

## Een vakstructuur van het schoolvak scheikunde

W. de Vos en A. H. Verdonk,  
Centrum voor Didactiek van Wiskunde en Natuurwetenschappen  
Rijksuniversiteit te Utrecht

### Summary

*It is often taken for granted that chemistry is taught in schools in a way that is more or less determined by an internal structure of the subject. The authors describe a structure of chemistry as a school subject. Their structure is a result of an analysis of chemistry textbooks used in schools in the present and in the past. In this structure the chemical reaction concept occupies a central position. The authors show that this concept, after having been introduced at a very general level from the start, is gradually being developed along two lines: centripetal and centrifugal.*

### 1. Inleiding

In de inleiding op het "Leerplan rijksscholen scheikunde havo" van 1987 wordt opgemerkt:

*"Hoewel een leerplan de onderwerpen nu eenmaal in een, zo enigszins mogelijk, logische volgorde moet weergeven wil dat niet zeggen, dat de onderwerpen voor een bepaald leerjaar in die volgorde behandeld moeten worden. De docent blijft hierin vrij, hoewel het door de vakstructuur vaak noodzakelijk is bepaalde onderwerpen voor andere te behandelen."*

Voor het aanbrengen van een volgorde in een aantal onderwerpen worden in dit citaat twee criteria genoemd. Het eerste is dat de volgorde, voorzover dat kan, "logisch" moet zijn. Dit criterium geldt blijkbaar voor vermelding van onderwerpen in een leerplan, maar expliciet wordt gezegd dat het niet noodzakelijk geldt voor het behandelen van de onderwerpen in de klas. De docent is bij de volgordebepaling echter wel gebonden aan het tweede criterium, dat aangeduid wordt als "de vakstructuur" en dat blijkbaar iets anders is dan alleen een logische volgorde.

Wij kennen geen document waarin een daartoe bevoegde instantie een vakstructuur ten behoeve van scheikunde-onderwijs vastlegt. Toch is er onder degenen die met het scheikundeonder-

wijs in Nederland te maken hebben kennelijk een zekere consensus over het bestaan van zo'n vakstructuur. In beschouwingen over scheikunde-onderwijs (bijv. Schoen en Mast, 1989) wordt het gebruik van de term vakstructuur niet ter discussie gesteld; wel wordt soms gesproken over de al of niet te sterk overheersende invloed van de vakstructuur op het onderwijs. Lameris (1983) beschrijft in Faraday een "kennisstructuur" maar beperkt zich daarbij tot het stofbegrip in een veel gebruikt schoolboek.

In dit artikel willen wij proberen aan te geven wat wij ons bij de term vakstructuur voor het schoolvak scheikunde voorstellen. Wij pretenderen niet "de" vakstructuur te beschrijven; onze beschrijving sluit andere niet uit en is zeker niet bedoeld als het laatste woord op dit terrein. De beschrijving die wij geven is voornamelijk gebaseerd op een analyse van leerplannen en schoolboeken. Wij menen te kunnen spreken van één vakstructuur die, met zekere accentverschuivingen, gedurende een lange periode het scheikunde-onderwijs in ons land heeft bepaald en dat in grote lijnen ook nu nog doet. Naast de momenteel gangbare boeken voor mavo, havo en vwo hebben we ook boeken voor HBS en gymnasium uit de periode vóór de invoering van de mammoetwet (1968) geraadpleegd. We zouden onze beschrijving kunnen toelichten en ondersteunen met talrijke citaten, maar laten deze weg om de lengte van het artikel te beperken.

Het woord vakstructuur wekt de indruk dat het om een structuur van het vak scheikunde, d.w.z. van scheikunde als wetenschappelijke discipline gaat. In die interpretatie is er eerst een vak met een bepaalde vakstructuur en, daarna en afhankelijk ervan, ook nog onderwijs in dat vak. De vakstructuur zou dan voor het onderwijs een gegeven zijn. Wij menen echter dat de relatie tussen chemie en chemie-onderwijs gecompliceerder is. Zo is bij alle chemici de basis van hun chemische kennis gelegd in onderwijs. Een structuur die chemici in hun vakkennis aanbrenge, zou daarom wel eens in sterke mate een weerspiegeling kunnen zijn van onderwijs dat zij hebben genoten. In onze interpretatie staat een vakstructuur daarom niet los van onderwijs maar is het een produkt van structurering van chemische kennis *als resultaat van en met het oog op onderwijs*. Dat betekent dat onze analyse van leerplannen en schoolboeken niet objectief kan zijn, maar onvermijdelijk is beïnvloed door onze eigen ervaringen met scheikunde-onderwijs. We merken in dit

verband nog op dat, waar we in dit artikel korthedshalve over een vakstructuur voor scheikunde spreken, we met scheikunde niet de wetenschappelijke discipline maar het schoolvak bedoelen.

De bedoeling van onze beschrijving is bij te dragen aan een discussie over de toekomst van het scheikunde-onderwijs in Nederland. Immers, een zichtbaar gemaakte vakstructuur verliest haar vanzelfsprekendheid. Het wordt dan mogelijk alternatieven te zoeken en noodzakelijk om een keuze te motiveren. In dit artikel willen we onze beschrijving van een vakstructuur geven zonder daaraan een oordeel over die vakstructuur of het ermee corresponderende onderwijs te koppelen. In een tweede artikel willen we onze positie ten opzichte van de hier beschreven vakstructuur bepalen.

