



Universiteit
Leiden

The Netherlands

De moleculaire polder

Kleyn, A.W.

Citation

Kleyn, A. W. (2000). *De moleculaire polder*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/5324>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Leiden University Non-exclusive license](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/5324>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

De moleculaire polder

Rede uitgesproken door

Aart W. Kleyn

Bij de aanvaarding van het ambt van gewoon hoogleraar in de scheikunde,
in het bijzonder in de “Oppervlaktechemie, materialen en katalyse”,
Aan de Universiteit Leiden op vrijdag 30 juni 2000.

Mijnheer de Rector Magnificus, Zeer gewaardeerde toehoorders,

In ons polderland is de derde dimensie niet rijk bedeed. De hoogte is een maat, waarvan slechts met mate gebruik van gemaakt wordt. Weidsheid en vlakke tooit ons land. Voor één van mijn Japanse bezoekers was het een schok te ervaren, dat landen zonder bergen bestaan. Ik zal u laten zien, dat ook op moleculaire schaal een polderlandschap kan bestaan, en dat het grote consequenties heeft voor scheikundige reacties aan oppervlakken.

Op 6 juni 1989, iets meer dan 11 jaar geleden, hield ik mijn inaugurele rede aan de universiteit van Amsterdam: getiteld reflecties. Dat was een toekomstblik van iemand die nieuw is in de universiteit. Ik liet zien hoe informatie over het landschap kan worden verkregen, door er licht en atomen aan te spiegelen. Ik was toen werkzaam als bijzonder hoogleraar aan de Universiteit van Amsterdam, zeer aan de periferie van de universitaire wereld. Mijn werkzaamheden werden uitgevoerd in het FOM Instituut voor Atoom- en Molecuulfysica of AMOLF, in de watergraafsmeer, een van de laagst liggende polders van ons land. Nu opschuif ik op naar het vlakke bèta land buiten Leiden's singels. Mijn positie is niet meer bijzonder, maar gewoon.

Alvorens u iets te vertellen over het leven in de moleculaire polder, begin ik met een introductie over het macroscopisch polderlandschap, waarin ik me beweeg: de universiteit. Veel van wat ik zeg zal voor een aantal van u gesneden koek zijn, maar toch sta ik er even bij stil. Soms zijn open deuren minder open dan je zou denken. Ik begin dus niet bij moleculen maar bij de Universiteit in het algemeen.

De kortgeleden ondertekende Bologna verklaring geeft aan wat een universiteit in Europa zou moeten zijn. Hij is ondertekend door Rectores en Ministers en moet dus wel waar zijn. Het Universitair Onderwijs is verdeeld in twee delen: een 3 jarige opleiding tot bachelor, gevolgd door een twee jarige tot masters. In polderland betekent dat, dat het kandidaats en doctoraal weer hun intrede doen. Naar mijn gevoel is de cirkel nu weer rond: het scheikunde curriculum begint aardig te lijken op wat het was toen ik in 1968 aan deze universiteit begon te studeren. Na het bachelors-diploma behaald te hebben moet de student naar een andere universiteit kunnen gaan. Voor mij was dat de universiteit van Amsterdam. In de masters fase moet men een breed onderwijs aanbod kunnen benutten. Voor mij leidde dat tot een bijvak aan de universiteit van Utrecht. Al deze omzwervingen gingen probleemloos en het is goed te horen, dat het weer mogelijk wordt. Iets minder honkvast kan in Nederland en hopelijk Europa geen kwaad.

Veel belangrijker voor mij in de Bologna verklaring is de uitspraak dat onderwijs en onderzoek onlosmakelijk verbonden zijn. Een universiteit geeft onderwijs en doet

onderzoek: deelname aan dat onderzoek is één van de belangrijkste aspecten van het onderwijs: leren wetenschappelijk onderzoek uit te voeren in een zuivere onderzoekspraktijk. Dit brengt ons tot de vraag: wat is wetenschap en wat is wetenschappelijk onderzoek? Ik heb altijd het gevoel gehad, dat hier tegenaan gekeken wordt als naar een gebouw, dat als een Griekse tempel uittorent vanaf een hoge rots: vast, bepaald en onveranderlijk. Een indrukwekkend uitzicht voor polderbewoners. Wat wetenschap werkelijk is, weet ik ook niet. Mij troffen een paar zinnen in Popper's "Logic of Scientific discovery". "De empirische basis van objectieve wetenschap heeft, aldus Popper, niets absoluuts over zich. Wetenschap is niet gebaseerd op vaste grond. De indrukwekkende structuur van haar theorieën rijst als het ware op uit een moeras (of misschien een polder). De palen zijn van bovenaf in het moeras gedreven, maar niet naar beneden naar een natuurlijke of vaste basis. Als we stoppen om de palen dieper te heien is dat niet omdat we vaste grond bereikt hebben. We stoppen eenvoudigweg wanneer we denken dat de palen stevig genoeg zitten om het gebouw te dragen, althans voor het moment. Einde citaat.

