

Twee verschillende werelden die bij elkaar horen

Michiel Vogelesang
Radboud Universiteit Nijmegen

Peter Buck
Pädagogische Hochschule Heidelberg

Markus Rehm
Pädagogische Hochschule Zentralschweiz – Luzern en Pädagogische Hochschule
Ludwigsburg

Inleiding

Binnen het onderwijs en ook in het onderzoek van de natuurwetenschappen neemt de belangstelling toe voor de manier waarop de huidige wetenschappelijke resultaten tot stand zijn gekomen en binnen welke constellatie dit is gebeurd. Deze aspecten worden in de Engelstalige literatuur benoemd als de History of Science (HOS) en de Nature of Science (NOS). Door leerlingen kennis te laten maken met de wordingsgeschiedenis van 'feiten' worden zij mogelijk meer ontvankelijk voor het besef dat wetenschappelijke kennis impliciet een voorlopigheid met zich meebrengt en dat het tot stand brengen ervan een sociaal gebeuren betreft (De Berg, 2003). Het zal voor veel leerlingen verrassend zijn om te bemerken dat wetenschappelijke feiten er niet zomaar zijn, maar dat ze langzaam maar zeker gestalte krijgen in de groep van de wetenschapsbeoefenaren (Latour, 1987). Ook voor het zich momenteel vernieuwende scheikundeonderwijs vormt de geschiedenis van de scheikunde een inspiratiebron, zoals blijkt uit een module elektrochemie die zich baseert op de wetenschapsontwikkeling rond dit thema (Arnold, 2010). Als tijdens het betreffende onderwijs de leerlingen de gelegenheid krijgen om met elkaar te spreken over hun ervaringen, kunnen zij een soortgelijke ervaring opdoen dat feiten langzaam maar zeker in een gemeenschap ontstaan. Bovendien doen de leerlingen ervaring op met het gegeven dat de wetenschap zelf als een context kan worden beschouwd waarbinnen concepten tot leven kunnen komen. Dit is van belang omdat er concepten zijn die vooral binnen een wetenschappelijke context betekenis hebben, maar niet direct daarbuiten (Goedhart, 2004). Goedhart benadrukt dat het deeltjesconcept niet direct terug te vinden is in een leefwereldcontext, maar wel betekenis krijgt in een wetenschappelijke samenhang. Löffler heeft zich hierover ook in deze zin uitgesproken (1992; 1994; 2006). Bij het onderwijzen van een dergelijke thematiek is het uitermate belangrijk dat docenten goed voorbereid zijn ten aanzien van de historische ontwikkelingen in de vakwetenschap, en dus is het belangrijk dat er informatie komt voor verschillende thema's en hoe deze thema's zich historisch ontwikkeld hebben. Zo biedt De Berg (2003) informatie aan rond het

thema van de elektrolytische dissociatie en Niaz (2000; 2005) voor de bepaling van de lading van het elektron. Kubli (2005) en Boot (2008) benadrukken het belang van het gebruik van de oorspronkelijke wetenschappelijke verhalen in de klas.

Wanneer wordt nagestreefd dat de leerlingen oog krijgen voor de sociale samenhang waarin wetenschappelijke feiten worden gemaakt en voor de voorlopigheid van wetenschappelijke zienswijzen, dan kan niet worden uitgegaan van een visie op onderwijzen die overdracht van vaste kennisfeiten tot doel heeft. Veeleer zou moeten worden gezocht óf naar een meer sociaal-constructivistische óf naar een fenomenologische wijze van aanbieden van de onderwijsthema's opdat de leerlingen actief mee kunnen bepalen in welke richting de kennisontwikkeling gaat. Ten Voorde (1977, p. 41) spreekt van de noodzaak om tot een *durend gesprek* tussen 'langer lerenden' en 'korter lerenden' te komen en Marton & Booth (1997, p. 175) pleiten voor 'thought contact' en 'coherent collaboration' tussen 'the teacher teaching and the learner learning'. De Berg (2003) wijst erop dat de nadruk bij het onderwijs veelal ligt op

'the *facts* of science and how these facts can be confirmed or discovered in laboratory experiences and the fact that teachers themselves have not experienced the teaching of science from a perspective which gives due consideration to matters of scientific literacy. Nature of science issues are also regarded by teachers as too abstract and too difficult to learn' (cursivering van de auteur). (De Berg, 2003, p. 398)

Clough (1995; 2006) beschrijft bij dit laatste aspect het belang van het tot stand brengen van een juiste afwisseling tussen enerzijds wat hij een hoog gecontextualiseerde benadering van NOS noemt en anderzijds een gedecontextualiseerde benadering ervan. Met contextualisering bedoelt hij: '... drawing students' attention to important NOS issues *entangled in science content and its development*. Highly contextualized NOS instruction is so tightly bound up in the science content being learned that the two are seamless, and thus conveying how the experience is *like* science is unnecessary' (cursivering van de auteur).

De Vos & Verdonk (1996, p. 661-662) vergeleken de manier waarop in schoolboeken de grootheden massa, tijd, lading en energie in het kader van atomen en moleculen worden gebruikt en hoe dit gebeurt in de huidige wetenschap, en kwamen tot de volgende uitspraak:

'Reviewing these data, we conclude that our description of the particulate nature of matter in science education refers to a classical, micromechanical material world, governed by Newton and Coulomb, in which mass and electric charge are quantized, whereas space, time and energy are not.

This description has obviously been inspired by qualitative versions of 19th century scientific theories. There is also an echo of 19th century optimism about the ability of science to produce absolutely correct explanations of all physical and chemical

phenomena in (micro)mechanic terms. Later developments that led to a rejection of classical mechanics as a source of first principles and the introduction of uncertainty and relativity as scientific concepts usually receive little attention in elementary science education.' (De Vos & Verdonk, 1996, p. 661-662)

