

# Groepsgedrag op de nanoschaal

Prof. dr. ir. Jasper van der Gucht

Inaugurele rede bij de aanvaarding van het ambt van  
hoogleraar in de Fysische Chemie en Kolloïdkunde  
aan Wageningen University op 10 april 2014



WAGENINGEN UNIVERSITY  
WAGENINGEN UR



# Groepsgedrag op de nanoschaal

Prof. dr. ir. Jasper van der Gucht

Inaugurele rede bij de aanvaarding van het ambt van hoogleraar in de Fysische Chemie en Kolloïdkunde aan Wageningen University op 10 april 2014



WAGENINGEN UNIVERSITY  
WAGENINGEN **UR**

ISBN 978-94-6173-971-1

# Groepsgedrag op de nanoschaal

*Mijnheer de rector, collega's, familie en vrienden, dames en heren,*

Het gebeurt niet zo vaak dat wetenschappelijk nieuws het journaal haalt. Ja, als een vooraanstaand wetenschapper sjoemelt met data, of zichzelf of iemand anders plagieert dan willen we daar graag alles over horen. Maar twee jaar geleden openden de journaals met echt wetenschappelijk nieuws. U weet het vast nog wel: het CERN, het Europese instituut voor kernonderzoek in Genève, maakte, met het nodige voorbehoud dat de natuurwetenschap past, bekend dat ze het Higgs boson dachten te hebben gevonden. In het grootste - en duurste - wetenschappelijke experiment dat ooit heeft plaatsgevonden werd een nieuw elementair deeltje gevonden, dat precies de eigenschappen had van het door Peter Higgs voorspelde deeltje. Maar waarom was juist deze ontdekking ook al weer wereldnieuws? Waarom stonden natuurkundigen massaal te juichen? Welnu, het Higgs deeltje was de ontbrekende schakel in het "Standaardmodel" van de fysica, of anders gezegd, door de ontdekking van het Higgs deeltje zijn we een stap dichterbij de ultieme natuurwet, de Theorie van Alles. Nu denkt u misschien dat met zo'n Theorie van Alles de natuurwetenschap wel zo'n beetje af zal zijn. Dat de belangrijkste zaken daarmee bekend zijn en dat de rest slechts een invuloefening wordt. In een interview met NRC Handelsblad van twee weken geleden, vroeg zelfs Nobelprijswinnaar Gerard 't Hooft zich af of de natuurkunde nog wel toekomst heeft [1]. Toch denk ik niet dat mijn collega's en ik bang hoeven te zijn dat we zonder werk komen te zitten. Want ook al kennen we het fundamentele gedrag van één enkel deeltje tot in het allergrootste detail, wanneer meerdere van die deeltjes bij elkaar komen ontstaat al snel geheel nieuw en onvoorspelbaar gedrag.

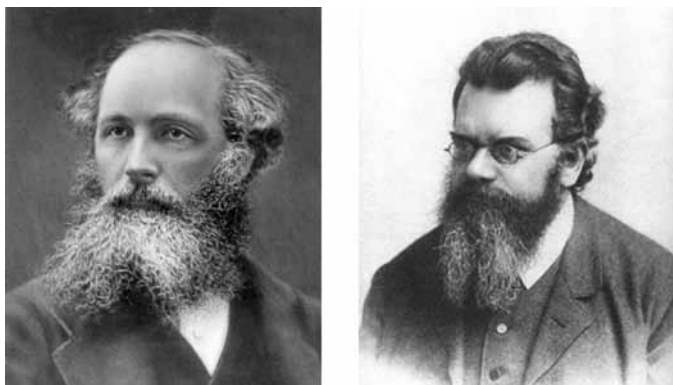
De biljarters onder u weten dat als geen ander. Voor een enkele biljartbal die over een pooltafel rolt kunnen we zonder problemen voorspellen welke baan deze zal afleggen. Daar is geen Theorie van Alles voor nodig. Voor twee biljartballen lukt dat ook nog wel. Met behulp van de bewegingswetten van Newton, die u allen op de middelbare school heeft geleerd, kunnen we exact uitrekenen hoe we de gekleurde bal moeten raken om hem precies in de pocket te laten verdwijnen. Met twee ballen

zou biljarten dus een saai en voorspelbaar spelletje zijn. Maar op een biljarttafel met meerdere ballen is het een ander verhaal: als meerdere ballen met elkaar botsen, wordt het erg lastig om te voorspellen welke bal waar terecht gaat komen. En dat komt niet doordat Newton's wetten niet goed genoeg zijn voor het beschrijven van een bewegende biljartbal. Nee, dat komt doordat de uitkomst heel erg sterk afhangt van de precieze beginposities en snelheden van de ballen. Een miniem verschil in beginsnelheid of richting kan tot een volledig ander bewegingspatroon leiden. De briljante Franse wiskundige Henri Poincaré heeft al meer dan 100 jaar geleden laten zien dat zelfs voor drie ballen de bewegingspatronen al zo complex en chaotisch kunnen zijn dat de uitkomst eigenlijk niet meer te voorspellen is. U begrijpt het al: een Theorie van Alles zal de biljartsport weinig verder helpen, of, anders gezegd, zelfs voor het beschrijven van vrij eenvoudige systemen is de theorie van alles eigenlijk een Theorie van Niets!

Dit brengt mij bij de uitdaging waar fysisch chemici, zoals ikzelf, voor staan. De zaken waar wij ons mee bezighouden, zoals vloeistoffen, materialen, voedingsproducten, of levende cellen, bestaan niet uit een paar, maar uit triljarden deeltjes. En elk van die deeltjes is ook nog eens veel ingewikkelder dan een biljartbal. Het lijkt dus een hopeloze missie om het gedrag van dit soort systemen te voorspellen of te verklaren. Als drie deeltjes al zulk chaotisch, onvoorspelbaar gedrag vertonen, hoe kunnen we dan ooit iets zinnigs zeggen over systemen met honderden deeltjes, laat staan een triljard? Maar gelukkig hoeven we ons meestal niet om alle details te bekommeren. Net zoals de ANWB niet hoeft te weten dat Jantje elke werkdag met zijn BMW bij Renkum de snelweg opgaat en er bij Eindhoven weer afgaat, om te kunnen constateren dat er 's ochtends op de A50 vaak file is, zo hoeven wij fysisch chemici ook niet de grillige bewegingen van ieder afzonderlijk deeltje te kennen om toch wetmatigheden te ontdekken.

Laat ik dit illustreren aan de hand van een eenvoudig chemisch voorbeeld: een gas, zoals bijvoorbeeld de lucht hier om ons heen. Zoals u weet bestaat een gas uit een heleboel rondbewegende en met elkaar botsende moleculen. Een soort biljartballen, maar dan honderdmiljoen keer kleiner en vele malen sneller. Met zo'n duizend kilometer per uur botsen die moleculen tegen elkaar aan, en daarbij veranderen ze miljarden keren per seconde van richting. Het is dus een wilde bedoening in de lucht om ons heen. Toch merken wij weinig van al die moleculaire onrust. Op de macroscopische schaal heerst kalmte. Een gas heeft een temperatuur, een volume, en een druk die we kunnen meten en die bovendien met elkaar samenhangen volgens de gaswetten van Boyle, Charles en Gay-Lussac. Wanneer we het volume van een gas met een factor twee verkleinen, dan neemt de druk met een factor twee toe. Elke keer weer, ook al doen de individuele moleculen steeds iets anders. Twee van de meest

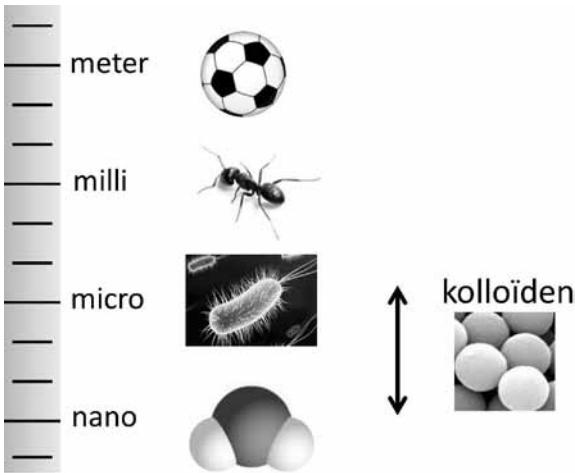
briljante natuurkundigen allertijden, de Schot James Clerk Maxwell en de Oostenrijker Ludwig Boltzmann (figuur 1), hebben aan het einde van de 19<sup>e</sup> eeuw een verklaring voor deze regelmaat gegeven. Het zit hem in de *statistiek*. Maxwell en Boltzmann waren niet geïnteresseerd in de lotgevallen van individuele moleculen; ze wilden enkel het *gemiddelde* gedrag weten. Door de botsingen tussen moleculen te beschouwen als kansprocessen konden zij een moleculaire, statistische verklaring geven voor de, tot dan toe puur empirische, gaswetten. Bovendien konden zij op deze manier een mechanische betekenis geven aan het begrip temperatuur, namelijk als een maat voor de gemiddelde bewegingsenergie van een molecuul: bij hogere temperatuur bewegen de moleculen sneller. En dit deden zij allemaal in een tijd dat het bestaan van moleculen nog verre van geaccepteerd was.



