

Ketens van onderzoek

Citation for published version (APA):

Michels, M. A. J. (1999). *Ketens van onderzoek*. Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1999

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.

Ketens van onderzoek

Intreerede

prof.dr. M.A.J. Michels

Intreerede

Uitgesproken op 15 oktober 1999
aan de Technische Universiteit Eindhoven

Prof.dr. M.A.J. Michels

Mijnheer de Rector Magnificus, dames en heren,

In 1933 begon het Engelse bedrijf ICI met een nieuwe Plastics Divisie voor de productie van recent ontdekte polymere materialen waarvan men een grote toekomst verwachtte. Nadat de manager van de nieuwe divisie zijn opdracht uit handen van zijn directeur had aanvaard, hoorde men hem bij het verlaten van de board room tegen zijn hoogste baas fluisteren: 'By the way, what are plastics?'. Waarop de chief executive van de Imperial Chemical Industries antwoordde: 'God knows. But you might show a little enthusiasm.'

Ik ontleen deze anekdote aan de geautoriseerde bedrijfsbiografie van ICI, waarvan de titel overigens vrij lijkt van enige relativering: *ICI - The Company that Changed our Lives* [1]; maar deze titel is wel een aanwijzing dat polymeren niet geheel zonder betekenis zijn gebleken. In ieder geval hoop ik dat ik u in deze rede iets nieuws over polymeren kan vertellen, en dat u na afloop een beetje mijn enthousiasme kunt delen.

Ketenmoleculen

Het onderwerp waar ik het vooral over wil hebben zijn ketenmoleculen. Moleculen met een ketenstructuur die zijn opgebouwd uit veel, in feite heel veel, afzonderlijke deeltjes: uit atomen, of uit steeds weer terugkerende combinaties van atomen. In het Grieks betekent πολυσ 'veel' en μερος 'deeltje', vandaar de naam 'poly-meren'. De vaak gebruikte naam 'plastics' verwijst naar de blijvende, dat wil zeggen de niet-elastische, vervormbaarheid van veel kunststofmaterialen die uit dit soort ketens zijn opgebouwd, en gaat terug op het Griekse woord πλασσειν, dat 'kneden' betekent. Maar niet alle polymeren zijn plastisch vervormbaar, en ik ben geen materiaal-kundige. Ik denk in deze rede dus vooral in termen van polymeren, ketenmoleculen, en van hun fysische eigenschappen, en maar een beetje in termen van plastics, vervormbare kunststoffen.

Een van de eenvoudigste en bekendste polymeren is *poly-etheen*: een lineair of vertakt ketenskelet van koolstofatomen met zijwaarts gemiddeld twee waterstof-

atomen. Polyetheen werd in 1933 binnen ICI min of meer bij toeval ontdekt in een onverwachte polymerisatiereactie van etheen onder hoge druk [1]. Het zal duidelijk zijn dat de verbindingen tussen de monomere bouwstenen grote invloed hebben op de onderlinge beweeglijkheid. Daarbij moet u bedenken dat een polyetheenmolecuul uit zeer veel koolstofatomen kan bestaan, tot één miljoen toe. Elk koolstofatoom heeft ongeveer de afmeting van 10^{-10} meter, ééntienmiljardste meter. Als ik me dit atoom voorstel als een kleine knikker, dan kan ik met één enkele gestrekte keten een afstand overbruggen van het centrum van Eindhoven tot in Veldhoven. In werkelijkheid zullen de eenheden onderling wanordelijk willen bewegen, wat voor die keten van vele kilometers resulteert in een veel meer bolvormige, spaghetti-achtige en bijna niet te ontwarren kluwen die gemakkelijk in de aula van de Technische Universiteit Eindhoven blijkt te passen. U kunt zich voorstellen wat voor een hoogvisceuze en blijvend vervormbare materie kan ontstaan wanneer een groot aantal van dit soort ketenmoleculen met elkaar verknoopt raakt.

Materialen opgebouwd uit ketenmoleculen zijn letterlijk bijna zo oud als de wereld. De natuur gebruikt ketenmoleculen als bouwsteen voor het leven, zowel in het menselijk en dierlijk lichaam als in alle plantaardige gewassen. De natuur rijgt daarbij zelf de ketens, vooral met koolstofatomen die in kooldioxide, het bekende CO_2 , één voor één aan de aardse atmosfeer onttrokken worden. Natuurlijke polymere producten, van plantaardige gewassen en van dieren, hebben duizenden jaren de mensheid gediend in het dagelijks leven: als houten wapens en constructiematerialen, als kleding van vlas, zijde of wol, als afdichtende lijm in handels- en oorlogsschepen, of als onderdeel van papier om onze kennis op vast te leggen. De materiaalkundige Ashby geeft in zijn boek *Materials Selection in Mechanical Design* [2] een historisch overzicht van het relatieve belang van verschillende klassen van constructiematerialen. Daaruit blijkt hoe dominant vanaf het begin van de menselijke beschaving tot tegen de negentiende eeuw natuurlijke polymeren zijn geweest. Pas vanaf de industriële revolutie, rond het jaar 1800, krijgen metalen zwaar de

overhand. Ook valt in Ashby's overzicht op hoe snel op deze tijdschaal van ongeveer twaalfduizend jaar de trends weer ombuigen. 'Snel' is in dit geval een periode van ongeveer 200 jaar, ruwweg van 1800 tot nu, waarna nieuwe, door de mens ontworpen, constructiematerialen dominant worden. Een belangrijk aandeel in die nieuwe materialen wordt geleverd door synthetische polymeren. De grondstof hiervoor is vooral afkomstig van eenzelfde natuurlijke bron; alleen is deze bron miljoenen jaren geleden ontstaan, en nu pas voor ons beschikbaar gekomen via de winning van aardolie en via petrochemische processen.

De eerste kunststoffen, zoals celluloid en bakeliet, werden al in de vorige eeuw of in het begin van deze eeuw ontdekt. Toch blijkt uit het voorval binnen de top van ICI dat synthetische polymeren in feite een jonge, in 1933 nog vrij onbekende, materiaalklasse zijn. Dit gebrek aan kennis geldt ook in wetenschappelijke zin. Om maar iets ter vergelijking te noemen: in 1933 hadden natuurkundigen het neutron in de kern van atomen al ontdekt. Maar toen slechts elf jaar eerder de Duitse

hoogleraar Staudinger postuleerde dat kunststoffen en natuurlijke materialen zijn opgebouwd uit lange macromoleculaire ketens, werd hij publiekelijk uitgelachen.

Nog even terug naar het praktische belang van polymeren. In volume is het aandeel van synthetische polymeren wereldwijd inmiddels al groter dan dat van staal, en de toename blijkt exponentieel. Bovendien nemen de laatste jaren de mogelijkheden van polymeren voor andere dan constructieve toepassingen ook spectaculair toe; ik kom daar nog op terug.

Synthese, structuurvorming en eigenschappen

Op de talloze wijzen waarop synthetische polymeren nu in het dagelijkse leven zijn doorgedrongen hoef ik voor u niet in te gaan. Wel wil ik de grote variatie in natuurkundige eigenschappen noemen. Het eenvoudige polyetheen is in bijna dezelfde atoomsamenstelling verkrijgbaar als dunne folie, maar ook als supersterke vezel: bij gelijk gewicht vele malen stijver

en sterker dan een stalen vezel. Belangrijk voor deze spreiding in eigenschappen blijkt vooral de variatie aan mogelijkheden te zijn waarop de ketens bij de verwerking geordend kunnen worden: van een wanordelijke kluwen tot een bundel hoogverstrekte of regelmatig gevouwen ketens. En intussen zijn naast polyethen talloze andere, veel complexere polymeren gerealiseerd, met nog oneindig veel meer mogelijkheden aan microstructuren en materiaaleigenschappen. Hiermee ben ik beland bij de relatie tussen synthese, microstructuur, verwerking en end-eigenschappen, binnen deze universiteit het vakgebied van mijn collega's van de Eindhoven Polymer Laboratories.