Blijkbaar is er een groot verschil tussen de manier waarop in schoolboeken wordt gesproken over deeltjes in de wetenschap. Dit vindt zijn oorzaak in een te sterk vereenvoudigde voorstelling van zaken in schoolboeken, maar ook in het gegeven dat de wereld van de atomen en moleculen een intrinsiek andere is dan die van de macroscopische objecten waarin wij leven. Daardoor wordt de manier waarop 'the facts of science [...] can be confirmed or discovered in laboratory experiences' zoals De Berg (2003) voorstelde, in het middelbare onderwijs een problematische zaak als voor dit aspect geen aandacht is geweest. In deze publicatie willen wij een schets geven van de ontwikkeling naar het denken in atomen en moleculen waarbij wij als doel hebben dat er meer aandacht komt voor de bijzondere verschillen tussen de wereld waarop deze concepten betrekking hebben en vergeleken met de ons omringende dagelijkse wereld. Het belang van een dergelijke wijze van aanbieden is gelegen in de centrale rol die het molecuul-atoomconcept speelt in het huidige natuurwetenschappelijk denken. Daarom heeft de commissie Van Koten dit als een van de centrale concepten in het vernieuwde scheikundeonderwijs voorgesteld (Driessen, 2003). Om tot een echte vernieuwing te komen rond dit concept is het in onze ogen van het grootste belang om de hierboven genoemde aspecten van modelvorming, voorlopigheid van de theoretische resultaten en van het grote verschil tussen de dagelijkse wereld en de wereld van atomen en moleculen aan de orde te laten komen. Als dit niet gebeurt, dan is het gevaar aanwezig dat de leerlingen een opvatting vormen dat er een één op één relatie is tussen de hun zo vertrouwde wereld en die van de atomen en moleculen en in een naïef realisme vervallen (Talanquer, 2006).

Vertalen

In een leerboek voor scheikunde staat het volgende te lezen:

'Elke stof kan worden opgevat als een verzameling gelijksoortige moleculen. Dit houdt in dat elke molecuulsoort 'drager' is van een unieke set aan eigenschappen.' (Franken, 2006, p. 48).

In dit citaat gaat het ons niet om de vraag in hoeverre 'elke stof kan worden opgevat als een verzameling gelijksoortige moleculen', maar om de vraag wat de reikwijdte zou kunnen zijn van het vervolg, namelijk 'dat elke molecuulsoort 'drager' is van een unieke set aan eigenschappen.' Voor een leerling die nog in het begin staat van zijn of haar leren van scheikunde zou dit de indruk kunnen wekken dat er een één op één relatie bestaat tussen de eigenschappen van stoffen en die van moleculen. Uit het overzichtje in tabel 1 blijkt dat de relatie tussen deze twee werelden ingewikkelder is.

Tabel 1.

<i>Eigenschap in macrowereld</i>	<i>Verklaring in de microwereld</i>	<i>Eigenschap van één molecuul of atoom?</i>
Temperatuur	Warmtebeweging	Nee
Smeltpunt	Verdwijnen kristalstructuur	Nee
Kookpunt	De cohesiekrachten tussen die moleculen zijn kleiner dan de dispersiekrachten	Nee
Kleur/Emissielijnen in Bunsen & Kirchhoffs spectroscopie	Elektromagnetische straling bij de overgang van hogere naar lagere energieniveaus in een molecuul of atoom	Ja
Elektrisch geleidingsvermogen	Transport van elektronen	Nee, een enkel molecuul vertoont over het algemeen geen geleidingsvermogen
Hardheid	Weerstand tegenover verschuivingen van atomen en moleculen	Nee, het komt op de structuur in het geheel aan
Dichtheid	Resulteert uit de onderlinge afstanden tussen de moleculen en atomen in combinatie met hun massa	Nee
Reageren	Verbreken en vormen van bindingen	Nee, er zijn botsingen met andere deeltjes nodig

Uit dit overzicht komt naar voren dat we niet zonder meer kunnen spreken over moleculen als dragers van de eigenschappen van een stof en dat het dus de vraag is wat we ermee bedoelen als we toch willen spreken over moleculen als dragers van de eigenschappen van een stof. Stoffen kunnen andere eigenschappen worden toegekend dan aan moleculen en atomen en daarbij vereisen beide werelden ook hun eigen taal om deze eigenschappen te verwoorden. Dit roept de vraag op naar de relatie tussen beide werelden. Hiertoe vertrekken we vanuit onze vertrouwde stoffelijke wereld, of is het juist om te zeggen vanuit onze vertrouwde wereld met zijn voorwerpen omdat we stoffen tegenkomen *in* voorwerpen? Beide aspecten, zowel stof als voorwerp komen verderop aan de orde. We beginnen met stoffen.

Constantheid in massa en atoommassagetallen

Een belangrijke behoudswet in de scheikunde is die van het behoud van massa bij een chemische reactie en bij een fase-overgang. Hiermee denken en handelen chemici in een stevig verankerde traditie, die door uitstekend uitgevoerde proeven steeds weer bevestigd

is. In dit kader verdient Stass vermelding, omdat hij reeds rond 1865 de wet van massa-behoud voor de synthese van zilverjodide en zilverjodaat bevestigde met een experimentele fout van + 0,0014% resp. - 0,0013% (zie hiervoor het uitstekende boek van Ida Freund (1904) op p. 65 e.v.).¹

Lavoisier heeft als eerste de wet van het behoud van de massa van stoffen bij chemische reacties uitgesproken. Op grond van het totale massabehoud bij chemische reacties en het feit dat telkens eenzelfde hoeveelheid van de elementaire stoffen kon worden teruggewonnen als waarvan was uitgegaan (beide uiteraard gemeten in de toestand van de niet-ontleedbare stof) is het consequent om ook een wet van het behoud van de massa van het element te formuleren.

Chemici gingen ertoe over om te spreken over equivalente massa's van stoffen of elementen, waarmee werd bedoeld dat die massa's (onontleedbare oftewel elementaire) stof met elkaar konden reageren of elkaar in een verbinding konden vervangen. Het ging dus om de massa van een hoeveelheid stof die op de weegschaal bepaalbaar was in de vorm van een uitgangsstof, dan wel reactieproduct, bij een chemische reactie. Voor elementen in een verbinding moest op grond van de wet van het elementmassabehoud een toekenning gebeuren naar aanleiding van de gemeten stofmassa's. Ter verklaring van de regelmaat die vervat is in het optreden van deze equivalente massa's kwam Dalton met zijn atoom- en molecuultheorie (Talanquer, 2006; M.J. Vogelezang, 1990). Toen de chemici tot een overeenstemming zijn gekomen over de begrippen atoom en molecuul tijdens en na het Karlsruher congres in 1860 heeft Loschmidt het idee van een bijzonder getal aan de orde gesteld, namelijk het aantal moleculen per milliliter gas. Hij was ook de eerste die, in 1865, er een waarde voor heeft bepaald, namelijk $1,8 \cdot 10^{18}$ (zie bijvoorbeeld Van Eyk (1942), met name p. 63 en 133). In het begin van de twintigste eeuw vindt er echter een verschuiving plaats naar de betekenis van het aantal moleculen per mol gas en wordt het gekoppeld aan de naam van Avogadro, de benaming die in Frankrijk, Nederland en de Engels sprekende landen inburgerde (nadere informatie is te vinden in Jensen (2007)). In Duitsland en Oostenrijk werd nog langere tijd in de twintigste eeuw gesproken over het getal van Loschmidt.