In dit eerste artikel zullen we vooraf moeten aangeven wat we in dit verband onder een structuur verstaan. Daartoe noemen we drie kenmerken: een structuur bestaat uit een aantal bouwstenen of elementen, tussen die elementen bestaan relaties en de structuur vertoont bovendien een zekere begrenzing. Als elementen van een vakstructuur voor scheikunde kiezen wij chemische begrippen. Welke begrippen dat zijn, hoe ze onderling samenhangen en hoe de structuur begrensd is komt hieronder aan de orde, zij het dat we in dit artikel niet meer dan een globale beschrijving kunnen geven. De chemische begrippen die we als belangrijke elementen van de vakstructuur beschouwen zijn in de tekst vet gedrukt.

## 2. De basisbegrippen

Scheikunde verschijnt in mavo, havo en vwo in het derde leerjaar op het lesrooster. Dat is in vergelijking met andere vakken relatief laat. Voor 1968 moesten gymnasiumleerlingen zelfs tot de vierde klas wachten op hun eerste scheikundeles. Er bestaat in Nederland een lange traditie waarbij scheikunde minstens één jaar na natuurkunde wordt geïntroduceerd. Deze volgorde biedt de mogelijkheid de positie van scheikunde als nieuw schoolvak te bepalen en te rechtvaardigen *ten opzichte van het vak natuurkunde* dat de leerlingen al bekend is. In schoolboeken van voor de tweede wereldoorlog is dat heel duidelijk te zien. Scheikunde wordt daar gepresenteerd als een natuurwetenschap, net als natuurkunde, maar met een eigen onderzoeksobject, nl. "chemische verschijnselen". Om deze chemische verschijnselen, ook wel

chemische reacties genoemd, van fysische verschijnselen te onderscheiden wordt vaak gesteld dat ze meer ingrijpend en blijvend van aard zijn. In de oude schoolboeken wordt dit verschil meestal aan de hand van een aantal proeven gedemonstreerd.

De huidige leerplannen en scheikundeboeken plaatsen chemische reacties nog steeds in een vroeg stadium centraal. Het valt op dat zowel in de oude als in de moderne boeken, meestal na enige concrete voorbeelden, heel snel over chemische reacties in een *algemene* betekenis wordt gesproken. De voorbeelden van chemische reacties, zoals de reactie van ijzer met zwavel en de verbranding van magnesiumlint, worden niet in de eerste plaats vanwege hun eigen belang behandeld maar vanwege de kenmerken van het algemene reactiebegrip die ze vertonen. Pas door generalisatie vanuit die voorbeelden krijgt het bijzondere geval een leerwaarde. We willen dit algemene begrip "**chemische reactie**" dat een belangrijke functie vervult bij de legitimering van scheikunde als afzonderlijk schoolvak naast natuurkunde, centraal plaatsen in onze vakstructuur.

Hoewel ook sommige hedendaagse schoolboeken nog steeds chemische veranderingen als "blijvend" en fysische als "tijdelijk" beschrijven, zijn er duidelijke bezwaren tegen deze karakterisering. Heel wat chemische reacties zijn omkeerbaar en lang niet alle fysische processen laten zich gemakkelijk ongedaan maken. Een beter criterium werd, ook al in sommige oude schoolboeken, gevonden door de invoering van een *chemisch* begrip *stof*. Dit stofbegrip houdt in dat bij een fysisch proces de betrokken stoffen behouden blijven, terwijl bij een chemisch proces sprake is van het verdwijnen van een of meer stoffen en het ontstaan van een of meer andere (Ten Voorde, 1977, blz. 140, blz. 399; zie ook het Leerplan Scheikunde Rijksscholen havo). Het gaat hier om een specifiek chemisch stofbegrip, waarbij bijvoorbeeld ijs en water als één en dezelfde stof moeten worden opgevat omdat het smelten van ijs nu eenmaal niet als een chemische reactie wordt beschouwd. Dit specifiek chemische stofbegrip willen we als tweede element in onze vakstructuur opnemen.

De relatie tussen de begrippen stof en chemische reactie is tweeledig. Enerzijds dient het stofbegrip, zoals hierboven aangegeven, om inhoud te geven aan het reactiebegrip, anderzijds kan het chemische karakter van het bedoelde stofbegrip niet goed worden begrepen zonder te verwijzen naar de chemische reactiemogelijkheden van de stof. Het begrippenpaar stof-reactie

vormt daardoor de basis van de vakstructuur in zijn huidige vorm. Net als het begrip chemische reactie wordt ook het stof-begrip in een zeer algemene betekenis geïntroduceerd: wanneer er concrete stoffen worden genoemd, dienen die in de eerste plaats als voorbeeld.

In de afgelopen tientallen jaren zien we in de schoolboeken pogingen om tot een steeds zorgvuldiger introductie van de twee basisbegrippen te komen. Om het probleem van de onderlinge afhankelijkheid van beide begrippen op te lossen heeft men in de schoolboeken een aantal hulpbegrippen ingevoerd, die daarmee ook deel zijn gaan uitmaken van de vakstructuur. We noemen daarvan de begrippen stoffeigenschap, zuivere stof en scheiding.

