

## Wanorde en structuren

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

Michels, M. A. J. (2012). *Wanorde en structuren*. Technische Universiteit Eindhoven.

***Document status and date:***

Gepubliceerd: 01/01/2012

***Document Version:***

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

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

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

[Link to publication](#)

***General rights***

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

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

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

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


***Take down policy***

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

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

providing details and we will investigate your claim.

Afscheidscollege  
prof.dr. M.A.J. Michels  
7 september 2012

A portrait of a middle-aged man with glasses, wearing a dark suit, a light blue striped shirt, and a blue tie. He is smiling slightly and looking directly at the camera. The background is a solid light blue color.

/ Faculteit Technische Natuurkunde

**TU** e Technische Universiteit  
Eindhoven  
University of Technology

# Wanorde en structuren

Where innovation starts

Afscheidscollege prof.dr. M.A.J. Michels

---

# Wanorde en structuren

Uitgesproken op 7 september 2012  
aan de Technische Universiteit Eindhoven



# Inleiding

---

Mijnheer de Rector Magnificus, dames en heren,

Dertien jaar geleden heb ik mijn intrede gehouden als voltijdhoogleraar en mijn plannen ontvouwd. Dit afscheidscollege wil ik beginnen met een terugblik op die plannen, op de achtergronden ervan en op de resultaten. Dat doe ik aan de hand van drie hoofdlijnen: theoretische natuurkunde, de invulling richting polymeerfysica en de industriële samenwerking. Daarna ga ik in op het onderwijs, met name op de rol van het onderwijs in de theoretische natuurkunde aan een technische universiteit.

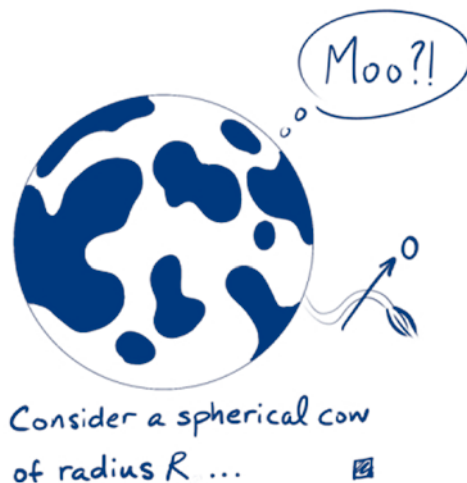
# Theoretische natuurkunde

Waarom ik indertijd theoretische natuurkunde ben gaan studeren, kan ik niet precies aangeven. Op de middelbare school lag mijn hart jarenlang veel meer bij geschiedenis en de klassieken. Toen ik uit rationele overwegingen toch de bèta-kant koos, groeide het idee architect te worden. Vanuit elementaire lijnen en vlakken een logische en mooie ruimtelijke structuur ontwerpen, vond ik fascinerend en heb ik vaak op papier geoeftend. Na mijn eindexamen koos ik zonder al te lang afwegen toch enthousiast voor de natuurkunde. En drie jaar later voor de theoretische natuurkunde. Beide keuzes werden overigens afgeraden door mijn vader, een experimenteel en technisch natuurkundige, wiens werk ook nog belangrijk is geweest voor de vroege ontwikkeling van polymeren; hij zag in 1965 spannende nieuwe wetenschap opkomen, vooral richting de levende materie.

Terugkijkend denk ik dat ikzelf de natuurkunde, en vooral de theoretische natuurkunde, herkende als de discipline die de meeste antwoorden zou gaan geven op vragen over de materiële wereld. In dit verband wil ik de titel van een boek van Frans Saris<sup>1</sup> graag omkeren en parafraseren: natuurkunde is zeker niet alles, maar alles in die wereld is uiteindelijk wel natuurkunde. Toch herinner ik me mijn vaders aansporing om als kandidaat-theoreticus vooral, zoals hij het woordelijk uitdrukte, 'het contact met de industrie niet te verliezen'; hij zou mij ook een keer op een van zijn maandelijkse bezoeken naar De Staatsmijnen meenemen. Daar kon het helaas niet meer van komen. Eerlijk gezegd heb ik me indertijd niet veel van die aansporing aangetrokken, en me nog jarenlang enthousiast als zuiver-academisch theoreticus mogen ontwikkelen. Maar een hoop toeval, een uitdagend industrieel laboratorium en wellicht een beetje erfelijkheid deden kennelijk toch de rest. In ieder geval raakt zijn aansporing aan een centrale vraag in dit afscheidscollege: hoe kan de theoretische natuurkunde bijdragen in wat we tegenwoordig valorisatie noemen en toch dicht bij zijn eigen wortels en drijfveren blijven?

# Theorie en toepassing

De theoretische fysica heeft een wat esoterisch imago en de aanpak van een theoretisch fysicus lijkt soms ver af te staan van de realiteit. Het spreekwoordelijke voorbeeld van de bolvormige koe is zelfs op het internet te vinden (figuur 1). Het is dan niet zaak om een beetje op te schuiven richting de toepassing, maar om te pogen grotere afstanden te overbruggen. Bij de theoretische, modelmatige aanpak van een specifiek probleem is het vaak noodzakelijk allerlei complicerende factoren eerst weg te laten. Het gevaar bestaat dat daarmee de afstand tot de praktijk alleen nog maar groter wordt en de theoretische vraagstelling nóg specifiekere. Een strategie van vereenvoudiging die er slechts ogenschijnlijk veel op lijkt is om het probleem in een algemenere context te plaatsen. Dit is een vereenvoudiging juist door generalisatie en door het gebruik van analogie. Naarmate je dieper in de principes van de fysica doordringt, wordt nu eenmaal het aantal fysische wetten alleen maar kleiner, worden de analogieën herkenbaarder en de oplossingen transparanter. Het is dus zaak om als theoreticus in complexe en praktische problemen eerst de essentiële fysische mechanismen te ontdekken en ontfaelen,



Figuur 1

(bron: [www.morningcoffeephysics.com](http://www.morningcoffeephysics.com)).

om zo een inzichtelijke fundamentele basis te verschaffen voor een meer specifieke aanpak van het praktische probleem. Pierre-Gilles de Gennes (figuur 2), de geestelijke vader van ons vakgebied, was hier een meester in en vertelde mij eens over zijn voorliefde voor ‘dirty physics’ en conceptuele, eenvoudige modellen.



Figuur 2

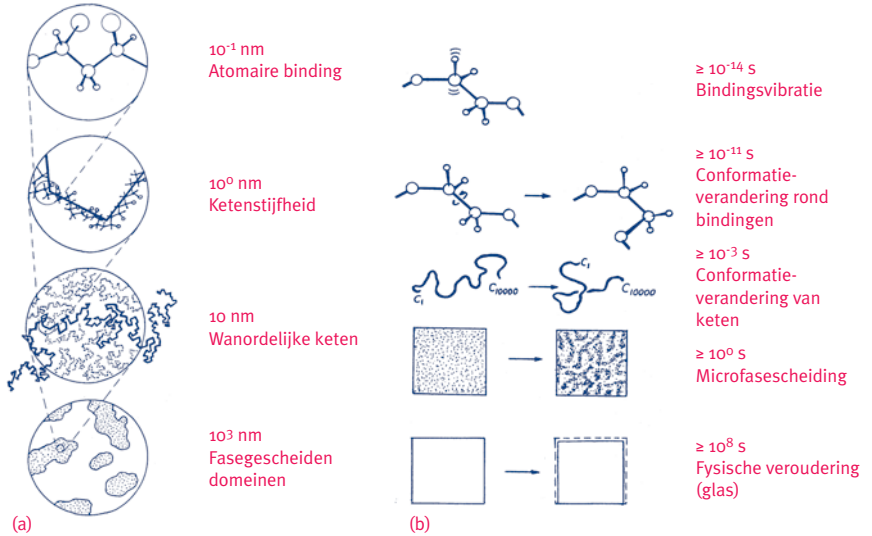
Pierre-Gilles de Gennes (1932-2007). Nobelprijs Natuurkunde 1991 *“for discovering that methods developed for studying order phenomena in simple systems can be generalized to more complex forms of matter, in particular liquid crystals and polymers”* (foto: [www.physicaplus.org.il](http://www.physicaplus.org.il); tekst: [www.nobelprize.org](http://www.nobelprize.org)).