Met dit idee veranderde ook de betekenis van het begrip 'equivalent'. Werd een equivalent vroeger als de massa van een portie stof gedacht, nu wordt 'equivalent' in de context van de atoomtheorie een relatie tussen getallen.² Nadat op verschillende manieren het getal van Loschmidt dan wel van Avogadro in de orde van $6,02 \cdot 10^{23}$ werd bepaald, kon men ook de massa van een enkel atoom uitrekenen. Binnen deze visie is er nog geen reden om het spreken over de massa van een enkel atoom dan wel van een bij elkaar horend ensemble van atomen te problematiseren.

Verdwijnen van constantheid in atoommassa

Toen atoommassa's steeds nauwkeuriger bepaald werden, doemde een nieuw probleem op. Men vond dat de atoommassa van lood *niet* voor alle loodmonsters in de wereld dezelfde waarde heeft. Richards en Lambert (1914) schrijven hierover:

'For many years the possibility that samples of a given element from different sources might have different atomic weights had been considered, and investigated, but never before with a positive outcome.' (Richards & Lambert, 1914, p. 1343)

Ze lichtten dit toe aan de hand van koper, calcium, natrium, zilver en ijzer. Het was voor deze onderzoekers dan ook schokkend om bij lood te merken dat hier wel sprake was van variërende atoommassa's. Ze gebruikten onder andere lood afkomstig van radioactieve bronnen en konden een relatie leggen met de mate van radioactiviteit: 'Although in general the samples of lead having greater radioactivity show less atomic weight, the decrease in the atomic weight is not exactly proportional to the radioactivity.' Hoe sterker radioactief het uitgangsmateriaal, des te lager de atoommassa, is echter de veel zekerder klinkende uitspraak van Holleman in zijn leerboek dat vijftig jaar later verscheen (Holleman, 1964, p. 592). Men had toen nog niet in de gaten dat er drie radioactieve vervalreeksen bestonden. Het waren uiteindelijk de UV-spectra van de verschillende monsters waarop Richards en Lambert vertrouwden. Hoewel ze volledig identiek bleken te zijn, bleven Richards en Lambert nog sceptisch, of het écht wel lood en niet een nieuw ander element was³:

'Either the unknown substance, which is mixed with ordinary lead and produces the lower atomic weight, has the same spectrum as lead itself; or else it gives no lines whatever in the ultraviolet range of this photograph; or else the presence of a large bulk of lead hides or aborts the spectrum of the foreign admixture; or else ordinary lead is a similar medley in somewhat different proportions. It is perhaps premature to decide between these alternatives, but all are of interest, the first and last of course being the most revolutionary.' (Richards & Lambert, 1914, p. 1341-1342)

Tegenwoordig weten we dat de resultaten van dit onderzoek het gevolg zijn van verschil in isotopen samenstelling van het onderzochte materiaal, maar deze en dergelijke onderzoeken uit die tijd vormen juist het startpunt voor de ontwikkeling van een dergelijke visie.

Heel anders ligt het als Dole in 1935 naar aanleiding van minieme verschillen in de dichtheid van water komt tot een waarde voor de (relatieve) atoommassa van zuurstof in lucht ter grootte van 16,00008 wanneer als atoommassa voor zuurstof in het water van Lake Michigan 16,00000 wordt genomen. Hij schrijft dit inderdaad toe aan verschillen in de isotopensamenstelling en concludeert:

'... that it is meaningless to express the atomic weight of oxygen to more than four decimal places.' (Dole, 1935, p. 2731)

Het is duidelijk dat chemici hier de gevolgen zien van het bestaan van isotopen: we kunnen niet meer spreken van een constante atoommassa voor een hoeveelheid van een natuurlijk gevonden element, maar we moeten spreken van de gemiddelde atoommassa van het betreffende isotopenmengsel⁴. Het uitgangspunt dat alle atomen van hetzelfde element aan elkaar gelijk zijn, hebben we dus moeten verlaten. Dat niet eerder binnen de chemische of de natuurkundige gemeenschap de noodzaak was ontstaan om over verschillende soorten van bijvoorbeeld het element lood te spreken, geeft aan dat de chemische eigenschappen van de verschillende isotopen in chemisch opzicht niet van elkaar verschillen, afgezien dus van de waarde van de massaverhouding waarin ze bij een reactie zijn betrokken.

Naar losse atomen

Het bestaan van isotopen is een reden om nader te kijken naar de samenstelling en de massa van de verschillende isotopen zoals in tabel 2, waarbij voor de berekende massa's is uitgegaan van de waarden uit het Handbook of Chemistry and Physics (Weast, 1997). De massa's zijn uitgedrukt in de binnen de chemie gebruikelijke eenheid u voor atoom- en molecuulmassa's.

Wanneer we leerlingen deze tabel laten maken, kan hun opvallen dat de getabelleerde atoommassa's kleiner zijn dan de berekende som van de massa's van de componenten. In de wereld van het systeem 'atoom' geldt de wet van behoud van massa blijkbaar niet. De reden hiervoor ligt in de beroemde vergelijking van Einstein $E = mc^2$. Uit deze vergelijking volgt dat bij elke energieverandering een massaverandering hoort. Zelfs al bij het vormen van het ^1H -atoom uit een proton en een elektron verlaagt zich de energie van het nieuwe systeem zodanig, dat ook de massa kleiner wordt. Men noemt dit een merkbaar 'massadefect'. Naarmate de energie en de massa van het systeem lager worden, verhogen zich de massa en de energie van de omgeving. Men zegt dan, dat er energie 'vrijkomt' bij de vorming van het neutrale ^1H atoom. Eigenlijk zijn de termen 'massadefect' en 'vrijkomen van energie' voorbeelden van verwarrend taalgebruik, want ze laten buiten beschouwing dat in het *systeem* én de massa én de energie verlaagd worden, en in de *omgeving* én energie én massa 'vrijkomt'. Naarmate in een kerncentrale tijdens een kernreactie de massa én de energie van de brandstofelementen kleiner worden, worden de energie én de massa van de omgeving groter. Systeem en omgeving worden dus bij de eerste verwarrende uitspraak verwisseld. Als we hierover spreken in de klas, is het zaak om dit zorgvuldig te doen: 'Bij elke massaverandering hoort altijd een energieverandering die in dezelfde richting gaat!'

