Jan van Driel

BETROKKEN BIJ EVENWICHT

BETROKKEN BIJ EVENWICHT JAN VAN DRIEL

5

CD-β WETENSCHAPPELIJKE BIBLIOTHEEK

onder redactie van:
Dr. P.L. Lijnse
Prof. dr. A. Treffers
Dr. W. de Vos
Dr. A.J. Waarlo

1. Didactiek in Perspectief
   redactie: P.L. Lijnse en W. de Vos

2. Radiation and Risk in Physics Education
   H.M.C. Eijkelhof

3. Natuurkunde-onderwijs tussen Leefwereld en Vakstructuur
   R.F.A. Wierstra

4. Een onverdeelbare Eenheid
   M.J. Vogelezang

5. Betrokken bij Evenwicht
   J.H. van Driel

Centrum voor Didactiek van Wiskunde en Natuurwetenschappen
Rijksuniversiteit Utrecht
Postbus 80.008
3508 TA Utrecht

BETROKKEN BIJ EVENWICHT

CIP-GEGEVENS KONINKLIJKE BIBLIOTHEEK, DEN HAAG

Driel, Jan Hendrik van

Betrokken bij evenwicht : een chemiedidactisch onderzoek naar ontwikkeling van een chemisch evenwichtsbegrip / Jan Hendrik van Driel. - Utrecht : CDB Press. - (CD-β wetenschappelijke bibliotheek ; 5)
Proefschrift Utrecht. - Met lit. opg. - Met samenvatting in het Engels.
ISBN 90-73346-07-X
SISO 456.4 UDC 372.854.02(043.3)
Trefw.: chemie ; didactiek.

Omslag: A. Lurvink, OMI-RUU
Lay-out: Jan van Driel
Druk: Wibro, Helmond (binnenwerk) en Haro, Hengelo (omslag)
Copyright: J.H. van Driel, Utrecht, 1990.

ISBN 90-73346-07-X

BETROKKEN BIJ EVENWICHT

Een chemiedidactisch onderzoek naar
ontwikkeling van een chemisch evenwichtsbegrip

INVOLVED IN EQUILIBRIUM

An educational study into developing
a chemical equilibrium concept
(with a summary in English)

PROEFSCHRIFT

TER VERKRIJGING VAN DE GRAAD VAN DOCTOR AAN DE RIJKSUNIVERSITEIT TE UTRECHT OP GEZAG VAN DE RECTOR MAGNIFICUS, PROF. DR. J.A. VAN GINKEL, INGEVOLGE HET BESLUIT VAN HET COLLEGE VAN DECANEN, IN HET OPENBAAR TE VERDEDIGEN OP MAANDAG 17 SEPTEMBER 1990 DES NAMIDDAGS TE 4.15 UUR.

door

Jan Hendrik van Driel

geboren op 14 augustus 1959 te Groningen

uitgeverij CDβ pers - Utrecht

Promotor: Prof. Dr. A.H. Verdonk

Co-promotor: Dr. W. de Vos

Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van het VF-onderzoeksprogramma "Begripsontwikkeling en Curriculumonderzoek in de Wiskunde en de Natuurwetenschappen".

"kijk, het gaat erom dat je aan
de buitenkant niets ziet..."

"...maar d'r gaat hartstikke
wilde gedoe allemaal binnenin!"

Woord vooraf

Hoewel dit proefschrift in de eerste persoon enkelvoud is geschreven, wil ik benadrukken dat ik zowel bij de uitvoering van het onderzoek als bij het schrijven van dit verslag heb samengewerkt met verschillende mensen. Zonder hun bijdragen zouden mijn inspanningen in veel gevallen vruchteloos zijn geweest.

In de eerste plaats wil ik mijn co-promotor Wobbe de Vos bedanken. Hij is bij alle facetten van het onderzoek intensief betrokken geweest. Hij maakte tijd vrij op ieder moment dat ik daar om vroeg. Zijn bijdragen waren altijd creatief en constructief; de samenwerking inspirerend en stimulerend. Wobbe, het was een voorrecht om met je te werken.

Mijn promotor Adri Verdonk heeft zich minder intensief met het onderzoek bezig kunnen houden. Desondanks liet hij zijn betrokkenheid steeds blijken. Zijn persoonlijke visie op chemie, didactiek en onderwijs heeft mij vaak zowel verrast als verder geholpen. Bovendien heb ik hem leren kennen als een gedreven, integere en warme man. Adri, ik heb veel van je geleerd.

Veel dank ben ik ook verschuldigd aan Ri-Jean Mertens. Zij koos ervoor om als studente bij de beginfase van het onderzoek betrokken te zijn. In dat stadium was ik nog nauwelijks in staat om haar te begeleiden, maar zij toonde zelf veel initiatieven. Ri-Jean, jouw bijdrage is heel waardevol geweest.

Ook de steun van andere collega's en studenten heeft veel voor mij betekend. Van hen wil ik met name noemen: mijn mede-promovendi Hans Elzenga en Martin Goedhart ('Jong Oranje'); Riet Leewis, Louisette Rommerts-Coops en Frits Pater, die alle drie hulp boden bij de meest uiteenlopende klussen en problemen; Nico Haselager, voor de manier waarop hij stapels schriftelijke antwoorden van groepen leerlingen heeft verwerkt; Tjeerd Haitjema, Berry van Berkel en Wim den Boer, die in het kader van hun 'klein bijvak' onderzoeksgegevens verzamelden die ook voor mij bruikbaar bleken; Harry Broekman, die conceptversies van de hoofdstukken 1 en 2 van commentaar voorzag en prof. dr. H.A.M. Snelders, voor zijn assistentie bij mijn wetenschaps-historische verkenningen. Mijn schoonvader, Hans Kruse, heeft het manuscript gecorrigeerd op type- en taalfouten, waarvoor ik hem zeer erkentelijk ben.

Voor het verzamelen van onderzoeksmateriaal was ik afhankelijk van de medewerking van scheikundedocenten en leerlingen. Speciaal wil ik de leerlingen bedanken die zich vrijwillig lieten 'afluisteren' door mijn geluidsopnameapparatuur. Ik noem de docenten van deze leerlingen, die de deur van hun klaslokaal voor mijn onderzoek openstelden: Rob Loven, Berry Philippa, Peter van de Linden, Tom van Eck, Barbara de Wit, Arie Hamaker, Klaas-Jan Terpstra, Dirk Kooiman, Lidy van Prooije-Belle, Eelco Hessling en Johan de Roo.

Tenslotte wil ik alle anderen die mij tijdens het onderzoek op één of andere manier hebben geholpen, al was het maar door me aan te horen, hiervoor van harte bedanken.

hoofdstuk 1

Inleiding

Opzet van dit proefschrift
Dit proefschrift is een verslag van een chemiedidactisch onderzoek. Ik heb gekozen voor de volgende rapportagevorm: na een inleiding waarin een doelstelling wordt geformuleerd, beschrijf ik het kader en de methode van het onderzoek. Dan volgt een inhoudelijke oriëntatie op het onderzoeksgebied, waarna een gedetailleerde beschrijving van experimenteel verkregen onderzoeksresultaten aan de orde komt. Het verslag wordt afgerond met conclusies met betrekking tot de doelstelling en met suggesties voor nader onderzoek.

Een dergelijke opzet is gebruikelijk en voldoende in wetenschapsgebieden waarin bruikbare en geaccepteerde theoretische kaders en onderzoeksmethoden voorhanden zijn. In chemiedidactiek zijn theorieën en methoden echter nog sterk in ontwikkeling. Ik heb getracht om hieraan via mijn onderzoek een bijdrage te leveren. In dit verband acht ik het van belang om expliciet aandacht te besteden aan het leerproces dat ik als onderzoeker heb doorgemaakt. Op verschillende plaatsen verwijs ik naar dit proces en in het slothoofdstuk doe ik er, terugblikkend op het onderzoek, enkele uitspraken over.

Dit eerste hoofdstuk is vooral bedoeld om aan te geven wat de aanleiding is geweest voor het onderzoek. Na enkele persoonlijke ervaringen als docent scheikunde in HAVO en VWO, beschrijf ik de voornaamste problemen waarvoor het scheikunde-onderwijs op deze schooltypes m.i. staat en die chemiedidactisch onderzoek noodzakelijk maken. Hieruit volgt een eerste formulering van het onderzoeksdoel. Tenslotte laat ik zien dat de keuze om het onderwerp chemisch evenwicht centraal te stellen, samenhangt met resultaten van eerder verricht chemiedidactisch onderzoek en met een zekere onderzoeksstrategie.

1.1 Onderwijsproblemen

Sinds mijn studietijd krijg ik van vele niet-chemici, voor zover zij scheikunde-onderwijs hebben gevolgd, gelijkluidende reacties op de mededeling dat ik me met scheikunde bezighoud. Deze kan ik samenvatten in de uitspraak:

"Van scheikunde heb ik echt nooit iets begrepen!"

Omdat ik van andere chemici heb vernomen dat ook zij regelmatig met een dergelijke uitspraak worden geconfronteerd, ben ik tot de overtuiging gekomen dat hier sprake moet zijn van een algemeen probleem. Aanvankelijk zocht ik de oorzaak ervan in een lage kwaliteit van het onderwijsaanbod (via docent en schoolboek), gecombineerd met de mogelijkheid dat scheikunde voor velen nu eenmaal te moeilijk is om in het voortgezet onderwijs "begrepen" te kunnen worden. In de periode dat ik zelf scheikunde aan HAVO en VWO doceerde, merkte ik echter dat deze analyse te oppervlakkig was.

Ervaringen als docent
Slechts enkele van de onderwerpen die ik als docent aan de orde stelde, wekten de belangstelling van een aanzienlijk deel van de leerlingen. Bovendien kreeg ik af en toe de vraag waarom ik bepaalde onderwerpen behandelde, want 'daar hebben we toch niets aan'. Ik hield me echter aan de onderwerpen die in de gebruikte leergang werden beschreven, o.a. opdat de leerlingen zouden kunnen terugzoeken wat ik in de les had besproken. Deze leergang was afgestemd op de vigerende examenprogramma's en leerplannen voor HAVO en VWO die door het ministerie van O&W zijn vastgesteld[1]. Ik merkte echter dat er nauwelijks gelegenheid was om onderwerpen die ik als onbelangrijk en oninteressant voor leerlingen was gaan beschouwen achterwege te laten. Evenmin was er ruimte om extra onderwerpen die wel geschikt leken, toe te voegen.

Pogingen om traditionele onderwerpen te actualiseren (zure regen behandelen in het kader van zuren en basen), konden het probleem wat mij betreft niet oplossen. Ik slaagde er niet in om chemische actualiteiten te integreren in de schoolchemie. Mijn onderwijs bleef in het teken van leerplan en examen staan.

Meestal volgde ik bij de behandeling van een onderwerp de opzet van de leergang, waarin theorie, practica en vraagstukken elkaar afwisselden. Bij de behandeling van theorie door middel van een frontaal betoog kreeg ik vaak de indruk over de hoofden heen te praten. Als leerlingen luisterden, deden ze dit voor mijn gevoel niet zozeer uit belangstelling en/of met begrip, maar vooral omdat ik ze gevraagd had stil te zijn. Mijn vermoedens werden vaak bewaarheid bij de correctie van proefwerken. Hoewel gewoonlijk de meeste leerlingen een voldoende wisten te behalen, kwamen velen in hun antwoorden m.i. niet verder dan napraten zonder begrip. Ik trachtte dit probleem wel eens op te lossen door de leerlingen in kleine groepen theorie uit het boek te laten bestuderen, waarna ik ze bijbehorende opgaven liet maken. Deze aanpak bevredigde echter evenmin. Ik werd te vaak te hulp geroepen om de tekst en de vragen te verduidelijken, terwijl bovendien de onrust in de klas toenam.

Van proeven die ik regelmatig liet uitvoeren, had ik aanvankelijk verwacht dat leerlingen deze zowel interessant als leerzaam zouden vinden. Na afloop van een leerlingenpracticum in 5-VWO echter stelde een leerlinge mij eens in volle ernst de vraag:

> "Waarom doen we al die proefjes eigenlijk?"

Ik was ontzet. Ik beschouwde practica als de basis voor het leerproces van de leerlingen. Na de ervaringen die ze hierbij opdeden, zou een te presenteren theorie voor hen een (verklarende) functie moeten krijgen. In andere gevallen verwachtte ik dat ze zouden zien dat het resultaat van een proef al of niet in overeenstemming was met een eerder behandelde theorie. Deze samenhang tussen proeven en theorie bleek voor leerlingen echter lang niet altijd te bestaan.

---

[1]Onder een leergang versta ik een reeks schoolboeken. De leer*plannen* zijn formeel slechts van toepassing op rijksscholen, maar alle recente leergangen zijn erop afgestemd. Een leerplan kan gezien worden als een uitwerking van een examenprogramma: hierin wordt per leerjaar een reeks onderwerpen opgesomd. Per onderwerp worden enkele onderwijssuggesties gegeven en een aantal lesuren aanbevolen.

In verband met de voorbereiding op proefwerken liet ik leerlingen grote hoeveelheden vraagstukken maken. Ik kreeg hierdoor echter de indruk dat mijn onderwijs vaak niet meer was dan toetstraining. Deze nadruk op toetsen werkte door in de houding van leerlingen. Ook zij leken de toets als het hoogste onderwijsdoel te beschouwen en wilden vaak heel precies weten wat hen op een proefwerk te wachten stond. Gezien hun persoonlijke belang bij rapporten en examens kon en kan ik ze dat niet kwalijk nemen. Het gevolg was echter dat hun belangstelling voor onderwerpen die niet getoetst zouden worden alleen om die reden veelal minimaal was.

Interpretatie

Achteraf kan ik mijn onvrede in verband brengen met het in de aanhef van deze paragraaf aangewezen probleem. Het niet-begrepen-hebben van scheikunde staat in mijn ogen betrekkelijk los van resultaten bij toetsen en examens. Ik vermoed dat veel leerlingen, ook bij het behalen van een voldoende resultaat, het gevoel hebben niet over 'werkelijk' begrip te beschikken. Daarnaast heb ik de indruk dat ook de *zin* van het scheikunde-onderwijs veelal niet begrepen wordt: men kan hier voor zichzelf geen betekenis aan geven. Een betekenis bestaat slechts binnen de schoolcontext; daarbuiten krijgt chemische kennis geen functie en dus geen waarde. Er is daarom sprake van een probleem met aspecten die zowel cognitief ('napraten zonder inzicht') als affectief ('wat hebben we hier aan?') getint zijn. Ik typeer dit probleem als *een gebrek aan betrokkenheid.* De term 'betrokkenheid' verbind ik met zowel cognitieve als affectieve factoren, omdat deze in mijn ogen samenhangen.

Het negatieve onderwijsresultaat schrijf ik toe aan een combinatie van een aantal factoren. In de eerste plaats is de doelstelling van het scheikunde-onderwijs niet eenduidig. Zo is het o.a. de bedoeling om een wetenschappelijke studie van chemie voor te bereiden. Tegelijk vertoont het programma onderwerpen die vooral met het oog op een toekomstige beroepsuitoefening als chemicus (analist) opgenomen lijken te zijn. Tenslotte probeert men leerlingen die later in studie of beroep geen gebruik zullen maken van chemie een aantal noties bij te brengen omtrent de rol van chemie in maatschappij en leefwereld ('chemie voor de burger').

De eerste twee doelstellingen blijken beide het onderwijs in zowel HAVO als VWO te domineren: zo moeten leerlingen in het derde leerjaar van beide schooltypes verslagen maken van practica, alsof zij daarbij wetenschappelijke experimenten zouden hebben uitgevoerd. Een zeer gering percentage van de betrokken leerlingen zal na het voortgezet onderwijs verslagen in een wetenschappelijke context gaan schrijven. Tevens oefent men leerlingen van zowel HAVO als VWO in titraties, hoewel slechts enkelen later in een beroepspraktijk zullen titreren. De toekomstige 'burger' komt er in dit verband slecht af. De meeste onderwerpen sluiten slecht aan bij ervaringen die leerlingen in hun leefwereld opdoen en bij informatie over chemie die zij opvangen via media.

De vigerende examenprogramma's en leerplannen voor HAVO en VWO zijn in mijn ogen vooral het produkt van een *onderwijstraditie*, waarin het voorbereiden op wetenschap en beroepsuitoefening lange tijd de enige doelstellingen waren. Daarnaast lijkt de genoemde toetscultuur er toe bij te dragen dat sommige onderwerpen (zoals 'chemisch rekenen' en 'zuren en basen') hun plaats

vooral danken aan de mogelijkheid om er talloze rekenopgaven over te maken. Zulke opgaven kunnen immers 'objectief' getoetst worden: een berekening kan goed, gedeeltelijk goed of fout zijn. Hierdoor is de nadruk gaan liggen op binnen-schoolse doelen, terwijl het zicht op doelen buiten de school belemmerd wordt. Het onderwijs vormt een gesloten systeem dat vooral selecteert, maar nauwelijks prepareert met het oog op 'burgerschap'.

Men lost het probleem van de betrokkenheid niet op door uitsluitend de onderwerplijsten te actualiseren of door het onderwijs meer te richten op aansluiting bij de leefwereld. Of leerlingen over kennis gaan beschikken die door hen (ook later) als zinvol wordt gezien, hangt in belangrijke mate af van de wijze waarop het onderwijs is ingericht. Daarbij gaat het zowel om de structurering van de vakinhoud als om de wijze waarop deze structurering in de onderwijssituatie voor leerlingen en docenten gestalte krijgt.

De door mij beschreven inrichting van onderwijs acht ik hiertoe achteraf ongeschikt, omdat ik vooral trachtte om mijn kennis op leerlingen over te dragen. Daarbij hanteerde ik (noodgedwongen en in navolging van de gebruikte leergang) een chemische vakstructuur en een hierbij horende vaktaal, die voor leerlingen vaak ontoegankelijk bleek. Hierdoor werd de eigen ontwikkeling van kennis door leerlingen geblokkeerd. Zo konden zij vaak niet verder komen dan napraten en imiteren, hetgeen bij toetsen naar voren kwam.

Als docent kon ik de geschetste problemen niet oplossen omdat:

- ik geen alternatieven zag voor de beschreven manier van onderwijzen, mede door gebrek aan onderwijservaring;
- binnen leerplannen en examenprogramma's weinig speelruimte overbleef in het onderwijsprogramma;
- de leerlingen onder druk van het toetssysteem de bestaande situatie min of meer aanvaardden[2].

Gelet op de opmerking die aan het begin van deze paragraaf geciteerd is, vermoed ik dat deze interpretatie niet uitsluitend van toepassing is op het door mij verzorgde onderwijs. *Het probleem van de betrokkenheid wordt in belangrijke mate veroorzaakt door inhoud en structuur van het scheikunde-onderwijs op HAVO en VWO en is daarmee van chemiedidactische aard.* Deze stelling werk ik in het onderstaande uit.

1.2 De noodzaak van chemiedidactisch onderzoek

Problemen die overeenkomen met die hierboven, zijn ook door anderen beschreven. In dit verband volsta ik met verwijzingen naar dissertaties van de Nederlandse chemiedidactici Koning, De Miranda, Ten Voorde en De Vos[3].

---

[2]Hierbij wil ik opmerken dat leerlingen uit het toetssysteem min of meer kunnen afleiden wat van hen verlangd wordt, hetgeen hen een gevoel van zekerheid kan verlenen.

[3]Zo betoogt Koning dat het mededelen van 'feiten' in leerboeken en het toetsen hiervan op examens belemmert "dat de leerling de stof zelf leert vormen" (Koning, 1948, p. 208-217); De Miranda uit o.a. bezwaren tegen de samenstelling en de overladenheid van het HBS-examenprogramma (De Miranda, 1955, p.17-33); bij Ten Voorde staat de term "kloof van onverstaanbaarheid" centraal. Deze is bijvoorbeeld van toepassing op situaties waarin leerlingen en docent in verschillende 'talen' over chemische zaken spreken (Ten

Ondanks hun inspanningen zijn, zoals uit de vorige paragraaf is gebleken, deze problemen in het huidige scheikunde-onderwijs nog altijd aanwijsbaar. Dit rechtvaardigt in mijn ogen verder onderzoek.

Hieronder wil ik ingaan op een rapport dat Verdonk in 1986 heeft geschreven op verzoek van de Wetenschappelijke Raad voor het Regeringsbeleid (WRR) in verband met de aanstaande invoering van de basisvorming[4]. Hierin stelt ook hij inhoud en structuur van het huidige scheikunde-onderwijs ter discussie. Hij gaat daarbij o.a. in op een relatie tussen onderwijs en wetenschap en betoogt dat de schoolchemie de ontwikkelingen in de wetenschappelijke chemie niet heeft kunnen volgen. Dit is niet zo vreemd, omdat in een vrijwel gelijk gebleven aantal lesuren niet steeds meer onderwerpen behandeld kunnen worden, waarvan bovendien het niveau steeds geavanceerder is. Pogingen om deze kloof door 'leerstofvervroeging' te overbruggen, leiden doorgaans tot napraten zonder inzicht.

Verdonk trekt de conclusie dat het niet langer zinvol is om wetenschap en beroepsuitoefening als bron voor de inrichting van beginonderwijs in de scheikunde te hanteren. Wetenschap(shistorie) en beroep bieden wel een kader voor de inhoud van dit onderwijs, maar niet voor de structuur ervan. Hiervoor moeten andere bronnen worden gezocht.

Mogelijkheden om onderwijs in te richten op basis van maatschappelijke actualiteiten worden door hem echter beperkt geacht. Deze actualiteiten wisselen elkaar snel en in een onvoorspelbaar patroon af: door hieraan veelvuldig aandacht te besteden maakt men het onderwijsaanbod versnipperd en structuurloos. Zonder inzicht in samenhang tussen chemische verschijnselen is de mogelijkheid voor leerlingen om chemische kennis op andere dan de behandelde voorbeelden toe te passen gering.

Verdonk betoogt dat onderwijskundig onderzoek evenmin kan bijdragen aan de gezochte structureringscriteria voor vakonderwijs. In onderwijskundig onderzoek staan meestal immers generale concepten (orde, motivatie, abstractieniveau, e.d.) centraal, welke worden losgekoppeld van inhoud en structuur van het feitelijke onderwijs. Op dit laatste gebied ligt echter de kracht van vakdidactisch onderzoek:

> "Door leren en onderwijzen in samenhang met elkaar en met leerinhoud en leermiddel in de microsituatie te onderzoeken, creëert men een mogelijkheid om de ontwikkeling van leerplannen, examens en onderwijsmateriaal te verbeteren ("bottom up" onderzoek). Juist deze samenhang maakt de ontwikkeling mogelijk van op elkaar passende structuren voor leren en onderwijzen, tot uiting komend in leermiddel en in toetsing."
> (Verdonk, 1986, p.47-48)

Op basis van dit type onderzoek kan volgens Verdonk een *didactische structuur* worden verkregen, waarin de keuze en volgorde van onderwerpen op basis van zowel *leerbaarheid* als *onderwijsbaarheid* worden gelegitimeerd. Chemiedidactisch onderzoek kan daarmee bijdragen tot een situatie waarin leerlingen hun

---

Voorde, 1977, p.30); De Vos beschrijft onder meer het onbevredigend functioneren van het leerlingenpracticum (De Vos, 1985, p.9-12).

[4]Verdonk (1986); De Vos heeft aan dit rapport een artikel gewijd (De Vos, 1986).

onderwijs als zinvol ervaren, terwijl docenten aan hun inspanningen eveneens betekenis kunnen geven: leren en onderwijzen zijn dan op elkaar betrokken.

Van dit rapport onderschrijf ik in de eerste plaats de stelling dat een vakwetenschappelijke structuur van chemie niet geschikt is voor het beginonderwijs in de scheikunde. Net als Verdonk zie ik evenmin mogelijkheden om dit onderwijs in te richten op basis van maatschappelijke actualiteiten. *Ik verwacht echter dat chemiedidactisch onderzoek een bijdrage kan leveren aan de oplossing van het probleem van de betrokkenheid.* Zulk onderzoek zou mij kunnen helpen bij het zoeken naar alternatieven die ik als docent niet zag. Maar daarmee is het probleem van de speelruimte nog niet opgelost. Beslissingen over leerplannen en examenprogramma's worden op landelijk niveau genomen. Een pleidooi voor veranderingen hierin kan aan kracht winnen indien het door onderzoeksresultaten wordt ondersteund[5].

Tevens ontleen ik aan dit rapport een eerste formulering van het doel van mijn onderzoek: *dit wordt gericht op het verkrijgen van een didactische structuur.* In het volgende hoofdstuk zal ik de term didactische structuur nader preciseren. In verband daarmee zal ik aangeven vanuit welke visie op onderwijs ik streef naar vergroting van betrokkenheid van leerlingen. Tevens beschrijf ik objecten van chemiedidactisch onderzoek en de wijze waarop dit onderzoek concreet is uitgevoerd, teneinde het genoemde doel te kunnen bereiken. In de volgende paragraaf verbind ik dit doel met een onderzoeksstrategie, die samenhangt met een keuze van chemische begrippen die in mijn onderzoek centraal zullen staan.

1.3 Een didactisch onderzoek naar chemisch evenwicht

In een recent artikel laten De Vos en Verdonk zien dat het begrip chemische reactie centraal staat in de scheikundeprogramma's van het voortgezet onderwijs en dat een groot aantal onderwerpen in het kader van de ontwikkeling van dit begrip worden behandeld. Zij baseren zich op een analyse van leerplannen en leergangen en spreken van een "vakstructuur van het schoolvak scheikunde", die zij zien als:

> "een produkt van structurering van chemische kennis *als resultaat van en met het oog op onderwijs.*" (De Vos & Verdonk, 1990, p.20)

Zij betogen dat er een samenhang bestaat tussen structuren van chemie als wetenschap en chemie als schoolvak, zonder dat de laatste een vereenvoudigd of geschematiseerd onderdeel van de eerste zou zijn. De schoolvakstructuur heeft een eigen identiteit, die in belangrijke mate wordt bepaald door een zekere onderwijstraditie.

De Vos en Verdonk demonstreren dat het schoolvak scheikunde een interne samenhang vertoont, waarin verschillende onderwerpen elkaar legitimeren: zo worden scheidingsmethoden behandeld in het kader van het begrip zuivere stof, dat op zijn beurt nodig is in verband met de invoering van het reactiebegrip.

---

[5]De Vos & Verdonk hebben beschreven hoe een leerplan tot stand kan komen. Zij pleiten er voor om leerplannen op basis van vakdidactisch onderzoek te motiveren (De Vos & Verdonk, 1984).

Uit hun analyse blijkt dat de schoolchemie weliswaar een redelijk consistente eenheid vormt, maar ook dat maatschappelijke toepassingen van chemische kennis niet goed opgenomen kunnen worden in de bestaande schoolvakstructuur.

Op basis van deze beschrijving kunnen verschillende strategieën gekozen worden om de bestaande schoolvakstructuur door middel van onderzoek te veranderen:

- Door de schoolvakstructuur zoveel mogelijk te vervangen door een *wetenschappelijke* vakstructuur kan de bestaande kloof tussen wetenschap en onderwijs verkleind worden. Zoals gezegd (§1.2) wijs ik een hierop gerichte onderzoeksstrategie af.
- Men kan trachten om het onderwijs meer *leefwereldgericht* te maken. In dat geval probeert men de betrokkenheid van leerlingen te vergroten door het onderwijs te laten aansluiten bij ervaringen uit hun leefwereld. Recent natuurkundedidactisch onderzoek (bijvoorbeeld van Wierstra, 1990) heeft uitgewezen dat een dergelijke aanpak mogelijk is.
- De schoolvakstructuur kan op een *alternatieve* wijze worden ingevuld. Deze aanpak is gekozen door Ten Voorde (1977) en Vogelezang (1990). Ook bij hen staat het begrip chemische reactie centraal, doch zij ontwikkelen dit begrip op een andere wijze dan in het scheikunde-onderwijs gebruikelijk is. O.a. stellen zij de invoering van corpusculaire begrippen uit.
- Uitgaande van de bestaande schoolvakstructuur kan men nagaan welke onderwijs- en leerproblemen in de onderwijspraktijk optreden. Op basis hiervan kan men veranderingen voorstellen. In deze strategie wordt de bestaande vakstructuur *'van binnenuit'* veranderd. Daarbij worden randvoorwaarden die uit leerplannen en examenprogramma's volgen aanvankelijk geaccepteerd, maar tevens object van onderzoek. De Vos (1985) en De Jong (1990) hebben deze onderzoeksstrategie gehanteerd.

Het door mij verrichte onderzoek kan worden gezien als een voortzetting van dat van De Vos, waarbij gekozen is voor dezelfde onderzoeksstrategie. De Vos heeft onderzoek verricht naar de invoering van het begrip chemische reactie in 3-HAVO/VWO, in samenhang met de begrippen stof en element en simultaan met de begrippen molecuul en atoom. Op basis hiervan heeft hij onderwijsmateriaal ontworpen voor leerlingen en docenten (De Vos, 1987).

Zijn onderzoek riep o.a. vragen op met betrekking tot de ontwikkeling van het reactiebegrip in het scheikunde-onderwijs nà 3-HAVO/VWO (De Vos, 1985, p.142). In de bestaande vakstructuur van het schoolvak scheikunde is een dergelijke voortgang in 4-HAVO en 4-VWO met name aan de orde bij de invoering van het begrip chemisch evenwicht. Om dit te kunnen verduidelijken, moet ik ingaan op inhoudelijke aspecten van de begrippen chemische reactie en chemisch evenwicht. Een dergelijke beschouwing stel ik uit tot hoofdstuk 3.

Voorlopig rond ik de bespreking van onderzoeksdoel en -strategie als volgt af: het onderwerp chemisch evenwicht, zoals dat in de bestaande schoolvakstructuur voorkomt, wordt centraal gesteld. Door chemiedidactisch onderzoek te verrichten op de door Verdonk (§1.2) aangegeven wijze, via een strategie die gericht is op het 'van binnenuit' veranderen van de bestaande vakstructuur, wil ik nagaan of het mogelijk is om een *een didactische structuur van chemisch evenwicht* te verkrijgen.

hoofdstuk 2

Kader van het onderzoek

In dit hoofdstuk probeer ik de doelstelling van mijn onderzoek te verduidelijken door mijn visie op chemiedidactiek te expliciteren. Na een oriëntatie op de constructivistische epistemologie kom ik tot een standpuntbepaling omtrent een relatie tussen persoonlijke en publieke kennis, in verband met onderwijs in de natuurwetenschappen. Aansluitend beschrijf ik doelen en objecten van chemiedidactiek waarna ik een nadere invulling geef aan de term didactische structuur. Hierna volgt een beschrijving en verantwoording van de opzet en uitvoering van het door mij verrichte onderzoek.

In dit hoofdstuk gaat het dus om een standpuntbepaling ten aanzien van chemiedidactiek. De beschrijving hiervan is vooral bedoeld om voor de lezer een kader te schetsen waarbinnen de volgende hoofdstukken gelezen kunnen worden. Het is echter niet zo dat ik mijn standpunten bewust en beargumenteerd heb gekozen alvorens met het onderzoek te beginnen en dat hierin geen wijzigingen zijn opgetreden. In een nabeschouwing (§9.1) geef ik aan welke verschuivingen in mijn visie ten aanzien van chemiedidactiek zijn opgetreden gedurende en onder invloed van het onderzoek.

2.1 Oriëntatie op constructivisme

Constructivistische gezichtspunten ten aanzien van persoonlijke en publieke kennis in verband met onderwijs zijn o.a. beschreven door Pope en Gilbert (1983), Bodner (1986) en Driver (1988). Na een kort overzicht van deze gezichtspunten kom ik tot een standpuntbepaling hieromtrent.

Persoonlijke kennis

In de constructivistische epistemologie wordt kennis als een menselijke constructie beschouwd. Voor zover het om *persoonlijke kennis* gaat, is het constructivisme o.a. geïnspireerd door Piagets theorie over intellectuele ontwikkeling (equilibratie door middel van assimilatie en accommodatie[1]). In het constructivisme wordt leren verbonden met het ontwikkelen van mentale structuren. Driver spreekt over "conceptual change" als een lerende eerder gevormde "conceptions" wijzigt. Bij conceptions gaat het om zaken van mentale aard: voorstellingen, opvattingen en betekenissen die door een lerende geconstrueerd worden. Driver omschrijft leren als "the active construction of meaning". Dit proces vergt een actieve rol van de lerende en kan optreden onder invloed van ervaringen met verschijnselen of door een gesprek, maar ook door het lezen van een tekst of door interne reflectie. Driver benadrukt dat dit proces bepaald wordt door de gerichtheid van de lerende en dat emoties hierbij een belangrijke rol kunnen spelen (Driver, 1988, p.165-168).