De beschrijving van een chemische reactie als verdwijnen en ontstaan van stoffen veronderstelt een manier om stoffen van elkaar te onderscheiden. Er moet immers worden vastgesteld of de stoffen die na afloop van het proces aanwezig zijn, andere zijn dan de uitgangsstoffen. Om stoffen van elkaar te onderscheiden moet men, zo stellen hedendaagse schoolboeken, letten op de **stoffeigenschappen**. Meestal wordt deze term verduidelijkt door het noemen van enkele voorbeelden: kleur, geur, aggregatietoestand, smelt- en kookpunt. De genoemde stoffeigenschappen hebben het voordeel dat ze geen geavanceerde apparatuur vereisen maar het bezwaar dat ze slechts beperkt hanteerbaar zijn. Er zijn nu eenmaal vele reukloze en in poedervorm witte vaste stoffen en vele kleurloze vloeistoffen. Bovendien zijn deze eigenschappen erg gevoelig voor de aanwezigheid van andere stoffen. Met een druppel inkt erin is water niet meer een kleurloze vloeistof en bij het koken van wijn zijn de kookpunten van alcohol en van water niet herkenbaar. Voor het herkennen van stoffen aan stoffeigenschappen zoals hierboven genoemd is het daarom in vele gevallen nodig dat men elk van de bij een proces betrokken stoffen als **zuivere stof** in handen heeft. En bij vele chemische processen is er nu eenmaal, zowel vooraf als na afloop, sprake van mengsels. Dit maakt een onderscheid tussen zuivere stof en mengsel noodzakelijk. Ook wordt een **scheiding** van een mengsel in zijn bestanddelen nodig. Dit leidt tot kennisgeving met een aantal scheidingstechnieken zoals filtratie, destillatie en chromatografie. Omdat het hierbij om fysische processen gaat, mogen de eindprodukten van de scheiding als bestanddelen van het oorspronkelijke mengsel worden opgevat. Bij de behandeling van voorbeelden van chemische reacties is de

aandacht van de leerlingen gevestigd op enkele aspecten van het reactiebegrip die later een belangrijke rol in de vakstructuur zullen spelen. In de eerste plaats leidt kwantitatieve beschrijving van de (vooral nog aflopende) reacties tot invoering van **massabehoud** en **massaverhouding**. In deze stoichiometrische context past ook het begrip **overmaat**. Verder verschillen reacties vaak niet alleen van elkaar door de combinatie van uitgangsstoffen en reactieproducten maar ook door de ervoor vereiste **reactieomstandigheden**. Daarbij verschillen ze ook in de heftigheid waarmee zij verlopen. In deze heftigheid worden later twee aspecten onderscheiden: de reactie gaat onder gegeven omstandigheden gepaard met een zeker **energie-effect** en verloopt met een **zekere snelheid**.

### 3. Concretisering

Het tot nu toe besproken gedeelte van de vakstructuur is bedoeld om leerlingen in principe in staat te stellen een stof van een andere stof en een chemische reactie van een ander proces te onderscheiden. Daarmee is het studiegebied van de scheikunde als wetenschap van stoffen en reacties ten opzichte van de natuurkunde afgebakend. Met de systematische bestudering van dit gebied is echter nog nauwelijks begonnen. In de besproken voorbeelden van stoffen en van reacties valt nog geen onderlinge samenhang te ontdekken. Regelmaat in reactiemogelijkheden van stoffen is nog niet gesignaleerd. Er kan nog geen enkele nieuwe stof en geen enkele onbekende reactie worden voorspeld en ook verklaringsmogelijkheden ontbreken nog. Het vak scheikunde moet in dit stadium op leerlingen welhaast de indruk maken van een steeds groeiende lijst voorbeelden van stoffen en van reacties zonder enige ordening. De mogelijkheden binnen het afgebakende gebied lijken onbegrensd.

Deze situatie, die zich tegenwoordig na enkele maanden in de derde klas voordoet, is wezenlijk voor de vakstructuur zoal wij die zien. Vanaf dit moment staat het scheikunde-onderwijs in het teken van het stap voor stap concretiseren van de oorspronkelijk algemene en dus abstracte begrippen stof en reactie. Dat concretiseren gebeurt op twee manieren: door *inperking* en door *invulling*.

Inperking houdt in dat het gebied van denkbare stoffen en reacties geleidelijk wordt teruggebracht tot het gebied van werkelijk bestaande stoffen en mogelijke reacties. Dit gebeurt

door voorwaarden te introduceren waaraan een stof of een reactie moet voldoen. Denkbaarheden die aan een van die voorwaarden niet voldoen komen als mogelijkheid te vervallen.

Invulling wil zeggen dat het oorspronkelijk nog zeer beperkte repertoire van stoffen en reacties geleidelijk met steeds meer voorbeelden wordt uitgebreid, zodat een steeds groter aantal werkelijk bestaande stoffen en reacties door de leerlingen wordt gekend. Een versnelde vorm van invulling is mogelijk door groepsgewijze aanbieding en behandeling van stoffen (bijvoorbeeld: metalen) en/of reacties (bijvoorbeeld: verbrandingen).