In deze formulering worden de twee belangrijke behoudswetten, waar ongetwijfeld veel chemici van uitgaan, tegelijk terzijde gesteld. Zowel de wet van behoud van massa als die van behoud van energie zijn geen strenge behoudswetten die altijd opgaan. Einstein heeft hiervoor in de plaats een nieuwe algemene behoudswet opgesteld, die van het behoud van de viervector. Ook al kunnen we met behulp van de ons ter beschikking staande

Tabel 2.

Deeltjes- symbool	Het systeem opgevat als samengesteld uit afhankelijke resp. onafhankelijke onder- delen	Massa berekend door <i>optellen</i> van de massa's van de com- ponenten (in u)	In tabellenboek <i>gevon- den</i> (gemeten en bere- kende) atoommassa (in u)
1p			1,007 276 466 88
1e			5,485 799 094 5 · 10 ⁻⁴
1n			1,008 664 915 60
¹ H	1p, 1e		1,007 825 032 14
	[1p + 1e]	1,007 825 046 790 8	
² H	1p, 1n, 1e		2,014 101 777 99
	[1p + 1n + 1e]	2,015 101 513 67	
¹² C	6p, 6n, 6e		12,000 000 000 (SI- Definitie)
	[6p + 6n + 6e]	12,090 609 0820	
¹⁶ O	8p, 8n, 8e		15,994 914 622 1
	[8p + 8n + 8e]	16,120 808 107 3	
²⁸ Si	14p, 14n, 14e		27,976 926 532 7
	[14p + 14n + 14e]	28,211 421 192 1	
¹³³ Cs	55p, 78n, 55e		132,905 446 9
	[55p + 78n + 55e]	134,028 886 3	

apparatuur bij een chemische reactie de feitelijk optredende massaverandering niet vaststellen, we zijn er tóch van overtuigd dat ze optreedt. Onder omstandigheden die we niet-relativistisch kunnen noemen, gaat de wet van behoud van de viervector over in de vertrouwde wetten van behoud van massa en van energie.

We kunnen de verschillen tussen de werkelijke massa van een deeltje en de som van zijn samenstellende protonen, elektronen en neutronen ook zien als het gevolg van een fundamenteel onjuiste manier van beschouwen van het atoom. Blijkbaar kunnen we een atoom niet zien als een loutere optelling van de samenstellende delen, maar moeten we het geheel als iets anders zien dan als de losse onderdelen ervan. Dit maakt begrijpelijk dat de waarde van de eenheid u per definitie is vastgelegd:

'The unified atomic mass unit u is $\frac{1}{12}$ times the mass $m(^{12}\text{C})$ of a free (noninteracting) neutral atom of carbon-12 at rest and in its ground state: $1u = m_u = \frac{1}{12}m(^{12}\text{C}) \approx 1.663 \cdot 10^{-27}$, where the quantity m_u is the atomic mass constant.' (Mohr, 2005, p. 8)

Voor chemici lijkt deze precisering ('... free, neutral, at rest, and in their ground state') niet van belang omdat het in de praktijk niet erg is, als het aantal atomen in een reactie niet *precies* in de juiste verhouding bij elkaar wordt gebracht. Want dan is het voldoende, als *ongeveer* de overeenkomstige aantallen atomen bij elkaar komen om te reageren, net zo als het in de praktijk voldoende is dat een stof nooit precies 100% zuiver is. Dit wordt echter anders als we uitgaan van het idee dat er sprake is van behoud van de viervector en niet van behoud van massa en behoud van energie als aparte grootheden. Omdat dit vaak over het hoofd wordt gezien, heeft het Comité International des Poids et Mesures (CIPM), dat verantwoordelijk is voor begripsnormeringen, in 1980 nog eens uitdrukkelijk gespecificeerd, 'that in this definition, it is understood that unbound atoms of carbon 12, at rest and in their ground state, are referred to' (NIST, 2000). De beroemde formule van Einstein heeft namelijk een onverwacht effect op het aantal deeltjes C-12 in 0,012 kg C-12. Wanneer we niet uitgaan van vrije en onafhankelijke koolstofatomen, maar bijvoorbeeld denken aan de omzetting van grafiet in diamant dan moeten we rekening houden met een energieverandering van $+0,019 \cdot 10^5$ J per mol (bij 298 K en $p = p_0$). Dit betekent dat deze verandering gepaard gaat met een massa-toename van $2,1 \cdot 10^{-14}$ kg. Deze minieme hoeveelheid valt ruimschoots binnen de nauwkeurigheid van de meest gevoelige balans, maar blijkt op atomaire schaal wel grote gevolgen te hebben. Precies 0,012 kg diamant bestaande uit C-12 atomen zullen daarom ongeveer 10^{12} atomen meer zijn dan precies 0,012 kg C-12 in de vorm van grafiet (De Dobbelaere, Lutgerink, & Buck, 2006). Hoeveel atomen er precies minder zijn in 1 mol grafiet vergeleken met 1 mol losse standaardatomen C-12 in de energetische omgeving van een massaspectrometer, weet niemand, en voorlopig kent ook niemand een weg om dit te kunnen bepalen. Evenmin is het mogelijk om te spreken over het aantal deeltjes in een mol als over het (vaste) getal van Avogadro, maar alleen als over de constante van Avogadro. Het betreft dus niet een vaste telwaarde maar een meetwaarde waarvan de uitkomst afhangt van de keuze van het te bemeten uitgangsmateriaal. Hierbij gaat het om de (huidige) technologische onmogelijkheid om dit aantal atomen te bepalen, maar ook om de *principiële* onmogelijkheid atomen te tellen. Ook dit hangt zowel samen met de (energie-)toestand van de mol C-12 atomen in kwestie als met de anderswereldlijke eigenschappen van atomen, die discreet en tegelijkertijd niet onderscheidbaar en dus niet telbaar zijn.

Tot nu toe waren de equivalentgetallen en de daaruit afgeleide atoommassa's nog verbonden met empirisch gevonden massaverhoudingsgetallen. Maar in de gegeven definitie voor de eenheid u gebeurt iets nieuws: de massa van een deeltje wordt per definitie gegeven, aan de hand van een los atoom. Er mag geen interactie meer zijn met andere

deeltjes. Dit heeft ertoe geleid dat de waarden die in tabel 2 in de vierde kolom staan, waarden zijn die massaspectrometrisch zijn bepaald ten opzichte van de per definitie vastgestelde standaard atomaire massa-eenheid u . Daarom zijn deze waarden dimensieloos en geven ze de *relatie* weer ten opzichte van het standaard ^{12}C -isotoop.