De klassieke synthetisch chemicus dacht in het verleden vooral in termen van moleculen en reactiesnelheden, dat wil zeggen in termen van verschijnselen die zich afspelen op de lengteschaal rond en onder de nanometer, dat is éénmiljardste van een meter. De traditionele materiaal-kundige dacht in termen van continue, macroscopische voorwerpen waaraan je op de randen allerlei voorwaarden kunt opleggen, bijvoorbeeld een druk, tempera-

tuur of afschuifsnelheid; als typische lengteschaal stel ik me hierbij een centimeter voor, dat wil zeggen tienmiljoen maal een nanometer. De tijdschalen van beide onderzoekers zullen navenant sterk uiteenlopen. Toch bevinden de syntheticus en de materiaal-kundige zich aan de uiteinden van dezelfde kennisketen. Beiden richten zich nu ook op de microstructuren en processen die zich op tussenliggende lengteschalen en tijdschalen voordoen, en die dus zo bepalend blijken voor de end-eigenschappen.

Zo is binnen de moderne organische chemie en katalyse grote aandacht gekomen voor nieuwe macromoleculaire architecturen en voor polymeren met een regelmatige substructuur; de uitdaging is dan, de supramoleculaire ordening al in de synthese van het molecuul vast te leggen; de Natuur doet niet anders. In navolging van de Natuur kan men naast eendimensionale ketens ook twee- en driedimensionale netwerken creëren, met een sterke en thermisch reversibele waterstofbindingen tussen lineaire ketens, of direct tussen kleine monomere

eenheden. Het blijkt ook mogelijk in de polymeersynthese twee soorten monomeren, bijvoorbeeld etheen en koolmonoxide, foutloos af te wisselen. Het resultaat is telkens weer een aanzienlijke verbetering of zelfs een wezenlijke vernieuwing van materiaaleigenschappen [3].

In de fundamentele materiaalkunde worden nu domeinen van geordende macromoleculen op nanometerschaal onderzocht met moderne technieken als Atomic Force Microscopy, en worden effecten van microdomeinen in de continue structuur met krachtige computerberekeningen, zogeheten eindige-elementen-methoden, door-gerekend. De uitdaging blijft hier om de overbrugging te maken van continue micromechanica naar de dynamica van afzonderlijke macromoleculen.

Het zijn al deze nieuwe mesoscopische ordeningen, en deze overbrugging van continue naar moleculaire lengteschalen, waar mijn interesse als fysicus naar uitgaat. Naar mijn mening kan de fysica hier een belangrijke rol spelen in de kennisketen van monomeer tot eindpro-

dukt. Er zijn goede redenen om dit te denken.

Statistische fysica en superstatistische mechanica

De vertaling van verschijnselen die zich afspelen op moleculaire lengteschaal en op zeer korte tijden naar materiaalgedrag op veel grotere schaal en navenant veel langere tijden is een vertaling van individuele, snelle gedragingen van zeer veel moleculen naar een vele malen kleiner aantal en tijdgemiddelde natuurkundige eigenschappen. De wetenschap die zich hiermee bezighoudt is de statistische fysica. Voor mij als theoretisch statistisch fysicus dus één reden om mij te interesseren voor de kennisketen van chemie tot materiaalkunde.

De statistische fysica heeft een sterke Nederlandse traditie, en het past in dit betoog om daar even op terug te grijpen. In 1873 liet de Nederlander Van der Waals zien hoe, onder algemene veronderstellingen over de aantrekkende en afstotende krachten tussen snel bewegende molecu-

len, het verband en het verschil tussen een gas en een vloeistof begrepen kon worden. In het bijzonder toonde hij aan dat er één punt is, één waarde van druk, temperatuur en dichtheid, waarbij het verschil tussen gas en vloeistof verdwenen is: het kritieke punt. Deze continuïteit van de gas- en de vloeistofoestand was in 1873 een revolutionair nieuw inzicht. Ver van het kritieke punt bleek de zogeheten toestandsvergelijking van Van der Waals ook kwantitatief redelijk nauwkeurige voorspellingen te geven. Decennia lang hebben onderzoekers getracht de vergelijking nog te verbeteren, maar dicht bij het kritieke punt bleek deze naar zijn wiskundige aard niet in staat naast kwalitatief inzicht ook kwantitatieve overeenstemming te geven. Het werk van Van der Waals raakte mede hierdoor op de achtergrond. In hun overigens voortreffelijke leerboek *Statistical Physics* gingen Landau en Lifshitz zelfs zover om de vergelijking van Van der Waals 'a convenient interpolation formula' te noemen [4].

Op 13 april 1964 hield de naar Amerika geëmigreerde Nederlandse fysicus George Uhlenbeck -die vooral bekend is vanwege

zijn ontdekking van de elektronspin- zijn intreedde als eerste Van der Waals-gasthoogleraar aan de Universiteit van Amsterdam [5]. Onder de titel *Van der Waals revisited* argumenteerde hij dat de oplossing in een andere richting gezocht moest worden. Hij benadrukte dat de wezenlijke bijdrage van Van der Waals het *kwalitatieve* inzicht was dat het bestaan *en* de continuïteit van gas- en vloeistof-toestand volgt uit algemene veronderstellingen over intermoleculaire krachten, en dat verder inzicht over het kritieke gebied vooral ook kwalitatief, conceptueel inzicht moest zijn.

'Wat mij voor de geest zweeft -aldus Uhlenbeck- ben ik gewend de superstatistische mechanica te noemen. (...) Men zegt altijd dat de taak van de statistische fysica is de verklaring van de macroscopische eigenschappen van de materie uit de bekend veronderstelde intermoleculaire krachten. Dit is zeker juist, maar men moet het woord verklaring mijns inziens niet opvatten als een exacte deductie, waardoor de macroscopische eigenschappen precies voorspeld zouden kunnen worden. (...)

Elke theorie wil inzicht geven, en in de statistische physica betekent dat volgens mij -aldus nog steeds Uhlenbeck- dat men in de eerste plaats (en misschien wel uitsluitend) die macroscopische eigenschappen wil begrijpen en verklaren die afhangen niet van de precieze vorm van de intermoleculaire krachten maar enkel van enige algemene, kwalitatieve eigenschappen van die krachten. En dit beschouw ik als de taak van de superstatistische mechanica. (...) Hoe dit ook zij - en als ik het wist zou ik het U vertellen! -, ik hoop dat U zelfs in deze vage formulering de indruk heeft gekregen dat de superstatistische mechanica een soort programma is niet alleen voor het theoretische maar ook voor het experimentele onderzoek.'

