TU/e EINDHOVEN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Leven met fouten

Citation for published version (APA):
Metselaar, R. (1977). *Leven met fouten*. Technische Hogeschool Eindhoven.

Document status and date:
Gepubliceerd: 01/01/1977

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

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

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Download date: 09. Oct. 2026

Leven met fouten

Rede uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van gewoon lector in de fysische chemie aan de Technische Hogeschool Eindhoven op 30 september 1977 door Dr. R. Metselaar.

Mijne Heren leden van het College van Bestuur en van de Hogeschoolraad,
mijnheer de Rector Magnificus,
dames en heren hoogleraren, lectoren en wetenschappelijk medewerkers,
dames en heren leden van de technische en administratieve staf,
dames en heren studenten,
en voorts U allen, die door Uw aanwezigheid deze bijeenkomst aan waarde doet toenemen.

Zeer gewaardeerde toehoorders,

In dit betoog wil ik U trachten duidelijk te maken welk een belangrijke rol fouten spelen in ons dagelijks leven. Zonder overdrijving durf ik te stellen dat ik, zoals vele anderen, van en met fouten leef. Hierbij moet U niet denken aan mijn werk als corrector van tentamens, maar veeleer als onderzoeker van de vaste stof: speurend naar onregelmatigheden, afwijkingen, kortom naar fouten. Het mogelijke verwijt dat achter deze aandacht een ongezonde belangstelling schuilt voor het niet-reguliere, hoop ik te weerleggen door U te wijzen op de uiterst vruchtbare ontwikkeling van de fysica en de chemie van de vaste stof. Haar geschiedenis moet haar oorsprong vinden in de nieuwsgierigheid, verwondering en de praktische behoeften van de oudste mensen. Al sinds duizenden jaren is de mens geïnteresseerd in de talrijke verschijningsvormen van de vaste fase. In de oudste tijden was men nog tevreden met hetgeen de natuur te bieden had als gebruiksvoorwerp of als wapen – denkt U bijvoorbeeld aan het stenen tijdperk. Van het hanteren van natuurlijk gevormde stenen tot het bewerken van hout en stenen tot gereedschap is misschien slechts een kleine maar in ieder geval een fundamentele stap. Een veel grotere technologische vooruitgang vinden we bij de produktie van keramische voorwerpen. Zoals dikwijls het geval is, is de technologie hier ver vóór bij de wetenschap. Het inzicht in de aard van de vaste stof dateert eerst van de laatste tweehonderd jaar. Hoe weinig men in dit opzicht in het begin van onze jaartelling nog wist, moge het volgende voorbeeld duidelijk maken.
Een in de bergen veel voorkomend mineraal is het kwarts. Deze kristallijne vorm van de verbinding siliciumdioxide was reeds bij de Grieken bekend onder de naam bergkristal. Men onderstelde echter dat men hier te maken had met ijs; het Griekse woord 'krystallos' betekent dan ook 'helder ijs'. De Romeinse natuuronderzoeker Plinius, die in 79 na Christus omkwam bij een uitbarsting van de Vesuvius, schrijft hierover:

Bergkristal wordt slechts daar gevonden waar de wintersneeuw de strengste koude brengt, en zonder twijfel is het een soort ijs, waar de Grieken het naar genoemd hebben'.
Plinius vervolgt dan: 'Het staat vast dat het niet in een waterrijke omgeving gevonden wordt, en omdat het bovendien zo koud is, moet het wel uit neerslag en zuivere sneeuw ontstaan'. Ook in de Middeleeuwen gebruikt men het woord kristal nog voor het doorzichtig, gekristalliseerde kwarts. Men was er van overtuigd dat bergkristallen uit water bestonden, dat bij de strenge koude in de Alpen zo diep bevroren was, dat het niet meer kon ontdooien.
Eerst rond 1500 verschijnt het woord *kwarts* in de literatuur, en in de 16e–17e eeuw heeft het woord kristal de algemene betekenis verkregen die wij er thans nog aan toekennen. Tegen het begin van de 18e eeuw ontstaat het idee dat de regelmatige uitwendige vorm van een kristal veroorzaakt wordt door een regelmaat in de inwendige structuur. De eerste speculatie hierover vinden we in het boek 'Micrographia' dat Robert Hooke in 1665 publiceert. Hij oppert hierin het denkbeeld dat een kristal een regelmatige stapeling van bolvormige deeltjes is. Korte tijd later, in 1678, werd dit idee door onze landgenoot Christiaan Huygens[1]) verder uitgewerkt. Tijdens zijn studie van de breking van lichtstralen door calcietkristallen, merkte hij op dat er zeer uitgesproken splijtvlakken aan deze kristallen voorkomen. Huygens onderstelde dat het kristal opgebouwd was uit een vlakke stapeling van deeltjes, waardoor in bepaalde richtingen natuurlijke spijtvlakken ontstaan.