De wetenschap is dus niet gefundeerd op vaste grond: als het gebouw voorlopig maar niet inzakt. In de praktijk is de wetenschapsbeoefening verankerd in de werkwijze van een discipline. De verschillen tussen disciplines zijn groot. Een kritische en open instelling ten opzichte van het materiaal van onderzoek is een gemene deler. Alleen het resultaat telt, dat verifieerbaar en falsificeerbaar moet zijn. De manier waarop het resultaat bereikt wordt doet er niet toe, en dit geeft een gigantische vrijheid en ruimte voor eigen creativiteit en aanpak.

Het bedrijven van academisch wetenschappelijk onderzoek is voor een goede Hollandse polderbewoner onbegrijpelijk: wij zoeken voor veel geld dingen uit, en bieden de resultaten gratis aan aan de gehele wereld. Wij genereren vrij toegankelijke kennis op de volgende wijze. De onderzoekcentra zoals de universiteiten vormen een soort winkelcentra: collectieven van onafhankelijke kleine zelfstandigen, of soms consortia. Iedere winkel wordt bezet door één onderzoeksgroep. De winkel biedt onderzoek op het gebied van een bepaald thema, bij voorbeeld oppervlakte chemie aan. De klanten zijn inkopers van toegankelijke kennis: vertegenwoordigers van de 1e geldstroom: de universiteit zelf; de 2e: semi-overheids-organisaties als de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek NWO en haar onderafdelingen zoals FOM, NWO-CW, STW etc; en de 3e geldstroom: alle anderen, waaronder het bedrijfsleven en de Europese Unie. Merkwaardig is, dat vele van deze organisaties zelf niet voldoende kennis in huis hebben om de aan te kopen wetenschap inhoudelijk te beoordelen. Zij besteden dat dan uit aan onafhankelijke deskundigen, of peers. Dit zijn collegae uit binnen- of buitenland. Het werk van de groepleider of hoofd van de winkel is te vergelijken met werk in het MKB (midden- en kleinbedrijf), schipperen met de regels en wensen van alle klanten en de door hen ingehuurde beoordelaars. Omdat de opdrachten altijd tijdelijk van aard zijn is een

belangrijk aspect van de bedrijfsvoering de continuïteit van onderzoek. Dit is speciaal van belang omdat het eigenlijke werk door studenten en promovendi in een opleidingssituatie wordt gedaan en deze vele van hun kennis meenemen bij vertrek. Deze nadruk op continuïteit heeft het gevaar van inflexibiliteit en verstarring in zich.

De rapportage van het product gebeurt op twee niveaus: het belangrijke niveau zijn de publicaties in internationale tijdschriften, die zorgdragen voor de kwaliteit, die wordt getoetst. Het wetenschappelijk gezien minder belangrijke niveau is de directe rapportage aan de opdrachtgever. Iedere opdrachtgever heeft zo zijn eigen formaat. Het zou fantastisch zijn als de winkel een jaarverslag zou kunnen publiceren, bijvoorbeeld gebundeld in het verslag van zijn winkelcentrum, waarin over al het werk verantwoording wordt afgelegd en wordt aangegeven welke klant heeft betaald voor welk deel van het onderzoek. Wanneer dit ook nog elektronisch gebeurt, kunnen de klanten in hun rapportage simpelweg verwijzen naar het verslag per winkel. Dit zou weer meer tijd beschikbaar brengen voor de kernactiviteit: onderzoek. Ook zou een deel van deze tijd ingezet kunnen worden voor een zeer belangrijke rapportage: naar een breder deel van de samenleving. Als iedere onderzoekswinkel een saillant resultaat zou presenteren op een manier, die ook toegankelijk is voor leerlingen van het VWO, dan zou de brug tussen VWO en WO alweer wat steviger zijn.

Traditioneel hebben de Europese universiteiten gekozen voor een vrij grote bezetting per winkel. Er is een vaste staf van onderzoekers, die geen eigen winkel voeren. Zolang deze stafleden zich nog in een 'leerfase' bevinden is daar niets op tegen, maar naar mijn gevoel is het Amerikaanse systeem: waar ieder staflid op termijn hooger wordt of het winkelcentrum verlaat, te prefereren. Ik ondersteun derhalve het voornemen van onze faculteit om nieuwe medewerkers op een 'tenure track' systeem aan te nemen, hopelijk geselecteerd op voornamelijk wetenschappelijke kwaliteit en minder op de richting van hun onderzoek. Kritische grootte van een onderzoekspanning moet daarbij niet uit het oog verloren worden.

De tijdelijke staf van onze winkel is ook van eminent belang: Promovendi, PostDocs en studenten voeren het onderzoek daadwerkelijk uit en zonder hen kan geen product meer worden afgeleverd. Voor de winkelier betekent dit een extra probleem: zodanige producten moeten worden aangeboden dat zowel de klanten als het eigen personeel bereid zijn om daarvoor te gaan. Al met al maakt het draaiend houden van een winkel in wetenschap een functie voor een hoogleraar, die een grote mate van creativiteit vraagt en een grote mate van onafhankelijkheid geeft. Ik hoop, dat dit voldoende is om de beste onderzoekers naar de universiteit te blijven lokken.