Figuur 1. James Clerk Maxwell (links) en Ludwig Boltzmann (rechts).

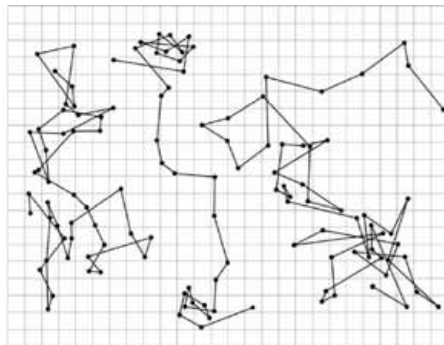
De gaswetten zijn dus niet zomaar een eigenschap van de afzonderlijke moleculen. Zij ontstaan door het *collectieve* gedrag van grote aantallen moleculen. Het is dit moleculaire groepsgegedrag waar het om draait in ons vakgebied. Hoe kunnen we verschijnselen op de macroscopische schaal verklaren uit de gebeurtenissen op de moleculaire schaal?

Ik heb u tot nu toe verteld over Higgs bosonen, biljartballen en gasmoleculen. Het wordt tijd dat ik het over *kolloïden* ga hebben. Wat zijn kolloïden? En waar komen we ze tegen? Kortgezegd zijn kolloïden deeltjes met een grootte ergens tussen die van een eenvoudig molecuul en die van een bacterie (zie figuur 2). Dat wil zeggen, ergens tussen de één en duizend nanometer, ofwel tussen de eenmiljoenste en eenduizendste millimeter. We kijken dus naar verschijnselen op de *nanoschaal*. Kolloïden zijn te klein om met het blote oog te zien, maar met een goede microscoop kunnen we ze wel zien. Ze zijn veel groter dan watermoleculen, maar in tegenstelling tot bijvoorbeeld biljartballen zijn ze nog wel klein genoeg om iets te merken van de



Figuur 2. Kolloïden zijn deeltjes met een grootte ergens tussen een nanometer en een micrometer.

chaotische bewegingen op de moleculaire schaal. Ze worden voortdurend rondgeschud door de vele botsingen met kleine moleculen en maken daardoor een grillige beweging, die we aanduiden als Brownse beweging, naar de Schotse botanicus Robert Brown die dit verschijnsel in de 19<sup>e</sup> eeuw voor het eerst waarnam (zie figuur 3). Op de kolloïdale schaal is er dus nooit rust; alles is voortdurend in beweging. Overigens begreep Brown zelf helemaal niet waar de naar hem genoemde beweging vandaan kwam. Er was een genie als Albert Einstein voor nodig om het fenomeen te verklaren. In zijn proefschrift liet Einstein namelijk zien hoe die Brownse beweging kon worden verklaard uit de voortdurende botsingen met de moleculen in het medium. Hij leverde daarmee ook voor eens en voor altijd het bewijs dat moleculen echt bestaan.



Figuur 3. Links: Robert Brown. Rechts: trajecten van drie kolloïdale deeltjes zoals waargenomen onder een microscoop. Posities zijn elke 30 seconden gemeten en verbonden door rechte lijnen (uit 'Les Atomes', Jean Baptiste Perrin, 1914).

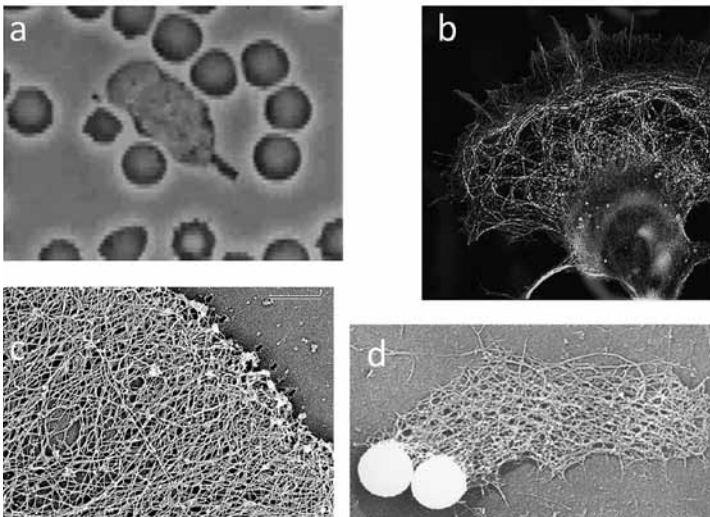


Waar komen we kolloïden tegen? Kolloïden ontstaan bijvoorbeeld door het samenklonteren van kleine moleculen tot korreltjes of druppeltjes. U kunt bijvoorbeeld denken aan pigmentdeeltjes in verf, aan kleine kiezeldeeltjes in tandpasta, of aan vetdruppeltjes in melk, mayonaise, of handcrème. Ook polymeren, de lange sliertvormige moleculen die voorkomen in bijvoorbeeld haargel, in plastics of in rubbers, rekenen we tot de kolloïden. En ook de bouwstenen van onze cellen – vetzuren, eiwitten en DNA – zijn kolloïdaal. Wat deze voorbeelden laten zien is dat kolloïdale materialen geen gewone vloeistoffen zijn, zoals water of benzine, maar ook geen vaste stoffen zoals ijzer of glas. Kolloïdale materialen zijn complexer. De ene keer gedragen ze zich als vloeistof, de andere keer als vaste stof. Tandpasta stroomt als vloeistof de tube uit wanneer we in de tube knijpen, maar het blijft vervolgens op je tandenbortsel liggen als een vaste stof. Een klodder mayonaise vloeit niet vanzelf uit tot een plasje, maar met een klein beetje kracht kunnen we het uitsmeren als een vloeistof. Kolloïdale materialen zijn makkelijk vervormbaar; ze zijn zacht en puddingachtig. Om deze reden wordt de kolloïdkunde tegenwoordig meestal aangeduid als de wetenschap van de zachte materie. Of in het Engels: *soft matter*. Het onderzoek in onze leerstoelgroep richt zich op het begrijpen van deze zachte materie. De centrale vraag is hoe we de eigenschappen van zachte materialen kunnen verklaren uit het samenspel van de kolloïdale bouwstenen. Om deze vraag te kunnen beantwoorden moeten we kijken naar interacties tussen grote aantallen kolloïden. We kijken dus naar collectieve processen in kolloïdale systemen, of anders gezegd naar *groepsgedrag op de nanoschaal*.

Ik geef u graag een voorbeeld uit mijn eigen onderzoek van een aantal jaren geleden. Na mijn promotie in 2004 vertrok ik voor een postdoctoraal onderzoek naar Parijs. Ik ging werken in het Instituut Curie, op de plaats waar Marie Curie een eeuw geleden haar onderzoek deed naar radioactiviteit, en waar sommige van de muren nog steeds een beetje radioactief zijn. Het Instituut Curie is een medisch centrum dat zich richt op het behandelen en onderzoeken van kanker. Interdisciplinair onderzoek is er de norm: biologen en *soft matter* fysici werken er samen aan de fundamentele vragen over het ontstaan van kanker. Zo was een van de wetenschappers die daar toen werkte professor Pierre-Gilles de Gennes, degene die de term *soft matter* heeft geïntroduceerd en die het gebied zodanig op de kaart heeft gezet dat hij er in 1992 de Nobelprijs voor de Natuurkunde voor kreeg [2].

