



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Het op atomaire schaal afbeelden van chemische reacties op oppervlakken

Groot, I.M.N.

Citation

Groot, I. M. N. (2025). *Het op atomaire schaal afbeelden van chemische reacties op oppervlakken*. Leiden. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/4198299>

Version: Publisher's Version

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

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/4198299>

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

Prof.dr. Irene M.N. Groot

Het op atomaire schaal afbeelden van chemische reacties op oppervlakken



Universiteit
Leiden

Bij ons leer je de wereld kennen

Het op atomaire schaal afbeelden van chemische reacties op oppervlakken

Oratie uitgesproken door

Prof.dr. Irene M.N. Groot

bij de aanvaarding van het ambt van hoogleraar

Surface and Interface Science of Chemie van oppervlakken en grensvlakken

aan de Universiteit Leiden

op vrijdag 28 maart 2025



**Universiteit
Leiden**

Waarde rector magnificus, geacht faculteitsbestuur, waarde collega's, studenten, familie en vrienden, lieve Paul, David en Eric,

Kijkt u eens even om u heen: bijna alles wat u ziet, is gemaakt met behulp van katalyse. Zonder katalyse, geen brandstoffen; zonder katalyse, geen voedsel; zonder katalyse, geen kleding; zonder katalyse, geen medicijnen. Maar zonder katalyse, zou u hier ook niet zitten. In uw lichaam vinden er voortdurend chemische reacties plaats, die gekatalyseerd worden door enzymen. Maar ook bijna alle chemische reacties die we gebruiken om bijvoorbeeld brandstoffen of medicijnen te maken in de industrie, worden uitgevoerd met behulp van katalysatoren. Katalysatoren zijn dus van levensbelang: ongeveer 90% van alle chemische reacties die dagelijks plaatsvinden, gebeuren met behulp van katalysatoren. En als u meer in economie geïnteresseerd bent: ongeveer een kwart van het wereldwijde bruto internationaal product wordt verdiend met behulp van katalyse.

Wat zijn katalysatoren? Om dat uit te leggen, moeten we eerst even een stapje terugdoen. Ik ben chemicus, en chemici maken stoffen en materialen. Dat doen we met behulp van atomen. De bijbel van een chemicus is het periodiek systeem. Dat is een tabel waarin alle atomen die in het heelal voorkomen gerangschikt staan. Door atomen met elkaar te laten reageren, kunnen we moleculen maken, en daarmee vervolgens nieuwe stoffen en materialen. Om dit beter te begrijpen, wil ik een analogie gebruiken. Zie de atomen als legosteentjes, waarmee we de onderdelen van een huis en vervolgens het huis zelf gaan bouwen. De onderdelen van het huis, zoals bijvoorbeeld muren, ramen, en deuren zijn de moleculen, en het huis is de uiteindelijke stof of het materiaal, bijvoorbeeld brandstof of kleding. In sommige gevallen kunnen we dat huis gewoon bouwen, maar in de meeste gevallen hebben we nog gereedschap nodig. Dat gereedschap, dat zijn de katalysatoren. Ze helpen mee om het huis te bouwen, maar zijn uiteindelijk geen onderdeel van het huis zelf.

Oftewel, katalysatoren zijn hulpstoffen, die nodig zijn om ervoor te zorgen dat een chemische reactie goed verloopt.

Een goede katalysator heeft de volgende drie eigenschappen. Ten eerste moet hij actief zijn. Dit betekent dat de katalysator per aanwezig atoom in zo kort mogelijke tijd zoveel mogelijk producten, bijvoorbeeld een medicijn, moet maken. Want hoe meer katalysator er nodig is, of hoe meer tijd het kost om iets te maken, hoe duurder het wordt. Ten tweede moet een goede katalysator stabiel zijn: hij moet zo lang mogelijk chemische reacties laten gebeuren zonder kapot te gaan. Als een katalysator kapot is gegaan, moet hij vervangen worden, waarbij de chemische fabriek stil gelegd moet worden. Dit kost allebei een hoop geld. En ten slotte, een katalysator moet selectief zijn. Dit betekent dat hij in de chemische reactie de juiste producten moet maken. Met wol en breinaalden kun je een trui maken, maar ook sokken. En je wilt geen sokken breien, als je een nieuwe trui nodig hebt. Dit geldt ook in de chemische industrie, of in je lichaam: het is belangrijk dat het juiste product gemaakt wordt.

Het bekendste voorbeeld van een katalysator, is de autokatalysator. Zonder die katalysator zouden er bij het verbranden van benzine, de chemische reactie die ervoor zorgt dat uw auto beweegt, heel veel gevaarlijke en giftige stoffen vrijkomen. Door een katalysator toe te voegen, kunnen die giftige stoffen omgezet worden in minder gevaarlijke.