Het programma dat Uhlenbeck hier omschreef kwam nog in de jaren zestig in een grote versnelling, en leidde tot het inzicht dat niet alleen voor alle moleculen een continue gas-vloeistof-overgang bestaat (dat inzicht is de bijdrage van Van der Waals), maar dat ook alle moleculen op eenzelfde wijze en volgens eenzelfde verklaring rond dit kritieke punt van de

theorie van Van der Waals afwijken. De verklaring is dat in het gebied rond het kritieke punt niet langer afzonderlijke moleculen de bepalende eenheden zijn waarover statistisch gemiddeld moet worden, maar steeds grotere clusters van moleculen. De nieuwe bouwstenen zijn dus clusters, fluctuaties in de dichtheid, met als karakteristieke lengteschaal de gemiddelde clustergrootte. In deze beschrijving verdwijnen de kenmerkende eigenschappen van het afzonderlijke molecuul en van structurele details beneden de gemiddelde clustergrootte. Bij nadering van het kritieke punt wordt de gemiddelde cluster zelfs willekeurig groot -gas en vloeistof worden immers identiek en verdwijnt dus elke microscopische lengteschaal uit deze beschrijving. Wiskundige formules voor natuurkundige verbanden kunnen dan alleen nog maar eenvoudige machtwetten zijn. Dat wil bijvoorbeeld zeggen dat de compressibiliteit, de samendrukbaarheid van het gas of de vloeistof, een eenvoudige macht is van de afstand tot het kritieke punt. Omdat moleculaire details verdwenen zijn, zijn deze machtwetten, of zogeheten schaalwetten, identiek voor een

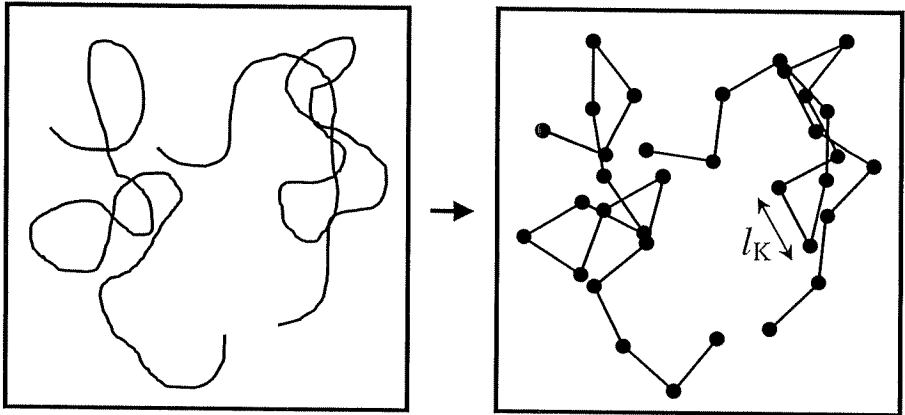
grote klasse van stoffen; men spreekt dan van universeel gedrag, en van een universaliteitsklasse. Het universele van dit gedrag gaat zelfs zover dat bijvoorbeeld gas-vloeistofsystemen en magnetische systemen dicht bij de ferromagnetische fase-overgang tot eenzelfde universaliteitsklasse kunnen behoren. De grote theoretische doorbraak kwam in 1971, toen de Amerikaan Kenneth Wilson met zijn zogeheten renormalisatietheorie liet zien hoe het kwantitatieve gedrag in het kritieke gebied berekend kon worden; hij ging uit van een Van der Waals-achtig vertrekpunt en beeldde vervolgens de beschrijvingen op de verschillende lengteschalen trapsgewijs op elkaar af, telkens door middeling over een volgende lengteschaal [6]. Hiervoor kreeg hij in 1982 de Nobelprijs.

Schaling in polymeren

Wat heeft dit nu met polymeren te maken, die ketenmoleculen met een veel gevarieerdere en gecompliceerdere mesoscopische structuur dan eenvoudige gassen en vloeistoffen? Heel veel. Aller-

eerst is de algemene vermaning van Uhlenbeck dat de statistisch fysicus zich toch vooral op de essentiële kwalitatieve kenmerken moet richten bij uitstek in zo een situatie nuttig. Ten tweede is er het inzicht dat ook eenvoudige gassen en vloeistoffen dichtbij het kritieke punt op grotere, mesoscopische lengteschalen een structuur hebben, en dat die structuur zelfs allesbepalend wordt voor het begrip van de eigenschappen. Ten derde zijn er nu dus statistische methoden ontstaan om hier kwantitatief aan te rekenen. Dit wil ik verduidelijken met een inmiddels klassiek voorbeeld.

Ik heb u al eerder geschetst hoe een ketenmolecuul van heel veel eenheden zich als een bolvormige klauwen kan voordoen. Als basiseenheid neem ik in figuur 1 even niet een monomeer, maar een iets langer stukje keten dat zich ten opzichte van het vorige stukje volledig flexibel kan gedragen; elke keten heeft immers een eindige stijfheid. We kunnen dan de afmeting van de klauwen ook kwantitatief beschrijven. Als opvolgende basiseenheden zich echt onafhankelijk van elkaar kunnen richten, dan blijkt de



Figuur 1. Buigzame polymeren en hun representatie door volledig flexibele ketens. De basiseenheid van deze ketens is de Kuhn-lengte l_K , in het geval van polyetheen ongeveer zeven koolstofatomen lang. De eenheden hinderen elkaar, waardoor de keten kan gaan zwellen.

dichtheid van de kluiten met toenemende ketenlengte niet constant te blijven maar naar buiten toe af te nemen, in feite omgekeerd evenredig met de wortel uit de ketenlengte. Steeds langere ketens hebben dus *onevenredig* steeds meer ruimte nodig. Anders gezegd: een verzameling van veel kleine ketens heeft in oplossing minder ruimte nodig dan eenzelfde gewicht aan weinig grotere ketens, en leidt dus minder snel tot onontwarbare verknopingen. Het praktische belang van deze constatering zal u intuïtief duidelijk zijn.

Ik nam zoëven aan dat de basiseenheden van mijn keten zich onafhankelijk mochten richten. Maar in het algemeen is dat niet zo. Afzonderlijke eenheden hebben elk een zeker volume, en kunnen dus niet dwars door elkaar heen bewegen. De consequentie hiervan is dat de kluiten *nog* meer ruimte nodig heeft, en opzwellt om al zijn segmenten een plaats te geven. Hoe dit uitmiddelt voor het verband tussen de ketenlengte en het effectief ingenomen volume was een vraag waar statistisch fysici zich in de jaren zestig mee bezighielden. Het probleem bleek weerbarstig, want de beschrijving van het

gezwollen polymeer bleek niet te kunnen worden gegeven als een kleine numerieke correctie op het geïdealiseerde geval, met het volume van een basiseenheid als kleine parameter. In feite is er een diepe analogie met het probleem van de gas-vloeistofovergang, en met het numeriek falen van de Van der Waals-vergelijking in het kritieke gebied.

In 1972, één jaar na het werk van Kenneth Wilson, liet de Fransman Pierre-Gilles de Gennes zien hoe de renormalisatiemethode van Wilson gebruikt kon worden om het probleem van de gezwollen keten te kraken [7]. De ideale keten en de gezwollen keten bleken twee universaliteitsklassen te vertegenwoordigen, met twee verschillende schaalwetten voor het verband tussen ketenlengte en effectief volume. Het resultaat voor de ideale keten mag hier vergeleken worden met de theorie van Van der Waals, en heet in het jargon een gemiddelde-veld-resultaat; het is bijvoorbeeld van toepassing op polymere smelten. Het beeld van de gezwollen keten geldt universeel voor een grote klasse van polymeren in oplossing.

