

1. Oorsprong, reikwijdte en structuur

Hebzucht. Hebzucht inspireerde de mens tot een bijzondere ontdekkingsreis, die nog steeds iedereen raakt. De hebzucht waar ik op doel, betreft zowel het bereiken van onsterfelijkheid als onbegrensde rijkdom. De veronderstelde route naar beide was het manipuleren van materie, om brouwsels te verkrijgen die lijfelijke kwalen konden overwinnen en voor onsterfelijkheid zouden zorgen. En om alles wat maar een beetje op goud leek – qua kleur, zoals urine of zand, en qua gewicht, zoals lood – in echt goud om te zetten. Onsterfelijkheid noch rijkdom werd ooit bereikt, maar door hun onophoudelijke geknutsel raakten alchemisten wel behoorlijk vertrouwd met de materie. Het leverde een voedingsbodem op voor het ontstaan van een echte wetenschap: de scheikunde.

Het belangrijkste instrument in de overgang van alchemie naar scheikunde was de weegschaal. De mogelijkheid om dingen precies te kunnen wegen, gaf de mens de mogelijkheid de materie te voorzien van getallen. Het belang van die prestatie mag niet onopgemerkt blijven, want het is heel bijzonder dat aan lucht, water, goud en elke andere vorm van materie een betekenisvol getal gekoppeld blijkt te kunnen worden. Dat voerde de studie van materie en de transformaties die deze kan ondergaan (de huidige strekking van de scheikunde), naar het domein van de natuurwetenschappen, die kwalitatieve concepten kwantitatief maakt en ze uitvoerig toetst aan onderliggende, verhelderende theorieën.

Het wegen van materie voor en na transformatie van de ene naar de andere vorm leidde tot het allerbelangrijkste verklarende concept van de scheikunde: het atoom. Meer dan tweeduizend jaar zweefde het idee van ‘atomen’ door ons bewustzijn. De oude Grieken speculeerden al over een soort ultieme, ondeelbare korreligheid van de wereld – overigens zonder een jota van bewijs. Hun speculaties werden door

John Dalton (1766-1844) verankerd in de wetenschap. Hij analyseerde het gewicht van stoffen voor en na een reactie, en kwam tot de conclusie dat de elementen, de fundamentele bouwstenen van de materie, uit onveranderlijke atomen zijn opgebouwd. Als de ene stof in een andere overgaat, zijn de atomen eenvoudigweg te volgen door de stoffen te wegen.

Atomen vormen de ‘munteenheid’ van de scheikunde. Bijna elke uitleg maakt er gewag van, als individuele deeltjes of aaneengeregeng tot combinaties, die we *moleculen* noemen. Atomen zijn de ultieme onderdelen van alle materie; alles wat je kunt zien en aanraken, is opgebouwd uit atomen. Hoe klein ze ook zijn, je kunt niet stellen dat ze onzichtbaar zijn. Kijk naar een boom: je ziet atomen. Kijk naar een stoel: je ziet atomen. Kijk naar deze bladzijde: je ziet atomen (zelfs als deze pagina op een digitaal scherm staat afgebeeld). Raak je gezicht aan: je raakt atomen aan. Voel aan een stof: je voelt atomen. Natuurlijk is een afzonderlijk atoom te klein om te zien, maar de materie is opgebouwd uit hele regimenten en we zien die uitzwermende regimenten als de stoffen die ons omringen. Verderop, in hoofdstuk 5, zal ik overigens uitleggen hoe chemici tegenwoordig wel degelijk *individuele* atomen kunnen waarnemen.

Er zijn meer dan honderd atoomtypen. Wat ik precies met ‘type’ bedoel, zal ik in hoofdstuk 2 uitleggen, als we samen hun binnenste bekijken en de interne structuren identificeren, die maken dat atomen van elkaar verschillen. Elk ander type atoom correspondeert met een ander element. Dus zoals we elementen kennen als waterstof, koolstof, ijzer, enzovoort, zo zijn er waterstofatomen, koolstofatomen, ijzeratomen, enzovoort. Helemaal tot aan het 114^e element dat we kennen, het in 2013 ontdekte, volstrekt nutteloze, extreem kortlevende element livermorium. (In feite is dat element nummer 116. Maar twee andere elementen die eraan voorafgaan, zijn nog niet officieel ontdekt.) Het kernconcept van de scheikunde is dat atomen zelf niet veranderen. Als de ene stof in de andere

verandert, dan wisselen de atomen eenvoudigweg partners uit, of ze veranderen hun relaties. Chemie gaat, zou je kunnen zeggen, over scheiden en hertrouwen.