Kleine winkels, een vast onderzoeksthema, continuïteit en problemen met kritische grootte: dit alles maakt vernieuwing van de winkel problematisch. Een goede samenvatting is: Schoenmaker houdt je bij je leest. Dit is redelijk en realistisch maar kan verstikkend werken. Omdat het creatieve proces in het onderzoek een verwantschap

met de kunst suggereert dringt de vraag zich op: hoe veranderen beeldende kunstenaars hun stijl. Uiteraard ziet met bij kunstenaars een evolutie van hun werk met de jaren, soms ten goede, soms ten kwade. Hun stijl en vormtaal blijft echter bij de meesten behouden in hun gehele werkzame leven. Mijn grote voorbeeld in deze is de schilder Mondriaan. Wanneer men zijn late werk naast zijn eerste werk hangt, dan zal moeilijk vast te stellen zijn dat het werk van dezelfde persoon is. Echter, als men de ontwikkelingslijn van zijn werk ziet, dan is het duidelijk dat alle overgangen van stijl naar stijl vloeiend zijn geweest.

Er is een mogelijkheid om Mondriaan's voorbeeld enigszins te volgen en tot verandering binnen een bestaande wetenschaps-winkel komen: namelijk het aanstellen van aanstellen van jonge nieuwe ambitieuze onderzoekers. Zij kunnen een lopende lijn verleggen en nieuwe openen. Ik ben erg blij dat de Koninklijke Nederlandse Academie van wetenschappen Dr Mischa Bonn binnen mijn winkel heeft aangesteld. Het is van het grootste belang binnen onze vergrijzende universiteit dat veel jonge en talentvolle onderzoekers worden aangetrokken.

Na het onderzoek nu het onderwijs. Het zou onverstandig zijn als de universiteit zich ook hier als winkelcentrum presenteert: onderwijs zonder enige structuur is inefficiënt en ongewenst. Voor het onderwijs zie ik de Universiteit als tour operator: er is een groot aantal reizen in het pakket. De elementen van de reis zijn vaak losstaand en hebben soms ook geen samenhang. De reiziger, de student moet hopen op aansluiting van de verschillende programma onderdelen. Enige aanpassing en eigen initiatief van de studenten is ook wenselijk: ze moeten niet als Japanse toeristen achter een Japanse gids met een vlag aansjokken. Als docent ben je verantwoordelijk voor een stuk van het onderwijs, en het collectief of de onderwijs directeur moet zorgen voor samenhang. Het onderzoek houdt de docent scherp voor het onderwijs. De universiteit als geheel zorgt voor de totale infrastructuur, die het aanzien van de stad Leiden mede bepaalt.

Onze reizen voor chemie worden vernieuwd en mooi opgetuigd. Toch valt het aantal studenten tegen. Dit is zorgwekkend. Over de oorzaken van het tekort wordt veel gespeculeerd. Ik noem: de zwaarte van de studie in vergelijking met andere. Dit is altijd zo geweest. Ik hoop, dat de studenten verenigingen de bèta-studenten ook gastvrijheid en vermaak kunnen bieden in overeenstemming met de zwaarte van de studie. Een andere oorzaak van het tekort is dat de studenten vaak onbekend blijken met de mogelijkheden, die de studie biedt. De zogenaamde 'science based professional' blijkt op heel veel posities aan de slag te kunnen. Het is dus niet waar dat een bèta-studie uitsluitend opleidt voor onderwijs of onderzoek. Ik hoop, dat de nieuwe maatschappij gerichte variant van de doctoraal opleiding hier nieuwe mogelijkheden geeft om studenten te werven, die nu voor economie of bedrijfskundige opleidingen kiezen, maar goede bèta's zouden kunnen zijn. Tenslotte, de arbeidsmarkt positie voor bèta's

is bij vlagen slecht. Dit komt omdat de industrie de deuren dichtdoet zodra het wat slechter gaat. Het korte termijn denken van de industrie verhoudt zich slecht met de opleidingscyclus van 5-10 jaar. Campagnes om studenten te werven en voorlichting over bèta-studies te geven zijn dus zeer wenselijk. Ik hoop, dat de initiatieven van de Nederlandse Natuurkundige Vereniging om via world-wide-web activiteiten scholieren beter te informeren niet direct worden gesmoord door de onderlinge concurrentie van universiteiten.

Een chronisch tekort aan bèta's is zeer schadelijk voor onze samenleving. Juist nu de mondiale global village aan het ontstaan is is een bèta-benadering van die global village met betrekkelijk objectieve en kwantitatieve modellen te verkiezen boven het wederzijds uitdragen van geloof, politieke voorkeur en wapentuig. Wat ons eigen land betreft: inzicht in technologische ontwikkeling is te cruciaal om aan anderen over te laten. Op vele takken van b.v. computertechnologie tellen we als land en als Europa totaal niet meer mee: ik hoop dat het belang van Nederland straks niet uitsluitend polders met klompen, tulpen en windmolens is. Meer bèta's is cruciaal.