---

[1]Deze theorie wordt o.a. besproken door Flavell (1963), p.44-52.

Publieke kennis
Volgens het constructivisme kan in een sociale omgeving, waarin mensen gesprekken voeren en samenwerken, naast persoonlijke kennis ook *publieke kennis* ontstaan. Deze komt tot stand doordat mensen hun persoonlijke kennis (inclusief meningen en opvattingen) tot gespreksonderwerp maken.

Natuurwetenschappelijke kennis kan gezien worden als een specifieke vorm van publieke kennis. De ontwikkeling ervan vindt plaats doordat wetenschappers zich mondeling en schriftelijk uiten in discussies, artikelen, etc. Het specifieke van natuurwetenschappelijke kennis ligt in het gegeven dat bij de ontwikkeling bepaalde 'spelregels' min of meer expliciet worden toegepast. Het gaat daarbij niet om het 'ontdekken' van objectieve feitelijkheden, maar om een zekere mate van overeenstemming over de vraag welke kennis het meest geschikt is ter beschrijving en verklaring van verschijnselen. Dat impliceert o.a. dat het mogelijk moet zijn om voorspellingen te doen, die een experimentele toets doorstaan. Indien dit niet lukt, kan wijziging van eerder gevormde wetenschappelijke kennis optreden. Doorgaans tracht men om deze kennis zo veel mogelijk intact te laten. Anomalieën worden uiteindelijk vaak verklaard door minimale aanpassingen aan te brengen[2].

Omdat de ontwikkeling van wetenschappelijke kennis een sociaal proces is, hangt deze kennis samen met cultuur: niet alleen is zij cultuurbepaald, zij is tevens cultuurbepalend.

Onderwijs
Het voorafgaande heeft belangrijke implicaties voor onderwijs. Overdrachtonderwijs, waarin lerenden als (passieve) kennisontvangers worden gezien, wordt in het algemeen door constructivisten afgewezen. Dergelijk onderwijs sluit niet aan bij de opvatting dat leren een actief constructieproces van lerenden vergt. Zo'n proces wordt door overdracht vaak geblokkeerd, waardoor lerenden veelal niet verder komen dan napraten (en/of imiteren) zonder inzicht (zie ook §1.1). Volgens constructivisten moet het onderwijs niet gericht zijn op overdracht, maar op *conceptual change* bij lerenden. Hiertoe moeten situaties gecreëerd worden, waarin zij hun persoonlijke kennis tot gespreksonderwerp maken. Dit geldt niet alleen voor onderwijs in de natuurwetenschappen, maar is bijvoorbeeld ook van toepassing op de opleiding van leraren[3].

Voor wat betreft het onderwijs in de natuurwetenschappen probeert men in het constructivisme de persoonlijke kennis van lerenden te ontwikkelen in de richting van geaccepteerde wetenschappelijke kennis. Tegelijkertijd wil men inzicht in wetenschappelijke werkwijzen ontwikkelen. In dit verband wordt het ook als een bezwaar van overdrachtonderwijs gezien, dat hierdoor een verkeerd beeld van wetenschapsbeoefening en van wetenschappelijke kennis wordt geschetst: ten onrechte wordt de indruk gewekt dat zulke kennis feitelijk en 'eeuwig' waar zou zijn.

---

[2]Deze opvatting komt ook voor in het werk van Lakatos. Van der Vet beschrijft in navolging van Lakatos drie voorbeelden, waarin men tracht om een bestaande chemische theorie te 'redden'; Van der Vet (1989), p.69-72.

[3]Onlangs heeft Wubbels beschreven hoe de opleiding van leraren gericht kan worden op het "induceren van conceptual change" (Wubbels, 1990, p.183-187).

In het onderwijs in de natuurwetenschappen kent men aan proeven, waarvan resultaten strijdig zijn met de actuele persoonlijke kennis van lerenden, een centrale rol toe. Van belang is dat zulke tegenstrijdigheden worden opgemerkt en besproken. Taak van een docent is om constructieprocessen te bevorderen. Hiertoe moet hij[4] gesprekken en redeneringen van leerlingen proberen te begrijpen. In dit verband kan hij vragen aan leerlingen stellen en hen stimuleren om zelf vragen te stellen. Bovendien kan hij vanuit zijn natuurwetenschappelijke achtergrond informatie verschaffen en andere proeven (laten) uitvoeren. Hierbij kan zich het probleem voordoen dat zijn informatie een constructieproces van leerlingen blokkeert, zoals dat bij het overdrachtonderwijs het geval kan zijn. Om zijn taak te kunnen vervullen moet een docent dus inzicht hebben in factoren, die van invloed zijn op het bevorderen respectievelijk blokkeren van constructieprocessen. Ik kom hier in het onderstaande op terug.

Preconcepties

De constructie van persoonlijke kennis vindt niet alleen in onderwijssituaties plaats. De term *preconcepties* wordt gehanteerd voor kennis die voorafgaand aan zeker onderwijs ontwikkeld is[5]. Veel van het constructivistische onderzoek is tot dusver gericht geweest op preconcepties. Er is onderzoek verricht om preconcepties ten aanzien van verschillende onderwerpen uit de schoolfysica en -chemie (mechanica, thermodynamica, corpuscula, etc.) op te sporen en te beschrijven. In de literatuur is een groot aantal artikelen hieromtrent verschenen. Een overzicht is o.a. te vinden in Driver et al. (1985).

Ausubel heeft er al op gewezen dat preconcepties vaak zeer hardnekkig en 'bestand tegen onderwijs' zijn. Dit wordt door vele onderzoekers bevestigd. Er zijn onderwijsstrategieën ontworpen, die gericht zijn op het 'overwinnen' van preconcepties, maar deze blijken lang niet altijd succesvol. Ook indien men in het onderwijs expliciet rekening houdt met het optreden van zekere preconcepties, blijkt dat deze soms gehandhaafd worden (Engel-Clough & Driver, 1986).

Posner et al. (1982) noemen een aantal voorwaarden waaraan voldaan moet zijn opdat lerenden hun concepties wijzigen. In de eerste plaats moeten zij ontevreden zijn met hun eigen concepties. Deze ontevredenheid kan optreden indien men inziet dat een nieuwe ervaring relevant is in verband met een bestaande conceptie, doch hiermee niet in overeenstemming is. De auteurs beschrijven echter o.a. dat leerlingen schoolkennis en leefwereldkennis soms strikt gescheiden houden, om ontevredenheid te kunnen vermijden. Ook tracht men vaak bestaande concepties te handhaven door waarnemingen aan te passen

---

[4]Indien in dit proefschrift sprake is van docenten, onderzoekers, leerlingen, etc. in algemene zin, worden deze met de mannelijke vorm aangeduid. Dit is gedaan om de tekst compact te houden. Deze aanduidingen hebben echter betrekking op zowel vrouwen als mannen.

[5]Preconcepties zijn door Ausubel (1968, p.335-337) omschreven als "pre-existing organizing principles in the learner's cognitive structure". Andere termen (misconceptie, alternative framework, children's science) worden in dit verband ook gebruikt.

of ad hoc verklaringen te formuleren[6]. Pas als dit mislukt bestaat een kans dat concepties gewijzigd worden. In zo'n geval kan een nieuwe conceptie volgens Posner et al. aantrekkelijk worden, indien deze aan de volgende voorwaarden voldoet: zij moet begrijpelijk zijn, plausibel lijken (dit houdt niet alleen in dat het geconstateerde probleem opgelost wordt, maar ook dat de nieuwe conceptie niet strijdig is met eerdere ervaringen) en nieuwe mogelijkheden bieden (bijvoorbeeld toetsbare veronderstellingen oproepen).

Het bovenstaande kan ook van toepassing zijn op docenten. Zo hebben Hewson en Hewson (1987) gemerkt dat docenten, die naar aanleiding van een workshop aankondigden dat zij hun onderwijs op het bevorderen van constructieprocessen wilden gaan richten, in hun onderwijspraktijk bleven vasthouden aan overdracht in een natuurwetenschappelijke vaktaal. Wellicht waren zij toch niet erg ontevreden over hun eerdere onderwijsconceptie. Ook is het mogelijk dat zij nog niet beschikten over een bruikbare nieuwe conceptie.

Tevens lijkt het bovenstaande te gelden voor de ontwikkeling van wetenschappelijke kennis: soms worden onverklaarbare verschijnselen genegeerd, of tot schijn of bedrog uitgeroepen om een geaccepteerde theorie in stand te kunnen houden[7]. In dat geval zijn het wetenschappers die vasthouden aan preconcepties.

Standpuntbepaling

In grote lijnen onderschrijf ik het voorgaande. Ik wil enkele kanttekeningen plaatsen en aanvullingen geven.

De term conceptual change zou ik willen vertalen met *begripsontwikkeling. Wanneer het gaat om de constructie van persoonlijke kennis, wil ik van begripsontwikkeling spreken indien lerenden eerder gevormde concepties wijzigen*[8]*. In het geval van publieke kennis spreek ik van begripsontwikkeling indien in een groep overeenstemming bereikt wordt over een wijziging in eerder geaccepteerde kennis.*

Begripsontwikkeling kan in mijn ogen door overdrachtonderwijs nauwelijks gestimuleerd worden. Men kan echter ook leren zonder concepties te wijzigen. Dit is o.a. het geval als iemand ervaringen opdoet die in overeenstemming zijn met reeds gevormde concepties. Indien men bijvoorbeeld beschikt over een fysisch begrip 'dichtheid' kan men daarmee over de dichtheden van talrijke materialen bijzonderheden leren zonder zijn dichtheidsbegrip te veranderen[9].

---

[6]Ook Hashweh (1986) wijst op het gegeven dat verschijnselen uitgaande van een bestaande conceptie worden geïnterpreteerd op een wijze die handhaving van de betrokken conceptie mogelijk maakt.

[7]Benvéniste, die enkele jaren geleden met zijn 'verdunningsexperimenten' de fundamenten van de corpusculaire theorie dreigde aan te tasten, werd als bedrieger gekwalificeerd.

[8]In de literatuur wordt gediscussieerd over de vraag hoe het mogelijk is dat nieuwe concepties gevormd worden. Kan een mens deze inpassen in reeds in aanleg aanwezige mentale structuren of is hij in staat om deze structuren zelf te genereren? In dit verband wordt wel gesproken van de "learning paradox". Op deze vraag ga ik verder niet in. Zie echter Bereiter, 1985.

[9]Lijnse spreekt hierbij van "Dazulernen" en stelt terecht dat overdracht in dit verband geschikt kan zijn. Voor "Umlernen" is daarentegen nodig dat leerlingen "een niet door

Ook voor andere vormen van leren acht ik de term begripsontwikkeling ongeschikt, bijvoorbeeld als men een chemische analysemethode leert (zoals een spectrofotometrische bepaling), zonder de principes die aan zo'n methode ten grondslag liggen, te bestuderen. Een dergelijk leerproces kan op basis van instructie plaatsvinden en is geschikt indien men geen andere dan routinebepalingen hoeft te verrichten.

In het door mij te beschrijven onderzoek gaat het om chemische begrippen en modellen die vroeger in wetenschappelijk onderzoek en nu in voortgezet onderwijs bestudeerd worden. Leerprocessen die in onderzoek en onderwijs optreden, wil ik proberen te beschrijven vanuit het gezichtspunt begripsontwikkeling[10].

In het constructivisme wordt m.i. impliciet aangenomen dat leerlingen bij het onderwijs in de natuurwetenschappen zich spontaan zullen houden aan 'spelregels', zoals die door wetenschappers worden gehanteerd bij de ontwikkeling van wetenschappelijke kennis (consistentie, eenduidigheid, controleerbaarheid, etc.). Hoewel ik niet uitsluit dat leerlingen deze regels intuïtief min of meer zullen toepassen, acht ik deze aanname discutabel. De regels moeten m.i. worden onderwezen. Dat wil zeggen dat ik natuurwetenschappelijke werkwijzen als doel van onderwijs in de natuurwetenschappen beschouw. Zo zullen leerlingen bijvoorbeeld moeten leren dat uitspraken betreffende chemische zaken in principe toetsbaar moeten zijn en dat het niet is toegestaan om voor ieder verschijnsel een gelegenheidsverklaring op te stellen, die los staat van andere kennis en ervaringen. Dit aspect moet integraal deel uitmaken van het onderwijs. Een aparte paragraaf over 'de natuurwetenschappelijke methode', zoals tegenwoordig vaak in leergangen is opgenomen, acht ik hiertoe ongeschikt.

Wetenschappelijke kennis en werkwijzen maken deel uit van en bepalen in zekere zin onze cultuur. Het toegankelijk maken van de bestaande cultuur is m.i. ook een taak van onderwijs. Ten aanzien van preconcepties geef ik hiermee aan, dat ik deze *in het kader van onderwijs* wil wijzigen in de richting van geaccepteerde (wetenschappelijke) kennis. Ik wil de term preconcepties niet beperken tot 'leefwereldopvattingen'. Evenmin beschouw ik preconcepties als foutieve opvattingen. Ik spreek ook van preconcepties als het gaat om begrippen die eerder onderwezen zijn, maar die later gewijzigd moeten worden: zo wordt de opvatting dat stofomzettingen bij chemische reacties volledig zijn, in 3-HAVO/VWO onderwezen. Bij de invoering van het begrip chemisch evenwicht (in 4-HAVO/VWO) beschouw ik deze opvatting als een preconceptie. In het kader van 'titraties' in 5-HAVO/VWO is deze opvatting echter weer bruikbaar! De context bepaalt dus of een opvatting een preconceptie is.

Het voorgaande impliceert niet dat ik het voortgezet onderwijs in de natuurwetenschappen volledig wil richten op de ontwikkeling van zoveel mogelijk begrippen in een natuurwetenschappelijke betekenis (§1.2). Men zal zich moeten beperken tot begrippen waarvan een natuurwetenschappelijke betekenis

---

autoriteit af te dwingen sprong maken" (Lijnse, 1990, p.24). "Umlernen" heeft dus betrekking op begripsontwikkeling.

[10]De keuze om begripsontwikkeling in wetenschappelijk onderzoek *en* onderwijs te bestuderen, werk ik in de volgende paragraaf verder uit.

een zekere waarde heeft voor de betrokken leerlingen, met name voor hen die na hun schooltijd *geen* vervolgopleiding kiezen waarin de natuurwetenschappen een belangrijke rol spelen. Zo kan ik de vraag of leerlingen van 4-HAVO en 4-VWO gebaat zijn bij een wetenschappelijk chemisch evenwichtsbegrip op voorhand niet beantwoorden. Wel vermoed ik dat veel leerlingen zich laten inspireren door hun eigen verklaringsbehoeften. Uit het onderzoek zal dan moeten blijken of een chemisch evenwichtsbegrip (en zo ja, welk) voor leerlingen een aanvaardbare en/of aantrekkelijke verklaring vormt voor verschijnselen waarop chemici dit begrip van toepassing achten. Een uitkomst van dit onderzoek kan echter zijn dat de ontwikkeling van een wetenschappelijk chemisch evenwichtsbegrip niet wenselijk is, of dat in plaats daarvan de invoering van een ander chemisch evenwichtsbegrip aanbeveling verdient.

Een voorbeeld
Enkele van de hiervoor beschreven standpunten kan ik illustreren aan de hand van een voorbeeld. Hierin worden de eerste ervaringen van leerlingen in 3-HAVO/VWO met chemische reacties beschreven (De Vos & Verdonk, 1985). Daarbij mengden leerlingen twee witte poeders met een stamper in een mortier. De verschijning van een knalgele kleur werd door veel leerlingen met ongeloof begroet. In veel gevallen ontstond een crisissituatie waarvoor de term 'cognitief conflict' een te beperkte aanduiding zou zijn: veel leerlingen toonden zich ook emotioneel betrokken. Dit zie ik als een illustratie van mijn opvatting van de term betrokkenheid, waarin ik cognitieve en affectieve aspecten combineer (§1.1).

Sommige leerlingen meenden achteraf dat één van beide poeders ook al geel was geweest en anderen bedachten ad hoc verklaringen, waarin de waargenomen verandering werd 'weggeredeneerd'. Doordat een docent bepaalde vragen stelde ('wie heeft dat gele spul in het mortier gedaan?'), bleek het mogelijk om een discussie op gang te brengen, waardoor sommige leerlingen voor het gezichtspunt kozen dat sprake moest zijn van de vorming van een nieuwe stof. Slechts in zulke gevallen was mogelijk sprake van begripsontwikkeling.

Met dit voorbeeld wordt tevens geïllustreerd dat de *verwachting* van lerenden bepalend is voor de wijze waarop zij verschijnselen ervaren: het verschijnen van de gele kleur was verrassend omdat de leerlingen kennelijk uitgingen van het behoud van stoffen (of stofeigenschappen) in het geval van mengen. De verwachting dat een kleurverandering uitgesloten zou zijn, leidde er soms toe dat het proefresultaat zo werd geïnterpreteerd dat begripsontwikkeling *vermeden* kon worden. Dit vormt een illustratie van de hardnekkigheid van preconcepties.

2.2 Een rol voor chemiedidactiek

Indien men scheikunde-onderwijs volgens een constructivistisch model zou willen inrichten, ontstaat behoefte aan onderwijsmateriaal waarmee leerlingen in kleine groepen zelfstandig kunnen werken. Het materiaal moet aansluiten op kennis die eerder gevormd is en er moeten proeven en vragen in staan die gericht zijn op begripsontwikkeling.

Het valt niet mee om dergelijk onderwijsmateriaal te ontwerpen. Op voorhand is immers niet duidelijk welke kennis bij welke leerlingen reeds aanwezig is en welke proeven en vragen geschikt zijn om ervaringen te laten opdoen en gesprekken te laten voeren, die uiteindelijk tot begripsontwikkeling voeren. In de onderwijspraktijk komen daar voor docenten nog problemen bij: hoe moeten zij reageren op gesprekken en vragen van leerlingen? Wanneer moeten welke vragen aan leerlingen gesteld worden en wanneer is welke informatie voor hen geschikt?

Deze problemen betreffen de structurering van de chemische inhoud van het onderwijs. Op dit gebied doet de constructivistische epistemologie geen uitspraken. Desalniettemin worden problemen betreffende de vakinhoud door constructivisten wel onderkend, getuige Drivers uitspraken:

> "An important point to make here is that the curriculum is not something that can be planned in an "a priori" way but is necessarily the subject of empirical enquiry." (Driver, 1988, p.168)

en:

> "[...] strategies for promoting conceptual change need to be investigated in the context of particular domains of knowledge." (Driver, 1988, p.183)

Hiermee duidt Driver een terrein aan waarop vakdidactiek zich kan begeven[11]. Op het gebied van natuurkunde- en chemiedidactiek is nog geen (geaccepteerde) theorie beschikbaar, die geschikt is voor het beschrijven en mogelijk verklaren van begripsontwikkeling[12]. Een doel van het onderzoek dat in dit proefschrift wordt beschreven is dan ook om aan theorievorming voor chemiedidactiek een bijdrage te leveren. Aansluitend op §1.2 betekent dit concreet dat ik door middel van empirisch onderzoek wil nagaan welke factoren van invloed zijn op de ontwikkeling van zekere chemische begrippen. *Hiertoe moet chemiedidactisch onderzoek niet alleen gericht worden op scheikunde-onderwijs, maar ook op begripsontwikkeling die in wetenschappelijk chemisch onderzoek optreedt.* Ik licht beide bronnen van chemiedidactisch onderzoeksmateriaal hieronder toe, waarna ik het eerder genoemde onderzoeksdoel (didactische structuur) nader toespits.

Didactisch onderzoek in onderwijssituaties

In onderwijssituaties kan men bijvoorbeeld nagaan hoe leerlingen zekere proeven uitvoeren en hoe ze op de resultaten hiervan reageren; welke gesprekken leerlingen onderling en met hun docent voeren naar aanleiding van proeven en vragen en welke antwoorden ze formuleren op bepaalde vragen. Deze handelingen, gesprekken en antwoorden beschouw ik als uitingen van mentale activiteiten. Door deze uitingen te analyseren en te interpreteren wordt het mogelijk om uitspraken te doen over begripsontwikkeling, die in groepen (publieke kennis) of bij individuen (persoonlijke kennis) optreedt. Voor wat betreft de ontwikkeling van persoonlijke kennis doet zich echter het probleem voor dat een mentaal constructieproces zich aan waarnemingen onttrekt. Hier-

---

[11]Aangenomen dat haar term curriculum betrekking heeft op de inhoud van onderwijs.

[12]Deze stelling wordt onderschreven en onderbouwd door De Jager & Verdonk (1986), p.93-94 en door Lijnse (1990), p.32-34.

over kan ik dus slechts veronderstellenderwijs rapporteren. In dit licht is de status van mijn interpretaties problematisch. Ik kom hier in §2.4 op terug.

Ten aanzien van onderwijssituaties staan voor mij de volgende vragen centraal: welke proeven en welke vragen voeren tot produktieve onderwijssituaties en welke argumentaties van leerlingen en docenten spelen hierbij een rol? Voor blokkerende onderwijssituaties zijn dezelfde vragen van belang.

Van produktiviteit spreek ik o.a. als gespreksdeelnemers (leerlingen, docenten) van gezichtspunt veranderen. Het optreden van produktiviteit kan in belangrijke mate bepaald worden door het proces dat in een groep optreedt. Het formuleren van nieuwe gezichtspunten kan onder invloed van een discussie optreden. Ik koppel produktiviteit niet uitsluitend aan een ontwikkeling in de richting van geaccepteerde (wetenschappelijke) kennis. Als gespreksdeelnemers bijvoorbeeld door een consistente redenering een voor hen nieuw en bruikbaar gezichtspunt formuleren, dat in wetenschappelijke zin onbruikbaar of verouderd wordt geacht, zou ik wel van produktiviteit willen spreken. Ook het stellen van bepaalde vragen kan wijzen op produktiviteit.

In het beschreven voorbeeld van de proef met de witte poeders is sprake van produktiviteit bij leerlingen die gaan spreken over 'een nieuwe stof'. Uit het voorbeeld bleek ook dat een docent een belangrijke bijdrage aan deze produktiviteit kan leveren door een argumentatie te geven of een vraag te formuleren die leerlingen merkbaar aanspreekt. Indien een docent er in slaagt om met leerlingen te communiceren in een voor hen bruikbare taal spreek ik van produktiviteit in chemiedidactisch opzicht. Via gesprekken met zijn leerlingen kan een docent bovendien op het spoor komen van hiaten in zijn eigen chemische kennis of van alternatieve visies op die chemische kennis. Dit kan leiden tot produktiviteit voor de docent in chemisch opzicht.

De term blokkade is van toepassing indien gespreksdeelnemers hun eigen standpunten blijven herhalen en/of elkaars standpunten niet lijken te begrijpen. Van een blokkade is o.a. sprake als een docent een chemische vaktaal blijft hanteren, die voor leerlingen onbegrijpelijk blijkt. Een blokkade kan ook blijken uit het achterwege blijven van een discussie: alle gespreksdeelnemers zijn het met elkaar eens, maar er is geen voortgang in hun redeneringen aanwijsbaar, hoewel deze wel beoogd was. Van zo'n blokkade is bijvoorbeeld sprake indien leerlingen de proef met de witte poeders ook na een discussie nog interpreteren vanuit het gezichtspunt dat stoffen behouden blijven.

In verband met het al of niet optreden van begripsontwikkeling is het, zoals gezegd, van belang dat leerlingen en docenten hun chemische kennis in onderwijssituaties expliciteren en bespreken. Daarom richt ik onderzoek in onderwijssituaties op uitingen van leerlingen en docenten. Gesprekssituaties dienen daarbij voor een *beschrijving en analyse* van het optreden (of het uitblijven!) van begripsontwikkeling. De resultaten van dit onderzoek geven dus inzicht in factoren die van invloed zijn op begripsontwikkeling in onderwijssituaties en zijn daarom mede van belang voor de opleiding en nascholing van docenten.

Didactisch onderzoek naar wetenschappelijke begripsontwikkeling

Bij de analyse van onderwijsgesprekken stuit een didactisch onderzoeker soms op vragen en argumentaties die hij niet begrijpt. Ook lukt het niet altijd om een blokkerende situatie te verklaren. In zulke gevallen kan het nuttig zijn om na te

gaan hoe de betrokken chemische begrippen in wetenschappelijk onderzoek zijn ontwikkeld: vanuit welke vragen werkten de onderzoekers; welke experimenten voerden zij uit en welke argumentaties waren van belang? Soms blijken vragen en problemen in onderwijssituaties overeenkomsten te vertonen met vragen en problemen die in de wetenschapshistorie een rol hebben gespeeld[13].

De wijze waarop wetenschappers omgingen met bepaalde vragen en problemen kan aanknopingspunten bieden voor onderwijs: van vragen, ervaringen en/of argumentaties die in de wetenschappelijke ontwikkeling produktief zijn gebleken, kan worden nagegaan of en in hoeverre deze ook tot produktiviteit in onderwijssituaties kunnen leiden. Ik wil echter niet bepleiten dat men in onderwijs zou moeten trachten de wetenschapshistorie na te bootsen. Er is immers een groot contextverschil tussen onderwijs en wetenschap, zodat er weinig redenen zijn om er *op voorhand* vanuit te gaan dat begripsontwikkelingen in beide contexten parallellen zullen vertonen (Verdonk, 1986, p.31-32). Ik wijs het standpunt van Jansen et al. dat de "Geschichte der Chemie als eine sinnvolle, strukturierende Komponente eines wirklich problemorientierten Unterrichts" beschouwd kan worden dan ook af[14].

In mijn visie gaat onderzoek in onderwijssituaties dus vooraf aan en is richtinggevend voor didactisch onderzoek naar wetenschappelijke begripsontwikkeling.

Wetenschappelijke studieboeken of schoolboeken geven doorgaans geen of weinig informatie over de wijze waarop en de context waarin begrippen in wetenschappelijk onderzoek tot stand zijn gekomen. Meestal worden slechts *resultaten* van dit onderzoek aangeboden. In dit verband spreken Joling et al. (1990) over 'verstudieboeking'. Zij stellen dat dit proces leidt tot het vervormen van wetenschappelijke kennis tot 'feiten' en illustreren deze stelling met enkele voorbeelden.

Ofschoon in studie- of schoolboeken soms een reconstructie van wetenschapshistorie wordt gepresenteerd, komen oorspronkelijke vragen van onderzoekers en experimenten die zij uitvoerden hierin zelden aan de orde. Informatie hierover kan in wetenschaps-historische en (soms) wetenschaps-filosofische literatuur gevonden worden. Historici en filosofen beschouwen de ontwikkeling van wetenschap doorgaans echter vanuit een andere invalshoek dan didactici die zich laten leiden door onderzoek in onderwijssituaties. Om een proces van wetenschappelijke begripsontwikkeling te kunnen volgen, is het vaak nodig om authentiek materiaal, voor zover toegankelijk, te raadplegen. Hierbij gaat het bijvoorbeeld om oorspronkelijke artikelen, teksten van lezingen en verslagen van conferenties[15].

In hun opleiding hebben docenten veelvuldig gebruik gemaakt van wetenschappelijke studieboeken. In hun onderwijspraktijk maken zij gebruik van

---

[13]Dit wordt o.a. bevestigd door Driver & Easley (1978), p.80; Jansen et al. (1986), p.395 en Hashweh (1988), p.123-126.

[14]Jansen et al. (1986), p.396. Voor een visie op de relatie tussen begripsontwikkeling in chemieonderwijs en -onderzoek verwijs ik naar Van Driel et al. (1989).

[15]Voorbeelden van didactisch onderzoek naar wetenschappelijke begripsontwikkeling dat is geïnspireerd door onderzoek in onderwijssituaties zijn in het vervolg van dit proefschrift opgenomen in de paragrafen 5.2 en 6.2.

schoolboeken. Hierdoor zullen zij doorgaans slecht op de hoogte zijn van zaken die van belang waren bij de wetenschappelijke ontwikkeling van een zeker begrip. Inzicht hierin is voor hen echter van belang in verband met het kunnen begrijpen van en reageren op vragen en argumentaties van leerlingen. Bovendien kan een docent in bepaalde blokkerende situaties een argumentatie hanteren of leerlingen een proef uit laten voeren, die aan dit inzicht ontleend is. Een studie naar wetenschappelijke begripsontwikkeling in het kader van een didactisch onderzoek is dus niet alleen van belang voor de onderzoeker, maar ook in verband met opleiding en nascholing van docenten.

Een didactische structuur

In het vorige hoofdstuk stelde ik dat het onderzoek in dit proefschrift is gericht op het verkrijgen van een didactische structuur. In deze paragraaf heb ik aangegeven te willen bijdragen aan theorievorming op het gebied van chemiedidactiek. Tevens heb ik mijn keuze voor begripsontwikkeling in onderwijs en wetenschap(shistorie) als object van chemiedidactisch onderzoek toegelicht. Daardoor kan ik nu de term didactische structuur preciseren.

Een didactische structuur is in dit proefschrift een stelsel van chemische begrippen, waarvan inhoud en samenhang in het kader van begripsontwikkeling beschreven worden. Structuren in een stelsel van chemische begrippen kunnen ook worden opgesteld naar aanleiding van een analyse van chemische studieboeken. Een voorbeeld betreft het eerder (§1.3) genoemde artikel van De Vos en Verdonk (1990) over een "vakstructuur van het schoolvak scheikunde". Kenmerkend voor een didactische structuur is echter de koppeling met begripsontwikkeling[16]. Een didactische structuur biedt mogelijkheden om produktiviteit te beschrijven en deze te verklaren en te voorspellen. Er worden (verschillende) 'routes' in aangegeven waarlangs in de onderwijspraktijk begripsontwikkeling gerealiseerd blijkt te kunnen worden. Uiteraard zullen in de onderwijspraktijk ook blokkades (blijven) optreden. Ook deze moeten vanuit een didactische structuur (tenminste gedeeltelijk) beschreven en verklaard kunnen worden. In dit opzicht is een didactische structuur te zien als een onderdeel van een (chemie-)didactische theorie, zonder uiteraard de mogelijkheid te bieden alle voorkomende onderwijssituaties te verklaren en/of te voorspellen. In §2.4 kom ik op dit aspect terug.

Hoewel de begrippen in een didactische structuur betrekking hebben op chemische zaken, kunnen hierin begrippen voorkomen die in de wetenschappelijke en/of schoolchemie ontbreken of niet meer worden gehanteerd. Zulke begrippen worden bijvoorbeeld ingevoerd ter beschrijving van argumentaties van leerlingen ten aanzien van zekere chemische zaken. Ook kan een analyse van chemie, geïnspireerd door chemiedidactisch onderzoek, de behoefte aan zo'n begrip oproepen[17].

---

[16]Deze opvatting komt ook voor in het werk van Ten Voorde en van Goedhart. De eerste koppelt een didactische structuur bovendien aan een didactische theorie (niveauschema; zie bijvoorbeeld Ten Voorde, 1987, p.119-121), terwijl de tweede begripsontwikkeling op basis van 'ervaringsleren' en 'zakelijk gesprek' nastreeft (Goedhart, 1990, p.90).

[17]Zo heeft Ten Voorde een niet-corpusculair begrip als voorbereiding op het ionbegrip ingevoerd ('reagens'); zie Ten Voorde (1979), p.224 en 238.

Een didactische structuur biedt mogelijkheden voor toepassing in onderwijs. Verklaringen voor produktiviteit en blokkades zijn van belang voor docenten. Een door onderzoek verkregen didactische structuur vormt daarmee een leidraad bij het ontwerpen van nascholing. Tevens kan deze structuur worden gezien als basis voor de inrichting van scheikunde-onderwijs. Uit de structuur kunnen concrete suggesties ten aanzien van onderwijsmateriaal worden afgeleid: criteria voor proeven en vragen voor leerlingen, voor toetsen, etc.

In de volgende paragraaf beschrijf ik hoe het onderzoek is opgezet en uitgevoerd teneinde een didactische structuur te verkrijgen.

2.3 Opzet en uitvoering van het onderzoek

In het kader van het onderzoek is onderwijs ontworpen, uitgevoerd en geëvalueerd. Deze activiteiten hadden binnen het onderzoek een functie in een *didactisch experiment,* dat is uitgevoerd met het oog op onderzoek naar begripsontwikkeling, voor zover in onderwijssituaties aanwijsbaar. Het ontwerpen van onderwijs was in het onderzoek dus geen doel op zich.

