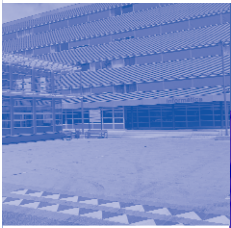




LEGO® op atomaire schaal

Complexe oxides als bouwstenen voor de nanotechnologie

door
Prof.dr.ing. Dave H.A. Blank



Universiteit Twente
de ondernemende universiteit

LEGO® op atomaire schaal

Complexe oxides als bouwstenen voor de nanotechnologie

Rede uitgesproken bij het
aanvaarden van het ambt
van hoogleraar

Anorganische Materiaalkunde

aan de faculteit Technische Natuurwetenschappen
van de Universiteit Twente
op donderdag 22 mei 2003
door

Prof.dr.ing. Dave H.A. Blank

Inleiding

**Mijnheer de Rector Magnificus, Leden van het College van Bestuur,
Collegae hoogleraren en andere leden van de universitaire
gemeenschap,
Dames en heren, oftewel beste vrienden,**

Materiaalkunde speelt een zeer belangrijke rol in ons bestaan. Niet voor niets hebben we de tijdperken naar materialen genoemd. Zoals het stenen tijdperk: de prehistorische cultuurperiode waarbij wij als mens de steen gingen gebruiken als hard werktuig. Dit tijdperk werd opgevolgd door de bronstijd. De mens was nog niet geletterd, maar toch had men het materiaal brons gevonden om werktuigen en vooral wapens te maken. De ontdekking van het brons is waarschijnlijk toe te schrijven aan natuurlijke verontreinigingen van kopererts met arseen of tin. Het had een zeer gunstige effect zoals een lager smeltpunt en harder metaal. Deze tijd duurde tot 2300 voor Christus en ging over in de ijzertijd. Het ijzer werd het eerst gebruikt in Azië, vervolgens naar Syrië en Egypte om uiteindelijk omstreeks 600 v.C. Europa te bereiken. Deze tijdperken zijn in 1814 geïntroduceerd door Christian Jurgensen Thomsen, curator of the National Museum of Denmark in zijn drie periodensysteem (steentijd, bronstijd, ijzertijd) als hoofdindeling van de Scandinavische prehistorie en vervolgens omstreeks 1840 door de internationale archeologie omarmd. Thomsen eindigt bij de Romeinse beschaving, maar wat als we onze tijd moeten karakteriseren? Mijn eerste ingeving zou het siliciumtijdperk kunnen zijn, vooral de siliciumoxide. Immers de eigenschappen van silicium en siliciumoxide hebben geleid tot de bloei van de halfgeleider-technologie. Maar is het bewerken van zand zo'n bijzondere prestatie? Geeft niet juist de mogelijkheid om kunstmatig materialen te maken ons beschavingsniveau aan: via steen, brons en ijzer naar artificiële of kunstmatig gemaakte materialen, zoals plastic-tijdperk. Kunststoffen, zoals legostenen, kunnen vele vormen, kleuren en eigenschappen hebben. Echter er is een klasse van materialen die bijna alles in zich heeft: de oxides. Ik hoop dan ook u tijdens mijn rede te kunnen overtuigen dat we in het oxidetijdperk leven. Jongstleden oktober heb ik het hoogleraarschap aanvaard in de anorganische materiaalkunde. Een klassiek vakgebied met veel toekomstmogelijkheden. Materiaalkunde klinkt voor velen ouderwets in de oren en wordt in Europa, maar vooral in Nederland, ondergeschoven in de natuurkunde of de

chemie. In Amerika is Materials Science een volwassen vakgebied, die de concurrentie met de fysica en chemie moeiteloos aankan. De Materials Research Society beslaat een groot gebied van de technische wetenschappen. Het klinkt daarom in eerste instantie vreemd dat ik vanuit de technische natuurkunde de discipline van de chemische technologie binnen stap, in feite beslaat materiaalkunde beide vakgebieden. Dat bijna tegelijkertijd met mijn benoeming de faculteiten Technische Natuurkunde en Chemische Technologie samengevoegd zijn tot Technische Natuurwetenschappen juich ik daarom zeer toe. Daarnaast staan we met de intrede van de nanotechnologie voor nieuwe uitdagingen in de materiaalkunde. Bovenstaande was de inspiratie om te komen tot de titel van mijn oratie:

Oxidische materiaalkunde als bouwstenen voor de nanotechnologie.

met als ondertitel: *LEGO® op atomaire schaal*, hetgeen aangeeft dat we in staat zijn om materialen naar onze hand te zetten en zelfs nieuwe materialen te kunnen construeren. De analogie met lego wordt hopelijk duidelijk tijdens mijn voordracht. Dat vooral de toepassing in de nanotechnologie voorop staat is eigenlijk een prettige bijkomstigheid, immers het stapelen van atomen is een tijdrovende bezigheid.

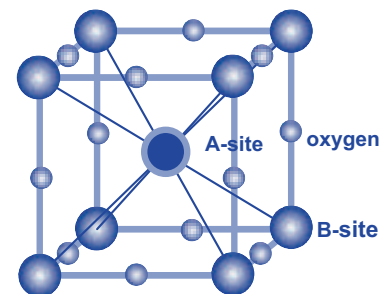
De inhoud van mijn voordracht is als volgt:

- wat zijn anorganische materialen
- wat kunnen we met deze materialen
- hoe maken we de materialen
- uitdagingen in het onderzoek en onderwijs

Anorganische materialen

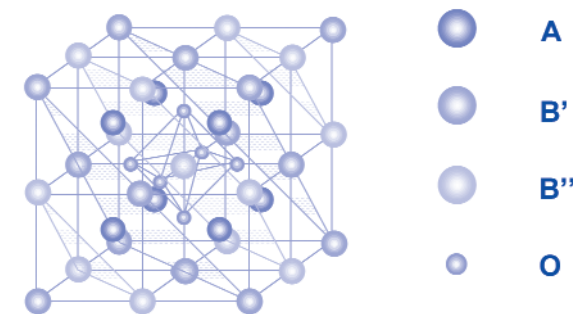
Onder anorganische materialen verstaan we bijna alle materialen, uitgezonderd de koolwaterstoffen (overigens als bouwsteen zeer belangrijk voor het leven). Het bestuderen van anorganische materialen is een van de oudste wetenschappen. Het zoeken naar en bestuderen van nieuwe materialen of mineralen had soms een zeer voor de hand liggende oorzaak, zoals het zoeken naar neggoud. Daarnaast kon men al ruim voor onze jaartelling ijzeroxide reduceren tot ijzer, hetgeen geleid heeft tot de eerder genoemde ijzertijd. Eigenlijk een eerste voorbeeld van het volledig veranderen van de eigenschappen van een materiaal door middel van het laten reageren van het materiaal.