Hoewel 'aatom' ondeelbaar betekent, zijn atomen wel degelijk op te delen. Met enig logisch nadenken kom je al tot die conclusie, want het voorkomen van verschillende soorten atomen impliceert de aanwezigheid van verschillende structuren. Met voldoende vindingrijkheid zou het dus mogelijk moeten zijn een aatom uit elkaar te knallen en de zogeheten *subatomaire deeltjes* te identificeren. Deze speculatie is bevestigd met experimenten en in hoofdstuk 2 zullen we iets zien van het binnenste van atomen, en daarmee de oorsprong van hun verschillende persoonlijkheden. Hier leunt de scheikunde het sterkst op de natuurkunde. Natuurkundigen legden de structuur van atomen bloot en scheikundigen gebruiken die informatie om te verklaren hoe ze moleculen vormen en reacties ondergaan.

Die laatste observatie zinspeelt op de reikwijdte van de scheikunde. Ze houdt in dat concepten uit de natuurkunde nodig zijn voor begrip van de scheikunde. Dat is inderdaad zo, en de scheikunde leunt dan ook flink op talrijke concepten ontwikkeld door natuurkundigen (in ruil daarvoor bieden chemici hun het materiaal waarmee ze hun kunsten vertonen). Twee concepten zijn daarbij enorm belangrijk: het ene met betrekking tot het gedrag van individuele atomen en hun subatomaire componenten; het andere met betrekking tot de 'bulk', waarbij het om tastbare vormen van materiaal gaat, zoals een kan met water of een staaf van ijzer. Meer technisch uitgedrukt, gaat het hier om respectievelijk de *microscopische* en de *macroscopische* werelden.

De belangrijkste inbreng van de natuurkunde ter verklaring van de eigenschappen van de microscopische wereld van individuele atomen en moleculen is de *quantummechanica*. Hoewel veel van de scheikunde al in de 19^e eeuw werd ontwikkeld, werd nauwelijks begrepen waarom sommige verschijnselen

wel optraden en andere niet. In die tijd was Isaac Newtons 'klassieke mechanica' dé wiskundige manier om de beweging van lichamen te beschrijven. De methode was al succesvol gebleken in het beschrijven van planeetbanen en het traject van kanonskogels. Daarom dacht men dat verkleining van die planeten en ballen tot het formaat van atomen ook wel tot verklaringen voor chemische verschijnselen zou leiden. Aan de eind van de 19^e en het begin van de 20^e eeuw werd echter duidelijk dat het afslanken van planeten en ballen tot atomen tot het volstreekte falen van de klassieke mechanica leidde: zelfs de concepten waarop Newtons mechanica was gebaseerd, verbrokkelden bij toepassing op atomen en de deeltjes waaruit die zijn opgebouwd. Onbehoedzame extrapolatie is gevaarlijk, zo bleek.

Vervolgens ontstond rond 1927 een nieuw soort mechanica, die inmiddels immens succesvol is gebleken in het verklaren van het gedrag van atomen en subatomaire deeltjes. Tot de dag van vandaag is deze theorie, de quantummechanica, onovertroffen in voorspellend vermogen en rekenkundige precisie. Het is een irritante tekortkoming dat de theorie grotendeels onbegrijpelijk is, maar ik zal later mijn best doen datgene eruit te destilleren dat nodig is voor het begrip van het gedrag van atomen, en daarmee van de hele scheikunde. We zullen dan zien dat chemici, roerend in hun kokende vloeistoffen, in feite bezig zijn atomen over te halen zich te gedragen volgens de bizarre wetten van de quantummechanica.