# Polymeren en polymeerfysica

De interesse om voltijds in Eindhoven aan de slag te gaan, was gewekt door gesprekken met Bert Meijer en Piet Lemstra en door het hierin geschetste vooruitzicht om bij te kunnen dragen aan het Technologisch Top Instituut Polymeren, het Dutch Polymer Institute (DPI), een initiatief van toenmalig minister Hans Wijers. Dat initiatief werd vooral gedragen door groepen uit de hoek van de chemische technologie en materiaalkunde, en er bleek behoefte aan fundamentele polymeerfysische onderbouwing in het onderzoek. Voor de faculteit Technische Natuurkunde bood dit de mogelijkheid aan te haken bij een steeds belangrijker wordend interfacultair zwaartepunt binnen de TU/e. Mij gaf het de kans mijn horizon te verruimen van één industrie naar een brede universitair-industriële kennisketen. Over de precieze opzet van het DPI heb ik het straks nog even, maar duidelijk was dat er een navenant brede behoefte was aan polymeerfysica: van structuurvorming tijdens het maken en verwerken van materialen, tot mechanische en opto-elektronische producteigenschappen en hun mesoscopische, moleculaire of submoleculaire oorsprong. Om uit te leggen hoe hieruit een coherent onderzoeksthema voor een theoretische leerstoel en groep voortkomt, even kort iets over polymeren.

Polymeren zijn macromoleculen, lange ketens of grote netwerken van honderden tot honderdduizenden moleculaire segmenten. Nu nog meestal afkomstig uit fossiele bronnen, maar hopelijk dankzij veel onderzoek steeds meer van duurzame oorsprong. Bovendien zijn ze biologisch en biomedisch relevant, omdat wij er zelf voor een groot deel uit zijn opgebouwd. Door hun ingewikkelde moleculaire architectuur hebben polymeren een grote mate van wanorde; voor synthetische polymeren is gekookte spaghetti een veel gebruikte vergelijking. Ondanks die wanorde zijn op microscopische lengteschalen karakteristieke structuren te herkennen, met al even karakteristieke tijdschalen voor structuurveranderingen onder invloed van de aanwezige thermische energie. Doros Theodorou te Athene, pionier in het simuleren van polymeerdynamica met computers, vatte het eens<sup>2</sup> samen zoals in figuur 3.



Figuur 3 (a)

(b)

Lengte- en tijdschalen in de polymerdynamica (bewerkt van referentie 2).

De extreem brede reeks van relaxatietijden, van subpicoseconden tot jaren, maakt dat polymeren zich onder invloed van uitwendige krachten geheel anders gedragen dan andere materialen. In veel sterkere mate dient niet slechts de relatie tussen microstructuur en eigenschappen te worden opgehelderd. Een van die eigenschappen is namelijk de dynamica. En als gevolg van de trage bewegingen hierin bepaalt de lokale dynamica weer de microstructuur - en dit vervolgens voor elke lengte- en tijdschaal. Er is dus een schaalafhankelijke driehoeksrelatie tussen structuur, dynamica en eigenschappen, met grote consequenties voor het materiaalgedrag in de toepassing. Deze driehoeksrelatie is een leidend thema geweest in ons polymeerfysisch onderzoek van de afgelopen jaren.

Piet Lemstra heeft het vorig jaar in zijn afscheidscollege<sup>3</sup> gehad over de praktische kanten van polymere materialen. Ik wil hier alleen opmerken dat het met afstand de wereldwijd snelst groeiende materiaalklasse is, met een steeds breder scala van toepassingsgebieden - zowel ten koste van andere hoogwaardige materialen als in geheel nieuwe functies. De 'materials of choice' dus, voor het creëren van oplossingen in een wereld waarin de meerderheid van de bevolking nog niet ons

welvaartsniveau heeft mogen bereiken en waarin wij onze welvaart willen behouden. Bij uitstek een onderwerp voor een technische universiteit die duurzaamheid en kwaliteit van leven hoog in het vaandel heeft.

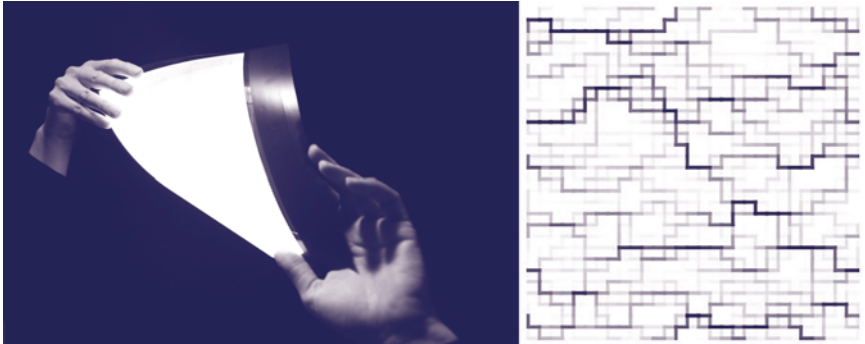
# Percolerende structuren

Collega Han Meijer zei mij eens: “Als ik jou zie, denk ik aan percolatie.” Een mooie kapstok om met voorbeelden te illustreren hoe generieke theoretische concepten steeds weer helpen bij het ontdekken van de essentie in ogenschijnlijk heel uiteenlopende problemen van polymeren. Percolatie is het verschijnsel waarbij via een of ander wanordelijk en coöperatief proces in een materiaal een doorlopend, dus percolerend, netwerk van dunne paden ontstaat voor transport, bijvoorbeeld transport van lading of impuls. Zo een grillig ijl netwerk wordt dan bepalend voor eigenschappen van het materiaal als geheel, bijvoorbeeld de elektrische geleidbaarheid of mechanische stijfheid.

Polymere materialen zijn van oudsher gebruikt als elektrische isolatoren. Sinds ruim twintig jaar wordt er echter geëxperimenteerd met organische materialen die geleidend zijn en onder invloed van stroom licht kunnen uitzenden. Van deze revolutionaire materialen wordt veel verwacht, bijvoorbeeld voor flexibele elektronische displays en verlichting (figuur 4, links). Bovendien kun je het principe omkeren: licht erin en stroom eruit, dan heb je een zonnecel. Een van de grote problemen is hier het geringe geleidingsvermogen ten opzichte van metalen. Dit blijkt nauw verbonden met de al gesignaleerde wanorde: ladingen moeten zich door organische materialen verplaatsen als door een woest berglandschap, met energetische hoogteverschillen vele malen hun thermische energie, en vooral ook een grote spreiding in deze hoogteverschillen. Mechanistisch begrip van de geleiding gaat dus over het zoeken van een optimaal percolerend pad door het landschap, met vele snelle passages over gemakkelijke passen, maar ook onvermijdelijke trage en hoge sprongen, die grote invloed hebben op de uiteindelijke stroom tussen de elektroden. Ook op elektronisch niveau is er dus een breed spectrum aan schalen.