Er is materiaal ontworpen voor twee types onderwijs die met elkaar samenhingen: een leerlingentekst over chemisch evenwicht voor 4-HAVO/VWO en een nascholingscursus over dit onderwerp voor docenten die deze tekst in hun eigen klassen gebruikten. Na een overzicht van de feitelijke gang van zaken tijdens het onderzoek, geef ik een beschrijving van uitgangspunten die bij het ontwerpen van onderwijsmateriaal zijn gehanteerd. Tenslotte ga ik in op het verzamelen en de analyse van onderzoeksgegevens.

Gang van zaken tijdens het onderzoek

De eerste fase van het onderzoek was gericht op het verzamelen van gegevens omtrent bestaand onderwijs, zowel over chemisch evenwicht in 4-HAVO/VWO als over begrippen in het voorafgaand onderwijs die daarmee in verband staan. Hiertoe werden recente Nederlandse scheikundeleergangen voor 3- en 4-HAVO/VWO geanalyseerd. Als docent onderwees ik chemisch evenwicht aan de hand van één van deze leergangen in een 4-HAVO-klas (voorjaar '85). Tevens woonde ik in die periode op één school lessen bij over chemisch evenwicht in een drietal 4-VWO-klassen. Hierdoor werden eerste indrukken omtrent redeneerwijzen van leerlingen en docenten met betrekking tot chemisch evenwicht verkregen.

In de winter van '85-'86 werd een preconceptie-onderzoek uitgevoerd. Daartoe werden vragenlijsten opgesteld voor leerlingen van 4-VWO-klassen vóórdat chemisch evenwicht was behandeld. Bedoeling was om informatie te krijgen over argumentaties en opvattingen van leerlingen met betrekking tot begrippen, die in verband met de naderende invoering van chemisch evenwicht van belang werden geacht. De vragen hadden vooral betrekking op reeds behandelde aspecten van het begrip chemische reactie (§2.1). Leerlingen van vier 4-VWO-klassen hebben in kleine groepen aan deze vragen gewerkt. Van in totaal acht groepen werden geluidsopnamen gemaakt. Bovendien werden schrif-

telijke groepsantwoorden van zoveel mogelijk groepen uit deze vier klassen verzameld[18].

Deze activiteiten leverden uitgangspunten voor het ontwerpen van een eerste versie van een leerlingentekst. In een docententoelichting beschreef ik mijn bedoelingen en verwachtingen ten aanzien van deze tekst. De eerste leerlingentekst werd op twee scholen gebruikt, waarbij geluidsopnamen werden gemaakt van groepen leerlingen. Om te kunnen vaststellen of en welke ontwikkelingen optreden, werd een groep meestal enkele lessen (vijf tot tien) achter elkaar opgenomen. Naast het geluidsmateriaal werden schriftelijke antwoorden op de vragen in de leerlingentekst van enkele tientallen groepen verzameld. Voor, tijdens en na de periode waarin zij met de leerlingentekst in hun klassen werkten, werden besprekingen met de betrokken docenten gevoerd. Een aantal van deze gesprekken werd op geluidsband opgenomen.

Op basis van ervaringen met deze eerste versie en analyses van het verzamelde onderzoeksmateriaal ontwierp ik een tweede versie van leerlingentekst en docententoelichting. Bovendien werd voor docenten die de tekst gebruikten een viertal nascholingsbijeenkomsten georganiseerd. Twee hiervan waren gepland voordat de leerlingentekst op school aan de orde kwam. De andere twee vielen tijdens en na de periode waarin met de tekst op school gewerkt werd. Tijdens de bijeenkomsten maakte ik geluidsopnamen van discussies, die plenair en in kleine groepen werden gevoerd.

Hierna volgde nog één cyclus: een derde versie van de leerlingentekst werd ontworpen, waarbij een nieuwe docententoelichting werd geschreven. Voor de betrokken docenten werd opnieuw een reeks nascholingsbijeenkomsten georganiseerd. Een aantal van de docenten was ook betrokken geweest bij de vorige cyclus. Nadat zij met deze leerlingentekst gewerkt hadden, kregen docenten het verzoek om een evaluatieformulier in te vullen. In dit formulier waren twee reeksen open vragen opgenomen, die verdeeld waren over de categoriën 'inhoud' en 'organisatie/werkvorm'. Ik ontving ingevulde formulieren van ongeveer de helft van alle deelnemende docenten.

In onderstaande tabel worden enkele getalsmatige gegevens over het onderzoek vermeld:

Leerlingentekst	eerste versie	tweede versie	derde versie
Periode	voorjaar en zomer '86	voorjaar '87	voorjaar '88
Aantal scholen	2	11	25
Geluidsopnamen	9 groepen VWO¶	3 groepen 4-HAVO en 3 groepen 4-VWO	4 groepen 4-VWO
Schriftelijke antwoorden	2 scholen	7 scholen#	8 scholen#

¶Op één school werd in mei-juni '86 met deze leerlingentekst gewerkt in 4-VWO-klassen; op de andere school werkten twee 5-VWO-klassen in augustus-september '86 met een enigszins bijgestelde versie van deze leerlingentekst.

[18]Een uitvoerige bespreking van dit onderzoek staat in Mertens (1986), p.10-17. In een later stadium is op vergelijkbare wijze een tweede preconceptie-onderzoek uitgevoerd. Dit wordt beschreven in Den Boer & Van Berkel (1989), p.12-19.

#Ik wilde over schriftelijke antwoorden van ca. 100 verschillende groepjes leerlingen kunnen beschikken. Daarom vroeg ik niet aan alle scholen om aan het verzamelen hiervan mee te werken.

Ontwerpen van leerlingentekst
In verband met het streven naar begripsontwikkeling (§1.1) zijn in alle versies van de leerlingentekst enkele (chemische) problemen aan de orde gesteld. Voor ieder probleem is globaal de volgende opzet gevolgd: na een oriëntering op het probleemgebied volgden opdrachten waarin herkenning en explicitering van het probleem centraal stonden. Hierna werd naar een oplossing van dit probleem toegewerkt. Tenslotte werden verbanden tussen deze oplossing en andere zaken (proeven, begrippen) gelegd. Daardoor werd vaak meteen een nieuw probleem voorbereid (oriëntatie, etc.). Ik licht een aantal aspecten van deze onderwijsconstructie nader toe.

- *Herkennen van een probleem*
  Door leerlingen te vragen een verwachting te expliciteren en deze in hun groep te bespreken, werd het ontstaan van een context nagestreefd waarin een later uit te voeren proef zou moeten functioneren. Deze proeven[19] hadden vaak de functie om leerlingen ervaringen te laten opdoen die niet overeenstemden met hun verwachting. Door vragen na zulke proeven te stellen, werden de geconstateerde afwijkingen tot gespreksonderwerp gemaakt. De bedoeling was dat leerlingen het probleem tot *hun* probleem zouden maken, zodat hun betrokkenheid zou toenemen.
  In andere opdrachten werd een eerder onderwezen theorie of regel in verband gebracht met resultaten van een recente proef. Aan de hand van gezamenlijk te beantwoorden vragen zouden leerlingen in een gesprek een probleem of een tegenstrijdigheid onder woorden moeten kunnen brengen.
- *Oplossen van een probleem*
  Oplossingen in de vorm van verklaringen voor onverwachte proefresultaten werden in de tekst niet aangeboden via uitgeschreven redeneringen. De bedoeling was leerlingen, in groepen discussiërend aan de hand van vragen, zo veel mogelijk zelf oplossingen en verklaringen te laten formuleren. Docenten dienden dit proces zo nodig te ondersteunen.
  Vragen waren bedoeld om de leerlingen in de richting van geaccepteerde chemische kennis te voeren. Ook alternatieve opvattingen werden echter aan de orde gesteld. Een reeks opdrachten werd vaak afgesloten met een mededeling betreffende een in die chemische context geaccepteerde zienswijze.

In de leerlingentekst kwamen ook andere opdrachttypes voor. Zo waren huiswerk- en samenvattingsopdrachten opgenomen in verband met verbreding van en reflectie op zaken die in probleemgerichte opdrachten aan de orde waren gesteld.

---

[19]De uitvoering van proeven werd in de leerlingentekst min of meer gedetailleerd voorgeschreven. Begripsontwikkeling werd in deze leerlingentekst dus niet verbonden met ontwikkeling van praktische werkwijzen. Ik spreek van proeven in plaats van experimenten, omdat ik de laatste term associeer met wetenschappelijk onderzoek.

Concrete voorbeelden van opdrachten worden in de hoofdstukken 4 t/m 7 besproken. Een overzicht van opzet en inhoud van de drie versies, die van de leerlingentekst vervaardigd zijn, is opgenomen in bijlage A.

De ontworpen tekst was bedoeld als vervanging van hoofdstukken over chemisch evenwicht, waarvan er in alle recente schoolboeken voor 4-HAVO en 4-VWO één is opgenomen. Daarbij wordt meestal binnen één hoofdstuk chemisch evenwicht na reactiesnelheid behandeld. Ik besloot om deze opzet ook voor mijn leerlingentekst te hanteren. Bovendien werd bij het ontwerpen van de tekst rekening gehouden met randvoorwaarden ten aanzien van inhoud en tijdsbesteding, die door de vigerende leerplannen voor 4-HAVO en 4-VWO worden aangegeven en met de inhoud van voorafgaand en hierop volgend onderwijs (zie verder §3.3). Naast deze tekst ontwierp ik een reeks voorbeeld-proefwerkopgaven, die aan de betrokken docenten ter beschikking werden gesteld.

De keuze voor inpasbaarheid qua inhoud en tijd is voornamelijk door praktische overwegingen ingegeven. Om onderzoek in onderwijssituaties te kunnen uitvoeren, was ik afhankelijk van de medewerking van docenten. Een niet-inpasbare leerlingentekst zou hen voor praktische problemen hebben gesteld, waarop het gebruik af zou kunnen stuiten. Dit heb ik willen voorkomen. Consequenties van deze keuze komen in §3.5 ter sprake.

Ontwerpen van nascholingscursus

Bij het ontwerpen van een nascholingscursus heb ik gebruik gemaakt van ervaringen en inzichten die ik door mijn onderzoek (in onderwijssituaties en naar wetenschappelijke begripsontwikkeling) verkreeg. Ten tijde van de eerste versie van de leerlingentekst achtte ik het opzetten van zo'n cursus nog niet opportuun. Mede in verband hiermee was het aantal docenten dat bij deze versie betrokken was zeer beperkt gehouden.

Voor docenten die met de tweede en de derde versie van de leerlingentekst hebben gewerkt is wel een reeks nascholingsbijeenkomsten georganiseerd. Hierbij koos ik voor een opzet waarin het stellen van (onderwijs-)problemen en het bespreken hiervan een belangrijke plaats innam. Tegelijkertijd hoopte ik te leren van ervaringen van de betrokken docenten, zowel uit hun gangbare onderwijspraktijk als met de door mij ontworpen leerlingentekst.

Bij het stellen van problemen confronteerde ik docenten met authentieke schriftelijke antwoorden van groepen leerlingen en uitgeschreven onderwijsgesprekken die ik eerder tijdens mijn onderzoek had geregistreerd. Discussies hierover werden gevoerd aan de hand van de vraag: 'hoe ga je als docent met zulke uitingen van leerlingen om?' Daarbij werden de docenten uitgenodigd hun eigen onderwijservaringen en -opvattingen tot gespreksonderwerp te maken.

Via andere discussieopdrachten wilde ik de wijze waarop reactiesnelheid en chemisch evenwicht in gangbare leergangen worden behandeld problematiseren. Hierbij liet ik docenten discussiëren over vragen die waren geformuleerd naar aanleiding van fragmenten uit deze boeken. Ik bracht de leergangen hierbij ook in verband met de wetenschappelijke ontwikkeling van de betrokken begrippen.

Met deze aanpak probeerde ik docenten voor te bereiden op het werken in de klas met de leerlingentekst[20]. Bij het gebruik daarvan doen zich immers onvoorziene situaties voor: leerlingen herkennen problemen niet altijd. Evenmin zijn zij altijd in staat om een verklaring op te stellen. Een docent moet in zulke gevallen een blokkerende groep weer kunnen stimuleren en eventueel corrigeren. Hiertoe moet hij redeneringen van de betrokken leerlingen kunnen begrijpen, geschikte vragen weten te stellen, etc. Met informatie moet hij terughoudend zijn. Toch is het verstrekken hiervan af en toe gewenst. Maar welke informatie is op welk moment geschikt?

Het kunnen omgaan met problemen van dit type vergt in mijn ogen van docenten begripsontwikkeling ten aanzien van zowel chemiedidactiek als chemie. De nascholingscursus was hier dus op gericht. Daarnaast zou begripsontwikkeling bij docenten onder invloed van onderwijssituaties met leerlingen op kunnen treden (§2.2). Om dit na te kunnen gaan voerde ik aan het einde van een cursus besprekingen met docenten over hun ervaringen bij het werken met de leerlingentekst. Deze besprekingen hadden tevens een evaluatie van de leerlingentekst tot doel.

Door geluidsopnamen te maken van discussies tijdens deze bijeenkomsten en deze te analyseren, verzamelde ik criteria voor een volgende nascholingscursus. Net als bij de leerlingentekst werd dus volgens een cyclisch schema gewerkt.

Gang van zaken bij het maken van geluidsopnamen

De selectie van groepen leerlingen voor geluidsopnamen vond plaats in overleg met de betrokken docenten. Het belangrijkste criterium was van sociale aard: van de geselecteerde groep verwachtte de docent dat alle leden wezenlijk zouden bijdragen aan het groepsproces (proeven uitvoeren, discussiëren). Groepen met een uitgesproken leiderstype en/of introverte leerlingen werden dus niet geselecteerd. Hiermee wilde ik groepen selecteren die relatief goed bruikbaar onderzoeksmateriaal zouden opleveren. Leerlingen die in sociaal opzicht aan elkaar gewaagd zijn, kunnen elkaar in discussies stimuleren tot het zo expliciet mogelijk verwoorden van hun opvattingen.

Een ander criterium was dat de prestaties van de leerlingen bij scheikundetoetsen min of meer gemiddeld waren. Groepen waarvan de leerlingen zeer hoge of zeer lage cijfers voor scheikunde haalden, kwamen niet in aanmerking[21]. Bij de selectie van groepen werden zowel groepen die volledig uit jongens of uit meisjes bestonden als gemengde groepen benaderd. In totaal kwamen in de opgenomen groepen ongeveer evenveel jongens als meisjes voor. De leerlingenteksten zijn in de praktijk vooral in 4-VWO-klassen gebruikt. Met de tweede en de derde versie is echter ook in 4-HAVO-klassen gewerkt. Ook in deze klassen werden opnamen van enkele groepen gemaakt. In §2.4 kom ik terug op de selectie van groepen.

Aan de leerlingen van een geselecteerde groep werd gevraagd of zij mee wilden werken aan een onderzoek. Daarbij werd benadrukt dat medewerking

---

[20]Aan het begin van een cursus verschafte ik bovendien informatie over de leerlingentekst en het hiermee verbonden onderzoek. Bovendien liet ik docenten in kleine groepen proeven uitvoeren en vragen beantwoorden die in de leerlingentekst waren opgenomen.

[21]Overeenkomstige selectiecriteria zijn gehanteerd door De Jong (1990, p.96).

geen extra inspanningen van de leerlingen vergde. Zij werden verzocht om tijdens de les 'gewoon' en op dezelfde wijze als andere groepen te werk te gaan. Pas na toestemming werd geluidsopname-apparatuur geïnstalleerd. Vaak reageerden groepen aanvankelijk wat onwennig op de opnamesituatie. Uitingen hiervan (giechelen, stoer of verlegen gedrag) hielden echter zelden langer dan een kwartier aan en traden bij volgende opnamen niet of nauwelijks op.

Bij ongeveer de helft van de geluidsopnamen zat ik als onderzoeker in de buurt van de op te nemen groep[22]. Hierbij maakte ik aantekeningen die een ondersteuning vormden bij het naderhand uitwerken van de opnamen. Tevens raakte ik af en toe betrokken in onderwijsgesprekken. In sommige gevallen spraken de leerlingen mij als docent of onderwijsontwerper aan ('Kunt u ons helpen?'; 'Hoe is deze vraag bedoeld?'). In andere gevallen vroeg ik leerlingen om een eerdere uitspraak te verduidelijken. Soms deed ik een poging om een vastgelopen discussie weer op gang te brengen. In mijn contacten met groepen probeerde ik steeds de kwaliteit van het onderzoeksmateriaal te bevorderen, met name door groepsdiscussies te stimuleren. Bij de analyse van gesprekken waaraan ik een bijdrage leverde, werd ook (de invloed van) deze bijdrage onderzocht.

Analyse van onderzoeksmateriaal

Het onderzoeksmateriaal dat tijdens onderwijssituaties verzameld is, omvatte dus voornamelijk geluidsopnamen en schriftelijke antwoorden van groepen leerlingen en, voor zover het nascholingsbijeenkomsten betrof, van groepen docenten. Daarnaast ging het om observatieaantekeningen.

Bij het afluisteren van geluidsopnamen registreerde ik regelmatig onderwijsgesprekken en -gebeurtenissen, die overeenstemden met mijn verwachtingen omtrent de betreffende, door mij ontworpen opdracht. Bij andere gesprekken en gebeurtenissen werden mijn bedoelingen en verwachtingen van een opdracht echter niet gerealiseerd. Dit gebeurde bijvoorbeeld doordat andere argumentaties gehanteerd werden dan ik verwacht had. In sommige gevallen leidde dit tot blokkades en in andere tot een zekere produktiviteit, ook al trad een andere ontwikkeling op dan ik had beoogd.

Het belang van onverwachte gesprekken en gebeurtenissen zie ik in de mogelijkheid dat hierdoor bij mij als onderzoeker *chemiedidactische begripsontwikkeling* optreedt. De betrokken fragmenten werden tot protocollen uitgeschreven en vervolgens geanalyseerd. Deze analyse was gericht op een beschrijving van en een verklaring voor het onverwachte karakter van het betrokken onderwijsgesprek: welke argumenten en redeneringen worden verwoord; hoe kunnen deze geïnterpreteerd worden en welke invloed hebben deze op de voortgang van het gesprek? Hoe kunnen eventueel optredende blokkades en/of produktieve situaties worden beschreven en verklaard?

Protocolanalyse werd doorgaans gecombineerd met bestudering van schriftelijke antwoorden van 20 tot 40 groepen leerlingen. De informatie in deze antwoorden is uiteraard van geheel andere aard dan die in protocollen: uitvoerige discussies worden vaak samengevat in een kort schriftelijk antwoord.

---

[22]Bij de eerste versie van de leerlingentekst was R.J. Mertens tijdens enkele opnamen aanwezig.

Schriftelijke antwoorden die overeenstemden met mijn verwachtingen konden meestal als zodanig geïnterpreteerd worden, omdat de formulering herkenbaar was. Onverwachte en/of onherkenbare antwoorden werden geanalyseerd vanuit gezichtspunten die door protocolanalyse waren gevormd. Soms werden schriftelijke antwoorden van groepen waarvan geen procotol beschikbaar was, begrijpelijk door deze te vergelijken met redeneringen in protocollen van andere groepen. De analyse schriftelijke antwoorden leverde doorgaans geen voor mij nieuwe chemiedidactische gezichtspunten op, maar had vooral een verbredende functie.

Analyse van onderzoeksmateriaal dat verzameld was in onderwijssituaties riep doorgaans vragen op met betrekking tot (de structuur van) de chemische inhoud van dit onderwijs: wat betekenen bepaalde begrippen in een bepaalde context; hoe hangen verschillende begrippen samen en hoe zijn ze tot stand gekomen? In §2.2 gaf ik al aan dat in dit verband wetenschappelijke begripsontwikkeling, te bestuderen via oorspronkelijke wetenschappelijke artikelen en verslagen en door historische en filosofische literatuur, van belang is. Daarnaast werden wetenschappelijke artikelen, chemische studieboeken en schoolboeken bestudeerd. Door deze analyse van en reflectie op chemie, waaraan behoefte was ontstaan op grond van het empirisch onderzoek, leerde ik (opnieuw) chemie. Ook dit chemieleerproces leverde een bijdrage aan de invulling van begrippen en relaties in de didactische structuur.

2.4 Verantwoording van werkwijze

Kwalitatief onderzoek

Het onderzoek waarover in dit proefschrift wordt gerapporteerd is van kwalitatieve aard. Dat wil o.a. zeggen dat het onderzoeksmateriaal niet aan statistische verwerkingsmethoden is onderworpen. De keuze voor kwalitatief onderzoek hangt samen met het geformuleerde onderzoeksdoel. Om een didactische structuur te verkrijgen, moeten analyses van onderwijsgesprekken worden gecombineerd met analyses van chemische literatuur. In een fase waarin hierdoor nieuwe (betekenissen van) begrippen en nieuwe relaties tussen begrippen door onderzoekers worden ontwikkeld, acht ik het niet opportuun om het onderzoeksmateriaal aan een statistische procedure te onderwerpen. Hiertoe moeten immers grote aantallen redeneringen en opvattingen in globaal gedefinieerde categorieën worden ingedeeld. In verband met chemiedidactische begripsontwikkeling is het echter van belang om onverwachte redeneringen en opvattingen zorgvuldig te analyseren (§2.3). Daarbij is de frequentie waarmee een zekere redenering wordt aangetroffen weinig relevant. Belangrijk is de (geschatte) geloofwaardigheid van zo'n redenering vanuit leerlingenperspectief en de bijdrage ervan aan de analyse van mogelijke betekenissen van chemische begrippen.

In de sociale wetenschappen is kwalitatief onderzoek een geaccepteerd alternatief voor onderzoek waarin statistische methoden worden gehanteerd. Onlangs heeft Wester een overzicht gepubliceerd van doelen en methoden van kwalitatief onderzoek (Wester, 1987). Hij acht kwalitatief onderzoek o.a. wenselijk indien men leefwijzen, opvattingen en/of argumentaties van mensen in

hun complexe realiteit wil beschrijven, zonder deze op voorhand te reduceren tot prototypes. Het door mij verrichte onderzoek past dus in dit kader.

In het onderstaande bespreek ik een aantal kenmerkende aspecten van het onderzoek in het licht van het gekozen onderzoeksdoel. Terugblikkend op het onderzoek zal ik de nu volgende discussie in §9.2 voortzetten.

Verzamelen van geluidsmateriaal

De keuze om groepen op de beschreven wijze te selecteren hangt samen met een beperking die uit het onderzoek van geluidsopnamen voortkomt. Dit onderzoek is zeer tijdrovend zodat slechts een klein aantal groepen bestudeerd kan worden. Met Goedhart ben ik echter van mening dat er geen bruikbaar alternatief is voor het onderzoek dat gericht is op begripsontwikkeling in onderwijssituaties (Goedhart, 1990, p.205). De representativiteit van het verzamelde geluidsmateriaal staat hierdoor echter ter discussie. In dit verband wil ik wijzen op de hiervoor beschreven verbredende functie van schriftelijke groepsantwoorden en op het cyclische onderzoeksschema. In het onderstaande kom ik hier nog op terug.

Bij de analyse van het onderzoeksmateriaal is geen rekening gehouden met eventuele verschillen tussen HAVO- en VWO-leerlingen en tussen jongens en meisjes. Dit hangt samen met het onderzoeksdoel: ik ben er in eerste instantie vanuit gegaan dat het niet nodig zou zijn om didactische structuren voor chemisch evenwicht te onderscheiden naar geslacht en schooltype. Nadat ik had besloten om eventuele verschillen voorlopig buiten beschouwing te laten, is het mij in de loop van het onderzoek niet opgevallen dat meisjes in de geobserveerde onderwijssituaties wezenlijk anders argumenteren en handelen dan jongens, noch dat HAVO-leerlingen in dit opzicht duidelijk verschillen van VWO-leerlingen.

Protocolanalyse

De analyse van protocollen van onderwijsgesprekken is in Nederlands chemiedidactisch onderzoek reeds enige tijd gangbaar[23]. De keuze voor protocolanalyse komt voort uit de wens om processen die in onderwijssituaties optreden te kunnen bestuderen.

Aan deze methode kleven echter enkele belangrijke bezwaren. Afgezien van de tijdsinvestering, waardoor slechts een beperkt aantal protocollen kan worden geanalyseerd, is de informatie die in protocollen is vastgelegd sterk gereduceerd ten opzichte van de (onderwijs-)werkelijkheid. Zo is het zelden mogelijk om op basis van protocollen uitspraken te doen over groepsleden die zich weinig uiten. Begripsontwikkeling kan ook optreden door te luisteren, maar dit is in protocollen niet aanwijsbaar.

De kloof tussen een werkelijk gesprek en een uitgeschreven versie kan zeer groot zijn. Kennis van intonatie en non-verbaal gedrag is soms van groot belang bij de interpretatie van een uitspraak in een protocol. Om aan dit bezwaar tegemoet te komen, beluisterde ik soms met andere onderzoekers tijdens de analyse van protocollen de betrokken geluidsfragmenten. Bij de weergave van protocol-

[23]Behalve naar het werk van Goedhart (1990) en De Jong (1990) kan ik verwijzen naar dat van Ten Voorde (1977), De Vos (1985), De Jager (1985) en Vogelezang (1990).

len in dit proefschrift heb ik af en toe mededelingen over intonatie en non-verbaal gedrag opgenomen. Het genoemde bezwaar wordt hierdoor echter zeker niet opgeheven. Video-opnamen bevatten wat dit betreft meer informatie dan audio-opnamen, maar zijn moeilijker te verwerken in de onderzoeksrapportage. Bovendien wordt het gedrag van leerlingen mogelijk sterk beïnvloed door de aanwezigheid van een camera in de klas.

De analyse van protocollen wordt gestuurd door de verwachtingen van de onderzoeker (§2.3). Deze vormen zijn analysecontext. Om te voorkomen dat de analyse hierdoor te sterk bepaald wordt ('je gaat lezen wat je wilt lezen'), waardoor ik zou kunnen vasthouden aan zekere chemiedidactische preconcepties, heb ik verschillende maatregelen getroffen. Ten eerste heb ik mijn verwachtingen ten aanzien van onderwijsmateriaal, na het ontwerpen en vóór het gebruik ervan, steeds zoveel mogelijk (schriftelijk) geëxpliciteerd. Hiertoe dienden o.a. de docententoelichtingen. In de tweede plaats heb ik protocollen altijd in samenwerking met één of meer andere onderzoekers geanalyseerd. Daarbij werkte ik voornamelijk samen met R.J. Mertens, W. de Vos en A.H. Verdonk. Zodoende krijgen analyseresultaten een interpersoonlijke status. Hierbij bestaat echter het risico dat samenwerking in een vaste, kleine groep na verloop van tijd kan leiden tot een minder kritische houding van de onderzoekers ten opzichte van elkaar.

Mede in verband hiermee heb ik ervoor gekozen om in dit proefschrift een aantal kenmerkende protocollen weer te geven, inclusief het betrokken onderwijsmateriaal, mijn verwachting(en) hieromtrent en het (interpersoonlijke) analyseresultaat. Volgens Wester kan deze weergave bijdragen aan de "plausibiliteit van de interpretaties":

> "Aan de lezer is de taak de geboden beschrijvingen van de werkelijkheid te weerspreken, ongeldig te verklaren of als niet toepasbaar voor de eigen situatie van de hand te wijzen." (Wester, 1987, p.40)

Wester noemt in dit verband ook de mogelijkheid om de geloofwaardigheid te verhogen door aan te sluiten bij onderzoeksresultaten die in de literatuur zijn gepubliceerd. Verslagen van empirisch onderzoek over leren en onderwijzen van chemisch evenwicht hebben vooral betrekking op enquêtes, tests en interviews die voor en na onderwijs zijn afgenomen. Deze publicaties zal ik in §3.4 bespreken. Over onderzoek op dit gebied dat verricht is *tijdens* onderwijs, is voor zover ik heb kunnen nagaan niet gepubliceerd. Dit impliceert dat resultaten van mijn onderzoek mogelijk niet goed aansluiten bij reeds gepubliceerde onderzoeksresultaten. Anders gezegd: mijn onderzoek kan een nieuw terrein ontsluiten.

Ontwikkeling van een didactische structuur

In het onderzoek spelen onderwijssituaties een centrale rol. Deze situaties zijn per definitie uniek en niet-reproduceerbaar. Dit heeft consequenties voor de generaliseerbaarheid van hieraan ontleende onderzoeksresultaten en dus voor de te verkrijgen didactische structuur (§2.2). De ontwikkeling van deze structuur verloopt via een proces waarin voorlopige inzichten (didactische hypotheses) voortdurend getoetst worden door confrontatie met andere onderzoeksgegevens. Zo kunnen inzichten die ontstaan op basis van de analyse van een protocol

worden getoetst door analyse van andere protocollen en door vergelijking met schriftelijke antwoorden. Een andere vorm van toetsen betreft de vergelijking van argumentaties in onderwijssituaties met argumentaties in chemische literatuur, met name in die literatuur waarin de ontwikkeling van chemische begrippen aan de orde is (§2.3).

Bij het genereren van een didactische structuur speelt het cyclische schema van het onderzoek een essentiële rol. Door onderwijsmateriaal te ontwerpen op basis van didactische hypotheses, kan men deze gericht toetsen. Analyse van onderzoeksmateriaal dat met het nieuwe onderwijsmateriaal verkregen is, kan leiden tot verscherping of bijstelling van deze hypotheses.

Wester bepleit een soortgelijke onderzoeksopzet. Hij spreekt hierbij van de 'gefundeerde theorie-benadering', met als resultaat:

> "Er wordt een begrippenstruktuur ontwikkeld (de gefundeerde theorie) op basis van onderzoek van een bepaalde groep of situatie(s) en de relevantie ervan wordt in vergelijkbare groepen of situaties getoetst. Met de theorie kunnen verschijnselen op een bepaald onderzoeksveld worden beschreven, waarvan de onderzochte groepen of situaties vertegenwoordiger zijn." (Wester, 1987, p.156)

De beschreven werkwijze wordt door Wester aangeduid als 'theoretical sampling'. Zowel toetsing als bijstelling van theorie vindt hierin plaats door voortdurend vergelijkingsgevallen te zoeken.

> "Dit vergelijkingsproces gaat zolang door tot geen nieuwe inzichten meer worden verkregen. Op deze wijze kunnen theorieën ontwikkeld worden die [...] een empirische 'vulling' hebben." (Wester, 1987, p.29)

Uiteraard kan men er nooit zeker van zijn dat aan de voorwaarde uit de eerste zin is voldaan. Op een zeker (soms arbitrair) moment wordt het onderzoek afgerond. In mijn geval was de onderzoekstijd beperkt.

Het laatste citaat moet overigens niet worden opgevat als zou door het vergelijkingsproces 'vanzelf' theorie ontstaan. Een didactische structuur wordt immers door onderzoekers gecreëerd, vanuit een visie op onderzoek en onderzoeksobject. Mede om die reden heb ik in het voorgaande mijn visie omtrent chemiedidactiek en -onderwijs geëxpliciteerd.

hoofdstuk 3

Oriëntatie op chemisch evenwicht

In dit hoofdstuk wil ik het chemische onderwerp van mijn onderzoek concretiseren en afbakenen (zie §1.3). Hiertoe beschrijf ik 'chemisch evenwicht' in een aantal verschillende kaders. Ter inleiding geef ik een oriënterende wetenschapshistorische beschouwing omtrent chemisch evenwicht. Naar aanleiding hiervan ga ik in op huidige wetenschappelijke contexten van chemisch evenwicht. Om vervolgens te kunnen laten zien dat er een kloof tussen wetenschap en onderwijs op dit gebied bestaat, beschrijf ik vanuit een onderwijs-historisch perspectief de wijze waarop chemisch evenwicht in het huidige Nederlandse voortgezet onderwijs behandeld wordt. Daarmee schets ik tevens de bestaande (school-)vakstructuur omtrent dit onderwerp, die ik in §1.3 als vertrekpunt voor mijn onderzoek heb gekozen. Tenslotte geef ik een overzicht van reeds verricht onderzoek naar onderwijs in chemisch evenwicht.

In §3.5 formuleer ik op basis van deze beschrijvingen een aantal consequenties voor mijn onderzoek en voor de wijze waarop ik daarover in dit proefschrift rapporteer.

3.1 Wetenschaps-historische contexten

Ontwikkeling in het kader van affiniteitsleer

In deze paragraaf geef ik in grote lijnen de ontwikkeling van chemisch evenwicht in wetenschappelijk onderzoek weer. In verband met het oriënterende karakter van dit hoofdstuk baseer ik me op wetenschaps-historische beschouwingen over chemisch evenwicht[1]. In de komende hoofdstukken ga ik op sommige aspecten nader in, waarbij ik, zoals aangekondigd in §2.2, ook gebruik zal maken van authentieke bronnen.