We zullen de beide vormen van concretisering toelichten voornamelijk aan de hand van het reactiebegrip. Het stofbegrip komt in dit verband slechts beperkt aan de orde, maar de ontwikkeling ervan loopt grotendeels parallel aan die van het reactiebegrip.

Bij de inperking worden voor het optreden van chemische reacties achtereenvolgens drie belangrijke wetmatigheden gegeven die de vorm van voorwaarden hebben. Een van die voorwaarden, het elementbehoud, komt ter sprake in de derde klas.

Bij de introductie van het chemische begrip element is in de afgelopen tientallen jaren net als bij de introductie van de begrippen stof en reactie een steeds grotere zorgvuldigheid nagestreefd. In vele oudere scheikundeboeken wordt eerst **ontleding** ingevoerd als naam voor een type reactie waarbij slechts één uitgangsstof is betrokken, waarna de term **element** valt als aanduiding voor een stof die niet kan worden ontleed. Een **verbinding** is dan een stof die wel kan worden ontleed. Daarna wordt gesteld dat een verbinding uit elementen bestaat. Geleidelijk is duidelijk geworden dat daarbij de term element in twee verschillende betekenissen wordt gebruikt. Wanneer we zeggen dat kopersulfaat het element koper bevat, bedoelen we niet dat in de blauwe kristallen het roodbruine metaal aanwezig is. Grotere zorgvuldigheid is bereikt door de term element in de eerste betekenis te vervangen door de term niet-ontleedbare stof (Umans, 1980; Hondebrink, 1981; Hooykaas 1981). Elementen zijn dan, hoewel ze worden aangeduid met stofnamen, geen stoffen. Met elementbehoud wordt bedoeld dat elementen in tegenstelling tot stoffen bij chemische reacties (kwantitatief) behouden blijven.

De functie van het elementbehoud in de vakstructuur komt vooral tot uiting in de mogelijkheid allerlei tot nu toe nog

denkbare reacties als niet realiseerbaar uit te sluiten. Zo zou een leerling die nog niets weet van elementen, zich niet verbazen als uit kwik en zwavel keukenzout zou worden bereid. Dit proces is immers voor zo'n leerling niet vreemder dan de bereiding van keukenzout uit natrium en chloor. Wetend dat zout een verbinding van natrium en chloor is, kan een chemicus een bereiding uit kwik en zwavel uitsluiten. De enorme voorspellende kracht van het elementbehoud blijkt het best als we nog ongewijde leerlingen vragen zelf chemische reacties te ontwerpen door enkele willekeurig gekozen namen van stoffen uit een lijst stofnamen voor de pijl te schrijven en enkele andere, even willekeurig uit de lijst gekozen namen erachter. Weinige van de bedachte combinaties zullen aan de voorwaarde voldoen dat na de "reactie" dezelfde elementen aanwezig zijn als ervoor. (Hierbij wordt het elementbehoud in kwantitatieve zin nog buiten beschouwing gelaten.)

Het elementbegrip maakt een beschrijving van een verbinding als een combinatie van elementen mogelijk. Na de invoering van elementsymbolen kunnen dan zogenoemde kommaformules voor verbindingen worden geïntroduceerd, bijvoorbeeld Na,Cl voor keukenzout en C,H,O voor (o.a.) suiker. Een kwantitatieve behandeling levert dan formules en reactievergelijkingen op. De mogelijkheid om eenvoudige berekeningen aan reacties uit te voeren wordt hier gewoonlijk aangegrepen. Bij zulke berekeningen wordt de massaverhouding van stoffen die bij een gegeven reactie zijn betrokken afgeleid uit een tabel van atoommassa's.

Wanneer een reactie aan de voorwaarde van het elementbehoud voldoet, krijgt men door verwisseling van uitgangsstoffen en reactieproducten een reactie die eveneens aan het elementbehoud voldoet. Dit legt een basis voor invoering van een begrip **omkeerbare reactie** en de meeste schoolboeken bieden een of meer voorbeelden van omkeerbaarheid, zoals de electrolyse van water gevolgd door de verbranding van waterstof.

Samen met de begrippen stof en reactie vormt het elementbegrip tegenwoordig het hart van de vakstructuur voor scheikunde in het eerste leerjaar. De relatie tussen het elementbegrip en de andere twee begrippen is, net als die tussen stof en reactie onderling, tweezijdig. Het elementbegrip beperkt de reactiemogelijkheden van stoffen. Anderzijds bereiden de begrippen stof en reactie het elementbegrip voor. Dit laatste blijkt als we het behouden blijven van de elementen bij een chemische reactie



stellen tegenover het verdwijnen en ontstaan van stoffen. Dat het **element** koper bij het oplossen van het metaal in salpeterzuur behouden blijft wordt pas een zinvolle uitspraak als we eerst hebben vastgesteld dat de **stof** koper bij dat oplossen verdwenen is.

