

# OMGAAN MET HET ONBEKENDE

---

DR. G. FRENS

 **TU Delft**

Technische Universiteit Delft

TRES Red. 1988

# OMGAAN MET HET ONBEKENDE

Rede, uitgesproken bij het aanvaarden van het ambt van  
gewoon hoogleraar in de fysische scheikunde aan de  
Technische Universiteit Delft, op 16 maart 1988 door

DR. G. FRENS.



## Omgaan met het Onbekende

Om duidelijk te maken waar het mij om gaat als ik het heb over "Omgaan met het Onbekende" zal ik mijn betoog beginnen met een anecdote uit onze familie.

Ik heb een oom die in Delft gestudeerd heeft. Dat komt in de beste families vóór, en eigenlijk is dat maar goed ook. Want stel je voor dat iedereen de mode van de dag zou volgen en zich werpen op de bedrijfskunde. Dan zou het met de bedrijvigheid in Nederland heel gauw over zijn.

Mijn oom is dus ingenieur. Werktuigbouwkundig ingenieur. Zijn leven lang heeft hij gewerkt aan stoommachines en locomotieven. Om precies te zijn: aan het opvoeren van het energierendement. Hoe je met zo min mogelijk kolen, olie of gas zo veel mogelijk nuttige arbeid kunt produceren.

Mijn vader wilde eerst ook naar Delft. Om scheikundige technologie te doen. Maar na een paar maanden hield hij dat voor gezien en trok naar de Universiteit in Utrecht. Zijn vak werd de fysiologie der dieren. Om precies te zijn: het rendement van de voeding bij koeien en varkens. Hoe je met zo min mogelijk hooi, gras of sojameel zo veel mogelijk melk, vlees of bacon kunt produceren.

Mijn neef heet Jan. Hij is een zoon van mijn oom, de ingenieur. Toen Jan een jaar of twaalf was kwam hij bij ons logeren en op een dag ging hij met mijn vader mee naar het Rijkslandbouwproefstation. Hij zag daar de voederproeven met koeien, schapen en varkens. Hij zag het werk om voor alle beesten het voer te verdelen in afgepaste porties. Hij zag dat de melkgift gemeten werd, en het vetgehalte bepaald als het voer was veranderd. En toen ging hij naar mijn vader toe

en vroeg hem: "Waarom nemen jullie niet zo'n koe, haalt hem uit elkaar, rekent hem uit en bouwt een betere?"

Daar wil ik het over hebben. Want wat is er nu eigenlijk zo vreemd of zo komisch aan die vraag? Een werktuigbouwkundig ingenieur zoals mijn oom kan zoiets. Hij kan een nieuwe locomotief bedenken. Hij kan die ontwerpen op papier en door-rekenen aan de terminal. Als de locomotief gebouwd is wordt die getest op ontwerpfouten. Hier en daar wordt dan nog wat gecorrigeerd. Maar als de ingenieur zijn vak verstaat zal de locomotief werken volgens de verwachtingen. Ook al was zo'n type nog nooit eerder gebouwd. Want die locomotief is een machine, net als een fiets, een vliegtuig of een Oosterscheldedam. Zo'n machine wordt bedacht en geconstrueerd volgens duidelijke regels: de regels van het vak. Volgens die regels kan een machine helemaal worden beschreven en dan werkt hij goed.

Voor scheikundige technologie ligt dat gecompliceerder, en daar ga ik het over hebben. Chemici hebben gemeen met de fysiologen, fysici, psychologen, geologen en artsen dat zij werken aan en denken over systemen die niet ontworpen zijn volgens de regels van hun vak. Eerder geldt het omgekeerde. De wetten van de natuur zijn de manier waarop mensen hun ervaringen met de dingen van de natuur aan elkaar doorvertellen. De zogenaamde natuurwetten zijn door mensen bedacht. Op grond van hun ervaringen. Ze beschrijven de uitkomst van waarnemingen en van proeven in laboratoria.

In de resultaten van onze proeven herkennen we door onze ervaring een zekere regelmaat. Dingen die we zien, proeven die we doen lijken beheerst te worden door vaste relaties van oorzaak en gevolg. Natuurwetten noemen we die regels, en we vertrouwen er op dat die regels van onze ervaring blijven

gelden bij proeven die we nog niet gedaan hebben, of in situaties die we nog nooit hebben meegemaakt.

De fysioloog, de geoloog, de psycho- en de technoloog werken aan vragen waarvan de antwoorden besloten liggen in de natuur der dingen om ons heen. Wanneer we de regels kennen waar die dingen door beheerst worden kunnen we ze bespelen en de wereld naar onze hand zetten. Maar niet altijd kennen we die regels. Het is zelfs de vraag of we natuurwetten allemaal kunnen kennen. Chemisch technologen bijvoorbeeld werken met moleculen, atomen, electronen, ionen en andere kleine deeltjes. In de wereld van de moleculen is de verhouding van de belangrijkheid van wetten heel anders dan in de ervaring van alle dag. Het is een onbekende wereld, die ons keer op keer voor verrassingen stelt.