In een laboratorium kunnen we van een hoeveelheid stof (uitgedrukt in mol) de massa bepalen (uitgedrukt in gram of kilogram) en/of het volume (uitgedrukt in bijvoorbeeld milliliter of dm^3). Hieraan gekoppeld is de molaire massa met de eenheid $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ en het molair volume met de eenheid $\text{dm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$. Met de grootheid 'molaire massa' of 'molair volume' heeft het *Système International des Poids et Mesures* de brug gedefinieerd tussen de macroscopische meetwaarden (meestal kg of liter) die we in het lab gebruiken als we een hoeveelheid stof (aangegeven in 'mol') bepalen, en de atomaire meetwaarden van 'losse' atomen en moleculen in massaspectroscopen. Op de website van de IUPAC (1997) is de volgende definitie voor de mol te vinden:

mole

SI base unit for the *amount of substance* (symbol: mol). The mole is the amount of substance of a system which contains as many elementary entities as there are atoms in 0.012 kilogram of carbon-12. When the mole is used, the elementary entities must be specified and may be atoms, molecules, ions, electrons, other particles, or specified groups of such particles.

'Specified groups of such particles' betekent dat men strikt genomen moet aangeven, in welke energetische omgeving de 'elementary entities' (dus bijvoorbeeld ^{12}C -atomen) bedoeld zijn. De gemiddelde massa van een ^{12}C -atoom heeft immers in grafiet een andere massa dan in een massaspectroscop ('losse' ^{12}C -atomen), ook een andere massa dan in diamant en een weer andere massa dan in Buckminsterfullereen. Hiermee is duidelijk rekening gehouden in de definitie voor de mol zoals die wordt gegeven door Mohr (2005, p. 8):

One mole is the amount of substance of a collection of as many specified entities X as there are atoms in 0.012 kg of carbon-12, where it is understood that the carbon atoms are free, neutral, at rest, and in their ground state. (Mohr, 2005, p. 8)

Systeemdenken binnen de andersoortige wereld van atomen en moleculen

De relativistische effecten op de chemie van de (super)zwarte elementen zijn interessant (M. J. Vogelesang, Buck, P., & Rehm, M., 2007), maar men zal er in het middelbaar onderwijs nauwelijks toe komen om ze te thematiseren. Laten we de leerlingen waarden zoals die in tabel 2 zelf uitrekenen, dan kunnen zij directe ervaring opdoen met de beperkte geldigheid van de wet van behoud van massa in de andersoortige wereld van atomen, moleculen en atomaire deeltjes. Een mogelijk antwoord op de vraag waaraan we het optreden van dit massadefect kunnen toeschrijven, ligt in de zienswijze dat het atoom opgevat

wordt als een uit samenhangende onderdelen bestaand systeem. Spreken over systemen kan al eerder gebeuren, zoals Rehm en Buck hebben aangetoond. Rehm beschrijft hoe hij zijn onderwijs over atomen en moleculen begon door zijn fiets uiteen te halen in de wielen, trappers, zadel etc. Vervolgens verspreidde hij de onderdelen over het klaslokaal, een aanpak die duidelijk aansluit bij de dagelijkse belevingswereld van de leerlingen (Buck, 2004, p. 100 e.v.). Dit leidde tot de volgende onderwijssituatie:

'Als die Schülerinnen und Schüler in den Chemiesaal kamen, machten sie schon spöttische Bemerkungen, über das 'was so 'rum lag'.

'Ein Fahrrad' sagte ein Schüler. Wieder ein anderer, der bislang nur die Räder gesehen hatte, fragte zurück: 'Wo, wo ist hier ein Fahrrad?' 'Nun hier auf dem Schrank und da in der Ecke die Räder!' kam als Antwort.

Ohne daß die Stunde förmlich eröffnet war, erörterten wir alle gemeinsam, ob hier nun ein Fahrrad im Raum sei oder ob bei uns nur die Vorstellung eines Fahrrads assoziiert wird, ohne daß wir sagen dürften, es sei ein Fahrrad da.

Auf die Frage, wie ich denn am besten nach Hause käme, riefen die Schülerinnen und Schüler einhellig: 'Zusammenbauen!' Ich baute die Teile unter den Augen der Schülerinnen und Schüler zusammen: Das Hinterrad setzte ich in die Vordergabel und umgekehrt, die Pedale montierte ich seitenverkehrt. Die Schüler und Schülerinnen riefen: 'Falsch, alles falsch!' Und: 'Richtig müssen Sie es montieren!' (Buck, 2004, p. 100 e.v.)

Aan de hand van dit voorbeeld werd voor de leerlingen duidelijk dat een systeem andere eigenschappen heeft dan de onderdelen los bij elkaar. Dit voorbeeld sluit duidelijk aan bij de dagelijkse ervaringen van de leerlingen. We kunnen de leefwereld echter ook zien als het totaal van dat wat leerlingen buiten de school aan ervaringen opdoen, plus hetgeen ze leren in school (Jung, 1981; Redeker, 1990; Roth, 2006; M. J. Vogelezang, 2009). Vanuit dit gezichtspunt gebruikt Buck (2004, p. 26 e.v.) de elektrische cel als systeem tegenover een koperen en een zinken plaat, enige elektriciteitskabels en een fles met een oplossing van het een of andere zout als losse onderdelen als een voor leerlingen duidelijk chemisch voorbeeld. Het systeem is iets geheel anders dan deze losse componenten. Het samenstellen van de elektrische cel uit de losse componenten levert nieuwe eigenschappen op, eigenschappen die niet direct afleidbaar zijn uit de afzonderlijke onderdelen. Ook is uit de onderdelen niet logisch af te leiden dat de batterij hieruit kan worden gemaakt.

Ongetwijfeld heeft Millar (1990) gelijk, als hij zegt: 'Particle ideas must be taught ostensively, not by providing a set of rules about how the invisible particles behave, but by seeing specific samples of the particular theory in use.' Tonen wordt ook van ons docenten verwacht. Maar tegelijk moeten wij onze leerlingen van hun ervaringen weg leiden en voor hen geloofwaardig maken, dat wat wij willen 'tonen', zijn empirische basis heeft. Gooding (1990, pp. 72, 87) geeft aan welke belangrijke plaats 'ostention' in de ontwikkeling van wetenschap inneemt:

'ostention depends upon the existence of a ready-made linguistic system of names, all of which are matched to objects and properties. Construing on the other hand, *creates* communicable representations of new experience and at the same time integrates these into an existing system of experimental and linguistic practices. Successful construing creates 'givenness' in experience.