De mensheid maakt al meer dan 13 000 jaar gebruik van katalyse. Het oudst bekende katalytische proces is de reactie om uit suiker alcohol te maken met behulp van gist als katalysator. In de laatste 100 jaar zijn we op steeds grotere schaal gebruik gaan maken van katalyse. Maar ondanks dat, begrijpen we eigenlijk nog steeds niet hoe het precies werkt. De reden hiervoor is dat een katalysator een ontzettend ingewikkeld materiaal is dat uit vele verschillende soorten atomen en moleculen bestaat. In grote lijnen bestaat een katalysator uit metalen nanodeeltjes, heel kleine deeltjes, waarop de reactanten zich vasthechten en met elkaar reageren tot nieuwe moleculen. Dit is de zogenaamde actieve fase van de katalysator, de plek waar de magie plaatsvindt. Het is gebleken dat hoe kleiner deze deeltjes, oftewel hoe minder atomen zij bevatten, hoe beter de katalysator

werkt. Maar helaas is het zo, dat kleinere deeltjes als gevolg van de temperatuur die nodig is om de reactie te laten verlopen en de aanwezigheid van de gasmoleculen tijdens de chemische reactie de neiging hebben samen te gaan klonteren, en daardoor minder actief worden. Om dit te voorkomen worden deze metalen nanodeeltjes vastgezet op een dragermateriaal. Vervolgens worden er nog andere atomen, zogenaamde promotoren, toegevoegd die ervoor zorgen dat de katalysator nog wat actiever en stabiel wordt, of om te zorgen dat in de chemische reactie de gewenste producten worden gevormd. Ten slotte worden er nog bindmaterialen toegevoegd om te zorgen dat de katalysator niet uit elkaar valt in de chemische fabriek. Alles bij elkaar is dit dus een enorm ingewikkeld materiaal, dat niet zo makkelijk onderzocht en begrepen kan worden. Daarom worden veel chemische reacties en katalysatoren in de chemische industrie gevonden via trial and error. En hoewel dat op zich best goed lijkt te werken, zijn we het erover eens dat om nieuwe katalysatoren te kunnen maken, die we nodig hebben om de menselijke invloed op klimaat en planeet te verminderen, en om onze huidige welvaart te behouden of te vergroten, we katalyse eerst echt zullen moeten begrijpen. Om die reden wordt onderzoek naar katalyse vaak uitgevoerd met behulp van vereenvoudigde modelsystemen, maar wel systemen die de cruciale componenten van echte katalysatoren bevatten.

Het doel van mijn onderzoek is dus het begrijpen van katalyse. Wat maakt dat de ene katalysator zeer geschikt is voor een bepaalde chemische reactie, maar hopeloos presteert voor een andere chemische reactie? Waarom maakt het toevoegen van een bepaald extra atoom in sommige gevallen de katalysator beter, maar in andere gevallen juist slechter? Waarom gaan de nanodeeltjes soms wel en soms niet klonteren? Waarom is platina zo'n ontzettende goede katalysator voor heel veel chemische reacties? En waarom is goud juist in veel gevallen geen goede katalysator? Dit is een aantal van de vragen waar ik mij dagelijks mee bezighoud. En die ik probeer te beantwoorden door het op atomaire schaal afbeelden van chemische reacties op oppervlakken. Dit is dan ook de titel van mijn oratie.

Ik zal nu eerst de cruciale onderdelen van deze titel, en dus van mijn onderzoek, toelichten. Ten eerste, wat is een chemische reactie? Zoals u begrepen hebt uit mijn eerdere analogie is een chemische reactie het proces van het bouwen van een huis waarbij atomen, de legosteentjes, reageren tot moleculen, de ramen, muren, en deuren van het huis, en de moleculen vervolgens het complete huis vormen, de nieuwe stoffen en materialen die chemici maken. Deze stoffen en materialen kunnen van alles zijn: van brandstoffen tot medicijnen, en van voedsel tot kleding.

Ten tweede, waarom op atomaire schaal? Om een chemische reactie echt te kunnen begrijpen, ben ik ervan overtuigd dat we die moeten bestuderen op het niveau van de kleinste bouwstenen, en dat zijn de atomen. Het zijn de atomen die met elkaar reageren om stoffen en materialen te maken.

Ten derde, waarom oppervlakken? De reden hiervoor is dat de chemische reactie plaatsvindt op het oppervlak, oftewel aan de buitenkant, van de katalysator. Ook een katalysator, die niets anders is dan een materiaal met speciale eigenschappen, bestaat uit atomen. En alleen op de atomen die aan de buitenkant, oftewel aan het oppervlak van de katalysator zitten, kunnen de atomen en moleculen, die de chemische reactie zullen ondergaan, zich vasthechten. Zij zijn niet in staat binnen te dringen in het materiaal.

En ten slotte, wat bedoel ik met afbeelden? Hiermee bedoel ik dat wij letterlijk proberen plaatjes te maken van het katalysatoroppervlak terwijl daar de chemische reactie plaatsvindt. Maar waarom zouden we plaatjes willen maken? Dat kan kort maar krachtig samengevat worden met de volgende twee spreekwoorden: "Een beeld zegt meer dan duizend woorden" en "zien is geloven".