Trefzeker, voortvarend, vol vertrouwen kunnen werken aan systemen waarin eigen, afwijkende regels gelden dat noem ik "Omgaan met het Onbekende". Chemisch technologen moeten dat leren. En dat kun je leren. Ieder mens heeft het in zich te leren omgaan met iets onbekends, dat niet aan de regels van ervaring wil gehoorzamen. Van jongs af aan zijn we daar in getraind. Om te overleven moet iedereen, steeds opnieuw, adequaat reageren op onverwachte, niet tot in detail bekende situaties. Dat doen we doordat we oorzaken en gevolgen leerden onderkennen. Door waar te nemen dat allerlei dingen steeds op dezelfde manier gebeuren. "Een steen valt altijd naar beneden". "Morgen gaat de zon ook weer op". Door dat soort waarnemingen maken we voor onszelf de wetten waarmee we iedere onoverzichtelijke situatie herleiden tot bekende feiten en regels. Omdat we uit ervaring weten, dat we op die analyse meestal mogen vertrouwen durven we dan vooruit te denken. Onze verbeeldingskracht, onze fantasie vertelt ons wat er op grond van die feiten en wetten zal ge-

beuren. Willen we dat dat ook echt gebeurt of niet? We bepalen ons standpunt, soms bewust, meestal onbewust, en handelen daarnaar. Op die manier overleeft de mens in de barre natuur, het verkeer, de maatschappij.

Nu zijn er ook wat ik noemde "Onbekende" situaties. Dat is, wanneer de wetten die we menen te kennen niet de uitwerking blijken te hebben die we verwacht hadden. Een mens reageert dan zoals wanneer hij in de "Python" zit, dat is de achtbaan in de Efteling. Je merkt daar op hardhandige manier dat bij grote versnellingen de wetten van de zwaartekracht, zoals je die uit ervaring kent, van ondergeschikt belang zijn. Behoud van impuls, daar blijkt het om te gaan. Je kunt over de kop gaan in een open wagentje zonder er uit te vallen. En die steen valt ook niet meer naar beneden.

Wat doet iemand die in zo'n wereld met andere wetten verzeild raakt? Wat doen alle mensen als ze beschaamd worden in hun vertrouwen op de wetten die een onbekende situatie overzichtelijk maken? Ze houden zich goed vast, en hopen dat het goed afloopt. Ze vinden het eng, maar ze weten dat de directie van het pretpark (een hogere macht), er voor zorgt dat zij weer op hun pootjes terecht zullen komen. En ze gie-ren van de pret - of is dat eigenlijk omdat ze zich groot houden in hun eigen ontredde-ning nu de regels niet meer op lijken te gaan? Ze weten niet om te gaan met een onbekende situatie.

Net als in de Python legt de zwaartekracht het ook af tegen andere krachten wanneer we de aarde verlaten. Toch gaat het in een ruimteschip heel anders toe dan in een pretpark. Cosmonauten zijn serieuze mensen, getraind om effectief te werken in een wereld met veranderde regels. Het is absoluut geen ongeordende chaos in zo'n ruimteschip, ook al is de zwaartekracht er weggevallen. Je kunt er blijkbaar een jaar

lang, gewichtloos en wel, slapen, eten, drinken, spelletjes doen en laboratoriumproeven.

De eerste eis van effectief omgaan met de nieuwe onbekende wereld in een ruimteschip is dat een cosmonaut zich leert aanpassen aan de wetten die daar gelden. Hij moet ze dus leren kennen om zijn doelen te realiseren en om de ongemakken van gewichtloosheid te verhelpen.

Je mag aannemen dat een cosmonaut al zindelijk was geworden sinds hij een baby was. Maar toch zal hij daar boven, in het ruimtelab, luiers dragen om droog te blijven in zijn ruimtepak. Want zonder hulp van de zwaartekracht kan een cosmonaut niet in een potje plassen, maar in het ruimteschip is het absorptievermogen van luiers net zo goed als in de wieg. Want absorptie van vocht in textiel wordt bepaald door de krachten tussen moleculen van water en van katoen. En dat soort krachten verandert niet doordat er geen zwaartekracht is.

Omdat eigenschappen van materialen, van vocht, van luiers, van aluminium metaal en van plastic door de krachten worden bepaald die werken tussen moleculen blijven die overal dezelfde. Op aarde en in een ruimteschip. Daarom ziet het er eigenlijk allemaal zo gewoon uit op de t.v. rondom die cosmonauten. Ze drinken uit een spuitfles, net als tennissers. En als ze de knop omdraaien gaat het licht uit, net als thuis. Een cosmonaut kan nog steeds vertrouwen dat dat deel van zijn ervaring bruikbaar is. Dat wat te maken heeft met materiaaleigenschappen. Met het gedrag van moleculen en atomen. Met de regels van de fysische chemie. En dus kan hij, experimenterend, fantaserend, de onbekende wereld zonder zwaartekracht verkennen. Gewapend met een incompleet stelsel van ervaringen gebruikt hij zijn inventiviteit om te leren daar mee om te gaan.

En straks, als U in de rij moet staan bij de receptie, dan leert de ervaring dat U zich staat te vervelen. Probeer dan eens te bedenken hoe gewichtloosheid Uw eigen vak kan veranderen. H.H. technologen, in Sky Lab zal een destillatiekolom niet meer werken, want damp stijgt niet meer op en vloeistof druipt niet meer neer. En hoe ontwerp je een fluid bed in een ruimteschip? Scheiding met omgekeerde osmose doet het nog wel daarboven, want die techniek berust op interactie tussen verschillende molecuulsoorten. Een aardig spelletje voor straks. Misschien komen er wel patenten uit voort, zodat deze bijeenkomst dan zijn geld weer opbrengt voor de Faculteit. Dat zullen dan vermoedelijk wel patenten zijn buiten mijn vakgebied, de fysische chemie. Ik sta daar trouwens niet bij in die rij. Maar fysische chemie gaat over krachten en effecten in de wereld der moleculen. En die blijven, naar ik zei, hetzelfde daarboven, zo lang er maar dezelfde moleculen en aards aandoende omstandigheden voorhanden zijn. Voor ons, collegae fysisch chemici, is in de ruimte niet veel nieuws te verwachten. U zult zich dus ter receptie naar geestrijker onderwerpen moeten haasten.