The primary function of discourse would therefore be to aid the interpretation of the manipulation of objects, in order to describe something of which it would *later* be taken for granted that everyone would perceive it in the same way or at least as being 'out there'.' (Gooding, 1990, p. 72, 87)

Dit betekent dat de docent het 'tonen' doet vanuit zijn kennis van de betekenis van het getoonde, en de daarbij passende verwoordingen reeds kent. Maar tegelijk moet hij er wel van uitgaan dat wat voor hem vanzelfsprekend is, nog niet vanzelfsprekend is voor de leerlingen. In deze geest onderwijzend zijn goede ervaringen opgedaan met objecten die Buck zelf als 'gespreksaanleiding' voor dit onderwijsdoel heeft gemaakt.⁵ Buck en Rehm gebruiken deze objecten nadat het onderwijs heeft plaatsgevonden zoals beschreven in de bijdrage 'Crossing the bridge from the macro to the micro World' (Rehm, 2007) of uitvoeriger in hun boek 'Der Sprung zu den Atomen'⁵. Buck's object 'op. 100 p, n, e' (figuur 1) is op tweeërlei wijze geschikt voor de thematisering van de beperkte geldigheid van de wet van behoud van massa:



Figuur 1.

Zienswijze 1: De kist (figuur 1) is nog gesloten en aan het slot hangt een etiket (figuur 2) en de leraar verzekert: 'De tekst op het etiket is in overeenstemming met waarom het hier gaat, en de getalswaarden zijn naar beste weten opgesteld. Wat zullen we zien als we de kist open maken?' De leerlingen die de lessenserie over de geschakelde systemen en hun componenten (Rehm, 2007) begrepen hebben, zullen zeggen: 'Er kan van alles inzitten – flessen, boeken, munten of broodjes enz.' De ervaring heeft geleerd dat er altijd ook leerlingen zijn die zeggen: 'Niets!' Of: 'Lucht!' Sommigen slaan er gewoon een slag naar, maar anderen kunnen ook redenen aanvoeren: 'Niets! Want protonen, neutronen en elektronen

kan men niet zien.' Zij hebben in zoverre gelijk, dat wij inderdaad slechts voorwerpen kunnen zien die opgebouwd zijn uit de bouwstenen atomen die op hun beurt weer uit de bouwstenen protonen, neutronen en elektronen *samengesteld zijn*.⁶ Het is voor ons niet mogelijk om deze verschillende soorten van componenten zelf op de passende diepe laag te zien. Als een leerling zo kan argumenteren, is hij reeds midden in het gesprek dat wij willen voeren over met elkaar verbonden en niet-verbonden bouwstenen.



Figuur 2.

De kist figureert in deze onderwijsopzet niet als een black box op de manier zoals bijvoorbeeld door de CMLS in de jaren zeventig van de vorige eeuw de inhoud van luciferdoosjes moest worden geraden door met deze doosjes te schudden, ze te wegen of door er andere handelingen mee te doen, terwijl het doosje gesloten bleef. In de onderwijsopzet van Buck en Rehm voeren de leerlingen met de nog gesloten kist verder geen handelingen uit, omdat de nadruk er veel meer op ligt dat de leerlingen gaan zien dat de omschrijving die is gegeven op de deksel, zo ruim is, dat er van alles in kan zitten. Wordt de kist vervolgens geopend, dan blijken er zich inderdaad verschillende dingen uit de dagelijkse leefwereld in te bevinden (figuur 3). De aanblik van de inhoud leidt tot een mogelijke discussie omtrent de vraag naar de 'juistheid' van het opschrift op de kist:

'Ja, en hoe weet degene die het etiket geschreven heeft, dat het uitgerekend deze getallen zijn: $1,01 \cdot 10^{27}$ protonen en elektronen en $1,15 \cdot 10^{27}$ neutronen?'

'Hij heeft ieder ding gewogen en dan het periodiek systeem van de elementen erbij genomen en met behulp van de *unified atoommassa* en de isotopensamenstelling van ieder betrokken element uitgerekend hoeveel mol protonen, neutronen en elektronen ongeveer bij elk ding horen.'⁷

'Dat lijkt een hele rekenarij geweest te zijn!'

'Erg veel rekenen! – Maar we kunnen zelf eens proberen met behulp van dit tabellenboek uit te rekenen, met hoeveel protonen, neutronen en elektronen we te maken hebben bij deze ijzeren houtboor' (zie de pijl in figuur 3).

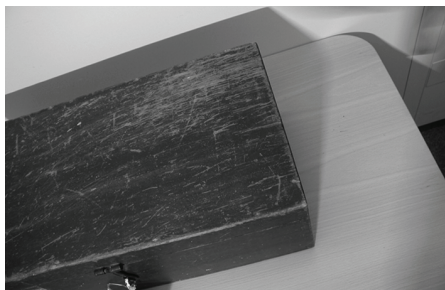
Het is zeer leerzaam om zelf een paar gegeven waarden uit tabel 2 na te rekenen, met name het ^{12}C -atoom, omdat slechts zo voor de leerlingen duidelijk wordt, hoe men in de wetenschap tot zulke getallen komt. Ook het erop attenderen dat we rekening moeten houden met de wet van Einstein is 'learning by ostention' omdat dit niet anders kan in de situatie van de middelbare school.

Door zo te werken met een 'sample of particulate theory in use', komt zeer veel nieuwe gespreksstof naar boven. Hierbij kan men het beste werken met originele tabellenboeken, niet met door de docent van tevoren gemaakte werkbladen. Buck en Rehm maken gebruik van het Handbook of Chemistry and Physics (Weast, 1997).



Figuur 3.

Zienswijze 2: De kist 'op. 100, p, n, e' roept een vervolgvraag op: wat betekent de erop geplakte tekening? (figuur 2) Deze geeft een nevelkameropname weer van de sporen van geladen deeltjes, hetzij protonen, α -deeltjes of elektronen, in tegenstelling tot die van ongeladen deeltjes in een kamer met oververzadigde damp. Wat wij zien, zijn sporen en niet de deeltjes zelf. De bekraste deksel (figuur 4) maakt een visie mogelijk zoals die is bedoeld: er was iets, gebeurtenissen die hun sporen hebben achtergelaten, krabbelende nagels of krassende spijkers of zoiets. En wij kennen genoeg van zulke situaties, bijvoorbeeld als een vogel zijn voetsporen zet in de sneeuw of in het zand bij het strand.



Figuur 4.

Tijdens zo'n sessie merkte eens een meisje op: 'Als we iets wegen, dan is het net zo: dan laat iets zijn werking, zijn sporen op de weegschaal achter!' Loopt het onderwijsgesprek in een dergelijke klassensituatie goed, dan wordt opeens duidelijk dat al ons natuurwetenschappelijk meten en concluderen te zien is als het vastleggen van sporen en criminologische duiding. Zo kan de aansluiting met de leefwereld tot stand worden gebracht en toch het andersoortige van de wereld van atomen en elementaire deeltjes alledaags worden gemaakt.