Hoe klein is een atoom eigenlijk? En hoe kun je dat in beeld brengen? Een atoom is ongeveer 1 Ångström groot. Een Ångström is gelijk aan 10^{-10} m, oftewel we delen een meter door 10

miljard. Dit is ongelooflijk klein. Eén van de kleinste dingen die je nog redelijk makkelijk met je ogen kunt zien, is een haar. Een haar is ongeveer 500 000 keer zo breed als een atoom. Je kunt je dus voorstellen dat er speciale apparatuur nodig is om atomen in beeld te kunnen brengen. Die speciale apparatuur is een microscoop. Dat woord komt uit het Grieks waar mikros “klein” betekent, en skopein “nauwkeurig bekijken” of “onderzoeken”. De meesten van jullie zullen wel eens met een microscoop naar bijvoorbeeld een cel hebben gekeken tijdens de biologieles. De microscoop vergroot het beeld van de cel zodat je het met je ogen kunt zien, zolang je door de microscoop blijft kijken. Maar hoe verhoudt zich de grootte van een cel tot de grootte van een atoom? Kunnen we met een microscoop uit de biologieles atomen zien? Een cel is ongeveer 10 duizend keer zo groot als een atoom, en nee, met een gewone microscoop kun je geen atomen zien, die zijn daar te klein voor. Dus hoe doen we dat dan?

We maken daarvoor gebruik van een zogenaamde rastertunnelmicroscoop. Deze microscoop werd in 1981 ontwikkeld door Gerd Binnig en Heinrich Rohrer. In de wetenschappelijke wereld zeggen we altijd dat je een eventueel Nobelprijswaardige ontdekking in je jonge jaren moet doen, en dat je dan vervolgens moet wachten tot je oud en grijs bent voor je de Nobelprijs krijgt. Dit was niet het geval voor Binnig en Rohrer. Slechts 5 jaar na hun ontwikkeling van de rastertunnelmicroscoop konden zij al naar Stockholm afreizen om de Nobelprijs in ontvangst te nemen. Dit geeft wel aan hoe belangrijk deze ontdekking was voor de wetenschap. Ter illustratie, tegenwoordig heeft elk natuur- of scheikundig laboratorium in de wereld wel één of meerdere van deze microscopen staan. Hier in Leiden bijvoorbeeld hebben we er ongeveer 15.

Hoe werkt een rastertunnelmicroscoop? Op een oppervlak dat je wilt meten, breng je een spanning aan. Vervolgens nader je met een metalen tip, waar op het uiterste puntje slechts één atoom zit, dit oppervlak. Je brengt de tip heel dichtbij, namelijk tot ongeveer een Ångström, oftewel er zit nu ongeveer een

afstand van 1 atoom tussen het uiterste atoom van de metalen tip, en de atomen in je oppervlak. Doordat er een spanning staat op je oppervlak, gaan er elektronen bewegen tussen de tip en je oppervlak. Dit wordt tunnelen genoemd. Vervolgens ga je met de tip in een rasterbeweging over je oppervlak heen, zodat er elektronen kunnen tunnelen tussen alle atomen in het oppervlak en de tip. Vandaar dus de naam: rastertunnelmicroscoop. Raster omdat we in een rasterbeweging over het oppervlak gaan om alle atomen te meten, tunnel vanwege de tunnelstroom die gaat lopen tussen oppervlak en tip, en die het afbeelden mogelijk maakt, en microscoop, omdat we kleine dingen kunnen bekijken. Met behulp van een computer kun je vervolgens de gemeten tunnelstroom omzetten in een plaatje van het oppervlak, waarin je dus de atomen kunt zien! Ik kan mij nog goed de eerste keer herinneren dat ik een plaatje van atomen zag, gemaakt met behulp van een rastertunnelmicroscoop, en hoe blij ik daarvan werd. En nog beter, de eerste keer dat ik zelf zo'n plaatje heb gemaakt. Dit zijn geen gemakkelijke experimenten, en de triomf is dan ook groot als het gelukt is. En dan nog een leuk weetje over deze microscoop: je kunt de tunnelstroom niet alleen meten, maar je kunt hem ook horen! De eerste keer dat ik iemand achter de microscoop zag zitten met een koptelefoon op, en dit was nog voordat iedereen permanent met muziek op zijn oren rondliep, en diegene zei dat hij naar de atomen luisterde, dacht ik dat ik voor de gek werd gehouden. Maar nee, hoe de tunnelstroom klinkt, vertelt je iets over hoe goed je de parameters van de rastertunnelmicroscoop hebt ingesteld, en dus hoe goed je plaatje wordt.

Tot ongeveer twintig jaar geleden werd katalyse op de atomaire schaal voornamelijk onderzocht in ultrahoog vacuüm, in opstellingen waaruit alle gassen die normaal aanwezig zijn worden weggepompt. Ter vergelijking, in deze ruimte is de luchtdruk 1 bar. In die ultrahoog vacuüm opstellingen is de luchtdruk 10 quadriljoen keer lager, dat is een 1 met 13 nullen erachter! De reden hiervoor is dat de meeste meettechnieken die relevante informatie kunnen geven over katalysatoren en chemische reacties alleen bij zulke lage druk werkten. Maar

de afgelopen jaren hebben vele natuur- en scheikundigen, waaronder ikzelf, hard gewerkt om deze technieken geschikt te maken voor condities die industrieel relevant zijn, zoals hoge temperaturen en gasdrukken. Dit is een grote, internationale samenwerking geweest, waar ook onze technici van de fijnmechanische en elektronische diensten een onmisbare rol hebben gespeeld. Met behulp van deze nieuwe meettechnieken hebben wij veel informatie verkregen die van belang is voor het beter begrijpen van katalyse en daarmee voor de ontwikkeling van nieuwe en verbeterde katalysatoren, die wij bijvoorbeeld nodig hebben voor de overgang naar een duurzame samenleving.