Het is mij niet bekend of Huygens het werk van Hooke kende. Wel blijkt uit de literatuur dat deze veelzijdige geleerden niet altijd in grote vriendschap met elkaar omgingen. Eén korte anecdote wil ik U niet onthouden. Hooke was één van een groep briljante studenten in Oxford, die regelmatig discussieerden over natuurwetenschappelijke verschijnselen. Onder patronage van koning Charles II stichtten zij de Royal Society of London. Binnen dit illustere gezelschap opperde Hooke in 1658 het idee om een veer in plaats van gewichten te gebruiken voor het aandrijven van een uurwerk. Enkele van zijn vrienden, waaronder Boyle, zagen het grote belang hiervan in, en steunden hem met de uitwerking van dit idee. U moet hierbij bedenken dat in die tijd een plaatsbepaling op zee nog altijd niet mogelijk was door de geringe nauwkeurigheid van de uurwerken. Om onduidelijke redenen trok Hooke zich echter weer terug uit dit project, waardoor het niet tot een octrooi kwam. In 1674 was het Christiaan Huygens die het eerste horloge met een onrust met spiraalveer construeerde, en toen Hooke dit vernam was hij woedend. Om zich te wreken, maakte hij samen met de klokkenmaker Thomas Tompion een soortgelijk horloge dat hij

aanbood aan de koning. In dit uurwerk graveerde hij de tekst: 'Robert Hooke invenit 1658, T. Tompion fecit 1675'. Het is echter vrij zeker dat Huygens inderdaad de eerste was die de spiraalveer heeft toegepast.

Keren we nu terug van het platvloerse verschijnsel van de menselijke naijver tot de verlokkingen van het kristal. Eerst in het jaar 1800 nam de Franse geestelijke Haüy[2]) het idee van een kristal als regelmatige stapeling van bouwstenen weer op. Hij verklaart dan de hoeken tussen de splijtvlakken van calciet door aan te nemen dat het kristal is opgebouwd uit zeer kleine eenheden waaraan deze hoeken ook al voorkomen. Tenslotte postuleert Bravais[3]) in 1848 dat atomen in een kristal ruimtelijk geordend zijn. De tijd is nu bijna rijp voor de grote doorbraak in het vaste-stofonderzoek.
Op 8 juni 1912 wordt aan de Beierse Akademie van Wetenschappen in München een manuscript aangeboden onder de titel: 'Interferenz-Erscheinungen bei Röntgenstrahlen'. Friedrich, Knipping en Laue[4]) tonen daarin experimenteel aan dat kristallen bestaan uit een periodieke rangschikking van atomen. Zoals een behangselpatroon opgebouwd kan zijn uit een regelmatige herhaling van een motief in twee dimensies, moeten we ons een kristal opgebouwd denken door herhaling van een motief in drie dimensies.
Voor de kristallografie betekent deze ontdekking het einde van een periode waarin de klassificatie plaatsvindt naar de uiterlijke vorm van de kristallen. Een analyse van de door een kristal verstrooide röntgenstraling maakt het nu immers mogelijk de inwendige structuur op te helderen. In 1914 publiceert W.L. Bragg[5]) (de latere Sir Lawrence) de eerste kristalstructuurbepaling met behulp van deze nieuwe methode. In de daarop volgende jaren zal een steeds groter wordende stroom van publicaties over dit onderwerp verschijnen.
De snelle ontwikkeling van de kennis van de vaste stof is mede het gevolg van het werk van een aantal van de grootste theoretisch fysici van deze eeuw. In 1901 doet Planck[6]) de eerste suggestie voor de kwantumtheorie, in 1913 geeft Bohr[7]) een beschrijving van het waterstofatoom, en in 1926 legt Schrödinger[8]) het gedrag van een elektron vast in een wiskundige uitdrukking. Wat de wetten van Newton betekenen voor de klassieke mechanica, en de Maxwell-vergelijkingen voor het elektromagnetisme, is de Schrödinger-vergelijking als mathematische formulering voor de beschrijving van de atomaire, de moleculaire en de vaste-stofstructuur. Het inzicht in de periodieke opbouw van de vaste stof brengt een groot aantal nieuwe begrippen met zich mee. We zijn hier weliswaar op het werkterrein van de vastestoffysica, maar ik meen dat ook voor een chemicus die met vaste stoffen werkt een goede basiskennis op dit gebied onmisbaar is.

Het zij mij daarom veroorloofd de volgende opmerking te maken. In het huidige voor-kandidaatsprogramma voor chemici zijn 2 semesteruren gewijd aan de vaste-stoffysica en 4 semesteruren aan de vaste-stofchemie. Onder de druk van de herstructurering van het studieprogramma blijven van deze 6 uren slechts 2 uren vaste-stofchemie over. Een voor de chemisch technoloog interessant onderwerp als materiaalkunde verliest daarmee vrijwel de gehele onderbouw. Om dit te voorkomen lijkt het mij wenselijk een aantal van de belangrijkste onderwerpen in andere colleges te integreren.

Keren we thans terug tot ons oorspronkelijk onderwerp.
Voor een oppervlakkig toeschouwer lijkt de vaste stof een bij uitstek star geheel. De Engelse en Franse benamingen, solid respectievelijk solide, beide afgeleid van het Latijnse solidus, brengen dit uiterlijke aspect eveneens tot uitdrukking. De glans van een edelsteen draagt niet slechts bij tot de luister van de draagster ervan, zij bevestigt in vele gevallen ook de soliditeit van haar echtgenoot. Doch schijn bedriegt! De bekende Engelse kristallografe Dame Kathleen Lonsdale[9]) maakte de volgende vergelijking: 'A crystal is like a class of children arranged for drill, but standing at ease, so that while the class as a whole has regularity both in time and space, each individual child is a little fidgety!' Vertaalt naar de vaste stof betekent dit: de samenstellende atomen van de stof bevinden zich gemiddeld over de tijd op goed gedefinieerde en geordende posities, ze zijn daarbij echter in een voortdurende trillingsbeweging. Zelfs bij het absolute nulpunt van de temperatuurschaal voeren de atomen een vibratie uit rond hun evenwichtspositie. Het gekwantiseerde energiepakketje dat samenhangt met de vibraties in het kristal werd door Tamm[10]) een fonon genoemd. Deze fononen of roostertrillingen spelen een uiterst belangrijke rol in de eigenschappen van de vaste stof. We zijn hiermee op een uitgebreid en interessant werkterrein van de vaste-stofonderzoeker gekomen namelijk dat van de afwijkingen van de ideale structuur. We kunnen het fonon opvatten als de meest elementaire fout in het kristalrooster. Naast neutronenverstrooiingstechnieken zijn het vooral spectroscopische methoden die ons een inzicht in deze roostertrillingen verschaffen. Moderne interferometers maken het onderzoek mogelijk over een zeer groot spectraal gebied met een hoog oplossend vermogen. Door de ontwikkeling van de laser is naast de absorptie- en reflectiespectrometrie ook de Ramanspectrometrie tot een belangrijke informatiebron geworden.
Behalve met de beweging van atomen hebben we te maken met elektronenbewegingen. Ook hier inspireert de periodieke structuur van de vaste stof tot een belangrijk, nieuw concept, nl. dat van de