De andere cruciale bijdrage van de natuurkunde, in dit geval ter verklaring van de eigenschappen van de macroscopische wereld waarin materie in grotere hoeveelheden voorkomt, is de *thermodynamica*. Dit is de wetenschap van energie en de transformaties die energie kan ondergaan. De thermodynamica ontstond ten tijde van de stoommachine, die de samenleving in het Victoriaanse tijdperk zowel letterlijk als economisch voortstuwde. Het bleek al snel ook een cruciaal element in de structuur van de scheikunde. Atomen vormen

het materiaal in die structuur, maar voor wat betreft de veranderingen die de atomen ondergaan, zowel bij de aandrijving als bij de regulering, draait alles om energie. We zullen zien dat energie niet alleen vrijkomt bij het verstoffen van een brandstof – een overduidelijke, handige, maar primitieve uiting van de relatie tussen energie en scheikunde – maar dat energie in het algemeen bepaalt hoe atomen zich gedragen, welke structuren ze kunnen vormen, welke veranderingen in organisatie ze kunnen ondergaan en met welke snelheid die veranderingen kunnen optreden. Energie blijkt ook op subtiele wijze de drijvende kracht achter de scheikunde, in de zin dat reacties erdoor worden voortgedreven op een manier die ik in hoofdstuk 3 zal toelichten. Aangezien energie op zo'n intieme manier met de essentie van de scheikunde verweven is, zal het geen verbazing wekken dat thermodynamica in de scheikunde een rol speelt, ondanks de technologische oorsprong.

Waar de scheikunde naar de onderliggende natuurkunde reikt voor haar verklaringen (en via de natuurkunde nog verder naar de wiskunde, voor de kwantitatieve formuleringen), reikt ze voor veel van haar bijzondere toepassingen naar boven, richting de biologie. Heel verrassend is dat niet, aangezien de biologie slechts een uitwerking van de scheikunde is. Laat me dat preciseren, voordat biologen ontploffen van verontwaardiging over deze opmerking, die wel iets heeft van de claim als zou sociologie niet meer dan een uitwerking zijn van de deeltjesfysica. Organismen zijn opgebouwd uit atomen en moleculen, en die structuren zijn te verklaren met scheikunde. Organismen functioneren, dat wil zeggen, ze leven, als gevolg van het complexe netwerk van reacties binnen in hen, en die reacties zijn te verklaren met scheikunde. Organismen reproduceren zichzelf door gebruik te maken van moleculaire structuren en reacties, die beide deel uitmaken van de scheikunde. Organismen reageren op hun omgeving, bijvoorbeeld via reukzin en gezichtsvermogen, dankzij veranderingen in

molecuulstructuren. Dus zijn dergelijke reacties – al onze zintuigen – uitwerkingen van chemie. Zelfs het hypermacroscopische fenomeen van evolutie en het ontstaan van soorten vallen te beschouwen als een vergevorderde uitwerking van de gevolgen van de Tweede Wet van de thermodynamica, en dus als een aspect van de scheikunde. Sommige organismen, ik denk vooral aan mensen, overdenken hoe de wereld in elkaar zit, en de mentale processen die daaraan ten grondslag liggen en er een uiting van zijn, zijn het gevolg van complexe netwerken van chemische reacties. Biologie is dus werkelijk een uitwerking van de chemie. Ik laat in het midden wat ik er zelf precies van vind, maar ik wil hier zeker niet het idee benadrukken dat alles wat biologen interesseert, zoals bijvoorbeeld dierlijk gedrag in het algemeen, slechts het gevolg is van chemie. Ik beperk me tot de bewering dat alle structuren, reacties en processen van organismen scheikundig zijn. De biologie is dus doordrongen van de scheikunde, die onmiskenbaar heeft bijgedragen aan ons begrip van organismen.

Wij mensen zijn sociaal ontwikkelde wezens en wij bouwen dingen. We maken producten. We mijnen de rotsen van de aarde, pompen vloeistoffen uit de diepte en oogsten gassen uit de atmosfeer met het doel deze grondstoffen om te zetten in wat we ook maar willen. De conversie van die grondstoffen in stoffen die we kunnen vormen, bewerken, spinnen, lijmen, eten, of gewoon verbranden, is onderdeel van de scheikunde. Chemici maken plaats om vormers te laten vormen, bewerkers te laten bewerken en, meer in het algemeen, om makers te laten maken en het uiteindelijke product te creëren. Maar het zijn de scheikundigen die de grondstoffen hebben geleverd, de infrastructuur van onze moderne technologische samenleving, en die daarmee een grote bijdrage hebben geleverd aan wereldeconomieën en aan de manier waarop individuen en landen er tegenwoordig uitzien.