Onder leiding van Peter Bobbert en Reinder Coehoorn is hiernaar door onze studenten veel onderzoek gedaan, waarbij het proces werd gesimuleerd in geïdealiseerde roostermodellen en waarbij concepten uit de percolatietheorie essentieel waren (figuur 4, rechts). De resultaten bleken niet alleen geschikt voor diverse fraaie publicaties, maar ook belangrijk voor het praktische begrip van de invloed van veldsterkte en ladingsdichtheid op de stroom-spanningskarakteristiek van

devices. Een publicatie van zeven jaar geleden in het fundamentele tijdschrift *Physical Review Letters*<sup>4</sup> is inmiddels al bijna 300 keer geciteerd, terwijl de resultaten ervan al snel bij Philips in modellen werden opgenomen. Dit is wat ik bedoel met het overbruggen van afstand.

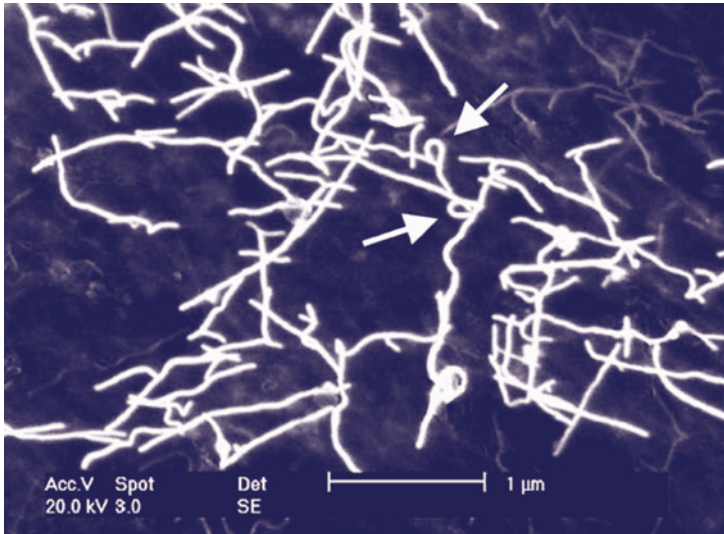


Figuur 4

Roostermodel (rechts) voor wanordelijke geleiding in organische LEDs voor verlichting (links): de lijndikte geeft de stroomsterkte aan door het energetisch wanordelijke rooster (foto: Holst Centre/TNO; model: J. Cottaar).

Voor een theoreticus is het vanuit dit voorbeeld conceptueel geen grote stap naar het geleidend maken van gewone niet-geleidende polymeren door toevoeging van geleidende nanodeeltjes zoals koolstofnanobuizen of grafen. Hier is de theoretische vraag hoe door zelfassemblage een wanordelijk en percolerend netwerk van geleidende deeltjes kan ontstaan in een al even wanordelijk polymeer (figuur 5). En welke rol de structuur en grootte van de nanodeeltjes spelen in de geleidbaarheid van het zo gecreëerde nanocomposiet. Maar chemisch en technologisch is het een uitdaging in een geheel ander vakgebied dan daarnet. Een doel is om transparante geleidende films te maken, waarmee het industrieel veel in devices gebruikte indium-tin oxide kan worden vervangen. Indium is een van die elementen die schaars en strategisch dreigen te worden; het is bovendien erg milieuvriendelijk. Cor Koning is er in de faculteit Scheikundige Technologie in geslaagd zulke nanocomposieten te maken en de theoretische samenwerking met mijn collega Paul van der Schoot was daarbij belangrijk. Opnieuw kon een grote afstand overbrugd worden, met zowel publicaties in *Physical Review Letters* als ook een gezamenlijk patent<sup>5</sup>.

Polymeren worden vooral toegepast vanwege hun mechanische eigenschappen en er is dan ook al decennia lang materiaalkundig onderzoek gedaan naar verschijnselen als stijfheid, vervorming, wrijving en breuk. Zo lang zelfs dat deze



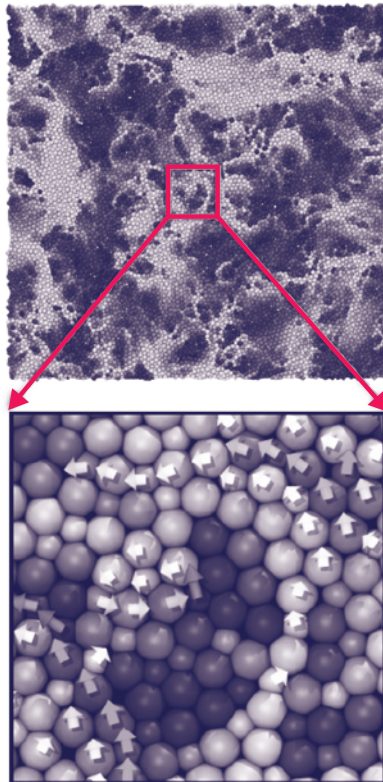
Figuur 5

Netwerk van geleidende koolstofnanobuizen in een polystyreen nanocomposiet (bron: J. Loos et al., *Ultramicroscopy* 104 (2005) 160).

onderwerpen in de ogen van veel fysici een wat traditioneel ingenieurskarakter hebben. Dit is een misvatting: juist aan de mechanica van polymeren ontbreken nog de fysische inzichten op het diepste niveau. Gelukkig krijgen wereldwijd steeds meer groepen in de fysica van zachte materie aandacht voor dit gebied en met name voor de coöperatieve dynamische processen die zich hier afspelen. Dit is het best te illustreren aan de zogeheten glastoestand, die in genoemde verschijnselen steeds weer een rol speelt.

Een wanordelijk polymeer is eigenlijk een vloeistof, met bij hoge temperatuur een grote moleculaire beweeglijkheid. Het materiaal wordt in zijn vloeï slechts gehinderd door de verknopingen in de spaghetti en gedraagt zich daardoor rubberachtig. Bij afkoelen zien we de wanordelijke structuur statistisch niet veranderen en toch vindt er een spectaculaire overgang plaats: het materiaal wordt glashard en de stijfheid neemt meer dan een factor 1000 toe. Tegelijkertijd wordt de moleculaire beweging een factor  $10^{15}$  trager dan ver boven deze zogeheten glasovergang. Een factor  $10^{15}$ , dat is - zoals Leen Struik het plastisch uitdrukt - meer dan de leeftijd van het heelal in uren: als een moleculair ketensegment bij hoge temperatuur in één uur zou bewegen, kwam het bij lage temperatuur nog niet tijdens de levensduur van het heelal in beweging. En dat alles zonder duidelijke verandering van de structuur. Nobelprijswinnaar Philip Anderson bestempelde de glasovergang

als “the deepest and most interesting unsolved problem in solid-state physics”. Het probleem is niet dat er geen theorie is van de glasovergang, het probleem is dat er wel honderd zijn<sup>6</sup>. En steeds meer van die theorieën roepen weer het beeld op van percolatie: van een mengsel van moleculaire segmenten met zeer uiteenlopende beweeglijkheden, waarin bij afkoeling een fluctuerend netwerk groeit van trage en daardoor stijve domeinen, een netwerk dat uiteindelijk bij de glasovergang percoleert. Deze heterogene glasdynamica is fraai in beeld gebracht in een computersimulatie<sup>7</sup> door de groep van David Chandler in Californië (figuur 6). Zowel voor de polymeertechnologie als voor de fundamentele fysica dus een belangrijk onderwerp dat ook goed past in onze agenda. Onder leiding van Alexey Lyulin doet onze groep grootschalige moleculaire simulaties van glasachtige mechanica, in het bijzonder in nanocomposieten en ultradunne films, waar de percolatie van stijfheid nóg ingewikkelder en omstredener blijkt.