De ontwikkeling waar we in Leiden vooral aan gewerkt hebben, is het inbouwen van zo'n rastertunnelmicroscop in een reactor, zodat we plaatjes kunnen maken van het oppervlak van katalysatoren tijdens chemische reacties, onder condities zoals zij ook gebruikt worden in de chemische industrie. Dit betekent dat we deze plaatjes maken bij hoge temperatuur en terwijl er gasmoleculen rondvliegen door de reactor. Hierdoor is het extra moeilijk om de atomen van het katalysatoroppervlak en de reactanten te zien. Maar dankzij het oneindige geduld en de experimentele vaardigheden van mijn promovendi en postdocs zijn wij in staat dit te doen, als één van de weinige groepen ter wereld. Hier komt mijn liefde voor moeilijke experimenten en het ontwikkelen en bouwen van specialistische apparatuur samen. Zo zitten we niet alleen maar achter de computer om mooie plaatjes van atomen te maken, maar staan we ook regelmatig met schroevendraaier of Engelse sleutel in de hand om dingen te repareren. Want omdat we de apparatuur zelf ontwikkelen en bouwen, kunnen we niet even een monteur bellen als er iets kapot is.

Maar ook al kunnen we heel mooie plaatjes maken van katalysatoroppervlakken tijdens chemische reacties, er is echter wel een groot nadeel aan de rastertunnelmicroscop: deze is wat we noemen "chemisch blind". Dat betekent dat wij wel de atomen kunnen zien, maar niet altijd weten welke atomen het zijn. Zien we bijvoorbeeld de platina atomen van de katalysator,

of de zuurstofatomen die deel zijn van de chemische reactie? Of nog lastiger, zien we nu de zuurstofatomen die onderdeel zijn van het dragermateriaal van de katalysator of zijn dit de producten van de reactie? Om die reden gebruiken wij naast deze microscoop ook nog andere technieken, die wel in staat zijn chemische informatie te verschaffen. Omdat het niet mogelijk is een expert te zijn in alle experimentele of computationele technieken die er nodig zijn om katalyse te begrijpen, werk ik samen met wetenschappers van over de hele wereld, ook een aspect dat dit werk zo leuk maakt. Daarnaast is katalyse een vakgebied dat zich afspeelt op het grensvlak tussen scheikunde, natuurkunde, technische scheikunde en materiaalkunde. Om die reden bestaat mijn groep uit een mix van mensen met verschillende achtergronden.

Graag wil ik nu enkele voorbeelden van katalysatoren en chemische reacties waar ik aan werk bespreken. Als eerste de zogenaamde ontzwavelingsreactie. Wanneer ruwe olie uit de grond wordt gehaald en wordt omgezet in diesel en benzine, zitten er altijd zwavelhoudende stoffen in. Als diesel of benzine die zwavel bevat in de verbrandingsmotor van uw auto wordt omgezet in energie, komt daar zwaveldioxide bij vrij, wat de belangrijkste oorzaak is van zure regen. In de jaren tachtig was zure regen een groot probleem waardoor veel bomen stierven. Toen regeringen overal ter wereld zich realiseerden wat hier de oorzaak van was, kwam er wetgeving die de hoeveelheid zwavel die was toegestaan in diesel en benzine drastisch verlaagde. Zwavel moet dus verwijderd worden uit diesel en benzine. Dit kan met behulp van katalyse, en de katalysator die dit kan is kobalt molybdeen disulfide. Ondanks dat deze katalysator al in de industrie gebruikt wordt, is het door steeds strengere regelgeving en doordat er steeds meer zwavel zit in de olie die nu nog over is, nog steeds nodig om betere katalysatoren te maken. Om hieraan een bijdrage te leveren, bestudeer ik dit proces op atomaire schaal. In het lab maken wij een modelsysteem van een ontzwavelingskatalysator, en vervolgens kijken wij naar de chemische reactie met behulp van onze rastertunnelmicroscop. Hierbij proberen wij de procescondities in de

chemische industrie zo dicht mogelijk te benaderen. Onder deze condities is het ongelooflijk moeilijk om de atomen van de katalysator en de reagerende moleculen te zien. Het heeft twee promotietrajecten gekost, maar het is gelukt. In een combinatie van experimenten en theoretische berekeningen met partners van Albemarle Catalysts en de Universiteit Utrecht, hebben we de reactiemechanismen weten te ontrafelen, die anders bleken te zijn dan eerder gedacht.