Het begrip chemisch evenwicht is geïntroduceerd in het kader van onderzoek naar de zogenoemde 'chemische affiniteit'. Dit begrip had betrekking op de neiging van stoffen om met elkaar te reageren en dus op de *oorzaak* van chemische reacties. Affiniteitsvoorstellingen ten aanzien van chemische omzettingen kwamen reeds voor in de Griekse oudheid, o.a. bij Hippocrates.

Een belangrijk deel van het wetenschappelijke chemische onderzoek gedurende de achttiende en de negentiende eeuw heeft in het kader gestaan van het zoeken naar regelmatigheden in en verklaringen voor de chemische affiniteit. Tot 1800 had men hierbij vooral aandacht voor de *aard van de stoffen*. Men stelde tabellen met relatieve affiniteiten op, waaruit de richting waarin een omzetting mogelijk was kon worden afgeleid ('verdringingsreeksen'). De Zweed Bergman hanteerde omstreeks 1780 twee verschillende verdringingsreeksen: één voor omzettingen in waterige oplossingen bij gewone temperatuur en één voor omzettingen van zuivere stoffen bij verhoogde temperatuur (bij-

[1]Ostwald (1902), p.1-198, Lindauer (1962), Lund (1965, 1968), Snelders (1973, 1977) en Laidler (1985).

voorbeeld in een smelt[2]). Hij had namelijk gemerkt dat de onderlinge affiniteitenvolgorde behalve van de aard van de stoffen ook afhing van de *reactieomstandigheden* (m.n. de temperatuur). Bergman nam aan dat affiniteiten onafhankelijk waren van stofhoeveelheden.

Rond 1800 toonde Berthollet experimenteel aan dat chemische reacties tussen zuren en basen in oplossing door de keuze van bepaalde hoeveelheidsverhoudingen ook konden optreden in een richting tegengesteld aan die, welke op grond van de onderlinge affiniteiten was voorspeld. Berthollet concludeerde dat affiniteiten niet uitsluitend door de aard van de stoffen bepaald worden, maar ook afhangen van stof*hoeveelheden*. Hij merkte tevens dat de door hem bestudeerde omzettingen niet altijd volledig waren. Hij hanteerde als eerste de term 'evenwicht' om aan te geven dat in zulke gevallen, net als in mechanische evenwichten, verschillende 'krachten' of 'werkingen' elkaar opheffen.

Hoewel deze conclusies van Berthollet door andere onderzoekers werden aanvaard, werd zijn werk volgens Ostwald (1902, p.47) niet op grote schaal voortgezet. Wel werd ook van andere chemische reacties aangetoond dat deze door variatie van stofhoeveelheden in twee tegengestelde richtingen en onvolledig kunnen optreden. Bekend in dit verband zijn de onderzoekingen van Berthelot en Péan de Saint-Gilles (1862-'63). Zij stelden vast dat bij de vorming van een ester en water uit een alcohol en een zuur een eindtoestand optreedt, die wordt gekenmerkt door de aanwezigheid van alle vier betrokken stoffen, en dat een dergelijke toestand ook bereikt kan worden door uit te gaan van ester en water.

In dezelfde periode werden ook gasreacties onderzocht. Daarbij stelde men vast dat sommige stoffen dissociëren onder invloed van temperatuurverhoging. De dissociatie bleek doorgaans ongedaan gemaakt te kunnen worden door temperatuurverlaging. Tevens bleek dat dissociaties in een zeker temperatuurgebied onvolledig zijn. In dit verband werd de term dissociatiegraad ingevoerd.

Ontwikkeling in het kader van reactiekinetiek en thermodynamica

In de loop van de vorige eeuw is het onderzoek naar chemische affiniteit gedifferentiëerd in twee verschillende kaders: in het ene richtte men zich vooral op tijdsafhankelijke proceskenmerken van chemische reacties, waarbij verklaringen veelal met behulp van corpusculaire begrippen werden geformuleerd. In het andere stonden energetische aspecten van chemische omzettingen centraal. Ik duid deze kaders aan met de namen *reactiekinetiek* respectievelijk *thermodynamica*.

In beide contexten zijn (kwalitatieve) verklaringen voor evenwichtsverschijnselen opgesteld. In het kinetische kader heeft men verondersteld dat in een evenwichtstoestand twee tegengestelde reacties met even grote snelheid optreden. Hiervoor is de term *dynamisch evenwicht* ingevoerd. Sommige onderzoekers, zoals Guldberg en Waage in 1864, formuleerden deze hypothese in niet-corpusculaire termen. Daarentegen baseerde Pfaundler in 1867 deze hypothese op een eerder door Clausius opgestelde moleculair-kinetische theorie om hiermee de onvolledigheid van dissociaties te verklaren (zie verder §6.2).

---

[2]Reacties in gastoestand werden in deze periode nog nauwelijks bestudeerd.

In een thermodynamisch kader is een kwalitatieve verklaring voor onvolledige dissociaties opgesteld door Horstmann. Deze was geïnspireerd door de wijze waarop Clausius de tweede hoofdwet van de thermodynamica had geformuleerd. Volgens Clausius treden processen slechts op indien de totale entropie toeneemt ("Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu"; Clausius, 1865, p.400). In 1873 paste Horstmann deze zienswijze toe op onvolledige dissociaties.

In de jaren hierna voerden Pfaundler en Horstmann een discussie (zie Snelders, 1977, p.63-67). Beiden erkenden elkaars werk en de hierin geformuleerde evenwichtskenmerken ('tegengestelde omzettingen op moleculair niveau' respectievelijk 'maximale entropie'). Zij verschilden vooral van mening over het belang van deze criteria ten opzichte van elkaar. Voor Pfaundler vormde het entropiecriterium een aanvulling op het idee van de tegengestelde moleculaire omzettingen. Dit laatste beschouwde hij als de rechtstreekse ("unmittelbare") oorzaak voor de evenwichtstoestand.

Volgens Horstmann werden moleculaire processen bepaald door de regels van de statistiek: deze waren in zijn beschouwing slechts van invloed op de *tijd* die nodig is voordat een evenwichtstoestand is bereikt. De *oorzaak* van evenwicht zou volgens hem niet door het toeval bepaald kunnen worden maar moest liggen in het gegeven dat de entropie niet verder kan toenemen. Bovendien toonde Horstmann aan dat de visie van Pfaundler, toegepast op heterogene evenwichten, kon leiden tot conclusies die strijdig zijn met experimentele gegevens (zie verder §7.2).

In dezelfde periode zijn ook kwantitatieve beschrijvingen van chemisch evenwicht geformuleerd. In het kinetische kader hebben Guldberg en Waage hieraan een belangrijke bijdrage geleverd. Op basis van mathematische formules voor reactiesnelheden en de veronderstelling dat in een evenwichtstoestand twee tegengestelde reacties met even grote snelheid plaatsvinden, leidden zij af dat een zekere wiskundige relatie tussen evenwichtsconcentraties ('actieve massa's') van de reagerende stoffen een constante waarde heeft, die overigens van de temperatuur afhangt.

Soortgelijke formules werden omstreeks deze tijd ook op basis van thermodynamica verkregen. Op dit gebied zijn de bijdragen van Horstmann, Van 't Hoff[3] en (vooral) Gibbs van belang geweest. De laatste stelde bovendien reeds in de jaren '70 van de vorige eeuw een formule op waarmee beschreven wordt hoe evenwichtsconcentraties van de temperatuur en van energetische grootheden afhangen. Het werk van Gibbs is echter pas tegen het einde van de vorige eeuw op grote schaal erkend. Voorafgaand daaraan had Van 't Hoff (1884) eveneens op thermodynamische basis een formule afgeleid ter beschrijving van de verandering van de 'ligging' van een evenwicht onder invloed van temperatuurveranderingen.

Hieraan verbond Van 't Hoff een zogenoemd 'principe van beweeglijk evenwicht', dat korte tijd later in een meer algemene versie is geformuleerd door Le Chatelier. In diens principe worden uitspraken gedaan over veran-

[3]Van 't Hoff had in 1877 op basis van de esterexperimenten van Berthelot en Péan de Saint-Gilles een kinetische afleiding gepubliceerd, waarna hij in 1886 een thermodynamische afleiding beschreef. Zie verder §8.4.

deringen in evenwichtssamenstellingen onder invloed van veranderingen van verschillende grootheden (temperatuur, druk, volume, concentratie). De formulering van Le Chatelier is in het begin van deze eeuw bekritiseerd, waarna in de jaren '30 een bevredigende formulering op basis van thermodynamica is gegeven (Deze ontwikkeling omtrent het principe van Le Chatelier is o.a. beschreven door De Heer, 1957).

Het gegeven dat chemisch evenwicht ontwikkeld is in twee verschillende wetenschappelijke kaders roept de vraag op naar de huidige wetenschappelijke status van dit begrip. In de volgende paragraaf komt deze status aan de orde.

3.2 Huidige wetenschappelijke contexten

Voor een beschrijving van actuele wetenschappelijke inzichten omtrent chemisch evenwicht maak ik gebruik van enkele recente fysisch-chemische studieboeken[4]. Daarbij ga ik ervan uit dat wetenschappelijk onderzoek op dit vakgebied de laatste jaren geen nieuwe inzichten over chemisch evenwicht heeft opgeleverd. Hieronder geef ik korte omschrijvingen vanuit de klassieke thermodynamica en de reactiekinetiek. Wetenschappelijke kennis van chemisch evenwicht wordt o.a. toegepast bij bereidingsvraagstukken in de chemische technologie. Aan het einde van deze paragraaf ga ik hier dan ook kort op in.

Klassieke thermodynamica

De klassieke thermodynamica is gebaseerd op twee wetten die betrekking hebben op chemische en fysische verschijnselen (eerste en tweede hoofdwet). Op grond van deze wetten is een stelsel betrekkingen afgeleid waarmee veranderingen beschreven kunnen worden van grootheden als energie en entropie en van de waarden van parameters (temperatuur, druk, volume, massa) voor gevallen waarin een materiëel systeem van de ene toestand overgaat in een andere.

Kenmerkend voor de klassieke thermodynamica is dat processen hierin uitsluitend als *verschillen tussen toestanden* worden beschreven. Anders gezegd: in de klassieke thermodynamica speelt de grootheid 'tijd' geen rol. Essentiëel is de op de tweede hoofdwet gebaseerde aanname dat systemen die volledig van de buitenwereld zijn afgesloten[5] uiteindelijk in een evenwichtstoestand zullen verkeren. Een thermodynamicus wacht zogezegd tot een dergelijke toestand is ingetreden; veranderingen die daaraan voorafgaan worden door hem niet beschreven. De klassieke thermodynamica wordt ook wel een evenwichtsleer genoemd.

In eerste instantie is het criterium voor evenwicht de afwezigheid van veranderingen in de tijd. In de thermodynamica is dit niet voldoende: een mengsel van waterstofgas en zuurstofgas dat volledig is afgesloten van de buitenwereld kan bij kamertemperatuur en atmosferische druk weliswaar 'eindeloos' bewaard worden zonder dat hierin veranderingen optreden, doch in dit systeem is geen sprake van evenwicht in thermodynamische zin. De beide gassen kunnen namelijk reageren onder vorming van water, waarbij de entropie

---

[4]Met name van Atkins (1986), Laidler (1987) en Bijvoet et al. (1973).

[5]Dit houdt in dat het systeem geen stof, geen warmte en geen (volume- of andere) arbeid met de omgeving kan uitwisselen.

toeneemt. *Een systeem dat volledig is afgesloten van de buitenwereld verkeert in evenwicht indien de entropie van zo'n systeem een maximale waarde heeft bereikt.* Deze formulering kan worden gezien als een operationalisering van de eerder geciteerde uitspraak van Clausius (§3.1).

Door Gibbs is o.a. voor chemische reacties een evenwichtscriterium opgesteld, waarbij de naar hem vernoemde grootheid Gibbs-energie centraal staat. Uit een beschouwing op basis van de eerste en de tweede hoofdwet volgt dat een chemische reactie bij zekere druk en temperatuur in een systeem dat geïsoleerd is voor andere arbeid dan die tegen een constante buitendruk vanuit thermodynamisch oogpunt slechts mogelijk is, indien de waarde van de Gibbs-energie hierbij afneemt. Indien een chemische omzetting plaatsvindt, daalt de actuele waarde van de Gibbs-energie (G) onder invloed van concentratieveranderingen die het gevolg van de optredende reactie zijn, totdat deze een minimumwaarde bereikt heeft.

Bij deze situatie hoort een zekere waarde van de vorderingsgraad ξ van de reactie, die tussen 0 (in het geheel geen omzetting) en 1 (volledige omzetting) moet liggen. Deze waarde representeert de evenwichtssamenstelling van het reactiemengsel. De evenwichtstoestand kan worden weergegeven als het minimum van een curve waarin G is uitgezet als functie van ξ en kan in een vergelijking worden beschreven met:

$$(\partial G/\partial \xi)_{T,p} = 0 \qquad (1)$$

Dit wil zeggen: indien bij de evenwichtssamenstelling een omzetting van een infinitesimale (d.i. oneindig kleine) hoeveelheid reactanten in produkten plaatsvindt, is de bijbehorende verandering van de Gibbs-energie gelijk aan nul.

Voor een omkeerbare reactie $mA+nB \rightleftarrows qC+rD$ waarbij uitsluitend stoffen in gasvormige toestand betrokken zijn, kan met behulp van formule (1) worden afgeleid dat in een evenwichtstoestand geldt:

$$-\Delta G^\circ/RT = \ln \{(p_C{}^q).(p_D{}^r)/(p_A{}^m).(p_B{}^n)\} = \ln K_p \qquad (2)$$

Hierin is ΔG° een temperatuurafhankelijke standaardwaarde voor de verandering van de Gibbs-energie voor de omzetting van m mol A en n mol B in q mol C en r mol D bij een druk van 1 atmosfeer. ΔG° wordt berekend uit getabelleerde waarden van Gibbs-energieën voor de afzonderlijke stoffen die bij de reactie betrokken zijn. Verder is R de zgn. gasconstante, T de absolute temperatuur en heeft p betrekking op partiële drukken (Atkins, 1986, p.213-215).

Wezenlijk in vergelijking (2), die wordt afgeleid onder de aanname van ideaal gasgedrag, is het linker gedeelte: hierin wordt een betrekking gegeven tussen ΔG°, T en de waardes die de partiële drukken van de betrokken stoffen in een evenwichtstoestand hebben. In het rechterdeel wordt de constante waarde die de breuk $(p_C{}^q).(p_D{}^r)/(p_A{}^m).(p_B{}^n)$ in een evenwichtstoestand (bij 1 atmosfeer en temperatuur T) bezit, aangeduid met K_p. K_p wordt doorgaans *evenwichtsconstante* genoemd.

Voor een omkeerbare reactie $mA+nB \rightleftarrows qC+rD$ waarbij A, B, C en D alle vier zijn opgelost onder vorming van een ideaal verdunde oplossing, geldt in een evenwichtstoestand:

$$-\Delta G^\circ/RT = \ln \{[C]^q.[D]^r/[A]^m.[B]^n\} = \ln K_c \qquad (3)$$

Met *[A]*, etc. worden evenwichtsconcentraties aangeduid en met K_c een evenwichtsconstante in termen van concentraties.

Evenwichten van gassen en opgeloste stoffen gedragen zich slechts volgens (2) respectievelijk (3) in geval van oneindige verdunning. Om van toepassing te kunnen zijn op werkelijke situaties moeten deze formules gewijzigd worden. In (2) dienen partiële drukken vervangen te worden door *fugaciteiten*, terwijl in (3) voor concentraties *activiteiten* ingevuld moeten worden. In het geval van zeer verdunde systemen worden de grootheden fugaciteit en partiële druk, respectievelijk activiteit en concentratie vaak aan elkaar gelijk gesteld. Indien een zuivere stof bij een omkeerbare reactie betrokken is, wordt de activiteit ervan gelijk aan 1 gesteld.

Reactiekinetiek

Een kenmerkende grootheid in de reactiekinetiek is *tijd*. Doel van dit vakgebied is het beschrijven van reactiesnelheden en het verklaren van tijdsafhankelijke *proces*kenmerken van chemische omzettingen. Omdat het in de experimentele reactiekinetiek vooral gaat om veranderingen in de tijd zijn de onderzochte systemen in principe *niet* in evenwicht.

Op het eerste oog lijkt het dus weinig zinvol om reactiekinetiek met (chemisch) evenwicht te verbinden; kinetiek en evenwicht lijken elkaar zelfs uit te sluiten. Desalniettemin kunnen toestanden van macroscopisch evenwicht beschreven worden in kinetische termen. Daarbij speelt het begrip *reactiemechanisme* een belangrijke rol. Zo'n mechanisme bestaat uit een reeks 'stappen', die samen een corpusculaire 'route' beschrijven die verondersteld wordt ten grondslag te liggen aan de omzetting op macroscopisch niveau. Een corpusculaire stap wordt ook aangeduid als een elementaire reactie. De snelheid van zo'n reactie wordt afgeleid uit een corpusculaire beschouwing op basis van een begrip botsingskans en mathematisch tot uitdrukking gebracht in een snelheidsvergelijking, waarin concentraties voorkomen.

Om tot een beschrijving van chemisch evenwicht op basis van zulke snelheidsvergelijkingen te komen, moet iedere elementaire reactie die deel uitmaakt van het voorgestelde reactiemechanisme in de evenwichtssituatie omkeerbaar geacht worden. Hierdoor wordt een stelsel van paren tegengestelde elementaire reacties verkregen. Bovendien moet worden aangenomen dat de snelheden van tegengestelde elementaire reacties die een paar vormen in een evenwichtstoestand aan elkaar gelijk zijn. Beide aannames zijn gebaseerd op principes uit de statistische mechanica, die in de jaren '20 en '30 zijn geïntroduceerd: het principe van de 'microscopische reversibiliteit' en het hiermee verwante principe van 'detailed balancing', die beide uitsluitend op evenwichtstoestanden van toepassing worden verklaard (zie Krupka et al., 1966).

Door de snelheidsvergelijkingen van al die elementaire reacties wiskundig te combineren, wordt voor een omkeerbare reactie $mA+nB \rightleftarrows qC+rD$ in een evenwichtstoestand een uitdrukking verkregen van de vorm:

$$k_1k_2k_3.../k'_1k'_2k'_3... = [C]^q.[D]^r/[A]^m.[B]^n = K \qquad (4)$$

In het linkerlid van deze vergelijking zijn de (theoretische) reactiesnelheidscoëfficiënten van alle successieve elementaire reacties in beide tegengestelde richtingen (k_1 resp. k'_1, k_2 resp. k'_2, etc.) weergegeven (Laidler, 1987, p.285-288).

Relatie tussen thermodynamica en reactiekinetiek
Thermodynamica en reactiekinetiek vullen elkaar aan: met behulp van de Gibbs-energie kan men nagaan of een zeker proces onder gegeven omstandigheden thermodynamisch gezien mogelijk is. Uit een kinetisch onderzoek blijkt pas of dit proces onder die omstandigheden inderdaad merkbaar optreedt, hoe het optreedt en hoe dit optreden beïnvloed kan worden.

Ten aanzien van chemisch evenwicht blijken thermodynamica en kinetiek beide een relatie op te leveren waarmee een evenwichtssamenstelling in termen van concentraties wordt beschreven. Daartoe moeten de formules (3) respectievelijk (4) echter worden ontdaan van hun karakteristieke linkerdeel ($-\Delta G^o/RT = ln...$ resp. $k_1k_2k_3... /k'_1k'_2k'_3...$). In dat geval ontstaat een formule die te beschouwen is als een 'geamputeerde' thermodynamische dan wel kinetische vergelijking: de relatie van evenwichtsconcentraties met temperatuur en met energetische respectievelijk kinetische grootheden wordt hierin immers niet weergegeven. Zo'n formule kan nog wel van betekenis zijn in een analytisch-chemische context. Ik kom hier in verband met onderwijs over chemisch evenwicht in de volgende paragraaf op terug.

Chemische technologie
Bij bereidingsvraagstukken in de chemische technologie streeft men naar een optimale produktie: er moet zo snel en zo veel mogelijk geproduceerd kunnen worden. In dit verband vormt de eventuele instelling van een chemisch evenwicht een probleem: een volledige omzetting kan niet bereikt worden en bovendien blijven uitgangsstoffen over die het gewenste eindprodukt kunnen verontreinigen. Dit heeft belangrijke technologische consequenties. Gezocht moet worden naar procesomstandigheden waarbij de omzetting zo volledig mogelijk zal zijn. Dit vergt inzicht in de invloeden die (bijvoorbeeld) druk en temperatuur op het betreffende evenwicht hebben. Ook moeten zuiveringsmethoden ontworpen worden. In het gunstigste geval kunnen overgebleven uitgangsstoffen opnieuw gebruikt worden (recycling).

Om de snelheid van de omzetting te vergroten kan men eveneens druk en temperatuur variëren. Bovendien zoekt men veelal naar katalysatoren. Om het proces te kunnen optimaliseren, zijn dus zowel thermodynamische als kinetische argumenten van belang.

Het voorbeeld van de ammoniaksynthese is niet alleen klassiek, maar ook zeer illustratief[6]. In de vorige eeuw heeft men lange tijd gezocht naar mogelijkheden om stikstof en waterstof om te zetten in ammoniak, dat als grondstof voor de kunstmestindustrie zou moeten dienen. Slechts door ongebruikelijk hoge drukken toe te passen, zou een behoorlijke opbrengst verkregen worden. Thermodynamisch gezien zou een lage temperatuur de opbrengst eveneens verhogen,

[6]De ontwikkeling van deze synthese wordt o.a. beschreven in Molenaar & Kooiman (1986), p.64-85.

maar dit bracht kinetische bezwaren met zich mee: bij lage temperaturen verliep de reactie uiterst langzaam. Uiteindelijk zijn installaties ontworpen waarbij onder hoge druk gewerkt kon worden en waarbij overgebleven uitgangsstoffen gerecycleerd kunnen worden. Bovendien werd een katalysator voor het proces gevonden, waardoor bij matig hoge temperaturen gewerkt kon worden.

In een produktiecontext is het optreden van een chemisch evenwicht in het algemeen dus ongewenst. Het veroorzaakt technologische problemen, die uiteraard economische consequenties hebben: investeringen van tijd en geld zijn noodzakelijk.

3.3 Chemisch evenwicht in het voortgezet onderwijs

Begin van onderwijs-historische ontwikkeling

In 1905 hield de hoogleraar Cohen, een voormalig medewerker van Van 't Hoff, een toespraak voor de toenmalige Nederlandsch Chemische Vereniging, waarin hij pleit voor modernisering van het scheikunde-onderwijs op de HBS. Hij noemt evenwichtsleer en reactiekinetiek als belangrijke wetenschappelijke onderwerpen die tot dusver te weinig aandacht in leergangen krijgen. Hij stelt een vereenvoudigde behandeling voor zonder mathematische beschouwingen, maar met de hypothese dat in een evenwichtstoestand twee tegengestelde reacties optreden (Cohen, 1905).

In het Chemisch Weekblad reageert Enklaar in 1906 op deze toespraak. Hij erkent het wetenschappelijke belang van de evenwichtsleer en onderschrijft de mening dat een behandeling hiervan op de HBS op zijn plaats is. Evenals Cohen wijst hij een mathematische aanpak af. Maar tevens voorziet hij problemen bij de invoering van de door Cohen genoemde hypothese, omdat deze niet rechtstreeks uit experimenten kan worden afgeleid. Moet een docent dan een moleculair-kinetische beschouwing geven, of "zijn toevlucht nemen tot de statistische natuurkunde?", zo vraagt hij zich af. Enklaar bepleit een "uitermate voorzichtige en bedachtzame" behandeling van de evenwichtsleer (Enklaar, 1906, p.27-28).

In alle Nederlandse scheikundeleergangen voor voortgezet onderwijs vanaf 1910 wordt, voor zover ik heb kunnen nagaan, tenminste één hoofdstuk aan chemisch evenwicht gewijd. Eerder was dit niet steeds het geval. Men lijkt dus gehoor te hebben gegeven aan de oproep van Cohen. In ieder geval neem ik aan dat *de aandacht voor chemisch evenwicht in het voortgezet onderwijs is toegenomen, omdat dit begrip van groot wetenschappelijk belang werd geacht.*

In de periode van 1910 tot heden zijn veranderingen aanwijsbaar in de manieren waarop chemisch evenwicht in leergangen wordt behandeld en in de eisen die aan deze behandeling via examenprogramma's worden gesteld. Deze veranderingen breng ik in verband met ontwikkelingen die in het scheikunde-onderwijs in het algemeen in deze eeuw hebben plaatsgevonden. In het begin van de eeuw probeerden auteurs van schoolboeken wetenschappelijke ontwikkelingen, zij het op enige afstand, te volgen. De boeken uit deze periode vormen het begin van een onderwijstraditie. Gedurende deze eeuw is het scheikunde-onderwijs veranderd onder invloed van argumenten, afkomstig uit de wetenschappelijke chemie, uit het onderwijs zelf en uit maatschappelijke discussies.

Daardoor zijn onderwerpen om uiteenlopende redenen verwijderd uit, respectievelijk toegevoegd aan de onderwijsprogramma's, vastgelegd in examenprogramma's en leerplannen. Als gevolg hiervan kan worden gesproken van een *onderwijs-historische ontwikkeling* die niet alleen achter loopt op, maar ook afwijkt van een wetenschaps-historische ontwikkeling.

In het onderstaande bespreek ik een aantal aspecten van de onderwijshistorische ontwikkeling van chemisch evenwicht. Daarmee tracht ik de huidige positie van chemisch evenwicht in het voortgezet onderwijs vanuit een onderwijs-historisch perspectief te verklaren.

Ontwikkeling van 1910 tot 1968

De indeling van scheikundeleergangen voor HBS en gymnasium uit de eerste helft van deze eeuw werd doorgaans afgeleid uit het periodiek systeem: na een kort algemeen gedeelte volgde een reeks hoofdstukken waarin één of meer elementen en verbindingen daarvan ter sprake kwamen. Tenslotte volgde een organisch-chemisch gedeelte. In deze periode werd een hoofdstuk over chemisch evenwicht in een leergang opgenomen, nadat de bespreking van een zeker element hiertoe een bijzondere aanleiding had gegeven. Meestal waren voorbeelden van omkeerbare reacties en evenwichten reeds hiervoor (bij andere elementen) genoemd, en werden andere voorbeelden pas besproken bij elementen die later aan de orde kwamen.

Op deze versnipperde aanpak werd o.a. kritiek geuit door De Lange (1936), die het niet wenselijk vond een algemene behandeling van homogene evenwichten pas veel later te laten volgen door een bespreking van voorbeelden, zoals de ammoniaksynthese, waarbij kennis over zulke evenwichten wordt toegepast.

> "En het heterogeen chemisch evenwicht moet gewoonlijk nog maar wachten. Niet, omdat het speciale moeilijkheden heeft, maar omdat het "mooie" voorbeeld van de dissociatie van calciumcarbonaat tot de behandeling van metselkalk onder het element calcium moet wachten!"
> (De Lange, 1936, p.119)

De Lange was één van degenen die voor een indeling van het scheikundeonderwijs op basis van "gelijksoortige verschijnselen" in plaats van het periodiek systeem pleitten. Vanaf 1950 werden leergangen in toenemende mate geordend op basis van algemene onderwerpen, zoals 'zuur-base reacties' en 'chemische binding'.

Voor de behandeling van chemisch evenwicht had dit tot gevolg dat de genoemde versnippering verminderde. Voor wat betreft de *inhoud* van de behandeling waren de consequenties echter gering. Vanaf 1910 tot de invoering van de mammoetwet (1968) werd deze in leergangen namelijk gedomineerd door drie kenmerken, die ook waren opgenomen in de exameneisen voor HBS van 1932 tot 1968 (zie bijlage B):

- De zogenoemde *Wet van Guldberg en Waage*. Hieronder wordt verstaan een vergelijking ter beschrijving van evenwichtssamenstellingen *en* de afleiding ervan op basis van reactiesnelheidsvergelijkingen en de aanname dat in een evenwichtstoestand twee tegengestelde reacties met even grote snelheid plaatsvinden (§3.1). Voor een omkeerbare reactie $mA+nB \rightleftarrows qC+rD$ luidt deze vergelijking:

$$k/k' = [C]^q.[D]^r/[A]^m.[B]^n = K \qquad (5)$$

waarin *k* respectievelijk *k'* reactiesnelheidscoëfficiënten voor de twee tegengestelde reacties representeren[7]. In verband met de afleiding van vergelijking (5) werd chemisch evenwicht doorgaans voorafgegaan door een behandeling van reactiesnelheid.

- Het *principe van Le Chatelier-Van 't Hoff*, waarmee invloeden van verschillende factoren (temperatuur, druk, volume, stoftoevoer en -afvoer) op de 'ligging' van een chemisch evenwicht besproken werden[8]. In leergangen werden varianten van de formulering van Le Chatelier zelf beschreven (§3.1).
- Voorbeelden van evenwichtsreacties die van belang zijn in de analytische chemie (pH-berekeningen, neerslagen van zouten) en in de chemische industrie (bereiding van ammoniak, zwavelzuur, kalk, etc.). Op veel van deze voorbeelden werd het principe van Le Chatelier-Van 't Hoff toegepast.

Met name uit het eerste punt van deze opsomming blijkt dat aan de oproep van Cohen en (vooral) Enklaar tot voorzichtigheid geen gevolg is gegeven door auteurs van leergangen en opstellers van examenprogramma's. Met de 'Wet van Guldberg en Waage' is gekozen voor een kinetische behandeling, die in wetenschappelijk opzicht reeds lang bekritiseerd werd (zie bijvoorbeeld Van Laar, 1908). Vergelijking (5) vertoont weliswaar op het eerste gezicht veel overeenkomst met formule (4), maar wijkt er essentiëel van af. Het verschil in het linkerdeel hangt samen met de uitgangspunten die bij de afleidingen van beide vergelijkingen zijn gehanteerd: in leergangen werd hierbij geen gebruik gemaakt van de begrippen reactiemechanisme en elementaire reactie. In plaats daarvan werd (5) afgeleid door de omzetting volgens $mA+nB \rightleftarrows qC+rD$ in beide richtingen impliciet als elementaire reactie op te vatten. Dit is in het algemeen echter in strijd met experimentele kinetische gegevens (zie verder §8.4).

Ontwikkeling na 1968

Na de invoering van de mammoetwet is de wijze waarop chemisch evenwicht in leergangen besproken wordt, veranderd:

- Een kinetische afleiding van (5) is geleidelijk uit leergangen verdwenen en behoort ook niet langer tot de examenstof voor HAVO en VWO. Ik schrijf deze verandering toe aan de zojuist genoemde kritiek van wetenschappelijke aard die gedurende een lange periode op de bedoelde afleiding is geuit[9]. Het

---

[7]Deze afleiding hoort vanaf 1966 niet meer tot de examenstof. De hierin gehanteerde snelheidsvergelijkingen en de "evenwichtsconstante" (*K* uit (5)) bleven echter wel verplicht (zie bijlage B). Overigens lijkt de 'Wet van Guldberg en Waage' gebaseerd te zijn op een artikel van deze onderzoekers uit 1879, hoewel een vergelijking van het type (5) als zodanig hier niet in voorkomt (Guldberg & Waage, 1879).

[8]De aanduiding 'Principe van Le Chatelier-Van 't Hoff' wordt uitsluitend in het kader van Nederlands scheikunde-onderwijs gehanteerd. In buitenlandse leergangen en in wetenschappelijke literatuur is meestal sprake van het 'Principe van Le Chatelier' en soms van het 'Principe van Le Chatelier-Braun'. Zie Gold & Gold (1985).

[9]In Nederland o.a. door Brunt (1941), Peeters (1974) en Ludwig (1985). In Angelsaksische literatuur zijn artikelen van Frost (1941), Mysels (1956), Wright (1965), Ashmore (1965) en Harris (1982) vermeldenswaard.

rechterdeel van (5) is gebleven; ik duid deze vergelijking in het vervolg aan als *'concentratiebreuk=K'*. Hiernaast wordt het begrip 'dynamisch evenwicht' apart behandeld (zie §3.1). Een verbinding tussen 'concentratiebreuk=K' en dynamisch evenwicht is door het ontbreken van de genoemde afleiding echter afwezig.