Figuur 6

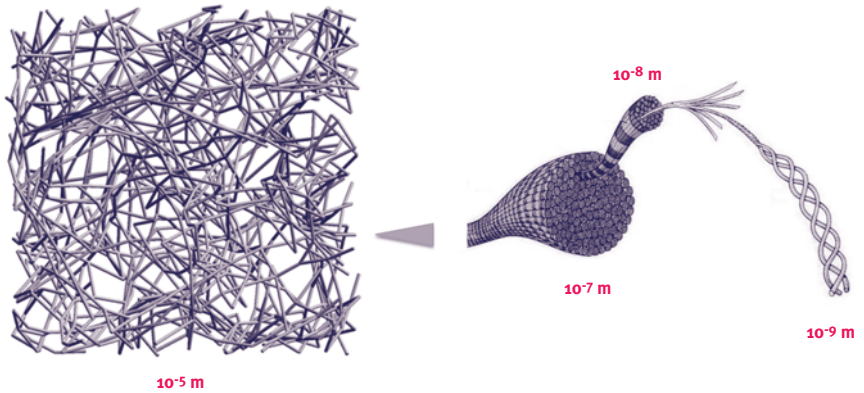
Heterogene dynamica in een gesimuleerd glas: de pijlen geven verplaatsingen groter dan een halve deeltjesdiameter aan (bron: A.S. Keys et al., Phys. Rev. X 1 (2011) 021013; voor de film, zie referentie 7).

# Zachte materie en nieuwe thema's

De generieke aspecten die ik zojuist besproken heb, zijn niet voorbehouden aan synthetische polymeren. Er zijn opvallende analogieën met andere wanordelijke materialen, zoals colloïden en gels. Het vakgebied van de polymeerfysica gaat daarmee naadloos over in het bredere gebied van wat sinds De Gennes 'matière molle' is gaan heten: zachte materie, gekenmerkt door thermische fluctuaties, wanorde en zelforganisatie in mesoscopische structuren. Bij uitstek passen hierin ook de materialen van de levende natuur. De natuur is er al miljoenen jaren geleden in geslaagd om met een beperkt aantal bouwstenen een oneindige variatie aan nuttige zachte structuren te creëren. Wij kunnen hier veel van leren, voor klasieke én nieuwe toepassingen. Terwijl wij traditioneel onze structuren maken via 'top-down'-processen van mengen en roeren, dus met controle op de grootste lengteschaal, doet de natuur dit feilloos 'bottom-up', door zelfassemblage vanuit de moleculaire lengteschalen. Binnen de nanotechnologie tracht men deze omkering nu ook te bereiken en het zal duidelijk zijn dat hier vruchtbare synergie is van nano en bio. Een paar jaar geleden hebben wij daarom besloten om ons ook op biologische problemen te richten.

Paul van der Schoot zet zijn theoretische kennis over zelfassemblage nu ook in om te laten zien hoe nanocapsules kunnen worden gemaakt uit de eiwitmantels van virussen. En Kees Storm onderzoekt de mechanica en functie van biologische netwerken, met name van collageen, het weefsel waaruit wij allemaal zijn opgebouwd. De polymeren erin zijn op moleculaire schaal al veel stijver dan een doorsnee synthetisch polymeer, meer *ongekookte* spaghetti, met een spectaculair andere stijfheid bij grote rek. Dit andere rekgedrag is essentieel voor het biologisch overleven en kon door Kees al enige jaren geleden uit fundamentele fysica verklaard worden. Nu is de uitdaging het uit collageenketens samengestelde extracellulaire netwerk structureel en mechanisch te doorgronden, in de hoop inzichten te verschaffen voor medische tissue engineering. Hier openbaart zich een nog een veel grotere complexiteit en veel rijkere hiërarchie van lengteschalen en mesostructuren dan bij een verknoopt synthetisch polymeer (figuur 7).





Figuur 7

 $10^{-5} \text{ m}$ 

Hiërarchische opbouw van het collageennetwerk (bewerkt van: E.M. Huisman et al., *Physical Review E* 82 (2010) 061902 en N.A. Campbell, *Biology*, Benjamin/Cummings, CA, 1996).

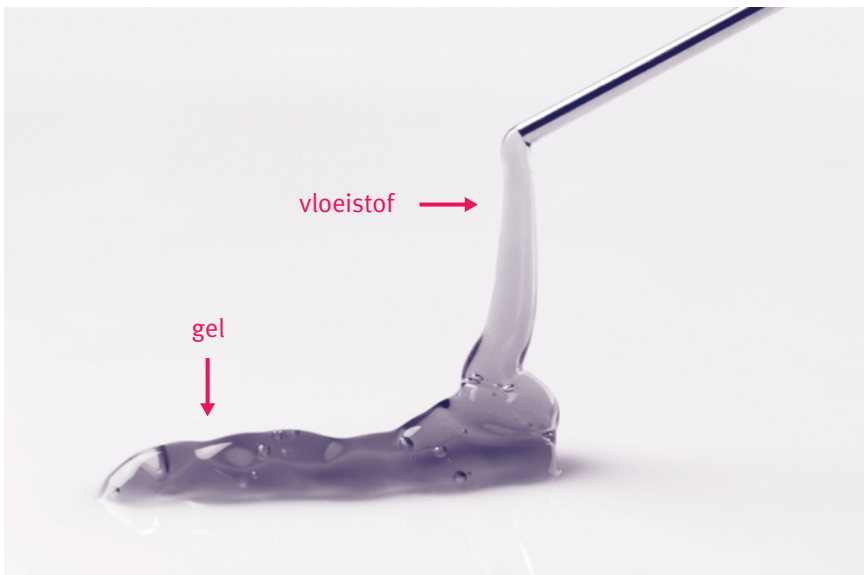
Daarmee kom ik tot twee algemene begrippen in het onderzoek naar polymeren en zachte materie, maar ook in veel onderzoek in andere vakgebieden: ‘multiscale modelling’ en ‘complexiteit’. Dit zijn begrippen die internationaal een nieuw leidend thema van onderzoek en kruisbestuiving zijn geworden en recent ook binnen onze universiteit een speciale plek hebben gekregen, tussen de faculteiten in. Zoals ik hoop met voorbeelden te hebben geïllustreerd, past de theorie van zachte materie hier perfect in. Ik ben blij dat onze groep vanaf het begin nauw betrokken is bij het nieuwe Eindhoven Multiscale Institute en het Institute for Complex Molecular Systems. De nieuwe behuizing van beide interfacultaire initiatieven, in het gebouw Ceres, wordt in oktober feestelijk geopend.

# Complexiteit en universeel gedrag

Bij het begrip 'complexiteit' wil ik iets langer stilstaan. Het betekent wat mij betreft iets anders dan het alledaagse 'gecompliceerd', hoewel gecompliceerde problemen ook complex kunnen zijn en complexe problemen gecompliceerd - maar soms juist net niet. Complexiteit verwijst ernaar dat in een probleem veel actoren aanwezig zijn die elkaar als in een onontwarbaar netwerk wederzijds beïnvloeden. Het gedrag van het geheel zal zeker afhangen van de individuele eigenschappen van al die actoren. Soms echter blijkt het collectieve patroon van interacties, dus het totale web van wederzijdse invloeden, veel bepalender voor het uiterlijk gedrag. Een klassiek en inmiddels eenvoudig voorbeeld is de condensatie van een afkoelend gas. Het in een vat opgesloten ijle gas besluit een dichte vloeistof te worden op het moment dat de correlatie tussen de moleculen, dus het netwerk van wederzijdse beïnvloeding via intermoleculaire krachten, oneindig groot is geworden, dus zich uitstrekt over het gehele vat. Die grootschalige correlatie wordt dan veel belangrijker dan de kleinschalige moleculaire eigenschappen. Gevolg is dat de thermodynamische verschijnselen rond het kritieke punt van de gas-vloeistof-faseovergang onafhankelijk worden van moleculaire details en een universeel en mathematisch eenvoudig karakter krijgen. Complexiteit leidt hier dus juist tot vereenvoudiging en tot analoog gedrag voor zeer uiteenlopende systemen bij een faseovergang. Echter, dit kan pas worden doorzien en benut door al bij voorbaat het complexe collectief van interacties tussen al die actoren centraal te stellen en de vereenvoudiging te zoeken in weglating van overige details.