Het is overigens niet onze bedoeling in het Delftse Laboratorium voor Fysische Chemie ruimteonderzoek te gaan doen. Over die ruimtevaart kwam ik te spreken omdat door de tv-journals die "onbekende" wereld voor iedereen aanschouwelijk gemaakt is. Toch blijken goed getrainde cosmonauten zich in die wereld goed te redden.

Zo'n soort onbekende wereld waar eigen wetten gelden is ook de Scheikunde, en het vak fysische chemie gaat over de regels die werkzaam zijn in de wereld van moleculen en atomen. Om in die wereld effectief te kunnen opereren moet de technoloog die regels kennen, en er zich aan weten aan te passen, anders is hij nat. Fysische chemie levert de fundamente

waarop technologie kan worden opgebouwd. Technologische problemen zijn te onoverzichtelijk om de oplossingen aan de terminal te ontwerpen. Maar er bestaan, ook in ons vak, regels die ons in staat stellen effectief te werken. Dat stelsel van regels en wetten, dat we gedestilleerd hebben uit chemische verschijnselen, daar kunnen we ons bij het opzetten van het werk door laten leiden. Dat stelsel noemen we de fysische chemie. De regels staan in onze boeken. Ook als een chemicus wil weten hoe een stof is opgebouwd uit moleculen kan hij dat in boeken opzoeken. Hij kan moleculen synthetiseren volgens het boekje. En als het om nieuwe stoffen gaat, dan kent hij meetmethoden om de molecuulstructuur te bepalen. Het lijkt of goed getrainde chemici alles weten wat nodig is om hun vak compleet te beschrijven. Maar dat is niet zo: er is een aspect aan de wereld der moleculen dat principieel onbekend is. Onbekend in de zin waarin dat woord hier gebruikt is: zodat we niet uit de waargenomen structuren van moleculen en atomen, en op grond van onze ervaring met zekerheid kunnen zeggen hoe het verder gaat met een bepaald molecuul.

Dat komt omdat de natuurwetten met betrekking tot moleculen, atomen en andere kleine deeltjes anders werken dan we gewend zijn. De wereld waarin wij leven lijkt te gehoorzamen aan causale wetten: van oorzaak en gevolg. Maar op het niveau van de kleine deeltjes, de moleculen en atomen gelden alléén wetten van waarschijnlijkheid, van kansberekening en van statistiek. Chemici beweren wel met grote stelligheid dat de structuur van DNA een dubbele helix is, ofdat in een watermolecuul een knik zit, maar dat is maar bij wijze van spreken. Beide beweringen zijn wel ongeveer wáár, maar niet omdat we de structuren van water of DNA zo precies kunnen kennen.

Laat mij proberen uit te leggen waarom chemici zulke beweringen zo stellig en ongenueanceerd doen. De fysici en chemici onder mijn gehoor moeten mij dit intermezzo maar ten goede houden: ze hoeven even niet op te letten, want ze weten al wat ik hierover zeggen ga. Straks gaat het betoog over "Omgaan met het Onbekende" weer verder.

Niet-chemici stellen zich nu dus in gedachten een molecuul voor. Dat is dan een ingewikkelde constructie van atombolletjes. Ze hangen met bindingen aan elkaar. Zo'n binding is geen ding. Het is een verschijnsel: we constateren dat atomen elkaar op een bepaalde afstand sterk aantrekken. In een model kunnen we heel goed stokjes gebruiken waarmee we de bolletjes aan elkaar prikken. Dan zitten de bolletjes vast in een structuur die voorstelt hoe een molecuul, honderd miljoen maal vergroot, in elkaar steekt. We zien in zo'n model alle atomen vast op hun eigen plaats zitten. Stellig en zeker. In de werkelijkheid, zoals die geldt in de wereld van de moleculen zelf, is die vaste plaats meer een soort gemiddelde positie. Het atoom bevindt zich daar ergens in de buurt, het meest waarschijnlijk op die plek tussen de andere atomen in het molecuul. Het wordt daar vastgehouden omdat het krachten - aantrekking, afstoting - ondervindt van de atomen in zijn buurt. Maar niet precies: het trilt en slingert rond zijn gemiddelde positie. Soms trilt het hard, soms minder heftig, dat varieert. Als wij van een afstand, kijkend naar de moleculen, constateren dat alles hard staat te trillen, vervolgens opkijken om te zien of dat ook in de wereld die wij kennen merkbaar is, dan merken we dat hard trillen van atomen samen gaat met hoge temperatuur. Als het kouder wordt om ons heen zien we dat het trillen minder wordt, maar stoppen doet het nooit.