Met het (vrijwel onafhankelijk van elkaar) voorgestelde periodiek systeem hebben de Russische chemicus Dmitri Ivanovitsj Mendelejev en de Duitse chemicus Julius Lothar Meyer een belangrijke bijdrage geleverd voor de hedendaagse chemie. In het midden van de 19^{de} eeuw wisten deze wetenschappers de elementen te ordenen. Hoewel in die tijd niet alles werd begrepen (dat was eigenlijk pas begin 20^{ste} eeuw met de kennis omtrent de chemische bindingen) wisten ze bepaalde materialen te groeperen, bijvoorbeeld door hun heftige reactie met water. Later, met de verklaring dat de chemische binding ontstaat wanneer twee atomen een paar binding-elektronen met elkaar delen, begreep men dat materialen met maar een elektron in de buitenste schil dit elektron graag afstaan, immers een geheel gevulde schil is energetisch veel voordeliger. Vandaar dat de alkalimetalen zo reageren met water, hetgeen Mendelejev reeds had bemerkt. Het is om dezelfde reden dat edelgassen, die een geheel bezette buitenste schil hebben, niet reageren en zeer stabiel zijn. Het periodiek systeem en vooral de valentie van de atomen zullen een belangrijke rol spelen in het legoën. Onder anorganische materialen vallen verbindingen zoals kunstmest, beton of kalk. Binnen de leerstoel Anorganische Materiaalkunde werken we aan meer complexe. Een voorbeeld is de perovskieten (naar graaf L.A. Perovski van St.-Petersburg). Het is een groep oxides met gelijksoortige kristalstructuur, vernoemd naar het mineraal perovskiet, CaTiO_3 . Ondanks dat deze perovskietmaterialen een kristalstructuur hebben die erg op elkaar lijkt, kunnen de eigenschappen zeer verschillend zijn.



Figuur 1: eenheidscel CaTiO_3

In figuur 1 staat de kristalstructuur van CaTiO_3 , met calcium in het zwaartepunt en titaan op de hoekpunten en zuurstof op de ribbes. CaTiO_3 heeft niet zoveel toepassingen maar wanneer we calcium door barium of lood vervangen hebben we de piezoelektrisch materialen bariumtitanaat (BaTiO_3) of loodtitanaat (PbTiO_3). Het belangrijkste piezomateriaal is PZT (lood-zirkoon-titanaat), een vaste stof oplossing van $(1-y)\text{PbTiO}_3$ en $(y)\text{PbZrO}_3$: $\text{Pb}(\text{Zr}_y\text{Ti}_{1-y})\text{O}_3$. Door Zr^{4+} of Ti^{4+} ionen gedeeltelijk te vervangen door ionen met een andere valentie kunnen de eigenschappen nog verder beïnvloeden. Zo zal Fe^{3+} leiden door zuurstofvacatures. Hierdoor neemt de mobiliteit van de zuurstofionen toe: ze kunnen als het ware makkelijker een vacatureplaats innemen. Het gevolg is een piezomateriaal die moeilijker is om te polen (harde piezo's) en worden gebruikt voor ultrasone motoren.



Figuur 2: $\text{A}(\text{B}'\text{x}\text{B}''1-\text{x})\text{O}_3$ perovskite

Aan de andere kant kunnen we het titaan (Ti^{4+}) ook vervangen door, i.e., Nb^{5+} , hierdoor ontstaan Pb vacatures en het piezomateriaal wordt juist makkelijk om te polen (zachte piezo's) en heeft erg sterke piezoelectrische eigenschappen: ideaal voor actuatoren en sensoren. Tenslotte, wanneer we de Pb^{2+} ionen gedeeltelijk vervangen door La^{3+} ionen (PLZT) hebben we een transparante ferroelektrische perovskiet dat uitermate geschikt voor elektro-optische toepassingen. Met dit voorbeeld heb ik hopelijk duidelijk gemaakt welke verschillende eigenschappen deze materialen kunnen hebben, ondanks dat de kristalstructuur zo gelijk is. Maken we het venster iets groter en kijken niet alleen naar perovskieten, maar naar metaaloxides dan kunnen we de volgende indeling maken.

Magnetische eigenschappen:

diamagnetisch: YBaCuO , LaSrCuO

paramagnetisch: RuO_2 , MMoO_3

ferrimagnetisch: Ferrites, MFeO_3

ferromagnetisch: LaCaMnO SrRuO_3

maar ook elektrische eigenschappen:

isolatoren: PZT, BaTiO_3 , TiO_2

halfgeleiders: PrBaCuO_x

half-metalen: LaCaMnO_3

metalen: RuO_2 SrRuO_3

supergeleiders: YBaCuO BiSrCaCuO

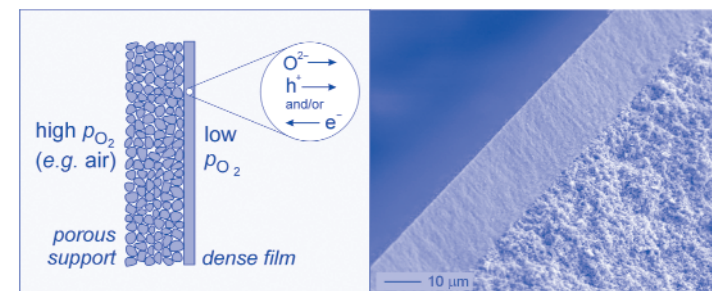
Als voorbeeld mag natuurlijk ook de Colossal Magneto-Resistance (CMR) niet ontbreken. Bij de manganaten LaMnO_3 en CaMnO_3 ontdekten Jonker en van Santen reeds in 1950 dat de elektrische eigenschappen veranderen wanneer het materiaal een magnetische overgang ondergaat. Boven de zg. magnetische ordeningstemperatuur zijn deze materialen halfgeleidend, onder die temperatuur gedragen ze zich als een metaal. Het heeft tot gevolg dat het materiaal een grote weerstandsverandering ondergaat bij kleine temperatuur veranderingen en vooral magneetveld veranderingen rond deze ordeningstemperatuur. Het CMR-effect is in 1993 in dunne lagen ontdekt en vindt zijn toepassing in magnetische dataopslag.

Naast deze fysische eigenschappen hebben de gemengde oxides nog een bijzondere eigenschap: ze kunnen worden toegepast als dichte membraan voor bijvoorbeeld zuurstoftransport. Door een partiaalspanningsgradiënt over het membraan vindt permeatie (transport) plaats van zuurstof van de hoge naar de lage drukzijde. De diffusie van de zuurstofionen is afhankelijk

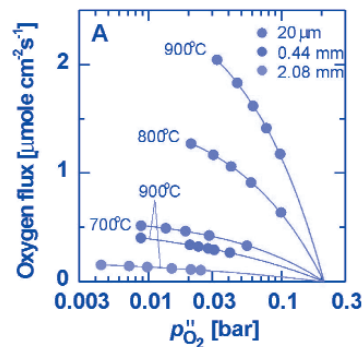
van de concentraties zuurstofvacatures in het materiaal en de temperatuur. Belangrijke dichte membranen zijn yttrium gestabiliseerd zirkonium. Het kan gebruikt worden voor het scheiden van zuurstof uit lucht, maar ook toegepast worden in zuurstofgevoelige sensoren. Het bestuderen van ionentransport in deze materialen is een belangrijk onderdeel van de leerstoel. Als voorbeeld wil ik noemen het onderzoek dat Marco van der Haar en Edward Span verricht hebben naar de zuurstoftransport door zeer dunne dichte membranen. Als anorganisch materiaal hebben zij lanthaan strontium kobaltoxide gekozen, een materiaal dat bekend staat om een zeer goede zuurstoftransmissie bij hoge temperaturen (900°C). Als drager hebben zij een poreuze membraan genomen van hetzelfde materiaal.

In figuur 3 staat een scanning elektron microscoopopname (SEM) van een doorsnede van zo'n poreuze membraan en gesloten dunne laag. De dichte membraan is aangebracht met behulp van gepulste laser depositie, waarover later in meer detail op ingegaan zal worden. Een dergelijk dunne membraan heeft een zuurstoftransmissie die een factor 20 hoger is dan tot op heden gerealiseerd in commercieel verkrijgbare . In figuur 4 wordt de zuurstoftransmissie vergeleken met bestaande dichte membranen.