bandenstructuur. De ligging van de energiebanden is bepalend voor vele fysische eigenschappen, zoals de elektrische geleiding, de magnetische en de optische eigenschappen. De elektronenbewegingen zijn overigens niet onafhankelijk van de atoombewegingen. Denken we bijvoorbeeld aan de elektrische geleiding in een metaal. Onder invloed van een aangelegd elektrisch veld zullen de elektronen zich verplaatsen door het metaal. Met toenemende temperatuur verstoort de warmtebeweging van de atomen steeds meer de vrije doorgang van de elektronen. Omdat wij graag een voor niet-ingewijden onbegrijpelijke vaktaal bezigen, zeggen we dan dat de fonon-elektronwisselwerking de weerstand van het metaal doet toenemen bij toenemende temperatuur.

Mijn betoog was tot nu toe vrij sterk fysisch georiënteerd. Enerzijds komt dit doordat ik U liet kennismaken met een aantal basisbegrippen uit de wetenschap van de vaste stof. Anderzijds is het inderdaad zeer moeilijk de grens tussen chemie en fysica van de vaste stof duidelijk aan te geven. Veeleer is er een verschil in benaderingswijze van de problemen te constateren. Als we toch het werkterrein zouden willen afbakenen dan zouden we misschien kunnen stellen dat de chemici zich voornamelijk beperken tot de defecte vaste stof. Ik besef echter dat ik hiermee velen, bijvoorbeeld mijn collegae kristallografen en kristalgroeiers, ernstig tekort doe. Zo U wilt mag U het ook aan mijn persoonlijke willekeur toeschrijven dat ik mij thans concentreer op de fouten in het kristalrooster. Met fouten bedoel ik dan afwijkingen ten opzichte van de ideale d.w.z. periodieke structuur. Ik wil U met enkele van de eenvoudigste fouten laten kennismaken.
Een triviale roosterfout is de verontreiniging. Hierin zijn we uiteraard niet geïnteresseerd. Wel interessant wordt het wanneer we een stof eerst in zeer zuivere vorm kunnen bereiden en vervolgens de materiaaleigenschappen wijzigen door toevoegen van vreemde atomen in een nauwkeurige dosering. Als voorbeeld van het geweldige belang van dit soort onderzoek noem ik de ontwikkeling van de halfgeleiders met alle daarmee verbonden technologische implicaties. Zelfs mijn achtjarig zoontje is vertrouwd met het woord transistor. Voor het vervaardigen van zo'n transistor zuivert men eerst silicium éénkristallen totdat er minder dan 1 vreemd atoom per 10^{10} d.i. tien miljard siliciumatomen aanwezig is. Vervolgens krijgt men de gewenste halfgeleidende eigenschappen door bepaalde toevoegingen, bijvoorbeeld boriumatomen of fosforatomen. De invloed van dit soort roosterfouten is, hoewel zeer spectaculair, op zich niet zo verrassend. Er komen echter ook in zeer zuivere stoffen roosterfouten voor. Men noemt deze in het Engels 'native defects'; we zouden kunnen zeggen aangeboren fouten.

We kunnen ons het ontstaan van dit soort fouten op de volgende wijze voorstellen. Bij het absolute nulpunt denken we ons een perfect kristalrooster met alle atomen trillend rond hun evenwichtspositie. Bij verhoging van de temperatuur worden de trillingsbewegingen steeds heftiger. Zoals men onder dergelijke geëmotioneerde omstandigheden vaker ziet springen een aantal atomen uit de band. Atomen die hun plaats verlaten, laten een lege roosterplaats of vacature achter; de atomen die hun plaats niet meer weten, komen dikwijls terecht op plaatsen waar in de ideale structuur geen atoom aanwezig hoort te zijn. We spreken dan van interstitiële atomen. Omstreeks 1930 verschijnen er een aantal belangrijke publicaties van o.a. Frenkel[11]) en Schottky en Wagner[12]). In deze artikelen wordt de theorie van de roosterfouten en de statistische thermodynamica van reële kristallen ontwikkeld. Een belangrijke conclusie uit dit werk is dat er bij iedere temperatuur boven het absolute nulpunt een eindig aantal roosterfouten aanwezig moet zijn. Om een indruk te geven over de concentratie van de fouten noem ik U dat er in keukenzout, even onder het smeltpunt bij 800°C, één op dertigduizend plaatsen leeg is. Stelt U zich even voor dat U, als Alice in Wonderland, door het kristal kunt lopen. U zult dan, wanneer U dit in een willekeurige richting doet, één op de dertig roosterplaatsen onbezet vinden.