Zoals ik in de inleiding heb benadrukt, zijn er uiteraard zwarte vlekken en spetters te midden van het licht. De

scheikunde heeft zeker bijgedragen aan het menselijke vermogen om te verminken en te doden, en het zou ongepast zijn in dit overzicht de ontwikkeling van explosieven en zenuwgassen onder het tapijt te vegen, net als de belasting van ons fragiele milieu, of dat nu onopzettelijk of moedwillig gebeurt. Ik ga daar later op in, maar op deze plaats – om het belang van persoonlijke oordeelsvorming te benadrukken – zou ik je willen uitnodigen in een gedachtenexperiment alle bijdragen van de scheikunde aan de moderne wereld uit te vlakken en terug te keren in het pijnlijke, gevaarlijke, oncomfortabele en beperkende stenen tijdperk, en je daarbij af te vragen of de donkere aspecten van tegenwoordig opwegen tegen het verschaft licht.

De gebieden van de chemie

De reikwijdte van de scheikunde is zo enorm groot dat deze introductie een structuur behoeft. Gelukkig hebben scheikundigen zelf een structuur gevonden die hen helpt hun werk te doen, die hen laat samenkomen op congressen van gelijkgestemden en waarmee ze procedures ontwikkelen zoals landen hun politiek en economie ontwikkelen. Anders dan tussen landen zijn de grenzen hier echter vaag, en vaak wordt de grootste vooruitgang geboekt in gebieden waar twee culturen overlappen. Dat geldt vooral als het onderwerp zo volgroeid is als de scheikunde van vandaag, waar elk domein grondig verkend is en waar de inspiratie – net als in de kunst – het productiefst is op vruchtbare, overlappende gebieden binnen de scheikunde en aan de grenzen waar de scheikunde overlapt met andere disciplines.

Om de algemene structuur van de scheikunde te begrijpen is het nuttig kennis te nemen van de opdeling van de scheikunde in verschillende subdisciplines en te zien waar die zich mee bezighouden. Deze scheikundige deelgebieden zijn nog steeds terug te vinden in universitaire afdelingen en opleidingen, net zoals in de tijdschriften die de ontdekkingen publiceren.

Hun beschrijving is daarom een belangrijk onderdeel van het handboek voor de bezoeker. Maar een waarschuwing is op zijn plaats: de grenzen vervagen, zowel intellectueel als organisatorisch.

De meest brede, belangrijkste, traditionele indeling van de scheikunde is nog overal terug te vinden. Het gaat om: de fysische, organische en anorganische chemie.

De *fysische chemie* begeeft zich op het grensvlak van de scheikunde en de natuurkunde (de fysica; vandaar de naam). Ze houdt zich bezig met de beginselen van de scheikunde. Zoals we hebben gezien, betreffen die grotendeels de quantummechanica om de structuur van atomen en moleculen te verklaren, en de thermodynamica voor het beschrijven van de rol en de inzet van energie. Ook de snelheid waarmee reacties zich voltrekken, is een fysisch chemisch onderwerp, zowel op macroscopische als op microscopische schaal. Voor dat laatste is het van belang tot in groot detail individuele moleculen te kunnen volgen, die in reacties uit elkaar worden gescheurd en tot andere stoffen worden hervormd. De fysische chemie levert een belangrijke bijdrage aan de interpretatie van technieken om dat te onderzoeken, met name de 'spectroscopie'.

Zoals we in hoofdstuk 5 zullen zien, benut de spectroscopie allerlei soorten licht om informatie uit het binnenste van de moleculen naar de ogen van de waarnemer te brengen, waarbij die 'ogen' steeds vaker kunstmatige ogen zijn. De hedendaagse technieken zijn zo verfijnd dat fysisch chemici voor de interpretatie van de data alles in stelling moeten brengen, met name de quantummechanica. Wat daarbij precies de bijdrage is van de scheikunde en wat van de natuurkunde, valt hier moeilijk te onderscheiden. Daarom vloeit de fysische chemie hier vaak over in de *chemische fysica*, waarin onderzoekers het gedrag van individuele moleculen onder de loep nemen met een benadering die dicht bij de natuurkunde ligt.

Organische chemie betreft het deel van de scheikunde waar het om verbindingen met koolstof gaat. Dat één enkel element

aan een hele vakgebied ten grondslag kan liggen, is een bewijs van de veelzeggende middelmatigheid van koolstof. Het ligt in het midden van het periodiek systeem en het maakt koolstof nauwelijks iets uit welke verbintenissen het aangaat. Het is bovendien erg genegen bindingen met zichzelf aan te gaan. Vanwege zijn milde, niet-agressieve karakter kan koolstof ketens en ringen vormen van een verbluffende complexiteit. Het is precies die verbluffende complexiteit die we terug vinden in levende organismen. Verbindingen met koolstof vormen de structurele en reactieve infrastructuur van het leven. Zo uitgebreid is het aantal koolstofverbindingen (inmiddels zijn het er vele miljoenen) dat het weinig verrassend is dat voor hun studie een hele tak van de scheikunde is ontstaan die speciale technieken, naamgevingssystemen en benaderingen heeft ontwikkeld.