Ik ging op die inspirerende plek werken aan het voortbewegen van cellen. Celbeweging is soms slecht nieuws, bijvoorbeeld als tumorcellen zich gaan verspreiden over het lichaam en zo uitzaaiingen veroorzaken. Maar in andere gevallen is het juist essentieel dat cellen kunnen bewegen. Bijvoorbeeld voor witte bloedcellen, de veiligheidsagenten van ons lichaam, wiens taak het is om indringers te vangen en

onschadelijk te maken. De vraag die ons interesseerde is *hoe* zo'n cel zich precies voortbeweegt. Wat is het moleculaire mechanisme dat de cel vooruitduwt? Nu zijn er verschillende manieren om dit te onderzoeken. De moleculair bioloog, bijvoorbeeld, maakt gebruik van genetische technieken om ervoor te zorgen dat een bepaald eiwitmolecuul niet meer actief is in de cel. Als de cel daarna niet meer kan bewegen, dan was dat eiwit kennelijk nodig voor die beweging. Of er wordt een lichtgevend labeltje aan een bepaald eiwit gehangen, zodat onder de microscoop te zien is waar dat eiwit zich ophoopt. Dankzij deze ingenieuze experimenten weten we welke eiwitmoleculen bij het bewegingsproces betrokken zijn en waar in de cel ze zich bevinden. Bovendien weten we dankzij gevoelige elektronenmicroscopie-opnames dat die eiwitten, die slechts een paar nanometer groot zijn, zich organiseren op veel grotere lengteschalen, in grote netwerkachtige structuren. Maar betekent dit ook dat we *begrijpen* hoe die eiwitstructuren een cel vooruit bewegen? Nee, natuurlijk niet. Weten welke onderdelen er nodig zijn, en hoe ze eruitzien, is nog iets anders dan begrijpen hoe het werkt. Om het te begrijpen moeten we het *collectief* gedrag van de eiwitten bestuderen. Een typisch *soft matter* probleem dus.



Figuur 4. (a) Een witte bloedcel die een bacterie achterna zit (David Rogers, Vanderbilt University, 1953). (b,c) Het netwerk van actinefilamenten dat de cel vooruit duwt. (d) Plastic deeltjes voortgestuwd door een netwerk van groeiende actinefilamenten.

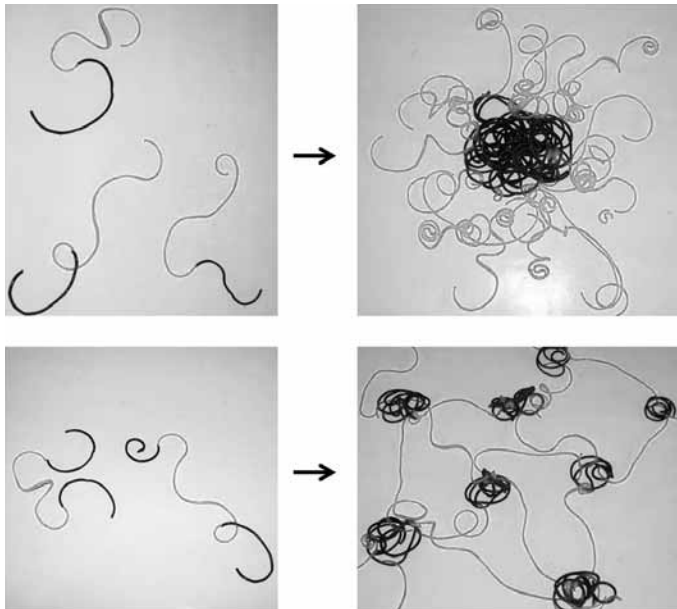
Nu is een cel een vreselijk ingewikkeld ding met duizenden verschillende eiwitten, en ook nog een heleboel andere soorten moleculen zoals DNA, RNA en vetzuren. Het leek ons daarom verstandig om het probleem te versimpelen. De beroemde Amerikaanse natuurkundige Richard Feynman zei, “What I cannot create, I do not

understand". Als je wilt weten hoe iets werkt kun je het het beste eerst helemaal uit elkaar halen en vervolgens weer in elkaar zetten. Wat overigens niet altijd makkelijk is: mijn ouders herinneren zich waarschijnlijk nog wel dat ik vroeger, in mijn poging om te begrijpen hoe de oude slingerklok die op onze kast stond werkte, slechts de eerste helft van dit proces met succes wist te volbrengen. Toch kozen we deze strategie ook voor de bewegende cellen: kunnen we een cel uit elkaar halen en vervolgens weer iets stap voor stap opbouwen dat ongeveer net zo beweegt als een cel? Om het niet meteen al te ingewikkeld te maken probeerden we, in plaats van een cel, een plastic bolletje vooruit te sturen met behulp van de eiwitten uit de cel. En tot onze verbazing waren er maar een paar verschillende eiwitten nodig om dit voor elkaar te krijgen [3]. In figuur 4 ziet u zulke bolletjes in een oplossing waaraan we twee soorten eiwitten hebben toegevoegd waarvan we weten dat ze een rol spelen bij de celbeweging. Het eerste eiwit heet actine en heeft de neiging om zich spontaan aaneen te rijgen tot lange draden. Het tweede eiwit plakt aan het plastic deeltje en beïnvloedt daar de groei van die actinedraden. Het zorgt ervoor dat alle actinedraden in de buurt van het deeltje dezelfde kant op groeien. Het is dit collectief van groeiende eiwitdraden dat het deeltje vooruit duwt. De beweging komt dus voort uit het groepsgegedrag van de talloze eiwitmoleculen. Ik ben me er natuurlijk van bewust dat een plastic bolletje nog geen cel is; daar wezen mijn collega's uit de biologie me anders wel op. Toch zijn er overtuigende aanwijzingen dat de beweging van cellen wordt gedreven door een vergelijkbaar mechanisme als die van de bolletjes. We hebben de slingerklok misschien nog niet terug in elkaar gezet, maar in elk geval hebben we al iets dat slingert.

Het spontaan ontstaan van zo'n netwerk van groeiende eiwitdraden uit een soep van losse eiwitmoleculen is een voorbeeld van *zelf-organisatie*. Zonder dat er een bouwplan is, of een opzichter die vertelt welk eiwitmolecuul waar moet komen, weten de moleculen elkaar uit zichzelf te vinden. Voortgestuwd door de voortdurende botsingen met watermoleculen dansen de eiwitmoleculen op een willekeurige manier in het rond tot ze tegen elkaar aan botsen. Vervolgens zorgt een heel fijne balans tussen aantrekkende en afstotende krachten ervoor dat de moleculen precies in de juiste oriëntatie aan elkaar blijven plakken. Zo ontstaan spontaan allerlei complexe structuren. De natuur is een meester in dit collectieve spel van aantrekking en afstoting. Allerlei multi-moleculaire structuren in de cel ontstaan door zelf-organisatie: chromosomen, de membranen die de cel omgeven en in compartimenten verdelen, het eiwitskelet dat voor stevigheid zorgt, en de machinerie die ervoor zorgt dat de cel zich kan delen. Op wonderbaarlijke wijze vormen deze structuren zich steeds weer, met ongekende precisie – en met een grote mate van flexibiliteit. Een witte bloedcel kan zijn hele interieur razendsnel aanpassen wanneer er een bacterie langskomt. En als er onverhoopt een scheurtje in het celmembraan ontstaat, dan herstelt dit zich vanzelf.