Naast deze zogenaamde dichte membranen vindt onderzoek plaats naar de poreuze anorganische membranen. Deze membranen hebben vele toepassingen. Doordat men in staat is om de poriëngrootte te variëren kunnen ze gebruikt worden om vloeistoffen te filteren, of zelfs atomen van elkaar te scheiden.

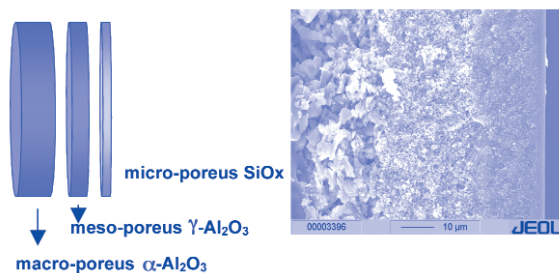


Figuur 3: Schematische voorstelling van dichte membraan op poreuze drager voor zuurstofpermeatie en SEM opname van een dichte membraan gedeponeerd met gepulste laser depositie.



Figuur 4: Zuurstofflux door dichte membraan op poreuze drager (zie figuur 3). Ter vergelijking de literatuurwaarden voor een 2 mm en 0.44 mm dichte membraan.

Deze membranen bestaan uit een drager, een macro-poreus $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ met een poriëngrootte van minimaal 60 nm, waarop een meso-poreus materiaal wordt aangebracht, bijvoorbeeld $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ dat een poriëngrootte van ongeveer 5 nm kan hebben. Door het aanbrengen van een micro-poreus siliciumoxide laag wordt de poriëngrootte verder verkleind tot 0.3 tot 0.6 nm, dus in de grootte orde van de moleculen. In figuur 5 staat een schematische weergave van een dergelijk membraan en een SEM opname van een dwarsdoorsnede. Belangrijk voor een goede werking van het membraan is de poriëngrootte verdeling. Door ladingseffecten aan het oppervlak van de poriën kan de effectieve grootte kleiner zijn dan de fysieke. Door extra lading aan te brengen, bijvoorbeeld door aan weerszijde van het membraan een elektrode te plaatsen, hebben we de mogelijkheid om deze effectieve poriëngrootte te beïnvloeden, met andere woorden we zijn in staat om door een veldeffect de membraan te openen of te sluiten.

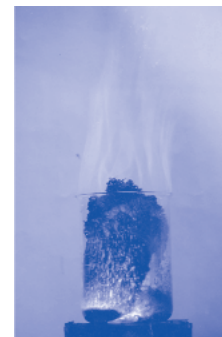


Figuur 5: Schematische voorstelling van 3-laags membraan en SEM opname (links)

Een mogelijke toepassing hierbij is het gedoseerd aanbrengen van vloeistoffen in een 'lab-on-a-chip'.

Het succes van de poreuze en dichte anorganische membranen is sterk afhankelijk van de controle over het fabricage proces. Het maken van de poeders, vaak met exotische elementen en verschillende doseringen en samenstellingen, is een zeer precies werk. Er zijn verschillende methodes om deze complexe materialen te maken. Alleen al van Al_2O_3 bestaan 9 verschillende fases, ieder met hun specifieke eigenschappen. Ik noemde al alfa en gamma Al_2O_3 voor de macro- en mesoporeuze toepassingen. De verdeling van de deeltjesgrootte, het maken van pillen of buizen, het sinterproces, het calcineren, alles speelt een zeer belangrijke rol. Daarnaast zijn sommige materialen zeer vluchtig of reageren met zuurstof en vormen ongewilde fases. Ook kunnen zeer fijn verdeelde materialen gaan clusteren tot grotere deeltjes, een eigenschap dat soms juist gewild is, soms juist vermeden moet worden. Als voorbeeld van het maken van dergelijke poeders wil ik teruggaan naar mijn eerste kennismaking met de leerstoel anorganische materiaalkunde.

In februari 1987 was de hoge temperatuur supergeleider $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ontdekt en als toenmalige medewerker bij de leerstoel Lage Temperaturen wilde ik dit materiaal zo zuiver mogelijk maken. Ik kwam al gauw terecht bij Henk Kruidhof, die mij inwerkte in de citraat synthese. Bij deze chemische methode om een poeder te maken worden de afzonderlijke poeders yttriumoxide, bariumcarbonaat en koperoxide in de juiste hoeveelheden opgelost in salpeterzuur en ammonia. Vervolgens wordt er citroenzuur aan toegevoegd.



Figuur 6: Zelfontbranding tijdens de fabricage van $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ poeder via de citraat synthese.

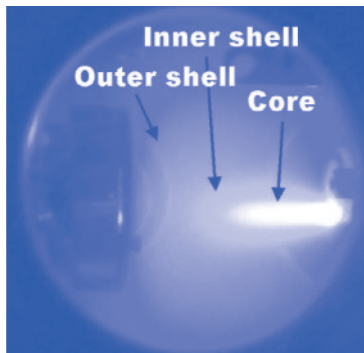
Bij de juiste verhoudingen zijn alle metaalcomplexen opgelost en wordt deze oplossing ingedroogd. Door de combinatie van zuren vindt zelf-ontbranding plaats en vormt zich een poeder met de juiste stoichiometrie, zie figuur 6. Het poeder bevat veel koolstof en moet gecalcineerd worden, waarbij de koolstof reageert met zuurstof en als CO_2 de oven verlaat. U begrijpt dat deze fascinerende methode om poeder te maken een diepe indruk op mij heeft gemaakt. Toen niet wetende dat ik nu 15 jaar later dezelfde groep mag leiden. Trouwens tot op heden is de citraat synthese met pyrolyse nog steeds de beste methode om zeer zuiver $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ te maken met de hoogste piekwaarde bij soortelijke warmtemetingen rond de supergeleidende overgangstemperatuur.

Dit is slecht een klein voorbeeld van wat er allemaal mogelijk is binnen dit vakgebied. De expertise in mijn onderzoeksgroep is enorm. Aangezien dit zeer technologisch van aard is moeten wij ervoor waken dat het niet ondergesneeuwd raakt in de meer fundamentele richting die het onderzoek ook op deze universiteit lijkt op te gaan. Wij hebben dan ook besloten om dit gedeelte onder te brengen in een *centre of advanced ceramics*. Een centrum dat de technologie en techniek een meer zelfstandige rol geeft met een beter overzicht van behoeften en mogelijkheden. Door een betere aansluiting met de industrie, waarbij eisen, opschaling en andere wensen van belang zijn, hopen wij een continuïteit in mogelijkheden en mankracht te behouden of zelfs uit te breiden. Daarnaast zal het centrum een belangrijke rol kunnen gaan spelen in de kennisoverdracht betreffende het vervaardigen van hoogwaardig keramisch materiaal naar de industrie.

