon. Als de omvang van een stuk magnetisch materiaal op extreme wijze tot in het domein van de nanometers wordt gereduceerd, veranderen de magnetische eigenschappen op niet-triviale wijze. Bijvoorbeeld, het atomaire magnetische moment kan veranderen, of er vindt overgang plaats naar een ander type ordening. Het daarbij betreden domein wordt *nanomagnetisme* genoemd.

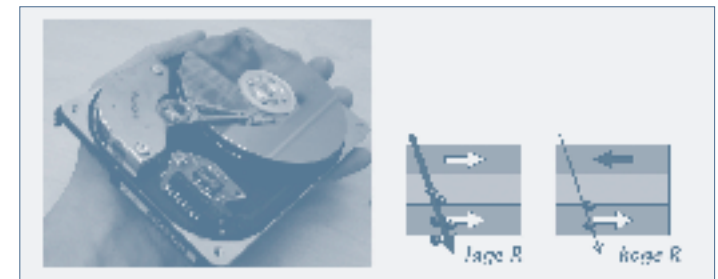
Een ander facet is gerelateerd aan het feit dat bewegende elektronen die

samen een elektrische stroom dragen allen een spin hebben. Nieuwe fenomenen –en daarmee nieuwe technologische mogelijkheden– doen hun intrede als we in staat zijn deze spin te temmen. Het elektrische transport is dan niet langer slechts te beïnvloeden door elektrische velden, maar ook door magnetische velden. Deze elektronica, waarin de elektronspin een cruciale rol speelt, is daarom spin-elektronica – of kort: *spintronica* – genoemd<sup>4</sup>.

Een stuk nanotechnologie pur sang is de hardeschijf in een PC. Een dergelijke eenheid bestaat uit een dataopslagmedium (de schijf) en een gecombineerde schrijf- en leeskop. De informatie op een harde schijf is op magnetische wijze gecodeerd. In feite is het opslagmedium een verzameling van miljarden kleine nanomagneetjes. De oriëntatie van de magnetische gebiedjes –naar links of naar rechts– representeert een binaire '0' of '1'.

De grote mate van verfijndheid van deze techniek wordt duidelijk wanneer we ons realiseren dat de opslagcapaciteit in de afgelopen tien jaar met een factor duizend (!) is toegenomen. We zijn vandaag even tevreden met een schijf van 100 Gbyte, als tien jaar geleden met een van 100 Mbyte. En dat scheelt wel een factor duizend aan informatie-inhoud – het verschil tussen een enkel boek en een boekenkast vol! In de richting langs de sporen (tracks) van het medium zijn daarbij de afmetingen van de magnetische domeinen afgenomen tot slechts enkele tientallen nanometers.

Hardeschijf (links) en magneto-weerstandsprincipe (rechts)



Er is een functionele vertaalslag nodig om de magnetische informatie





om te zetten in bruikbare elektrische signalen. Sinds het eind van de jaren 90 wordt hiertoe gebruik gemaakt van het zogenaamde ‘giant magnetoresistance’ (GMR). Dit fenomeen werd ontdekt in 1988 in de laboratoria van Albert Fert in Parijs en Peter Grünberg in Jülich. Hoewel geboren uit zuiver wetenschappelijke nieuwsgierigheid, was binnen tien jaar na dato de vertaling naar een state-of-the-art hardeschijftechnologie een feit – en sinds een jaar of vijf bezit elke PC een dergelijke GMR sensor! Een grote bijdrage aan de verkenning van de nieuwe principes is vanuit Eindhoven geleverd door Wim de Jonge (TU/e) en Reinder Coehoorn (Philips Research) en medewerkers.

Het hart van een dergelijk GMR element betreft een sandwich van twee ferromagnetische laagjes, bijvoorbeeld legeringen van nikkel, ijzer en kobalt, en een ultradunne niet-magnetische tussenlaag, bijvoorbeeld koper. Voor een dergelijke structuur hangt de elektrische weerstand af van de relatieve oriëntatie van het moment in de twee magnetische lagen. In het algemeen is de weerstand minimaal als de elektronenspin in beide lagen dezelfde oriëntatie heeft – allebei op of beide neer, d.w.z. een parallelle oriëntatie van de magnetisatie. Door engineering van een groot aantal ‘hulplagen’ verkrijgt men in de praktijk één vaste en één magnetisch vrije laag. De vrije laag richt zich als een kompasnaald naar de zwakke strooivelden van de magnetische bits in het medium. Met een leesfrequentie van een miljard bits per seconde wordt op deze wijze de magnetische oriëntatie vertaald in een werkbaar elektronisch signaal.

Het succes van GMR in applicatiegericht fundamenteel onderzoek wordt gezien als een belangrijke stimulans voor golven van nieuwe onderzoeksthema’s, gebaseerd op nieuwe principes. Golven die we vanuit Eindhoven vol overgave helpen lanceren. Het werk aan magnetische tunneljuncties (MTJs), een op GMR gelijkend principe berustend op een kwantummechanische tunnelstroom door een extreem dunne oxidische tussenlaag, is halverwege de jaren 90 gelanceerd. Inmiddels werken grote industriële consortia aan implementatie in een magnetisch random-access-memory (MRAM), van groot potentieel belang voor embedded systems. De MRAM bestaat uit een regelmatig netwerk van gecontacteerde MTJ-elementen, opgebouwd op een laag met halfgeleider (CMOS) technologie. Ieder element representeert een logische ‘o’ of ‘1’ afhankelijke van de parallelle dan wel anti-parallelle oriëntatie van de twee magnetische elektrodes.