Het zal u niet verbazen dat chemici en materiaalkundigen met enige jaloezie kijken naar de dynamische, zelf-herstellende structuren van de natuur. Maar inmiddels kunnen we meer dan alleen maar toekijken en bewonderen. We beginnen de principes van zelf-organisatie steeds beter te begrijpen. En met die kennis zijn we steeds beter in staat om de natuur na te doen; om kunstmatige zelf-organiserende materialen te ontwerpen. Het vakgebied ontwikkelt zich enorm snel. Dat komt onder andere door de snelle ontwikkelingen in de chemie. Chemici zijn steeds beter in staat om met grote precisie ingewikkelde moleculen te maken die op een heel specifieke manier met elkaar wisselwerken; moleculen die als legoblokjes op elkaar passen en zo heel specifieke structuren vormen.

In onze leerstoelgroep gebruiken wij vooral polymeren als bouwstenen. Polymeren zijn lange ketenvormige moleculen, die ontstaan door een heleboel kleinere subeenheden aan elkaar te rijgen; als een soort microscopische kralenketting. Ze zijn flexibel en kunnen allerlei verschillende conformaties aannemen, van een compacte kluwen tot een uitgestrekte sliert. De synthesemethoden zijn inmiddels zover ontwikkeld, dat we polymeermoleculen met allerlei samenstellingen en architecturen kunnen maken. Zo kunnen we bijvoorbeeld een polymeer van het ene soort verbinden aan een polymeer van een andere soort, waardoor een polymeerketen met twee verschillende delen ontstaat. Door de subeenheden op de juiste manier te kiezen - dat wil zeggen, door te zorgen voor de juiste balans van aantrekking en afstoting - kunnen we ervoor zorgen dat deze polymeermoleculen zichzelf spontaan organiseren tot allerlei structuren (figuur 5). Tot kleine bolletjes, bijvoorbeeld, maar ook tot staafjes, of mini-zakjes die lijken op het membraan van cellen. Die bolletjes kunnen we bijvoorbeeld gebruiken als mini-containertjes voor medicijnen, om deze op een gecontroleerde manier af te kunnen geven op de juiste plaats in het lichaam van een patiënt. Met ietsje meer moeite kunnen we ook polymeren maken die bestaan uit drie of meer verschillende delen. Zo kunnen we netwerken maken die heel effectief een vloeistof kunnen verdikken tot iets dat aanvoelt als haargel of pudding [4]. Dit soort polymeren wordt bijvoorbeeld toegevoegd aan watergedragen verf, om ervoor te zorgen dat de verf precies dik genoeg is, zodat het makkelijk op te brengen is, maar niet van de muur stroomt. Ook kunnen we de moleculen responsief maken, wat betekent dat de structuren die ontstaan afhangen van bijvoorbeeld de temperatuur, de pH of zuurgraad, de hoeveelheid licht, of van mechanische krachten. Zo hopen we 'slimme' materialen te kunnen ontwerpen, die reageren op hun omgeving. U kunt hierbij denken aan polymeerbolletjes die hun medicinale inhoud loslaten in de buurt van een tumor, waar de pH net iets anders is. Of aan kunstmatige spiervezels, die krimpen onder invloed van een elektrisch veld.

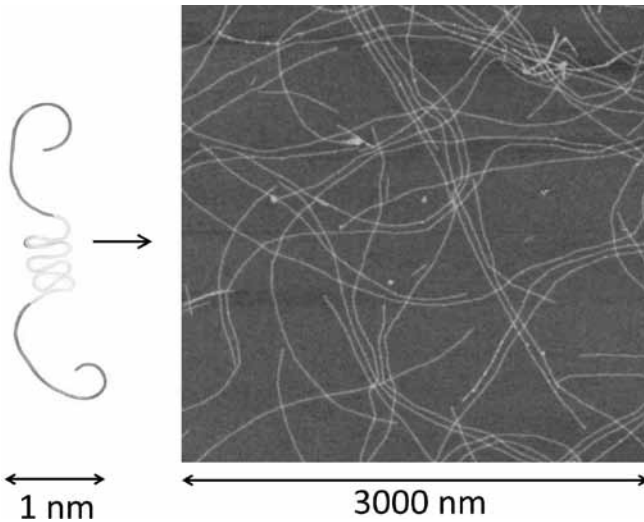


*Figuur 5. Droppeters als zelf-organiserende polymeren. Boven: polymeren met één plakkend uiteinde organiseren zich spontaan tot bolvormige structuren (micellen genaamd). Onder: polymeren met twee plakkende uiteindes vormen netwerken.*

Toch steken de materialen die we tot nu toe op deze manier kunnen ontwerpen maar magertjes af bij de materialen die de natuur produceert. Huid, bijvoorbeeld, is zacht en vervormbaar, maar ook supersterk. En de draden van een spinnenweb zijn zo dun dat we ze nauwelijks met het blote oog kunnen zien, maar ze kunnen wel met gemak een dikke vlieg tegenhouden die er hard tegenaan vliegt. Wat zouden wij graag in staat zijn om ook zulke elastische en supersterke materialen te maken! Maar hoe? Wat voor bouwstenen moeten we daarvoor ontwerpen? De natuur heeft er miljoenen jaren over gedaan om de optimale bouwstenen te ontwikkelen voor het maken van haar materialen. Dus waarom zouden we het wiel opnieuw proberen uit te vinden? Het lijkt verstandiger om leentjebuur te spelen bij de natuur.

De belangrijkste bouwstenen in veel biologische materialen zijn zogenaamde structuureiwitten. Dat zijn eiwitmoleculen die zich spontaan organiseren tot grotere structuren, zoals fibrillen of netwerken. Bijvoorbeeld de eerdergenoemde actinedraden die cellen vooruitduwen. U herinnert zich wellicht nog van uw biologielessen dat eiwitten de polymeren zijn die onze cellen produceren. Daartoe hebben ze een geavanceerde, zeer precieze machinerie, die een stukje DNA code afleest en dat vertaalt in een eiwitmolecuul met precies de juiste volgorde van subeenheden. Sinds

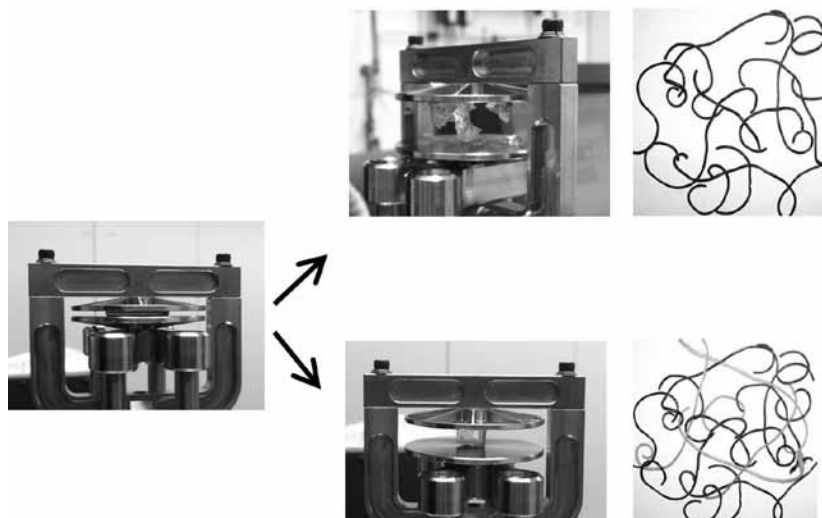
enkele tientallen jaren zijn biotechnologen in staat om de DNA code van cellen te herprogrammeren. Dat betekent dat we de code kunnen wijzigen, zodat er een *kunstmatig* eiwit wordt gemaakt met de samenstelling die wij willen. Zo kunnen we dus cellen, meestal bacteriën of gisten, gebruiken als fabriekjes die met ongekende nauwkeurigheid een door ons gewenst eiwitmolecuul produceren. Mijn voorganger als leerstoelhouder, Martien Cohen Stuart, zag wel wat in deze technologie en zocht daarom samenwerking met een Wageningse biotechnoloog van een van de DLO instituten. Inmiddels is deze samenwerking een behoorlijk grote activiteit geworden binnen onze onderzoeksgroep en er zijn reeds vele verschillende kunstmatige eiwitmoleculen gemaakt voor ons onderzoek.