Hoewel er nu ca. 45 jaar verstreken zijn sinds de ideeën over roosterfouten systematisch ontwikkeld werden, is er opvallend weinig van deze resultaten terug te vinden in een gemiddeld chemisch leerboek, met name op middelbaar-schoolniveau. We vinden hier nog altijd een slaafse toewijding aan de cultus van het molecuul en een naïef, doch misplaatst vertrouwen in de algemene toepasbaarheid van de wet van Dalton. Volgens deze theorie heeft een chemische verbinding een eenvoudige en constante samenstelling. Deze wet werd ook voortdurend bevestigd doordat men voornamelijk anorganische reacties in de gasfase bestudeerde. Er was echter reeds in het begin van de vorige eeuw een bittere controverse tussen Proust en Berthollet, waarbij de laatstgenoemde aantoonde dat voor vaste stoffen deze constantheid van samenstelling zeker niet algemeen is. Zijn argumenten werden niet werkelijk weerlegd, maar raakten in het vergeetboek, vooral ook door de groeiende belangstelling voor de organische chemie. Pas een eeuw later toonde Kurnakov[13]) aan dat er een groot aantal verbindingen met variabele samenstelling bestaat. Ook zijn werk had nog weinig invloed op het chemisch denken in die jaren. Het zijn vooral de fysische metingen en de röntgenanalytische onderzoekingen die de doorslaggevende bewijzen voor de onvolkomenheid van de vaste stof leveren. Darwin[14]) merkte bijvoorbeeld reeds in 1914, dus in de beginjaren van de röntgenanalyse, op dat de waargenomen

intensiteit van de verstrooide röntgenstraling in sommige gevallen alleen te verklaren was, indien men aannam dat er onregelmatigheden in de kristalbouw voorkwamen. Met het toenemende inzicht in het gedrag van de perfecte vaste stof wordt ook duidelijker welke invloed afwijkingen van de ideale bouw kunnen uitoefenen. Met name de eerder genoemde publicaties van o.a. Frenkel, Schottky en Wagner hebben hiertoe sterk bijgedragen.

U zult zich wellicht afvragen waarom we ons zo druk maken om een paar fouten in het kristalrooster. Ik wil trachten U dit duidelijk te maken met een discussie over een aantal materiaaleigenschappen. Als belangrijk voorbeeld van een proces in de vaste stof dat beïnvloed wordt door de concentratie van roosterfouten, noem ik de diffusie. Wanneer de concentratie van een atoom aan één zijde van een kristal groter is dan in de rest van het kristal, dan zal er een deeltjesstroom door het kristal ontstaan, die zolang duurt tot de concentratie van dat atoom overal in het kristal gelijk is. We spreken hier van diffusie. U bent allen vertrouwd met dit proces. Wanneer ik in één hoek van een vertrek een druppel parfum laat vallen, zult U na enige tijd de geur overal in het vertrek kunnen waarnemen, zelfs als het er niet waait. U kunt makkelijk inzien dat zo'n verplaatsing van een atoom door het kristal aanzienlijk makkelijker verloopt wanneer er roosterfouten, bijvoorbeeld lege plaatsen, in het rooster aanwezig zijn. Een technologisch zeer belangrijk onderwerp, dat via diffusie samenhangt met roosterfouten, is dat van de vervorming van een materiaal onder een mechanische belasting. Vooral bij verhoogde temperatuur, bijvoorbeeld temperaturen hoger dan een half maal het smeltpunt, kan er na verloop van tijd een aanzienlijke vervorming optreden. We spreken hierbij van kruipverschijnselen.

Naast deze in de tijd langzaam voortschrijdende vervorming kennen we ook deformaties die, reeds bij kamertemperatuur, zeer snel optreden. Denkt U zich eens in dat we een trekkracht uitoefenen op een kristalstaafje. We veroorzaken hiermee een verplaatsing van de atomen uit hun evenwichtsposities. Als de verplaatsing klein is, is de rek elastisch, dat wil zeggen bij het opheffen van de belasting keren de atomen in hun oorspronkelijke posities terug. Bij grotere belasting krijgen we een blijvende lengteverandering. Deze komt tot stand doordat kristalvlakken langs elkaar schuiven. Dank zij ons inzicht in de bindingskrachten tussen de atomen kunnen we ook berekenen bij welke belasting deze blijvende lengteverandering zal optreden. Maar helaas, het experiment bewijst ondubbelzinnig dat ons kristal ca. 1000x zwakker is dan we theoretisch verwachtten. Dit komt doordat we in onze theorie geen rekening hielden met de aanwezigheid van roosterfouten. U kunt zich het afschuifproces van de kristalvlakken,

dat leidt tot de verlenging van het kristal, als volgt voorstellen. Stel U probeert een zwaar tapijt een paar centimeter over de grond te verschuiven door aan de rand te trekken. Dit zal U vrij veel moeite kosten. Het niet-perfecte kristal kunt U nu vergelijken met een kleed waar een plooi in zit. U kunt deze plooi met weinig moeite door het kleed verplaatsen. Zodra U de rand bereikt is het tapijt enige centimeters verschoven. Gedurende het gehele proces is alleen het gebied in de onmiddellijke nabijheid van de plooi in beweging, terwijl het grootste deel van het oppervlak in rust op de vloer blijft liggen. In kristallen is een soortgelijk proces verantwoordelijk voor de afschuiving. Het verstoorde gebied wordt een dislocatie genoemd, en het bestaat uit een lijn van roosterfouten. Als laatste voorbeelden van het belang van roosterfouten noem ik de bereiding en de vormgeving van een vaste stof. Wanneer we atomen A en B met elkaar willen laten reageren tot een verbinding AB, dan zullen deze atomen eerst naar elkaar toe moeten bewegen voor de reactie kan plaatsvinden. Hier hebben we dus weer te maken met een diffusieproces. Dit is eveneens het geval bij de vervaardiging van keramische materialen. We gaan in dit geval uit van een zeer fijn poeder dat in de gewenste vorm wordt geperst. Vervolgens wordt het materiaal zo hoog verhit dat de atomen zich door diffusie kunnen verplaatsen. Uit een los gepakt poeder ontstaat hierbij een vast lichaam.