Een ander onderwerp waar ik aan werk, zijn tweedimensionale materialen. Dit zijn materialen die slechts 1 atoomlaag dik zijn, en daardoor heel bijzondere fysische en chemische eigenschappen hebben. Het bekendste voorbeeld van een tweedimensionaal materiaal is grafeen, bestaand uit een enkele laag van koolstofatomen. Door hun bijzondere eigenschappen kunnen deze materialen gebruikt gaan worden in allerlei toepassingen, bijvoorbeeld in elektronica, als gassensoren, of als katalysatoren. Momenteel lukt dit nog niet omdat gebleken is dat het ontzettend moeilijk is deze materialen op grote schaal te maken zonder dat er imperfecties, ook wel defecten genoemd, in zitten. En deze defecten zorgen ervoor dat deze materialen hun bijzondere eigenschappen verliezen. Het is dus belangrijk te weten hoe deze materialen groeien om te zorgen dat er geen defecten inzitten. En u raadt het al, deze materialen kunnen gemaakt worden door een chemische reactie op het oppervlak van een katalysator plaats te laten vinden. In de afgelopen jaren heb ik samen met collega's van verschillende Europese universiteiten, onderzoeksinstituten en twee bedrijven, een nieuwe reactor ontwikkeld waarin wij grafeen kunnen groeien op een vloeibare koperkatalysator. Het bijzondere van deze reactor is dat wij ook hier de chemische reactie kunnen bestuderen terwijl hij plaatsvindt. En dat is niet makkelijk bij een temperatuur van meer dan 1000 °C, de temperatuur waar koper vloeibaar wordt. Doordat we precies kunnen zien wat er gebeurt terwijl het grafeen groeit, kunnen we direct de reactiecondities veranderen om te zorgen dat we op grote schaal grafeen kunnen groeien zonder defecten. Het grafeen dat wij op deze manier maken heeft een hogere kwaliteit dan tot dus-

verre gemaakt kon worden. Inmiddels hebben wij dit onderzoek uitgebreid naar de groei van grafeen op andere vloeibare metalen, maar ook naar de groei van andere tweedimensionale materialen.

Een derde en laatste voorbeeld is Fischer-Tropsch synthese. In deze reactie worden kunstmatige brandstoffen gemaakt door koolstofmonoxide en waterstof te laten reageren op een kobalt- of ijzerkatalysator. Ondanks dat het proces al 100 jaar bekend is en een grote rol heeft in de chemische industrie, wordt het nog steeds niet volledig begrepen. En juist omdat het zo'n ontzettend groot proces is waar heel veel geld in omgaat, kan een kleine verbetering aan de katalysator of de procescondities al een groot verschil maken. Ook hier proberen wij weer de chemische reactie en een kobaltkatalysator te bekijken op de atomaire schaal met de rastertunnelmicroscopie. Dat is in dit geval extra ingewikkeld omdat kobalt erg reactief is: het reageert niet alleen heel makkelijk met de gewenste reactanten, maar ook met restgassen die aanwezig zijn in de gasstroom en de reactor. Daarnaast levert de Fischer-Tropsch synthese niet maar één type kunstmatige brandstof op, maar een heleboel verschillende tegelijk, die niet makkelijk uit elkaar te houden zijn. Maar dankzij de volhardendheid van de promovendi en postdocs in mijn groep, krijgen we ook deze katalysator en chemische reactie steeds beter in beeld. Het ultieme doel van dit onderzoek is om niet CO maar CO₂ te gebruiken als reactant. Op die manier zouden we twee vliegen in één klap kunnen slaan: we gebruiken CO₂ om er iets nuttigs van te maken in plaats van het in de atmosfeer te laten komen, en we maken kunstmatige brandstoffen die in de verbranding veel schoner zijn dan brandstoffen gebaseerd op olie. Helaas is dit niet zo makkelijk. CO₂ is een molecuul dat heel graag CO₂ wil blijven en niet zo makkelijk reageert. Er zal dus een zeer actieve katalysator nodig zijn om dat mogelijk te maken. Ook hier doen wij onderzoek naar.

Samengevat, door het bestuderen van katalyse op fundamenteel, atomair niveau proberen wij begrip te krijgen van chemische

reacties en katalysatoren. Deze fundamentele kennis kan vervolgens door de chemische industrie gebruikt worden om verbeterde en nieuwe katalysatoren te ontwikkelen. De belangstelling van de chemische industrie voor mijn werk wordt duidelijk door de gemeenschappelijke onderzoeksprojecten die ik heb.

Waarom ben ik chemicus en daarna zelfs wetenschapper geworden? Dit is namelijk iets wat niet altijd al duidelijk was. Op de middelbare school gingen de talen mij makkelijker af dan de exacte vakken. Ik heb dan ook eindexamen gedaan in 3 moderne talen, maar ook in zowel Latijn als Grieks. Maar stiekem vond ik die talen eigenlijk een beetje saai. Ik kon me niet zo goed indenken dat het leuk zou zijn om je vier lang intensief bezig te houden met talen tijdens je studie, en dan ook nog daarna de rest van je leven. Bot gezegd kon ik me niet voorstellen dat de wereld beter zou worden van nog een extra interpretatie van Ovidius, zoals ik ook mijn lerares klassieke talen zei, toen zij haar teleurstelling uitte dat ik dit niet wilde gaan studeren. Ja, subtiliteit was niet mijn sterkste kant als tiener. Maar het was dus duidelijk dat ik graag iets wilde bijdragen aan een betere wereld al wist ik niet precies hoe. Daarnaast was ik ook gewoon nieuwsgierig hoe de wereld in elkaar zat. En dat je hiermee heel verschillende dingen kunt bedoelen werd mij duidelijk in een gesprek dat ik eens met een dispuutsgeenoot over studiekeuze had. Hij zei mij, dat hij politicologie was gaan studeren om de wereld te begrijpen. Waarop ik zei dat ik om die reden scheikunde was gaan studeren. Gelukkig was ik ook goed in de exacte vakken, al moest ik daar wel meer moeite voor doen. De anekdote in de familie gaat dat ik een boek over Marie Curie las, en daarom scheikunde wilde gaan studeren, zoals mijn zusje Lillian een boek las over Darwin, en daarom biologie is gaan studeren. En ook al is dat misschien wat kort door de bocht, Marie Curie is wel één van mijn boegbeelden. Daarnaast kon ik mij van scheikunde wel voorstellen dat ik het mijn hele leven leuk zou vinden en dat ik daarmee echt iets zou kunnen bijdragen. Dus het werd scheikunde. De keuze tussen klassieke scheikunde en technische scheikunde was snel gemaakt. Ik wilde in eerste instantie op fundamenteel niveau