Zowel in de fysica als in de economische en sociale wereld zijn inmiddels veel ingewikkeldere complexe en zelforganiserende systemen onderwerp van theoretisch onderzoek door fysici geworden. Met vaak boeiende dynamische kritieke verschijnselen en verrassend eenvoudige uiterlijke wetmatigheden. Bijvoorbeeld voor de statistiek van aardbevingen, beurskoersen of het uitsterven van biologische soorten. Het gevaar ligt op de loer dat fysici eenvoudig ogende empirische wetmatigheden te gemakkelijk willen verklaren vanuit eenzelfde principe van dynamische complexiteit. Toch kan ik u het voor een breed publiek geschreven boek met de onbescheiden titel 'How nature works', van de theoretisch fysicus Per Bak<sup>8</sup>, van harte aanbevelen.

Dynamische complexiteit is wel degelijk aan de orde in het actuele onderwerp van ‘jamming’, van het vastlopen van stromen deeltjes die elkaar in de weg zitten, bijvoorbeeld in poeders, emulsies, gels of schuimen. Een lastig praktisch probleem in de technologie van plastics, voedsel of gezondheidsproducten, maar ook in de civiele techniek. Een paar jaar geleden kwam ik in contact met Daniel Bonn, die in Amsterdam reologisch onderzoek doet naar deze zachte materialen. Ze gedragen zich bij geringe belasting als een vaste stof, maar bezwijken bij een kritieke zwichtspanning en worden dan vloeibaar. We spreken daarom van ‘yield-stress fluids’. Denkt u maar aan haargel (figuur 8); deze blijft immers op uw hand staan zolang u er niet over strijkt. Daniel ontdekte dat zo een materiaal, na tot stilstand te zijn gekomen beneden de zwichtspanning, niet normaal elastisch vervormt maar op een merkwaardige manier voortdurend van vorm blijft veranderen. Het kruipt, zeggen we dan, en op elk tijdstip blijkt daarbij de procentuele vormverandering recht evenredig met de procentuele verandering van de meettijd zelf. Wiskundig betekent dit dat de vervorming geen eigen kenmerkende tijdschaal heeft en een eenvoudige machtwet is als functie van de tijd; ogenschijnlijk heeft dit schaalinvariante proces geen einde. Daniel vond dit gedrag niet alleen voor gels, maar ook voor schuimen en emulsies<sup>9</sup>.



Figuur 8

Carbopol, een hoofdbestanddeel van haargel, als demonstratie van een yield-stress fluid (bron: <http://arraseecase.blogspot.nl/2011/10/nova-progressiva-escova-de-gel-o-que.e.html>).

Bij Shell had ik al eens zulke data gezien voor de compactering van oliehoudend zand, waarbij de schaalinvariante kruip zelfs een week lang kon worden gevolgd<sup>10</sup>. In een samenwerking met de groep van Daniel zijn yield-stress fluids voor mij een intrigerend eigen onderzoeksgebied geworden. Het bleek dat dit soort schaal-invariant kruipgedrag al in 1910 door Andrade was ontdekt bij metalen; daar wordt het toegeschreven aan de beweging van elkaar afstotende kristalroosterfouten. Andrade-kruip, zoals het verschijnsel is gaan heten, is eveneens aangetoond in polymeren, colloïden, ijs en papier; en onlangs ook in het zachte bioweefsel van de tussenwervelschijven, de collageenhoudende *nucleus pulposus*<sup>11</sup>. Zelfs het frequentiepatroon van de naschokken bij aardbevingen wordt ermee in verband gebracht<sup>12</sup>. Uiteraard zijn fysici op zoek gegaan naar verklaringen, en een recente suggestie is dat hier inderdaad sprake is van zo een generiek collectief verschijnsel, dwars door al die verschillende kristallijne en amorfe materiaalsoorten heen. De gemeenschappelijke noemer zou dan een kritieke overgang kunnen zijn analoog aan die gas-vloeistofovergang. Maar dan niet een overgang in de dichtheid, maar in het karakter van de dynamica. In plaats van groeiende heterogene structuren van vloeistof in een gas, hebben we dan groeiende heterogene patronen van stagnatie in een stroming, dichtbij een kritiek percolatiepunt waar het geheel stagneert. Deze kritieke dynamica zou dan opnieuw een vereenvoudigde en breed toepasbare beschrijving toelaten, waarbij het collectieve proces centraal staat en details onbelangrijk worden; dat zou verklaren waarom het proces zo universeel wordt waargenomen. Samen met Daniel en zijn student Jose Paredes Rojas heb ik getracht dit pad te volgen door algemene concepten van kritieke verschijnselen te combineren met de statistiek en patronen van wanordelijk bewegende deeltjes die elkaar in de weg zitten. En tot onze verrassing waren die algemene ingrediënten voldoende om de Andrade-wet te vinden en het reologisch gedrag van emulsies en gels te begrijpen. Die wet lijkt een manifestatie van het feit dat het systeem zich zo ver buiten kinetisch evenwicht bevindt, dat het in een soort zichzelf vertragende, maar doorlopende, val geraakt, op zoek naar een evenwicht dat pas op heel andere tijdschalen wordt bereikt. Wij hopen dit werk binnenkort te publiceren.

# Publiek-private samenwerking

Dames en heren, dit is een afscheidscollege en ik heb er daarom voor gekozen om enkele samenhangende wetenschappelijke voorbeelden te geven. Ik hoop dat het voor u onderhoudend was, voor ons was het dat al die jaren zeker. Een bachelorstudent die met mij aan het laatste onderwerp gewerkt heeft, kwam in zijn eindverslag spontaan met een toepasselijk citaat van een beroemde theoreticus op de proppen<sup>13</sup>: *“One thing that makes the adventure of working in our field particularly rewarding [...] is that a chief criterion for the selection of a correct hypothesis [...] seems to be the hypothesis of beauty, simplicity, or elegance.”* Maar dit doet niets af aan de keuze om ons door de mogelijkheid van toepassingen te laten inspireren. En daarmee kom ik terug op het Dutch Polymer Institute (DPI)<sup>14</sup>, en op de publiek-private samenwerking.

Hans Wijers richtte in 1997 het DPI en drie andere instituten op, als eerste TTI's (Technologische Top Instituten), om Nederland te versterken als kennisland en als vestigingsplaats voor kennisintensieve industrie. De formule was simpel en toch vernieuwend: universiteiten en industrieën gaan een fifty-fifty partnerschap aan in fundamenteel maar tegelijkertijd strategisch en precompetitief onderzoek en de overheid beloont dit met 100% premie. Van harte nam ik de uitnodiging van Piet Lemstra en Leen Struik aan om mee te helpen bij de opbouw van dit instituut, naast de opbouw van mijn eigen groep.

Het waren boeiende leerjaren, want een nieuw *top*instituut richt je niet zomaar op. Je hoopt dat na veel ups en downs uiteindelijk te bereiken, zeker in zo een gevoelig onderwerp als de samenwerking tussen ambitieuze, autonoom opererende professoren en industrieën die elkaar in de markt beconcurreren. De stelregel was: de industrie beslist 'wat', de universiteit bepaalt 'hoe', universitaire promovendi en postdocs doen op academisch niveau het onderzoek en het resultaat is gezamenlijk DPI-eigendom. Maar in de praktijk was de industrie daarbij wel zwaar aan zet. Dit was een bewuste keuze omdat academici nog ervaring moesten opdoen met het samenwerken in industrieel gerichte kennisketens.