Gepulste Laser Depositie

Het toepassen van complexe oxidische materialen in de dunne film techniek is enorm toegenomen. Dit natuurlijk mede door de verrassende eigenschappen die dergelijke materialen kunnen hebben. Een veel toegepaste techniek waarmee dunne films gemaakt worden is gepulste laser depositie (PLD). Hierbij wordt materiaal verdampt met behulp van een laserbundel. Vaak wordt hiervoor een excimeer laser (XeCl 308nm, KrF 248nm of ArF 193nm) gebruikt. Dit type laser produceert een gepulste ultraviolette bundel welke, gefocusseerd op een target, in staat is om in korte tijd (~20 ns) een zeer dicht plasma te genereren. Het oppervlak van het targetmateriaal zal door de laser verhit worden tot boven de verdampings-temperatuur. Vervolgens zal de dampdeeltjes verder worden verhit tot 10.000 graden. Bij deze temperatuur zullen alle deeltjes geïoniseerd zijn. Aangezien het target zich in een vacuüm klok bevindt zullen de geïoniseerde deeltjes zich verspreiden in de klok, zie figuur 7. De weg die de deeltjes afleggen hangt sterk af van de botsingen die ze ondervinden. Aangezien de botsingen in loodrechte richting van het target het minst zullen zijn, immers de dikte van de verdampte laag is veel kleiner (enkele micrometers) dan afmetingen van de laserspot (enkele millimeters), bewegen de deeltjes zich hoofdzakelijk in loodrechte richting t.o.v. het targetoppervlak. Dit is bijna onafhankelijk van de hoek waaronder de laserbundel op het target schijnt. We plaatsen het substraat waar we de dunne laag (ook wel film genoemd) op willen groeien dan ook parallel aan het target. De achtergrond druk zal vervolgens de vorm van het plasma beïnvloeden. Een hoge druk, dus veel botsingen, leidt tot een klein bolvormig plasma, een lage druk leidt tot een erg uitgestrekt plasma.

Aangezien de deeltjes geïoniseerd zijn zullen ze makkelijk reageren met elkaar of met het achtergrondgas. Is dit bijvoorbeeld zuurstof, dan vindt oxidatie plaats, hetgeen voor de complexe oxidische materialen essentieel is. Het moge duidelijk zijn dat wanneer we als achtergrond een edelgas nemen deze niet zal reageren met de deeltjes. Wanneer we een mengsel van gassen gebruiken kunnen we het oxidatieproces beïnvloeden, maar ook de vorm van het plasma. We hebben hier meteen een belangrijke parameter die we kunnen variëren. Naast de druk zijn andere belangrijke parameters de temperatuur van het substraat en de afstand van de target naar het substraat.



Figuur 7: Plasma gevormd door geïoniseerde deeltjes. Het substraat met heater is geplaatst aan de rand van het plasma.

Wat is er zo bijzonder aan gepulste laser depositie en waarom onderscheidt het zich van andere depositie systemen? PLD is vooral in de belangstelling komen te staan toen in 1987 de eerder genoemde hoge temperatuur supergeleiders werden ontdekt. Deze supergeleider heeft een perovskiet-structuur en bestaat uit verschillende elementen: yttrium, barium en koperoxide. Het zuurstofgehalte in het materiaal bleek essentieel voor de supergeleidende eigenschappen. Met andere meer 'standaard' depositie-technieken was het moeilijk om een dunne film te groeien met de juiste verhoudingen van de elementen of lastig om voldoende zuurstof in de film te krijgen.

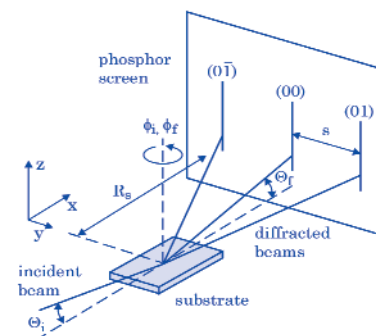
Deze hoge temperatuur supergeleiders zijn zeer anisotroop en hebben in de verschillende kristalrichtingen andere eigenschappen. Dit betekent dat het materiaal epitaxiaal gegroeid moet worden. In de beeldspraak met LEGO betekent dit het geordend stapelen van de stenen. Zo wordt een laag gevormd met de c-as loodrecht op het substraat. Deze groeimode kan alleen verkregen worden bij relatief hoge temperatuur en druk, opnieuw een eis waar PLD aan kan voldoen. Het snelle succes dat PLD opleverde bij het maken van deze supergeleiders heeft geleid tot een wereldwijde interesse voor PLD. Nieuwe ontwikkelingen zoals de eerder genoemde Giant Magnetic Resistance waren er niet geweest, althans niet zo snel, zonder de gepulste laser depositie techniek.

Een ander onderscheid ten opzichte van andere depositietechnieken is de groeisnelheid. Tijdens één laserpuls wordt ongeveer 1 Ångström (0.1 nanometer) gedeponeed. Op zich niet veel, een zuurstofatoom is bijvoorbeeld iets groter dan 1 Å, maar aangezien de depositie plaatsvindt

in enkele microseconden is de positiesnelheid al snel tientallen micrometer per seconde. De feitelijke depositiesnelheid ligt natuurlijk veel lager omdat de laserpuls niet continu is. Een snelle laser kan zo'n 200 pulsen per seconde halen, hetgeen een depositiesnelheid geeft van 20 nm per seconde, dus een factor 1000 lager. Het voordeel van de extreem hoge depositiesnelheid per puls is het 'invriezen' van de atoomlagen tijdens depositie vóórdat andere fasen gevormd worden. We maken gebruik van deze oververzadiging en de structuur die we willen bouwen wordt niet thermodynamisch maar kinetisch gevormd. In het eerste geval ontstaan grotere kristallen, in het laatste geval vele kleine kristallietjes, in mijn beeldspraak zijn dat de LEGO-stenen.

Voor het maken van een bouwwerk moeten we de groei zichtbaar maken. We werken op atomaire schaal en niet alle observatietechnieken kunnen we gebruiken. Een geschikte methode om de groei van dunne lagen te kunnen volgen is RHEED (Reflection High Energy Electron Diffraction).

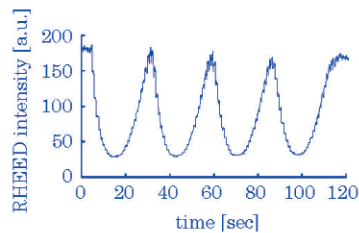
De elektronendiffractie ontstaat door een bundel van elektronen scherend op het substraattooppervlak te schieten. Door de interferentie met het oppervlak zullen in bepaalde richtingen de uittredende bundels elkaar versterken, in andere richtingen doven zij elkaar uit. Op zich kunnen we hier erg veel informatie krijgen over de structuur van de laag die we groeien, ik gebruik voor het volgen van de bouw van de structuur alleen de elektronen die gereflecteerd worden door het oppervlak. Wanneer de laag gesloten is zal deze reflectie maximaal zijn.



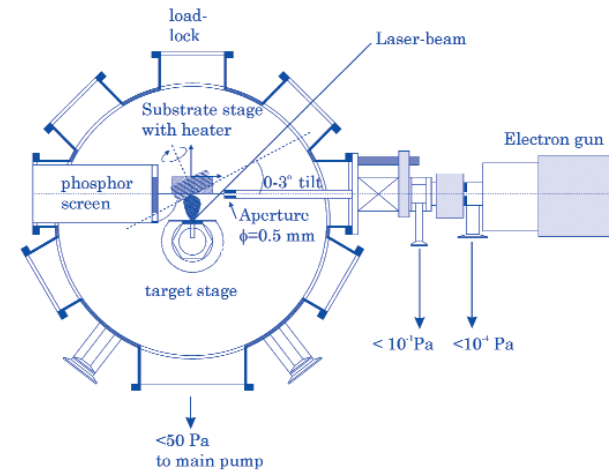
Figuur 8: principe van RHEED. Voor groei-oscillaties wordt de intensiteit van de gereflecteerde bundel gevolgd.