In de vakgroep fysische chemie van deze hogeschool heeft het onderzoek van de diffusieprocessen altijd grote belangstelling gehad. Door bestudering van het reactieverloop in eenvoudige modelsystemen, zoals twee tegen elkaar geplaatste metalen, is veel inzicht verkregen in het verloop van de diffusie en in het vormingsproces van de daarbij optredende verbindingen. Een ander eenvoudig modelsysteem dat thans in de belangstelling staat is dat van de metaal-metaaloxide-reacties. De hierbij optredende processen zijn o.a. van groot belang voor corrosieverschijnselen bij legeringen. Bij het onderzoek in de vakgroep hebben röntgenografische methoden altijd een belangrijke rol gespeeld, en gezien de aard van de studies zal dat ook in de toekomst zeker het geval blijven. Voor het verkrijgen van een verder inzicht in het verloop van diffusieprocessen en vaste-stofreacties zullen waarschijnlijk ook andere methodieken een rol gaan spelen. Met name is er weinig bekend over de rol van de defecten in de uitgangsmaterialen op de optredende processen. Samenwerking met groepen die beschikken over bijvoorbeeld optisch-spectroscopische, resonantie- en relaxatietechnieken is hiertoe onontbeerlijk.
Een ander onderwerp dat tot nu toe niet de aandacht heeft verkregen die het verdient, is de invloed van het oppervlak op chemische reacties.

Het belang van onderzoek dat zich bezighoudt met materialen met bijzondere en toepasbare fysische eigenschappen neemt nog steeds toe. Van de technologische kant is de vraag vooral gericht op materialen die toepasbaar zijn onder extreme condities. Een deel van de problemen is afkomstig uit de ruimtevaart, waarbij materialen nodig zijn die sterk wisselende temperaturen en mechanische belastingen kunnen verdragen. De laatste tijd is het vooral het zogenaamde energiegelieerde onderzoek dat nieuwe eisen stelt. In dit kader mag een belangrijke researchbijdrage worden verwacht bij de ontwikkeling van zonnecellen en van vaste-stofelektrolyten voor batterijen. Veel onderzoek zal ook gericht dienen te worden op de ontwikkeling van materialen die bruikbaar zijn bij zeer hoge temperaturen en in aanraking met reactieve gassen. Binnen onze T.H. kunnen we hierbij denken aan de materiaalproblemen die zich voordoen bij de ontwikkeling van de magnetohydrodynamische reactor.
Bij het ontwikkelen van bijvoorbeeld een zonnecel zijn de fundamentele research en de ontwikkeling nog zeer nauw gelieerd, op andere gebieden is er daarentegen een grote kloof tussen beide takken van onderzoek. Als voorbeeld noem ik dat we thans nog bezig zijn de diffusieverschijnselen in binaire en ternaire metaallegeringen te bestuderen, terwijl de schoepen van een hoge-temperatuurgasturbine uit wellicht negen verschillende elementen bestaan. Er zijn nog zeer vele andere voorbeelden te bedenken waarbij de technoloog op dikwijls zuiver empirische gronden tot een bepaalde materiaalsamenstelling is gekomen zonder veel ruggesteun uit de fundamentele research. Ik acht het een belangrijke taak van een onderzoeker aan de technische hogeschool deze kloof tussen fundamenteel onderzoek en toepassing te vullen met kennis.

Geachte toehoorders,

De vraag wordt soms gesteld of het nog wel zinvol is, na al die jaren van vaste-stofonderzoek, door te gaan met dit werk. Het tijdperk van de grote ontdekkingen ligt immers al achter ons! Diegenen onder U die actief op dit gebied werkzaam zijn, zullen echter met mij erkennen dat er voortdurend verrassend nieuwe en waardevolle effecten gevonden worden. In de jaren dat ik werkzaam was op het Philips' Natuurkundig Laboratorium heb ik een aantal onderwerpen van nabij tot leven zien komen. Ik beperk mij nu even tot een voorbeeld uit de groep van de magnetische materialen. Voor toepassingen waarbij men een constant magnetisch veld nodig heeft, is het veel aantrekkelijker om permanente magneten te gebruiken dan elektromagneten. Deze aantrekkelijkheid ligt voornamelijk in de besparing aan ruimte en