Er is een kans, dat zien we in, dat ergens iets losrammelt in zo'n molecuul. Dat zal blijvend iets aan de structuur van ons molecuul veranderen. Of de structuur kan door al dat trillen in de war raken. Of atomen kunnen worden uitgeruild als twee moleculen toevallig dicht bij elkaar in de buurt komen. In al die gevallen verandert er iets - meer permanent dan alleen door dat trillen - aan de structuur in het molecuul. Zo'n molecuul met een andere structuur is een molecuul van een andere stof. Zo'n gebeurtenis - het lostrillen - noemen we een reactie, een chemische reactie waarbij de ene stof wordt omgezet in de andere.

We kunnen uit de gemiddelde grootte van al die trillingen wel schatten of de kans groot is dat er iets lostrilt aan ons molecuul. Maar 100% zekerheid of dat gebeuren zal, of hoe lang dat nog gaat duren, hebben we niet. Kunnen we ook nooit hebben omdat we nooit helemaal exact al die trillingen kunnen beschrijven. Dat is echt een wet. We weten alleen dat de kans dat er iets gebeuren zal samenhangt met de grootte van de trillingen - met onze onzekerheid over de precieze plaats en de exacte snelheid van al die atomen. En we zien ook wel in dat die kans veranderen zal wanneer we iets veranderen - wij iets veranderen - aan de omstandigheden. Wanneer we bijvoorbeeld de stof waarvan wij één molecuul bekijken opwarmen in een oven. Dan wordt de kans dat er wat lostrilt dus groter.

Wanneer U het nu met mij eens bent dat we wel de kans kunnen berekenen dat er iets zal veranderen aan een molecuul, maar nooit precies kunnen zeggen wanneer en hoe, dan moeten wij ons samen verbazen over onze scheikundeleraar, de toch met grote stelligheid verkondigde dat twee moleculen waterstof en één molecuul zuurstof samen reageren tot twee moleculen water.  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$  was de reactie-

vergelijking. Je hoorde nooit praten over de kans dat dat gebeuren zou. Gesteld werd: "Het gebeurt". Punt. Uit.

Die stelligheid - en nu gaat ons betoog over het omgaan met het onbekende weer door - komt door de ervaring die onze scheikundeleraar als chemicus heeft opgedaan in experimenten. Experimenteren, dat is niet: je voorstellen hoe het een molecuul zal vergaan als het maar leuk blijft trillen. Experimenten worden in een laboratorium uitgevoerd. In een vlam zie je daar waterstofgas met zuurstof tot water verbranden. Er wordt nauwkeurig gemeten hoeveel waterstof er wordt verbruikt, en hoe veel water er ontstaat. Precies zo als bij die koeien die ander voer kregen om meer melk te geven. En zo ongeveer het allereerste wat iemand op school over scheikunde leert, is wat er uit dit soort proeven komt. Dat je de uitkomsten van dit soort proeven kunt beschrijven in een model. Als je maar wilt aannemen dat iedere hoeveelheid stof bestaat uit allemaal identieke, niet van elkaar te onderscheiden moleculen, en alle andere stoffen uit andere, daarvan verschillende deeltjes.

Dus terwijl een chemicus voor zijn neus en voor zijn ogen een vlam ziet waar waterdamp in ontstaat herleidt hij die onbekende situatie tot hanteerbare moleculaire modellen. In zijn fantasie ziet hij twee moleculen  $H_2$  en één  $O_2$  die zich verenigen, in elkaar verward raken en daarna weer uit elkaar vallen tot  $2 H_2O$ .

Het kan hem bij zijn fantasievoorstelling niet zo veel schelen of dat nu gebeurt met het ene molecuul of met het andere. Want hij weet, omdat ervaring dat leert, dat de uitkomst van de proef met de vlam voorspeld kan worden door over moleculen te redeneren alsof het zo zou gaan.

Wat daar niet bij verteld wordt is hoe het komt dat de uitkomst van zo'n redenering klopt. Dat komt omdat in elk echt

experiment onvoorstelbaar veel van die moleculen meedoen. Zelfs in een halve speldeknop water - en met minder kun je toch niet makkelijk proeven doen - zitten nog een miljard maal een miljard moleculen. Als we dan de kans kennen dat er met één van die moleculen iets bepaalds gebeuren zal, dan is het net als gooien met een dobbelsteen. Bij één keer gooien is het resultaat onvoorspelbaar. De kansen op 1, 2, 3, 4, 5 of 6 zijn gelijk. Maar wie zes miljoen maal zou mogen gooien kan vrij precies voorspellen dat hij één miljoen maal 3 zal gooien. En als hij zelfs een miljard maal mag rekenen met gelijke kansen neemt zijn vertrouwen in zo'n voorspelling van het aantal malen drie - of van de opbrengst aan  $H_2O$  bij het verbranden van waterstof - navenant toe.

Hierdoor lijkt het dat we in experimenten met stoffen en chemische reacties de eigenschappen en resultaten kunnen voorspellen in termen van oorzaak en gevolg. Dat is fijn, zo werkt alles om ons heen. De fiets, de machine, de locomotief. In werkelijkheid is het wel de statistiek van zeer grote aantallen die voorspelbaar maakt wat de moleculen gaan doen. Maar in experimenten zien we steeds weer een bevestiging voor de illusie van causale stelligheid bij onze beweringen over moleculen. Want in experimenten en technologie gaat het toch altijd - bijna altijd - om echte hoeveelheden van echte stoffen. De onzekerheden die theoretici zich scheppen bij het schouwen naar een eenzaam molecuul hoeven de Delftse ingenieur niet te plagen die olie wil raffineren. Hij houdt zich aan wetten die locomotieven laten rijden. Dat zijn de wetten van de thermodynamica: causaal en effectief.