begrijpen hoe iets zat, om deze kennis daarna toe te passen op een maatschappelijk relevant onderwerp. Deze combinatie is nog steeds terug te vinden in mijn huidige onderzoek.

Tijdens mijn studie kwam ik erachter dat ik de synthese van stoffen, één van de dingen waar grote nadruk op lag in het eerste jaar, niet zo leuk vond als ik had gedacht. Ook mijn interesse in biochemie verdween snel door het eindeloos moeten isoleren van DNA en het gieten van gelletjes. Gelukkig kregen we ook het college Atoombouw en Chemische Binding, van professor Mulder. Dat wakkerde mijn interesse voor scheikunde op de atomaire schaal aan. En samen met mijn drang om de wereld duurzamer te maken, leidde dat tot mijn carrière in de fysische chemie en mijn katalyse-onderzoek. En al stond het zeker niet van het begin af aan vast dat ik een academische carrière wilde, ik heb ook gedacht aan het leraarschap op een middelbare school of een baan in de chemische industrie, de veelzijdigheid van het werk en de interactie met studenten, promovendi, postdocs en andere wetenschappers van over de hele wereld, maken dat ik nog steeds elke dag blij naar mijn werk ga. Ik ben ervan overtuigd dat wij als docenten en onderzoekers een bijdrage kunnen leveren aan een betere wereld.

De afgelopen eeuw is de welvaart in de wereld enorm toegenomen. Meer mensen dan ooit hebben toegang tot onderwijs, schoon drinkwater, voedsel, medicatie en energie. Veel van deze toename in welvaart is tot stand gekomen dankzij scheikunde en de chemische industrie. Ik wil hier graag twee voorbeelden uitlichten. Dankzij het Haber-Bosch proces kan stikstof uit de lucht omgezet worden in ammoniak, wat vervolgens de basis is voor kunstmest. Door het bestaan van kunstmest is het de afgelopen 100 jaar mogelijk geworden een groeiende wereldbevolking van voedsel te voorzien. En dan veel recenter, scheikunde stond ook aan de basis van de ontwikkeling van een nieuw type vaccin, dat uitermate geschikt bleek om de CoViD-19 pandemie te bedwingen. Zowel de ontwikkeling van de ammoniak synthese en de RNA-coronavaccins zijn beloond met een Nobelprijs.

Maar natuurlijk is het ook zo, dat er problemen veroorzaakt zijn door deze toename in welvaart en de ontwikkeling van de chemische industrie. Denk aan de klimaatverandering door uitstoot van CO_2 , de afname van insectenpopulaties door gebruik van bestrijdingsmiddelen, of de plastic soep in de oceanen. Maar in veel gevallen speelde en speelt de chemische industrie ook een grote rol in het oplossen van maatschappelijke problemen. Door het ontwikkelen van vervangende stoffen voor chloor-fluor-koolwaterstoffen kon het gat in de ozonlaag gedicht worden. Door het ontwikkelen van ontzwavelingskatalysatoren kan zwavel verwijderd worden uit benzine, waardoor er minder zure regen ontstaat. Door het ontwikkelen van medicatie kunnen veel mensen nu langer in goede gezondheid leven. Ook voor het overgaan naar een samenleving gebaseerd op duurzame energie en een koolstof-neutrale toekomst zal de chemie onmisbaar zijn. Chemici werken aan de ontwikkeling van kunstmatige brandstoffen gebaseerd op CO_2 en waterstof gemaakt uit water. En ook in een batterij in een elektrische auto vinden verschillende chemische reacties plaats waarbij de energie vrijkomt die de auto laat rijden. Kortom, chemie en katalyse zijn overal en zullen een hoofdrol blijven spelen in onze samenleving. Onderzoek naar de onderliggende fenomenen en een fundamenteel begrip hiervan zullen nodig blijven om de welvaart voor een stijgende populatie te laten toenemen maar tegelijkertijd onze negatieve invloed op klimaat en planeet terug te dringen.