Een derde golf, gericht op ‘spin-injectie devices’ is enkele jaren geleden gelanceerd, en beoogt een volledige integratie van halfgeleider-technologie met magnetische materialen. Voortgang hierin vereist een uitdagende integratie van elektrische, magnetische en optische technieken. Mede daarom beschouw ik deze ontwikkeling als bijzonder kansrijk voor onze eigen groep – maar daarover straks meer.

### **Kleiner en kleiner**

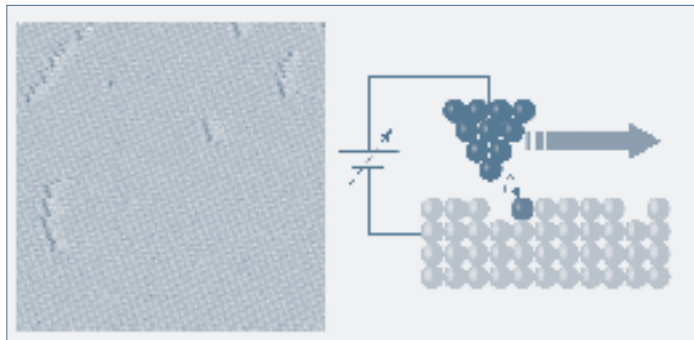
Na dit exposé over de functionaliteit van nanogestructureerde magnetische materie, zal ik allereerst het thema kleiner en kleiner in het specifieke licht van de magnetische functionaliteit beschouwen. Dit is het domein dat u aantreft in de linkerzijde van mijn generieke diagram.

Principes als het GMR effect en de magnetische tunneljuncties werken alleen als een of meerdere lagen een dikte hebben van niet meer dan één of een aantal nanometers. In de loodrechte richting behoren deze schakelingen daarmee intrinsiek tot de nanotechnologie. Met de toename van de opslagcapaciteit belanden de GMR sensoren ook in de laterale dimensie binnen het domein van de nanotechnologie. Hetzelfde geldt voor de MRAM dat reeds bij de marktintroductie verwacht wordt te bestaan uit individuele elementen van ruwweg 100 nanometer. In de jaren erop zal verdere miniaturisering plaats vinden. Echter, men voorziet dat het magnetische en elektrische transportgedrag van dergelijke elementen wel eens op fundamentele wijze gefrustreerd zou kunnen worden. Een wijze die direct op hun minimale omvang is terug te voeren. Sceptici vrezen thermische instabiliteit en een afwijkend schakelgedrag. Hier wachten ons volop uitdagingen voor onderzoek naar de elementaire processen op nanoschaal. Dergelijk onderzoek zijn we onlangs gestart in samenwerking met onze partners aan de TU in Delft en Twente, in het kader van het Nederlandse nanotechnologie-initiatief ‘NanoNed’.

Bij het kleiner worden van de devices gaat elk atoom tellen en bestaat de behoefte om meer en meer de magnetische oriëntatie van elk afzonderlijk atoom in kaart te brengen. Aan de ontwikkeling van een magnetische variant van de STM is in het bijzonder door de groep van Roland Wiesendanger te Hamburg meer dan een decennium lang met veel succes gewerkt. Het principe berust op het gebruik van een magnetische tip. Tezamen met de vacuümbaariere en een

magnetisch preparaat vormt dit in feite MTJ met atomaire dimensie. De tunnelstroom wordt wederom beïnvloed door de relatieve oriëntatie van spin in tip en atoom eronder. Aldus ontstaat een spin-opgelost beeld met atomaire resolutie. Het belang van deze techniek onderkend, zijn we momenteel bezig binnen onze groep deze techniek te ontwikkelen.

Principe van het manipuleren van magnetische kobaltatomen door een koperoppervlak (rechts). Een experimenteel resultaat is links weergegeven<sup>5</sup>



Wanneer elk atoom gaat tellen, ontstaat van nature de behoefte elk atoom artificeel te kunnen beïnvloeden. Ik heb u in mijn algemene verhandeling over STM reeds op deze mogelijkheden gewezen. Hier kan ik het niet laten u iets van onze eigen verkennende activiteiten op dit gebied te laten zien. Het betreft het schuiven van individuele (magnetische) kobaltatomen. Het bijzondere van dit experiment is echter, dat het een experiment bij kamertemperatuur betreft. En niet met kobaltatomen *op* een substraat, maar *in* het oppervlak van een koperpreparaat. Met de STM slepen we in feite kobaltatomen door de toplaag. Daarbij is het streven naar bereiken grotere kobaltclusters te genereren die stabiel zijn bij kamertemperatuur – iets wat ten gevolge van de hoge mobiliteit van atomen *op* een oppervlak onmogelijk is.

### Sneller en sneller

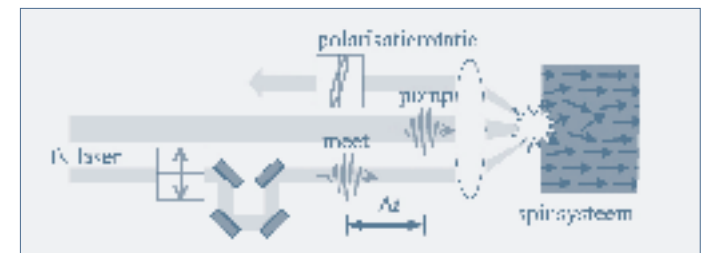
Zoals er een intrinsieke minimale lengteschaal is die het werk van de nanowetenschapper domineert, de nanometer – of het atoom, is er ook een intrinsieke tijdschaal. Ik zal enige voorbeelden geven van experimenten aan ultrasnelle dynamische processen in magnetische systemen, waarbij deze elementaire tijdschaal een rol speelt. We

belanden daarbij in het rechter deel van mijn generieke diagram.