Volgen we de intensiteit van de gereflecteerde elektronen-bundel dan zal deze afnemen wanneer we atomen aanbrengen. Elektronen zullen verstrooid aan de aangebrachte atomen of gevormde eilandjes. Wanneer na een hoeveelheid laserpulsen de laag steeds verder gevuld wordt zal ook de intensiteit toenemen, totdat de laag weer gesloten is. De intensiteit van een elektronenbundel kunnen we zichtbaar maken met een fosforschermb en camera.

In figuur 9 staat een voorbeeld van een waargenomen RHEED oscillatie tijdens de groei van strontiumtitanaat. Een oscillatie komt overeen met de groei van een eenheidscel. Deze opname is genomen tijdens het groeien onder optimale omstandigheden. Dit betekent dat de achtergronddruk van zuurstof relatief hoog is (100 Pa of 1 mBar betekent 10^{16} moleculen per cm^3 , vrije weglengte is ongeveer 0.1 mm): een voordeel van het gebruik van PLD, echter een groot nadeel wanneer we RHEED willen toepassen. Bij deze hoge druk is het niet mogelijk om op een conventionele manier RHEED toe te passen omdat de elektronen worden verstrooid door het achtergrondgas. Om toch bij hoge drukken RHEED toe te passen was een modificatie van het RHEED-systeem noodzakelijk. In ons geval hebben we het elektronenkanon uitgevoerd met een tweetraps differentieel gepompt systeem; een eerste trap waardoor de druk in het elektronenkanon laag kan blijven ($< 10^{-5}$ Pa) en vervolgens een lange buis waarin de elektronen in een relatief lage druk ($< 10^{-1}$ Pa) getransporteerd worden tot nabij het te bestuderen oppervlak. De verschillende compartimenten zijn gescheiden door kleine openingen waar de elektronenbundel nog wel doorheen kan. Vervolgens worden de verstrooide (nu door het oppervlak van de groeiende film) elektronen op een fosforschermb opgevangen dat eveneens vlakbij het sample is geplaatst. Op deze manier wordt het verlies als gevolg van diffuse verstrooiing aan het achtergrondgas (1-100 Pa bij PLD) geminimaliseerd.



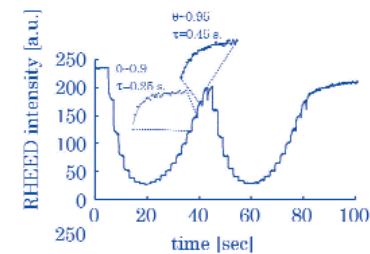
Figuur 9: RHEED oscillaties tijdens de homoepitaxiale groei van SrTiO_3 .



Figuur 10: Schematische tekening van de hoge druk RHEED gepulste laser depositie systeem.

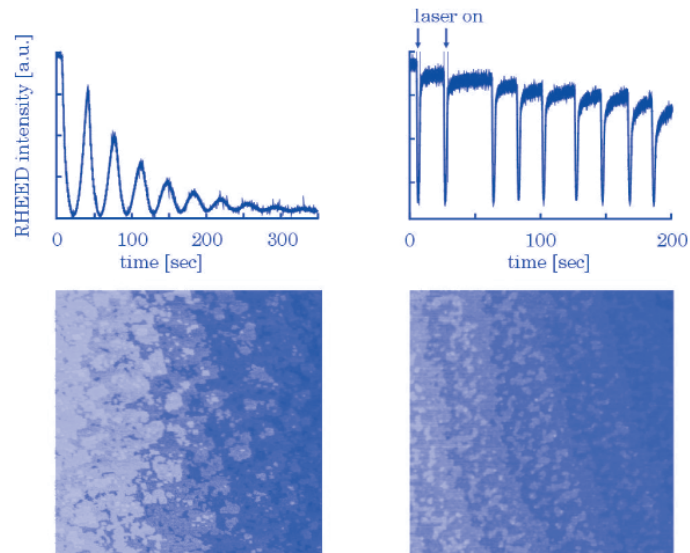
In figuur 10 staat een schematische weergave van het systeem. De afstand tussen de opening en fosfor scherm is 50 mm. Het idee is samen met dr. ing. Guus Rijnders ontwikkeld en is uitgegroeid tot een commercieel product dat op de markt gebracht wordt door Twente Solid State Technology, een start-up bedrijf onder leiding van dr. ir. Cas Damen.

Bij het bestuderen van de RHEED oscillaties bij deze hoge drukken viel het op dat naast het gepulste karakter van deponeren ook per puls een relaxatie was waar te nemen. Deze relaxatie hangt af van de dekkingsgraad, maar ook van de depositiedruk en temperatuur van het substraat. In feite nemen we de mobiliteit aan het oppervlak waar! We hebben een instrument in handen waarbij we direct de invloeden van de verschillende



Figuur 11: Relaxatie na een laser puls

depositieparameters kunnen waarnemen. In figuur 11 staat een uitvergroting van deze relaxatie. De gemeten relaxatietijden zijn 0.5 tot 1 seconde: vele malen langer in vergelijking met andere depositiemethoden en afkomstig door de hoge achtergronddruk. Tijdens deze mobiliteit van clusters atomen vormen er zich eilandjes aan het oppervlak. Wanneer deze eilandjes groter worden dan de gemiddelde diffusielengte zullen op deze eilandjes nieuwe ontstaan, waardoor er verruwing optreedt. Ook zal bij laserpulsen van 2 Hertz en hoger nieuwe atomen worden gedeponereerd, terwijl de atomen van de voorgaande puls nog bewegen over het oppervlak. Deze observatie in combinatie met de eerder genoemde oververzadiging tijdens depositie heeft geleid tot het introduceren van een nieuwe depositietechniek: pulsed laser interval depositie. Het idee is simpel en doeltreffend. Het aantal pulsen dat nodig is om precies een monolaag te deponeren wordt vastgesteld. Deze pulsen worden vervolgens met een hoge frequentie gedeponereerd. Hierna vindt een tijd zonder depositie plaats waarbij het materiaal de gelegenheid krijgt om een gesloten laag te vormen. Het proces is goed te volgen met RHEED.



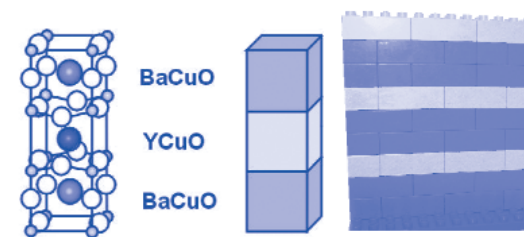
Figuur 12: RHEED intensiteit tijdens 'standaard' depositie (links) en 'interval' depositie (rechts). De bijbehorende AFM opnames laten zien dat in het eerste geval eilandgroei en in het laatste geval laag voor laag groei optreedt.

In figuur 12 staat het verloop van de RHEED intensiteit gedurende een depositie via standaard en interval depositie. In beide gevallen zijn de overige parameters gelijk. In het geval van de continue depositie neemt de intensiteit tijdens de depositie af, een indicatie voor verruwing van het oppervlak. Een AFM opname bevestigt de vorming van eilandjes met meervoudige eenheidscelstappen. Tijdens de interval depositie blijft de intensiteit hoog. Tijdens de depositie schiet de intensiteit naar beneden, immers er wordt veel materiaal gedeponereerd, waarna de intensiteit snel toeneemt door het groeien van een gesloten laag. De bijbehorende AFM opname laat alleen eilandjes zien ter hoogte van de eenheidscel van strontiumtitaanat op een gesloten oppervlak.