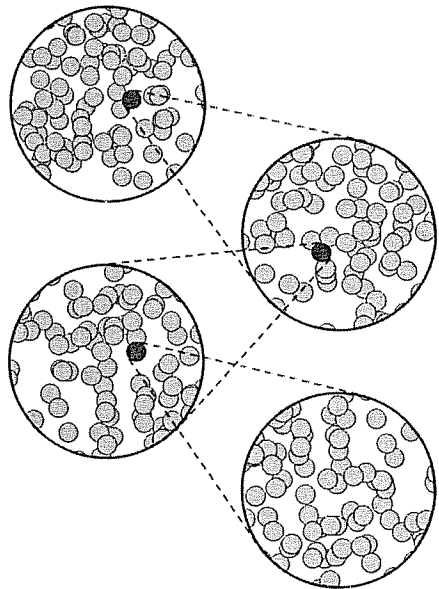
De bijdrage van De Gennes was niet zomaar het lenen van een handige wiskundige methode. Hij maakte duidelijk dat in het geval van polymeren de statistisch fysicus op precies eenzelfde wijze kan omgaan met wisselwerkingen en middelingen op verschillende lengteschalen als in een gas-vloeistofsysteem bij het kritieke punt. Het kritieke punt zelf - dus het punt waar de grootste dominante lengteschaal oneindig wordt - is in zijn geval de limiet van de oneindig lange keten. En schaalwetten, bijvoorbeeld voor het effectief volume van de kluiten, zijn machtwetten in de inverse ketenlengte.

Toepassingen van schaling

De zo ontstane nieuwe concepten van schaling, renormalisatie, en universeel gedrag van klassen van systemen, zijn een krachtig nieuw instrumentarium gebleken voor de statistische fysica. De aanpak van het conceptueel en kwalitatief denken in lengteschalen, en ook tijdschalen, in plaats van in kwantitatief detail, is veel breder toepasbaar dan Uhlenbeck in 1964 vermoedelijk voorzag. Schalingstheorie

blijkt relevant niet alleen voor fase-overgangen of lineaire ketenmoleculen, maar voor veel natuurkundige verschijnselen in mesoscopisch wanordelijke materialen: vernetting van polymeren, aggregatie van colloïdale deeltjes, gelvorming, transport langs wanordelijke paden, patroonontwikkeling in groei-processen, breukvorming [8]. Elk van deze verschijnselen is op zich al zeer relevant is voor polymere materialen, voor de synthese, de verwerking of het gebruik ervan. De schaalafhankelijke structuren die in de theorieën telkens weer beneden een zekere lengteschaal optreden, zijn fractalen gaan heten; ze blijken in de natuurkundige praktijk alomtegenwoordig. Hun kenmerk is weergegeven in figuur 2: wanneer je ze uitvergroot worden kleine details wel groter, maar tegelijk ontstaan weer nieuwe kleine details van dezelfde soort, onafhankelijk van de schaal waarop je ernaar kijkt. Dit alles binnen de uiterste grenzen van een grootste en kleinste lengteschaal. Ook onze natuurlijke omgeving blijkt zich veelvuldig van schaling en fractalen te bedienen; denkt u aan de steeds fijnere vertakkingen van een boom; of aan de

vorm van een kustlijn, met kleine inhammen in grote inhammen in nog grotere inhammen. Dat theoretici dit soort onderliggende principes telkens weer in nieuwe toepassingsgebieden wisten te ontdekken ontlokte aan De Gennes de typering: 'Weer een gebied dat is veilig-verklaard voor theoretisch fysici.' Voor zijn



Figuur 2. Principe van een fractale vorm: bij uitvergroten blijkt in elk detail weer nieuw detail van (statistisch) dezelfde vorm aanwezig. Fractale vormen komen veel voor in wanordelijke materialen zoals polymeren.

bijdragen aan de theorie van polymeren en andere zachte materie kreeg in 1991 ook De Gennes de Nobelprijs.

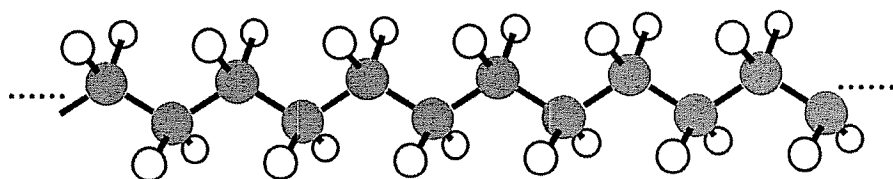
In mijn eigen werk bij Shell Research heb ik in veel verschillende onderwerpen ervaren dat het denken in lengteschalen, schaal-onafhankelijke structuren en universele schaalwetten geen theoretisch stokpaardje is, maar een krachtig hulpmiddel om complexe wanordelijke media goed te doorgronden. Dezelfde concepten bleken van toepassing op gelerende polymeersuspensies, uitvlokkende zware oliefracties, doorhardende polymere coatings, vervuilende roetdeeltjes en geleidende polymere materialen. Om méér dan één praktische reden kan ik nu niet op al deze onderwerpen ingaan; maar de laatstgenoemde toepassing wil ik toch als voorbeeld iets nader bespreken.

Geleidende polymere materialen

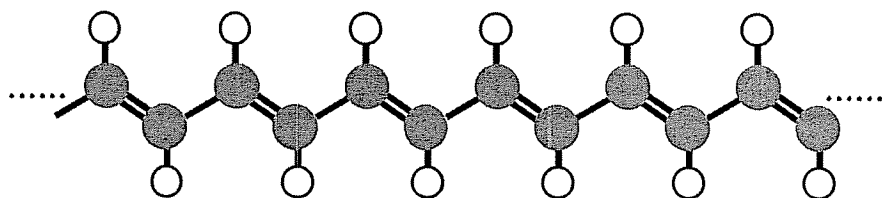
Aan één bijzondere fysische eigenschap van sommige polymeren ben ik tot nu toe voorbij gegaan. Sinds een aantal jaren weten we dat polymeren met een bepaalde

elektronische structuur -zogenoemde geconjugeerde polymeren- elektrisch geleidend kunnen zijn, of onder invloed van elektrische spanning zelfs licht kunnen uitzenden. Het prototype van een geconjugeerd polymeer is poly-acetyleen, dat u in figuur 3 ziet afgebeeld. Het lijkt op het al genoemde polyetheen; maar dat laatste dankte nu juist, na zijn toevallige ontdekking in 1933, zijn snelle doorbraak aan het goede *isolerend* vermogen in radartoepassingen [1]. Het essentiële verschil in de geleidende structuur is de afwisseling van de enkele en dubbele paren bindingselektronen tussen opvolgende koolstofatomen -hier afgebeeld met enkele en dubbele streepjes. Veel onderzoekers van universiteiten en bedrijven werken op dit moment aan een toekomst van plastic elektronica. Daarover straks meer.

Maar de meeste polymeren zijn net als polyetheen isolatoren. Wat nu, als we die geleidend willen maken, bijvoorbeeld voor antistatische toepassingen? Het recept is, er geleidende deeltjes aan toe te voegen. Als we, net als in figuur 4, op wanordelijke wijze steeds meer geleidende



polyetheen



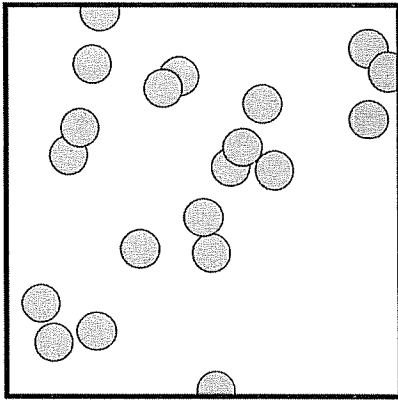
polyacetyleen

Figuur 3. Ketenstructuur van polyetheen, $(CH_2)_n$ (een zeer goede isolator), en poly-acetyleen $(CH)_n$ (prototype van een geleidend polymeer). De tweede structuur is elektrisch geleidend als gevolg van de afwisseling van enkele en dubbele paren bindingselektronen tussen de koolstofatomen.