*Figuur 6. Polymeren met een zijdemotief in het midden organiseren zich spontaan tot lange fibrillen.*

In figuur 6 ziet u een voorbeeld: een eiwit met een samenstelling die enigszins lijkt op die van natuurlijk zijde, het eiwit dat de spin gebruikt om zijn draden te spinnen. Dit eiwit blijkt zich spontaan te organiseren in lange fibrillen, en die fibrillen organiseren zich weer tot een netwerk, dat ervoor zorgt dat de hele vloeistof verandert in een soort gelatinepudding [5]. Een hydrogel noemen we dat, omdat het zoveel water kan vasthouden. Samen met partners in medische faculteiten onderzoeken we of we deze materialen misschien kunnen gebruiken in de geneeskunde, bijvoorbeeld als alternatief voor donororganen of metalen implantaten. Bij een patiënt met gewrichts-slijtage worden dan bijvoorbeeld kraakbeencellen weggehaald, en die cellen worden vervolgens in het hydrogel gebracht, in de hoop dat ze, na implantatie in het versleten gewricht, weer uitgroeien tot nieuw kraakbeenweefsel. U kunt zich waarschijnlijk wel voorstellen dat zo'n medische toepassing nogal wat eisen stelt aan het materiaal.

Het moet in precies de juiste vorm te gieten - of the printen - zijn, het moet tegen een stootje kunnen, cellen moeten zich er fijn in voelen, en het moet na verloop van tijd, als het weefsel voldoende hersteld is, ook weer afgebroken kunnen worden door het lichaam. Ik moet toegeven dat onze eerste generatie materialen nog niet aan al die eisen voldoet. Maar er is nog volop ruimte voor verbetering. Zo werken we op dit moment aan complexere, samengestelde hydrogelen, waarin elementen van verschillende stijfheid worden gecombineerd, zoals dat ook in natuurlijke materialen gebeurt [6]. Onze eerste resultaten zijn veelbelovend: ze laten zien dat zulke samengestelde hydrogelen een stuk sterker zijn dan de eenvoudigere, eerste generatie hydrogelen (figuur 7). Verder kunnen we in het ontwerp van de eiwitten redelijk eenvoudig verschillende functionaliteiten inbouwen, zoals specifieke motieven waar cellen goed aan hechten, of juist motieven die een antibacteriële werking hebben. Ik voorzie daarom een rooskleurige toekomst voor deze door de natuur geïnspireerde materialen.



*Figuur 7. Zwakke en sterke hydrogelen. Een één-component hydrogel breekt na samenpersen (boven), terwijl een samengesteld 'dubbel' netwerk de compressie overleeft (onder).*

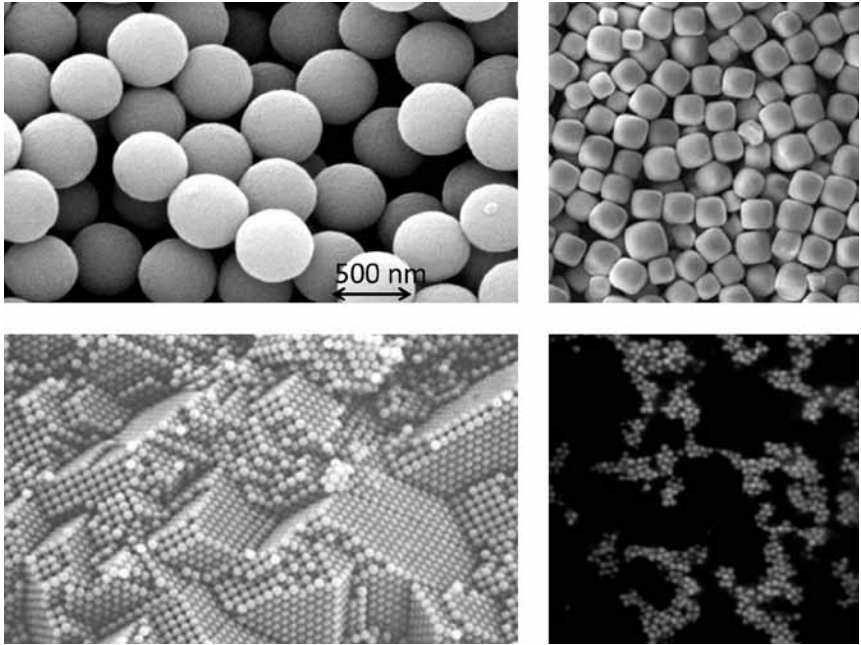
Nu krijgt u misschien de indruk dat ons onderzoek zich voornamelijk richt op de toepassing, zoals het maken van biomedische materialen. Maar dat is niet het geval. Zoals dat tegenwoordig van wetenschappers wordt verwacht, vertel ik u waar ons onderzoek goed voor is, of waar het goed voor zou kunnen zijn. 'Science for impact' heet dat hier in Wageningen. Natuurlijk zou het fantastisch zijn als onze materialen tot nieuwe doorbraken leiden in de kliniek. Of tot betere verf, stabielere voedingsproducten, of een nieuw soort shampoo. Maar eerst en vooral zijn wij geïnteresseerd

in de onderliggende principes. We willen begrijpen hoe moleculen structuren en materialen vormen. En we willen begrijpen waarom ze de eigenschappen hebben die ze hebben. Kortom, we willen inzicht in het collectief gedrag van moleculen, in het groepsgedrag op de nanoschaal.

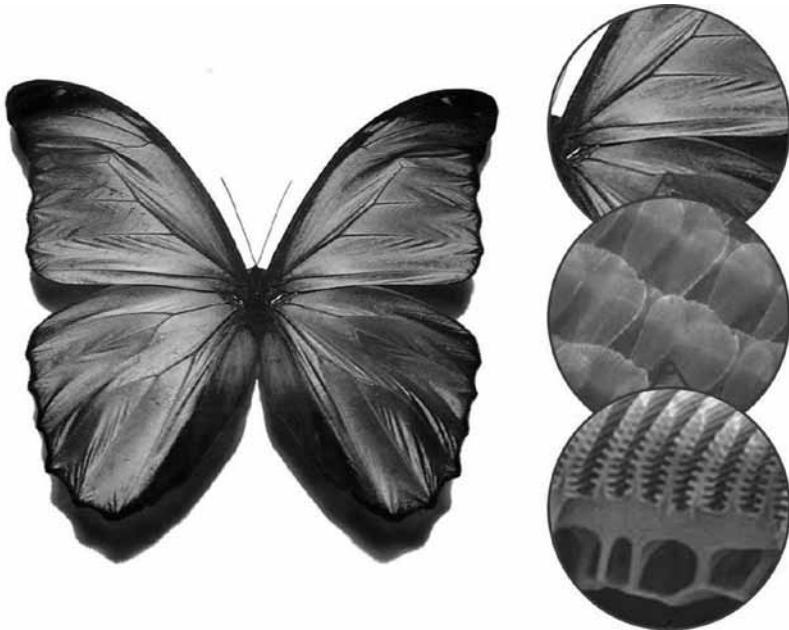
Om dat inzicht te krijgen is het van belang dat we op meerdere lengteschalen in een materiaal kunnen kijken. Zowel naar het grillige gedrag van de afzonderlijke deeltjes, als naar het grotere geheel, waar de statistiek regeert. De meetapparatuur die we tot onze beschikking hebben wordt steeds gevoeliger, zodat we in steeds meer detail structuren kunnen waarnemen, en manipuleren. Zo is het plaatje van de eiwitfibrillen, dat u zojuist zag, gemaakt met een zogenaamde aftastmicroscop. Een superfijne naald tast hierbij een oppervlak af en registreert de minieme hoogteverschillen die optreden als daar bijvoorbeeld een eiwitfibril ligt. Een beetje zoals een ouderwetse platenspeler, alleen kan deze naald hoogteverschillen detecteren van een fractie van een nanometer. Met dezelfde naald kunnen we zelfs enkele moleculen oppakken en van elkaar lostrekken, zodat we de krachten tussen moleculen rechtstreeks kunnen meten. Op iets grotere schaal gebruiken we microscopen, lasers, of krachtige röntgen- en neutronenstraling om de gevormde structuren te zien. En nog verder uitgezoomd meten we de materiaaleigenschappen: hoe ziet het er uit, hoe makkelijk vervormt het, wanneer breekt het? Om al die verschillende lengteschalen aan elkaar te verbinden, gebruiken we computersimulaties of theorie, gebaseerd op de statistische methodes van Maxwell en Boltzmann.