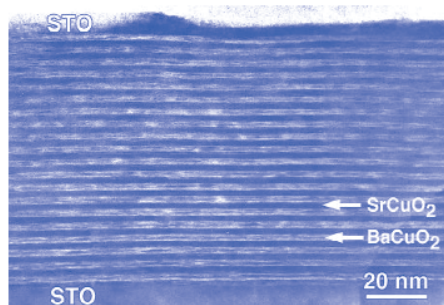
Deze nieuwe manier van deponeren biedt vele mogelijkheden. We kunnen de groei van de dunne lagen beïnvloeden, maar ook materialen construeren door het stapelen van verschillende eenheidscellen: **LEGO® op atomaire schaal**.

In het vervolg wil ik twee voorbeelden aanhalen. Als eerste de bestaande en bekende hoge temperatuur supergeleider, daarna de uiteindelijke uitdaging: het maken van nog niet bestaande materialen.

De hoge temperatuur supergeleider $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ bestaat uit 2 verschillende perovskiet blokken: YCuO en BaCuO . Door alternerend de blokken te deponeren kunnen we de juiste structuur stapelen. In figuur 13 staat de schematische weergave van de stapeling van de verschillende koperoxide blokken en het RHEED tijdens de depositie. Hoe groter het aantal pulsen per blok des te kleiner de fout, het aantal wordt wel gelimiteerd door de frequentie van de laser. De totale depositietijd per interval moet immers kleiner zijn dan de relaxatietijd.



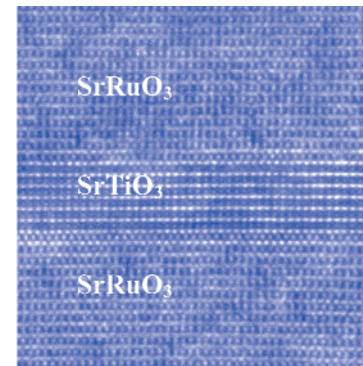
Figuur 13: Schematische voorstelling van $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, bestaande uit 2 BaCuO en 1 YCuO blokken.



Figuur 14: Hoge resolutie TEM opname van kunstmatig gemaakte supergeleider bestaande uit SrCuO en BaCuO. De opname is gemaakt door Karen Verbist, RUCA, Antwerpen.

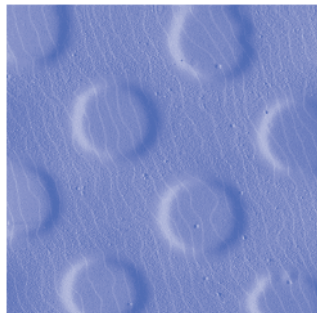
Dezelfde methode kan gebruikt worden om geheel nieuwe materialen te construeren of bestaande materialen te combineren om vervolgens hun gedrag te bestuderen. Een voorbeeld is de stapeling van CaCuO en BaCuO die dr. Ir. Gertjan Koster tijdens zijn promotiewerk heeft uitgevoerd. In figuur 14 staat een hoge resolutie transmissie elektron microscoop opname, waarbij deze stapeling duidelijk zichtbaar is.

Wanneer we dunne lagen van de afzonderlijke materialen maken krijgen we respectievelijk een slechte metallische geleider en een halfgeleider, die zelfs niet stabiel is en blootgesteld aan de lucht uit elkaar valt. Gecombineerd wordt het een goede geleider, die zelfs bij lage temperaturen supergeleiding vertoont. Een supergeleider die alleen kunstmatig te maken is. De exacte reden? Vertel het mij! Natuurlijk speelt de eerder genoemde valentieverschil tussen strontium, calcium en barium en de zuurstofvacatures een rol, maar niet als enige. Ook de stress en de bijbehorende oxidatie is van belang. Het geeft in ieder geval aan dat we in staat zijn om nieuwe materialen met mogelijk zeer verrassende eigenschappen te construeren. Deze bij de leerstoel Lage Temperaturen ontwikkelde techniek kunnen we veel breder toepassen en de laatst toegekende VICI laureaat is toegekend om deze weg verder te onderzoeken en te exploreren.



Figuur 15: HRTEM opname van een ferromagnetisch (SrRuO₃) en ferroelektrisch (SrTiO₃) materiaal. De laatstgenoemde is 6 eenheidscellen dik.

Laten we een Gedankenexperiment doen. Zoals ik reeds in het begin heb aangegeven kunnen de perovskietachtige materialen uiteenlopende eigenschappen hebben: van isolerend tot supergeleidend of van para-magnetisch tot ferromagnetisch. Dit terwijl hun kristalstructuur zeer overeenkomstig zijn. Wat gebeurt er wanneer we de materialen steeds dunner maken? Blijft een ferromagnetisch materiaal ferromagnetisch? Blijft een ferro-elektrisch materiaal ferro-elektrisch? Wat gebeurt er wanneer we een structuur maken bestaande uit verschillende complexe oxidische materialen? Wordt de structuur ferro-magnetisch, ferro-elektrisch of een combinatie van de twee effecten? Een materiaal dat dan uniek is, immers materialen die beide eigenschappen bezitten zijn zeer zeldzaam. De interactie tussen elektronen of spins zal een dominante rol gaan spelen. Deze interactie vindt op zeer kleine afstand plaats en vooral wanneer we in staat zijn om hiermee nanostructuren te maken zie ik vele mogelijkheden voor nieuwe devices, zie figuur 15. Kunnen we materialen construeren waarin we bijvoorbeeld magnetisch data kunnen schrijven, terwijl we het elektrisch uitlezen of omgekeerd? Dit geldt ook voor andere eigenschappen. Materialen die goed doorzichtig zijn voor zichtbaar licht zijn vaak zeer slechte geleiders. Een constructie bestaande uit gelijkvormige materialen, maar met verschillende eigenschappen, kan leiden tot materialen die optisch kunnen schakelen onder invloed van een elektrisch veld of misschien een magnetisch veld.



Figuur 16: AFM opname van NiO_2 dots op SrTiO_3 . De dots zijn gedeponeerd door een zeef en zijn 750 nm in doorsnede.

Bij het maken van nanostructuren zullen we ook gebruik maken van een techniek die wij thans in samenwerking met prof. Jürgen Brugger (EPFL) aan het uitwerken zijn. Hierbij wordt door middel van een zeeftechniek, direct nanostructuren gedeponeerd. In figuur 16 staat een AFM opname van een dergelijk experiment. De lijnen die over het oppervlak lopen zijn de stapranden van het SrTiO_3 kristal waarop de NiO_2 dotjes zijn gedeponeerd. Deze stapranden zijn 0.4 nm hoog.

Het stapelen van verschillende materialen is niet het enige wapen die we kunnen gebruiken. Omdat de blokjes bestaan uit verschillende atomen, ieder met hun eigen ionenstraal, zullen de afmetingen of kristalstructuren iets verschillen. Het stapelen kan gepaard gaan met stress of spanningen in het materiaal. Het is een bekend gegeven in de dunne lagen groei dat het enige eenheidscellen duurt voordat deze stress is gerelaxeerd. Vaak gaat dat gepaard met fouten in het rooster of breuklijnen in het materiaal. In ons geval zijn de lagen zeer dun en krijgt het niet de mogelijkheid om te relaxeren. Ten gevolge van de ontstane stress kan de eigenschap van het materiaal ook veranderen, bijvoorbeeld doordat het materiaal minder zuurstof kan opnemen.