Conclusie

In de wereld om ons heen komen we voorwerpen tegen, die van één of van meer stoffen kunnen zijn gemaakt. Spreken over stoffen betekent al zich distantiëren van deze wereld, want we kennen stoffen toe aan voorwerpen omdat stoffen niet kunnen bestaan zoals voorwerpen bestaan: we hebben altijd te maken met een concrete *hoeveelheid* van een stof. Het hebben van een concrete massa en concrete uitgebreidheid is kenmerkend voor voorwerpen en dus ook voor hoeveelheden stof. Bij een chemische reactie is er wel in zijn algemeenheid sprake van behoud van massa, niet van behoud van uitgebreidheid oftewel volume. Deze belangrijke behoudswet vormt een hoeksteen binnen het chemisch denken, maar betekent ook een verdere distantie nemen van de wereld om ons heen, omdat we daar voorwerpen in het algemeen in eerste instantie juist herkennen aan hun uitgebreidheid.

In de overgang naar de wereld van atomen en moleculen kunnen we bemerken dat er op dit niveau niet meer sprake is van behoud van massa, en hiermee wordt heel duidelijk een verschil aangegeven tussen de wereld om ons heen en de wetenschappelijke wereld waarin wordt gesproken over en gedacht vanuit atomen en moleculen. Het is voor docenten en leerlingen veelbelovend om bewust de weg te doorlopen tussen deze werelden en zo directe ervaring op te doen met het andersoortige van de wereld van atomen en moleculen ter beschrijving en verklaring van verschijnselen in onze dagelijkse wereld en in de reeds bekende wereld van de scheikunde. Hierbij is het leren denken in geneste systemen en de daarmee verbonden verschillende eigenschappen van de samenstellende delen een belangrijk onderdeel omdat het op een herkenbare manier duidelijk kan maken hoe een samenstel van onderdelen andere eigenschappen verkrijgt dan de som van de eigenschappen van de afzonderlijke componenten. Zo kan een atoom of molecuul een wezenlijk andere betekenis krijgen dan alleen maar een heel klein beetje van een stof of een element.

Noten

1. Stass heeft de geldigheid van de wet van behoud van massa hier aangetoond voor een open systeem. De veel gebruikte schoolproef waarbij in een afgesloten erlenmeyer twee oplossingen met elkaar reageren, toont slechts een gelijkheid van de totale massa van het geheel voor en na de proef aan, maar laat nog steeds de mogelijkheid

- open dat bijvoorbeeld de reactieproducten een geringere massa hebben dan de uitgangsstoffen en dat het massaverschil is terug te vinden in een toegenomen massa van het water.
2. Het gebruik van de aanduiding 'getal van Avogadro' in combinatie met de betekenisstoekenning 'het aantal deeltjes in ...' roept al snel de gedachte op dat dit aantal deeltjes een weliswaar erg groot, maar in elk geval een geheel getal moet zijn. Vanwege de huidige definitie van de mol hoeft dit niet het geval te zijn. Wel is er het voorstel gedaan voor een nieuwe definitie van de mol waarin dit aantal inderdaad bij definitie een geheel getal is, namelijk exact $6,022\ 141\ 79 \cdot 10^{23}$ per mol (Lorimer, 2010).
 3. Omdat destijds nog niet bekend was dat de elementen in het periodiek systeem geordend zijn naar opklimmend atoomnummer, kon het nog mogelijk worden geacht dat er sprake was van een dergelijk onontdekt element.
 4. Dit is nu zelfs in die mate geactualiseerd dat men aan de isotoopsamenstelling van haren van een persoon in veel gevallen met een grote mate van waarschijnlijkheid kan vaststellen waar hij of zij de laatste maanden is geweest (Ehleringer, 2008).
 5. Zie hiervoor: <http://www.ph-heidelberg.de/org/chemie/Buck/gespr.htm>
 6. Net als Eilks, Möllering, Leerhoff & Ralle (2001) voeren wij dus geen deeltjesmodel in, maar een deeltjesconcept. We doen dit met dezelfde bedoeling als deze auteurs: 'omdat het om een voldoende verzekerde natuurwetenschappelijke kennis' gaat (I. Eilks, & Möllering, J., 2001, p. 81). In elk geval verzwijgen wij niet dat atomen 'van een andere wereld zijn' (Rehm 2007) waarin een wezenlijk onderscheid ligt met de opzet van Eilks c.s.
 7. De docent heeft er ten eerste uitdrukkelijk op gewezen, dat de precisie maar bij 1% ligt waardoor het mogelijk is de massa van de elektronen buiten beschouwing te laten. Deze dragen ongeveer 0,02% aan de massa bij. Verder heeft de docent erop gewezen, dat hij met deze getallen rekent, omdat de chemici met deze getallen zo rekenen, maar zelf niet weet, of deze getallen juist zijn, omdat niemand immers weet of deze getallen juist zijn. Hoe kun je een getal aangeven van iets dat niet telbaar is?

English summary

In the article a way is sketched to develop a concept of atoms different from the common view of atoms as being little bits of a substance. An analysis of properties of substances on one side and those attributed to the micro particles to explain the first on the other side, reveals that there is no one-to-one relationship between the macro and the micro world and that both worlds require their respective language. Mass can be used in both worlds. Dalton took mass as the distinctive property of an atom. By the discovery of radio activity the atomic mass turned out to be different for different atoms of the same element. Nowadays, the relative atomic masses are defined in relation to the atomic mass unit, because the mass of an ensemble of protons and neutrons is different from the sum of the lone particles. If these aspects are to be dealt with in chemistry education, there must be a gradual

introduction into the alien world of atoms. The way proposed in this article is by starting with the idea of nested systems, in which the different components cannot explain the properties of the system as a whole. So an idea of an atom or a molecule as a system, consisting of different parts, each with different properties as the atom or molecule as a whole is conceived.