Toch blijven nog veel gebeurtenissen op de nanoschaal voor ons verborgen, simpelweg omdat moleculen zo klein zijn, en zo talrijk, dat we ze met geen mogelijkheid allemaal kunnen zien. Dat betekent dat we vaak aannames moeten maken over hun gedragingen. Maar we kunnen het onszelf ook gemakkelijker maken, door te kiezen voor wat grotere deeltjes, die zich beter laten bestuderen. We kunnen tegenwoordig kolloïdale deeltjes maken van allerlei groottes en met allerlei vormen (figuur 8). Bovendien kunnen we de interacties tussen die deeltjes instellen, door hun oppervlak te bedekken met wat elektrische lading of een laagje polymeer. Het mooie is dat deze deeltjes zich in veel opzichten net zo gedragen als moleculen. Net als moleculen zijn ze voortdurend in beweging, kunnen ze aggregeren tot clusters of netwerken, en vormen ze onder bepaalde omstandigheden spontaan kristalstructuren. Maar, omdat ze een keer of duizend groter zijn, kunnen we ze met een gewone microscoop 'live' in actie zien.





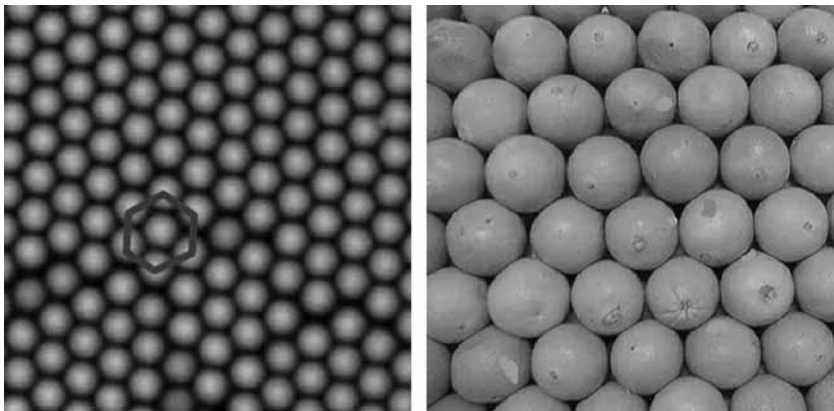
*Figuur 8. Boven: bolvormige en kubische kolloïden. Onder: een kolloïdaal kristal en een kolloïdaal netwerk.*



*Figuur 9. De morpho-vlinder dankt zijn blauwe kleur aan de microstructuur op de vleugels.*

Vooral kolloïdale kristallen trekken de aandacht, vanwege hun bijzondere optische eigenschappen. Voorbeelden hiervan vinden we wederom in de natuur. In figuur 9 ziet u een foto van een tropische vlinder, de zogenaamde morpho-vlinder. In tegenstelling tot wat u misschien zou verwachten, dankt deze vlinder zijn stralend blauwe uiterlijk niet aan pigmenten. De vlinder bevat geen spikkeltje blauwe kleurstof! Het is de *microstructuur* op de vleugels, die zorgt voor de spectaculaire kleureffecten. De interactie tussen lichtgolven en het regelmatige patroon van uitstulpsels zorgt ervoor dat alleen het blauwe licht door de vleugels wordt weerkaatst. We noemen zo'n structuur die het licht manipuleert een *fotonisch kristal*. Ook pauwenveren, sommige kevers, en opaal krijgen hun kleuren door zulke fotonische kristallen.

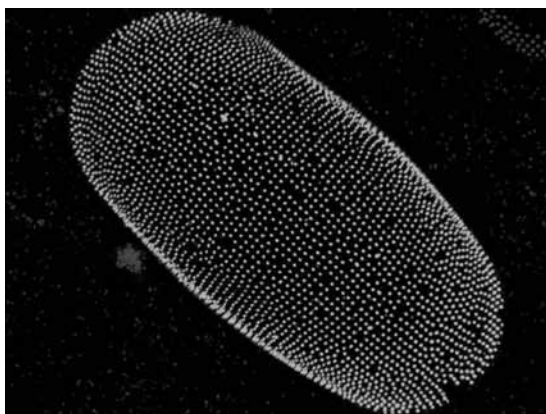
Gestimuleerd door de kleurrijke voorbeelden uit de natuur, is er onder wetenschappers een zoektocht gaande naar manieren om kunstmatige fotonische kristallen te maken, waarmee we licht op allerlei manieren kunnen manipuleren. Zulke kristallen zouden bijvoorbeeld gebruikt kunnen worden in speciale coatings, voor betere zonnecellen, of voor supersnelle optische datacommunicatie. Helaas is het maken van fotonische kristallen nog niet zo eenvoudig. De mechanische gereedschappen die we normaal gebruiken zijn veel te grof om zulke fijne structuren te maken.



*Figuur 10. Kolloïdale deeltjes kunnen zich spontaan ordenen in een kristal (links), met een zeshoekig patroon zoals u dat ook tegenkomt in de fruitwinkel (rechts).*

Kunnen we hier iets bereiken met zelf-organisatie? Zo doet de natuur het immers ook. Sinds een jaar of dertig weten we dat kolloïdale deeltjes zich spontaan kunnen ordenen in een regelmatig kristal. Voor bolvormige deeltjes levert dat altijd een structuur op met lagen waarin de deeltjes een zeshoekig patroon vormen. Iedereen die wel eens sinaasappels stapelt weet dat dat nou eenmaal de meest efficiënte manier is (figuur 10). Om iets anders te krijgen moeten we dus kiezen voor niet-

bolvormige deeltjes. Alleen zijn die een stuk lastiger te maken. Maar een van mijn promovendi vond, geheel per toeval, een manier om *bolvormige* deeltjes in een ander patroon te dwingen. Hij was aan het kijken naar de beweging van deeltjes op het oppervlak van een oliedruppel, toen hij tot zijn verbazing - en die van mij - zag dat die deeltjes zich soms ordenden in een patroon van vierkanten in plaats van zes-hoeken (figuur 11). Na de nodige extra experimenten, analyses, berekeningen, en discussies slaagden we er in om een verklaring te vinden voor deze spontane ordening. De kromming van het olieoppervlak blijkt er voor te zorgen dat de deeltjes zich langs bepaalde voorkeursrichtingen organiseren [7]. Zo kunnen we de kristalstructuur dus sturen door de vorm van de druppel te variëren. In de toekomst hopen we deze nieuwe manier om de zelf-organisatie van deeltjes te sturen, te kunnen gebruiken om functionele optische materialen te maken.

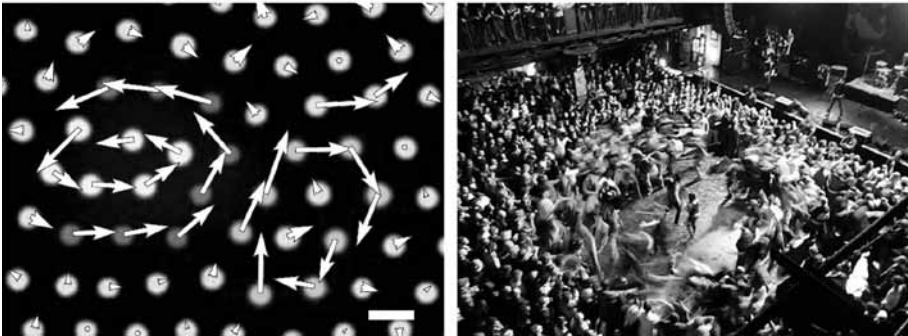


*Figuur 11. Bolvormige deeltjes op een gekromd oppervlak kunnen zich ordenen in een vierkant patroon.*

Maar deze kolloïdale kristallen zijn ook nog om een andere reden interessant. Omdat we namelijk ieder deeltje in het kristal afzonderlijk kunnen volgen, vormen ze een ideaal modelsysteem om fundamentele vragen te bestuderen. Wat gebeurt er bijvoorbeeld met de moleculen in een kristal als dat kristal gaat smelten? Ongeveer weten we dat natuurlijk wel: als het kristal opwarmt gaan de moleculen harder trillen, en als ze genoeg energie hebben om los te komen uit het kristalrooster, dan wordt het kristal instabiel en krijgen we een vloeistof. Maar *hoe* die instabiliteit ontstaat en zich verspreidt over het rooster, dat weten we helemaal niet. Moleculen zijn namelijk zo klein dat we ze niet kunnen zien.