Een inspirerend aanbod (1)

Uit het bovenstaande moge duidelijk zijn dat ik vele uitdagingen in het wetenschappelijk onderzoek naar deze complexe oxides zie; maar ook uitdagingen binnen het onderwijs. Met ingang van dit jaar zijn de faculteiten Technische Natuurkunde en Chemische Technologie samengegaan en vormen met de opleidingen Biomedische Techniek en Technische Geneeskunde de nieuwe faculteit Technische Natuurwetenschappen. U zult uit het begin van mijn oratie begrijpen dat ik als materiaalkundige deze ontwikkeling toejuich. Mijn vakgebied speelt zich af tussen deze twee 'oude' disciplines. Het geeft dan ook vele mogelijkheden om ons te profileren naar de toekomstige studenten. Zoals u misschien weet heb ik mij een aantal jaren intensief bezig gehouden met de studievoorlichting, zowel voor de opleiding technische natuurkunde als centraal voor de universiteit. Ook als mentor heb ik mij verdiept in het reilen en zeilen van onze studenten. Ik ben ervan overtuigd dat de VWO-er enthousiast te maken is voor een 'harde' technische studie, alleen moeten we hen wel wat te bieden hebben. We moeten ons realiseren dat de voorkennis anders is, niet minder maar anders. Maar ook onze opleiding is met de invoering van de bachelors en masters veranderd. Wat moet het niveau van een bachelor zijn? Of beter gezegd wat moeten hun competenties zijn? Moeten we eisen dat studenten beschikken over alle (theoretische) kennis of vormt de universitaire opleiding slechts de basis? Het kan toch niet zo zijn dat we denken of willen dat die jaren tussen je 18^{de} en 24^{ste} allesbepalend zijn voor de rest van je leven. Het moet een periode zijn waarbij je leert waar je capaciteiten liggen. Niet alles of niets oftewel wel of geen diploma, maar een fase in je leven waar je via uitdagingen en mogelijkheden je kan ontplooiën. Die mogelijkheden hebben wij, zeker als Universiteit Twente, zeker als brede science faculteit. Voor ons de uitdaging om een opleiding aan te bieden, niet zoals tot op heden met een uitgangsniveau, maar een die is toegespitst op de student. Laat de student zelf zijn portfolio samenstellen, geef ze de eigen verantwoordelijkheid in deze, zonder daarbij concessies te doen aan de eerder genoemde competenties. Het zal geen makkelijke maar wel uitdagende taak zijn om een opleiding op maat aan te bieden. Een inspirerend aanbod voor technisch georiënteerde studenten, studenten die graag breed opgeleid worden en/of studenten die juist het uiterste aan kennis willen opdoen.

Een inspirerend aanbod



samen werken aan breed opgeleide academici

Raad voor de Campusvoorzieningen, april 1997

Een andere reden waarom ik denk dat deze universiteit uniek is en nauw aansluit met portfolio gericht onderwijs is de academische vorming die aan de studenten geboden wordt. Dit is niet altijd zo geweest. Midden jaren negentig is door het beursenstelsel en blokonderwijs een veel te grote studiedruk ontstaan. Mede door het 'snel scoren tijdperk' raakte het studentenactivisme op de achtergrond. Zelf heb ik in die tijd zitting mogen nemen in een werkgroep die het studentenactivisme onder de loep heeft genomen, resulterend in het rapport: *een inspirerend aanbod*. Aanbevelingen waren o.a. het accepteren van studentenactivisme ook door de faculteiten, het beschikbaar stellen van zoveel mogelijk middelen en onderkennen dat studenten daarvoor beloond kunnen worden, zowel in studiepunten als financieel. Het rapport is ongetwijfeld in een bureaula terecht gekomen, maar misschien heeft het wel mede geleid tot de oprichting van de Student Union. Deze Student Union is wat mij betreft een mooi voorbeeld van het hernieuwde studentenactivisme. Door sommige sceptici worden zij gezien als een nieuwe tussenlaag in onze universitaire bestuursstructuur, maar in werkelijkheid is het een organisatie die door zijn bevoegdheden en ondernemingsdrift de nieuwe impuls is die we nodig hebben. Veel gebeurt hierbij achter de schermen, af en toe is het voor de hele universitaire gemeenschap zichtbaar, zoals de vernieuwde Bastille, die gisteren officieel is geopend en die de meeste van u vanavond kunnen bewonderen. Beste Student Union laat dit vooral zichtbaar blijven.

Een oratie uitspreken voor zo'n breed gezelschap, waarvan de meeste verbonden zijn aan deze universiteit is voor mij een mooie gelegenheid om mijn visie te geven betreffende een inspirerend aanbod voor het personeel

op deze universiteit. Talent zit overal en talent moet gestimuleerd en gehonoreerd worden. Lastig misschien, maar een mooier instrument is nauwelijks denkbaar. Ik wil graag twee voorbeelden aanhalen. Als eerste de Universitair Docent (UD). Sinds de laatste bestuurlijke hervorming is de weg naar het universitair Hoofd Docent (UHD)-schap flink beperkt. Hierdoor zal voor een groot aantal UD's in een vroeg stadium de carrièrelijn eindigen. Ondanks hun inspanningen op het gebied van onderzoek en/of onderwijs. Waarom niet gelijk vooraanstaande laboratoria en universiteiten wereldwijd het invoeren van de fellow. Deze research of onderwijs fellow heeft aantoonbaar zijn sporen verdiend en wordt in de gelegenheid gesteld zijn wetenschappelijke carrière te voltooien met een zekere mate van vrijheid. Zo'n fellow is geen automatisme maar eervolle toekenning mede door een externe of interne beoordeling en weerspiegelt de erkentelijkheid die de universiteit heeft ten aanzien van betrokken persoon. U zult van mij begrijpen dat, wanneer de situatie zich voordoet, de fellowship ook toegekend moet kunnen worden aan andere geledingen van onze universitaire gemeenschap.

Een tweede voorbeeld waar onze universiteit maar het voortouw moet nemen is het promotierecht van onze UHD's. Vooral met de invoering van ons nieuwe financieringsmodel stellen we hoge eisen aan onze UHD's. In feite moeten zij, gelijk aan de hoogleraren, actief betrokken zijn bij het realiseren van projecten, liefst tweede geldstroom. Het aantal promovendi neemt toe en de belasting voor de staf navenant. Een snelle rekensom leert ons dat een UHD al snel 4 tot 5 promovendi moet begeleiden om zijn onderzoek, inclusief salaris te verdienen. Om de situatie geen geweld aan te doen moeten wij de UHD's het promotierecht verlenen. We lopen daarmee in de pas met bijna alle andere landen. Een UHD die een project binnenhaalt, zorgt voor de dagelijkse begeleiding van de promovendus en een wezenlijke bijdrage heeft bij het totstandkoming van het proefschrift, verdient het promotor-recht.

Een inspirerend aanbod (2)

Tot slot van mijn oratie wil ik stilstaan bij de vele mensen die mij hebben gesteund op de weg naar deze gebeurtenis. Het inspirerend aanbod dat ik heb gekregen gedurende mijn studieperiode heeft hierbij een zeer belangrijke rol gespeeld.

Ik herinner mij nog goed het gesprek met mijn vader.

Een houten bureau dat een beetje afgeschermd stond van de eetkamer.