gewicht die hierdoor wordt bereikt. De kwaliteit van een permanente magneet drukt men uit in het zgn. maximale energieprodukt $(BH)_{max}$. Voor de eerst bekende magneten van koolstofstaal was dit produkt $(BH)_{max} = 2$ kJ/m³ in het jaar 1880. Via een aantal staalsoorten bereikte men met metaallegeringen in 1956 een waarde van ca 90 kJ/m³. Onderzoek aan legeringen van zeldzame-aardmetalen leidde in 1968 tot de verbinding $SmCo_5$ met een $(BH)_{max}$ van 160 kJ/m³, en na verdergaand onderzoek werd in 1973 het record gevestigd met een waarde van 254 kJ/m³. Het is interessant om ook het historisch verloop van deze ontwikkeling te volgen. Wanneer men de waarden van het maximale energieprodukt op een logarithmische schaal uitzet tegen de tijd dan vindt men vanaf 1880 tot heden een vrijwel lineair verband, m.a.w. de ontwikkeling is vrijwel exponentieel verlopen! Het gaat hiermee ongeveer op dezelfde wijze als met de prijzen van een woning. Je verwacht al jaren dat er eens een eind komt aan de stijging, maar toch gaat de prijs voortdurend omhoog. Hoewel de ontwikkeling van de $SmCo_5$-magneet op zich reeds een doorbraak genoemd mag worden, ligt het verrassend nieuwe effect waar ik op doelde toch op een ander terrein. Er werd namelijk gevonden dat de $(BH)_{max}$ van deze magneet in de tijd verminderde. Onderzoek toonde aan dat dit, uiteraard ongewenste effect, samenhangt met waterstof die aanwezig is in de lucht. Zelfs bij kamertemperatuur blijkt het materiaal snel te reageren met moleculaire waterstof, en al naargelang de condities kunnen grote hoeveelheden van dit gas worden opgenomen of afgestaan. De volgende stap was na te gaan hoe andere verbindingen met een soortgelijke kristalbouw zich in dit opzicht gedragen. Uit dit onderzoek werd in 1970 het $LaNi_5$ gevonden dat uitermate geschikt bleek voor opslag van waterstof. Op dezelfde manier als een spons water opneemt, absorbeert dit metaal waterstof, waarbij het juist zoals een spons opzwelt met wel 25% van zijn oorspronkelijk volume. Dit materiaal biedt grote voordelen in vergelijking met waterstofopslag in zware metalen gascilinders of in vloeibare vorm in dewarvaten. Met name kan dit grote voordelen bieden als we denken aan een economie gebaseerd op waterstof in plaats van op aardolie. Ook een groot aantal andere toepassingen is mogelijk.

Het is beslist niet moeilijk meer van dergelijke onverwachte vondsten van het recente vaste-stofonderzoek te vinden. Juist deze verrassingen maken de research tot zo'n boeiende bezigheid. Uit het gegeven voorbeeld blijkt bovendien dat de research niet slechts een aangename tijdpassering voor onderzoekers is, maar dat zij ook een belangrijke factor in onze economie vertegenwoordigt. Ik neem de vrijheid even buiten mijn vakgebied te treden met de volgende opmerking. Reeds

lang is door economen gewezen op het belang van innovaties voor de westerse economie[15]). Daarnaast is door de Amerikaanse onderzoeker Mueller aangetoond dat er een positieve correllatie bestaat tussen de uitgaven voor research en ontwikkeling van een bedrijf, en het aantal innovaties dat door dat bedrijf op de markt wordt gebracht. Het belang van een goed researchpotentieel wordt ook door de meeste ondernemingen ingezien. Voor de T.H. betekent dit dat niet volstaan kan worden met het opleiden van ingenieurs, er zal ook gezorgd moeten worden voor een voldoend aantal ingenieurs die weten hoe zij onderzoek moeten verrichten. Het stemt mij daarom droevig te moeten constateren dat door de huidige maatregelen van bezuiniging op het hoger onderwijs, juist het wetenschappelijk onderzoek de dupe dreigt te worden. Nog afgezien van de eigen merites van dit onderzoek, wordt er hierbij voorbijgegaan aan het feit dat men onderzoek niet kan aanleren door het verrichten van een practicumproef.

Dames en Heren,

Ik meen aan de Technische Hogeschool ook een verandering te constateren in de aard van het onderzoek. Naast belangstelling voor het traditionele onderzoek, dat ik kan kenmerken door: zeer diep graven in een zeer nauw vakgebied, zien we belangstelling voor meer project-gericht onderzoek. Naast sociologische en psychologische factoren spelen hierbij een rol de verwachtingen dat financiering van dit onderzoek via tweede of derde geldstromen mogelijk zal zijn. Voor het uitvoeren van dit soort onderzoek is onze organisatievorm echter weinig geschikt. Ik kan U dit wellicht duidelijk maken aan de hand van de ontwikkeling van een nieuw magnetisch materiaal.
U zult zich wellicht nog uit Uw kinderjaren herinneren hoe intrigerend de werking van een magneet kan zijn. Ik twijfel er niet aan dat U geboeid gespeeld heeft met de aantrekkende en afstotende krachten die magneten op elkaar uitoefenen. Men zal U daarbij verteld hebben dat men aan een magneet een noord- en een zuidpool kan onderscheiden, en dat gelijknamige polen elkaar afstoten en ongelijknamige polen elkaar aantrekken. Magnetisch materiaal kan echter ook voorkomen in een toestand waarbij het uit zeer vele kleine magnetische gebiedjes is opgebouwd die afwisselend de noord- en de zuidpool in een gegeven richting hebben staan. Men noemt deze gebiedjes magnetische domeinen. De resulterende magnetische werking kan in dat geval zelfs nul worden. Pas als we er in slagen de gelijknamige polen in één richting te concentreren krijgen we een bruikbare magneet. Men heeft de magnetische domeinstructuren gedurende vele tientallen jaren bestudeerd. In 1960 werd op het Philips Laboratorium gevonden