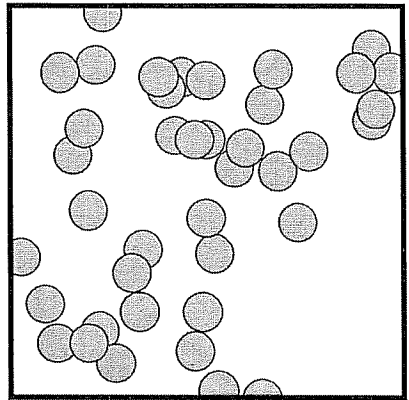
bolletjes aan het polymeer toevoegen ontstaat vanzelf op een gegeven moment een grillige ketenstructuur van aansluitende geleidende deeltjes, een doorlopend, dus *percolerend*, geleidend netwerk dwars door het isolerende polymeer. En de percolatietheorie -een ander onderdeel van dezelfde moderne statistische fysica- leert dat dit netwerk, jawel, ook al fractale eigenschappen heeft. Voor de polymeertechnoloog die een nieuw geleidend polymeer wil realiseren wellicht minder relevant; hij heeft zijn doel

bereikt, en zulke producten zijn inderdaad op de markt. De geleidende vulstof neemt dan wel soms tien tot twintig procent van het gewicht in; en daartegen bestaan weer praktische bezwaren.

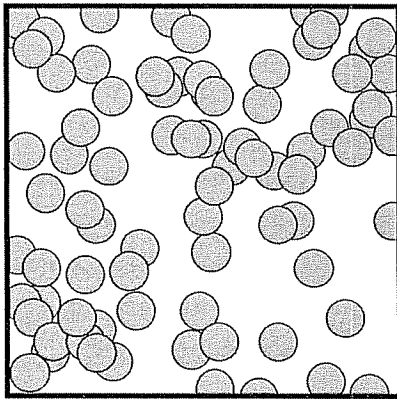
Op het Shell-Laboratorium in Amsterdam slaagde mijn collega Jose Brokken-Zijp erin hetzelfde geleidingseffect in polymeren te bereiken bij een honderden malen lager gewicht aan toegevoegd geleidend materiaal [9]. Om dit te begrijpen hebben Jose en ik jarenlang



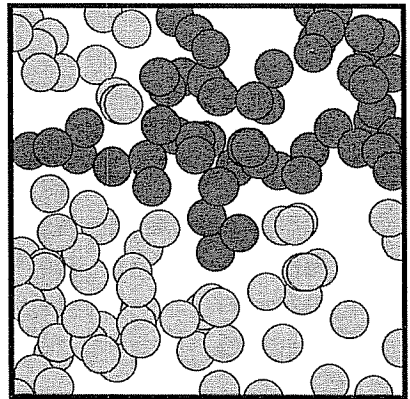
N=20



N=40



N=80



N=120

Figuur 4. Wanordelijke groei van een percolerend geleidend pad in een isolerend polymeer door toevoeging van geleidende vuldeeltjes. De kritieke vulgraad voor percolatie blijkt in dit voorbeeld bij ongeveer 120 vuldeeltjes te liggen. De dan aanwezige percolerende cluster (donker) is fractaal.

nauw samengewerkt met Hans Brom en collega's van het Kamerlingh Onnes Laboratorium in Leiden. Daar waren ze in staat de geleidingseigenschappen heel nauwkeurig als functie van een groot aantal variabelen te doorgronden. Uit onze theoretische analyses van de metingen rolde uiteindelijk het ene schalingsresultaat na het andere [10]. Hieraan lagen uiteraard fractale microstructuren ten grondslag, niet alleen van het percolerende, het stroomgeleidende netwerk, maar ook van bouwstenen in dit netwerk. En juist die fractale bouwstenen gaven uiteindelijk een verklaring van de extreem lage vulgraad waarbij de overgang van isolator naar geleider gerealiseerd kon worden.

Aan dit voorbeeld van een materiaal-eigenschap (de geleiding) in relatie tot de microstructuur (het fractale netwerk) wordt duidelijk hoe een intrigerend praktisch probleem voor wie ernaar zoeken wil vaak zeer fundamentele fysica bevat. Die geeft dan weer aanleiding tot nieuwe inzichten over wat praktisch nog meer mogelijk is, bijvoorbeeld via de fysica van het maakproces (in dit geval de groei van het fractale netwerk). Het voert

te ver hier nu dieper op in te gaan, maar het is duidelijk hoe een fysicus in de kennisketen van polymeersynthese tot toepassing kan bijdragen door zijn aandacht te richten op de driehoek van microstructuur, structuurontwikkeling, en fysische eigenschappen.

Toekomstplannen

Dit brengt mij op het onderwerp van het voor mij liggende onderzoek. Hier heb ik als leidende thema gekozen de fysica van micro-gestructureerde en wanordelijke materialen, in het bijzonder polymeren. En daarbij is een kanttekening wel op zijn plaats. De ontwikkeling en toepassing van de schalingstheorie heb ik zoëven uitvoeriger willen bespreken omdat ik niet alleen doordrongen ben geraakt van de kracht ervan, maar ook van de elegantie. Die elegantie maakt het een mooi onderwerp voor een gelegenheid als deze. Theoretische fysica kenmerkt zich vaak door elegante en generieke beschrijvingen. Maar wie de praktijk van het materialenonderzoek als inspiratie kiest, moet zich naast de mogelijkheden ook de beperkin-

gen van zo een aanpak bewust zijn, en oog hebben voor specifieke details en consequenties van bijvoorbeeld de chemische structuur van moleculen. Dan dringen vanzelf weer nieuwe generieke inzichten door, maar in een andere context en andere richtingen. Toen ik in 1979 als jong theoretisch fysicus in dienst trad van het Shell-Laboratorium in Amsterdam kreeg ik geen vastomlijnde opdracht mee. Maar mijn baas was wel zo verstandig mij op een kamer neer te zetten met een chemicus; daar ben ik hem nog dankbaar voor.

De invloed van de chemische structuur op eindeigenschappen wordt goed zichtbaar in de al eerder genoemde geleidende polymeren voor plastic elektronica. Een toepassing waaraan ook hier in verschillende faculteiten van de universiteit en binnen het Dutch Polymer Institute gewerkt wordt zijn polyLEDs, polymere lichtgevende diodes. Dit zijn schakelingen die onder invloed van elektrische spanning licht uitzenden, en voor allerlei weergavetoepassingen belangrijk kunnen worden. Het gebruik van polymeren leidt niet alleen tot gemakkelijke

verwerkbaarheid, maar ook tot grote variatie in denkbare moleculen. Chemici trachten door geschikte keuze van de monomere eenheden de elektronische eigenschappen van het ketenmolecuul zo te sturen dat er licht van een gewenste kleur uitkomt. Deze zogeheten 'band-gap engineering' zou zeer geholpen zijn, indien theoretisch op basis van de chemische en elektronische structuur de uitgezonden kleur en andere optische eigenschappen voorspeld konden worden. In mijn groep hebben Peter Bobbert en ik besloten te gaan onderzoeken in hoeverre quantummechanische methoden uit de vaste-stoffysica, gecombineerd met de beschikbaarheid van supercomputers, dit voor polymeren mogelijk maken; en, wat polymeren in dit opzicht anders maakt dan anorganische optisch-actieve materialen. Dankzij het promotie-onderzoek van Jan-Willem van der Horst zijn wij inmiddels in staat van een eerste polymeer - polythiofeen- de uitgezonden kleur nauwkeurig te voorspellen zonder enige parameter in onze theorie bij voorbaat aan het experiment aan te passen [11].