In dat licht bezien is het erg zorgelijk wat er momenteel in de wereld gebeurt. In steeds meer landen worden politieke partijen en regeringen gekozen die wetenschap wegzetten als “linkse hobby” waarop flink bezuinigd kan worden. Tegelijkertijd krijgt het idee dat wetenschap “ook maar een mening is” steeds meer voet aan de grond. Terwijl onze regering aan de ene kant roept dat onze huidige maatschappelijke opgaven als de stikstofcrisis, de oorlog in Oekraïne en de tekorten in de zorg opgelost moeten worden met behulp van innovatie, verlaagt zij tegelijkertijd de financiële bijdragen aan onderwijs en wetenschap. Dus waar moet straks die innovatie vandaan

komen? Ook ronduit zorgelijk is het dat de grootste partij in de huidige regering klimaatverandering ontkent, en het budget voor de overgang naar een energiesysteem gebaseerd op duurzame energiebronnen wil verkleinen of zelfs stopzetten. En dat terwijl het al jaren zo is dat Nederland weliswaar nog steeds in de wereldtop meedoet van onderwijs en onderzoek, maar op een veel kleiner budget dan andere landen.

Zo zijn wij als wetenschappers een groot deel van onze tijd bezig met het schrijven van onderzoeksvoorstellen. Het is absoluut belangrijk een idee om te kunnen zetten in een onderzoeksvraag en te bedenken welke experimenten of berekeningen nodig zijn om die vraag te beantwoorden en hiervoor een planning te maken. Maar de kansen om een dergelijk onderzoeksvoorstel gefinancierd te krijgen liggen vaak beneden de 10%. Hierdoor wordt er veel tijd en energie verspild, zowel aan de kant van de onderzoekers die de aanvragen schrijven, maar ook aan de kant van de programmamanagers van de organisaties die onderzoekssubsidies toekennen, en aan de kant van de wetenschappers die de voorstellen beoordelen. Dit is een inefficiënt model, dat waarschijnlijk nooit stand zou houden in het bedrijfsleven.

De Nederlandse deelname aan de Champions League van onderzoek en onderwijs met relatief weinig investeringen, die nu nog verder dreigen terug te lopen, is niet oneindig houdbaar, en alleen maar mogelijk omdat mensen in de onderwijs- en wetenschapssector veel meer uren werken dan waar ze voor betaald worden. Als wij morgen zouden besluiten dat niet meer te doen, of als wij zouden afdwingen dat onze overuren uitbetaald zouden worden, zou het systeem instorten. Waarom blijft het dan toch nog steeds overeind? Dankzij de passie en liefde die wij voelen voor het overbrengen van kennis aan onze studenten, promovendi, en postdocs, en dankzij onze interesse om de wereld om ons heen te begrijpen en beter te maken. Maar er is wel een minimumbudget nodig om onderwijs en onderzoek draaiende te houden. Met de huidige bezuinigingen zou het wel eens zo kunnen zijn dat we onder dit mini-

mum komen. De Universiteit Twente is al begonnen met het ontslaan van docenten en onderzoekers, en ook de Faculteit Geesteswetenschappen van onze eigen Universiteit heeft al een reorganisatie aangekondigd. Dit is natuurlijk een persoonlijk drama voor de mensen die het betreft, maar daarnaast is het zo dat de kennis en kunde die op deze manier wegvalt, maar heel moeizaam weer opgebouwd kunnen worden, mochten er betere tijden aanbreken. Bij mijn eigen instituut is het gelukkig nog niet zover, maar ook wij hebben al een aantal jaar vacatures voor docenten en onderzoekers niet opgevuld, wat een grotere druk legt op de mensen die nog in dienst zijn, en wat het exploreren van nieuwe onderzoeksgebieden tegenhoudt. En stilstand is achteruitgang. Als Nederland mee wil blijven doen in de wereldtop van de wetenschap, dan zal er niet bezuinigd moeten worden op onderwijs en onderzoek. Universiteiten zijn geen linkse hobby maar een absolute noodzakelijkheid om onze maatschappelijke uitdagingen het hoofd te kunnen bieden en onze welvaart te behouden. Ik vind het een voorrecht dat ik hieraan mijn kleine steentje kan bijdragen. Daarom wil ik graag het instituutbestuur van het LIC, het faculteitsbestuur van de Faculteit Wiskunde en Natuurwetenschappen en het College van Bestuur bedanken voor het tot stand komen van mijn benoeming.

Wetenschap is een internationale teamsport. Daarom wil ik ten slotte de mensen bedanken die het mogelijk gemaakt hebben dat ik hier vandaag sta en mijn oratie uitspreek. Ik wil beginnen met mijn mentoren, de mensen die mij begeleid en gesteund hebben op de lange weg van promovendus naar hoogleraar. De mensen die al die jaren in mij geloofd hebben en erop vertrouwd hebben dat deze dag zou komen, ook op de momenten waarop ik dat zelf niet deed. De mensen die ik nog steeds kan benaderen als ik advies of een luisterend oor nodig heb. In alfabetische volgorde zijn dat Joost Frenken, Ludo Juurlink, Aart Kleyn, Geert-Jan Kroes, en Roar Olsen. Bedankt dat jullie er vandaag bijna allemaal zijn om deze bijzondere dag mee te maken, en bedankt voor het vertrouwen in mij.

But even though I am the one standing here, this would never have happened without the people that are doing the actual work. The people that on a daily basis fight with our wonderful, but not always user-friendly equipment. The people that keep on trying to get atomic resolution under almost impossible conditions. The people that write the first drafts of our papers. In short, my PhD students and postdocs, both past and current. In chronological order, I would like to thank Matthijs, Rik, Mahesh, Sabine, Hamed, Mehdi, Dajo, Asad, Elahe, Vladyslav, Tycho, Vladimir, Sergi, Lipeng, Laurens, Marinka, Nicolas, Alex, Shitha, and Nikoo.