Waarom 'organisch'? Omdat moleculen met koolstof zodanig ingewikkeld zijn (op een paar uitzonderingen na, zoals koolstofdioxide), dat men oorspronkelijk dacht dat alleen de natuur in staat was ze te maken. Volgens deze 'vitalistische' zienswijze konden alleen organismen ze produceren. Dat veranderde na 1828, toen het mogelijk bleek een eenvoudig mineraal om te zetten in een karakteristieke 'organische' verbinding (namelijk ureum). De discussie woedde nog een tijd voort, maar sindsdien is het 'organische' in organische chemie een achterhaalde term. Omdat het lastig afscheid nemen is van handige archaïsmen bestaat de term 'organisch' nog steeds, alleen nu in de betekenis van 'een verbinding met koolstof'.

Dan blijft de rest van de elementen over, een stuk of honderd naast koolstof. Hun studie is het domein van de *anorganische chemie*. Zoals je kunt verwachten van een vakgebied dat meer dan honderd elementen bestudeert met wijd uiteenlopende persoonlijkheden is anorganische chemie een wezenlijk, maar zeer uitgestrekt onderzoeksgebied. Het wordt gedeeltelijk ingekaderd door het instellen van verschillende subdisciplines. Een belangrijke is de *vaste-stofchemie*, waar

het om anorganische vaste stoffen gaat zoals supergeleiders en de halfgeleidende materialen die computers binnen ieders handbereik hebben gebracht. Het is moeilijk de analogie te weerstaan van de anorganische chemie als een honderdkoppig orkest, waarbij de chemicus als componist-dirigent hele symfonieën van combinaties kan realiseren door de instrumenten dienovereenkomstig te arrangeren.

Koolstof ontkomt overigens niet aan de priemende ogen van de anorganisch chemicus die het periodiek systeem doorneemt. Sommige eenvoudige verbindingen van koolstof, zoals het eerder genoemde koolstofdioxide, het dodelijke gas koolstofmonoxide, maar ook het krijt en kalksteen, die onze landschappen vormen, staan niet in de belangstelling bij organisch chemici en worden daarom tot de anorganische chemie gerekend. In het grensgebied tussen beide vakgebieden zijn echter verbindingen te vinden die uit ingewikkelde constructies van koolstof bestaan, maar die ook metaalatomen bevatten. Enkele van deze verbindingen zijn belangrijke katalysatoren voor de chemische industrie, andere zijn cruciaal voor het functioneren van organismen. Hier ligt het interdisciplinaire vakgebied van de *organometaalchemie*, die een vruchtbare samenwerking tussen organisch en anorganisch chemici inhoudt.

De overlap van chemie met andere disciplines

De opdeling van de scheikunde in drie hoofdgebieden laat onverlet dat chemici hun onderwerp op allerlei andere manieren in goed behapbare brokstukken opknippen. Wel is daarbij steeds sprake van technieken, concepten en inspiratie opgedaan uit de drie basisgebieden, in allerlei verschillende verhoudingen gemengd en daarbij vaak gekruid met aspecten van andere onderwerpen. Het zou een hele onderneming zijn daarvan een uitputtende opsomming te geven. Daarom beperk ik me hier tot de algemeen gebruikelijkste.

De *analytische chemie* stamt af van de oeroude queeste om uit te vinden wat er allemaal is. Wat zit er in een mineraal?

Zou het goud zijn, of is het hafnium? Wat is aanwezig in olie? Wat zit er behalve die koolwaterstoffen nog meer in, en welke koolwaterstoffen eigenlijk? Wat is dat voor een verbinding die je daar gemaakt hebt? Kun je de rangschikking van de atomen afleiden? Het zijn allemaal vragen die analytisch chemici proberen te beantwoorden. Hoewel ze daarbij nog steeds met reageerbuizen, erlenmeyers en kolven in de weer zijn, vinden de analyses vooral plaats in geavanceerde machines waarvan sommige spectroscopische technieken benutten die door anorganisch en fysisch chemici werden ontwikkeld. Ik verken deze technieken in hoofdstuk 5. Een afstamming van de analytische chemie is de *forensische chemie*, die analytische technieken toepast binnen een wettelijk kader, om verdachten op te sporen of vrij te pleiten, en om een plaats delict te doorgronden.