De elektronische processen die voor een nanotechnoloog van belang zijn, betreffen elektronen in de buitenste schil van de atomen. Deze zijn verantwoordelijk voor chemische reacties, maar domineren ook elektrische en optische eigenschappen. De typische omlooptijd van deze elektronen rondom de kern betreft een *femtoseconde*, oftewel een miljoenste van een miljardste seconde. Op sub-fs tijdschaal is de elektronische vrijheidsgraad volledig ingevroren. Dit verklaart het gebruik van de femtoseconde naast de nanometer in de titel van mijn rede.

Daar waar het licht in een seconde 300.000 kilometer aflegt, reikt licht in een femtoseconde nog niet eens een micrometer. Toch biedt juist licht, i.h.b. korte laserpulsen, de mogelijkheid om processen bij een dergelijk onbegrijpelijk kleine tijdschaal in kaart te brengen. Het gebruik van gepulste lasers voor niet-lineaire en in een later stadium tijdsopgeloste experimenten vindt zijn oorsprong in het werk van o.a. Nicolaas Bloembergen in de jaren 60, waarvoor hij later de Nobelprijs ontving. De toepassing op supersnel (femtoseconde) magnetisme dateert echter pas uit 1996, met een pioniersrol voor Eric Beaurepaire uit Straatsburg<sup>6</sup>.

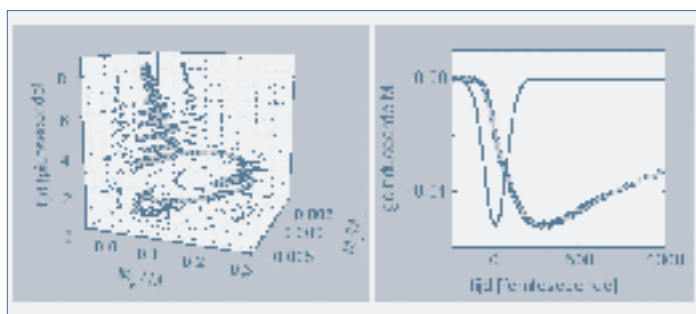
Magneto-optisch 'Pomp-meet' principe voor het bestuderen van ultrasnelle magnetische processen



In zo'n experiment wordt een medium met een eerste puls geëxciteerd, waarbij het spinsysteem plotseling uit zijn evenwichtstoestand wordt gebracht. De snelle evolutie van het spinsysteem na deze plotselinge excitatie wordt gemeten door na een zekere vertragingstijd een tweede laserpuls op het preparaat af te vuren. Door de uiterst kleine verandering te meten van de polarisatietoestand van het licht, die daarbij optreedt,

het Kerr effect, kan de magnitudo en oriëntatie van de magnetisatie worden gereconstrueerd. De tijdsvertraging wordt eenvoudig ingesteld door een spiegel over een afstand van een fractie van een micrometer tot tientallen centimeters te bewegen. Daarmee wordt de tweede puls tot een omweg gedwongen die correspondeert met enkele femtoseconden tot nanoseconden. Dit is juist het tijdsdomein waarbinnen de meest interessante magnetische processen zich afspelen.

Experimenteel beeld van het precederende magnetische moment in een nikkel-ijzer elementje (links?) en optische manipulatie van magnetisme in nikkel op een femtoseconde tijdschaal (rechts?)



Voor magnetische processen is de karakteristieke tijdschaal niet noodzakelijkerwijs in de orde van femtoseconden. Een magneetveld drijft een elektronspin in een precederende beweging, zoals een draaiende tol in het aardse zwaartekrachtsveld. De typische omlooptijd van deze beweging in een veld van 0,1 Tesla is ongeveer 1 ns. Deze tijdschaal is een van de limieten waartegen de recordingindustrie de komende jaren verwacht aan te lopen bij haar jacht op supersnelle magnetische geheugens. Het doel daar is een frequentie van minimaal een GHz – dat wil zeggen één leesactie binnen een nanoseconde.

Wereldwijd is een aantal onderzoeksgroepen de uitdaging aangegaan dergelijke magnetische processen middels optische technieken rechtstreeks, d.w.z. in het tijdsdomein, in kaart te brengen. Het beeld demonstreert een van onze eigen metingen aan een dun nikkel-ijzer elementje<sup>7</sup>. Daarbij wordt een van de interessante opties van deze optische techniek geïllustreerd: het simultaan meten van alle drie componenten van de magnetisatievector. Dit doen we in feite door licht met een sterk brekend microscoopobjectief vanuit een groot aantal

richtingen te laten invallen – en de verschillende richtingen afzonderlijk te analyseren. In de meting herkennen we de precessie rond een nieuwe evenwichtspositie nadat een korte magneetveldpuls, gegenereerd met een snelle pulsgenerator, arriveert. Nog voor het systeem langs de nieuwe evenwichtsrichting is uitgedempt, is de puls voorbij en zien we een precessionele terugkeer naar de oorspronkelijke toestand. Het hele experiment duurt slechts enkele miljardsten van een seconde!