Tot nu toe hebben we corpusculaire begrippen, zoals **molecuul** en **atoom** in onze beschrijving buiten beschouwing gelaten. We kunnen deze begrippen echter in de al geschetste structuur opnemen door de drie kernbegrippen stof, reactie en element elk in corpusculaire termen te interpreteren. Het begrip stof correspondeert met het begrip **molecuulsoort**, element met **atoomsoort** en chemische reactie met het verbreken en vormen van **bindingen** tussen atomen. De theorie van Dalton, die atomen als onveranderlijk beschouwde, kan dienen ter verklaring van zowel massabehoud als elementbehoud bij chemische reacties. Bij de behandeling van de binding in zouten is een verfijning van deze interpretatie nodig. De vakstructuur schrijft niet voor dat een corpusculaire interpretatie bij de invoering van de kernbegrippen meteen moet worden onderwezen. In de loop van de jaren is ook wat invoering van atomen en moleculen betreft een streven naar grotere zorgvuldigheid in schoolboeken zichtbaar geworden.

#### 4. Thermodynamica en kinetiek

Bij nader inzien is het elementbehoud een negatief criterium: het geeft van een aantal denkbare "reacties" aan dat ze onmogelijk zijn omdat ze niet aan het elementbehoud voldoen. Maar als een reactie daar wel aan voldoet, geeft dat geen zekerheid dat die reactie ook inderdaad een keer zal optreden als we de uitgangsstoffen onder allerlei verschillende omstandigheden samenvoegen. Uit diamant en water ontstaat niet zomaar suiker, ook al blijven alle betrokken elementen daarbij behouden. Het elementbehoud is dus slechts in die zin een voorwaarde dat het een (groot) aantal mogelijkheden *uitsluit*. Het is noodzakelijk maar niet voldoende. Leerlingen die ook na de derde klas scheikunde blijven volgen, worden in het kader van de inperking van het reactiebegrip geconfronteerd met nog twee andere voorwaarden.

Een daarvan is afgeleid van een wetmatigheid in de klassieke thermodynamica. Daar worden twee kenmerken van een spontane verandering in een systeem genoemd: het onveranderd blijven van de energie (eerste hoofdwet) én het toenemen van de entropie (tweede hoofdwet) van systeem en omgeving. Deze twee ken-

merken laten zich verenigen in de regel dat een willekeurig fysisch of chemisch proces in een systeem spontaan kan verlopen als het gepaard gaat met een verlaging van de Gibbs energie:  $\Delta G < 0$ . (Atkins, 1986, blz. 111) Daarbij moeten temperatuur en druk in begin- en eindtoestand gelijk zijn. (Een niet-spontaan proces kan men als spontaan verlopend beschouwen door de energiebron, bijvoorbeeld bij een electrolyse de stroombron, tot het systeem te rekenen.) Tot de processen waarop deze regel van toepassing is, behoren de chemische reacties. Bij de bespreking hiervan beperken we ons tot reacties die al voldoen aan de voorwaarde van het elementbehoud. De genoemde regel heeft het karakter van een tweede voorwaarde voor het optreden van een chemische reactie.

Om de tweede voorwaarde op chemische reacties te kunnen toepassen moet men de Gibbs energie van begin- en eindtoestand kunnen berekenen. Hiertoe zijn tabellen van Gibbs-energiewaarden van zuivere stoffen onder standaardomstandigheden beschikbaar. Bovendien biedt de thermodynamica mogelijkheden om deze waarden om te rekenen naar andere dan standaardomstandigheden. Voor de toepassing betekent dit dat niet alleen op de combinatie van uitgangsstoffen en reactieproducten moet worden gelet maar ook op de gekozen reactieomstandigheden. Wanneer dan na berekening blijkt dat de Gibbs energie van de eindtoestand bij een bepaalde chemische reactie onder bepaalde omstandigheden groter is dan die van de begintoestand, kan men op thermodynamische gronden concluderen dat deze reactie onder de gekozen omstandigheden niet mogelijk is.

Het is van belang om vast te stellen dat de thermodynamische voorwaarde dwingt tot een verfijning van het begrip chemische reactie. Tot toe ging het in de vakstructuur om aflopende reacties, d.w.z. reacties die doorgaan totdat één van de uitgangsstoffen op is. In de thermodynamische opvatting gaat een reactie niet door tot een van de uitgangsstoffen op is maar tot er een toestand is bereikt waarbij de Gibbs energie een minimumwaarde heeft. De eindtoestand is dan een evenwichtstoestand waarin in principe alle bij de reactie betrokken stoffen aanwezig zijn, zij het niet altijd in waarneembare hoeveelheden. De vraag die de thermodynamica kan beantwoorden is dan ook niet of een reactie al dan niet als aflopende reactie kan optreden, maar of in de evenwichtstoestand overwegend reactieproducten dan wel overwegend uitgangsstoffen aanwezig zullen zijn.