Na de pioniersjaren kwam onder de bezielende leiding van Piet Lemstra het succes, in de vorm van een groeiend aantal academische en industriële partners, en een aanzienlijke stroom van gerapporteerde vindingen. Belangrijk hierbij was dat het onderzoek werd georganiseerd in technologiegebieden rond industriële productsoorten en dat de industrie selectief tickets kon kopen voor bepaalde gebieden. In elk productgebied kwam daardoor een breed panel van industriële experts beschikbaar om de koers, het ‘wat’, te bepalen en de academische blik te verbreden met praktische kennis. Al bij de eerste evaluatie, na vier jaar, hadden industrieën er de nadruk op gelegd dat vooral goed opgeleide promovendi voor het afnemend veld belangrijk waren. Inderdaad heeft altijd een groot deel van de DPI-promovendi, vaak buitenlandse kennismigranten, na afloop de weg gevonden naar de polymeerindustrie, in het bijzonder in Nederland. Onze opleiding van promovendi met voor de maatschappij nuttige kennis en ervaring is een rendement van onderzoek dat in discussies over valorisatie vaak vergeten wordt.

Toen ik begin 2004 Piet Lemstra opvolgde was het doel DPI kansrijk te maken voor langjarige voortzetting als daadwerkelijk *top*instituut na het aflopen van de eerste subsidie in 2007. Het werd ons duidelijk dat met behoud van de succesvolle industriële oriëntatie en de snelle groei van intellectueel eigendom, een wetenschappelijk topniveau op Europese schaal een eerste vereiste was. Piet had al de visie van een EPI in plaats van DPI, en ook EZ gaf aan dat de Nederlandse schaal er niet toe deed, Europa was maatgevend. Er moest een Europees netwerk komen van academische topgroepen en leidende polymeerindustrieën. Voor de wetenschappelijke versterking hebben we daartoe meer symmetrie aangebracht tussen de financieel gelijkwaardige publieke en private partners en actief buitenlandse topgroepen aangezocht. De selectie en bewaking van het onderzoek bleven recht doen aan de industriële visies en voorkeuren, maar kregen parallel hieraan heldere NWO-achtige procedures en voorwaarden. Bovendien kwam er een team van wetenschappelijke experts als voorzitters van de industriegerichte en product-gerelateerde technologiegebieden.

Sinds enige jaren wordt DPI opgenomen in de monitor van kwaliteit die in opdracht van het Ministerie van OC&W tweejaarlijks wordt uitgevoerd naar al het onderzoek dat door Nederlandse universiteiten, instituten en industrieën wordt gedaan. De wetenschappelijke impact in termen van citaties van artikelen is daarbij dé kenmerkende graadmeter. In de evaluatie over de jaren 2003-2006 scoorde DPI al heel hoog, vlak achter een aantal bekende KNAW- en NWO-instituten. En twee jaar later had DPI alleen het Hubrecht Instituut voor ontwikkelingsbiologie nog voor zich, met een citatiescore van ruim twee keer het wereldgemiddelde

(figuur 9), een score die het onder leiding van Jacques Joosten en Martien Cohen Stuart heeft bestendigd. DPI was dus in die ranking het leidende instituut binnen de chemie, fysica of materiaalkunde; het heeft daarnaast nog steeds met afstand het grootste aantal gerapporteerde vindingen van enig TTI. Gestructureerde samenwerking met de industrie hoeft niet ten koste te gaan van een academisch topniveau, je kunt elkaar erin versterken.

Organisatie	Impact 2005-08
<b>Publieke onderzoeksinstituten</b>	
KNAW Hubrecht Instituut	2,94
TTI DPI	2,19
NWO FOM Amolf	2,10
Nikhef	2,05
ECN	1,96
KNMI	1,95
NKI	1,87

Figuur 9

Citatie-impact 2005-2008 van publieke onderzoeksinstituten in Nederland (bron: Wetenschaps- en Technologie-Indicatoren 2010, Ministerie van OC&W; [http://nowt.merit.unu.edu/docs/NOWT-WTI\\_2010.pdf](http://nowt.merit.unu.edu/docs/NOWT-WTI_2010.pdf)).

Sinds 1994 heb ik allerlei initiatieven meegemaakt op dit vlak, niet alleen DPI, en wat mij betreft verdient EZ een compliment voor de wijze waarop het in al die initiatieven mee richting gaf aan het Nederlandse materialenonderzoek, ook met extra geld. Er is ook veel voor te zeggen om inmiddels de vele vormen van stimulering eens tegen het licht te houden. En ook voor stimulering van innovatie tot verder in de keten dan alleen de grote bedrijven; DPI heeft daar in 2007 het gespecialiseerde DPI Value Centre voor opgericht. Maar het huidige Topsectorenbeleid van het ministerie steekt op twee punten toch schril af, zowel tegen dat verleden als tegen het beleid in de ons omringende landen. Allereerst natuurlijk de financiering, waarvoor aan academische kant de helft van het NWO-budget moet worden ingezet. In deze omvang is dit geen premie tot samenwerking maar een gedwongen huwelijk, nog afgezien van de wetenschappen die buiten de Topsectoren vallen. Vrij universitair onderzoek en universitair-industriële

samenwerking voor innovatie blijven verschillende doelen, die beide maatwerk vereisen als je naar de top wilt; maatwerk dat in elk toepassingsgebied weer anders is. Wie dit op één hoop gooit en er maar één keer voor wil betalen ondergraaft beide doelen. Ten tweede wordt de essentiële geldbron voor vrij onderzoek nu geormerkt voor een naar binnen gekeerde Nederlandse agenda, dus Nederlandse huwelijkspartners; zo werkt de wetenschap al honderd jaar niet meer. Ter vergelijking: in het laatste DPI-jaarverslag zag ik een wereldkaart van universitaire en industriële partners, tot in Brazilië en China; dus inmiddels een WPI in plaats van DPI. En vijf van de zeven genoemde wetenschappelijke voorzitters van de technologische programma's blijken nu buitenlanders, actief aan buitenlandse universiteiten, maar iedere keer weer bereid naar Nederland te komen en zich in te zetten voor een in de kern nog steeds Nederlands topinstituut.



# Onderwijs in de theoretische natuurkunde

Nadat DPI eind 2006 de nieuwe subsidieaanvraag op de bus kon doen, wilde ik, na acht jaar, mij nog een tijd volledig richten op datgene waarvoor ik ook gestudeerd had en waarvoor ik als hoogleraar primair verantwoordelijkheid had. Daarmee kwam ook de ruimte om weer deel te nemen aan het kernonderwijs voor ingenieurs. Hierin is recent veel veranderd: de nieuwe bachelor-masterstructuur, met nu ook nog eens de verbrede bachelor, verschillende gespecialiseerde master-tracks en een druk om de gehele studie in vijf jaar af te ronden.