Het management van onderwijs en onderzoek is een essentiële taak van de universiteit. Ik heb al aangegeven dat de positie van de universiteit ten opzichte van beiden verschillend is. Vroeger was mijn visie op Universitair management simpel: het is een contradictio in terminis. Immers, de studenten populatie behoort niet tot de meest geordende, zoals een fietstocht door Leiden snel aantoonde. Hoogleraren zijn ook niet voor niets verstrooid. Ieder land krijgt het politiek systeem wat het verdient, iedere organisatie krijgt het management dat hij verdient. Als dit alles leidt tot het verwaarlozen van het universitaire management is dat verkeerd. De waarborging van continuïteit en ondersteuning is essentieel. Daarnaast moet de leiding ook de verbinding vormen tussen zeer diverse winkelcentra en tour operators, en dat alles zonder een Kafka structuur te creëren. Universitair management is de ultieme uitdaging voor goede managers. Ik hoop, dat het de bestuurders van deze universiteit lukt om de Alma Mater ook door deze dynamische, maar ook harde tijd te loodsen.

Dichter bij huis. De faculteit wiskunde en natuurwetenschappen is gesplitst in 9 instituten. Ik kom van een instituut: AMOLF. Dit is een echt Instituut, namelijk een gebouw voor het instituut alleen met een eigen voordeur en lange tijd geen andere deur. Het heeft een dak en een kantine. Alles binnen de muren is van het instituut en voor het instituut. Het laat een groep mensen samen wetenschap bedrijven. Iedereen is op loop afstand van elkaar. Bij de universiteit zijn instituten vaak veel diffuser: ze delen soms, maar niet altijd, faciliteiten. Sommige zaken zijn centraal andere decentraal geregeld. De resulterende verwarring komt de efficiëntie van het werk niet ten goede. De balans tussen centraal en decentraal is naar mijn gevoel nog niet gevonden.

De traditie van deze plechtigheid staat inzet van audiovisuele middelen niet toe. Het is hopelijk mooi om te horen waartoe het gesproken woord alleen in staat is. Maar toch geven traditionele universitaire plechtigheden mij soms het gevoel van een openlucht museum en demonstraties van oude ambachten voor toeristen. Met name voor technische verhandelingen zijn ondersteunende beelden wel erg prettig. Enige daarvan, van belang voor deze lezing, kunt u, evenals mijn oratie, vinden door naar www.leidenuniv.nl te gaan en daar via faculteiten naar het Leids Instituut voor Chemie.

Nu wil ik overgaan naar een globale bespreking van mijn vak. Dit is verbonden aan problemen van milieu-vervuiling en energiegebruik. Als China en India met al hun inwoners zich de 'American way of life' aanmeten met het daarbij behorende grondstoffen- en energie-gebruik zal dit mogelijk catastrofale gevolgen hebben voor klimaat en verdeling van grondstoffen. Daarom zijn ontwikkelingen op het gebied van technologie om het aankomend energie probleem voor te blijven zeer wenselijk.

Het beeld, dat ik u nu geef zal u voor uw geestesoog moeten ontwikkelen. Laten we een zeer simpele chemische reactie beschouwen: de verbranding van koolmonoxide of CO met zuurstof O₂ tot kooldioxide CO₂. De vergelijking luidt: $2 \text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{CO}_2$. Dit is het verbranden van het stadsgas, dat vroeger uit de gasfabriek kwam. Wanneer de reactie niet wordt aangestoken gebeurt er niets. CO en O₂ kunnen naast elkaar bestaan. Om de reactie te laten verlopen moet eerst het zuurstof molecuul uiteenvallen. Dit kost veel energie. Deze dissociatie-energie wordt in een vlam opgebracht door de hoge temperatuur. Om te verbranden moet u eerst hoog verwarmen. Dit is inefficiënt en vervuilend. Daarna krijgt u de energie weer terug door het maken van de O-CO binding.

Om de verhitting te voorkomen is er een truc. U neemt een stof, die graag een verbinding vormt met zuurstof, de stof M. Stel, dat met deze stof de reactie $\text{M}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{O-M-M-O}$ spontaan, dus zonder verwarmen, verloopt. Kennelijk is de energie die u krijgt om de nieuwe stof te vormen groter, dan het kostte om de zuurstofbinding te breken. Netto valt de zuurstof dus spontaan uit elkaar. Wat zijn we hiermee opgeschoten? Niets, tenzij de CO ook een verbinding kan maken met het M. Nu bevinden het O-atoom en het CO-molecuul zich vlak bij elkaar, gebonden aan een M-atoom. Nu kan het CO₂ gevormd worden en het M komt weer vrij. In de totale reactie vergelijking komt M dus niet voor. M is een makelaar: het brengt de O₂ in de juiste toestand om te reageren door de binding te breken. Daarin investeert de makelaar, maar dat krijgt hij later weer terug. Vervolgens nodigt M ook een CO uit en het contract wordt gesloten. Zonder makelaar zouden O₂ en CO eindeloos lang om elkaar blijven bewegen en een reactie treedt niet op. De stof M heet een katalysator. M slecht barrières en zorgt dat een chemische reactie wordt versneld en in een bepaalde richting verloopt. In vrijwel ieder industrieel chemisch proces wordt een katalysator gebruikt om de reacties zo efficiënt mogelijk in de gewenste richting te laten verlo-

pen. De omzet in de chemische proces industrie die gerealiseerd wordt met katalysatoren loopt in de duizenden miljarden dollars.