Maar zo ongenueanceerd mag onze benadering niet blijven hier in Delft. Daarom is aan onze Technische Universiteit de opleiding van ingenieurs stevig op fysisch-chemische fundamenteën geplaatst. Dat onderscheidt haar van de Anglo-



Amerikaanse scholen voor Chemical Engineering en geeft de Nederlandse ingenieursopleiding een echt academische status. Voor de toekomst is dat maar gelukkig. In die Engels sprekende wereld begint men het gemis te voelen als er nieuwe technologie moet worden uitgevonden. Daar roept men, steeds luider, om "fundamentalisering" van het chemisch ingenieursvak.

Meer en meer raakt men er van doordrongen hoe belangrijk het is voor de techniek dat de ware aard van de chemie niet volledig schuil gaat achter wetten van extreem grote getallen. De eigen eigenschappen van moleculen, hun interactie met elkaar, de statistische fluctuaties rondom gemiddelde waarden zien we terug in de chemie die we bedrijven. Als we er maar op willen letten. Dit soort dingen leek wel geen rol te spelen in het geheel van de vaste en betrouwbare technologische wetten van de Chemical Engineer. Maar economische overwegingen dwingen hem nu om preciezer te kijken. De opbrengst van processen blijkt lager dan verwacht. Er gebeuren ongelukken. De concurrent produceert sneller, met minder nevenproducten. Onverwachte fenomenen, die niet in het schema passen.

De vaste wetten waar we door ervaring op hebben leren vertrouwen in de technologie worden in de natuurkunde soms aangeduid, c.q. afgedaan, als fenomenologische wetten. Een onzinnige term: alle natuurwetten zijn fenomenologisch in de zin dat ze waarneembare verschijnselen beschrijven. Daarvoor zijn ze geformuleerd. Wetten en constante eigenschappen die het gevolg zijn van statistiek met zeer grote getallen noemen we liever macroscopisch. Ze gaan niet over één afzonderlijk deeltje, maar wel over heel veel deeltjes samen. De thermodynamica is zo'n systeem van macroscopische wetten. Idealiter kan macroscopisch niets gezegd worden over ei-

genschappen van moleculen. Daarom is het thermodynamisch stelsel niet specifiek, maar algemeen geldig. Het gaat op voor de locomotief en voor de grote aantallen moleculen in chemische proeven. Het gaat over druk, temperatuur, de dichtheid, viscositeit en soortelijke warmte van stoffen en over chemische veranderingen die de stoffen ondergaan. De thermodynamica geeft ons een op ervaringsfeiten gebaseerde, sluitende systematiek om verschijnselen te beschrijven in termen van behoud of productie van op zichzelf abstracte grootheden: de energie en de entropie. Je kunt met thermodynamica een locomotief ontwerpen, of een chemische fabriek. En die zal werken.

Daar tegenover staat de microscopische theorie. Die geldt in de moleculaire wereld. Toch kan daar géén chemisch proces mee ontworpen worden. Hoogstens in een model beschreven, door afschatten van waarschijnlijkheid. Hier gaat het uitsluitend over specifieke aspecten van interactie tussen deeltjes, maar er komt géén voorspelling uit over wat in echte experimenten daarvan wordt teruggevonden. Maar wel van wat mogelijk zou zijn.

Tussen die twee: causale macroscopische wetten en microscopische waarschijnlijkheidsanalyse ligt een kloof. Om die te verkennen wapenen we ons met microscopisch inzicht en vertrouwen we op de macroscopisch voorspelbare feiten van onze ervaring. "Dat mag je niet", zal de thermodynamicus ons waarschuwen, "je moet je houden aan de feiten. Microscopische modellen berusten op fantasie". De molecuulspectroscopist zal wat schamper reageren: "Dat mag je niet doen, thermodynamica is niet fundamenteel. Chemie is bouw van moleculen". Maar wie iets nieuws wil doen, wie niet tevreden is alleen maar te beschrijven wat iedereen kan zien, of alleen maar te meten wat niemand wil weten, die

moet toch wat. Hij maakt met microscopisch inzicht een onvolkomen model van de werkelijkheid, en hij kijkt of het zo zou werken in de macroscopische praktijk. Daarna wordt door het interpreteren van afwijkende resultaten in het experiment het model verfijnd en zo voort.

Wie zo de fysische chemie benadert, met fantasie gepaard aan wat kennis, en met het experiment als uitgangspunt voor theoretische analyse, die is in goed gezelschap. De eerste Nobelprijs in de chemie ging naar onze landgenoot J.H. van 't Hoff. Niet veel mensen weten dat van 't Hoff begon in Delft te studeren: de macroscopische vakken van de technische realiteit die aan de Polytechnische School onderwezen werden. In Leiden bouwde hij daarna tetraeders als microscopisch model voor koolstof in een organisch molecuul, en verzong zo een verklaring voor de optische polariteit van suikeroplossingen, een macroscopisch verschijnsel. In Amsterdam werd van 't Hoff professor. Zijn oratie ging niet over techniek of over tetraedersmodellen. De titel was: "Verbeeldingskracht in de Wetenschap". En daar gaat het inderdaad over. Ideeën voor nieuwe technologie komen niet uit de techniek zelf voort. Ze ontstaan wanneer we verbeeldingskracht loslaten op modellen en die confronteren met experimenten in het laboratorium. Een voorbeeld is de technologie voor de Compact Disc plaat die door Philips is uitgevonden. Het product lijkt simpel, een spiegellend schijfje plastic van 12 cm, 1 mm dik ongeveer. Dat de kunststof vormvast moest zijn, en optisch leeg, zonder absorptie of dubbelbreking was al moeilijker. Uiteindelijk bleek de "engineering plastic" polycarbonaat te voldoen. Daar is hier in Delft nog aan gerekend. Echt nieuw aan Compact Disc was de manier om de bits van het gedigitaliseerde audiosignaal op de plaat te zetten. In putjes met een variabele lengte van 1  $\mu\text{m}$  (1/1000 mm) lang, 0,5