Dergelijk onderzoek aan GHz dynamica beantwoordt sterk aan een industriële nood voor de komende jaren. Vanuit zuiver wetenschappelijke nieuwsgierigheid komt de vraag op: zijn we hiermee gekomen aan de ultieme grens van de spindynamica? Vanaf 1998 verkennen we in Eindhoven deze fundamentele limieten, gebruik makend van een volledig optisch schema. Een eerste laserpuls verhit de elektronen in het ferromagnetische materiaal. Vervolgens vinden elementaire interacties plaats met individuele roostertrillingen (fononen) en spinexcitatie (magnonen). De laatste corresponderen met het verstrooien van elektronen van de spin-op naar de spin-neer band in een elektronisch bandendiagram. De extra thermische wanorde leidt tot een reductie van het netto magnetische moment. Sinds enkele jaren weten we dat deze magnetische transformatie zich op een extreem snelle tijdschaal van minder dan 500 femtoseconde voltrekt – een factor 100 sneller dan tot tien jaar geleden werd verwacht!<sup>8</sup> Verder vonden we dat de simpele optische puls in een ferromagnetisch materiaal een grote variëteit aan magnetische excitatie teweegbrengt. Eén daarvan, een optische geïnduceerde magnetische precessie<sup>9</sup>, zou mogelijk toepassing kunnen vinden in optisch-geassisteerde magnetische recording. Hiermee is ook op dit front de symbiose tussen exploratief onderzoek en technologische relevantie tot stand gebracht.

Bijna aan het eind van de wetenschappelijke reis door Wonderland wordt het tijd voor een blik in de toekomst. Waar liggen de uitdagingen? Waar de mogelijkheden? Ik zal betogen dat kansen zich in het bijzonder voordoen in het epicentrum van mijn generieke diagram: het streven naar een gelijktijdige ultieme tijds- en ruimtelijke resolutie, in combinatie met nieuwe functionaliteit.

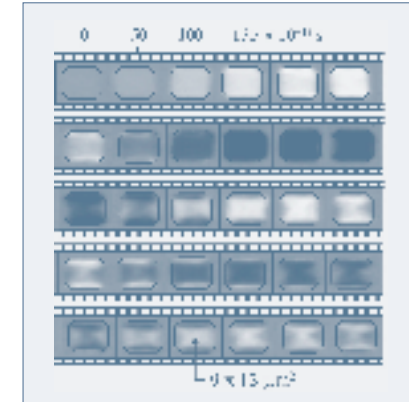
Allereerst wil ik terugkeren naar het experiment van de precederende magnetisatievector. Dit hebben we onlangs uitgebreid naar het gecombineerde ruimte- en tijdsdomein<sup>10</sup>. Aldus is de methode toegepast op een structuur van  $9 \times 13 \mu\text{m}^2$ , qua complexiteit gelijkend op een potentieel MRAM element. Bovenaan ligt een 'vrije' laag. Dan een nanometerdun oxide, de harde magnetische laag, gepind op een antiferromagnetische laag en additionele 'engineeringlagen' eronder. De korte magneetveldpuls wordt gegenereerd middels een smalle geïntegreerde geleider. De geïnduceerde dynamica in de vrije laag wordt opgepikt via een laserpuls die op het MRAM element gefocuseerd wordt.

De realistische opbouw van de structuur wekt niet alleen enthousiasme bij onze partner in dit werk, Philips Research, maar resulteert ook in een wetenschappelijk aantrekkelijke verrijking van de fysica. Er ontstaat competitie tussen diverse mechanismen waarop spins elkaar voelen. Het dunne oxide leidt tot een zwakke parallelle koppeling tussen spins aan weerszijden. Strooivelden aan de rand prefereren juist een antiparallelle ordening. Tenslotte zien spins een afwijkende magnetische omgeving daar waar de spins parallel of loodrecht aan de rand staan.

Het resultaat van deze lokale verschillen wordt weerspiegeld in een 'video' van de precederende magnetisatie. Ik beperk me hier tot de component loodrecht op het vlak, die volgens een kleurcodering wordt gerepresenteerd. Na passage van de korte magneetpuls start een precessie. Geleidelijk aan zien we de spins aan de korte rand voorlopen en die aan de lange rand achterblijven t.o.v. het centrum. Dit effect

is te beschrijven in termen van gelocaliseerde eigenmodes van de aangeslagen spingolven.

Ruimtelijk- en tijdsopgeloste precessiebeweging in een microscopisch kleine spintronische structuur. Optisch contrast wit en zwart betekent een magnetisch moment uit het vlak omhoog en omlaag, resp.<sup>10</sup>



Voor de aardigheid: geprojecteerd op dit scherm zien we het proces ruimtelijk uitvergroot met een factor 1.000.000, en vertraagd in de tijd met een factor 1.000.000.000! In het tijdsinterval tussen opeenvolgende frames legt licht slechts 2 cm af!

Echter, hoe mooi ook om met een resolutie van een halve micrometer dergelijke structuren vectorieel op te lossen, en in ruimte *en* tijd te kunnen aanschouwen, de nanogestructureerde elementen die ik eerder aankondigde kunnen daarmee hoogstens op een integrale wijze gemeten worden. Het generieke probleem is, dat een microscoop nooit kleinere details kan oplossen dan de golflengte van de gebruikte straling! In het geval van onze optische microscopie betekent dat een ondergrens van ongeveer 200-400 nanometer. Toch hopen we in de naaste toekomst deze fundamentele limiet te omzeilen.