Maar in een kolloïdaal kristal kan dat wel! Een van onze studenten besloot te onderzoeken wat er zou gebeuren als hij het kristal op één plek zou smelten, door een van de deeltjes los te wrikken uit het kristalrooster. Om dat voor elkaar te krijgen moest

er wel eerst een apparaat worden gebouwd, waarmee hij met behulp van een krachtige laserstraal een enkel deeltje kon vastpakken en rondbewegen. De science fiction fans onder u kennen dit misschien als de 'trekstraal' waarmee ruimteschepen allerlei voorwerpen kunnen optillen. Alleen is dit een microscopische versie, en bestaat hij *echt*. Toen hij zo'n deeltje met die laserstraal heen en weer bewoog, bleken er allerlei collectieve bewegingspatronen op te treden in het kristalrooster [8]. In figuur 12 ziet u bijvoorbeeld cirkelvormige patronen, waarbij de deeltjes in een soort stoelendans steeds op zoek gaan naar een vrijgekomen plekje. Ook ontstonden er lange kettingvormige patronen, waarbij de deeltjes in polonaise door het hele kristal bewegen. We vermoeden dat deze collectieve bewegingen belangrijk zijn voor de stabiliteit van het kristal, omdat ze heel effectief interne spanningen en defecten kunnen oplossen. Zo kunnen we met behulp van kolloïdale deeltjes dus nieuwe inzichten krijgen in fundamentele fysische vragen, zoals hoe een kristal instabiel wordt en smelt.



Figuur 12. Collectieve cirkelvormige bewegingspatronen in een kolloïdaal kristal (links) en in een mosh pit (rechts).

Sommigen van u hebben dit soort groepsgedrag misschien ook al op een andere manier meegemaakt. Bij bepaalde concerten, waar snelle en harde muziek wordt gespeeld, ontstaan vaak spontane patronen in het publiek die lijken op de collectieve beweging in onze kolloïdale kristallen. Opgezweept door de snelle beats van de muziek, en in sommige gevallen een stevige alcoholinname, beginnen toeschouwers bij zo'n concert wild en ongecontroleerd in het rond te dansen. Vlak voor het podium, waar de extase het grootst is, ontstaat vaak een collectieve activiteit die de *mosh pit* wordt genoemd, en die te vergelijken is met een lokaal gesmolten zone in een kristal. Hoewel de individuele bewegingen van de deelnemers willekeurig zijn en ongericht, vertoont het collectieve gedrag duidelijke, vaak cirkelvormige patronen [9].

Nou hebben natuurkundigen nogal eens de neiging om de hele wereld te willen verklaren met hun overgesimplificeerde modellen. Mensen worden zonder schroom ontdaan van al hun uiterlijke, psychologische en intellectuele karakteristieken en simpelweg beschreven als levenloze, liefst bolvormige, botsende deeltjes. Op deze naïviteit valt natuurlijk heel wat af te dingen, maar ik denk dat er wel degelijk zinvolle parallellen zijn te trekken. Van de statistische fysica weten we dat het gedrag van complexe systemen, met veel deeltjes, soms niet afhangt van de details. Het collectieve patroon van interacties is dan veel belangrijker dan de eigenschappen van de individuele deeltjes. Voor dat soort collectieve eigenschappen maakt het dus niet uit of het om moleculen, kolloïdale deeltjes, mensen, of vissen gaat. De dynamica van dicht op elkaar gepakte deeltjes kan ons dus best iets leren over collectieve bewegingen in mensenmassa's, files, mierenkolonies, of spreekuuzwermen. Ik zie daarom volop mogelijkheden voor samenwerking met andere disciplines.

Ik heb u zojuist verteld over het zelf-organiserend vermogen van moleculen en deeltjes. En ik hoop dat u het met mij eens bent hoe krachtig die strategie is. Zelf-organiserende systemen zijn robuust en veerkrachtig, en ze passen zich makkelijk aan aan nieuwe omstandigheden. Zonder dat daar een bouwplan of regisseur voor nodig is. Zou zoiets ook werken voor het wetenschappelijk bedrijf? Beleidsmakers lijken daar in elk geval niet zo in te geloven. Er is eerder een wens om juist méér te sturen in de keuze van onderwerpen en het stellen van prioriteiten. De overheid ziet wetenschap vooral als een economische investering, die zich, liefst op niet al te lange termijn, moet terugverdienen. Er zijn topsectoren in het leven geroepen, waarin universiteiten en bedrijven moeten samenwerken aan onderwerpen die economische potentie lijken te hebben. Natuurlijk ben ik niet tegen zulke samenwerkingen, en natuurlijk mag er best iets worden terugverwacht van de publieke investeringen in de wetenschap. Maar innovatie laat zich niet zo makkelijk registreren. Veel technologische vernieuwingen ontstaan juist door onderzoek dat helemaal niet op een toepassing was gericht. Als Faraday en Maxwell zich hadden moeten richten op de topsectoren van de 19<sup>e</sup> eeuw, dan hadden we nu waarschijnlijk heel goede kaarsen gehad, maar geen elektrisch licht!

Er moet daarom voldoende ruimte blijven voor ongebonden, door nieuwsgierigheid gedreven onderzoek. Maar door de huidige nadruk op valorisatie is die ruimte erg beperkt; de competitie om het beschikbare budget is enorm en de honoreringskans voor fundamentele onderzoeksvoorstellen is vaak niet hoger dan 10 procent. Ik wil onze universiteitsbestuurders dan ook adviseren om hun onderzoeksbudget niet teveel in strategische thema's of programma's te stoppen. Dat creëert vooral opportunisme en weinig originele ideeën. Geef onderzoekers de kans om zelf met onderwerpen te komen; laat ze zelf samenwerkingen zoeken; vraag niet al van

tevoren welke *milestones en deliverables* er gehaald gaan worden, maar vertrouwen op het zelf-organiserend vermogen van uw onderzoekers!

Mijnheer de rector, dames en heren, ik heb u vandaag verteld over de wereld van moleculen en kleine deeltjes; over gebeurtenissen op de nanoschaal. Als u het wetenschapskatern van uw dagblad wel eens inkijkt, dan weet u: 'nano' is overall! Allerlei vakgebieden begeven zich op de nanoschaal, ook hier in Wageningen. Organisch chemici, biochemici en moleculair biologen, iedereen die zich met moleculen bezighoudt doet aan nano-wetenschap. Toepassingen van allerlei nano-deeltjes, bijvoorbeeld voor gezondheid, worden onderzocht bij bionanotechnologie, en ook voedings- en milieutechnologen richten zich steeds meer op nano. De mogelijkheden van nano zijn breed en ongekend, of, zoals Richard Feynman 50 jaar geleden al stelde: 'There is plenty of room at the bottom' [10]. Het zal u inmiddels duidelijk zijn waar, binnen dit brede veld, ik die ruimte zie voor onze leerstoelgroep: in het verbinden van de nanowereld met de macroscopische schaal; of met andere woorden in het bestuderen van het groepsgedrag op de nanoschaal.