Over al die veranderingen is goed nagedacht en er is, door anderen, heel veel werk voor verzet. Het resultaat moet de studie beter doen aansluiten aan de kwaliteiten en ambities van bachelorstudenten, en aan de technische vaardigheden die wij masterstudenten willen meegeven. Wat hier opvalt is een steeds grotere ruimte voor eigen keuzes, vooral verbredende keuzes, en een aanpassing aan specifieke trends in de veranderende buitenwereld. Een universiteit die zich niet aanpast aan veranderingen in de wereld heeft ook geen toekomst. Wel moet in de gaten worden gehouden in welke mate de eigen identiteit en omvang van de discipline overeind blijft, want zonder gedegen discipline geen gefundeerde interdisciplinaire samenwerking. Het niveau wordt in alle plannen gewaarborgd; maar er is niet slechts de keuze tussen enerzijds diepgravende specialisten en anderzijds 'generalisten die een glanzende maatschappelijke carrière zoeken', zoals dat nu is gaan heten. Juist de voortdurend veranderende mogelijkheden tot samenwerking met andere vakgebieden vragen ook om *wetenschappelijke* generalisten. Ingenieurs die zich de gedegen basis goed hebben eigen gemaakt en van daar uit over grenzen heen kijken. Die met een wetenschappelijk helikoptervermogen kunnen afdalen naar details van uiteenlopende en moeilijk toegankelijke probleemgebieden, maar steeds terugkeren naar het meer abstracte niveau waarop de natuurkundige samenhang tussen gebieden duidelijk is. Er zijn altijd weer studenten die juist hierdoor worden uitgedaagd. Hier ligt dan ook een belangrijke taak voor de theoretische natuurkunde, die zich immers bedient van grondbeginselen en generieke formalismen.

Onlangs las ik over de universitaire wetenschap de volgende bezorgde woorden: *steeds verder doorgevoerde specialisatie, toegenomen publicatiedrift, daarmee gepaard gaande gejaagdheid, een toenemend instrumentalistische houding ten opzichte van natuurkundige theorieën ten koste van inzicht, informatie in steeds grotere hoeveelheden, scoringsdrift, fragmentatie, groeiende nadruk op techniek ten koste van inzicht*. Wellicht heel herkenbaar voor de collega's onder u. Maar deze woorden gaan wel over bijna een eeuw geleden. Ze zijn te vinden in de biografie van de Leidse theoretisch fysicus Paul Ehrenfest (figuur 10) waarop Marijn Hollestelle in 2011 in Leiden promoveerde<sup>15</sup> en waar ik graag wat aan ontleen. Hollestelle beschrijft hoe volgens Ehrenfest zuivere wetenschap altijd als basis moest dienen voor toegepast onderzoek, hoe hij contacten had met industrieën en zelf colloquia organiseerde binnen het Philips NatLab. Ehrenfest was persoonlijk zeer betrokken bij zijn leerlingen en trachtte ze voor te bereiden op industriële onderzoekscarrières. Hij was ook diep betrokken bij de maatschappelijke problemen van zijn tijd, in het bijzonder de tijd van de Grote Depressie. In de opleiding van theoretici was hij echter compromisloos en veeleisend. Met een focus op intuïtie voor en het diep doorgronden van de essentiële problemen van de moderne fysica, meer dan op wiskunde, en met een enthousiasme om studenten zo vroeg mogelijk hierin te betrekken.



Figuur 10

Paul Ehrenfest (1880-1933) (bron: Noord-Hollands Archief, archief T.P. van Aardenne en archief P. Ehrenfest jr.).

De stijl van Ehrenfest heeft via zijn leerlingen veel vruchten afgeworpen, er zijn weinig of geen betere voorbeelden van school maken. Zijn sporen zijn daardoor wereldwijd terug te vinden binnen de theoretische fysica, maar in het bijzonder ook daarbuiten. Het belang van Hendrik Casimir voor industrieel onderzoek hoeft hier in Eindhoven geen betoog. Jan Burgers legde de basis voor de Delftse school van stromingsleer. Jan Tinbergen kreeg de eerste Nobelprijs Economie voor zijn modellering van dát vakgebied. En Tjalling Koopmans kreeg dezelfde prijs als grondlegger van de operations research. Roelf Krans richtte zich op het middelbaar onderwijs, en schreef een leerboek algemene natuurkunde dat door vele generaties leerlingen is gebruikt. Dit alles is uiteraard een voorbeeld en geen bewijs. Maar wel een inspirerend voorbeeld om na te denken over hoe wij geïnteresseerde studenten een zodanige generieke basis en zoveel wetenschappelijk helikoptervermogen kunnen blijven meegeven dat zij vooral zelf de mogelijkheden buiten het eigen vak weten te herkennen en verzilveren; het liefst mogelijkheden die wij als docenten helemaal niet voorzien. Ik ben iedere keer weer verbaasd van het talent dat zich binnen elke generatie aandient; recent hebben wij zulke studenten mét hun bachelordiploma nog wel eens naar Utrecht zien vertrekken.

Theoretische Natuurkunde was wel mijn leeropdracht, maar is geen speciale opleiding in ons technisch-natuurkundig curriculum. Toch hebben we in de gehele faculteit het aantal theoretische stafleden sterk zien toenemen. De snel groeiende mogelijkheden van experimenteren op de computer hebben hier zeker mee te maken. We hebben daarom inderdaad nagedacht over zo een gedegen theoretische basis voor daartoe gemotiveerde studenten. Voorop stond dat wij niet wilden concurreren met de eigen mastertracks of met de theoretische opleiding bij de algemene universiteiten, maar meerwaarde wilden creëren binnen de bestaande masteropleiding. Dit heeft geleid tot een samenhangend theoretisch gekleurd keuzeprogramma waarin we ook een menu van kleine Capita Selecta Theoretische Fysica hebben ontwikkeld, op disciplinaire onderwerpen die onderbouwend zijn voor de technische vakken. Bovendien proberen we binnen een informeel maar verplicht studentenseminarium aan theoretische ‘community building’ te doen, met actuele onderwerpen die de studenten aan elkaar moeten uitleggen. Met dit keuzeprogramma krijgen de studenten op hun masterdiploma de aantekening Theoretical Physics for Technology. Het heeft nu een jaar gedraaid en uit de reacties blijkt enthousiasme. Tien masterstudenten hebben met de eerste onderdelen meegedaan en binnen het eerste caputcollege kwam al de vraag of het vak niet twee uur per week kon worden gegeven in plaats van één uur. Op de wedervraag

of het tempo dan wellicht te hoog lag, kwam het antwoord: “nee, maar het is zo interessant, je leert hier echt nieuwe concepten.” Ik denk dat de faculteit met dit initiatief ook een zijinstroom van elders in de masteropleiding kan genereren.

Ook in de bacheloropleiding, en misschien wel juist daar, is het belangrijk studenten een helikopterblik over de natuurkunde te blijven bieden, want onvoorbereid krijgen zij het geheel van de natuurkunde in drie jaar opgediend als een verzameling aparte vakken. Ik had het geluk na terugkeer van DPI het verplichte vak Geschiedenis van de Natuurkunde te mogen gaan geven. Traditioneel niet een vak waar docenten voor in de rij stonden, maar mijn voorganger als docent, Herman Beijerinck, had er een mooie nieuwe werkvorm voor ontwikkeld. Ik heb getracht die vorm verder uit te werken als college waarin de studenten aan het eind van hun bachelorstudie zichzelf en elkaar een terugblik op dat hele curriculum verschaffen. Met aandacht voor de historische en maatschappelijke context waarin de kennis van al die vakken schoksgewijs en met veel toeval ontwikkeld werd. En aandacht voor de onderlinge verwevenheid en grote lijnen die deze geschiedenis weer tot één logisch geheel maken. Het was in mijn carrière het vak dat ik met het grootste plezier gegeven heb. Het maakte ook, gezien mijn oorspronkelijke interesses, de cirkel mooi rond.

# Dankwoord

Dames en heren, veel mensen wil ik bij dit slot bedanken, ik kan ze niet allemaal noemen. Toen ik hier veertien jaar geleden kwam, was ik vooral bezig met onderzoek. Studenten en promovendi hebben mij het plezier doen ervaren van het uitdragen en overdragen van kennis; veel dank dus allereerst aan hen - zij horen in een universiteit altijd voorop te staan.