Daar zat mijn vader vaak zijn lessen voor te bereiden. Hij was leraar op de MTS en een bezorgde vader van een lastige zoon. Hij sloeg een boek met werktuigbouwkundige machines open en liet vol passie zien hoe interessant dat wel niet was en wat je er later mee kon worden. Zijn opzet was mij erop voor te bereiden dat ik naar de LTS moest, om toch nog een vak te leren.

De eerste indrukken op de LTS zetten meteen de toon. De leraren waren zeer enthousiast, inspirerend en betrokken. Ik vertel dit omdat er mensen zijn zoals ik die gegrepen kunnen worden door een onderwerp of enthousiaste docenten.

Na de MTS, waarbij ik mijn vader als docent leerde kennen, volgde de HTS. Tijdens mijn HTS studie kwam ik al in contact met de Universiteit Twente, toen nog Technische Hogeschool Twente. Ik rook aan het doen van experimenten en wist dat ik daarin verder wilde.

Door meer geluk dan wijsheid kwam ik terecht bij de leerstoel Lage Temperaturen van de Universiteit Twente. De opdracht die ik kreeg was het doen van experimenten met een mengkoeler, een koelmachine waarmee je tot op eenhonderdste van het absolute nulpunt experimenten kon uitvoeren. Deze opdracht maakte in mij de onderzoeker los. De uitdaging, het ongrijpbare en het idee experimenten te doen, die nog nooit iemand eerder gedaan had gaf mij een zekere extase, een gevoel van bevlogenheid.

Prof. Leen van der Marel, de toenmalige hoogleraar, gaf mij alle vrijheid om mij verder te ontplooiën. Helaas is Leen kortgeleden overleden, maar zijn felicitaties toen mijn benoeming bekend werd gemaakt zijn mij zeer dierbaar.

De komst van prof. Horst Rogalla in de leerstoel Lage Temperaturen is cruciaal geweest in mijn wetenschappelijke carrière. Hij introduceerde de hoge temperatuur supergeleiding in Twente en stelde mij in staat om te gaan promoveren. Die periode waarin ik samen met mijn assistent-promotor dr. ir. Jaap Flokstra gewerkt heb aan het maken van deze supergeleider, zowel in bulk als dunne film, ervaar ik nog steeds als een zeer

creatieve en ongelofelijk gezellige periode. Ik ben erg blij dat mijn vader mijn promotie tot doctor in 1991 heeft mee mogen maken.

Horst stelde mij daarna in staat om als wetenschappelijk medewerker door te gaan. Dit alles op zijn onnavolgbare en bijzondere inspirerende wijze.

Alles is mogelijk, alles mag, als het maar creatief en origineel is. “we hebben het ook gedaan” telt niet! In deze periode ontstond de innige en bijzonder vruchtbare samenwerking met dr. ing. Guus Rijnders, een samenwerking die hopelijk nog lang zal voortduren. Veel hetgeen ik vandaag gepresenteerd heb is afkomstig uit de vele brainstorming die we graag mogen doen.

De periode bij Lage Temperaturen is zeer bijzonder geweest. De onderlinge contacten zowel wetenschappelijk maar ook persoonlijk waren uniek.

De mascotte ‘een gezette vrolijke pinguïn’ heeft hier zeker aan bijgedragen. Ik ben dan ook zeer verheugd dat deze vruchtbare samenwerking met Horst Rogalla en Hans Hilgenkamp wordt voortgezet. Als bewijs een (aangepast) patroon met halve fluxquanta. Zonder de materiaalkunde aan de ene en de fysica aan de andere kant was dit nooit gelukt.

Tijdens mijn verblijf aan de universiteit van Stanford ontmoette ik de emeritus hoogleraar Theodore Geballe, die mij liet kennismaken met een soort wetenschapsbeoefening waar ik bijzonder veel ontzag voor heb. Het is moeilijk om onder woorden te brengen, maar de combinatie van passie, geduld, enthousiasme en de persoonlijk interesse maken dat deze wetenschapper uniek is en een groot voorbeeld voor mij is geworden, alhoewel ik mij besef dat ik er nooit aan zal kunnen tippen. Ik ben zeer verheugd dat wij deze samenwerking met Stanford voortzetten en ook formaliseren in een officieel samenwerkings-overeenkomst. Wij verwachten daar veel van.

Na mijn Stanford periode stelde prof. dr. ir. David Reinhoudt mij aan als programma directeur op het gebied van de Materiaalkunde van Interfaces, een MASIF programma en strategische oriëntatie binnen het onderzoeks-instituut MESA+. Ik bevond mij tussen creatieve mede-directeuren, eigenlijk trekkers genoemd, maar dat klonk wat minder. De lat kwam weer wat hoger te liggen en als ik kijk hoe MESA+ zich ontwikkeld heeft, dan kan je stellen dat het koningskoppel David Reinhoudt en Kees Eijkel voor de universiteit in z’n geheel en MESA+ in het bijzonder van onschatbare waarde zijn. Ik hoop dat de inspanningen die beide getroosten op het gebied van de nano-technologie, een substantieel onderdeel van mijn werk, en in het bijzonder NANONed, zijn vruchten zal afwerpen. Samen met de realisatie van een high-tech laboratorium kunnen we een mooie en fascinerende toekomst tegemoet zien.

Beste studenten en oud-studenten. Jullie weten misschien niet half hoe leuk ik het vind om jullie samen te werken, zowel in het vakgebied als daarbuiten in diverse commissies en besturen of gewoon in de stad in een van de cafeetjes of eetgelegenheden. Daarnaast zijn er vele sportverenigingen, waarbij voor mij de volleybalvereniging Harambee een bijzondere plaats inneemt. De manier waarop studie-verenigingen zoals Arago en Alembic zich manifesteren en activiteiten organiseren is echt fantastisch. Ik hoop dat jullie nog sterker worden in de nieuwe faculteit en dat de BAMA (Bachelor-Master) geen negatief invloed heeft op het aantal actievelingen.

De medewerkers van de Universiteit Twente wil ik bij deze bedanken. Hierbij denk ik o.a. aan de mensen van restauratieve voorzieningen, de portiers, de nachtbewakers. Zij zorgen ervoor dat deze universiteit zo uniek is.

Beste vakgroepleden. Ik ben zeer blij dat jullie met mij het avontuur willen aangaan. Een avontuur deels op bekend terrein, deels volledig nieuw.

Ik vond het erg mooi dat jullie zo enthousiast hebben gereageerd op mijn komst, als ware het een nieuwe LEGO-speeltje. Wat mij betreft is de LEGO-doos oneindig groot!

“Vriendschap is een droom een pakketje schoot met een dun laagje chroom”. Als ooit een tekst niet van toepassing is, is het wel deze. Ik prijs mij zeer gelukkig met de vele vrienden die ik bezit. Vele zitten in de zaal, een aantal kon helaas niet aanwezig zijn. Maar ik wilde er toch twee noemen Albert en Arjan. Al sinds onze studietijd trekken wij samen op. We waren elkaar's paranimfen en tijdens de oratie van Albert deed hij uitdagend de opmerking: jullie zijn nu aan zet. Welnu tijdens Arjan's promotie werd het mij te kennen gegeven, dus bij deze heb je hem terug Arjan, *nu kan je niet achterblijven*.

Beste familie, beste vrienden,

Om dit te bereiken was energie en motivatie nodig. En die heb ik van jullie allemaal ontvangen. Nu ik hier sta besef ik dat ik nu de tijd heb om te relaxen en misschien meer tijd te steken in andere dingen.

Nou, mooi niet!



Universiteit Twente
de ondernemende universiteit