$\mu\text{m}$ , breed en 0,12  $\mu\text{m}$  diep. De lengte van de putjes wordt als een code uitgelezen bij het draaien van de plaat. Daarom moet die lengte tot op 0,05  $\mu\text{m}$  nauwkeurig bepaald zijn.

Niemand hier kan zich bij dit soort maten wat voorstellen. Denken we daarom zo'n plaat eens 1000x vergroot. De diameter wordt dan 120 m: het formaat van een voetbalstadion. Rondom het veld een baan, voor schaatsen, wielrennen of atletiek. En op die baan allemaal putjes. Ieder putje precies op z'n plaats. Ieder putje van de voorgeschreven lengte. Eén miljard individuele putjes, met een lengte van 1 mm, een breedte van 0,5 mm, een diepte van 0,12 mm en een precisie voor de scherpte van de rand die in honderdsten van millimeters wordt gemeten. Voor elk individueel putje, precies op z'n plaats.

Op schaal 1:1000 moest dat stadion, met baan, met putjes, binnen 30 seconden maakbaar zijn. Reproduceerbaar van plaat tot plaat. Alles op de juiste plaats, nauwkeurig, gespecificeerd. In grote oplagen, niet te duur. Een grote produktstroom plastic plaatjes. Hoogwaardige technologie. Het is ons gelukt, dat weet U uit de platenwinkel. Maar daarvoor moest eerst geleerd worden, om te gaan met een nieuw en onbekend aspect van dit soort technologie. Want 0,05  $\mu\text{m}$  tolerantie op randen van putjes betekent een maat die kleiner is dan het formaat van de moleculen polycarbonaat. We moesten dus, om die precisie te halen, een deuk drukken in afzonderlijke moleculen aan het oppervlak van de plaat.

Wat is er nu eigenlijk zo vreemd, zo komisch aan die vraag? Een werktuigbouwkundig ingenieur kan zoiets toch ook? Die kan toch putjes met gespecificeerde maten in een plaat plastic persen?

Maar niet zulke kleine putjes. Wie dat probeert merkt dat de moleculen waar hij op drukt zich niet wensen te schikken volgens zijn wens. Niet zonder meer althans. Niet als onze wensen zo nadrukkelijk, zo ongenueanceerd aan het materiaal worden opgedrukt. Polycarbonaat heeft eigenschappen waar uit te berekenen valt - volgens macroscopische ervaringsgegevens - dat door persen materiaal verplaatst kan worden. Maar als de druk weer van de plaat is hernemen moleculen, individueel, microscopisch en dus onvoorspelbaar, hun normale maten en veren terug. De putjes zijn klein. Hun rand nog kleiner, en het aantal moleculen waar het over gaat dus ook. Op grond van gemiddelden voor grote aantallen valt niet meer af te leiden wat elk afzonderlijk molecuul gaat doen. De gespecificeerde precisie kan niet gehaald worden. Het signaal verdrikt in de ruis. De technologie werkt niet omdat sub-moleculaire precisie met macroscopisch geweld werd nagestreeft.

Toen realiseerden we ons dat je niet zou moeten proberen met grote druk een scherpe knik in een paar moleculen op de rand van een putje te forceren. Achteraf kan ik uitleggen hoe dat wel moet. Maar toen, in de industriële realiteit van nog onbekende technologie, had je alleen maar de combinatie van intuïtie, experimenten en onderliggend fysisch chemisch inzicht bij de hand. Dat onderliggend inzicht zei, dat je het om zulke sub-moleculaire details te maken moet hebben van adsorptie.

Adsorptie doet zich voor waar twee stoffen, met verschillende molecuulsoorten aan elkaar raken in een grensvlak. Enerzijds zijn die moleculen, omdat ze tot zo'n stof behoren onderworpen aan de thermodynamische wetten en eigenschappen die gelden voor die stof als geheel. Anderzijds staan juist de moleculen in het grensvlak onder de invloed van

de moleculen in de andere stof: een microscopisch effect op het niveau van elk deeltje afzonderlijk. Je kunt de omstandigheden zo kiezen dat die microscopische interactie met het oppervlak van het matrijsmateriaal voldoende sterk is om de plasticmoleculen uit hun natuurlijke, thermodynamisch gemiddeld gunstige, in zichzelf opgerolde houding laten te komen, en zich tegen het metaal van de matrijs aan te vlijen. Van nature, door in hun eigen aard gegeven omstandigheden - niet door opgelegd geweld. Dit idee, waarin de moleculen er zelf naar streven zich te plooiën rond sub-moleculaire details werd uitgangspunt voor de technologie om Compact Discs te maken. Analoge interpretaties zou je kunnen geven voor succesvolle methoden op het gebied van microfilms, vaste stoflasers, glasvezels voor de telecommunicatie en Megachips. Ook daar is beheersing van chemische processen door ingebouwde chemische mechanismen nodig om de submicroscopische details van zulke hi-tech producten te realiseren. Hi-tech bestaat niet alleen uit geavanceerd ontwerpen. Voor realisering van de producten is het nodig dat je ze kunt maken. Voor die maakbaarheid zijn geavanceerde methoden van chemische procesbeheersing vereist van een nieuw type dat we "Extreme Control" noemen hier in Delft.