Literatuur

- Arnold, F., e.a. (2010). Module Ontwikkelen van wetenschap aan de hand van het onderwerp Elektriciteit en Elektrochemie <http://www.cdbeta.uu.nl/vo/woudschotenchemie/verslagen/werkgroepen.php?id=22>.
- Boot, R. (2008). Brahe en Kepler: van cirkels naar ellipsen. *NVOX*, 33(7), 284-285.
- Buck, P., Rehm, M., & Seilnacht, T. (2004). *Der Sprung zu den Atomen*. Bern: Seilnacht.
- Clough, M. (1995). Accurately portraying the nature of science while teaching science content. In F. Finley, Allchin, D., Rhees, D., & Fifield, S. (Ed.), *Proceedings. Third international history, philosophy, and science teaching conference* (pp. 202-211). Minneapolis: University of Minnesota.
- Clough, M. (2006). Learners' responses to the demands of conceptual change: considerations for effective nature of science instruction. *Science & Education*, 15, 463-494.
- De Berg, K. C. (2003). The development of the theory of electrolytic dissociation. *Science & Education*, 12, 397-419.
- De Vos, W., & Verdonk, A.H. (1996). The particulate nature of matter in science education and in science. *Journal of Research in Science Teaching*, 33, 657-664.
- Dole, M. (1935). The relative atomic weight of oxygen in water and in air. *Journal of the American Chemical Society*, 57, 2731.
- Driessen, H. P. W., & Meinema, H.A. (2003). *Chemie tussen context en concept*. Enschede: SLO.
- Ehleringer, J.R., Bowen, G.J., Chesson, L.A., West, A.G., Podlesak, D.W., & Cerling, T. E. (2008). Hydrogen and oxygen isotope ratios in human hair are related to geography. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 105(8), 2788.
- Eilks, I., & Möllering, J. (2001). Die Teilchenstruktur der Materie im naturwissenschaftlichen Unterricht und grundlegende Schwierigkeiten bei der Vermittlung. *MNU*, 54(4), 240-247.
- Eilks, I., Möllering, J., Leerhof, G., & Ralle, B. (2001). Teilchenmodell oder Teilchenkonzept? Oder: Rastertunnelmikroskopie im Anfangsunterricht. *ChemKon*, 8(2), 81-85.
- Eyk, B. J. van (1942). *Atomistiek zonder atoommodel*. Amsterdam: D.B. Centen.
- Franken, P. W., Kabel-van den Brand, M.A.W., Korver, E.J., & Reiding, J. (2006). *Chemie Overal 3hv*. Houten: EPN.
- Freund, I. (1904). *The study of chemical composition*. New York: Dover Publication's.
- Goedhart, M. J. (2004). Contexten en concepten: een nadere analyse. *NVOX*, 29(4), 186-190.

- Gooding, D. (1990). *Experiment and the making of meaning*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Holleman, A. F., & Wiberg, E. (1964). *Lehrbuch der Anorganischen Chemie*. Berlin: W. de Gruyter.
- IUPAC. from <http://www.iupac.org/goldbook/M03980.pdf>
- IUPAC. (1997). IUPAC Compendium of Chemical Terminology. from <http://www.iupac.org/goldbook/M03980.pdf>
- Jensen, W. B. (2007). How and when did Avogadro's name become associated with Avogadro's number? *Journal of Chemical Education*, 84(2), 223.
- Jung, W. (1981). Lebensweltliche und wissenschaftliche Vorstellungen. In R. Duit, W. Jung & H. Pfundt (Eds.), *Alltagsvorstellungen und naturwissenschaftlicher Unterricht*. Köln: Aulis Verlag Deubner & CO Kg.
- Kubli, F. (2005). Science teaching as a dialogue – Bakhtin, Vygotsky and some applications in the classroom. *Science & Education*, 14, 501-534.
- Latour, B. (1987). *Science in action*. Milton Keynes: Open University Press.
- Löffler, G. (1992). Piagets und Inhelders Interviews zum kindlichen Atomismus unter einem phänomenologischen Gesichtspunkt reinterpretiert. *Chimica didactica*, 18, 85-99.
- Löffler, G. (1994). Analyse und Reinterpretation von Untersuchungen von Novick und Nusbaum zum Teilchenbild der Materie. *Chimica didactica*, 20, 5-34.
- Löffler, G. (2006). Vom Dilemma eines Teilchenverständnisses, das dem alltäglich-praktischen Teilungsprozess nachgebildet ist – Kritische Analyse einer neueren Untersuchung Teilchenmodell und grundsätzliche Überlegungen. *Chimica didactica*, 32, 32-75.
- Lorimer, J. (2010). What is a Mole?: Old Concepts and New. *Chemistry International*, 32(1).
- Millar, R. (1990). Making sense: what use are particle ideas to children? In P. Lijnse, Licht, P., Vos, W. de, & Waarlo, A.J. (Eds.), *Relating macroscopic phenomena to microscopic particles* (pp. 283-293). Utrecht: CDβ-Press.
- Mohr, P.J., & Taylor, B.N. (2005). CODATA values of the fundamental constants 2002. *Review of Modern Physics*, 77, 1-107.
- Niaz, M. (2000). The oil drop experiment: a rational reconstruction of the Millikan-Ehrenhaft controversy and its implications for chemistry textbooks. *Journal of Research in Science Teaching*, 37(5), 480-508.
- Niaz, M., & Rodríguez, M.A. (2005). The oil drop experiment: do physical chemistry textbooks refer to its controversial nature? *Science & Education*, 14, 43-57.
- NIST (2000). Unit of amount of substance (mole). <http://physics.nist.gov/cuu/Units/mole.html>.
- Redeker, B. (1990). Leefwereld en natuurkundige interpretatie bij het ontstaan van nieuwe kennis. *Tijdschrift voor de didactiek der β-wetenschappen*, 8(2), 85-99.

- Rehm, M. (2007). Crossing the bridge from the macro to the micro world. *NVOX*, 32(6), 291-293.
- Richards, T. W., & Lember, M.E. (1914). The atomic weight of lead of radioactive origin. *Journal of the American Chemical Society*, 36(7), 1329-1344.
- Roth, W.-M. (2006). *Learning Science – A singular plural perspective*. Rotterdam: Sense Publishers.
- Talanquer, V. (2006). Commonsense chemistry: a model for understanding students' alternative conceptions. *Journal of Chemical Education*, 83(5), 811-816.
- Vogelezang, M.J. (1990). *Een onverdeelbare eenheid*. Utrecht: University of Utrecht.
- Vogelezang, M.J. (2009). Wir brauchen einen Atombegriff – Aber welchen und wann? *Unterricht Chemie*, 20(114), 26-29.
- Vogelezang, M.J., Buck, P., & Rehm, M. (2007). Relativiteitstheorie en scheikunde. *NVOX*, 32(10), 465-466.
- Voorde ten, H. H. (1977). *Verwoorden en Verstaan*. Amsterdam: Universiteit van Amsterdam.
- Weast, R. C. (1997). *Handbook of Chemistry and Physics 78th Edition*. Boca Raton: CRC-Press.