De structuur waaraan Jan-Willem gerekend heeft is een keurige oneindige rechte en stijve keten. Maar ook een verzameling van deze ketens in een polyLED zal op grotere lengteschalen een meer wanordelijk, spaghetti-achtig voorkomen hebben. Voor de uitgezonden kleur gelukkig niet zo van invloed, maar wel voor het geleidende pad dat de ladingen in de lichtgevende schakeling moeten afleggen. De beweeglijkheid van de ladingen, en daarmee de efficiëntie van de lichtopbrengst, wordt beperkt door barrières op dit pad, barrières die het gevolg zijn van de wanorde. Wie in het belang van toekomstige plastic elektronica de geleiding in dit soort geconjugeerde polymeren wil begrijpen, kan zich dus niet beperken tot de elektronenstructuur van afwisselende enkele en dubbele bindingen in een geïsoleerd ketenmolecuul. De aandacht zal ook uit moeten gaan naar twee andere aspecten. Allereerst naar het wanordelijke pad van geleidende domeinen dat op grotere lengteschalen door het gehele materiaal heen percoleert. Veel wetenschappelijke vragen en hun antwoorden vertonen dan gelijkenis met die in het eerder besproken voorbeeld van

polymeren met geleidende vuldeeltjes. Hier blijkt weer de kracht van een generieke beschrijving. Ten tweede, en nauw met het eerste samenhangend, zal er goed moeten worden gekeken welke invloed het maakproces heeft op de niet-perfecte ordening van de ketenmoleculen, en daarmee op de geleiding.

Dit onderzoek van functionele polymeren, dat wij in samenwerking met het Kamerlingh Onnes Laboratorium en het Dutch Polymer Institute willen gaan voortzetten, is een van de hoofdthema's in ons toekomstig programma van microstructuur, structuurontwikkeling en eigenschappen. Op de andere thema's kan ik om redenen van tijd slechts kort in gaan. Bij het thema van structuurontwikkeling denk ik me vooral te gaan richten op de vraag hoe moleculaire processen als kristallisatie, fasescheiding, en netwerkvorming met waterstofbruggen, de opbouw kunnen sturen van de interessante geordende structuren op supramoleculaire schaal die men tegenwoordig in de polymeersynthese en -verwerking tracht te maken.

Structuurontwikkeling is echter niet alleen *vorming* in het proces, maar ook *vervorming* in het gebruik. In de materiaalkunde staat het onderwerp van taatheid en breuk al jaren volop in de belangstelling. Recent is opvallend en intrigerend universeel fysisch schaalgedrag bij breukvorming ontdekt, dwars door materiaalklassen als metalen, keramiek en beton heen. Zo blijken de breukvlakken telkens weer dezelfde fractale eigenschappen te hebben [12]. In hoeverre dit of ander generiek gedrag ook bij vervorming, beschadiging en breuk van taaie polymeren geldt, en vooral *waarom*, is een boeiende open vraag. Antwoorden op die vraag kunnen nieuw inzicht geven in het bezwijkgedrag van materialen. Voor theoretisch fysici is het -zeker in de toepassing op polymeren- nog niet echt veiligverklaard gebied. Maar dat is, ook tegen de achtergrond van het materiaalkundige programma van deze universiteit en van het Dutch Polymer Institute, juist een extra reden hieraan te willen beginnen.

Fundamenteel onderzoek en maatschappelijk nut

Geachte toehoorders,

Aan het begin van dit verhaal heb ik u geschetst hoe belangrijk polymere materialen zijn geworden in ons dagelijks leven. Dit impliceert dat het wetenschappelijk onderzoek aan polymeren niet alleen een academisch maar ook een evident maatschappelijk en economisch belang heeft. En daarmee kom ik op het onderwerp van fundamenteel onderzoek en maatschappelijk nut. Een onderwerp dat extra relevant is voor Nederland, omdat een aantal zeer grote producenten en verwerkers van polymeren hier een deel van hun onderzoek en ontwikkelingswerk uitvoert. Tot voor kort waren er zelfs in Nederland ongeveer tien industriële onderzoekers actief op het gebied van polymeren tegenover één universitaire onderzoeker.

Op de grens van universiteit en industrie heeft zich de afgelopen jaren een aantal belangrijke veranderingen voorgedaan. In het academische onderzoek is de nadruk

steeds meer komen te liggen op de tweede geldstroom van NWO, dat in haar beleid een bewuste verschuiving heeft gemaakt: van monodisciplinair en vanuit de wetenschap geïnspireerd onderzoek in de richting van interdisciplinair en vanuit de omgeving geïnspireerd onderzoek [13]. Parallel hieraan is er een omvangrijke directe derde geldstroom van de industrie naar de universiteiten ontstaan. Binnen de grote industrieën is juist de eigen generieke en lange-termijnresearch, die altijd bij uitstek geschikt was voor universitaire samenwerking, steeds meer gezien als een kostenpost die niet langer kan worden verantwoord. Met als gevolg een aanzienlijke reductie van het aantal industriële onderzoekers.

Ontegenzegglijk is de grens tussen fundamenteel en toegepast onderzoek aan polymeren en andere materialen opgeschoven in de richting van de universiteiten, met aan het grensvlak veel grote nieuwe stimuleringsprogramma's die gesteund worden door de Ministeries van Onderwijs, Cultuur en Wetenschappen en van Economische Zaken. Ik noem slechts het Prioriteitsprogramma Materialen-

onderzoek, Softlink, het IOP Oppervlak-technologie, en het programma Computational Materials Science. In de gewenste onderzoekvoorstellen ligt nu de nadruk op grootschaligheid, samenwerking, relevantie en industriële participatie. Een bijzondere plaats wordt wat dat betreft ingenomen door de nieuwe Technologische Topinstituten, zoals het Dutch Polymer Institute en het Netherlands Institute for Metals Research: hier is sprake van een inhoudelijk breed, financieel omvangrijk en langdurig partnerschap van universiteiten, bedrijfsleven en overheid: een duidelijk zichtbaar samengaan van Nederland Kennisland en de BV Nederland. Maar voor de onderzoeker die gehecht is aan zijn academische taak en die eenvoudigweg zijn projecten gehonoreerd wil zien, wordt het er niet in alle opzichten gemakkelijker op, en misschien ook niet duidelijker.

Onder invloed van al deze bewegingen laait het debat sterk op over de vrijheid van het academisch onderzoek tegenover het gewenste maatschappelijk nut ervan. Mij moet van het hart dat dit debat vaak een erg eenvoudig karakter heeft, waarbij

veel op één hoop wordt gegooid. In wezen zijn er dan twee uiterste standpunten, met vooral veel nadruk op wat moet, of juist aan andere zijde niet zou moeten. Kortweg geformuleerd aan de ene kant: de academische onderzoekers bekommeren zich te weinig om de toepasbaarheid van hun werk; en aan de andere kant: de geldgevers bemoeien zich teveel met het creatieve proces. Juist in een omgeving van onderzoek mag meer gevoel voor nuance worden verwacht.

Dit debat over vrijheid en nuttigheid van de onderzoeker is overigens niet geheel nieuw. In zijn boek *De Mechanisering van het Wereldbeeld* [14] schetst E.J. Dijksterhuis hoe in de oude Griekse wereld het denken over natuurlijke verschijnselen een kenmerkende activiteit was van vrije burgers, terwijl het maken van voorwerpen en werktuigen gezien werd als een bezigheid voor slaven. Op gezag van Plutarchus vermeldt hij dat zelfs Archimedes -ondanks zijn uitvindingen, en zijn aandeel in de verdediging van Syracuse tijdens de Tweede Punische Oorlog- het nuttig maken van wetenschap als een lage en verachtelijke activiteit

beschouwde. En de negentiende-eeuwse Franse schrijver en filosoof Alexis de Tocqueville, op studiereis door de jonge Amerikaanse republiek, sprak zijn twijfel uit over de Amerikaanse preoccupatie met het nut voor de democratische samenleving [15,16]; dit zou op de lange termijn de wetenschap en cultuur maar in de weg staan. Langs deze lijn zal het debat wel nooit beslist worden.