Ook extreem belangrijk zijn de technici met wie ik de afgelopen jaren heb mogen samenwerken. De mensen die de nieuwe ontwikkelingen mogelijk maken die ervoor zorgen dat wij blijven werken op het voorfront van wat technisch mogelijk is. De mensen die ervoor zorgen dat onze complexe apparatuur in de lucht blijft. De mensen van de fijnmechanische en elektronische dienst, in het bijzonder Peter van der Tuijn, Mirthe Bergman, Martijn Witlox en Marinus Schoute. Een speciaal dankwoord voor Johan Bakker, met wie ik al sinds mijn promotieonderzoek samenwerk, en die ook na zijn pensioen nog steeds meerdere malen per week aanwezig is in het lab, om ons met goede raad en twee gouden handen terzijde te staan. Ook dank aan de mensen met wie ik samenwerk in onderzoeksconsortia en aan de wetenschappers en technici die werken op de synchrotrons waar wij veel van onze metingen doen.

Ik noemde al even het schrijven van onderzoeksvoorstellen. Dank aan Christina, Inge, Jeannette en Lian die onmisbaar zijn bij het navigeren door het onderzoekslandschap, waar en wanneer welke voorstellen ingediend kunnen worden en de bijbehorende portals waar de voorstellen ingediend moeten worden. Dank aan Angelo, die de drijvende kracht is achter alle noodzakelijke, dagelijkse processen om de groep draaiende te houden.

Dan de twee mensen die mij gemaakt hebben tot wie ik ben, die mij zoveel liefde en wijsheid hebben gegeven, maar die er vandaag niet meer bij kunnen zijn. Lieve mama, van jou heb ik het doorzettingsvermogen en de “geef nooit op” mentaliteit waardoor ik het zover gebracht heb, ook als het moeilijk ging. Jij hebt zelfs niet meer geweten dat ik afgestudeerd ben, al zul je daar nooit aan getwijfeld hebben, en welk pad ik daarna gekozen heb. Lieve papa, ook jij was eigenlijk een alfa, die een bètapad gekozen heeft, wat mij inspireerde om hetzelfde te doen. Mijn liefde voor het geven van onderwijs, al is het dan aan een andere groep studenten/leerlingen, heb ik van jou. Ik mis jullie. En al kan niemand je eigen ouders ooit vervangen, toch zijn er drie mensen die daar heel dicht in de buurt komen. Lieve Monique, Stan en Pauline, dank dat jullie er altijd voor mij zijn! En dan natuurlijk mijn zusje, Lillian. Samen hebben we veel lief en leed gedeeld. En al zijn we na onze studies een heel andere kant opgegaan, en werk jij nu in de toerismesector op Kreta, je bent nog steeds mijn beste vriendin!

Maar de laatste woorden zijn voor Paul, David en Eric. Met jullie is de wereld zoveel mooier. Lieve Paul, dankjewel dat jij al jarenlang mijn grote steun en toeverlaat bent. Ook al werken wij in heel verschillende vakgebieden, je bent altijd zo geïnteresseerd in wat ik doe, en wilt altijd meer weten over mijn onderzoek. Je bent net zo blij als ikzelf met mijn successen en bij tegenslagen laat je mij altijd weer de zonnige kant zien. Dank ook voor de zorgen voor onze jongens als ik op reis ben. Lieve David en Eric, wat hebben jullie meegeleefd in het jaar dat ik aan het wachten was op de uitkomst van de laatste stap naar het hoogleraarschap. Ik wil hier graag Eric citeren die zei toen hij hoorde dat het gelukt was: “Mama, dit was wat je altijd al wilde, je droom is uitgekomen.”

Graag sluit ik af met een citaat van mijn grote heldin, Marie Curie:

I am among those who think that science has great beauty. A scientist in his laboratory is not only a technician: He is also a child placed before natural phenomena, which impress him like a fairy tale.

Ik heb gezegd.

PROF.DR. IRENE M.N. GROOT



After obtaining her Master's degree in physical chemistry, Irene Groot obtained her PhD in 2009 from Leiden University. She investigated the influence of steps and adsorbates on the reaction of hydrogen with metal surfaces using both experimental and theoretical techniques. Irene Groot then moved to the Fritz Haber Institute in Berlin where she worked as a postdoc with Hans-Joachim Freund. This postdoc was financed with a personal Alexander von Humbolt fellowship. After obtaining a Veni fellowship from NWO, Irene returned to Leiden for a postdoc position with Joost Frenken. In 2015 she started her tenure track position at the Leiden Institute of Chemistry. In 2018 she obtained tenure and became associate professor after receiving the Aspasia Prize from NWO. Irene's research is funded via prestigious grants such as the Vidi grant, and two Technology Area Grants from NWO, in collaboration with industry, and several grants from the European Innovation Council. She has been a board member and chair of the Surface Science Division of the American Vacuum Society, and has participated in many national and international panels granting research and synchrotron beamtime proposals. Her expertise lies at the interface of physics and chemistry, investigating phenomena happening at the boundary between gases and solids. Chemical reactions at surfaces play a key role in understanding and optimizing catalysis, a very relevant process with large societal impact.