- Een behandeling van invloeden van verschillende factoren op chemisch evenwicht is nog steeds gangbaar, maar hierbij wordt het principe van Le Chatelier-Van 't Hoff niet vaak meer gehanteerd. Dit principe hoort niet meer tot de examenstof voor HAVO en VWO. Deze verandering breng ik in verband met kritiek op de wijze waarop het principe doorgaans werd behandeld. Verschillende auteurs hebben aangetoond dat formuleringen in leergangen veelal onzorgvuldig waren en tot onjuiste conclusies konden leiden. Zij bepleiten de behandeling van een aantal aparte 'verschuivingsregels' in plaats van één algemeen principe[10].
- Toepassingen van chemisch evenwicht in de analytische chemie en in de chemische industrie zijn in de vigerende examenprogramma's voor HAVO en VWO opgenomen bij de onderwerpen 'zuren en basen' en 'industriële chemie'. Recente leergangen wijden aan beide onderwerpen meestal een apart hoofdstuk, bestemd voor 5-HAVO of 6-VWO.
- Een kwalitatieve omschrijving van chemisch evenwicht met behulp van de thermodynamische begrippen enthalpie en entropie komt steeds vaker voor in leergangen, met name in boeken voor 5- en 6-VWO. Deze begrippen worden eveneens gehanteerd in het kader van de genoemde 'verschuivingsregels'. Een kwalitatief verband tussen chemisch evenwicht en enthalpie en entropie wordt ook vermeld in het vigerende leerplan voor 5- en 6-VWO, maar hoort (nog) niet tot de examenstof voor VWO (zie bijlage B). Deze verandering weerspiegelt de opkomst van thermodynamica in het scheikunde-onderwijs op voortgezet niveau. Deze tendens wordt gevoed door artikelen, die vanaf 1950 zijn verschenen, waarin een grotere aandacht voor thermodynamica wordt bepleit[11].

De zojuist beschreven ontwikkeling heeft er toe geleid dat chemisch evenwicht in recente leergangen voor HAVO en VWO als volgt wordt behandeld:

- In boeken voor 4-HAVO en 4-VWO is een kwalitatieve behandeling van chemisch evenwicht in een kinetisch kader opgenomen. Hierbij staat het begrip dynamisch evenwicht centraal.

---

[10]Zie bijvoorbeeld De Heer (1957), Feis (1960), Mellon (1979), Treptow (1980), Allsop & George (1984), Gold & Gold (1985) en Schmidt (1987).

[11]In Nederland gaat het o.a. om artikelen van Bijvoet (1951), Van Dranen (1963), De Vos (1974 en 1981), Brants (1976) en Smith & Van Keulen (1977). Uit het grote aantal artikelen op dit gebied dat in buitenlandse tijdschriften is verschenen, vermeld ik MacWood & Verhoek (1961), Sanderson (1964), Strong & Halliwell (1970), Nash (1970), Ogborn (1974), Schmidt (1980) en David (1988). De artikelen van Nash, Smith & Van Keulen en David zijn toegespitst op een relatie tussen thermodynamica en chemisch evenwicht.

- De invoering van de relatie 'concentratiebreuk=K' vertoont geen samenhang met de kwalitatieve introductie van chemisch evenwicht en met het dynamisch karakter hiervan. De genoemde relatie wordt vooral toegepast in opgaven over zuren en basen (pH- en bufferberekeningen).
- Nu het principe van Le Chatelier-Van 't Hoff in onbruik is geraakt, varieert de plaats en de wijze waarop 'verschuivingsregels' worden besproken, van leergang tot leergang.
- In boeken voor 5- en 6-VWO wordt chemisch evenwicht in verband gebracht met enthalpie en entropie. De beschrijving is doorgaans van kwalitatieve aard en biedt als zodanig een alternatief voor de behandeling van dynamisch evenwicht in 4-VWO. Een verband hiermee wordt echter niet gelegd. Een bespreking van 'concentratiebreuk=K' in verband met enthalpie en entropie is evenmin gebruikelijk.

Hieruit blijkt dat de behandeling van chemisch evenwicht in het Nederlands voortgezet onderwijs vrijwel los is komen te staan van actuele wetenschappelijke inzichten omtrent dit begrip (§3.2). Zo beschouw ik de relatie 'concentratiebreuk=K' als een 'geamputeerde' wetenschappelijke formule. Een kwalitatieve beschrijving in termen van enthalpie en entropie is niet gangbaar in wetenschappelijke verhandelingen en heeft geen wetenschaps-historische achtergrond. Dit laatste geldt wel voor het begrip dynamisch evenwicht, dat volgens huidige kinetische inzichten echter vooral op elementaire reacties in een reactiemechanisme wordt toegepast, terwijl in het onderwijs reactiemechanismen in dit verband buiten beschouwing worden gelaten.

Met het bovenstaande wil ik niet suggereren dat wetenschappelijke 'correctheid' als norm voor het voortgezet onderwijs gehanteerd zou moeten worden (zie ook §1.2). Zelfs sluit ik niet uit dat een behandeling van 'concentratiebreuk=K' in dit onderwijs als voorbereiding kan dienen op de invoering van formules als (3) en (4) in hoger onderwijs. *Daarentegen wil ik aantonen dat de samenhang tussen verschillende kenmerken van chemisch evenwicht die in het voortgezet onderwijs aan de orde komen problematisch is geworden* (Zie ook De Vos & Verdonk, 1990, p.30). In de volgende paragraaf wil ik aan de hand van reeds verricht onderzoek nagaan welke onderwijsproblemen in verband met deze situatie worden beschreven.

3.4 Onderzoek naar onderwijs in chemisch evenwicht

Over chemisch evenwicht is in tijdschriften voor scheikunde-onderwijs en -didactiek veelvuldig gepubliceerd. Behalve artikelen waarin onderwijs over chemisch evenwicht vanuit een chemisch-wetenschappelijk gezichtspunt wordt besproken (enkele voorbeelden noemde ik in de vorige paragraaf), zijn met name in Angelsaksische literatuur ook artikelen verschenen waarin onderwijsproblemen en opvattingen van leerlingen op het gebied van chemisch evenwicht worden beschreven. Uit de artikelen blijkt dat in de betrokken landen de hiervoor genoemde aspecten van chemisch evenwicht in het onderwijs eveneens een rol spelen. *Tevens komt naar voren dat de gekozen inrichting van onderwijs problemen met betrekking tot zowel leerbaarheid als onderwijsbaarheid met zich meebrengt.*

Artikelen waarin melding wordt gemaakt van zulke problemen, verschijnen al vanaf de jaren '40. Zo schrijft Hildebrand (1946):

> "There seems to be no topic in freshman chemistry that presents more difficulties to students than chemical equilibrium. After trying for over 30 years to give clear answers to their questions, I have come to have a great deal of sympathy with them, realizing that the subject is inherently a difficult one." (Hildebrand, 1946, p.589)

In het vervolg van zijn artikel blijkt het vooral te gaan om problemen die optreden bij het berekenen van evenwichtsconcentraties (toepassing van 'concentratiebreuk=K'). Eerder had Adams (1940) ook al leer- en onderwijsproblemen op dit gebied beschreven.

In de jaren '70 verschenen de eerste onderzoeksverslagen waarin onderwijsproblemen betreffende chemisch evenwicht worden geïnventariseerd. Vanaf 1985 is het aantal artikelen hieromtrent vrij sterk gestegen. In alle gevallen zijn leerlingen of studenten na afloop van onderwijs over chemisch evenwicht ondervraagd (mondeling of schriftelijk) teneinde hun opvattingen en/of vaardigheden met betrekking tot dit onderwerp te onderzoeken (§2.4). Overigens zijn een aantal artikelen in de eerste plaats bedoeld om een zekere onderzoeksmethode of algemene (dat wil zeggen: niet-chemiedidactische) theorie te ontwikkelen, waarbij chemisch evenwicht bij wijze van voorbeeld-onderwerp is gekozen[12].

In het onderstaande beschrijf ik een aantal onderzoeksresultaten die in meerdere artikelen genoemd worden en die van betekenis kunnen zijn voor het Nederlandse scheikunde-onderwijs.

Statisch versus dynamisch evenwicht

De in onderwijs gepropageerde opvatting dat een chemisch evenwicht *dynamisch* is, dat wil zeggen dat twee tegengestelde reacties in een evenwichtstoestand met evengrote snelheid optreden, wordt dikwijls niet overgenomen door leerlingen. Zij blijken een chemisch evenwicht vaak te beschouwen als *statisch*, dat wil zeggen dat er 'niets meer gebeurt'. In dit verband wordt gewezen op de mogelijkheid dat leerlingen de term evenwicht associëren met andere, hen reeds bekende evenwichten (wip, balans; zie Gorodetsky & Gussarsky, 1986; Cohen, 1987; Maskill & Cachapuz, 1989 en Camacho & Good, 1989).

Evenwichtshoeveelheden van produkten en reactanten

Volgens Maskill en Cachapuz (1989) wordt een dynamisch evenwicht door leerlingen vaak als volgt geïnterpreteerd: 'beide reacties verlopen even snel, dus zijn hoeveelheden van produkten en reactanten in een evenwichtstoestand aan elkaar gelijk'. Een dergelijke opvatting ten aanzien van evenwichtshoeveelheden

---

[12]Bijvoorbeeld Sakmyser (1974), die prestaties van leerlingen die een 'inductieve cursus' hebben gevolgd, vergelijkt met die van leerlingen na afloop van een 'deductieve cursus'; Gorodetsky & Hoz (1985); Gussarksy & Gorodetsky (1988) en Maskill & Cachapuz (1989), waarin verschillende associatietesten worden vergeleken om inzicht te krijgen in de wijze waarop leerlingen chemische begrippen ordenen; Camacho & Good (1989) die heuristieken op het gebied van 'probleem-oplossen' onderzoeken.

kan ook het gevolg zijn van associatie met mechanische evenwichten, zoals dat op een balans (Gorodetsky & Gussarsky, 1986). Hackling en Garnett (1985) melden een soortgelijk resultaat. Zij vonden bovendien dat leerlingen evenwichtshoeveelheden uit reactiestoichiometrie afleidden: in het geval $2NO+Cl_2 \rightleftarrows 2NOCl$ beweerden veel leerlingen dat er in evenwicht evenveel NO als NOCl moet zijn.

Scheiding van links en rechts
Hackerman (1946) beschreef al dat veel leerlingen de neiging hebben om een chemisch evenwicht op te splitsen in twee 'zijden': een 'linker' en een 'rechter', die onafhankelijk van elkaar beïnvloed kunnen worden. Leerlingen achten het dan bijvoorbeeld mogelijk om slechts aan één zijde warmte toe te voeren. Johnstone et al. (1977) troffen een overeenkomstige opvatting aan in een onderzoek op basis van meerkeuzevragen. Zij noemen een aantal mogelijke oorzaken, zoals de behandeling in onderwijs van fysische analogieën ('water overbrengen tussen twee vaten') en/of verdelingsevenwichten van een opgeloste stof over twee oplosmiddelen, waarin daadwerkelijk sprake is van twee ruimtelijk gescheiden 'zijden'.

Het principe van Le Chatelier
Uit diverse onderzoeken is gebleken dat het toepassen van dit principe veel leerlingen voor grote problemen stelt. Camacho en Good (1989) vonden dat leerlingen in dit verband een voorkeur hebben voor moleculaire redeneringen die soms tot onjuiste conclusies leiden. Ook Wheeler en Kass (1978) en Cohen (1987) signaleren problemen op dit gebied. Sommige onderzoekers brengen deze problemen in verband met de wijze van behandeling van het principe (Johnstone et al., 1977; zie ook §3.3). Gorodetsky en Gussarksy (1986) merkten dat leerlingen het principe vaak uit het hoofd leren en het zonder begrip toepassen.

De beschreven onderzoeksresultaten hebben vooral betrekking op kwalitatieve beschouwingen omtrent chemisch evenwicht. Hierbij lijken associaties met fysische evenwichten opvattingen te bevorderen die binnen het scheikunde-onderwijs als ongewenst worden beschouwd. In deze onderzoeksverslagen worden geen problemen beschreven die ik kan interpreteren in verband met het door mij gesignaleerde gebrek aan interne samenhang in het onderwijsaanbod over chemisch evenwicht.

3.5 Consequenties voor mijn onderzoek

In §1.3 beschreef ik de wens om voortgang in de ontwikkeling van het begrip chemische reactie in het scheikunde-onderwijs ná 3-HAVO/VWO te onderzoeken. Ik stelde dat het onderwerp chemisch evenwicht in 4-HAVO/VWO hiertoe mogelijkheden biedt. Nu ik dit onderwerp geconcretiseerd heb, kan ik deze stelling verduidelijken.

Eerst wil ik nog wijzen op consequenties van enkele reeds genoemde uitgangspunten. In §1.3 heb ik de bestaande vakstructuur van het scheikunde-onderwijs als vertrekpunt voor mijn onderzoek gekozen. Via onderzoek volgens

een cyclisch schema wil ik voor het onderwerp chemisch evenwicht nagaan of het mogelijk is om, uitgaande van de bestaande vakstructuur, een didactische structuur te verkrijgen.

In dit verband past ook het in §2.3 beschreven streven naar 'inpasbaarheid': bij het ontwerpen van onderwijsmateriaal houd ik rekening met inhoud en randvoorwaarden van vigerende leerplannen en examenprogramma's. Dit betreft niet alleen het onderwerp chemisch evenwicht, maar ook hiermee samenhangende onderwerpen die in het onderwijs hiervoor en hierna aan de orde komen.

Deze uitgangspunten geven aan dat het onderzoek naar een didactische structuur plaatsvindt in een spanningsveld tussen enerzijds de grenzen die door bestaande onderwijsprogramma's worden gesteld en anderzijds de ruimte die nodig kan zijn om begrippen te ontwikkelen op een manier waarbij leren en onderwijzen op elkaar betrokken zijn.

Het bovenstaande impliceert dat er ten aanzien van inhoud en omvang van de op te stellen didactische structuur beslissingen vooraf moeten worden genomen, die in aan de leerplannen ontleende termen geformuleerd worden. *De didactische structuur in dit onderzoek zal betrekking hebben op de invoering van een kwalitatief begrip chemisch evenwicht in een kinetisch kader in 4-HAVO/VWO, waarbij het begrip dynamisch evenwicht een belangrijke rol speelt.*

Dit betekent dat kwantitatieve aspecten van chemisch evenwicht (formules zoals (3), (4) en 'concentratiebreuk=K') en een verband van dit begrip met enthalpie en entropie in het onderzoek, voor zover dit betrekking heeft op onderwijssituaties, buiten beschouwing zullen blijven. Deze aspecten ontbreken dan ook in de door mij op te stellen didactische structuur. Niettemin zal ik, naar aanleiding van mijn onderzoek, op deze aspecten in hoofdstuk 8 nader ingaan. Ik ben me er echter van bewust dat door deze keuze het reeds geconstateerde gebrek aan samenhang in het bestaande onderwijsaanbod over chemisch evenwicht (§3.3) door mijn onderzoek niet kan worden opgelost.

Uit een analyse van recente leergangen en vigerende leerplannen voor 3- en 4-HAVO/VWO blijkt dat verschillende aspecten van het begrip chemische reactie aan de orde komen, voordat het onderwerp chemisch evenwicht behandeld wordt. De ontwikkeling van het reactiebegrip in 3-HAVO/VWO is o.a. door De Vos bestudeerd. Deze geeft een overzicht van de betrokken aspecten van het reactiebegrip (zie De Vos, 1985, p.36-38 en 66-67). De introductie van chemisch evenwicht in het genoemde kinetische kader vergt een voortgang in de ontwikkeling van enkele van deze aspecten. Ik noem een drietal met name:

- Het gezichtspunt dat een chemische omzetting in principe weliswaar ongedaan gemaakt kan worden, maar dat hiervoor bijzondere maatregelen nodig zijn, past niet bij het begrip *omkeerbare* reactie dat in verband met chemisch evenwicht moet worden ingevoerd (zie verder §4.1);
- De regel dat tenminste één van de reactanten bij chemische reacties in principe volledig verdwijnt, geldt niet bij chemisch evenwicht. De *onvolledigheid* van chemische omzettingen moet dus aanvaardbaar worden gemaakt. In samenhang hiermee is een ontwikkeling van het begrip overmaat en eventueel van het identieke karakter van corpuscula van dezelfde soort aan de orde (zie verder §5.1);

- De mogelijkheid om het optreden van een chemische reactie te herkennen aan zekere waarnemingen (te interpreteren in verband met stofomzettingen) is niet van toepassing op de twee tegengestelde reacties die in een *dynamisch* evenwicht verondersteld worden op te treden (zie verder §6.1).

Hoewel leerlingen chemische reacties in hun leefwereld mogelijk kunnen aanwijzen, zal hen hierbij niet opvallen dat deze reacties onder zekere omstandigheden onvolledig en omkeerbaar zijn. Toch kunnen concrete ervaringen met chemische reacties een belangrijke rol spelen bij de ontwikkeling van deze aspecten (zie ook §3.1). Hiervoor zijn dan scheikunde-proeven nodig die conform mijn standpunt in §2.1, door leerlingen, zelfstandig werkend in groepsverband, uitgevoerd worden. Om deze reden blijven voorbeelden uit de chemische industrie in eerste instantie buiten beschouwing. Ik zoek dus naar proeven waarbij chemische reacties *omkeerbaar* en *onvolledig* optreden onder omstandigheden, die in een scheikundeles voor 4-HAVO/VWO gerealiseerd kunnen worden. In het onderzoek ga ik na welke ervaringen en argumentaties van leerlingen en docenten kunnen bijdragen tot produktiviteit ten aanzien van de genoemde aspecten, en welke kunnen leiden tot blokkades.

De *dynamische evenwichtshypothese* kan niet rechtstreeks op proeven worden gebaseerd. Deze hypothese vergt een reactiebegrip dat niet is verbonden met waarnemingen. Corpusculaire voorstellingen kunnen hierbij een rol spelen. Op voorhand is voor mij echter onduidelijk op basis van welke argumentaties en ervaringen leerlingen deze hypothese kunnen invoeren. Hier ligt een vraag die ik via het onderzoek wil beantwoorden.

Met het bovenstaande geef ik een eerste aanzet voor het ontwerpen van onderwijsmateriaal, dat kan functioneren binnen het gekozen onderzoeksdoel. Van belang hierbij is dat een voortgang in de ontwikkeling van het begrip chemische reactie in het onderzoek centraal staat. Deze keuze impliceert o.a. dat proeven met fysische evenwichten (zoals mechanische en verdelingsevenwichten) en simulatieproeven niet in aanmerking komen. Zulke proeven lijken bovendien een negatieve invloed op begripsontwikkeling ten aanzien van chemisch evenwicht te kunnen hebben (statisch; evenveel produkten als reactanten, links-rechtsscheiding; zie §3.4).

Het begrip chemisch evenwicht speelt, in tegenstelling tot andere evenwichtsbegrippen, geen rol in de leefwereld van leerlingen. Het woord evenwicht zal associaties met reeds bekende evenwichten oproepen. Dit kan tot ongewenste situaties leiden. Om dit te voorkomen, wil ik in het te ontwerpen onderwijs chemisch evenwicht *als term* pas invoeren, nadat de drie aspecten *omkeerbaarheid, onvolledigheid* en *niet-waarneembaarheid* van chemische reacties aan de orde zijn geweest.

Het vervolg van dit proefschrift is als volgt opgezet. In ieder van de hoofdstukken 4 t/m 6 staat één van de drie zojuist genoemde aspecten van het reactiebegrip centraal. Daarbij benader ik ieder aspect vanuit verschillende gezichtspunten. Eerst beschrijf ik wetenschaps- en onderwijs-historische ontwikkelingen. Vervolgens ga ik in op de wijze waarop een aspect in de verschillende versies van het door mij ontworpen onderwijsmateriaal (zowel leerlingentekst als nascholingscursus) aan de orde is gesteld. Aansluitend beschrijf ik erva-

ringen met dit materiaal. In ieder hoofdstuk probeer ik te komen tot een overzicht van argumentaties en ervaringen die van belang zijn in verband met produktiviteit of blokkades in ontwikkelingen ten aanzien van het betreffende aspect. Tevens tracht ik relaties met andere aspecten vast te stellen.

In hoofdstuk 7 beschrijf ik mogelijkheden om de genoemde aspecten van het reactiebegrip *toe te passen* op zekere kenmerken van chemisch evenwicht ('stabiliteit'; zie verder §7.1). Daarbij gaat het enerzijds om de vraag in hoeverre deze aspecten van het reactiebegrip kunnen worden benut bij een voortgang in de ontwikkeling van het evenwichtsbegrip. Anderzijds wil ik nagaan in hoeverre de ontwikkeling van de genoemde aspecten kan worden ondersteund en/of verstevigd door deze in het vervolg van het onderwijs op bepaalde zaken toe te passen.

In hoofdstuk 8 beschrijf ik een didactische structuur van chemisch evenwicht op basis van het onderzoek dat in de hoofdstukken 4 t/m 7 is beschreven. Bovendien formuleer ik conclusies met betrekking tot de bestaande vakstructuur en de vigerende leerplannen en examenprogramma's, voor zover deze betrekking hebben op chemisch evenwicht. Alternatieven voor een kwalitatieve invoering van chemisch evenwicht komen aan de orde, evenals kwantitatieve aspecten van chemisch evenwicht in het kader van zowel reactiekinetiek als thermodynamica. Voorstellen voor onderwijs en didactisch onderzoek worden besproken.

Hoofdstuk 9 tenslotte bevat een nabeschouwing van het onderzoek op een meer algemeen niveau. Hierbij kom ik terug op een aantal uitgangspunten van het onderzoek, die in de hoofdstukken 1 en 2 zijn beschreven.

hoofdstuk 4

Omkeerbaarheid van chemische reacties

In dit hoofdstuk worden ontwikkelingen besproken van een chemisch reactiebegrip, dat slechts één reactierichting toelaat, naar een begrip 'omkeerbare reactie'. De term richting kan op twee manieren worden geïnterpreteerd: reactanten A en B kunnen soms, afhankelijk van de reactieomstandigheden, in *verschillende* produkten worden omgezet (bijvoorbeeld in C of in D) In dat geval heeft 'richting' betrekking op de stof die gevormd wordt. Ook kan een omzetting in de *omgekeerde* richting verlopen: uit C ontstaat dan weer A en B. Hier gaat het om processen van dit laatste type, waarbij 'richting' dus betrekking heeft op een omzetting van een set reactanten in een set produkten en vice versa.

4.1 Inleiding: reacties in één richting

Voorafgaand onderwijs

Chemische reacties worden in het Nederlandse scheikunde-onderwijs geïntroduceerd als processen waarbij de oorspronkelijke stoffen verdwijnen en geheel nieuwe stoffen ontstaan. Om vast te kunnen stellen of een proces een chemische reactie is, moet men dus stoffen van elkaar kunnen onderscheiden.

In schoolboeken voor 3-HAVO/VWO zijn proeven opgenomen over het herkennen van chemische reacties. Door de stof(fen) voor en na de proef te vergelijken, moeten leerlingen kunnen beslissen of er sprake is geweest van een chemische reactie. In sommige boeken[1] wordt in dit kader de verhitting van een platinadraadje in een gasvlam beschreven. Het draadje neemt een rode kleur aan, die verdwijnt nadat het uit de vlam is genomen. Aangezien het draadje na afkoeling hetzelfde uiterlijk heeft als voor de verhitting, heeft hier volgens deze boeken geen chemische reactie plaatsgevonden. De constatering dat een verandering tijdelijk en omkeerbaar is, betekent hier dus dat er *geen* sprake van een chemische reactie is geweest.

Ook in andere schoolboeken wordt gewezen op het onomkeerbare karakter van de chemische verandering. G& noemen de verdamping van water een natuurkundig verschijnsel, omdat de waterdamp weer kan condenseren, terwijl het verbranden van papier een chemische reactie heet, want "je krijgt dat papier niet terug"[2]. K&M stellen in dit verband:

---

[1]C (1983, 3HV, p.34) en R&F (1984, 3HV, p.123). Hierin gebruik ik 'C' resp. 'R&F' als codes voor leergangen. Ook in het vervolg hanteer ik zulke codes. De meeste zijn afgeleid van de namen van de auteur(s). Een overzicht van de betekenis van alle gebruikte codes staat in bijlage C. Verder betekent '3HV' dat het om een boek voor 3-HAVO/VWO gaat, '4H' voor 4-HAVO, '4V' voor 4-VWO, etc.

[2]G& (1984, 3HV, p.19-20).

4.2 Op weg naar omkeerbare reacties

Wetenschaps-historische ontwikkeling
In §3.1 heb ik vermeld dat Bergman omstreeks 1780 affiniteitenvolgordes afleidde uit verdringingsreacties. Hij redeneerde dat wanneer een stof C met een stof AB reageerde onder vorming van AC en B, A en C een grotere affiniteit voor elkaar moesten hebben dan voor B. Een consequentie hiervan is dat B onder de gegeven omstandigheden (bijvoorbeeld in oplossing en bij gewone temperatuur) niet met AC kan reageren tot AB en C. Het was echter niet uitgesloten dat B bij verhoogde temperatuur wel met AC zou kunnen reageren tot AB en C[5]. Daarmee omvatte het reactiebegrip van Bergman een zekere vorm van omkeerbaarheid.

In §3.1 vermeldde ik ook dat Berthollet omstreeks 1800 de omkeerbaarheid van chemische reacties onder invloed van stofhoeveelheden experimenteel aantoonde voor reacties tussen zuren en basen in oplossing. Rond 1860 werd vastgesteld dat de richting van sommige omzettingen (m.n. dissociaties in de gasfase) door temperatuurvariatie kan worden omgekeerd. Dat wil zeggen dat indien een omzetting van AB in A en B optreedt onder invloed van temperatuurverhoging van T_1 tot T_2, temperatuurverlaging van T_2 tot T_1 leidt tot vorming van AB uit A en B.

Bij de wetenschaps-historische ontwikkeling van het begrip omkeerbare reactie is experimenteel onderzoek naar de invloeden van stofhoeveelheden en temperatuur op het optreden van chemische reacties dus van belang geweest. Voor onderwijs waarin chemische reacties aanvankelijk als 'éénrichtingsprocessen' worden voorgesteld, roept dit de gedachte op dat proeven, waarbij de richting van een chemische reactie omgekeerd wordt door variatie van stofhoeveelheden en/of temperatuur, een belangrijke rol zouden kunnen spelen bij de invoering van het begrip omkeerbare reactie.

Leergangen
In alle recente leergangen zijn omkeerbare reacties en chemisch evenwicht kort na elkaar in één hoofdstuk geplaatst. Zo'n hoofdstuk is, in overeenstemming met de leerplannen (zie bijlage B), opgenomen in boeken voor 4-HAVO en 4-VWO. Zoals uit de vorige paragraaf bleek, komen eerder reeds enkele voorbeelden aan de orde waarbij chemische omzettingen ongedaan gemaakt worden.

De bespreking van omkeerbare reacties wordt steevast ingeleid met de hiervoor genoemde vorming en ontleding van water. Hierover wordt in G& bijvoorbeeld opgemerkt:

> "De twee processen verlopen bij deze proeven echter onder zeer verschillende omstandigheden: de vorming van water is weliswaar omkeerbaar, maar onder de gebruikte omstandigheden verloopt de tegengestelde reactie niet." (G&, 1985, 4V, p.185)

[5]In dezelfde periode heeft Elliot aangetoond dat ook de aard van het oplosmiddel in dit verband van belang kan zijn: soms kan een omzetting die niet optreedt in waterig milieu wel plaatsvinden in een alcoholische oplossing (Ostwald, 1902, p.28).

4 C. 't Knalgasevenwicht, wordt op een gegeven moment natuurlijk wel ingesteld. Dan is 't een omkeerbare reactie.
5 A. Een knalgasevenwicht, maar dan praat je over 1500 graden.
6 C. Maar niet, elektrolyse is niet het omgekeerde van de knalgasreactie.
7 A. Want je krijgt ook, als je waterstof en zuurstof bij elkaar doet, dan krijg je geen water. Als je gewoon water hebt, dan krijg je niet zomaar waterstofgas en zuurstofgas.
8 B. Is dat zo?
9 C. Ja, je kan thermodynamisch, ze hebben wel eens uitgerekend wat de waterstofgasconcentratie is boven de stille oceaan, dat kan je doen.
10 J.v.D. Ja, thermodynamisch kan 't, komt er iets uit... Maar zou je dat proefje, elektrolyse gekoppeld aan verbranding, ik neem aan dat je voor leerlingen niet...
11 A. Niet omkeerbaar (...)
12 D. Het begrip omkeerbare reactie is natuurlijk weer tweeërlei opvattingen: of onder dezelfde omstandigheden zoals dit; of water/knalgas. *Kun je in principe reacties omkeren?* zou je kunnen zeggen. Ja, in principe kan 't. Misschien niet bij allemaal, maar in vele gevallen wel.

C. (in 6) en A. (in 11) geven aan dat zij de term omkeerbaar niet geschikt vinden voor de combinatie 'elektrolyse/verbranding'. Daarentegen wordt het zogenoemde "knalgasevenwicht" wel beschouwd als een omkeerbare reactie (zie C. in 4). Op dit "knalgasevenwicht" kom ik hieronder terug. Uiteindelijk formuleert D. in 12 een onderscheid tussen twee soorten omkeerbaarheid: bij de eerste horen "dezelfde omstandigheden" en de tweede betreft een principemogelijkheid, waarbij de omstandigheden niet gespecificeerd worden.

Kringloopreacties en omkeerbare reacties

Zowel schoolboekauteurs als docenten blijken dus de neiging te hebben om een onderscheid te maken tussen (tenminste) twee vormen van omkeerbaarheid. Hierbij hanteren zij steeds de term omstandigheden.

Een dergelijk onderscheid is van belang in verband met chemisch evenwicht, hetgeen ook in procotol 4.I naar voren komt: de combinatie elektrolyse/verbranding werd geen omkeerbare reactie genoemd, in tegenstelling tot de aanduiding "knalgas*evenwicht*". In het onderstaande zal ik trachten beide vormen van omkeerbaarheid nader te onderscheiden. Dit onderscheid is van belang omdat slechts één van beide vormen kan leiden tot de instelling van een toestand van chemisch evenwicht.

In §4.1 vermeldde ik dat de combinatie elektrolyse/verbranding in scheikundeleergangen één van de eerste voorbeelden is van een chemische omzetting die ongedaan gemaakt wordt. De ontleding van water door elektrolyse kan worden weergegeven met de vergelijking:

$$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2 \qquad (1a)$$

Voor de vorming van water (door verbranding van waterstof) geldt dan:

systeemvariabele (bijvoorbeeld temperatuur of volume) of door toevoegingen (concentratieveranderingen)[10]. Na de invoering van omkeerbare chemische reacties is de in schoolboeken gepropageerde mogelijkheid om chemische en fysische verschijnselen van elkaar te onderscheiden op grond van het criterium niet respectievelijk wel omkeerbaar, komen te vervallen.

4.3 Omkeerbaarheid door temperatuurvariatie

Opzet leerlingentekst (eerste versie)[11]

In de leerlingentekst heb ik chemisch evenwicht steeds laten voorafgaan door voorbeelden van omkeerbare reacties. Hiertoe waren o.a. leerlingenproeven met oplossingen van cobalt-complexen opgenomen[12].

In de eerste versie verwarmden de leerlingen een reageerbuis met een rose oplossing (van 'robalaat' in iso-propanol) met behulp van een waterbad van kamertemperatuur tot 85°C. Het ontstaan van een blauwe oplossing werd in de leerlingentekst geïnterpreteerd als het gevolg van een chemische reactie, waarbij robalaat ontleedt in 'blauwbaliet' (dat de blauwe kleur veroorzaakt) en water. Ik verwachtte dat de mededeling dat hier sprake is van een chemische reactie bij leerlingen niet op weerstand zou stuiten: kleurveranderingen worden in het voorafgaand onderwijs doorgaans met chemische reacties verbonden[13].

Hierna werden verschillende vragen gesteld. Eén ervan luidde:

> "Wat denken jullie dat er met de kleur van de oplossing zal gebeuren als we de reageerbuis afkoelen tot kamertemperatuur? Licht je antwoord toe."

De bedoeling van deze vraag was om de leerlingen een verwachting te laten uitspreken over een hierna uit te voeren proef, waarbij zij de blauwe oplossing inderdaad zouden afkoelen. Op grond van het preconceptie-onderzoek verwachtte ik dat de meeste leerlingen zouden voorspellen dat de kleur hierbij niet verandert. Dat een thermische ontleding bij deze proef omgekeerd kan worden door de temperatuur te verlagen, zou vanuit deze verwachting bij de leerlingen verbazing kunnen wekken.