Bij Extreme Control gaat het er niet om dat we het gemiddelde verloop van een proces via randvoorwaarden beheersen - vertrouwend op de causale wetten van de thermodynamica. We gaan een stap verder in beheersing door bewust in de processen mechanismen in te bouwen zoals adsorptie, en met behulp daarvan de groei van fluctuaties en het ontstaan van instabiliteiten of nevenreacties te onderdrukken. Grensvlakken spelen daarbij een bijzondere rol. Daar zijn moleculen in een microscopisch bepaalde uitzonderingssituatie geplaatst, terwijl ze tegelijkertijd deel hebben aan het macroscopische

systeem met zijn causale, thermodynamische wetten van grote getallen. Je zou kunnen beweren dat wanneer door de voortgang van een proces het evenwicht van het grensvlak met de rest van het systeem verstoord dreigt te worden, dat hele systeem zich zal uitputten om dat evenwicht te herstellen. Tot in elk detail, dus ook voor kleine, locale afwijkingen. Een bijzondere variant dus van van 't Hoff's principe van de kleinste dwang.

Met dit idee op de achtergrond wordt nu hier in Delft de ruimte ingevuld voor een eigen programma in het Laboratorium voor Fysische Chemie. In dat programma staat onderzoek aan grensvlakken centraal. Want zoals we zagen geven grensvlakken mogelijkheden om specifiek chemische effecten van de interactie tussen verschillende soorten atomen of moleculen te koppelen met fysische (macroscopische) transportverschijnselen voor warmte, materie of electriciteit. De combinatie geeft mogelijkheden voor Extreme Control in nieuwe, nog onbekende technologieën.

Wij zoeken daarvoor nu onderzoekers. Van en op deze plaats lijkt mij een wervende oproep gerechtvaardigd aan mensen met fantasie. Want wij hebben een perspectief, een droom als u wilt. We stellen ons technologie voor met Extreme Control. Als de in processen ingebouwde mogelijkheid tot terugkoppeling gebruikt wordt om fluctuaties en instabiliteiten te corrigeren kan preciezer, lokaler, selectiever gewerkt worden in de chemie. Dat verhoogt opbrengstpercentages. Het resulteert in schonere processen en zuiverder producten. Het elimineert onverkoopbare bijproducten en ongewenste nevenreacties. Extreme Control is een idee uit de fysische chemie. Toepassing ervan gaat echter over het technologisch realiseren van economische, industriële en maatschappelijke wenselijkheden. Dat is onze droom: Technologie, die nieuw

wordt opgetrokken op fundamenten van fysisch chemisch onderzoek.

Vanuit die invalshoek werkend zal het Delftse Laboratorium voor Fysische Chemie een natuurlijke partner zijn bij de cluster van onderzoekprojecten die in onze faculteit gevormd wordt rond het thema "Advanced Processing". Prof. van Rosmalen heeft onlangs in haar oratie verteld wat wij daar onder moeten verstaan. Het gaat bij deze clustering over procesbeheersing door te werken in unieke, thermodynamisch vastgelegde condities - zoals bij grensvlakken of bij evenwicht tussen verschillende fasen. Dus over Extreme Control. Dat representeert een Delftse toekomstvisie op de ontwikkeling van de chemische technologie. In die toekomst, juist in die toekomst, voorbij de horizon van wat we nu al allemaal weten en kunnen, zal de fysische chemie een solide basis vormen voor Delftse ingenieurs die technisch, effectief, probleemoplossend kunnen omgaan met het onbekende.

Op dit punt van deze rede begint de peroratie: het afsluitend bedanken en vermanen aan het eind. Vroeger begon de aantredende hoogleraar met H.M. de Koningin eerbiedig te danken voor zijn benoeming. Nu hoogleraren benoemd worden door het College van Bestuur der Universiteit past het mij dat College in diezelfde geest te bedanken.

Het verschil is echter groter dan het op het eerste gezicht lijkt. Het College is niet onschendbaar, maar feitelijk verantwoordelijk voor de gang van zaken hier. De gevolgen vallen niet alleen mij, maar ook anderen die deze organisatie van buitenaf betreden onmiddellijk op. Voor ook bij mij de bedrijfsblindheid toeslaat wil ik er dus wat over zeggen.