Welke is nu die magische stof M, die dergelijke reacties versnelt. Het moet een stof zijn, die gemakkelijk verbindingen maakt met vele elementen. Verder moet het een stof zijn, die enige moleculen tegelijk kan binden. Het moet een groot atoom zijn met veel elektronen, waarmee het chemische verbindingen kan maken. Atomen van metalen zoals nikkel, koper, zilver, goud, rhodium, ruthenium en platina hebben grosso modo deze eigenschap. Hoe bieden we dit atoom aan onze chemische reactanten aan? Vrije metaal-atomen zijn niet stabiel en plakken aan elkaar om een vaste stof te vormen. Daarnaast zijn ze giftig. We verpakken de atomen dus in grote stabiele moleculen die tussen de reactanten door bewegen. Dit is een voorbeeld van homogene katalyse: de katalysator en de reactanten bevinden zich alle in dezelfde aggregatietoestand, bijvoorbeeld een vloeistof. De metaal-atomen kunnen ook als stukjes metaal worden aangeboden, bv als kleine bolletjes. We spreken dan van heterogene katalyse. De katalysator bevindt zich nu bijvoorbeeld in de vaste fase en de reactanten en producten zijn gassen. Ik zal nu verder spreken over heterogene katalyse.

Een goed voorbeeld van een heterogene katalysator bevindt zich in de uitlaat van een moderne auto. Het doel van de katalysator is de CO, stikstofmonoxide NO, en slecht verbrande benzine om te zetten naar stikstof N₂ en CO₂. De katalysator is een keramisch blok met vele kleine buisjes, waardoor de uitlaatgassen stromen. In de buisjes bevinden zich kleine bolletjes van metalen, bijvoorbeeld platina en rhodium. Op het oppervlak van de bolletjes vinden de gewenste reacties plaats. Aan deze katalysatoren kleven enige bezwaren, zij werken niet bij koude start en de vervuiling van de auto is dan zeer groot. De hoeveelheid edele metalen, met name rhodium, is beperkt en de kostprijs is zeer hoog. Een auto met katalysator zal nimmer aan de strengste emissie eisen van uitlaatgassen voldoen. Verder onderzoek is dus nodig. Men zou dit kunnen doen door verschillende katalysatoren te bereiden en in de uitlaat van een auto te testen. Dit is een extreem dure procedure. Daarom worden kleine test reactoren gebruikt, die uitlaatgassen reinigen. Door ervaring en slim proberen probeert men nu de beste katalysator te vinden. Dit is zeer arbeidsintensief en daarom worden nu robots ingezet om het parallel testen van katalysatoren mogelijk te maken. Voor de industrie zal dit een aantal gevallen de voor de hand liggende methode zijn. Als de robots iets goeds vinden is dat mooi, en het doet er niet toe hoe iets werkt als het maar werkt.

Als er niets gevonden wordt zijn nieuwe concepten nodig. Nu is inzicht in het verloop van de oppervlakte reacties handig om verder te komen. Het inzicht dat men wil is hoe de reactie op moleculaire schaal verloopt: met andere woorden hoe bewegen de moleculen ten opzichte van elkaar wanneer de reactie verloopt. Een heterogene katalytische reactie heeft de volgende elementaire stappen. 1) de adsorptie, het

plakken van de reactanten uit de gasfase op het oppervlak; 2) het dissociëren, uiteenvallen van sommige reactanten (bv $O_{2,a} \rightarrow 2 O_a$); 3) het naar elkaar toe diffunderen of wandelen van de geadsorbeerde deeltjes; 4) het verlopen van de chemische reactie tussen de geadsorbeerde deeltjes; 5) het desorberen of wegvliegen van de reactie producten. Dit schema is ingevoerd door Langmuir en Hinselwood. De eerste was onderzoeker in het laboratorium van General Electric, de tweede hoogleraar in Oxford.

Dikwijls is er echter meer informatie over de details van de stappen nodig. Om dat inzicht te verkrijgen moeten we met een moleculaire bril kijken naar de werkende katalysator. Welke die bril ook is, hij kan niet door de wand van de uitlaat van een auto kijken, en we zullen de katalysator moeten bloot leggen om inzicht in zijn werking te verkrijgen. We doen dat door model katalysatoren te maken.