We ontwikkelen daartoe een op STM gelijkende techniek<sup>11</sup>. Een ultrascherpe punt wordt in de nabijheid van één van onze magnetische structuren gepositioneerd en het geheel wordt met gefocuseerde lichtpulsen beschenen. De tip werkt nu als lokale antenne. De emissie van licht wordt op deze wijze slechts beperkt door de radius van de tip,



die veel kleiner dan de golflengte van het licht gekozen kan worden. Hiermee denken we uiteindelijk ons femtoseconde-experiment aan magnetische materialen en met een ruimtelijke resolutie van minder dan 50 nm te kunnen bedrijven. Maar ook als we dat bereikt hebben, zullen we blijven zoeken naar nieuwe wegen. Nieuwe configuraties, nieuwe combinaties van licht, STM, en functionele nanodeeltjes. Vanuit deze visie is afgelopen winter een serie laboratoria gerealiseerd die specifiek gericht is op deze combinatie van technieken – een aantal van u is mogelijk bij de opening ervan, in het *Wim de Jongsteegje*, aanwezig geweest.

Toekomstige uitdagingen op het gebied van *spintronica* heb ik eerder als 'derde golf' aangeduid. Na de 'passieve' GMR en MTJ schakelaars, richt deze zich op 'actieve' spin-injectie devices. Daarin wordt een spin-gepolariseerde stroom geïnjecteerd in media, i.h.b. halfgeleiders, om aldaar een specifieke functie te verrichten. Een nieuw onderzoeksgebied waarin een combinatie van expertise op het gebied van spin-gepolariseerd transport, engineering van hybride (halfgeleider-metaal) nanostructuren en optische technieken is vereist.

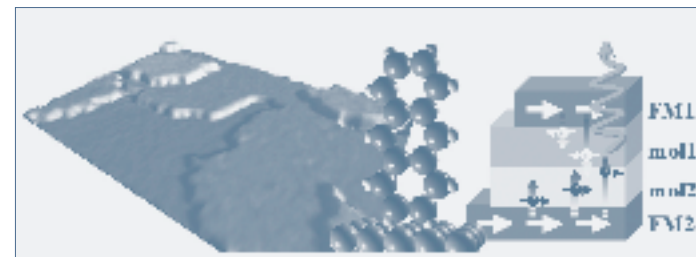
Optische selectieregels in halfgeleiders maken het mogelijk ladingsdragers met een specifieke spinoriëntatie te exciteren en de evolutie van het spin-systeem te volgen met ons tijdsopgeloste schema. De geïnjecteerde spins zijn eenduidig te identificeren op basis van hun energie en precessiefrequentie in een magneetveld. Dit spel hebben we de afgelopen jaren leren spelen. Maar we zijn nu op weg naar nieuwe uitdagingen. Eén daarvan betreft het *optisch* volgen van relaxatie en transport na *elektrische* injectie. Komende jaren hopen we daarmee subtiele interacties tussen halfgeleider spins en nanogestructureerde ferromagnetische elektrodes te onderzoeken.

Het spreekt voor zich dat in dit spel de engineering van de hybride structuren een belangrijke rol speelt. Zo hebben we in onze groep recentelijk ferromagnetische tunnelbarrières geïntroduceerd, een nanometer dunne europiumsulfidelaag waarvoor de tunnelkans afhangt van de spinrichting<sup>2</sup>. Allemaal nieuwe ideeën, nieuwe concepten, met nieuwe toepassingen in het vooruitzicht.

Sprekend over de combinatie van magnetisme en halfgeleiders wil ik

een laatste intrigerende mogelijkheid noemen. Deze is gerelateerd aan de opkomst van geleidende en halfgeleidende organische materialen en polymeren, een vinding waarvoor Heeger, Shirakawa en MacDiarmid werden geëerd met de Nobelprijs voor chemie in 2000. Tot op heden is onderbelicht gebleven dat organische materialen door hun extreem lange spinrelaxatietijd een ideaal medium voor spininjectie zouden vormen. Zeer recentelijk zijn veelbelovende resultaten gepubliceerd<sup>13</sup>. Toch zal het forceren van een wetenschappelijke doorbraak zeker niet eenvoudig zijn. We worden geconfronteerd met diverse complicaties, zoals de intrinsieke incompatibiliteit van hoogreactieve ferromagnetische metalen met zachte organische materie. Ook een theoretisch kader voor spingepolariseerd transport in deze nieuwe hybride structuren ontbreekt. Het zal echter een groot genoegen zijn deze uitdagingen aan te gaan, op weg naar organische spintronica, misschien wel enkel-moleculaire spintronica. Op weg naar nieuwe Wonderlanden.

Ingrediënten van moleculaire spintronica: zelf-assemblerende film van pentaceen-moleculen op ferromagnetische onderlaag,<sup>14</sup> structuur van het molecuul en een onlangs door ons voorgesteld deviceschema



## Onderwijs - kennis - maatschappij

Nanotechnologie staat momenteel in het middelpunt van de belangstelling. Superlatieven als “shaping the world atom-by-atom” en “revolutionaire technologie van de toekomst” worden daarbij afgewisseld met schampere opmerkingen over een inhoudsloze ‘nanohype’, geluiden van angst over niet beheersbare risico’s –soms aangeduid als nanofobie– en oproepen nanotechnologie volledig in de ban te doen. Daarnaast maakt nanotechnologie deel uit van een algehele politieke discussie over onderwijs, wetenschap en technologie. Ik wil hier op een aantal facetten ingaan, om met een meer persoonlijke drijfveer te besluiten.