Uit een periode vol bestuurlijke impasses heeft Delft de vrij unieke bestuurlijke constructie overgehouden. De beheers-

organisatie van materieel en geld, ook binnen de infrastructuur van vakgroepen en faculteiten, zoveel mogelijk ontkoppeld is van de bestuurskaders waarin volgens de wet het beleid bepaald wordt voor onderzoek en onderwijs. De beheersstructuur is direct opgehangen aan het College. Dat daardoor lijken gaat op het spookbeeld van heer Albedil, die met een schare van goedwillende maar niet erg professionele handlangers proberen moet om een organisatie waar een half miljard per jaar omgaat te regelen tot in het detail van milliguldens. Een nauwkeurigheid van één op triljoen. Dat zou vragen om extreme control, maar daarvoor ontbreekt in beheertheorieën iedere aanzet. Zo'n systeem moet leiden tot chaos, tot barre verstarring, of, zoals in Delft, tot beide. Bovendien: de bestaande tweedeling maakt het College tot partij in plaats van tot arbiter in discussies over de uitvoering van beleid voor onderzoek en onderwijs. Ongelukkiger systeem is voor een zich verzelfstandigende organisatie niet te bedenken. Het smooit ieder initiatief aan de basis in centralistisch dirigisme en is dodelijk voor slagvaardig reageren op veranderingen in de buitenwereld. Ik vraag het College waarom we niet, in het belang der Universiteit een eind kunnen maken aan deze ongelukkige erfenis uit slechte tijden.

Leden van de Academische Senaat, dames en heren professoren! Nu hoor ik fluisteren in deze Aula: "De Senaat bestaat niet meer". Bedoeld wordt dat professoren in Nederland niet meer als een besloten club bestuurszaken van de Universiteit bedisselen. Die tijden zijn gelukkig allang voorbij. Daar zijn nu de gekozen raden en de bestuurscolleges voor.

Maar heeft daarmee de Senaat opgehouden te bestaan? Wat zit hier dan, vooraan op een rij in deze Aula, met togas omhangen, als een gezelschap oudromeinse Senatoren? Die toga is een symbool. De Universiteit heeft de drager/ster be-

kleed met de verantwoordelijkheid voor zijn/haar vak. Misschien mag je het wel onthullend noemen dat de Senaat niet meer vergaderd blijkt te worden nu er niks meer te bedisselen valt. Jammer is het in elk geval. De verantwoordelijkheid voor onderzoek en onderwijs in de technische vakken is niet vervallen twintig jaar geleden. Het is mij een voorrecht die in Uw midden, met U samen, te mogen dragen. Onderzoek en Onderwijs in de technische wetenschappen dat is, krachtens de wet, onze Corporate Identity. Niets meer, niets minder dan dat. Het lijkt mij goed, mijnheer de Rector, als daar zo nu en dan aandacht aan besteed zou worden. Desnoods door er zelfs over te vergaderen.

Chemici, procestechnologen en materiaalkundigen vormen in Delft één faculteit. In onze laboratoria ontmoeten wij elkaar op ons vakgebied. Volgens mij kan mijn vak, de fysische chemie, alléén maar winnen bij zo'n interactie met de techniek. Juist hier, in onze faculteit kunnen onderzoekers zich richten op fundamentele knelpunten in technologie. Daardoor is de kwaliteit van ons gezamenlijk werk bepalend voor de maatschappelijke betekenis ervan.

Dames en heren medewerkers van Philips' Natuurkundig Laboratorium. Juist door niet meer dagelijks op het Nat Lab te komen gaat iemand zich realiseren hoe veel dingen je daar als vanzelfsprekend aanneemt die tot goed onderzoek stimuleren. Bijvoorbeeld de vele mooie verhalen die wij samen kennen over ons Lab en over ons werk. Een groep mensen die dezelfde verhalen kennen vormt een culturele eenheid met een eigen, unieke identiteit. Ooit wilde Kees Teer, onze directeur, kunstenaars en filosofen gaan aanwerven voor het Natuurkundig Laboratorium. Waarschijnlijk zag hij het net als van 't Hoff: inventiviteit, die kenmerkend is voor industriële research van hoog niveau zal altijd moeten berus-

ten op hoogwaardige kennis en grote kunde. Maar ze wordt gevoed door onze fantasie en een artistiek soort inspiratie. Dat cultureel klimaat, dat kan daadwerkelijk motiveren tot het aangaan van nieuwe en onbekende uitdagingen. Dat is voor mij, door de jaren heen, het meest unieke aspect geweest van werken in het Nat Lab.

En tenslotte richt ik mij dan tot U, dames, mijne heren studenten. "Om U gaat het allemaal" zeggen ze dan vaak in dit soort redes. Onzin lijkt me dat, of liever gezegd: een goed bedoeld maar gevaarlijk soort paternalisme. U hebt voor Uzelf de techniek uitgekozen als vak om in te studeren. U hebt als gevolg van die keuze wat aanpassingsrituelen te ondergaan, en een al dan niet selectieve propaedeuse. Maar zo bent U, net als de staf van de Universiteit, mondige leden van deze Academische Gemeenschap. Laat U niet inpakken door ge-  
onderwijs. Wees vooral kieskeurig op wat men U aanbiedt, en ga zorgvuldig om met de daarvoor gevraagde tijd. Wat U in een paar jaar tijd aan onze TU weet op te pikken moet U kunnen gebruiken op de weg die U bent ingeslagen. Die weg voert U verder dan de horizon van de T.U.. En op die weg zult U er vaak alléén voorstaan, oog in oog met het onbekende.

U hebt zichzelf de opdracht gegeven er wat van te maken hier in Delft. En ook later, als een begaafd en creatief technicus, niet bang om in zijn werk, nieuwe, onbekende problemen aan te pakken. En in Uw leven, Uw eigen leven, persoonlijk, bewust, sociaal in onze maatschappij. Als een goed ingenieur, die heeft leren omgaan met het onbekende.