Het Dutch Polymer Institute

Zinniger lijkt het mij als in de discussie over het grensgebied tussen wetenschap en toepassing meer nadruk komt op de kansen die hier liggen - en uiteraard staat het vervolgens iedereen vrij die kansen wel of niet te benutten. Gegeven de grote veranderingen binnen het industriële polymerenonderzoek, met veel aandacht voor de korte termijn, opsplitsing in 'business units', en veranderende eigendomsverhoudingen, dreigt het grensgebied een archipel te worden, zonder de noodzakelijke verbindingen onderling en met het academische moederland. Hier kan een blijvende en

centrale rol gespeeld worden door het DPI, het Dutch Polymer Institute. Een rol die zich ook niet tot Nederland hoeft te beperken. Overeenkomstig de Ministeriële nota *Kennis in beweging* [17] ontleent het instituut zijn bestaansrecht niet aan de uitvoering van een industriële wenslijst van contractresearch, maar aan het creëren en uitvoeren van een generiek en samenhangend fundamenteel programma met veelbelovende toepassingen in gespecialiseerde richtingen [18]. Alleen zo een programma heeft permanente aantrekkingskracht voor bestaande en nieuwe industriële partners, geeft een basis voor aanvullende bilaterale contract-research, en is resistent tegen de steeds sneller schuivende panelen in de industrie. 'Fundamenteel' zegt hier overigens iets over de diepgang, en is iets anders dan 'waardevrij'; in beide gevallen zal de normale onderzoeker sterk 'door nieuwsgierigheid gedreven' zijn. Het door elkaar halen van deze drie begrippen heeft ook al niet bijgedragen tot een helder debat.

Het is een belangrijk gegeven dat het DPI berust op partnerschap, met een even grote financiële inbreng van de deelne-

mende universiteiten als van het consortium van alle grote industrieën en TNO samen. De bonus voor beide partijen is de verdubbeling van het onderzoekbudget door de overheid, in het belang van Nederland als kennisland en als vestigingsplaats voor kennisintensieve industrie. Het partnerschap komt binnen het DPI mede daarin tot uiting dat de onderzoekprogramma's gedefinieerd en uitgevoerd moeten worden in een daadwerkelijke samenspraak tussen de academische onderzoekers en hun industriële collega's. Hiervoor zijn per thema zogeheten 'Industrial Reference Committees' opgezet. Per project worden nu op basis van wederkerigheid, dat wil zeggen halen *en* brengen van kennis, inhoudelijke afspraken gemaakt. Een vereniging van het academisch aangenane met het industrieel nuttige is heel goed mogelijk, en heb ik zelf altijd als zeer inspirerend ervaren. Het geeft de onderzoeker toegang tot een andere wereld van kennis, en stimuleert derhalve eerder het creatieve proces dan dat het dit in de weg staat. Via initiatieven als het DPI geeft het nu een belangrijke versterking van de universitaire infrastructuur en de inter-

universitaire samenwerking, en scheidt het een omvang van onderzoekprojecten die geen enkele afzonderlijke industrie zich nog in de jaarcijfers wil veroorloven.

Een Technologisch Topinstituut Polymeren waarin een aantal universiteiten landelijk samenwerkt mag niet gezien worden als vervanger van een Landelijke Onderzoekschool Polymeren. Wat voor academisch onderzoek in het algemeen geldt, geldt ook hier: het waardevrije onderzoek, met niet-geoordeelde gelden, dient zonder oormerk te blijven, en is uiteindelijk van groot belang voor onderzoekprogramma's met ook een economisch doel. Wel zijn samenwerking en uitbesteding van deelprogramma's heel goed denkbaar, en mogelijk heel effectief. Samenwerkingen worden ook al verkend of opgezet tussen topinstellingen en NWO-organisaties, en tussen de topinstellingen onderling. Een interessant nieuw initiatief is, te trachten vanaf het jaar 2000 onder de paraplu van de Bond voor Materialenkennis te komen tot één aansprekend nationaal materialensymposium waarin veel van de genoemde stimuleringsprogramma's hun wetenschappelijke

resultaten kunnen publiceren. Zonder alle naambordjes valt het met de onoverzichtelijkheid van het onderzoeklandschap uiteindelijk nog wel mee. Zo groot is Nederland nu ook weer niet.

Dankwoord

Dames en heren,

In het voorgaande heb ik het gehad over mijn hoofdonderwerp van onderzoek, de natuurkunde van ketenmoleculen. Daarbij heb ik geprobeerd aan te geven hoe dit onderwerp past in de kennisketen van polymeren, die vooral hier aan de Technische Universiteit Eindhoven zo sterk ontwikkeld is. Een kennisketen die dankzij initiatieven als het Dutch Polymer Institute kan worden verdergevoerd tot in de industrie. Maar ik hoop ook te hebben geïllustreerd hoe er in onze kennis historische ketens zijn, waarbij moderne concepten stapsgewijs terug te voeren zijn op heel oude vragen. En waarbij juist de theoretische natuurkunde de eenheid kan laten zien tussen zich steeds verder specialiserende wetenschappen. Ik heb in

dit verband ook gesproken over de Nederlandse traditie in de theoretische statistische fysica, en ik ben er trots op, in deze traditie te zijn opgeleid. In het bijzonder ben ik mijn Amsterdamse leermeesters Sybren de Groot en Leendert Suttrop dankbaar, die mij als vrienden oog hebben gegeven voor de logica en schoonheid die in goede theorie besloten ligt. De glasheldere caputcolleges en voordrachten van Jan de Boer over fase-overgangen en kritieke verschijnselen hebben mij een voorliefde bijgebracht voor het bouwen van statistische modellen, een voorliefde waaraan ik in de praktijk ruimschoots heb mogen toegeven.

Beste oud-collega's van het Shell-Laboratorium in Amsterdam. Het werken bij Shell is voor mij meer geweest dan een baan, het is een deel geweest van mijn vorming. Ik heb in bijna twintig jaar met teveel collega's mogen samenwerken om er nu één specifiek te willen noemen; maar ik heb er vooral veel van geleerd en veel van genoten. Mijn keuze om uiteindelijk toch over te stappen naar mijn nieuwe positie heb ik dan ook gemaakt na niet heel lang maar wel heel fundamenteel afwegen. Ik

verheug mij erop dat ik vanuit deze positie opnieuw met een aantal van jullie in boeiend contact zal zijn. In het bijzonder wil ik mijn dank uitspreken aan de managers van het laboratorium, die mij reeds jaren geleden de ruimte gaven om één dag per week hier in Eindhoven als deeltijdhoogleraar tussen theorie en industrie actief te zijn.

Mijn eerste kennismaking met de Technische Universiteit Eindhoven was een ontmoeting met Frans Sluijter, op een Shell Technologie Conferentie in Den Haag in 1987. Beste Frans: op een diffuse, maar toch herkenbare manier heeft die ontmoeting mijn verdere loopbaan beïnvloed. Graag wil ik je bedanken voor je voortdurende actieve belangstelling voor mijn wetenschappelijke carrière.