Afkoeling van de blauwe oplossing tot kamertemperatuur resulteerde in een kleurverandering van blauw in rose. Dit resultaat zou een bijdrage moeten

---

[10]In §6.2 wordt het onderscheid tussen kringloopreacties en omkeerbare reacties in verband met chemisch evenwicht verder uitgewerkt. Ook in de literatuur worden overigens wel twee vormen van omkeerbaarheid beschreven. Zo onderscheidt Arndt één vorm waarbij beide reacties ruimtelijk gescheiden en volledig plaatsvinden en één waarin beide reacties onder dezelfde omstandigheden in een gesloten reactievat optreden. Deze laatste vorm verbindt zij met het begrip chemisch evenwicht (Arndt, 1988, p.289).

[11]In bijlage A wordt een inhoudelijk overzicht van de drie versies van de leerlingentekst gegeven.

[12]Argumenten voor deze keuze en een beschrijving van de wijze waarop deze proeven werden gepresenteerd, worden gegeven in Mertens et al. (1987). Chemische achtergronden worden o.a. besproken door Spears Jr. & Spears (1984).

[13]Dit kan overigens tot ongewenste schematiseringen leiden: niet iedere kleurverandering duidt immers op een chemische reactie en niet iedere chemische reactie gaat met een kleurverandering gepaard.

De door mij verwachte verbazing omtrent het effect van temperatuurverlaging op de kleur blijft in dit gesprek aanvankelijk uit. Inge geeft in 7 aan dat ze dit effect al hadden waargenomen. In 8 doe ik een poging om alsnog verbazing te induceren. Hierop ontstaat een discussie die m.i. handelt over de vraag of hier van een fysisch of een chemisch proces sprake is. Mijn verwijzing naar de leerlingentekst (18) wordt door joop opgevat zoals bedoeld. De laatste lijkt inge met zijn opmerking in 19 te overtuigen (20). Tenslotte formuleert joop in 21 een verklaring voor de omkeerbaarheid. Hierbij maakt hij gebruik van noties van snelheid en binding van 'deeltjes' ("ze"). Gezien het stadium van het onderwijs beschouw ik deze verklaring als "een hele goeie" (23).

Ik had met deze opzet de opvatting dat chemische reacties leiden tot veranderingen, die niet eenvoudig ongedaan gemaakt kunnen worden, ter discussie willen stellen. Door de betrokken proeven als fysische verschijnselen op te vatten, kan een dergelijke discussie worden vermeden en wordt de beoogde ontwikkeling van het begrip omkeerbare reactie geblokkeerd. Voor inge, die slechts op de omkeerbaarheid lette, verviel daarmee het onderscheid tussen chemische reacties en fase-overgangen (§4.2). Dit onderscheid moet dan gebaseerd worden op een ander criterium, namelijk het ontstaan van een nieuwe stof. In deze groep bleek het, in tegenstelling tot mijn verwachting, *niet* vanzelfsprekend om de kleurveranderingen als stofomzettingen te interpreteren. Samengevat: het kenmerk omkeerbaarheid werd als zodanig wel herkend, maar het begrip omkeerbare reactie werd nog niet ontwikkeld.

Op de vraag naar een schema voor de reactie die optrad tijdens het afkoelen formuleerden vrijwel alle groepen een schema dat omgekeerd was aan het schema dat zij eerder voor de reactie tijdens het verwarmen hadden opgesteld. Ook bij andere vragen gaven de meeste groepen de beoogde antwoorden, waaruit ik concludeer dat zij de proeven op dat moment interpreteerden als het telkens opnieuw ontstaan en verdwijnen van steeds dezelfde stoffen.

4.4 Omkeerbaarheid door toevoegingen

Opzet leerlingentekst (tweede en derde versie)

De ongewenste associatie met fase-overgangen vormde een motief om de keuze voor temperatuurvariatie te herzien. In de tweede en de derde versie van de leerlingentekst heb ik de omkeerbaarheid van een chemische reactie geïntroduceerd door een proef waarbij toevoeging van verschillende reagentia bij kamertemperatuur leidde tot omkeerbare en herhaalbare veranderingen.

In de tweede versie voegden leerlingen water toe aan een blauwe oplossing (van 'blauwbaliet' in iso-propanol), waardoor een kleurverandering van blauw naar rose optrad. Deze rose kleur werd in de tekst in verband gebracht met het ontstaan van 'robalaat'. Hierna voegden zij aan de verkregen rose oplossing een oplossing met chloride-ionen toe[14]. Deze kleurde hierdoor blauw.

[14]Het ging hierbij om een oplossing van calciumchloride in iso-propanol. De betrokkenheid van chloride-ionen bij deze omkeerbare reactie was in de eerste versie niet bij de proeven naar voren gekomen en om die reden ook niet vermeld in de leerlingentekst.

onderzoeksbelangstelling betrof vooral de argumentatie van leerlingen, ook indien zij niet tot het opnemen van de genoemde stoffen zouden overgaan.

In de tweede versie vroeg ik tenslotte of er bij de uitgevoerde proeven gesproken kan worden van een 'omkeerbare reactie' (zonder een omschrijving van deze term mee te delen). Hierna werd dezelfde vraag gesteld over "de elektrolyse van water". De bedoeling van deze vragen was om na te gaan welke criteria leerlingen met betrekking tot omkeerbare reacties hanteren: letten zij daarbij slechts op reactieschema's, of spelen voor hen reactieomstandigheden eveneens een rol? Overigens is verder nooit verwezen naar (voorbeelden van) kringloopreacties. In de derde versie ontbraken de hier genoemde vragen.

Ervaringen

Naar aanleiding van de vraag in de tweede versie of de blauwe kleur steeds op dezelfde stof (blauwbaliet) betrekking heeft, ontstond in veel groepen discussie. In één van deze groepen hadden de leerlingen tijdens hun discussie een blauwe oplossing voor zich staan, welke was verkregen door water toe te voegen aan een blauwbalietoplossing en hieraan vervolgens een calciumchloride-oplossing toe te voegen:

protocol 4.III

1	anna	Nee ik denk dat 't een andere, want 't is ook een andere kleur.
2	joke	D'r zit misschien minder van dat blauw geval in.
3	tini	't Is een andere stof, want 't is een andere...
4	anna	't Is natuurlijk een andere kleur, maar dat kan omdat er water bij zit.
5	joke	't Was blauwbaliet, toen deden we d'r water bij, toen werd 't rose en nou krijg je 't weer terug. *[stilte]*
6	joke	Ja, want we denken dat 't blauwbaliet teruggekomen is.
7	tini	Hoe kan 't nou teruggekomen zijn? Gaat dat heen en weer of zo?
8	joke	Jij gaat toch ook weg en dan kom je toch ook weer terug?
9	tini	Ja, maar ik heb poten, dat dingetje niet.
10	mia	Ja, want we denken dat door de toevoeging van calciumchloride-oplossing de blauwbaliet terugkomt, en gooi je d'r weer water bij dan gaat 't weg en gooi je d'r dan weer calciumchloride bij dan komt 't weer terug.

In 4 lijkt anna op een verdunningseffect te wijzen. In 5 en 6 gebruikt joke voor het eerst het woord 'terug'. Dit stuit bij tini op weerstand: het lijkt of het verdwijnen van stoffen bij een reactie voor haar definitief is. Het argument van joke in 8 overtuigt haar niet, waarna mia's *voorspelling* in 10 de discussie voorlopig afrondt. Na dit standpunt als antwoord te hebben opgeschreven, voerden de leerlingen de volgende opdracht in de tekst uit, waarbij zij een hoeveelheid water toevoegden aan de blauwe oplossing. Mia reageerde als volgt:

Op de vraag in de tweede versie of er bij de robalaatproeven gesproken kan worden van een omkeerbare reactie antwoordde het merendeel van de groepen bevestigend. In hun toelichting verwezen veel groepen naar de twee *reacties* ("het reageert in twee richtingen") of naar de hierbij horende *schema's*. Daarnaast baseerde een groot aantal groepen hun argumentatie op de *herhaalbaarheid van de stofomzettingen of van de kleurveranderingen*. Voorbeelden van zulke antwoorden zijn:

"Je kunt steeds blauwbaliet terugkrijgen."

"Want we hebben het vele keren rose en blauw gehad."

Deze antwoorden vertonen overeenkomsten met de argumentatie van mia in protocol 4.III.

Er waren echter ook enkele groepen die de term omkeerbare reactie in dit verband afwezen. Hun toelichtingen luidden bijvoorbeeld:

"Want er moet nog een stof toegevoegd worden."

"Want het is gedwongen."

In deze groepen wordt omkeerbaarheid dus gekoppeld aan een *spontane* omkering en niet aan de potentie die in dit woord (omkeer*baar)* wordt uitgedrukt.

Ten aanzien van de elektrolyse van water waren de meningen verdeeld. Ongeveer de helft van de groepen koos voor omkeerbaar en verwees naar de mogelijkheid om water terug te vormen uit waterstof en zuurstof. De andere helft antwoordde negatief en motiveerde dit bijvoorbeeld door te stellen:

"Door elektrolyse kun je uit waterstof en zuurstof geen zuurstof laten ontstaan."

Hieruit blijkt dat de term omkeerbare reactie ook voor leerlingen verschillende betekenissen kan hebben. In vergelijking met de beschrijving in §4.2 komt hier bovendien de zienswijze naar voren dat slechts bij een spontane omkering sprake is van een omkeerbare reactie.

4.5 Discussie en conclusies

In het onderwijs worden chemische reacties aanvankelijk als blijvende, niet-omkeerbare veranderingen voorgesteld en ook als zodanig door leerlingen opgevat. Later worden manieren besproken om chemische omzettingen ongedaan te maken. Hierbij spelen verschillende aspecten een rol, te weten handelingen, waarnemingen, stoffen, reactieschema's en variabelen. Herhaalbare combinaties van handelingen en waarnemingen kunnen worden verbonden met het verdwijnen en ontstaan van telkens dezelfde stoffen, hetgeen kan worden weergegeven in twee tegengestelde reactieschema's.

Het voorgaande is van toepassing op twee vormen van omkeerbaarheid, waarvoor in §4.2 de termen *kringloopreactie* en *omkeerbare reactie* zijn ingevoerd. Om beide vormen te kunnen onderscheiden is het inzicht nodig dat in het geval van omkeerbare reacties slechts één variabele (bijvoorbeeld temperatuur of concentratie) verantwoordelijk is voor de omkering in beide richtingen.

Dit onderscheid is in scheikundeleergangen niet aangetroffen. Daarentegen wordt hierin de term omkeerbare reactie gehanteerd, zonder dat de betekenis hiervan gespecificeerd is (§4.2). Het verdient echter aanbeveling om dit onderscheid in onderwijs naar voren te laten komen. Daartoe kunnen proeven dienen waarbij omzettingen van de vorm reactanten→produkten en produkten→reactanten zowel via een kringloopprocédé als via de variatie van één systeemvariabele (of door toevoegingen) optreden.

De keuze om slechts in het laatste geval de term omkeerbare reactie te gebruiken, is betrekkelijk willekeurig en moet dus als een conventie aan leerlingen worden onderwezen. Bij het gebruik van deze term in onderwijs moet tevens rekening worden gehouden met de mogelijkheid dat leerlingen deze associëren met een *spontane* omkering van een chemische omzetting.

Omkeerbare reacties kunnen zowel via temperatuurvariatie als via toevoegingen van reagentia worden geïntroduceerd. In de eerste versie van de leerlingentekst is gekozen voor de eerste mogelijkheid. De verwachting was dat deze omkeerbaarheid bij leerlingen tot verbazing zou leiden, die vervolgens produktief gemaakt zou kunnen worden ten behoeve van begripsontwikkeling (§2.1). In de praktijk toonden leerlingen zich echter niet altijd verbaasd doordat de omkeerbaarheid door variatie van temperatuur bij velen de indruk wekte dat het bij de uitgevoerde proeven om fase-overgangen ging. Hierdoor konden zij chemische reacties als niet-omkeerbaar blijven beschouwen. Dit is in overeenstemming met de in §2.1 beschreven neiging die lerenden in het algemeen vertonen om ervaringen die in tegenspraak lijken met bestaande opvattingen, zo te interpreteren dat deze tegenspraak ontweken wordt. Hierdoor hoeven deze opvattingen niet aangepast te worden en wordt begripsontwikkeling geblokkeerd.

In latere versies van de leerlingentekst is de omkeerbaarheid van een chemische reactie aan de orde gesteld via toevoegingen van reagentia[17]. Hierbij bleek de associatie met fase-overgangen voor leerlingen geen rol meer te spelen: het gegeven dat veranderingen door *toevoegingen* teweeg worden gebracht, sluit voor hen deze associatie kennelijk uit. In de nieuwe opzet werden kleurveranderingen door leerlingen doorgaans geïnterpreteerd als chemische reacties, hetgeen de ontwikkeling van een begrip omkeerbare reactie bevorderde. De *herhaalbaarheid* van de kleurveranderingen leek hierbij een belangrijke rol te spelen.

Dat bij een omkeerbare reactie de produkten van de omzetting in de ene richting tevens de reactanten van de omzetting in de tegengestelde richting zijn en omgekeerd, komt tot uiting in schema's voor de beide omzettingen: deze zijn elkaars omgekeerde. In het geval van temperatuurvariatie stelden de meeste leerlingen inderdaad zulke schema's op. In het geval van toevoegingen werden omgekeerde schema's door veel leerlingen afgewezen. Zij maakten vooral bezwaren tegen het ontstaan bij een reactie van een bepaalde combinatie van produkten, omdat juist deze combinatie volgens hun verwachting merkbaar zou

[17]In §7.4 wordt deze beslissing ook op andere gronden gemotiveerd. Overigens waren proeven met temperatuurvariatie in de tweede versie nog wel opgenomen, maar nadat de omkeerbaarheid onder invloed van toevoegingen bestudeerd was (zie bijlage A).

moeten reageren, hetgeen bij de heersende omstandigheden echter niet het geval was.

Dat deze bezwaren niet gemaakt werden bij temperatuurvariatie, kan ik als volgt verklaren. Eén omzetting treedt dan slechts merkbaar op bij verhoging van temperatuur en de tegengestelde omzetting alleen bij verlaging hiervan. Indien bij de ene omzetting produkten ontstaan, die als reactanten voor de andere omzetting dienen, is voor leerlingen nog niet voldaan aan de voorwaarden voor het optreden van die andere omzetting. Daarvoor zou in hun ogen bovendien temperatuurverlaging nodig zijn.

De ervaring dat omgekeerde schema's in het geval van toevoegingen door leerlingen werden afgewezen, heeft voor mij een samenhang tussen de begrippen omkeerbare reactie en dynamisch evenwicht duidelijk gemaakt (§4.4). Deze samenhang zou in onderwijs voor leerlingen kunnen ontstaan indien vragen worden gesteld over een (gegeven en volledig) schema voor een omkeerbare reactie. Dit illustreer ik aan de hand van de schema's blauwbaliet+water→robalaat+chloride en robalaat+chloride→blauwbaliet+water. Indien water aan blauwbaliet wordt toegevoegd ontstaan volgens het eerste schema robalaat en chloride. De vraag is dan waarom chloride moet worden toegevoegd om de tweede reactie (merkbaar) te laten optreden. Is er een onderscheid denkbaar tussen het bij de eerste reactie gevormde en het toegevoegde chloride? Deze anomalie kan worden opgelost door het optreden van beide tegengestelde reacties te veronderstellen. Daarmee wordt het begrip dynamisch evenwicht ontwikkeld. Wezenlijk in deze ontwikkeling is dat het reactiebegrip van de leerlingen niet-waarneembare, toegekende processen gaat omvatten. In §6.3 zal ik hier op terugkomen.

hoofdstuk 5

Onvolledigheid van chemische reacties

De uitdrukking 'onvolledige chemische reactie' kan betrekking hebben zowel op stoffen als op tijd. In het laatste geval geeft men ermee aan dat een chemische reactie nog niet ten einde is. In het eerste geval beschouwt men daarentegen een eindtoestand, waarin van alle reactanten een hoeveelheid is overgebleven. Deze betekenis van onvolledigheid is van belang in verband met de invoering van het begrip chemisch evenwicht en staat in dit hoofdstuk centraal.

5.1 Inleiding: aflopende reacties

Constante massaverhouding en overmaat

Tot de kenmerken van chemische reacties die in het Nederlandse scheikunde-onderwijs al vroeg aan de orde worden gesteld, hoort de zogenoemde constante massaverhouding. Dit is de regel dat stoffen bij een chemische reactie betrokken zijn in een bepaalde, vaste massaverhouding. Deze regel komt al meer dan een eeuw voor in examenprogramma's en leerplannen voor voortgezet onderwijs.

Indien reactanten met elkaar in contact worden gebracht in de voor de betrokken reactie geldende massaverhouding, zullen zij volgens deze regel volledig worden omgezet in produkten. Bij afwijkingen van de massaverhouding blijft van een reactant waarvan teveel was genomen een gedeelte over. Deze hoeveelheid kan via een verhoudingsberekening bepaald worden en wordt doorgaans aangeduid met de term overmaat. *In dit stadium van het onderwijs worden chemische reacties dus als 'aflopend' beschouwd: reactanten worden in principe volledig in produkten omgezet.* Deze regel wordt zelden expliciet genoemd in schoolboeken, doch ligt ten grondslag aan de genoemde overmaat-berekeningen[1].

Identiciteit van moleculen

In dit beginstadium is bovendien een corpusculaire voorstelling van chemische reacties gebruikelijk. Hierbij wordt een (zuivere) stof op corpusculair niveau gerepresenteerd door een molecuulsoort. Moleculen worden verondersteld te bestaan uit atomen. Een chemische reactie wordt dan voorgesteld als het gevolg van botsingen tussen moleculen, welke in dat geval leiden tot een 'hergroepering van atomen' in nieuwe moleculen. Atomen blijven hierbij behouden. De waarneembare stofomzetting correspondeert dus met het uiteenvallen en het vormen van moleculen[2].

---

[1]De onvolledige oxidatie van aluminium, die in veel schoolboeken voor 3-HAVO/VWO wordt besproken, tast de geldigheid van deze regel niet aan. De onvolledigheid wordt toegeschreven aan de vorming van een dun laagje aluminiumoxide, waardoor het metaal van contact met lucht (en dus van zuurstof) wordt afgesloten. In dit geval is dus niet voldaan aan een voorwaarde voor het optreden van een reactie (contact tussen reactanten). Zie bijvoorbeeld C, 1983, 3HV, p.78.

[2]Consequenties van de ionentheorie blijven in dit verband buiten beschouwing.

De meeste schoolboeken vermelden zonder toelichting dat moleculen die tot dezelfde soort horen onderling *identiek* zijn. De Vos heeft onderzoek verricht naar de invoering van dit kenmerk van moleculen. Onlangs heeft hij de term *identiciteit* voorgesteld als aanduiding voor het identiek-zijn van moleculen van dezelfde soort (De Vos, 1990).

Dat een chemische reactie niet momentaan optreedt, maar gedurende een zekere eindige tijd plaatsvindt, kan worden toegeschreven aan verschillen in positie en in kinetische energie tussen moleculen, die desondanks identiek genoemd worden. Deze verschillen kunnen leiden tot verschillen in omgeving en in 'botsingstijdstip'. Met andere woorden: dat sommige moleculen bij een reactie eerder worden omgezet dan andere (van dezelfde soort) is niet in strijd met hun identiciteit.

Overmaatverschijnselen conflicteren evenmin met deze opvatting: dat van een bepaalde reactant een aantal moleculen verdwijnt terwijl de rest overblijft, moet niet worden toegeschreven aan principiële verschillen tussen deze moleculen. Op moleculair niveau is de omzetting een kwestie van toeval: voor een deel van de moleculen is op een gegeven moment geen geschikte botsingspartner meer beschikbaar.

Preconcepties

In beide preconceptie-onderzoeken (§2.3) zijn aan leerlingen van 4-VWO vragen gesteld over de (on-)volledigheid van stofveranderingen in bepaalde situaties. Op het moment van het onderzoek was in hun onderwijs reeds aandacht besteed aan het verschijnsel dat stoffen soms gedeeltelijk oplossen of verdampen, maar had de mogelijkheid dat een chemische omzetting onvolledig kan zijn nog geen of weinig aandacht gehad.

Uit hun antwoorden op een vraag over alcohol in een gesloten fles bij kamertemperatuur bleek dat leerlingen op de hoogte waren van de onvolledigheid van de verdamping die in zo'n situatie optreedt. Zij gaven hier verschillende argumenten voor: de grootte van de fles ('gebrek aan ruimte'), de waarde van de temperatuur ('te laag') en ook de omkeerbaarheid van het proces. Dit laatste argument kwam voor in redeneringen waarin alcoholdamp tegen de wand van de fles condenseert om vervolgens terug te stromen naar de vloeistof[3].

Uit een combinatie van de resultaten van beide onderzoeken werd geconcludeerd dat leerlingen van 4-VWO vóór de invoering van chemisch evenwicht de onvolledigheid van fysische stofveranderingen in bepaalde situaties als ervaringsfeit kennen en deze onvolledigheid verklaren door het betrokken proces als een kringloop voor te stellen (zoals bij het verdampingsvoorbeeld).

Overigens bleek ook uit deze onderzoeken dat leerlingen stofomzettingen bij chemische reacties als volledig verlopend beschouwen en de hiermee overeenstemmende overmaatredeneringen geven.

---

[3]Zie verder Mertens (1986), p.14-15.

5.2 Op weg naar onvolledige omzettingen

Recente leergangen

In leergangen komt de onvolledigheid van een chemische omzetting meestal pas aan de orde in het kader van de behandeling van chemisch evenwicht. Het is echter gebruikelijk om voorafgaand hieraan reeds één of meer voorbeelden van onvolledige reacties te noemen. Wat de recente Nederlandse leergangen betreft, wordt in R&F al gewezen op het "gedeeltelijk" verlopen van een reactie bij de bespreking van de ammoniaksynthese, terwijl K&G al een definitie geven van zwakke zuren, waarin de uitdrukking "gedeeltelijk ioniseren" voorkomt[4]. In deze gevallen gaat het om mededelingen die niet ondersteund worden met argumenten en/of proeven.

In een ander recent schoolboek wordt een hoofdstuk over chemisch evenwicht ingeleid met de volgende opmerking:

> "Een reactie kan, terwijl er nog uitgangsstoffen over zijn, na een poos 'stoppen'. We spreken dan van een chemisch evenwicht."
> (G&, 1985, 4V, p.179)

Impliciet wordt hier gerefereerd aan de gebruikelijke volledigheid van chemische reacties. Na enkele proeven over omkeerbare reacties (o.a. met NO_2 en N_2O_4; zie §4.2) stellen de auteurs:

> "Als moleculen met elkaar reageren, kan het zijn dat alle moleculen van de stoffen gaan reageren tot er geen meer over zijn. Hier is het anders: op een gegeven moment treedt een evenwicht op, waarbij de moleculen van de nieuwe stoffen weer met elkaar gaan reageren en de oorspronkelijke stoffen vormen." (G&, 1985, 4V, p.187)

In de eerste zin wordt het aflopende-reactiekader corpusculair verwoord. In de tweede zin wordt gerefereerd aan de uitgevoerde proeven. De omkeerbaarheid die hierbij naar voren is gekomen, wordt op corpusculair niveau geïnterpreteerd en verbonden met de term evenwicht. De gegeven omschrijving van evenwicht biedt geen waarneembaar criterium voor het optreden van een evenwichtstoestand.

Bij de beschrijving van de proeven legt men geen verband met de mogelijke onvolledigheid van de betrokken omzetting. In het citaat is deze onvolledigheid een consequentie van de omkeerbaarheid. Een relatie tussen evenwicht en onvolledigheid blijft dus tamelijk impliciet.

Alle andere recente leergangen hanteren op dit punt een soortgelijke aanpak[5]. Samengevat komt deze hierop neer:

- Vóór de invoering van chemisch evenwicht wordt meestal al eens gesteld dat chemische reacties niet altijd volledig verlopen. Een onderbouwing van deze stelling (met proeven en/of argumenten) wordt niet gegeven.

---

[4]R&F (1984, 3HV, p.133) en K&G (1983, 4H, p.124).

[5]Zie K&G (1983, 4H, p.192-194); C (1984, 4V, p.142-144) en R&F (1985, 4V, p.195).

- Bij de introductie van chemisch evenwicht wordt aan de waargenomen omkeerbaarheid van een bepaalde reactie de (meestal corpusculair omschreven) *veronderstelling* verbonden dat er twee tegengestelde reacties tegelijkertijd optreden. In dit kader wordt gesproken van een dynamisch evenwicht. Op grond hiervan wordt (min of meer impliciet) geconcludeerd dat de betrokken reactie onvolledig verloopt. In §6.3 zal ik hier nader op ingaan.

Het valt op dat de auteurs een experimenteel aantoonbaar verschijnsel als de onvolledigheid van een omzetting niet als zodanig introduceren, maar als conclusie uit een veronderstelling. Hieronder zal ik nagaan of deze aanpak een wetenschapshistorische achtergrond heeft.

Wetenschaps-historische ontwikkeling

Chemische reacties zijn lange tijd als volledig verlopend beschouwd. Ook Bergman ging er vanuit dat een 'verdringing' (§3.1) in principe volledig optrad, hoewel hij over experimentele gegevens beschikte die op onvolledigheid wezen (Lindauer, 1962, p.384; Ostwald, 1902, p.29). De mogelijke onvolledigheid van chemische omzettingen is als eerste door Berthollet geaccepteerd op grond van experimenteel onderzoek naar reacties tussen zuren en basen in oplossing. Hij verklaarde de onvolledigheid door te stellen dat een affiniteitsverschil tussen stoffen gecompenseerd kan worden door de hoeveelheden die van de betrokken stoffen aanwezig zijn. Berthollet constateerde dat een met de stoichiometrie overeenkomstige volledige omzetting bij reacties in oplossing vaak optrad indien een slecht oplosbaar vast produkt ontstond ofwel een gasvormig produkt ontweek. Hij concludeerde dat zulke produkten geen bijdrage konden leveren aan het compenserende vermogen van de 'massawerking' (Ostwald, 1902, p.41-43).

In de eerste helft van de vorige eeuw hebben ook andere onderzoekers vastgesteld dat omzettingen bij reacties in oplossing veelal onvolledig zijn. Ten aanzien van reacties in de gasfase is de onvolledigheid pas later geconstateerd. In 1857 formuleerde de Fransman Sainte-Claire Deville nog een definitie voor dissociatiereacties waarin iedere stof stabiel was tot een zekere temperatuur. Hij noemde dit de dissociatietemperatuur. Daar beneden bleef die stof volledig intact en daarboven zou deze volledig ontleden.

In de jaren 1862-'64 werd echter door diverse onderzoekers experimenteel aangetoond dat de dissociatie ook onvolledig kon zijn. Daarbij lukte het Von Pebal om zowel ammoniak als waterstofchloride aan te tonen in de 'damp' van ammoniumchloride. Onder invloed van deze resultaten herzag Sainte-Claire Deville zijn definitie en aanvaardde hij dat er ook partiële dissociatie kon optreden. Hij vergeleek dit met het verschijnsel partiële verdamping van een vloeistof beneden het kookpunt (Snelders, 1977, p.52-54). Kennelijk riep de onvolledigheid van dissociatiereacties de behoefte aan een verklaring op, want in de jaren hierna zouden verschillende onderzoekers hier verklaringen voor publiceren.

In §3.1 beschreef ik reeds de discussie die Horstmann en Pfaundler hierover voerden. De laatste trachtte in een artikel uit 1867 een verklaring te formuleren voor de onvolledigheid van de ontleding van stoffen in de gasfase bij een zekere temperatuur. Hierin wees hij op een corpusculair probleem in verband met deze onvolledigheid:

> "Man kann sich nicht recht denken, warum bei *derselben* Temperatur, bei der die eine Anzahl der einander offenbar gleichen Moleküle zerfallen muss, die übrige Menge derselben unzerlegt bleiben könne."
> (Pfaundler, 1867, p.57)

Met andere woorden: een onvolledige reactie conflicteerde met de identiciteit van moleculen. In het vervolg van ditzelfde artikel loste Pfaundler het hier geciteerde probleem op door een dynamisch evenwichtsbegrip in te voeren. Zijn argumentatie bespreek ik in §6.2.

Geëxpliciteerde en problematiserende onvolledigheid
In recente leergangen is de historische gang van zaken vrijwel omgekeerd. De onvolledigheid volgt niet uit een proef maar uit de veronderstelling van een dynamisch evenwicht. In het onderstaande zal ik kort ingaan op enkele oudere en buitenlandse leergangen om na te gaan of hierin een andere aanpak ten aanzien van de onvolledigheid dan tegenwoordig wordt gehanteerd. Vervolgens kom ik tot een positiebepaling ten aanzien van deze problematiek, die van belang is met het oog op het ontwerpen van onderwijsmateriaal.

Veel oudere Nederlandstalige leergangen wijken niet wezenlijk af van recente leergangen in de wijze waarop de onvolledigheid wordt besproken. In enkele oudere leergangen is daarentegen voor een aanpak gekozen die overeenkomsten vertoont met de wetenschaps-historische ontwikkeling op dit punt. Zo worden in H (1921) en M&B (1960, deel B, p.39-41) voorbeelden van gasdissociaties besproken. Op grond van dampdichtheidsveranderingen onder invloed van de temperatuur beredeneren de auteurs de onvolledigheid van de betrokken omzettingen. In H wordt deze bespreking afgerond met de volgende conclusie:

> *"Reacties, waarbij de oorspronkelijke stoffen niet geheel in de nieuwe overgaan, zullen in 't vervolg* **evenwichtsreacties** *worden genoemd. Veranderen bij een reactie de oorspronkelijke stoffen wel geheel in de nieuwe, dan zal zulk een werking met den naam* **afloopende reactie** *aangeduid worden."* (H, 1921, p.95[6])

Een ander voorbeeld in dit kader staat in K& (1954). In een hoofdstuk over ionen wordt het elektrisch geleidingsvermogen van zure oplossingen toegeschreven aan de aanwezigheid van H^+-ionen. Deze ontstaan als gevolg van ionisatie van het zuur. Uit een proef blijkt dat zoutzuur een groter geleidingsvermogen bezit dan een equimolaire oplossing van fosforzuur. Dan wordt de vraag gesteld hoe dit te verklaren is. Omdat beide stoffen goed oplosbaar zijn in water, moet de verklaring niet in deze richting worden gezocht. De tekst vervolgt:

[6]In een voetnoot stelt H: "Bij de eerste definitie wordt ondersteld, dat er oorspronkelijk van geen der stoffen een overmaat aanwezig is. Als dit wel zoo is, blijft ook bij een afloopende reactie iets over, nl. de overmaat."

> "We moeten dus wel aannemen, dat van de opgeloste moleculen fosforzuur **slechts een gedeelte is geioniseerd!** Maar ook dit lijkt geen bevredigende verklaring: we mogen immers niet aannemen dat sommige moleculen H_3PO_4 in staat zijn te ioniseren [...] terwijl de rest dit **niet** zou kunnen." (K&, 1954, deel 1, p. IV-78)

Een bespreking van de onvolledigheid van een omzetting aan de hand van verschillen in elektrisch geleidingsvermogen komt later ook in enkele andere leergangen voor. Net als in K& is deze bespreking niet opgenomen in een hoofdstuk over chemisch evenwicht, maar over zuren en basen.

In sommige buitenlandse leergangen wordt de onvolledigheid geïllustreerd met grafieken waarin het concentratieverloop van een zekere reactant is uitgezet tegen de tijd. Experimenteel blijkt dat deze concentratie daalt om na verloop van tijd constant, maar ongelijk aan nul te worden. Meestal wordt ook een tweede lijn geschetst, waarin het concentratieverloop van dezelfde stof is uitgezet voor het geval dat de reactie vanaf 'de andere kant' wordt gestart. Daarmee illustreren deze grafieken tevens dat dezelfde (evenwichts-)situatie bereikt kan worden vanuit twee 'tegengestelde' beginsituaties. Een geschikt praktijkvoorbeeld is de estervorming van Berthelot en Péan de Saint-Gilles, die is opgenomen in Jansen et al. (1984, p.136-137).

In de hier genoemde leergangen is gekozen voor een aanpak waarin op grond van *een interpretatie van proefresultaten* wordt vastgesteld dat zekere chemische omzettingen (onder bepaalde omstandigheden) onvolledig zijn.