In de schoolboeken vinden we de tweede voorwaarde meestal niet als zodanig terug. Thermodynamica wordt gewoonlijk aan het vervolgonderwijs overgelaten. Het begrip chemisch evenwicht wordt echter wel geïntroduceerd. In enkele deelgebieden van de schoolchemie ontmoeten we impliciet de voorwaarde van de afname van de Gibbs energie. Een oud, kwalitatief voorbeeld daarvan is de spannings- of verdringingsreeks der metalen, die HBS-leerlingen uit het hoofd moesten kunnen opzeggen. Deze reeks diende om het al of niet verlopen van reacties waarbij een metaal een ander metaal uit een zout verdrong te voorspellen. Tegenwoordig is de spanningsreeks opgenomen in een tabel van "Standaard elektrodepotentialen" in het tabellenboek BINAS. Deze tabel wordt dikwijls gebruikt om reacties met elektronenoverdracht te voorspellen en om een spanningsverschil tussen de polen van een electrochemische cel te berekenen. Een ander voorbeeld van toepassing van het thermodynamisch criterium op een beperkt gebied is de tabel van "Zuur- en baseconstanten" die eveneens in BINAS is opgenomen. Met deze tabel worden in het vwo evenwichtsberoeeningen gemaakt, zoals de berekening van de pH van een azijnzuuroplossing. Bij beide tabellen wordt in BINAS vermeld onder welke omstandigheden ze gelden.

Voor onze vakstructuur betekent het bovenstaande o.a. dat we het begrip **chemisch evenwicht** als nieuw aspect van de chemische reactie kunnen toevoegen. Het is opnieuw een begrip met een algemene betekenis, dat een functie heeft in de ontwikkeling van het reactiebegrip. Op de deelgebieden van de redoxreacties en de zuur-basereacties kunnen we in het kader van de tweede voorwaarde de begrippen **sterk** en **zwak** als stoffeigenschappen toevoegen. In een kwantitatieve benadering leidt dit tot de begrippen **standaard electrodepotentiaal** en **zuurconstante**.

Bij nadere beschouwing blijkt ook de tweede voorwaarde een negatieve selectiefunctie te bezitten. Een reactie die aan het elementbehoud voldoet maar waarvan kan worden aangetoond dat onder de gekozen omstandigheden de Gibbs energie toeneemt, zal niet verlopen. Dit geldt bijvoorbeeld voor de vorming van suiker uit diamant en water bij kamertemperatuur. Maar van een reactie die aan het elementbehoud voldoet en waarvoor bovendien geldt dat de Gibbs energie afneemt, kan niet met zekerheid worden voorspeld dat ze merkbaar zal verlopen. Als dat wel zo was, zou suiker bij kamertemperatuur spontaan veranderen in

water en diamant. Er is dus nog een derde voorwaarde waaraan voldaan moet zijn.

Deze derde voorwaarde is de kinetische. Aan iedere reactie die aan beide eerder genoemde voorwaarden voldoet, wordt in de chemie een snelheid toegekend. Deze snelheid kan echter in de gegeven omstandigheden zo laag zijn dat er van de reactie in de praktijk niets te merken is. Verschillen in reactiesnelheid worden via het begrip activeringsenergie in verband gebracht met het mechanisme van een reactie. In veel gevallen spelen bovendien aan- en afvoer van bij de reactie betrokken stoffen en van energie (warmte, elektrische energie) een belangrijke rol.

In het onderwijs wordt vaak naar de lage snelheid van een reactie verwezen wanneer de leerlingen bij practicumproeven over de tabel met standaard electrodepotentialen melden niets te kunnen waarnemen van een door hen voorspelde reactie. In het hoofdstuk over **reactiesnelheid** wordt gewezen op factoren die invloed op de snelheid van een reactie hebben, zoals temperatuur, concentratie en de fijnheid van verdeling. De invloed van deze factoren wordt verklaard met een botsingsmodel, dat een corpusculaire interpretatie van de chemische reactie biedt. Ook **katalyse** wordt behandeld, waarbij een verklaring meestal wordt gezocht in verlaging van de **activeringsenergie** die aan een reactie wordt toegekend.

Bij de derde voorwaarde krijgen we opnieuw te maken met het begrip chemisch evenwicht. Meestal wordt dit begrip zelfs geïntroduceerd op basis van reactiesnelheidsbeschouwingen bij omkeerbare reacties. In oudere boeken wordt op deze kinetische basis ook de stap naar kwantitatieve beschouwingen over evenwicht gezet: via de wet van Guldberg en Waage naar de concentratiebreuk en de evenwichtsconstante. Tegenwoordig wordt deze route niet meer gebruikt. Doordat het alternatief, een thermodynamische fundering van de evenwichtsconstante, slechts in zeer beperkte mate gekozen wordt, is het begrip evenwichtsconstante in feite buiten de vakstructuur van het huidige onderwijs terechtgekomen.

De derde voorwaarde vormt het sluitstuk van de inperking van het chemische reactiebepgrip, maar de leerlingen krijgen hier geen nieuw instrument voor het doen van voorspellingen aangereikt. Reactiesnelheden zijn een gegeven en alleen veranderingen ervan bij wijziging van omstandigheden laten zich enigszins

voorspellen. Ook het verschijnsel katalyse behoudt in wezen gewoonlijk een magisch karakter.

### 5. Het stofbegrip

Evenals het begrip chemische reactie wordt ook het chemische stofbegrip in eerste instantie in een zeer algemene betekenis ingevoerd. Tijdens de eerste scheikundelessen duiken er telkens weer nieuwe stoffen met lange namen en vreemde eigenschappen op. Zijn er regels die het aantal mogelijke stoffen aan banden leggen? We laten hier een uitvoerige beschrijving van dit deel van onze vakstructuur achterwege. Wel noemen we enkele begrippen die een rol spelen bij de stapsgewijze inperking van het stofbegrip.