Het zijn hectische tijden binnen de academische wereld. Onderwijsvernieuwing in het kader van de ‘BaMa’ structuur. Brede bachelors en thematische masters. Strategische allianties tussen universiteiten. Verregaande samenwerking tussen de technische universiteiten zoals in het sectorplan wordt besproken. De politiek die kenbaar maakt onderwijs- en onderzoeksactiviteiten sterker te willen sturen. Met een optimalere investering van gemeenschapsgeld in onze *kenniseconomie* voor ogen. Het verhogen van de *macrodoelmatigheid* van zowel onderwijs als onderzoek door concentratie en focussing van activiteiten.

Nanotechnologie wordt in het huidige wetenschapsbeleid soms als voorbeeld gesteld. Het betreft grensverleggend en interdisciplinair onderzoek. De wetenschap helpt technologische barrières te slechten, terwijl nieuwe technologische ontwikkelingen essentieel bijdragen aan wetenschappelijke progressie. Aldus bieden we studenten en jonge onderzoekers uitdagende onderzoeksmogelijkheden met state-of-the-art technologie, maar gelijktijdig affiniteit met industriële perspectieven. Het is dit complex van factoren dat heeft bijgedragen aan de recente toekenning van ruim 200 miljoen euro voor het nationale programma NanoNed als impuls in de nationale kennisinfrastructuur.

Besef van maatschappelijke relevantie vormt een essentieel ingrediënt van onderzoek aan een technische universiteit. Toch wil ik enige



kanttekeningen plaatsen. Allereerst omvat de *kennissamenleving* meer dan de kenniseconomie<sup>5</sup>. De opgeleefde nadruk op het belang van onze kennissamenleving is een goede zaak, maar dit beperken tot de innovatiekracht van onze huidige economie is kortetermijndenken. Kennis is veel complexer en veel universeeler. Uiteindelijk ligt de grootste kracht van academisch onderzoek in het voortbrengen van generieke kennis en excellente jonge onderzoekers. Mede als garantie voor de toekomstige innovatiekracht, zo u wilt.

Een andere nuancering betreft de centralisering. De politiek vraagt ons te specialiseren, keuzes te maken, onderzoek af te stemmen. Maar het moet in goede balans. Enerzijds *samen*: wederzijdse afstemming, zoals binnen het eerder genoemde 3TU verband. En samenwerking in wisselende consortia, zoals nu binnen NanoNed. Maar anderzijds *apart*: de autonome wetenschapper die zelf wil excelleren. Als een topsporter die de concurrentie aangaat met collega's. Autonoom, maar voor financiering in open competitie tredend. Dus 'samen-apart'. Want een te sterke sturing leidt tot afname van de prikkels te excelleren.



Ook dienen we ervoor te waken dat macrodoelmatigheid niet leidt tot vershraling van het onderwijs. Koppeling tussen onderzoek en onderwijs binnen de academische wereld is een belangrijk goed. Gemotiveerde docenten die zelf midden in het onderzoek staan, hun wetenschappelijke enthousiasme overdragend aan studenten die binnen die inspirerende onderzoeksomgeving worden opgeleid. Een onderzoekswereld die zeer internationaal is. Op basis van een aantal ontluisterende ervaringen signaleer ik echter een groeiende kloof tussen de luide roep om een kennissamenleving enerzijds en het repressieve beleid waar onze buitenlandse studenten en medewerkers mee te maken krijgen anderzijds. Als het beleid op dit punt wordt aangepast zou dat een heuse stap voorwaarts zijn in het streven naar een echte kennissamenleving.

Een andere ontwikkeling waar nanotechnologie zich van bewust moet zijn is de groeiende angst die zij oproept. Het knutselen op atomair niveau zou kunnen leiden tot zichzelf replicerende nanobots, die in stofwolken uitzwermen, onze lichamen binnendringen en de regie overnemen. Onterechte NanoFobie ingegeven door sciencefiction, zeggen de meeste insiders. Veel speculaties kunnen inderdaad eenvoudig op fysische gronden worden ontkracht. Werkelijke gevaren zijn meestal niet groter – maar ook niet *kleiner* – dan bijvoorbeeld binnen chemische wetenschappen. Bovenal moeten we ons bewust zijn de fobie deels zelf gekweekt te hebben door soms een te optimistisch toekomstbeeld aan publiek en geldschietters te schetsen. Nanotechnologie is machtig – maar niet almachtig – dat moeten we ons blijven realiseren.

Dan de tegenwerping dat Nanotechnologie slechts een hype is, waarin iedereen zich van het voorvoegsel ‘nano’ voorziet om een greep uit de megajackpot te doen. Ik ben het niet eens met deze negatieve benadering. ‘Nano’ bindt onderzoekers uit voorheen niet-verwante disciplines. En dat werkt. De extra synergie door ons *center for NanoMaterials* hier in Eindhoven. De extra interactie binnen Nederland in het kader van NanoNed. Noem het een hype. Maar deze hype bindt onderzoekers over grenzen heen. Waardoor zij van elkaar leren. En als de hype voorbij is storten zij zich met die nieuwe kennis op een andere hype, om verder te leren. Ik heb in het verleden zelf een aantal hypes in wording meegemaakt. De hoge- $T_c$  supergeleiders, eind jaren 80. De

Fullerenen, begin jaren 90. De nanotechnologie nu. Ik ben er een betere wetenschapper van geworden.