Deze model katalysatoren brengen ons terug naar de polder: in plaats van een bolletje in een keramische doos, nemen we een vlak plaatje dat toegankelijk is voor waarneming van buitenaf. We nemen een metaaloppervlak als model van de praktische werkelijkheid. Op dit plaatje kunnen we de verschillende stappen van de oppervlakte reactie individueel waarnemen. We doen dit met instrumenten die in staat zijn eigenschappen van geïsoleerde atomen en moleculen waar te nemen. Deze instrumenten zijn verre van simpel in het gebruik en worden meestal gebouwd door natuurkundigen.

Het onderzoek aan katalyse is dus multidisciplinair. Het heeft aspecten van natuurkunde en van scheikunde in zich. Voor een persoon zoals ik, die zich altijd op het grensvlak van deze disciplines heeft bewogen is het een interessant gebied. Wat zijn deze disciplines: simpel gezegd is natuurkunde koken van water en scheikunde koken van een ei. Natuurkunde gaat over energie en eigenschappen van materie, scheikunde is het maken van nieuwe materie. Deze vakken raken soms sterk aan elkaar, maar wil niet zeggen dat fysici en chemici dezelfde mensen zijn. Integendeel: de inhoud van hun onderzoek is soms vrijwel hetzelfde, maar hun methodologie en daardoor hun instelling is vaak zeer verschillend. Ik verwacht dan ook niet dat deze oude vakken als zodanig zullen verdwijnen. Wel hoop ik dat de interactie groter wordt. Een stap, die wij in ons gebied hebben gezet is het oprichten van een gemeenschappelijk van Marum colloquium op het gebied van de oppervlakken wetenschappen, met inbreng van astronomen, chemici en fysici. Het reflecteert het werk van van Marum, die zich aan het einde van de 18 eeuw in Haarlem met bijna alle vakken bezighield (toen kon dat nog) en die het eerste onderzoek naar reacties aan oppervlakken in Nederland heeft uitgevoerd.

Een vereenvoudiging, die de natuurkundigen bij onze oppervlakte chemie experimenten hebben geïntroduceerd is het gebruik van zogenaamde éénkristallen. Voor

deze kristallen vertaalt de microscopische structuur zich naar macroscopische structuur. U kunt zich dit voorstellen aan het plafond van deze zaal: het basispatroon herhaalt zich voortdurend. In een éénkristal zijn de atomen op altijd dezelfde manier gerangschikt, net als de balken en latten aan deze zoldering. Door gebruik te maken van de symmetrie van het vaste stof oppervlak kan met een aantal technieken de structuur van dat oppervlak met de daarop aanwezige atomen en moleculen worden bepaald. De toename van de symmetrie van het oppervlak kan afbreuk doen aan het realiteitsgehalte van de met dat oppervlak verrichte metingen. Als onze meettechnieken alleen eigenschappen met hoge symmetrie zien, kunnen ze vele belangwekkende aspecten van het oppervlak missen. Kijkt u bijvoorbeeld naar de luchters. Deze zijn op regelmatige wijze in het plafond opgehangen. Iedere luchter is ook prachtig symmetrisch, maar als u goed kijkt ziet u dat ze ten opzichte van elkaar gedraaid zijn. Dat zou ze voor diverse oppervlaktegevoelige technieken onzichtbaar maken, terwijl ze er toch zijn. Nog veel erger wordt het met de noodverlichting, die u ook ziet. Deze kleine lampjes lijken de symmetrie van het plafond niet te volgen. Men kan ze als het ware als defecten van de perfecte structuur zien. In de katalyse zijn dikwijls de defecten op atomaire schaal plaatsen, waarop chemische reacties zich bijvoorbeeld afspelen.

Het plafond bedekken met ballonnen is een goede analogie voor chemische reacties aan oppervlakken. Ik herinner u aan de stappen in de Langmuir-Hinshelwood reactie. De eerste is de adsorptie. Wanneer u een ballon oplaat, zal deze tegen het plafond blijven plakken. Schiet u daarentegen een voetbal tegen het plafond, dan kaatst deze terug. Waar hij het plafond raakt bepaalt waar hij terecht komt. Door nu atomen op oppervlakken te laten vallen, een voor een, kunnen we zien of ze weerkaatsen, als voetballen, of blijven plakken, als ballonnen. U kunt zich voorstellen, dat als een voetbal tegen een met ballonnen bedekt plafond wordt gegooid, hij anders weerkaatst, dan wanneer er geen ballonnen aanwezig zijn. Zo kunnen we nagaan of een oppervlak bedekt door atomen verandert van chemische eigenschappen. Zo hebben wij recent gezien, dat een Ruthenium oppervlak vrijwel alle NO moleculen die erop vallen vast plakt. Bedekken we dit oppervlak met waterstof atomen, dan verandert het in een spiegel voor NO moleculen: de reactiviteit is totaal veranderd.