Invoering van het elementbegrip geeft aanleiding te wijzen op het **periodiek systeem**. Dat laat zien dat het totale aantal elementen beperkt is tot ongeveer honderd. Slechts enkele tientallen daarvan komen in het onderwijs aan de orde. Het aantal verbindingen wordt beperkt, o.a. doordat een verbinding gewoonlijk maar uit een zeer klein aantal elementen bestaat. Verder is er, met uitzondering van de koolstofverbindingen, slechts een gering aantal verbindingen per combinatie van elementen mogelijk. Bovendien gelden er in het systeem zowel in horizontale als in verticale richting regels voor reactiemogelijkheden en dus voor de vorming van verbindingen. Het periodiek systeem beperkt dus het aantal mogelijke stoffen, biedt een indelingsmogelijkheid en zelfs een zekere voorspelbaarheid van stoffen.

Op corpusculair niveau wordt het aantal bindingsmogelijkheden per atoom vastgelegd met behulp van het begrip **valentie**. Bij de behandeling van dit onderwerp wordt in veel schoolboeken het atoommodel van Dalton vervangen door dat van Bohr. Met behulp van de **electronenverdeling** over energieniveaus in het atoom wordt een relatie gelegd tussen valentie en periodiek systeem. Bij verklaringen van chemische binding wordt aan de electronen niet alleen een energieniveau maar ook een positie in de ruimte toegewezen. Er worden verschillende **bindingstypen** onderscheiden en er is aandacht voor de ruimtelijke **structuur** van moleculen en kristallen.

Een wezenlijk aspect van wetenschappelijke modellen is dat ze niet ingewikkelder worden gemaakt dan voor hun verklarende functie nodig is. Een analyse van de corpusculaire modellen in schoolboeken leert dat ze gebruik maken van vijf elementen uit

de macroscopische wereld, te weten ruimte, tijd, massa, energie en elektrische lading. Daarvan zijn de laatste drie in de bovenbouw gekwanticeerd. (Strikt genomen zijn er voor een beschrijving van atoom- en molecuulmodellen in schoolboeken slechts vier van de zeven SI-grootheden nodig, nl. lengte, tijd, massa en stroomsterkte.)

## 6. Invulling

We hebben nu zowel voor het begrip chemische reactie als - zij het zeer globaal - voor het stofbegrip een deel van de vakstructuur beschreven. Daarbij ging het vooral om voorwaarden waaraan bestaande reacties en stoffen voldoen. Beide begrippen zijn immers oorspronkelijk in een algemene, onbegrensde betekenis geïntroduceerd. Door steeds meer voorwaarden te leren kennen ontwikkelen de leerlingen een steeds realistischer stof- en reactiebegrip. De beoogde begripsontwikkeling, die als een rode draad door de schoolboeken loopt, vindt hier als het ware van buitenaf plaats. We noemen dit proces, dat verwant lijkt te zijn aan een fysisch-chemische benadering, *inperking*.

Daarnaast is er vrijwel vanaf de eerste les een tweede rode draad als onderdeel van de vakstructuur herkenbaar, die in tegenovergestelde richting loopt. Deze begint met de allereerste voorbeelden van chemische reacties en van stoffen en breidt de lijst van bekende voorbeelden steeds verder uit. De beschikbare ruimte wordt als het ware van binnen uit met concrete gevallen opgevuld. Deze beschrijvende benadering noemen we *invulling*.

Het enorme aantal bekende stoffen en reacties dwingt bij die invulling tot kiezen. Voor het maken van die keuzes onderscheiden we een intern en een extern criterium. Het *interne* criterium houdt in dat de motieven voor het kiezen van een stof of een reactie binnen de vakstructuur worden gevonden. Het maakt een koppeling met de stapsgewijze inperking van de begrippen stof en reactie mogelijk. Zo worden bij de introductie van het elementbegrip een aantal elementen behandeld.

Het *externe* criterium heeft vooral betrekking op het maatschappelijk belang van stoffen en reacties. Voorbeelden daarvan zijn het roesten van ijzer en de verbranding van aardgas. Sommige stoffen en reacties voldoen aan beide criteria.

Het leren van afzonderlijke voorbeelden van stoffen en reacties is bij de huidige stand van chemische kennis een tamelijk uitzichtloze bezigheid. Een meer efficiënte wijze van invul-

ling is mogelijk wanneer stoffen of reacties groepsgewijs kunnen worden besproken. Indeling in groepen veronderstelt de keuze van een gezichtspunt en dit kan opnieuw zowel intern als extern ten opzichte van de vakstructuur worden gekozen. Een lijst van naar sterkte gerangschikte reductoren, die past bij de toepassing van het thermodynamische reactie criterium op het deelgebied van de redoxreacties is gebaseerd op een intern criterium, een lijst van brandstoffen met hun verbrandingswarmte op een extern criterium. Ammoniak kan volgens een intern indelingscriterium tot de basen worden gerekend, volgens een extern criterium wordt het echter als een van de indirecte veroorzakers van zure regen genoemd.