In K& wordt bovendien een mogelijk vervolg op deze aanpak aangegeven. Hierin wordt een probleem geformuleerd dat overeenkomt met dat van Pfaundler. De onvolledigheid van een chemische omzetting wordt door K& corpusculair geïnterpreteerd waardoor *de identiciteit van moleculen wordt geproblematiseerd*. Net als Pfaundler loste K& dit probleem op door een dynamisch evenwichtsbegrip in te voeren (zie verder §6.3). Een hiermee vergelijkbare aanpak komt zelden voor in Nederlandse leergangen. Behalve bij K& heb ik deze alleen bij H aangetroffen.

Samenvattend kan ik in de leergangen drie verschillende aanpakken identificeren:

- één waarin de onvolledigheid van een stofomzetting wordt *vastgesteld* op basis van proeven;
- een variant hierop waarin de onvolledigheid bovendien *problematiserend* wordt gebruikt;
- één waarin de onvolledigheid *als conclusie volgt uit een veronderstelling*.

Mijn bezwaar tegen de wijze waarop deze laatste aanpak in recente leergangen is uitgewerkt, richt zich vooral op het ontbreken van een koppeling tussen onvolledigheid en proeven. Indien in een onderwijstekst voor deze aanpak gekozen wordt, zou m.i. tenminste een poging moeten worden ondernomen om de conclusie dat een chemische reactie onvolledig zal zijn, experimenteel te toetsen.

De onvolledigheid leent zich echter uitstekend voor een introductie op basis van proeven. In de ontworpen leerlingenteksten heb ik dan ook steeds gekozen voor een dergelijke opzet.

> Voor een goed begrip van dit gesprek merk ik op dat de kleur bij verhitting tot 85°C van rose via paarse tinten geleidelijk overgaat in diepblauw. Indien tot 55°C wordt verhit, treden eveneens geleidelijke kleurveranderingen op. Met het oog is niet goed vast te stellen of de kleur wel of niet meer verandert. In 3 spreekt joop dan ook een *verwachting* uit, die m.i. inhoudt dat de kleur bij deze proef niet diepblauw zal worden. Ria en inge onderschrijven deze voorspelling, waarbij inge in 5 op een relatie tussen kleur en temperatuur lijkt te wijzen.
> Leo formuleert in 6 echter een andere verwachting. Zijn groepsgenoten spreken hem aanvankelijk nog tegen, maar nadat leo in 9 een argumentatie voor zijn verwachting heeft gegeven, staken zij hun verweer.

In de leerlingentekst werd slechts gevraagd naar waarnemingen; een verklaring was (nog) niet aan de orde gesteld en een beschrijving in corpusculaire termen kwam in de tekst niet voor. Bij leo riep de onvolledigheid als conclusie uit de proef weerstand op, omdat hij deze in verband bracht met zijn opvatting betreffende "moleculen van dezelfde stof". Het eerder onderwezen identiciteitsbegrip werd door hem in verband met de onvolledigheid geproblematiseerd op een wijze die nauwelijks afwijkt van die van Pfaundler en van K&. Dit betekent dat leo's redenering vooraf kan gaan aan de invoering van een dynamisch evenwichtsbegrip (§5.2). In dit opzicht beschouw ik zijn redenering als produktief, hoewel deze in het geciteerde gesprek tot een onjuiste voorspelling leidde.

Ook in andere groepen werd verondersteld dat de eindkleur bij 55°C blauw zou moeten zijn. In één zo'n groep werd in dit kader opgemerkt:

> "Waarom zou die reactie niet aflopen tot alle robalaat op is?"

Hierin wordt de onvolledigheid niet geaccepteerd omdat er nog robalaat aanwezig is dat onder de gegeven omstandigheden (temperatuur) kan reageren. Er is dan geen reden waarom niet alle robalaat zou reageren[7].

Uit geschreven antwoorden op vragen naar de paarse kleur bleek dat geen enkele groep het ontstaan van een afzonderlijke paarse stof als veroorzaker van deze kleur veronderstelde. De kleur werd daarentegen toegeschreven aan de gelijktijdige aanwezigheid van robalaat en blauwbaliet. De vraag of er nu ook water aanwezig zal zijn werd door alle groepen bevestigend beantwoord: op grond van het reactieschema (§4.3) kennen leerlingen dus de aanwezigheid van deze stof toe, hoewel zij deze niet hebben waargenomen.

In het vervolg van deze versie werd de opvatting dat de kleur bij 55°C uiteindelijk ook blauw zal worden vrijwel uitgesloten door de beschreven parallel-proef. Uit het verzamelde onderzoeksmateriaal bleek dat bijna alle leerlingen naar aanleiding van dit onderwijsaanbod accepteerden dat de robalaatproef bij 55°C tot een situatie leidt, waarin de drie betrokken stoffen (robalaat, blauwbaliet en water) in constante concentraties aanwezig zijn. In dit opzicht werd het beoogde onderwijsdoel dus bereikt.

---

[7]Ook in de literatuur is beschreven dat leerlingen de onvolledigheid als resultaat van een proef niet altijd als vanzelfsprekend accepteren. Soms redeneren zij: "if we had waited longer, or had mixed the reagents better, the reactions would have reached completion" (Cohen, 1987, p.7).

5.3 Onvolledigheid als conclusie uit een proef

Opzet leerlingentekst (eerste versie)
In de eerste versie is de onvolledigheid aan de orde gesteld na de eerder beschreven robalaat-proeven (§4.3). Een robalaatoplossing die twee keer de cyclus verhitten tot 85°C/afkoelen tot kamertemperatuur had ondergaan, werd verhit van kamertemperatuur tot 55°C. Hierdoor kreeg de oplossing een paarse kleur. Vervolgens werden vragen gesteld over de oorzaak van deze kleur: zou deze op het ontstaan van een nieuwe, paarse stof wijzen, of op de gelijktijdige aanwezigheid van robalaat en blauwbaliet?

Om de onvolledigheid van de omzetting onder deze omstandigheden voor leerlingen acceptabel te maken, liet ik hen aansluitend de volgende proef uitvoeren: een reageerbuis met een rose oplossing werd verwarmd van kamertemperatuur tot 55°C, terwijl tegelijkertijd een blauwe oplossing werd afgekoeld van 85°C tot eveneens 55°C (hiertoe werden beide buizen in hetzelfde verwarmingsbad geplaatst). Het resultaat van deze parallel-proef was dat beide oplossingen dezelfde paarse kleur kregen. Via een reeks vragen werd een verband tussen kleur, temperatuur en samenstelling van de betrokken oplossingen aan de orde gesteld. Het uiteindelijke doel van deze reeks proeven en vragen was leerlingen te laten inzien dat bij één constante temperatuur (55°C) de drie stoffen uit het reactieschema allemaal aanwezig zijn, terwijl hun concentraties niet veranderen.

Ervaringen
In een groep werd het volgende gesprek gevoerd, terwijl de leerlingen bezig waren om een robalaat-oplossing te verhitten van kamertemperatuur tot 55°C (nog zonder 'parallel-proef'):

protocol 5.1

1	joop	Het wordt een beetje paars.
2	ria	't Gaat alleen heel langzaam.
3	joop	Nee 't gaat niet langzamer, 't gaat maar tot een bepaalde punt.
4	ria	Ja, denk ik ook, ja.
5	inge	Ja, tot het punt van 55 graden (...)
6	leo	Nee, volgens mij niet, als je 't buisje op 55 houdt dan gaat de reactie langzamer, maar op een gegeven moment is hij weer helemaal blauw.
7	joop	Nee, volgens mij niet.
8	ria	Nee (...)
9	leo	Want waarom zullen bepaalde moleculen van dezelfde stof wel omzetten en de andere niet? Dat slaat toch nergens op? Het zijn toch allemaal dezelfde stof, dus ze hebben allemaal dezelfde eigenschappen. Dus worden ze allemaal omgezet, maar alleen gaat het wat langzamer.
10	inge	Hm ja, zit wel wat in.
11	joop	Zit wel wat in.

5.4 Problematisering door onvolledigheid

Opzet leerlingentekst (derde versie)
Het gegeven dat sommige leerlingen de onvolledigheid van een reactie als probleem ervaren, heeft consequenties gehad voor latere versies van de leerlingentekst. Ik veronderstelde dat veel leerlingen aangesproken zouden worden door een aanpak waarin de vaststelling, dat een chemische omzetting bij een proef onvolledig is geweest, gevolgd wordt door vragen waarin deze onvolledigheid ter discussie wordt gesteld. Indien leerlingen hierin een probleem herkennen, krijgen zij mogelijk behoefte aan een verklaring. Daarmee kan de invoering van een dynamisch evenwichtsbegrip worden voorbereid.

Dat leerlingen chemische reacties aanvankelijk associëren met volledige stofomzettingen, blijkt behalve uit de preconceptieonderzoeken (§5.1) ook uit het werk van De Vos. Hij heeft een proef ontworpen, waarbij leerlingen van derde klassen HAVO en VWO nagaan van welke van twee zoutoplossingen, waarmee eerder een neerslagreactie was uitgevoerd, een overmaat was genomen. De leerlingen hadden het filtraat in tweeën gedeeld en voerden de opdracht uit door de twee delen te onderzoeken met de afzonderlijke reagentia. Na één proef werd vaak al een conclusie getrokken, waarna een tweede proef slechts ter controle werd uitgevoerd: er kan immers maar van één van beide zoutoplossingen een overmaat zijn geweest (De Vos, 1985, p.59).

Deze proef heeft als inspiratiebron gediend voor de in de derde versie gekozen aanpak ten aanzien van onvolledigheid. De leerlingen voerden eerst een soortgelijke proef uit, met als reagentia oplossingen van natriumhydroxide en fenolftaleïne. Deze proef, waarvan de resultaten met de gebruikelijke overmaatredeneringen konden worden verklaard, diende als inleiding op een andere. Hierbij werden waterige oplossingen gebruikt van een ijzer(III)zout en van kaliumthiocyanaat. Menging van deze oplossingen (die zelf zwak geel respectievelijk kleurloos zijn) levert een homogeen mengsel met een dieprode kleur. In de leerlingentekst werd deze kleur toegeschreven aan het ontstaan van 'rodanide', als gevolg van een reactie van ijzer(III)ionen en thiocyanaationen[8].

Vervolgens moesten de leerlingen het reactiemengsel over drie buizen verdelen, waarna zij aan één ervan nog wat van de ijzer(III)oplossing toevoegden. Nadat gevraagd was om het resultaat van de proef (een intensivering van de rode kleur) in termen van overmaat uit te leggen, werd gevraagd aan één van de twee overgebleven buizen nog wat van de thiocyanaatoplossing toe te voegen. (De derde buis diende als referentie) Ook deze proef resulteerde in een intensivering van de rode kleur. Daarop werd de leerlingen gevraagd of zij nu nog steeds achter hun eerste conclusie met betrekking tot overmaat stonden.

De achtergrond van deze opzet is de volgende: in het kader van aflopende reacties met twee reactanten heeft het begrip overmaat betrekking op een hoeveelheid van één reactant, die *na afloop* van een omzetting is overgebleven. In het geval van een onvolledige reactie blijft echter van *iedere* reactant een hoeveelheid over. Dit zou impliceren dat van iedere reactant een overmaat was

---

[8]Chemische achtergronden van deze proef worden o.a. beschreven in Sandell (1959), p.524-535.

genomen, maar daarmee verliest dit begrip zijn oorspronkelijke betekenis. Bij een onvolledige reactie kan wel sprake zijn van een overmaat, maar dan heeft deze term betrekking op een *vooraf gekozen* afwijking van de reeds bekende massaverhouding waarin de betreffende stoffen met elkaar reageren. Kortom: *de onvolledigheid als uitkomst van een proef kan functioneren om het 'oorspronkelijke' begrip overmaat te problematiseren.* De genoemde vraag was als zodanig bedoeld.

Vervolgens werd in de leerlingentekst gesuggereerd dat er bij deze proef "van beide stoffen een overmaat genomen" was, "want er was van beide nog iets over". Aan de leerlingen werd gevraagd hun mening over deze bewering te geven. Hierna vervolgde de tekst:

> "Michiel zegt [...]: *"Dat kan toch helemaal niet! Want waarom zullen sommige ijzer(III)ionen en thiocyanaationen wel met elkaar reageren, en andere ijzer(III)- en thiocyanaationen niet? Dat slaat toch helemaal nergens op!"*
> Zijn jullie het met Michiel eens? Licht toe."

Via deze vraag wilde ik de onvolledigheid ook aangrijpen om de identiciteit van deeltjes (i.c. ionen) van dezelfde soort te problematiseren. Gekozen is voor een aangepaste weergave van uitspraak 9 van leo uit protocol 5.I in de verwachting dat deze formulering voor leerlingen herkenbaar zou zijn. Een oplossing van Michiels probleem werd in dit stadium niet van leerlingen verwacht. Het doel was een simultane ontwikkeling in het reactiebegrip en in de corpusculaire begrippen van leerlingen in gang te zetten. Via het vervolg van de leerlingentekst werd een voortgang in deze simultane ontwikkeling nagestreefd (zie §6.7).

Ervaringen

Ervaringen met de proef met fenolftaleïne en natronloog kwamen overeen met die van De Vos. De meeste leerlingen vonden een toets op de conclusie met betrekking tot overmaat door een extra proef eigenlijk overbodig en waren dan ook in het geheel niet verrast door het resultaat hiervan. Dit bevestigde mijn veronderstelling dat het aflopende-reactiekader, inclusief de hierbij horende betekenis van overmaat, voor leerlingen produktief functioneerde.

Dit kwam ook naar voren bij de proeven met rodanide. Sommige leerlingen uitten hun weerzin tegen het uitvoeren van de laatste proef omdat ze het resultaat met zekerheid meenden te kunnen voorspellen. Veel anderen spraken zo'n voorspelling uit. In een groep zei een leerling al vóór de proef:

protocol 5.II

1	bert	D'r moet dus niks gebeuren als het goed is.

Na het toevoegen vervolgde het gesprek:

2	arie	Nou dat wordt dus ook donkerder.
3	bert	Hallo.
4	cor	Ja.
5	arie	Hè, hoe kan dat nou?
6	bert	Begrijpen we dit?
7	arie	Nee, dat snap ik dus even echt niet hè?

8 bert Reageert 't met zichzelf? Dat zal wel niet.

Vervolgens ging de groep na of ze de proeven wel op de voorgeschreven wijze hadden uitgevoerd. Ze besloten het laatste proefje te herhalen met de referentiebuis. Toen het resultaat hetzelfde bleek te zijn, merkte cor op:

9 cor Nou d'r is dus een overmaat van beide, want eh...
10 arie Ha ha, dat kan dus nooit!
11 cor Anders kan 't niet reageren...

De vraag in de leerlingentekst of wellicht van beide stoffen een overmaat was genomen, leidde tot de volgende discussie:

12 arie Nee, want dan zou 't gelijk al helemaal met elkaar moeten reageren.
13 bert Nee, want d'r was van de ander ook iets over, 't moest toch met mekaar reageren?
14 arie D'r is ook een overmaat van die ander, dan moeten ze toch helemaal met elkaar opreageren?
15 bert Dan moeten ze toch ook met elkaar reageren? Ze reageren totdat er één overblijft, waar geen andere stof meer is om te reageren, dacht ik.

Deze groep probeert de proeven te interpreteren vanuit het kader van volledig verlopende reacties en een hierbij passende betekenis van overmaat. Dit verklaart hun verbazing in 3-7 en de verklaringsbehoefte die arie en bert (in 5 en 6) verwoorden. In 8 probeert bert het onverwachte resultaat te verklaren. Hij lijkt te doelen op een reactie van het toegevoegde reagens met de hiervan reeds aanwezige hoeveelheid, maar verwerpt dit idee meteen. Cor's suggestie om van een "overmaat van beide" (9) te gaan spreken, wordt afgewezen. Als deze suggestie even later ook in de leerlingentekst blijkt voor te komen, motiveren arie en bert hun afwijzing. Het gebruik van de woorden "helemaal" en "opreageren" illustreert het aflopende-reactiekader. Door het woord "moeten" te gebruiken, benadrukken zij hun vertrouwen in dit kader.

In andere geobserveerde groepen trad een soortgelijke gang van zaken op: eerst werd een resultaat van de laatste proef voorspeld, waarna de leerlingen probeerden het onverwachte resultaat te verklaren als het gevolg van triviale fouten bij de uitvoering. Nadat dit was mislukt, werd het resultaat geaccepteerd maar ontstond discussie over de term overmaat. Daarbij werd regelmatig gesteld dat er geen overmaat van beide reactanten kan zijn.

Opmerkingen van deze aard werden ook aangetroffen in de door groepen ingeleverde schriftelijke antwoorden op de vraag of van beide stoffen een overmaat was genomen. Een analyse van circa 40 van deze antwoorden liet zien dat het merendeel van de groepen de mogelijkheid van twee overmaten afwees. In veel gevallen werden argumenten gegeven zoals in de groep van bert ('twee overmaten zouden met elkaar reageren'). Slechts in drie groepen werd het idee van twee overmaten geaccepteerd. Eén van deze groepen schreef:

"Ja, het lijkt zo, want er was van allebei wat over."

In deze groepen was het resultaat van de proef kennelijk aanvaard, maar werd het begrip overmaat hierdoor niet expliciet geproblematiseerd.

De vraag met de uitspraak van Michiel leverde ongeveer hetzelfde beeld op: drie groepen waren het niet met hem eens (twee hiervan hadden de vorige vraag bevestigend beantwoord) en toonden zich dus ongevoelig voor de beoogde problematisering van identiciteit. De overige groepen antwoordden op deze vraag bevestigend. De meeste groepen wezen in hun toelichting (opnieuw) op de onmogelijkheid van twee overmaten of volstonden met een verwijzing naar hun antwoord op de vorige vraag. Andere groepen hanteerden het woord identiek in hun toelichting, hoewel dit niet in de vraag voorkwam. In één van deze (acht) groepen vond het volgende gesprek plaats:

protocol 5.III

1	marc	Ja, ik vind van wel.
2	henk	Ja, waarom?
3	marc	Theoretisch gezien klopt het wat Michiel zegt.
4	henk	Ja, ionen van dezelfde stof zijn identiek.
5	roel	Ja, ionen van dezelfde stof, ionen en moleculen.
6	marc	Zijn identiek.
7	rob	Ja, maar dit is toch wel interessant.
8	marc	Wat vind je interessant?
9	henk	Ik vind het wel vreemd, ik snap het niet.
10	rob	Nou, 't is vreemd, we hebben er nog steeds geen verklaring voor.

In dit gesprek geven de leerlingen blijk van herkenning van Michiels probleem (3-6). Henk en marc hanteren het woord identiek om het probleem mee aan te duiden. Rob en henk signaleren bovendien dat dit probleem nog niet is opgelost, en verwoorden tevens een verklaringsbehoefte (7, 9, 10). Daarmee heeft de vraag in mijn ogen voor hen produktief gefunctioneerd.

Uit de analyse van het onderzoeksmateriaal concludeerde ik dat de gekozen opzet in grote lijnen op de beoogde wijze heeft gefunctioneerd. Dat wil zeggen dat het merendeel van de leerlingen:

- het gegeven erkent dat bij de betrokken proeven van beide reactanten een (onbepaalde) hoeveelheid overblijft;
- zich gevoelig toont voor de onbruikbaarheid bij deze proeven van de term overmaat in de oorspronkelijke betekenis;
- tevens wordt aangesproken door de hiermee samenhangende problematisering van de identiciteit van deeltjes van dezelfde soort.

Om meningen van docenten over deze onderwijsopzet te peilen, heb ik achteraf gesprekken met hen gevoerd en heb ik hen gevraagd om een evaluatieformulier in te vullen (§2.3). Ten aanzien van de hiervoor beschreven opdrachten meldden veel docenten dat zij deze als zinvol voor hun leerlingen hadden ervaren. Ook zij hadden gemerkt dat leerlingen in verwarring raakten door deze opdrachten en uitspraken deden als 'er kan niet van beide iets over zijn'. Dat docenten dit positief waardeerden, vormt niet alleen een ondersteuning van de

hierboven vermelde conclusies. Het betekent bovendien dat docenten aangesproken werden door deze onderwijsopzet. Zij hechten wellicht niet (meer) aan de aanpak in de tegenwoordig gangbare leergangen waarin onvolledigheid uit een veronderstelling volgt (§5.2).

5.5 Theoretische onvolledigheid

Opzet leerlingentekst (tweede en derde versie)
De onvolledigheid van een chemische reactie is in de eerste versie via de 'robalaatoplossing bij 55°C' aan de orde gesteld (zie §5.3). In het vervolg daarvan waren ook vragen opgenomen over een toestand bij 85°C. De meeste leerlingen waren van mening dat bij die temperatuur geen robalaat aanwezig kon zijn, omdat de oplossing diepblauw gekleurd is en blijft. Met andere woorden: zij oordeelden op grond van waarnemingen dat de omzetting bij 85°C volledig was.

In de tweede versie is een opdracht opgenomen waarin deze directe relatie tussen (on)volledigheid en waarnemingen ter discussie werd gesteld. Na de robalaat-proeven (via toevoegingen; §4.4) volgde een opdracht over een reeks proeven, die niet door de leerlingen zelf waren uitgevoerd. Het ging hierbij om vijf porties van 5 ml blauwbaliet-oplossing waaraan verschillende hoeveelheden water werden toegevoegd. Met een "apparaat", waarvan de werking buiten beschouwing bleef, werden enige tijd na het toevoegen de concentraties van blauwbaliet en robalaat in iedere oplossing bepaald. De resultaten waren in de volgende tabel weergegeven[9]:

hoeveelheid toegevoegd water (ml)	kleur van de oplossing	concentratieverhouding blauwbaliet:robalaat
0,3	blauw	25:75
0,4	paars	15:85
0,5	rose	12:88
1,0	rose	4:96
2,0	rose	2:98

Naar aanleiding van deze tabel werd een achttal beweringen gedaan, waarbij aan de leerlingen gevraagd werd om aan te geven of deze "wel of niet juist zijn" en de antwoorden te motiveren. De eerste drie beweringen dienden om de relatie tussen kleur en samenstelling bij deze proeven te ontwikkelen: een blauw gekleurde oplossing kan (zelfs veel) robalaat bevatten, terwijl in een rose gekleurde oplossing blauwbaliet kan voorkomen.

Op grond van het reeds eerder meegedeelde reactieschema (§4.4) en het gegeven dat water werd toegevoegd aan een blauwbalietoplossing moesten leerlingen kunnen beredeneren dat in alle gevallen tevens 'chloride' (als tweede reactieprodukt) aanwezig is. Tenslotte werden deze drie beweringen gedaan:

"f) Als je 10 ml water toevoegt zal de [concentratie] van blauwbaliet echt nul worden.

[9]Deze resultaten zijn gebaseerd op Spears Jr. & Spears (1984).

g) Ook al voeg je nog zoveel water toe, er zal altijd een (heel klein) beetje blauwbaliet in de oplossing aanwezig blijven.
h) Ook al voeg je maar heel weinig water toe, er zal altijd een beetje water in de oplossing aanwezig blijven."

Ik wilde nagaan of leerlingen door deze opzet tot het inzicht zouden komen dat na toevoeging van een willekeurige hoeveelheid water alle vier betrokken stoffen nog aanwezig zijn. Daarmee zou de onvolledigheid van de omzetting los komen te staan van waarnemingen, en een theoretisch karakter krijgen.

Ik verwachtte dat leerlingen hiertoe bij f) en g) het asymptootbegrip uit de wiskunde zouden toepassen. Op grond daarvan kan worden ingezien dat de concentratie van blauwbaliet langzaam naar nul nadert, doch deze waarde niet bereikt. Een bevestiging van h) kan evenmin zonder meer uit de tabel worden afgeleid. De leerlingen konden deze bewering alleen onderschrijven op grond van een extrapolatie of een generalisatie. Ik wilde nagaan welke argumenten leerlingen in het geval van een bevestiging zouden hanteren.

Ervaringen (tweede versie)
In een groep werd f) afgewezen ("dat slaat toch nergens op") en g) bevestigd ("da's hetzelfde"), waarna over h) het volgende gesprek werd gevoerd:

protocol 5.IV

1	kees	Bij h) natuurlijk wel. Als je water toevoegt dan is er toch altijd water?
2	hans	't Kan toch ook helemaal reageren?
3	fred	Ja, dan reageert 't toch tot robalaat plus chloor... of zie ik dat verkeerd?
4	kees	Ja, wacht effe hoor.
5	fred	Ja, nee, dan reageert 't gewoon op.
6	hans	En je houdt geen water meer over.

Hierdoor gingen de leerlingen ertoe over om hun antwoorden op f) en g) te herzien, waarbij het gesprek over g) de volgende wending nam:

7	max	Er staat: *al voeg je nog zoveel water toe*, dus heel veel water.
8	kees	Ja, want blauwbaliet en water reageren tot robalaat... toch?
9	max	Als je veel water hebt, zou 't blauwbaliet...
10	fred	Nou dan reageert 't ook weer terug natuurlijk!
11	J.v.D.	Als je naar de getallen kijkt hè? Hier gaat steeds meer water bij.
12	kees	Hou je steeds minder blauwbaliet over.
13	max	Steeds minder blauwbaliet, ja.
14	fred	Maar nooit nul toch? Daarom, d'r is altijd weer iets wat terugreageert.
15	max	D'r hoeft maar één dingetje te reageren... terug te reageren, en je hebt wel... Dus toch gewoon ja?
16	fred	Ja, d'r is altijd wel wat dus.
17	max	Ja, dus d'r is wel.
18	fred	Ja, 't is wel goed.

19	J.v.D.	Kijk, je kunt 't hier een beetje aan zien hè? Als je hier twee maal zoveel toevoegt, van 1 ml naar 2 ml dan wordt 't de helft zeg maar.
20	kees	En de helft van de helft dat wordt nooit nul.
21	J.v.D.	Ja precies, bijna nul hooguit.
22	max	Dat hebben we met wiskunde gehad jongeman!

Van 2 tot 9 redeneert de groep vanuit het kader van volledige reacties, totdat fred (in 10) op de mogelijkheid van een reactie "terug" wijst. Ik negeer deze opmerking echter en tracht in 11 een argumentatie op basis van het asymptootbegrip te stimuleren. Kees en max gaan hierin mee, totdat fred in 14 opnieuw op een terugreactie wijst. Max neemt dit argument in 15 over, waarna hij het met fred hierover eens lijkt te zijn. Ik herken hun argumenten niet, omdat ik op een andere redenering gericht ben. In 19 probeer ik de leerlingen hier opnieuw op aan te spreken, hetgeen nu bij kees en max lukt.

Mijns inziens veronderstelden fred en max (in 14-18) het optreden van een reactie 'terug' op grond van de proeven, vragen en reactieschema's die hiervoor aan de orde waren geweest. Daaruit hadden zij afgeleid dat robalaat en chloride bij g) aanwezig moesten zijn en in elkaars aanwezigheid normaal gesproken reageren. Uit het protocol blijkt niet hoe zij zich deze terugreactie voorstelden (waarneembaar of niet), maar wel dat zij het optreden ervan aannamen om daarmee de aanwezigheid van blauwbaliet te kunnen beredeneren. Met andere woorden: door in te gaan op de omkeerbaarheid van de betrokken reactie en op grond hiervan een terugreactie toe te kennen, waren zij in staat om te beredeneren dat in de situatie bij g) de betrokken stoffen geen van allen volledig zullen verdwijnen. Door deze produktieve ontwikkeling kreeg hun begrip onvolledige reactie een theoretisch karakter.

Het verwachte gebruik van het wiskundige asymptootbegrip speelde in dit gesprek een ondergeschikte rol ondanks mijn pogingen om dit model aan de orde te stellen. Produktieve argumentaties op basis van omkeerbaarheid had ik niet verwacht, maar deze bleken ook in andere gesprekken een belangrijke rol te spelen. Tevens kwam dit argument regelmatig voor in de schriftelijke antwoorden van groepen op de vragen f), g) en h). Op grond van deze ervaringen besloot ik:

- de opdracht met de tabel te handhaven in de derde versie van de leerlingentekst, maar nu vanuit de verwachting dat argumentaties op basis van omkeerbaarheid gegeven zouden worden;
- voor de nascholingscursus een opdracht te ontwerpen om de problematiek van theoretische onvolledigheid aan de orde te stellen.

Schriftelijke antwoorden (derde versie)
Uit de door circa 45 groepen ingeleverde schriftelijke antwoorden op de drie geciteerde onderdelen van de tabel-opdracht bleek dat circa 85% van deze groepen gekozen had voor de trits 'oneens-eens-eens'. Een aantal hiervan wees op de regelmaat van de getallen in de tabel. Hierbij werden termen als 'asymptoot' en 'nader tot nul' enkele malen genoemd.

Bij de beoordeling van de drie beweringen maakte ongeveer één kwart van alle groepen melding van een terugreactie. Enkele sprekende voorbeelden luidden:

> "Bij de reactie tussen blauwbaliet en water ontstaan robalaat en chloride, die weer reageren tot blauwbaliet en water."

> "[...] robalaat+chloride→blauwbaliet+water, dus blauwbaliet wordt telkens teruggevormd, dat is alleen niet zichtbaar."

In dit laatste antwoord wordt expliciet over een onzichtbare reactie gesproken. Dit gebeurde ook in andere antwoorden (bijvoorbeeld: "reactie blijft altijd doorgaan"). In deze groepen werd het (permanente) optreden van een reactie dus *toegekend* (zie verder §6.6).

Ongeveer 15% van de groepen heeft daarentegen geantwoord met overmaatachtige redeneringen, waarin blauwbaliet respectievelijk water 'opreageert' of 'wegreageert'. Een voor deze groepen karakteristiek antwoord luidde:

> "Door steeds meer water toe te voegen zal ook het laatste restje blauwbaliet reageren en dus verdwijnen."

In zulke antwoorden is nog geen sprake van theoretische onvolledigheid.

Docenten over (theoretische) onvolledigheid

Om docenten die de derde versie van de leerlingentekst wilden gebruiken hierop voor te bereiden, heb ik hen tijdens een nascholingsbijeenkomst o.a. de robalaatproeven (via toevoegingen; §4.4) laten uitvoeren die in deze versie zouden worden opgenomen. Bij één van deze proeven leidde toevoeging van water aan een blauwbalietoplossing tot een volledige kleuromslag van blauw in rose. Hierover stelde ik de volgende vraag:

> "Vinden jullie (als chemicus!) dat [hierbij] sprake is van een aflopende reactie?"

Om hun leerlingen te kunnen begeleiden is het nodig dat de docenten zich bewust zijn van de mogelijkheid om een reactie die aflopend lijkt, toch als onvolledig te beschouwen. De vraag was bedoeld om hierover een gesprek te voeren. Een docent reageerde als volgt:

protocol 5.V

1 B. Ja, op het moment dat ik de zaak bekijk dan zie ik geen blauw meer; ik zie alleen maar rose van dat robalaat en op dat moment heb ik het gevoel dat er op dat moment geen blauwbaliet meer is en dus is-ie op dat moment voor mij aflopend. Maar als ik daarna ga kijken, ik bedoel als ik zie dat 't terug kan, is-ie voor mijn gevoel als chemicus niet aflopend.

Hierop ontstond een discussie over de eindtoestand bij de uitgevoerde proef. Ik zei op een zeker moment dat chloride en robalaat "in ieder geval" aanwezig moeten zijn op grond van het reactieschema. Daarna vervolgde het gesprek:

2 J.v.D. (...) en in 't vervolg merk je die reactie kan ook terug. Dus robalaat en chloride kunnen ook reageren en of 't ook terugreageert dat ligt eraan hoe je die blauwe kleur die ontstaat nadat je weer chloride hebt toegevoegd, interpreteert. (...)

3 B. Voor mijn gevoel is er theoretisch altijd blauwbaliet aanwezig, maar als je extra chloride toevoegt dan reageert 't met robalaat onder vorming van blauwbaliet. Nou, zelfs voordat ik er chloride bij gooi zijn allebei de stoffen aanwezig. Dus moet 't reageren, alleen zo weinig dat je 't niet waarneemt. (...) Dat ze reageren met elkaar, dat weet ik pas nadat ik chloride aan de rose oplossing heb toegevoegd. Daarvoor wist ik dat nog niet; toen kon ik nog zeggen dat 't aflopend was en daarna niet meer.

4 A. Maar dan moet je even definiëren wat aflopend is. (...) D'r kan nog een klein beetje blauwbaliet zijn, maar dat zie ik niet, dat accepteer ik, maar dan noem ik 't toch praktisch aflopend. Of zeg je theoretisch aflopend is als er helemaal geen blauwbaliet meer aanwezig is. Daar zit je mee, dus dan moet je een afspraak maken voor je definitie.