De botsingen van ballonnen en voetballen verlopen zo langzaam, dat wij ze kunnen zien. Botsingen van atomen en moleculen verlopen veel sneller. Een mens heeft een afmeting van ongeveer 1 meter en beweegt met hoogstens 10 meter per seconde. Een sprinter beweegt dus over zijn eigen lengte in ongeveer 0.1 seconde. Een atoom beweegt met ongeveer 300 meter per seconde. Het is ongeveer 10^{-8} cm lang. In een tijd van 3×10^{-13} seconde, 300 femtoseconde of 0.3 picoseconde beweegt het over zijn eigen lengte. Een verschil van een factor 300 miljard. Het waarnemen van de beweging van een mens gaat dus gemakkelijker van een atoom. Hoe kunnen we nu toch kijken hoe die botsing van een atoom, ballon of voetbal in onze analogie, verloopt?

We kunnen dat doen door deze zaal te bedekken met grote teilen. Ik schiet van deze kathedraal ballen met een bepaalde snelheid naar het plafond. Als ik totaal geblesseerd ben door het schieten van de ballen, tellen we de inhoud van de teilen. We zullen zien dat sommige voller zijn dan andere. Dat betekent dat het waarschijnlijker voor een bal om een bepaalde richting, die van de volle teilen, te vliegen dan in andere. Hoewel we dus niet precies kunnen zien wat er gebeurt wanneer de bal het plafond raakt, kunnen we dit afleiden uit hoe de ballen over de teilen verdeeld zijn.

Maar we kunnen het ook anders proberen. Dit is als het maken van een foto van de winnende goal in de voetbal wedstrijd. Het is niet zo gemakkelijk om op het juiste moment af te drukken. Dat kunnen we oplossen door een snelle, veel fotograferende camera te plaatsen, of misschien wel een filmcamera. Bij voetballen gebeurt dat, zoals wij allen weten, maar de beelden van een dergelijke snelle camera's zijn niet zo scherp. Bij de atletiek wordt dit beter aangepakt. Er is een finish lijn en zodra die wordt aangeraakt wordt een foto gemaakt. De fotofinish. Deze foto is vaak scherper en duidelijker, ook omdat hij op precies het juiste moment gemaakt wordt. Deze technieken wil ik nu ook op oppervlakte-reacties loslaten.

Kunnen we een snelle filmcamera maken? Die camera moet kijken naar een stukje oppervlak met afmetingen van een atoom en ten minste om de picoseconde een foto nemen. Dat betekent dat we 10^{12} foto's per seconde maken. Onder de omstandigheden van onze experimenten is op minder dan 10 van die foto's iets te zien. Niet zo handig dus. We moeten ook een soort fotofinish bouwen. We doen dat op de volgende manier. Het plafond ziet weer vol met te vol geblazen ballonnen. Bovendien hebben we naalden in sommige ballonnen gedaan om te zorgen dat wanneer een dergelijke ballon springt, vele andere ook springen. Dit moet dan maar even onze chemische reactie voorstellen. Hoe maken we nu onze fotofinish foto? Door met een laserstraal een gaatje in de ballon te schieten en onmiddellijk nadat de laserstraal de ballon geraakt heeft een of meer camera's een foto te laten maken. Dan zien we op de foto's de explosies. Het is nu mogelijk om lichtflitsen te maken met een tijdsduur van minder dan 10 femtoseconde. Door twee flitsen kort na elkaar op een oppervlak bedekt met reactanten af te vuren, kunnen we een chemische reactie 'aanzetten' en er een opname van maken. Die opname geeft ons informatie over in welke toestand de moleculen op dat moment in de tijd bevinden. Door bijvoorbeeld de tijd tussen de twee flitsen te variëren kunnen we zien hoe snel een reactie verloopt of weer uitdooft.

Zo spelen zich in de moleculaire polder taferelen af die lijken op wat ik iedere ochtend uit het raam van de trein zie. Voor de vorming van melk is het van belang dat de koe veel drinkt. Een sloot in de polder of een drinkbak is een essentiële plaats in het proces. Ook de melkmachine is tweemaal daags een speciale plaats waar een deel van het proces verloopt. Maar de eigenlijke productie van melk vindt in de gehele weide plaats. Zo leent ons polderland zich voor prachtige analogieën met chemische

reacties op vlakke oppervlakken met stappen en defecten. De vergelijkingen zijn Homerisch, overdreven en gaan maar gedeeltelijk op. Toch is het genereren van dergelijke metaforen een belangrijk product van onze groep. Gewapend met deze beelden kan een student van ons met meer inzicht nadenken over een praktisch probleem uit de katalyse, dan wanneer zij of hij slechts gedachteloze robots proeven kan laten doen.