De *biochemie* is de bijdrage van de organische chemie aan de biologie, soms met een toegevoegd vleugje anorganische chemie. Het vak houdt zich volledig bezig met de structuren en reacties van levende wezens, daarbij de stofwisselingsroutes ophelderend die voeding omzetten in actie (inclusief de actie die beperkt blijft tot de hersenen: het denken). Organismen zijn nog steeds een enorm belangrijk reservoir van organische moleculen; de natuur heeft immers miljarden jaren de tijd gehad om de structurele uithoeken te verkennen. Biochemici spelen een centrale rol bij zowel het ontdekken van wat er is, als bij het uitzoeken hoe het gemaakt is, onder aanvoering van de werkbijeen van het lichaam: de eiwitten, die we enzymen noemen. Een antropocentrische, maar relevante zorg omtrent het uitsterven van soorten is dat daarmee de bronnen verdwijnen van complexe moleculen waarvan het ontstaan miljoenen jaren vergde.

De naam *industriële chemie* spreekt voor zich. Hier ontmoet de scheikundige de ingenieur en worden reacties die in het laboratorium werden ontwikkeld, opgeschaald tot enorme afmetingen en aangepast in dienst van koopmanschap. In

westerse landen leveren industriële chemici een enorme bijdrage aan de economie en de handel tussen landen. Zo bedraagt het aandeel van de chemiesector in het bruto nationaal product van het Verenigd Koninkrijk ongeveer 20 procent. In de Verenigde Staten heeft de chemie een rechtstreeks aandeel in meer dan 96 procent van alle geproduceerde goederen. Voor zulke getallen mag je de neus – soms ook letterlijk – niet ophalen. Een belangrijk onderdeel van de huidige industriële chemie is de *groene chemie*, die ernaar streeft afvalhoeveelheden te minimaliseren, wat goed is voor de economie, evenals de invloed op het milieu, wat acceptatie en duurzaamheid vergroot.

De bijdrage van de scheikunde aan andere disciplines

De scheikunde is veel verschuldigd aan de omringende onderwerpen in het intellectuele landschap, maar die staan op hun beurt ook bij de scheikunde in het krijt.

De natuurkunde heeft veel te danken op het gebied van de elektronica, en in toenemende mate de fotonica (het gebruik van licht in plaats van elektronen om informatie over te dragen en data te manipuleren). Chemici maken de halfgeleiders, die ervoor zorgden dat computertechnologie en rekenkracht algemeen beschikbaar konden worden. Ze maken ook de recepten voor het kwaliteitsglas van optische vezels, waarmee ze haperende informatieoverdracht voorkomen.

De biologie is de scheikunde enorm veel verschuldigd, met name sinds de opkomst van de *moleculaire biologie*, ontsproten aan de ontdekking van de DNA-structuur als drager van genetische informatie over de generaties heen. Het is nauwelijks overdreven te stellen dat de biologie echt onderdeel werd van de natuurwetenschappen toen de moleculaire component van de relevantste biologische karakteristiek, reproductie, eenmaal geïdentificeerd was. Moleculaire biologie is echt een variant van de scheikunde, en de volwassen ontwikkeling van de scheikunde heeft ervoor gezorgd dat de biologie levendig

is als nooit tevoren. De samenwerking tussen biologie en scheikunde die we de *medicinale scheikunde* of *farmacochemie* noemen, is een van de grootste, meest onmiskenbare bijdragen van de scheikunde aan de samenleving.

De maatschappij is de scheikunde nog meer dank verschuldigd, want zoals ik in de inleiding al aangaf, maakt ze overal gebruik van de tastbare bijdragen van de scheikunde, in de geneeskunde, de landbouw, in communicatie, transport, alle vormen van constructie, fabricage en decoratie. We zijn de scheikunde ook persoonlijk dank verschuldigd omdat ze ons een innerlijk oog verschaft om de wereld te ervaren en ervan te genieten.

Dit alles komt voort uit een begrip van de scheikunde, dat ik nu voor je zal gaan ontvouwen.