De invulling van de eerst nog zeer algemene begrippen stof en reactie vertegenwoordigt, zoals hierboven reeds vermeld, de beschrijvende chemie. In oudere schoolboeken is de beschrijvende traditie sterker vertegenwoordigd dan in de latere. Elementen en hun verbindingen werden in schoolboeken van vóór 1960 systematisch, volgens de groepenindeling van het periodiek systeem besproken. Voor de organische chemie gold een behandelingswijze die voornamelijk op een indeling in homologe reeksen was gebaseerd: de alkanen, de alkanolen enz. Een indeling van stoffen naar samenstelling en structuur (bijv. functionele groepen) domineerde dus. Later werd de nadruk meer gelegd op een indeling in reactietypen, waarbij bindingstypen en reactiemechanismen een belangrijke plaats kregen toegewezen. De grote aandacht voor het gemeenschappelijke leidde er toe dat de individuele kenmerken van een bepaalde stof of reactie als relatief onbelangrijk werden beschouwd: voor allerlei combinaties van reductoren en oxidatoren konden op papier reactievergelijkingen (met elektronenoverdracht) worden opgesteld en berekeningen gemaakt zonder per geval na te gaan of en hoe zo'n reactie in werkelijkheid verloopt.

De indeling in reactietypen werd in steeds sterkere mate gebaseerd op corpusculaire modellen. Zo werden in oudere schoolboeken zuren en basen in oplossing nog herkend aan hun reactie met lakmoes, terwijl tegenwoordig de overdracht van protonen als criterium voor de reactie van een zuur met een base geldt.

Sinds ongeveer 1970 is de aandacht voor toepasbaarheid van chemische kennis in het dagelijks leven sterk toegenomen. Waarschijnlijk is dit mede een gevolg van het feit dat elemen-

taire scheikunde tegenwoordig voornamelijk wordt onderwezen aan leerlingen die later niet beroepsmatig in de chemie werkzaam zullen zijn. Daarnaast zal de toenemende aanwezigheid van chemische stoffen en processen in het dagelijks leven een rol spelen. Bij groeiende aandacht voor toepasbaarheid verschuift de nadruk terug naar individuele stoffen en reacties, zoals de samenstelling van lucifers, de werking van de loodaccu en de fotosynthese. Groepsgewijze behandeling van stoffen en reacties volgens een categorisering in termen van maatschappelijk belang past echter niet altijd goed bij een vakstructuur die beter intern-chemische criteria toelaat. Er ontstaat dus een spanning tussen de vakstructuur enerzijds en de belangstelling voor maatschappelijke toepassingen van chemische kennis anderzijds. In een tweede artikel willen we hierop terugkomen.

We hebben in dit laatste gedeelte van onze beschrijving geen vetgedrukte termen als onderdelen van de vakstructuur opgenomen. Namen van categorieën van stoffen of reacties zouden daarvoor in aanmerking komen, maar de namen die we hebben genoemd dienden slechts als voorbeeld en de onderlinge samenhang ervan wordt daarbij niet zichtbaar.

### 7. Slotopmerking

We hebben in het bovenstaande een vakstructuur van scheikunde beschreven die bestaat uit een basisgedeelte dat enkele kernbegrippen in een zeer algemene betekenis invoert, en een gedeelte waarin deze algemene begrippen geleidelijk een concreter inhoud krijgen. Wij menen dat deze vakstructuur, ook al wordt ze in het voortgezet onderwijs slechts gedeeltelijk gerealiseerd, als één geheel moet worden opgevat. De drie onder inperking genoemde voorwaarden bieden alleen in hun combinatie een sluitende verklaring voor het wel of niet optreden van een chemische reactie. De twee concretiseringsvormen, de inperking en de invulling, vullen elkaar aan en zouden elk afzonderlijk weinig zin hebben. De noodzaak tot concretisering vloeit voort uit het algemene karakter van de kernbegrippen chemische reactie en stof die in het prille begin worden ingevoerd.

Hoewel we in dit artikel niet alle onderdelen van de gangbare leerplannen uitvoerig hebben besproken, menen we toch te kunnen stellen dat we in onze vakstructuur alle grote onderwerpen van de gebruikelijke schoolscheikunde een plaats kunnen



geven. Aanvullingen, commentaren en andere reacties op dit artikel zouden we zeer op prijs stellen.

### Literatuur

- Atkins, P.W. (1986) *Physical Chemistry, 3rd ed.* Oxford: Oxford University Press.
- Hondebrink, J.G. (1981) Voorzichtig met elementen, *Faraday*, 50, 88-90.
- Hooykaas, R. (1981) De wet van elementbehoud, *Faraday*, 50, 189-195.
- Lameris, G.H. (1983) Een mogelijke kennisstructuur voor het beginonderwijs in de scheikunde, *Faraday*, 52, 2-8 en 43-50.
- Schoen, L. & A. Mast (1989) Wat moet een consument van scheikunde weten? *NVON-Maandblad*, 14, 8, 357-359.
- Umans, A.J.H. (1980) De begrippen element en enkelvoudige stof, *Faraday*, 49, 202-208.
- Voorde, H.H. ten (1977) *Verwoorden en verstaan*, 's-Gravenhage: Staatsuitgeverij.