Tenslotte wil ik mijn lezing wat concreter maken door u een tweetal problemen te noemen, waar we nu aan werken. Aluminium lijkt een edel, onaantastbaar metaal. Dat komt omdat het aluminium oxide, in tegenstelling tot dat van ijzer, zo hard en ondoordringbaar is. Schoon aluminium reageert violent met zuurstof. De zuurstof aluminium binding is de sterkste oxidische binding. Wanneer wij nu O_2 of NO op schoon aluminium laten vallen zouden wij verwachten dat het zuurstof uiteenvalt en beide atomen sterk aan het aluminium hechten. Dit is niet het geval. De kans dat het O_2 het aluminium oppervlak weer verlaat is groot, zo'n 90%. Als O_2 plakt dan valt het uiteen door een O-atoom met grote energie als een raket loodrecht van het oppervlak af te schieten. De beste theoretische modellen die er nu zijn kunnen dit in het geheel niet verklaren. Een zeer wezenlijk ingrediënt lijkt tot ons denken over dit probleem nog niet doorgedrongen te zijn.

Methaan is het molecuul CH_4 . Het is het voornaamste bestanddeel van het huidige aardgas, en komt dikwijls bij de winning van olie naar boven. In de golfstaten weet men niet wat men met dit gas moet en daarom wordt het verbrand. De hoeveelheid van het broeikasgas CO_2 , die daarbij vrijkomt is groter dan door alle verbranding van fossiele brandstoffen in West-Europa. Het is dus van eminent financieel en milieutechnisch belang dit methaan om te zetten in bijvoorbeeld benzine, methanol of koolmonoxide. Hier is een probleem. De belangrijkste en meest toepasselijke uitspraak die u in deze dagen kan doen is uiteraard de volgende: 'de bal is rond'. Dit nu is helaas ook waar voor CH_4 . De waterstof atomen zijn als het ware in het koolstof atoom gekropen en het geheel gedraagt zich als een niet reactieve bal. Slechts door het zeer heet te maken, zoals in een gasvlam, reageert het methaan. Omzetten van methaan in andere stoffen is daardoor moeilijk. Wij onderzoeken of methaan plakt aan een platina oppervlak. Als dit oppervlak vlak is, plakt het methaan in het geheel niet. Brengen wij echter atomaire stappen aan, zodat het er uit gaat zien als een lange trap, dan plakt het wel! De treden van de trap zijn precies een platina atoom hoog. Gestapte oppervlakken kunnen methaan gemakkelijker laten reageren dan vlakke en dit kan een belangrijk ingrediënt zijn van een methaan conversie katalysator.

Het beschreven werk op het gebied van de heterogene katalyse betekent een voortzetting van het werk van mijn voorgangers Wolfgang Sachtler en Vladimir Ponec. Hun werk was altijd gericht op de fundamentele katalyse en ik hoop een waardige opvolger te zijn. Ik dank het College van Bestuur van deze Universiteit en het Bestuur van de Faculteit voor het vertrouwen, dat zij in mij hebben uitgesproken door mij op

deze plaats te benoemen. Mijn werk is altijd sterk bepaald door mijn promotor Professor Joop Los. Zijn nadruk op eenvoud en elegantie in experimenten en in de analyse van die experimenten zijn en blijven mij tot een lichtend voorbeeld. Het grootste gedeelte van mijn wetenschappelijke leven heb ik doorgebracht op het FOM Instituut AMOLF. Ik heb mogen werken onder de inspirerende leiding van alle vier directeuren van AMOLF, Jaap Kistemaker, Joop Los, Frans Saris en Jook Walraven. Het werk met en van mijn medewerkers in de moleculaire bundelgroep is de bron geweest, waaruit al mijn wetenschappelijk werk is voortgekomen. Ik wil hen alle hartelijk danken, en zie het einde van deze groep op AMOLF met enige weemoed naderen. Gelukkig treedt daarvoor de groep in Leiden in de plaats. De samenwerking met Ben Nieuwenhuys, Geert-Jan Kroes, Hella Knegt, Jacques Aarts, Johan Bakker, Mischa Bonn en Rob van Schie geeft mij alle hoop voor de toekomst. Ik ben blij dat we reeds enige excellente promovendi en postdocs hebben kunnen werven en ik hoop dat er nog velen zullen volgen. De goede sfeer en collegialiteit op het Leids Instituut voor Chemie geven mij veel vertrouwen in de toekomst van het Instituut. Ik bewonder onze Directeur, Jan Reedijk, wegens zijn inzicht, inzet en werkkraft. Ik beschouw het als een bijzonder voorrecht dat ik met de op hun terrein slimste en scherpste jonge mensen gezamenlijk op het gebied van de fundamentele scheikunde en natuurkunde bezig mag zijn.

Ik prijs me zeer gelukkig, dat mijn moeder zonder wiens zorg deze oratie er nooit geweest zou zijn, hier vanmiddag aanwezig is. Tenslotte is het mij onmogelijk om dit werk te doen zonder de hechte thuisbasis van mijn gezin. Lieve Steven en Maarten, zonder jullie EK, hockey wedstrijden, huiswerk, skiafdalingen en virtuele reizen zou ik niet kunnen doen wat ik nu doe. Lieve Ilona, jouw nieuwe winkel heeft hardere klanten dan de mijne. Ik weet zeker dat wij samen ons gezin en onze winkels nog lang en met heel veel plezier zullen kunnen drijven.

Ik heb gezegd.