dat men in een dunne plaat van een magnetisch materiaal cilindervormige domeinen kan creëren. U moet zich daarbij voorstellen dat in de hele plaat de noordpolen naar de bovenkant gericht zijn en de zuidpolen naar de onderkant. Door het aanleggen van een tegengesteld gericht uitwendig magneetveld ontstaan er nu kleine gebiedjes met een cirkelvormige doorsnede waarin de richting van de noordpolen juist tegengesteld is aan die in de rest van de plaat. Men noemt deze speciale domeinen 'bubbles'. Het materiaal waarin deze bubbles gevonden werden was echter moeilijk in de gewenste éénkristallijne vorm te maken, de bubbles waren ook moeilijk te bestuderen en het onderzoek liep op dat ogenblik dood. Het kwam als een grote verrassing toen men in 1967 bij de Bell laboratoria in de V.S. nieuwe materialen vond waarin men de bubbles makkelijk kon maken en bestuderen. Men realiseerde zich ook het grote belang van deze vondst. Het al of niet aanwezig zijn van een bubble op een gegeven plaats in het materiaal betekent immers in termen van informatieopslag de aanwezigheid van een 1 of een 0. We hebben hiermee dus een geheugen gemaakt! Er volgde dan ook onmiddellijk een koortsachtige activiteit in de researchlaboratoria over de gehele wereld. De verdere geschiedenis van dit onderwerp demonstreert bij uitstek hoe onmisbaar voor het onderzoek van de vaste stof een nauwe samenwerking tussen chemici en fysici is. Voor het realiseren van de bubbles moet een groot aantal materiaalparameters binnen zeer nauwe grenzen worden ingesteld. Binnen zeer korte tijd vond men een nog veel geschikter materiaal, uitgaande van een verbinding bestaande uit een zeldzaamaardoxide en ijzeroxide. Om aan de fysische eisen te kunnen voldoen vervangt men hierin een deel van de ijzeratomen door niet-magnetische atomen, bijvoorbeeld gallium, terwijl in plaats van één zeldzaamaardatoom, twee verschillende zeldzaam-aardatomen nodig zijn. Van deze verbinding, met inmiddels vijf componenten, wil men een éénkristallijne laag hebben met een dikte van ca. 0.005 mm. Om dit te bereiken dompelt men een niet-magnetisch éénkristal dat vrijwel dezelfde roosterconstante heeft als de te groeien laag, in een oplossing van de uitgangsstoffen. Het oplosmiddel voor deze oxidische verbindingen is een mengsel van loodoxide, PbO, en boriumoxide, B_2O_3, waaruit men bij ca. 900°C de dunne lagen kan laten groeien. Door een juiste keus van de soort componenten, hun verhouding en de groeiomstandigheden slaagt men er in lagen met een zeer hoge perfectie te maken, die voldoen aan de eraan gestelde eisen. Vervolgens kan men locaal in de laag een bubble maken. De diameter van zo'n bubble is vrijwel gelijk aan de dikte van de laag, t.w. ongeveer 0,005 mm. Als we voor de afstand tussen twee bubbles ook ongeveer een bubblediameter nemen, dan kunnen we op 1 cm^2 materiaal circa 1 miljoen bubbles

plaatsen! Door middel van een uitwendig magneetveld kunnen we de bubbles door de laag verplaatsen waarbij we ongeveer 1 miljoen bubbles per seconde kunnen inschrijven of uitlezen. Het zal U hopelijk duidelijk zijn dat het bedenken en het bereiden van de hiervoor geschikte materialen een geweldige inspanning van chemici en fysici vereist. Wil men de materialen ook toepassen, dan komt hierbij nog een nauwe samenwerking met de ontwerpers van het produkt. Men kan in het algemeen stellen dat materiaal-gericht onderzoek slechts mogelijk is in een nauwe samenwerking tussen onderzoekers uit verschillende disciplines. We hebben bij een dergelijk onderzoek altijd te maken met een reeks processen die we ongeveer als volgt kunnen indelen:
1) de bereiding van de verbinding; 2) de vormgeving van het materiaal, bijvoorbeeld via een sinterproces of via éénkristalgroei; 3) meting van relevante fysische grootheden; 4) interpretatie van de resultaten. Wanneer het onderzoek gericht is op het realiseren van bepaalde materiaaleigenschappen zal vervolgens een terugkoppeling naar de vorige processtappen nodig zijn. Hier nu schuilt de zwakte van onze T.H. en ook van een aantal zusterinstellingen. Gedeeltelijk door traditie, gedeeltelijk door de inrichting van ons onderwijs is er een strikte indeling ontstaan in afdelingen. Zoals ik U aan de hand van de hiervoor genoemde processtappen duidelijk heb willen maken, strekt zich het onderzoek van de vaste stof tenminste uit over zowel de scheikunde als de natuurkunde, en dikwijls ook nog over materiaalkunde en/of elektrotechniek. Het valt daarom te betreuren dat er binnen onze Hogeschool zowel geografische als administratieve barrières aanwezig zijn die dit soort onderzoek in de weg staan. De eerlijkheid gebiedt mij daarbij te zeggen dat het minstens even lastig is om binnen een wetenschappelijke instelling de persoonlijke moeilijkheden te overwinnen. Het gaat er immers om een onderzoeker er van te overtuigen dat het gezamenlijke project minstens even interessant is als het onderwerp waar hij zelf reeds mee bezig was. Nochtans hoop ik dat er op basis van persoonlijke contacten een vruchtbare samenwerking tussen de verschillende groepen tot stand zal komen.