Beste collega's van de Faculteit Technische Natuurkunde en het Werkverband Theoretische Natuurkunde. Al een aantal jaren behoor ik tot wat eens de Vakgroep Theoretische Natuurkunde heette. Ik heb mij vaak schuldig gevoeld dat ik als gehaast deeltijder de ondervonden aandacht niet altijd even gemakkelijk

terug kon geven. Met veel enthousiasme zet ik me nu aan de taak om met jullie, speciaal met Peter Bobbert en Paul van der Schoot, de Eindhovense fysica verder gestalte te geven en, over de grenzen van onze faculteit heen, te polymeriseren. Wat dit laatste betreft stel ik me ook veel voor van de hernieuwde interactie met Peter Hilbers.

Waarde collega's van de Eindhoven Polymer Laboratories en het Dutch Polymer Institute, in het bijzonder Piet Lemstra, Bert Meijer, Han Meijer, Erik Nies en Han Bakker. Werken met jullie betekent: opgenomen worden in een levendig en ambitieus netwerk van polymerenonderzoek. Ik vlei mij met de gedachte dat jullie mij daarin willen betrekken. Piet Lemstra wil ik speciaal bedanken voor het vertrouwen dat ik op verschillende terreinen van zijn kant ondervonden heb.

Geachte studenten en promovendi van de Technische Universiteit Eindhoven. Het is vooral onder u dat ik enthousiasme voor het werken in en aan ketens hoop los te maken. Dat beschouw ik als een eerste

graadmeter van succes.

Op dit voor mij belangrijke moment wil ik graag nog eens mijn grote dankbaarheid tonen jegens diegenen met wie ik ook door de natuurkunde, maar veel meer door de natuur zelf, verbonden ben: mijn beide ouders. De manier waarop zij zich, met hun grote gaven van hoofd en hart, hebben ingezet voor de toekomst niet alleen van hun eigen kinderen, maar van zovelen, is voor mij een inspirerend voorbeeld. En vooral een liefdevolle herinnering.

Lieve Anneke en Daan. De belangrijkste ontdekkingen doet een onderzoeker niet in zijn vak, maar in zijn leven daaromheen. Jullie zijn hierin mijn inspiratie, vaak mijn hulp, en uiteindelijk mijn doel.

Anneke, ik ben je dankbaar omdat je mij steunt in mijn werk, maar er tegelijk in slaagt om mij het belang van mijn werk en onderzoek te doen relativeren.

Daan, tot de heerlijkste momenten met jou horen de vele 'waarom'-gesprekken. Als vierjarige vuurde jij eens een lange rij

van 'waarom'-vragen op mij af, waarbij elk antwoord van mij een nieuw 'waarom' van jouw kant veroorzaakte. Opzettelijk, maar onhandig, probeerde ik jou uiteindelijk een keer af te stoppen, door aan mijn zoveelste antwoord toe te voegen 'Begrijp je het nu?'. Maar onverstoorbaar kwam jij met je volgende vraag: 'Waarom begrijp ik het nu?'. Die houding wil ik ook in mijn werk blijven aannemen.

Ik heb gezegd.

Referenties

1. Carol Kennedy, *ICI, the Company that Changed our Lives*, Hutchinson Ltd., London 1986.
2. M.F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*, Pergamon Press, Oxford 1992.
3. Onder de beschrijvingen van deze paragraaf vallen bijvoorbeeld de commerciële producten Dyneema (DSM), M5 (AKZO-Nobel) en Carilon (Shell), alle mechanisch unieke materialen van Nederlandse bodem.
4. L.D. Landau and E.M. Lifshitz, *Statistical Physics*, 3rd revised and enlarged edition, Part 1, Pergamon Press, Oxford 1980, p. 234.
5. G.E. Uhlenbeck, *Van der Waals revisited*, N.V. Noord-Hollandsche Uitgevers Maatschappij, Amsterdam 1964.
6. Een populaire versie van zijn theorie publiceerde Wilson in: K.G. Wilson, *Scientific American*, August 1979, p. 140-157.
7. Voor een breed overzicht over toepassing van schaling op polymeren, zie: Pierre-Gilles de Gennes, *Scaling Concepts in Polymer Physics*, Cornell University Press, Ithaca 1979.
8. Zie bijvoorbeeld: A. Bunde en S. Havlin (eds), *Fractals and Disordered Systems*, Springer-Verlag, Berlin 1991.
9. Europees patent EP0370586A2.
10. *Physical Review Letters*, Volume 69 (1992) p. 494; *idem*, Volume 78 (1997) p. 1755.
11. *Physical Review Letters*, te verschijnen.
12. Zie bijvoorbeeld: *Fracture - Instability Dynamics, Scaling and Ductile / Brittle Behavior*, MRS Symposium Series, Volume 409, MRS, Pittsburgh 1996.
13. *Kennis verrijkt - Beleidsnota NWO 1996-2001*, NWO, Den Haag 1995.
14. E.J. Dijksterhuis, *De Mechanisering van het Wereldbeeld*, 8e druk, Meulenhoff, Amsterdam 1998, Hoofdstuk III E, p. 80-83.
15. *Du Pont, The Autobiography of an American Enterprise*, Charles Scribners Sons, New York 1952.

-
16. Alexis de Tocqueville, *De la Démocratie en Amérique*, heruitgave J. Vrin, Paris 1990, Tome II, Première Partie, Chapitre X. Een Nederlandse vertaling verscheen in: Tijdschrift voor Sociologie, Dertiende Jaargang, Bijzonder nummer 1-2, Acco, Leuven / Amersfoort 1992.
 17. *Kennis in beweging - over kennis en kunde in de Nederlandse economie*, Ministerie van Economische Zaken, Den Haag 1995.
 18. Voor een overzicht van opzet, organisatie en onderzoekprogramma van het DPI, zie de DPI-website: www.polymers.nl.



Thijs Michels werd geboren op 15 augustus 1947 in Amsterdam. Na in 1965 het diploma Gymnasium-b te hebben gehaald studeerde hij Natuurkunde aan de Universiteit van Amsterdam, met als hoofdrichting Theoretische Natuurkunde. In 1976 promoveerde hij cum laude bij Prof.dr. S.R. de Groot en dr. L.G. Suttrop op het proefschrift *The long-range interaction of relativistic hydrogen atoms*.

Na post-doc-stages aan het Imperial College in Londen en aan de Universiteit van Amsterdam trad hij in 1979 in dienst van het toenmalige Koninklijke/Shell Laboratorium, Amsterdam. Als onderzoeker, uiteindelijk in de positie van Principal Scientist, was hij in veel samenwerkingsverbanden betrokken bij een breed scala aan onderwerpen, zoals fase-evenwicht-

modellen voor koolwaterstofmengsels en voor gesmolten alumino-silicaten, microstructuur-eigenschapsrelaties van polymere composieten en geleidende polymeren, morfologie-ontwikkeling en procesdynamica in polymerisatiereactoren, colloïdale stabiliteit en flocculatie van zware componenten en roet in olieproductie, -raffinage en -verbranding. Van 1990 tot 1998 was hij deeltijdhoogleraar Theoretische Natuurkunde in Relatie tot de Industrie aan de Technische Universiteit Eindhoven.

Sinds 1 oktober 1998 is hij voltijds-hoogleraar aan deze universiteit, met als leeropdracht Theoretische Natuurkunde, in het bijzonder Polymeerfysica. Hij is als onderzoeker en Program Manager actief in het Dutch Polymer Institute. Tevens is hij lid van het Dagelijks Bestuur van het NWO-Prioriteitsprogramma Materialenonderzoek, lid van de Raad van Advies van de Bond voor Materialenkennis, en Nederlands vertegenwoordiger in het EU-COST Technical Committee on Physics.

TU/e technische universiteit eindhoven

Informatie:
Service Bureau Auditorium Plus
Telefoon 040 - 247 22 50

ISBN 90 386 14 21 7