Tenslotte zie ik de integratie van onderwijs en onderzoek nogmaals, nu vanuit persoonlijk perspectief. Voor mij is deze integratie –naast de passie voor het onderzoek zelf– het aantrekkelijkste facet van mijn werk. Het inspireren van studenten voor ons fascinerende onderzoeksgebied. Het mogen overdragen van kennis en ervaring aan jonge mensen aan het begin van hun onderzoekscarrière. Genieten van de wetenschappelijke topprestatie die ze uiteindelijk neerzetten. Evenals de dagelijkse interactie zelf, lerend van elkaar. Soms hoor ik een student: “Ik koos voor jullie groep om het uitdagende onderzoek – maar ook om de goede sfeer”. Dan ben ik even gelukkig – in Wonderland.

## Dankwoord

Mijn laatste woorden richt ik tot de mensen in mijn naaste omgeving die het mogelijk hebben gemaakt dat ik hier vandaag sta. Die mij hebben geïnspireerd en gesteund. Terugkijkend –en de zaal hier overziend– prijs ik mij een gelukkig mens.

De geschikte condities voor mijn functioneren worden allereerst geschapen door de TU/e en de faculteit Technische natuurkunde. Daarnaast ben ik meerdere instanties erkentelijk voor hun financiële steun, waarvan ik stichting FOM, technologiestichting STW en NanoNed expliciet wil noemen. Ook de interactie met (semi-)industriële onderzoeksinstituten, zoals Philips Research en IMEC Leuven, ervaar ik als zeer waardevol.

Ik heb het genoegen te mogen samenwerken met een groot aantal collega's in binnen- en buitenland, met als vruchtbare thuisbasis de TU/e. Speciale dank ben ik verschuldigd aan personeel van de ondersteunende diensten binnen de faculteit: de loge, mechanische werkplaats, secretariaten, financiële en personele diensten, onderwijsondersteuning en bestuur.

Een heel bijzondere plaats in mijn dankwoord is weggelegd voor collega's en studenten binnen onze onderzoeksgroep FNA. Karin, Gerrie en Jef vormen de wonderolie zonder welke alles (administratief, technisch en sociaal) in het honderd loopt. Jullie mogen trots zijn op het resultaat. Met Henk, Jürgen en Oleg hebben we een unieke bezetting van onze wetenschappelijke staf, met geheel complementaire expertise. Laat dat ook de komende jaren de sleutel zijn voor een succesvolle groep. Henk bedank ik tevens voor het kritisch doorlezen van dit manuscript. Het wetenschappelijke onderzoek in de groep drijft op de inzet van promovendi, postdocs en studenten. Ik heb ook vandaag weer kunnen putten uit jullie mooie resultaten. Daarnaast geniet ik elke dag weer van jullie sociale inbreng in onze groep.

Gedurende mijn loopbaan heb ik begeleiding van een aantal zeer



bijzondere wetenschappers genoten. Een unieke verzameling, realiseer ik mij. De persoonlijke begeleiding van Folkert van der Woude, mijn ene promotor, heb ik intens gewaardeerd. Hij verstond de kunst mij tot het allerbeste uit te dagen – zelfs waar het zijn eigen expertise te buiten ging. George Sawatzky, mijn andere promotor, was altijd bereid tot inspirerende wetenschappelijke discussie, het probleem tot de kern van de zaak terugdringend. Ik heb ervan geleerd – en genoten. Mijn dienstverband bij Theo Rasing was kort maar uiterst vruchtbaar, mede door zijn aanstekelijke enthousiasme en fijne neus voor wetenschappelijke impact. Manuel Cardona was mijn supervisor in Stuttgart. Zijn onmetelijk brede kennis en inzicht, gepaard aan intense sociale compassie, hebben mijn tijd daar tot een bijzondere gemaakt.

En tenslotte Wim de Jonge. Beste Wim, vanaf het begin in 1997 heb je mij gestimuleerd in het starten van nieuwe initiatieven. Mij enerzijds volledige vrijheid gunnend, maar mij anderzijds continu prikkend tot verdieping en verbreding van mijn activiteiten – op alle terreinen. Terugblikkend zie ik hoe jij als een schaakgrootmeester je zetten



## Literatuur

overdacht moet hebben. Ik heb zoveel van je geleerd en er valt nog zoveel te leren. Wim, hoe kan ik mij een groep zonder jou voorstellen? Nou ja, we blijven in ieder geval je steegje houden.

Mijn ouders, Delia en Hille. Jullie blijven het liefst op de achtergrond. Maar jullie bijdrage aan mijn ontwikkeling verdient hier een positie in de schijnwerpers. Waarbij ik nederig een stapje terug doe.

Marten en Helma zijn mijn twee grootste inspiratiebronnen. Of ik als professor nog steeds tekeningetjes mocht maken als ik een verhaal moest houden. Jullie hebben het gezien. Het was overigens heel lief dat jullie mij altijd speciaal “niet kwamen storen” als ik weer met “die Alice in Nanoland” bezig was.

Martha, mijn laatste en meest bijzondere woorden richt ik tot jou. Jouw ondersteuning en troost als ik het even niet zag zitten, je heldere analyse en advies bij problemen, en je inhoudelijke bijdrage – bijvoorbeeld aan deze rede. Martha, je bent geweldig.