Dames en heren, het Laboratorium voor Fysische Chemie en Kolloïdkunde is een lab met een rijke historie. Onder mijn voorgangers, Lyklema en Cohen Stuart, is een uitstekende reputatie opgebouwd. Het is een eer om in die voetstappen te mogen treden. In de loop der jaren is het karakter van het onderzoek in de groep wel behoorlijk veranderd. Tot een jaar of tien geleden stond de klassieke kolloïdkunde centraal, met onderzoek gericht op verdunde systemen van kolloïdale deeltjes en adsorptie aan modeloppervlakken. Maar zoals u heeft kunnen zien, zijn de systemen die we bestuderen inmiddels een stuk breder en complexer geworden. De nadruk ligt nu op collectief gedrag in geconcentreerde polymeersystemen, gellen, en zachte materialen. De naam 'kolloïdkunde' dekt de lading niet meer. In het veld wordt ons vakgebied aangeduid met de term 'Soft matter'. Ik stel daarom voor om de naam van de leerstoelgroep te veranderen in "*The Laboratory of Soft Matter*". Over een jaar verhuizen we naar het nieuwe Helix-gebouw op de campus. Dat lijkt me een mooie gelegenheid om die naamswijziging in te laten gaan.

Dames en heren, als er één ding na deze lezing duidelijk moet zijn geworden, is dat het belang van interacties en groepsdynamiek. En dat geldt natuurlijk ook voor het doen van wetenschappelijk onderzoek. Ik sta hier vandaag te pronken met alle mooie dingen die in onze leerstoelgroep gebeuren, maar ik realiseer me maar al te goed dat dat een collectieve prestatie is van het hele team. Ik prijs me gelukkig dat ik werk in een groep met slimme, creatieve, en gemotiveerde mensen, maar minstens zo belangrijk, in een groep waar samenwerking en collegialiteit vanzelfsprekend zijn, en waar ideeën vrij kunnen worden uitgewisseld en bediscussieerd. Ik wil al mijn

fysko-collega's dan ook bedanken voor die fantastische werksfeer: de wetenschappelijke staf, de docenten, de technische en administratieve ondersteuning, en natuurlijk alle aio's, postdocs en studenten.

Je zou het bijna vergeten, maar de belangrijkste taak van een universitaire groep is natuurlijke het opleiden van studenten; het verzorgen van onderwijs dus. Er wordt van alles geroepen over het belang van onderwijs, maar ik kan me niet aan de indruk onttrekken dat beoordelingscommissies, die beslissen over carrièrestappen van tenure trackers, toch vooral kijken naar publicaties en binnengehaalde financiering. Ik ben er daarom extra trots op dat in onze leerstoelgroep het verzorgen van onderwijs *niet* wordt gezien als een lastige maar noodzakelijke onderbreking van het onderzoek. We werken met zijn allen voortdurend aan de kwaliteit van ons onderwijs, zowel van de massale eerstejaarsvakken als van de specialistische mastervakken. Vorige maand, bij de dies, heeft onze rector magnificus een gloedvol betoog gehouden over de vele mogelijkheden van afstandsonderwijs via internet. Ik wil daar niets aan afdoen, maar we moeten toch vooral niet de enorme meerwaarde vergeten van groepsinteracties en direct contact. Ik zie in ons eigen onderwijs hoe inspirerend het werkt als groepjes studenten intensief met een docent samenwerken aan een onderzoeksproject. Het vraagt veel van de staf, maar het betaalt zich ook terug, niet alleen in evaluaties, maar ook in een flinke toename van het aantal studenten dat bij ons komt afstuderen.

Mijnheer de rector, dames en heren, dat ik hier vandaag sta dank ik ook aan de vele mensen met wie ik heb samengewerkt en die mij hebben gesteund de afgelopen jaren.

Twintig jaar geleden kwam ik in Wageningen studeren om biotechnoloog te worden. Dat het anders is gelopen komt onder andere door de colleges statistische fysica van Frans Leermakers. De formules vlogen je om de oren en het was een grote chaos, maar ik vond het fantastisch. Ik ben blij dat je nu mijn collega bent en dat er nog niets van je enthousiasme is verdwenen!

Mijn promotoren Gerard Fleer en Martien Cohen Stuart en mijn co-promotor Klaas Besseling wil ik danken, omdat zij mij hebben laten zien hoe je goede wetenschap doet, maar ook hoe je een promovendus opleidt tot zelfstandig wetenschapper. Martien, jou ben ik nog voor veel meer dingen dankbaar. Ik ben blij dat je me in Parijs bent komen opzoeken, om me over te halen terug naar Wageningen te komen. En ik ben blij met alle steun die ik van je heb gehad sinds die tijd. Ik heb grote bewondering voor de manier waarop jij de leerstoelgroep al die jaren hebt geleid, en het is een eer om je te mogen opvolgen.

Ik dank de Raad van Bestuur van Wageningen UR voor het in mij gestelde vertrouwen en ik dank de directie van onze kenniseenheid voor de fijne samenwerking. Ook dank ik alle collega's van binnen en buiten Wageningen met wie ik heb mogen samenwerken of dat nog steeds doe. Ik hoop dat er nog vele samenwerkingen zullen volgen.

Tot slot wil ik mijn familie en vrienden danken. Fijn dat jullie hier zijn! Pa, ma, zonder jullie onvoorwaardelijke steun zou ik natuurlijk nooit zover zijn gekomen. Lieve Fleur, Elle, en Vere, je vader in een jurk, dat zie je niet elke dag! Ik ben blij dat jullie er zijn. Leven is niet alleen maar werken, en ik ben blij dat ik veel van het niet-werken met jullie kan doen. Lieve Nicole, het is vooral door jouw steun dat ik hier sta. Het valt niet altijd mee om met een wetenschapper getrouwd te zijn. Ik dank je voor je begrip als ik 's avonds toch weer achter de laptop kruip, maar bovenal dank ik je voor al het moois dat we samen hebben.

Mijnheer de rector, geachte aanwezigen, ik dank u voor uw aandacht.

*Ik heb gezegd!*



## Literatuur

1. NRC Handelsblad, 23 maart 2014, interview met Gerard 't Hooft over de toestand van de natuurkunde.
2. Pierre-Gilles de Gennes, 'Soft matter', Nobel lecture, 1992.
3. J. van der Gucht, E. Paluch, J. Plastino, C. Sykes, 'Stress release drives symmetry breaking for actin-based movement', *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 102 (2005), 7847.
4. M. Lemmers, J. Sprakel, I.K. Voets, J. van der Gucht, M.A. Cohen Stuart, 'Multi-responsive reversible gels based on charge-driven assembly', *Angew. Chem. Int. Ed.* 122 (2010), 720.
5. A.A. Martens, J. van der Gucht, G. Eggink, F.A. de Wolf, M.A. Cohen Stuart, 'Dilute gels with exceptional rigidity from self-assembling silk-collagen-like block copolymers', *Soft Matter*, 5 (2009), 4191.
6. W.H. Rombouts, M. Colomb-Delsuc, M.W.T. Werten, S. Otto, F.A. de Wolf, J. van der Gucht, 'Enhanced rigidity and rupture strength of composite hydrogel networks of bio-inspired block copolymers', *Soft Matter*, 9 (2013), 6936.
7. D. Ershov, J. Sprakel, J. Appel, M.A. Cohen Stuart, J. van der Gucht, 'Capillarity-induced ordering of spherical colloids on an interface with anisotropic curvature', *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 110 (2013), 9220.
8. B. van der Meer, W. Qi, R. Fokkink, J. van der Gucht, M. Dijkstra, J. Sprakel, 'String-like rearrangements mediate stress relaxation in soft two-dimensional colloidal crystals', submitted.
9. J.L. Silverberg, M. Bierbaum, J.P. Sethna, I. Cohen, 'Collective Motion of Humans in Mosh and Circle Pits at Heavy Metal Concerts', *Phys. Rev. Lett.* 110 (2013), 228701.
10. Richard Feynman, 'There's plenty of room at the bottom', APS lezing Caltech, 1959.



Prof. dr. ir. Jasper van der Gucht

*'Om te begrijpen hoe materialen hun eigenschappen krijgen is kennis van het gedrag van de individuele bouwstenen vaak niet voldoende. Geheel nieuw gedrag kan ontstaan wanneer grote aantallen van die bouwstenen met elkaar wisselwerken. Dit is bij uitstek zo in de wereld van de zachte materie, waar fluctuaties en zwakke interacties tussen moleculen kunnen leiden tot spontane ordening op grotere lengteschalen. Om nieuwe complexe materialen te ontwerpen is inzicht in het collectief gedrag van moleculen daarom essentieel.'*