Dank ook aan al mijn collega's van de faculteit Technische Natuurkunde, de Eindhoven Polymer Laboratories en DPI. Mijn staf binnen de groep TPS heb ik al mogen noemen. Beste Peter, Alexey, Paul en Kees: in een beperkt aantal jaren hebben wij samen een zeer zichtbare en succesvolle theoretische activiteit weten op te bouwen, waarin jullie steeds meer gezichtsbepalend werden, in de richting en in dat succes. Het symposium dat jullie achter mijn rug hebben georganiseerd heeft mij oprecht geraakt. Veel dank ook aan alle sprekers van vandaag en aan DPI voor de genereuze sponsoring.

Binnen de universitair-industriële samenwerking wil ik Jacques Joosten noemen. Beste Jacques, al vanaf 1993 kwamen wij elkaar steeds weer tegen in of rond commissies die iets wilden doen aan die samenwerking. Wij zaten veel op één lijn en waren daarbij toch heel complementair. Ik was dan ook erg opgelucht toen jij in 2005, op een cruciaal moment, bereid was aan te treden als Managing Director van DPI. En nadat het nieuwe meerjarenplan voor EZ gereed was, kon jij er onmiddellijk begrip voor hebben dat ik zelf na acht jaar DPI wilde verlaten.

De groep en DPI waren af en toe twee banen en onmisbaar was daarbij Helmi van Lieshout. Helmi, jij zei het zelf ooit als grapje, maar jij bent inderdaad professor in de positieve energie. Heel veel dank voor je geweldige inzet en ondersteuning. En natuurlijk voor jouw grote bijdrage aan het symposium, dat jij meer dan een half jaar voor mij verborgen hebt weten te houden. Ook Clazien Saris is mij jaren tot steun geweest en wil ik nadrukkelijk in dit dankwoord betrekken. Samen hebben jullie een secretariaat neergezet waar ik altijd heel trots op ben.

Ten slotte lieve Anneke en Daan. Aan jullie heb ik, in mijn werk en daarbuiten, het meest te danken. Dat werk moest ik soms veel aandacht geven, maar ik heb er altijd van mogen genieten. Beide had ik niet zo gekund zonder jullie nabijheid. Anneke, jij hebt ook altijd mijn keuzes mogelijk gemaakt en die keuzes gesteund. Waarbij jij mij hielp de menselijke maat te blijven zien. Natuurkunde is inderdaad niet alles, en ook niet het belangrijkste. Dat heb ik niet uit een boekje, maar ervaar ik vooral door jou. Ik zie uit naar de vrijheid die wij nu samen voor ons hebben.

Ik heb gezegd.

# Literatuur

1. F.W. Saris, *Alles is natuurkunde, maar natuurkunde is niet alles*, FOM Instituut voor Atoom- en Molecuulfysica, 1993, ISBN 9080170410.
2. A. Uhlherr en D.N. Theodorou, *Hierarchical simulation approach to structure and dynamics of polymers*, *Current Opinion in Solid State & Materials Science* 3 (1998) 544-551.
3. P.J. Lemstra, *Polymeren van....uit Nederland*, Afscheidscollege TU Eindhoven 30 september 2011, ISBN 9789038628202; <http://alexandria.tue.nl/extra2/rees/Lemstra2011.pdf>.
4. W.F. Pasveer, J. Cottaar, C. Tanase, R. Coehoorn, P.A. Bobbert, P.W.M. Blom, D.M. de Leeuw en M.A.J. Michels, *Unified description of charge-carrier mobilities in disordered semiconducting polymers*, *Physical Review Letters* 94 (2005) 206601.
5. European Patent EP2036941 (2009).
6. K. Chang, *The nature of glass remains anything but clear*, *The New York Times*, 29 juli 2008.
7. [http://gold.cchem.berkeley.edu/The\\_Chandler\\_Group/Glassformers.html](http://gold.cchem.berkeley.edu/The_Chandler_Group/Glassformers.html).
8. P. Bak, *How nature works: the science of self-organised criticality*, Copernicus Press, New York, 1996, ISBN 0387947914.
9. P.C.F. Møller, A. Fall en D. Bonn, *Origin of apparent viscosity in yield stress fluids below yielding*, *EPL* 87 (2009) 38004.
10. J.W. Dudley, M.T. Myers, R.D. Shew en M.M. Aresteh, *Measuring compaction and compressibilities in unconsolidated reservoir materials by time-scaling creep*, *SPE Reservoir Evaluation & Engineering* 1 (1998) 430-437.
11. Zie voor al deze voorbeelden het Web of Science, met de zoekopdracht 'Andrade power law creep'.
12. A. Saichev en D. Sornette, *Andrade, Omori, and time-to-failure laws from thermal noise in material rupture*, *Physical Review E* 71 (2005) 016608.
13. M. Gell-Mann, *Particles and principles*, *Physics Today* 17 (November 1964) 11.
14. [www.polymers.nl](http://www.polymers.nl).
15. M. Hollestelle, *Paul Ehrenfest. Worstelingen met de moderne wetenschap, 1912-1933*, Leiden University Press, 2011, ISBN 9789087281229.





# Curriculum Vitae

**Prof.dr. Thijs Michels was sinds 1 februari 1990 deeltijdhoogleraar en sinds 1 oktober 1998 voltijdhoogleraar Theoretische Natuurkunde aan de faculteit Technische Natuurkunde van de Technische Universiteit Eindhoven (TU/e). Op 15 augustus 2012 ging hij met emeritaat.**

Thijs Michels (1947) studeerde Theoretische Natuurkunde aan de Universiteit van Amsterdam en promoveerde daar in 1976 cum laude bij prof.dr. S.R. de Groot. Tot 1998 werkte hij bij Shell Research in Amsterdam, uiteindelijk als Principal Research Physicist. Van 1990 tot 1998 was hij tevens deeltijdhoogleraar Theoretische Natuurkunde in Relatie tot de Industrie aan de TU/e. Op 1 oktober 1998 aanvaardde hij een voltijdbenoeming aan deze universiteit, met de leeropdracht Theoretische Natuurkunde, in het bijzonder de Polymeerfysica. Tegelijkertijd werd hij programmamanager binnen het net opgerichte Technologisch Top Instituut Polymeren: het Dutch Polymer Institute (DPI). Van april 2004 tot september 2006 was hij wetenschappelijk directeur van het DPI.

Het leidende thema binnen zijn onderzoeksgroep Theory of Polymers and Soft Matter (TPS) is de driehoeksrelatie tussen microstructuur, dynamica en eigenschappen van complexe materialen zoals synthetische en biologische polymeren, en de consequentie daarvan voor toepassingen – in het bijzonder binnen de nanotechnologie en biofysica. Zijn eigen interesses liggen hier vooral bij generieke patronen en unificerende concepten in ogenschijnlijke wanorde, bijvoorbeeld in relatie tot ladingstransport, zelfassemblage, fractale groei, glasachtige dynamica en dynamische kritieke verschijnselen.

Thijs Michels was zeer actief in programmacommissies en besturen op het gebied van materialen, met name binnen toepassingsgerelateerde stimuleringsprogramma's van NWO, FOM, SON/Chemische Wetenschappen en EU-COST en binnen de Onderzoekschool Polymeren.

**Colofon****Productie**

Communicatie Expertise  
Centrum TU/e

**Fotografie cover**

Rob Stork, Eindhoven

**Ontwerp**

Grefo Prepress,  
Sint-Oedenrode

**Druk**

Drukkerij Snep, Eindhoven

**ISBN 978-90-386-3229-2**  
**NUR 925**

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

**Bezoekadres**

Den Dolech 2  
5612 AZ Eindhoven

**Postadres**

Postbus 513  
5600 MB Eindhoven

Tel. (040) 247 91 11  
[www.tue.nl](http://www.tue.nl)