### **Mijnheer de Rector Magnificus, dames en heren,**

Wetenschap in Wonderland:

“I began at the beginning, and went on till I came to the end: and here I stop”

Ik heb gezegd.

- 1 Lewis Carroll, *Alice's Adventures in Wonderland*, ISBN 0-19-281620 (Oxford University Press, Oxford, 1971).
- 2 Bill Bruford, *One of a kind* (EG Records, EGCD 40, 1978).
- 3 M.F. Crommie, C.P. Lutz, and D.M. Eigler, *Science* **262**, 218 (1993).
- 4 S.A. Wolf, D.D. Awschalom, R.A. Buhrman, J.M. Daughton, S. von Molnár, M.L. Roukes, A.Y. Chtcelkanova, and D.M. Treger, *Spintronics: A spin-based Electronics Vision for the Future*, *Science* **294**, 1488 (2001).
- 5 O. Kurnosikov, J.T. Kohlhepp and W.J.M. de Jonge, Can surface embedded atoms be moved with an STM tip? *Europhysics Letters* **64**, 73 (2003).
- 6 E. Beaurepaire, J.-C. Merle, A. Daunois, and J.-Y. Bigot, Ultrafast Spin Dynamics in Ferromagnetic Nickel, *Phys. Rev. Lett.* **76**, 4250 (1996).
- 7 C. Jozsa, J.H.H. Rietjens, M. van Kampen, E. Smalbrugge, M.K. Smit, W.J.M. de Jonge and B. Koopmans, Retrieving pulse profiles from pump-probe measurements on magnetization dynamics, *J. Appl. Phys.*, in press.
- 8 B. Koopmans, M. van Kampen, J.T. Kohlhepp, and W.J.M. de Jonge, Ultrafast magneto-optics in nickel: magnetism or optics? *Phys. Rev. Lett.* **85**, 844 (2000).
- 9 M. van Kampen, C. Jozsa, J.T. Kohlhepp, P. LeClair, W.J.M. de Jonge, and B. Koopmans, All-Optical probe of coherent spin waves, *Phys.Rev. Lett.* **88**, 227201 (2002).

## Curriculum Vitae

- 10 J.H.H. Rietjens, C. Jozsa, H. Boeve, W.J.M. de Jonge, and B. Koopmans, Probing local spin modes in exchange-biased MTJ elements, to be published.
- 11 G. Zorinians, D. Englund, O. Kurnosikov, C.F.J. Flipse, E. Rido, H. Brune, W.J.M. de Jonge and B. Koopmans, Development of a near-field magneto optical microscope for studying ultrafast magnetisation dynamics, AIP conf. proc. **696**, 204 (2003).
- 12 A.T. Filip, P. LeClair, C.J.P. Smits, J.T. Kohlhepp, H.J.M. Swagten, B. Koopmans and W.J.M. de Jonge, Spin injection device based on EuS magnetic tunnel barriers, Appl. Phys. Lett. **81**, 1815 (2002).
- 13 Z.H. Xiong, D. Wu, Z.V. Vardeny, J. Shi, Giant magnetoresistance in organic spin-valves, Nature **427**, 821 - 824 (2004).
- 14 M.V. Tiba, W.J.M. de Jonge, B. Koopmans, and H.T. Jonkman, Morphology and electronic structure of pentacene-cobalt interface, to be published.
- 15 J.F. Sijm, De kennissamenleving omvat meer dan de kenniseconomie, Lezing uitreiking Civi-Prijzen, Haarlem, 27 november 2003.

**Prof.dr. B. Koopmans is per 1 januari 2003 benoemd tot hoogleraar Nanogestructureerde Materialen aan de faculteit Technische natuurkunde van de Technische Universiteit Eindhoven (TU/e).**

Bert Koopmans (1963) promoveerde in 1993 aan de RU Groningen op niet-lineair optisch onderzoek aan o.a. C60 films. Zijn promotoren waren prof.dr. Folkert van der Woude en prof.dr. George A. Sawatzky. In 1994 werkte hij bij prof.dr. Theo Rasing (KU Nijmegen) aan de ontwikkeling van magnetische extensies van de niet-lineaire optische techniek. In datzelfde jaar ontving hij een Alexander von Humboldt stipendium waarmee hij in de onderzoeksgroep van prof.dr. Manuel Cardona aan het MPI te Stuttgart onderzoek verrichtte aan halfgeleider kwantum-structuren.

Na zijn terugkeer in Nederland is hij sinds 1997 werkzaam binnen de faculteit der Technische natuurkunde aan de TU/e. Nieuw onderzoek dat daarbij opgestart is, betreft laserspectroscopie aan ultrasnelle magnetische processen, alsmede het samenspel van elektrische, magnetische en optische eigenschappen in hybride (halfgeleider-moleculaire-magnetische) nanostructuren. Begonnen als universitair docent in de groep van prof.dr.ir. Wim J.M. de Jonge, werd hij met een FOM "dakpan" subsidie in 2000 aangesteld als universitair hoofddocent op het gebied van fysica en nanostructuren. In hetzelfde kader is hij in 2003 benoemd tot hoogleraar.

---

## **Colofon**

Productie:  
Communicatie Service Centrum TU/e

Fotografie cover:  
Rob Stork, Eindhoven

Ontwerp:  
Plaza ontwerpers,  
Eindhoven

Druk:  
Drukkerij Lecturis,  
Eindhoven

ISBN: 90-386-1263-X

Digitale versie:  
[www.tue.nl/bib/](http://www.tue.nl/bib/)