Dames en Heren,

Met veel nadruk heb ik tot nu toe gesproken over het onderzoek. U hoeft dat niet aan het toeval te wijten. Sedert lang ben ik inderdaad geboeid door dit werk. Ware ik echter uitsluitend geïnteresseerd in het onderzoek, dan zou ik thans niet voor U staan. Mijn vorige werkkring bood mij in dat opzicht alle mogelijkheden die ik mij wensen kon. Uit het feit dat ik mijn benoeming aanvaard heb, moge blijken dat ik mij

mede aangetrokken voel tot het wetenschappelijke onderwijs. Er staan juist in dat onderwijs een aantal veranderingen voor de deur. Binnen enkele jaren zal een nieuw studieprogramma van kracht worden waarmee beoogd wordt de duur van de opleiding te bekorten. Deze verandering biedt bij uitstek de gelegenheid tot een bezinning op het studiepakket. Hoewel er vele voordelen van een kortere en meer efficiënte opleiding op te noemen zijn, schuilen er ook grote gevaren. Met name ben ik beducht voor een programma met een zeer groot aantal onderdelen waarin ieder onderdeel binnen een strak schema moet verlopen. Ik heb reeds in het begin van mijn voordracht er op gewezen dat juist de interdisciplinaire opleiding hiermee in ernstig gevaar kan komen.

Zeer gewaardeerde toehoorders,

Tot besluit van mijn toespraak wil ik graag enkele woorden van dank uitspreken. In de eerste plaats dank ik Hare Majesteit Koningin Juliana, voor mijn benoeming aan deze Technische Hogeschool.

Dames en Heren, leden van de afdeling der Scheikundige Technologie,

Voor de prettige wijze waarop U mij in de afdeling heeft opgenomen, ben ik U veel dank verschuldigd.

Dames en Heren, leden van de vakgroep Fysische Chemie,

Na deze periode van ruim een jaar voel ik mij geheel thuis in de vakgroep; voor de steun en medewerking die ik vanaf het begin van U heb ondervonden, ben ik U zeer dankbaar.

Waarde Rieck,

Ik stel het zeer op prijs dat ik een deel van je taak heb mogen overnemen. Ik vertrouw erop dat wij de prettige wijze van samenwerken, ondanks je drukke bestuurlijke taken, in de komende jaren kunnen voortzetten.

Leden van de directie, oud-collega's en medewerkers van het Philips' Natuurkundig Laboratorium,

De tien jaren die ik bij U op het Natuurkundig Laboratorium heb doorgebracht, hebben bij mij een grote indruk nagelaten. Wetenschappelijk gezien betekenen ze voor mij enerzijds een aanzienlijke verruiming van inzicht, anderzijds ook een verdieping van mijn kennis. Zowel de

grote vrijheid in het onderzoek die de directie mij heeft gegeven, als de intensieve samenwerking met vele medewerkers hebben hiertoe bijgedragen.

Waarde Bongers en Enz, beste Piet, beste Ulrich,

Ik prijs mij gelukkig dat ik met jullie heb mogen samenwerken. Nooit heb ik gewerkt in een prettiger omgeving dan in de magnetische groep. Jullie aanwezigheid in de nabije omgeving is ook thans voor mij nog een grote steun.

Waarde Van der Elsken, beste Jan,

Mijn belangstelling voor de molecuulspectroscopie is onder jouw leiding geworden tot een liefde die niet meer verdwijnt. Ook mijn besluit deze benoeming te aanvaarden is door jouw oordeel beïnvloed. Ik maak van deze gelegenheid gebruik je hiervoor mijn dank te betuigen.

Dames en Heren Studenten,

Voor U zowel als voor mij geldt dat wij beginnen in een tijd van grote onzekerheid. Wellicht kunnen wij steun putten uit een uitspraak van de bekende 17^{e} eeuwse, Engelse wijsgeer Francis Bacon: 'If a man will begin with certainties he shall end in doubts; but if he will be content to begin with doubts he shall end in certainties'. Ik neem graag de taak op mij bij te dragen tot Uw chemische vorming, ik hoop echter van harte dat dit in een samenspraak tot stand zal komen. Nog meer hoop ik dat U ook buiten het strikte vakgebied met mij tot een gedachtenwisseling wilt komen over zaken die ons beiden aangaan.

Dames en Heren,

Mocht ik er niet in geslaagd zijn voortdurend Uw aandacht te boeien, dan kan ik nu tot Uw geruststelling de woorden van Sophocles citeren: 'Dit is het eind van de droefenis: geen geweeklaag meer'. Ik heb gezegd.

Literatuur

1. C. Huygens, Traite de la lumière (1678).
2. R.J. Haüy, Essai d'une théorie sur la structure des cristaux, Paris, (1784).
3. A. Bravais, Etudes crystallographiques.
4. W. Friedrich, P. Knipping, M. Laue, Sitzungsberichte der Kgl. Bayerische Akademie der Wissenschaften 303 (1912).
5. W.L. Bragg, Proc. Roy Soc. London A*89*, 248 (1914).
6. N. Planck, Ann. d. Physik *4*, 553 (1901).
7. N. Bohr. Phil. Mag. *26*, 1 (1913).
8. E. Schrödinger, Ann. d. Physik *79*, 361 (1926).
9. K. Lonsdale, Crystals and X-rays, (1949).
10. I. Tamm, Z. Physik *76*, 849 (1932).
11. Y.I. Frenkel, Z. Physik *35*, 652 (1926).
12. W. Schottky, C. Wagner, Z. physik. Chemie *11*B, 163 (1930).
13. N.S. Kurnakov, Z. anorg. Chem. *88*, 109 (1914).
14. C.G. Darwin, Phil. Mag. *27*, 675 (1914).
15. o.a. J.A. Schumpeter, Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung, Leipzig (1912).