In dit gesprek geeft B. duidelijk aan dat voor hem de omkeerbaarheid van een reactie impliceert dat de omzetting bij deze reactie nooit helemaal volledig zal zijn. In 3 redeneert hij dat de aanwezigheid van chloride en robalaat een reactie hiervan tot gevolg *moet* hebben. Deze niet-waarneembare reactie zorgt ervoor dat "theoretisch altijd blauwbaliet aanwezig" is. A. ziet hier een aanleiding in om twee types 'aflopend' te onderscheiden.

Het verband tussen theoretische onvolledigheid en omkeerbaarheid waar B. op wees, stemt overeen met de argumentatie van fred en max in protocol 5.IV. De betrokken docenten toonden zich bovendien aanspreekbaar voor verschillende betekenissen van de term aflopend. Daarmee functioneerde de beschreven vraag als bedoeld.

Naderhand rapporteerden docenten dat de meeste leerlingen naar hun indruk bij de tabel-opdracht tot de conclusie waren gekomen dat alle stoffen bij de robalaatproeven steeds aanwezig blijven. Daarbij hadden zij argumentaties op basis van omkeerbaarheid herkend.

5.6 Discussie en conclusies

Het kader waarin chemische reacties als volledig verlopend worden beschouwd, kan ter discussie worden gesteld via proeven en vragen over onvolledige omzettingen. Deze onvolledigheid kan vervolgens worden aangegrepen om op twee niveaus een probleem te stellen:

- Op het niveau van verschijnselen, door de onvolledigheid in verband te brengen met de constatering dat van de uitgangsstof(fen) een hoeveelheid over is, terwijl geen belemmeringen voor het verdere verloop van de omzetting aangewezen kunnen worden.

- Op corpusculair niveau, door een verband te leggen met de identiciteit van deeltjes ('waarom worden sommige wel en andere niet omgezet?').

Uit het onderzoek is gebleken dat de meeste leerlingen aanspreekbaar zijn voor problematisering op beide niveaus. In sommige gevallen merkten zij uit zichzelf op dat de onvolledigheid in strijd is met hun opvattingen over chemische reacties (§5.3). In de derde versie is problematisering via bepaalde opdrachten bewust nagestreefd. Veruit de meeste leerlingen toonden zich gevoelig voor de gekozen aanpak. Hierbij viel op dat zij de mogelijkheid van een 'dubbele overmaat' op grote schaal met hetzelfde argument verwierpen: indien men van beide reactanten een overmaat neemt, moet de reactie aflopen tot tenminste één van beide reactanten volledig is omgezet (§5.4).

Problematisering door onvolledigheid is geen onderwijsdoel op zich, maar moet een functie in het kader van de invoering van chemisch evenwicht vervullen. Historisch gezien is de anomalie tussen de onvolledigheid van een omzetting en de identiciteit van deeltjes door Pfaundler verklaard via een dynamisch model van chemisch evenwicht. De anomalie van een 'dubbele overmaat' kan hiermee verklaard worden, zonder dat daarbij een corpusculaire redenering noodzakelijk is.

In §5.5 hebben leerlingen een route aangegeven naar de invoering van de dynamisch evenwichtsopvatting. Zij bleken de theoretische onvolledigheid bij de zogenoemde tabel-opdracht vooral te verbinden met de omkeerbaarheid van de betrokken omzetting: stoffen die via één van beide reacties volledig omgezet dreigen te worden, kunnen via de andere reactie weer worden teruggevormd. Zodoende kwamen veel leerlingen tot het inzicht dat een omkeerbare reactie in principe 'nooit' volledig verloopt.

Daarbij kwam soms wel een nieuwe vraag naar voren: hoe kunnen stoffen worden teruggevormd via een reactie, terwijl het optreden van deze reactie niet uit waarnemingen is af te leiden? Dit probleem werd door sommige leerlingen opgelost door het optreden van deze reactie toe te kennen. Daarmee zetten zij een belangrijke stap in verband met de verklaring voor het probleem van de onvolledigheid. Om behalve de onvolledigheid ook de afwezigheid van reactieverschijnselen te kunnen verklaren, moet het gelijktijdig optreden van een reactie in de tegengestelde richting eveneens worden verondersteld. Daarmee zou een dynamisch model van chemisch evenwicht ingevoerd worden. In het volgende hoofdstuk bespreek ik in hoeverre dit model voor leerlingen in het onderzoek aantrekkelijk of acceptabel bleek te zijn.

In dit hoofdstuk is ook gebleken dat de betrokkenheid van leerlingen bij het onderwijs toenam, doordat zij problemen als gevolg van onvolledigheid herkenden. Zij toonden zich merkbaar verbaasd (protocol 5.II) en lieten soms duidelijk blijken dat het verrassende resultaat van de proeven een verklaringsbehoefte bij hen opriep (protocol 5.III). Bovendien bleek dat ook docenten werden aangesproken door een aanpak waarin onvolledigheid problematiserend werd benut. Zij vonden het kennelijk zinvol dat het begrip chemisch evenwicht op deze wijze werd voorbereid. Op grond van mijn onderzoek beveel ik dan ook aan om de onvolledigheidsproblematiek in leergangen meer nadruk te geven, dan nu gebruikelijk is. Daarmee wordt niet alleen een ervaringsbasis voor de invoering van dynamisch evenwicht gelegd, maar kan bovendien de betrokkenheid van leerlingen worden vergroot.

hoofdstuk 6

Dynamisch evenwicht

Met de aanduiding 'dynamisch evenwicht' in leerplannen en examenprogramma's wordt verwezen naar de hypothese dat in een toestand van chemisch evenwicht voortdurend twee tegengesteld gerichte reacties met even grote snelheden optreden. Dit optreden wordt niet door waarnemingen ondersteund, maar aan een evenwichtstoestand *toegekend*. In dit hoofdstuk gaat het om de vraag waarop deze toekenning gebaseerd wordt. Antwoorden uit de wetenschapshistorie, uit leergangen en van docenten en leerlingen komen aan de orde.

6.1 Inleiding: waarneembare reacties

Voorafgaand onderwijs
Chemische reacties worden aanvankelijk verbonden met *waarnemingen*. De eerste voorbeelden in het Nederlandse scheikunde-onderwijs gaan gepaard met opvallende en vaak spectaculaire verschijnselen: kleurverandering, gasontwikkeling en/of energie-effect. De keuze van dergelijke voorbeelden hangt samen met de wens om chemische reacties van (minder opvallende) fysische processen te onderscheiden. Wezenlijk voor de chemische reactie blijkt dan de omzetting van stoffen in andere stoffen. Dit aspect wordt expliciet vermeld in het vigerende leerplan voor 3-VWO, waarin onder de kop "chemische reacties" als eerste staat:

> "Gebeurtenissen waarbij stoffen zich omzetten in andere stoffen; merkbaar aan het veranderen van stofeigenschappen." (O&W, 1984, p.3)

Het woord "merkbaar" verbindt chemische reacties met waarnemingen, al worden de waarneembare proceskenmerken (zoals energie-effecten) niet met name genoemd.

De Vos heeft een poging beschreven om leerlingen van 3-HAVO/VWO tot het inzicht te brengen, dat een chemische reactie kan optreden *zonder* dat dit uit waarnemingen blijkt. Hiermee stelde hij zich tot doel om "een meer theoretisch reactiebegrip te ontwikkelen" (De Vos, 1985, p.55-57). In zijn opzet voerden leerlingen eerst een proef uit waarbij na menging van twee heldere, kleurloze oplossingen een wit neerslag optreedt. Vervolgens liet hij leerlingen de betrokken wit gekleurde reactanten in zuivere, vaste toestand in een mortier samenwrijven. Ongeveer de helft van de leerlingen rapporteerde over deze laatste proef dat volgens hen ook in dit geval een chemische reactie was opgetreden, waarbij zij vooral naar de overeenkomst met de neerslag-proef verwezen. Zij kenden dus het optreden van een reactie toe. Ik merk hierbij op dat de betrokken reactie in principe wel met verschijnselen in verband te brengen is, in dit geval bijvoorbeeld met behulp van röntgendiffractie.

Preconcepties
In het preconceptie-onderzoek van Mertens werden vragen over een fles met zuivere alcohol gesteld (§5.1). In de inleidende tekst van de vraag werd gegeven

dat alcohol bij kamertemperatuur verdampt, omdat je alcohol kunt ruiken als de dop van de fles wordt gehaald. Hierna luidde één van de vragen:

"Gaat het verdampen door wanneer we de dop er weer op doen?"

Op deze vraag antwoordden veel (groepen) leerlingen bevestigend, met een verwijzing naar de mogelijkheid dat zowel verdamping als condensatie kan optreden. Er waren antwoorden die beschreven dat een hoeveelheid alcohol eerst verdampte, vervolgens condenseerde tegen de wand van de fles en dan weer terugstroomde in de vloeistof. Slechts in sommige van deze antwoorden werd vermeld dat deze drie processen gelijktijdig en continu plaatsvinden. Deze redeneringen lijken op kringloopvoorstellingen die bijvoorbeeld in biologie- en aardrijkskunde-onderwijs voorkomen. Condensatie aan het vloeistofoppervlak werd niet of nauwelijks vermeld[1].

Geconcludeerd werd dat leerlingen het toekennen van een niet-waargenomen proces vooral baseren op het inzicht dat aan de voorwaarden voor het optreden van het proces voldaan is. Het toekennen van twee *gelijktijdig* optredende processen lijkt problematisch te zijn, vooral indien deze processen niet ruimtelijk gescheiden optreden. In de dynamische opvatting van chemisch evenwicht is juist de eenheid van tijd én ruimte essentieel.

6.2 Wetenschaps-historische ontwikkeling

Beschrijvingen van chemisch evenwicht in termen van tegengestelde reacties die met gelijke snelheden optreden, zijn vanaf de jaren '50 van de vorige eeuw door verschillende onderzoekers op verschillende manieren geformuleerd. Hierbij onderscheid ik twee verschillende benaderingen: één waarin de argumentatie vooral op corpusculaire voorstellingen is gebaseerd en één waarin dit niet expliciet het geval is. Het is niet geheel duidelijk wanneer en door wie de term 'dynamisch' in dit verband is geïntroduceerd. Zeker is wel dat voor deze term al in de vorige eeuw gekozen is om een tegenstelling met 'statisch evenwicht' tot uitdrukking te brengen (Zie bijvoorbeeld Nernst, 1898, p.402 en 538 en Ostwald, 1902, p.102).

Corpusculaire benadering

In 1850 postuleerde A.W. Williamson de stelling dat in een zuivere stof voortdurend atomen tussen de moleculen worden uitgewisseld. Hoewel hij niet verwees naar energienoties formuleerde Williamson in feite een dynamische opvatting van de chemische binding. Hij viel hiermee de toen gangbare gedachte aan dat atomen zich niet zouden verplaatsen indien een systeem macroscopisch niet veranderde in de tijd. In het geval van chemische reacties beperken atomen zich volgens Williamson niet tot plaatsverwisselingen tussen moleculen van hun oorspronkelijke soort, maar gaan ze ook combinaties aan met atomen die aanvankelijk in moleculen van andere soorten voorkwamen. Daardoor ontstaan nieuwe moleculen (Williamson, 1850).

---

[1] Voorbeelden van zulke antwoorden en analyses hiervan worden beschreven door Mertens (1986), p.14-17.

In een later werk over "the dynamics of chemistry" beschreef Williamson o.a. de reactie van ijzer(III)chloride en isocyaanzuur, HSCN. De rode kleur die bij menging van oplossingen van beide stoffen ontstaat, beschouwde hij als het gevolg van een "interchange of iron and hydrogen". Zo'n reactie werd door Williamson aangeduid met de term "double decomposition"[2]. Hij stelde dat de omzetting voortdurend doorgaat in het mengsel:

> "The quantity of the products of this interchange remains constant, because a similar double decomposition, equal in absolute number of atoms per unit of time, is constantly going on between these products, reproducing the original compounds." (Williamson, 1851-54, p.94)

Deze bewering werd volgens Williamson bewezen door het experimentele gegeven dat de rode kleur verdwijnt als gevolg van het toevoegen van geconcentreerd zoutzuur. Hij verbond dus de omkeerbaarheid van de reactie (door toevoegingen) met de veronderstelling dat beide tegengestelde reacties blijven optreden. Williamson stelde de onvolledigheid van de betrokken omzetting niet ter discussie. Daarentegen was deze in zijn redenering impliciet opgenomen. Hoewel Williamson de term '(dynamisch) evenwicht' niet hanteerde, kan zijn theorie beschouwd worden als de eerste waarin een dergelijke evenwichtsopvatting wordt verwoord.

In 1850 had Clausius, onafhankelijk van Williamson, de mechanische warmtetheorie opgesteld waarin warmte op moleculair niveau gezien wordt als een bewegingsvorm. Later werkte hij deze theorie verder uit. Zo formuleerde hij de hypothese dat individuele moleculen van dezelfde soort bij een bepaalde temperatuur allen bewegen, maar als gevolg van onderlinge botsingen verschillende snelheden hebben (Clausius, 1857). Deze snelheden zijn verdeeld rondom een gemiddelde waarde, die met de genoemde temperatuur correspondeert. Op grond hiervan stelde Clausius een kinetische theorie op voor de verdamping van zuivere vloeistoffen. Alleen moleculen die aan bepaalde bewegingsvoorwaarden voldoen, kunnen uit de vloeistof ontsnappen. Na het bereiken van de verzadigde dampspanning treedt volgens Clausius een toestand in waarin gemiddeld evenveel moleculen per tijdseenheid de dampfase binnentreden als de vloeistoffase:

> "Der eintretende Gleichgewichtszustand ist demnach nicht ein Ruhezustand, in welchem die Verdampfung aufgehört hat, sondern ein Zustand, in welchem fortwährend Verdampfung und Niederschlag stattfinden, die beide gleich stark sind, und sich daher compensiren." (Clausius, 1857, p.362)

In een artikel uit 1867 besprak Pfaundler de problematiek van onvolledige dissociaties[3]. Eerst noemde hij de mogelijkheid om deze te verklaren door te stellen dat bij een zekere temperatuur een bepaalde evenwichtsdruk hoort die, indien deze bereikt is, verdere dissociatie verhindert. Maar Pfaundler vond een

---

[2]Williamson (1851-54). In hedendaagse chemische termen kan deze reactie worden omschreven als de vorming van een ijzer-thiocyanaatcomplex (dat verantwoordelijk is voor de rode kleur). Met de term 'double decomposition' wordt dan aangegeven dat hierbij zowel ijzer(III)chloride als isocyaanzuur 'ontleed' worden.

[3]Pfaundler (1867); dit artikel wordt uitvoerig besproken in Lund (1968).

dergelijke verklaring in fenomenologische termen onbevredigend en formuleerde in plaats daarvan twee mogelijke verklaringen op corpusculair niveau: ofwel alle moleculen ondergaan eenzelfde verandering (waarbij de binding zwakker wordt en de afstanden tussen de atomen binnen een molecuul toenemen), waardoor zij in een toestand overgaan die tussen de volledig gebonden en de volledig gedissocieerde toestand in ligt; ofwel een aantal van de moleculen dissocieert volledig, terwijl de overige onveranderd blijven.

Pfaundler verwierp de eerste verklaring omdat deze niet overeenstemde met experimentele feiten, zoals het aantonen door Von Pebal van zowel ammoniak als waterstofchloride in de onvolledig gedissocieerde damp van ammoniumchloride (§5.2). De tweede verklaring riep daarentegen het in §5.2 geciteerde probleem van de identiciteit van moleculen op. Voor een oplossing van dit probleem verwees Pfaundler naar de theorie van Clausius, waarin niet alle moleculen op hetzelfde tijdstip zich in dezelfde 'bewegingstoestand' bevinden. Op basis hiervan stelde Pfaundler:

> "Ich gehe nun zur Erklärung der *Dissociation* der *Dämpfe* über und stelle zu diesem Zwecke die Hypothese auf, dass im Dampfe einer theilweise zersetzen Verbindung, so lange die Temperatur dieselbe bleibt, eine *ebenso grosse Anzahl von Molekülen sich spaltet, als sich durch Begegnung wieder vereiniget.*" (Pfaundler, 1867, p.59)

Door er vanuit te gaan dat afzonderlijke moleculen van dezelfde soort op hetzelfde tijdstip bij verschillende veranderingen betrokken kunnen zijn, was Pfaundler dus in staat om zijn probleem op te lossen. Hierbij werd de identiciteit van moleculen statistisch geïnterpreteerd. Dit betekende een nieuw gezichtspunt op dat ogenblik.

In het vervolg van dit artikel werkte Pfaundler zijn theorie verder uit in verklaringen voor het ontstaan van evenwichtstoestanden en voor de invloed van temperatuur en van het toevoegen en/of onttrekken van reactanten op evenwichtstoestanden. In §7.2 zal ik deze bespreken.

Niet-corpusculaire benadering

De onvolledige omzetting van bariumsulfaat en kaliumcarbonaat in bariumcarbonaat en kaliumsulfaat die optreedt in een kokende waterige oplossing werd door Rose (in 1855) verklaard door aan te nemen dat het ontstane kaliumsulfaat inwerkt op het gelijktijdig gevormde bariumcarbonaat, waardoor bariumsulfaat wordt teruggevormd. Rose was op de hoogte van de omkeerbaarheid van de betrokken omzetting, evenals Malaguti die in 1857 naar aanleiding van hetzelfde probleem een voorstelling beschreef waarin een reactie in tegengestelde richting gaat optreden zogauw kleine hoeveelheden van de twee genoemde produkten zijn ontstaan. Omdat de uitgangsstoffen langzaam verdwijnen neemt de snelheid van de oorspronkelijke reactie gestaag af, terwijl die van de reactie in tegengestelde richting juist langzaam toeneemt naarmate meer bariumcarbonaat en kaliumsulfaat ontstaan. Als beide tegengestelde reacties met gelijke snelheid verlopen, ontstaat een toestand waarin geen veranderingen meer optreden (Ostwald, 1902, p.57).

In de jaren '60 van de vorige eeuw hebben Guldberg en Waage wiskundige formules opgesteld waarin zij een samenhang tussen concentraties van stoffen in

een evenwichtstoestand tot uitdrukking brachten (zie §3.1). Aan de afleiding van hun eerste formule in 1864 lag een kwalitatief evenwichtsbegrip ten grondslag waarin zij de werking van twee tegengestelde *chemische krachten* veronderstelden[4]. In een tweede artikel uit hetzelfde jaar stelden zij dat de chemische kracht bij een reactie evenredig is met, en tot uiting komt in, de *snelheid* van die reactie. Zij formuleerden ditmaal een evenwichtsbegrip waarin twee tegengestelde reacties met dezelfde snelheid optreden. Daarbij maakten zij geen expliciet gebruik van corpusculaire voorstellingen (zie Lund, 1965 en Snelders, 1973).

6.3 Onderwijs-historische ontwikkeling

Wet van Guldberg en Waage

In de onderwijs-historische ontwikkeling van chemisch evenwicht heeft de zogenoemde 'Wet van Guldberg en Waage' een belangrijke rol gespeeld. Deze wet heeft betrekking op een kwantitatieve beschrijving van chemisch evenwicht op basis van reactiesnelheidsvergelijkingen en lijkt ontleend te zijn aan een artikel van Guldberg en Waage uit 1879 (zie §3.3).

In een groot aantal Nederlandse leergangen uit de periode van 1910 tot 1968 was de invoering van dynamisch evenwicht nauw verbonden met deze wet. Ik beschrijf de aanpak uit B (1946), die in dit opzicht representatief is. Na een paragraaf over omkeerbare reacties (beschreven als reacties "die zowel van links naar rechts als van rechts naar links" kunnen verlopen) volgt één over chemisch evenwicht. Hierin staat "het omkeerbare proces $A+B \rightleftarrows C+D$ in een homogeen stelsel" centraal. Nadat een wiskundige formule is gegeven voor de snelheid, S_1, van de reactie "van links naar rechts", stelt de auteur:

> "[...] als men een zekere hoeveelheid van stof A bij stof B voegt, [zal] de snelheid S_1 voortdurend afnemen, doordat de concentraties van A en B tengevolge van de reactie steeds verminderen. Zodra echter door de omzetting een weinig van stof C en van stof D is gevormd, zal het mogelijk zijn, dat bij een botsing van deze molecuulsoorten de oorspronkelijke stoffen A en B worden teruggevormd." (B, 1946, deel IB, p.83)

In dit citaat wordt op grond van een corpusculair botsingsmodel beredeneerd dat *naast* de reactie van A en B al spoedig een reactie van C en D zal optreden. Vervolgens wordt een formule voor de snelheid, S_2, van deze tweede reactie opgesteld. Deze snelheid zal aanvankelijk nul zijn, omdat de concentraties van C en D in eerste instantie gelijk aan nul zijn. Met het stijgen van deze concentraties neemt S_2 toe. Het betoog wordt als volgt afgerond:

> "S_1 wordt steeds kleiner, S_2 neemt voortdurend toe uitgaande van de waarde nul. Zodra S_1 gelijk geworden is aan S_2 betekent dit, dat er per seconde evenveel van stof A wordt gevormd als er verdwijnt en dat dit evenzeer geldt voor de andere stoffen." (B, 1946, deel IB, p.83)

---

[4]Een chemisch krachtbegrip werd in het kader van de chemische affiniteit gehanteerd (§3.1). Guldberg en Waage namen het over van Bunsen, bij wie Waage enige tijd gewerkt had. Zie Lund & Hassel (1964).

Hier wordt het *ontstaan* van een evenwichtstoestand beschreven uitgaande van het gelijktijdig optreden van twee tegengestelde reacties. De invoering van een dynamisch evenwicht wordt hier dus gebaseerd op een corpusculaire interpretatie van de term omkeerbare reactie en verbonden met de omschrijving van een ontstaansmechanisme voor een chemisch evenwicht. Dit mechanisme vertoont sterke overeenkomsten met de beschreven redenering van Malaguti (§6.2).

Door vervolgens de uitdrukkingen voor S_1 en S_2 aan elkaar gelijk te stellen, wordt een mathematische vergelijking voor de evenwichtstoestand van het type (5) uit §3.3 verkregen.

Verklaring voor onvolledigheid

In dezelfde periode verschenen echter ook enkele schoolboeken waarin voor een andere invoeringswijze is gekozen, namelijk via problematisering van de identiciteit van moleculen in verband met de onvolledigheid van reacties. In §5.2 heb ik beschreven hoe in K& de onvolledige ionisatie van fosforzuur in waterige oplossingen werd besproken. Na de opmerking dat het onwaarschijnlijk is dat slechts een gedeelte van de fosforzuurmoleculen tot ionisatie in staat zou zijn, gaan de auteurs in op het indampen van een fosforzuuroplossing. Hierbij treedt volgens hen het omgekeerde proces van ionisatie op (vereniging van ionen tot moleculen; ionisatie en vereniging worden aangeduid met de termen "reactie (1)" respectievelijk "reactie (2)"). De tekst vervolgt:

> "Wanneer nu **alle** moleculen volgens (1) kunnen ioniseren, en de oplossing blijkt toch slechts **weinig ionen** te bevatten, dan is dit slechts te begrijpen, als **in de oplossing, tegelijk met reactie (1) ook voortdurend reactie (2) plaats vindt!** In de fosforzuuroplossing worden dus wel voortdurend ionen gevormd, maar steeds wordt ook een aantal ionen weggenomen, doordat zich weer ongesplitste moleculen terugvormen. Zo ontstaat een **stationaire toestand**: op elk ogenblik is slechts een klein aantal ionen aanwezig. Het **aantal ionen is constant**, maar het zijn **telkens verschillende deeltjes!**" (K&, 1954, deel 1, p. IV-78)

Deze redenering lijkt op de argumentatie van Pfaundler. *Het doel is in beide gevallen om een verklaring voor de onvolledigheid van een omzetting te geven.* Uitgangspunt is, naast de omkeerbaarheid van de betrokken reactie, een corpusculair model dat ten behoeve van de gezochte verklaring wordt uitgebreid met statistische kenmerken. Dit laatste komt in het citaat tot uitdrukking in de zinsnede "telkens verschillende deeltjes".

De invoering van een dynamisch evenwicht ter verklaring van de onvolledigheid van een chemische omzetting komt ook voor in H (1921, p.88-90), P (1938, p.67-68) en F&H (1939). In deze leergangen zijn voorbeelden van onvolledige dissociaties in de gasfase gekozen. In H en P wordt de invoering van de dynamische opvatting gebaseerd op moleculair-kinetische redeneringen, die overeenkomen met die van Pfaundler. F&H beschouwen de onvolledige dissociatie van waterstofjodide bij 445°C en redeneren:

> "De omstandigheden bij deze proef zijn dus van dien aard dat zowel de vorming als de ontleding van joodwaterstof gelijktijdig plaatsvinden. Dientengevolge wordt in het eerste geval niet alle jodium en waterstof tot HJ verenigd, en in het laatste geval niet alle joodwaterstof in de elementen ontleed." (F&H, 1939, deel IIB, p.35)

Ook hier wordt het gelijktijdig optreden van twee tegengestelde reacties gezien als een verklaring voor de onvolledigheid van de omzetting. Opvallend is echter dat de auteurs deze opvatting niet invoeren op basis van een corpusculaire argumentatie. In het onderstaande ga ik hier nader op in.

Een dynamisch model

Alvorens de aanpak van recente leergangen te bespreken, wil ik op grond van het voorgaande de betekenis van de aanduiding dynamisch evenwicht nader omschrijven. Daartoe kom ik terug op het in §4.2 gemaakte onderscheid tussen kringloopreacties en omkeerbare reacties. De ontleding van waterdamp bleek omkeerbaar door temperatuurvariatie: bij een bepaalde druk en temperatuur, ongeacht of men deze 'van onder' of 'van boven' heeft bereikt, neemt het systeem altijd hetzelfde volume in. Uit dit volume kan de samenstelling van het mengsel worden berekend, waaruit blijkt dat de omzetting bij gegeven druk in een zeker temperatuurtraject meetbaar onvolledig is. Het mengsel wordt bij hogere temperaturen gekenmerkt door een steeds lager waterdampgehalte.

Indien de temperatuur gefixeerd wordt op een waarde in dit traject zal het volume bij constante druk na enige tijd constant worden. De samenstelling van het systeem verandert vanaf dat moment niet verder. Er is een toestand van chemisch evenwicht ingetreden. In deze toestand hebben alle systeemparameters (druk, temperatuur, volume, samenstelling) een constante waarde. Zo'n toestand wordt dus gekenmerkt door uiterlijke rust.

Om de onvolledigheid van de omzetting onder deze omstandigheden te verklaren, kan men beredeneren dat ondanks de uiterlijke rust toch chemische reacties optreden. Hiertoe zijn redeneringen op twee niveaus mogelijk. De eerste is gebaseerd op de moleculaire theorie die door Clausius en Pfaundler is opgesteld (§6.2). Wezenlijk hierin is dat aan overigens identieke moleculen verschillen in bewegingstoestand worden toegekend. Hieruit volgt bijvoorbeeld dat watermoleculen niet alleen bij verhoging van de systeemtemperatuur kunnen dissociëren, maar dat er ook bij een constante systeemtemperatuur moleculen zullen zijn, die via onderlinge botsingen voldoende inwendige energie hebben verkregen om te kunnen dissociëren. Op grond van de mechanische warmtetheorie moet men dus concluderen dat in een evenwichtstoestand op corpusculair niveau in beide richtingen 'reacties' kunnen optreden. Deze 'reacties' zijn niet verbonden met stofomzettingen op macroscopisch niveau.

Een andere redeneringswijze is aangegeven in het werk van Rose en Malaguti en in het citaat uit F&H. Toegepast op het water-evenwicht luidt deze als volgt: onder de ingestelde omstandigheden kunnen beide reacties *in principe* verlopen. Alle voor beide reacties benodigde stoffen zijn immers aanwezig en met elkaar in contact. Bij de heersende temperatuur en druk kan dus zowel de ontleding als de vorming van water optreden. Het ontbreken van waarneembare veranderingen wordt verklaard door aan te nemen dat beide reacties met gelijke

snelheid optreden, zodat ze elkaars effect teniet doen. Ook deze redenering biedt een mogelijkheid om de onvolledigheid van een omzetting te verklaren[5]. Daarbij wordt de regel gehandhaafd dat een reactie optreedt wanneer aan alle voorwaarden is voldaan[6].

In beide redeneringen wordt het optreden van reacties op grond van een theoretische argumentatie aan een evenwichtstoestand toegekend. Het gelijktijdig optreden van tegengestelde processen is geen empirisch gegeven. Een experimenteel bewijs voor de dynamische opvatting kan m.i. niet geleverd worden[7]. Om deze reden spreek ik van een *dynamisch model*.

Een omkeerbare reactie is in §4.2 beschreven als een verschijnsel. De vorming en de ontleding van water volgens de vergelijkingen (1a) en (1b) kunnen in één systeem slechts na elkaar optreden. De reacties die in het dynamisch model aan een optredende evenwichtstoestand worden toegekend, kunnen met dezelfde vergelijkingen worden aangeduid. Omdat deze reacties niet met verschijnselen gepaard gaan, is de term omkeerbare reactie hiervoor niet bruikbaar. Ik spreek in dit verband van *tegengestelde reacties*, waarbij ik de meervoudsvorm hanteer om te benadrukken dat tegengestelde reacties uitsluitend tegelijkertijd optreden.

Zolang een omkeerbare reactie in één van beide richtingen plaatsvindt, kan men op grond van dezelfde redeneringen als hierboven het optreden van tegengestelde reacties (met ongelijke snelheden) veronderstellen. Uit de waarneembare stofomzetting kan worden afgeleid welke van de twee met de grootste snelheid plaatsvindt. Het ontstaan van een evenwichtstoestand bij een omkeerbare reactie, kan men zich voorstellen met een mechanisme zoals dat hiervoor beschreven is uit B (1946).

In §4.2 stelde ik dat een onderscheid tussen omkeerbare reactie en kringloopreactie van belang is in verband met chemisch evenwicht. Met behulp van het dynamisch model kan ik deze stelling verduidelijken. Een omkeerbare reactie kan leiden tot de instelling van een evenwichtstoestand, waarvan het ontstaan met behulp van 'tegengestelde reacties' kan worden beredeneerd. Dit is niet het geval bij een kringloopreactie. Zo is het onzinnig om te veronderstellen dat aan de elektrodes waar de elektrolyse van water plaatsvindt, tegelijkertijd de vorming ervan via de verbrandingsreactie verloopt. Men kan een kringloop-

---

[5]Deze redenering wordt gekenmerkt door een zeker formalisme, maar voldoet aan de structuur van een causale verklaring (Zie bijvoorbeeld De Vos, 1985, p.94-99).

[6]Als voorwaarde voor het waarneembaar plaatsvinden van (bijvoorbeeld) de ontleding van waterdamp kan men ook stellen dat de reactieprodukten (waterstof en zuurstof) slechts in beperkte mate aanwezig mogen zijn: als de spanning van deze gassen een zekere waarde heeft bereikt (bij een bepaalde temperatuur en druk), stopt de waarneembare ontleding. Voor het toekennen van reacties volgens de weergegeven redenering moeten reactieprodukten buiten beschouwing worden gelaten: alleen de aanwezigheid van (en het contact tussen) reactanten onder overigens geschikte omstandigheden 'telt'.

[7]Over deze kwestie heeft in het Chemisch Weekblad in 1908 (!) een discussie plaatsgevonden. Uitkomst hiervan was dat de dynamische opvatting niet bewezen kan worden zonder gebruik te maken van een aantal hypotheses; een zuiver experimenteel bewijs werd onmogelijk geacht. Zie Cohen & Strengers (1908) en Smits & Wibaut (1908).

reactie dan ook niet verbinden met tegengestelde reacties, noch met de instelling van een chemisch evenwicht.

Verfeitelijking van dynamisch evenwicht
Sinds de invoering van de mammoetwet komt een wiskundige afleiding van een evenwichtsformule op basis van snelheidsvergelijkingen steeds minder in leergangen voor[8]. Met het achterwege laten van de afleiding is een motief voor de invoering van dynamisch evenwicht vervallen. Een ander mogelijk motief, een verklaring voor de onvolledigheid van een omzetting, wordt tegenwoordig evenmin gehanteerd. Ik zal hieronder beschrijven op welke wijze deze invoering in recente leergangen plaatsvindt.

Meestal speelt hierbij een proef waarbij de stof jood wordt verdeeld over twee oplosmiddelen een centrale rol[9]. Bij een bespreking van deze proef wordt gesteld dat zich na enige tijd een situatie voordoet waarin de concentraties van jood in beide vloeistoflagen constant zijn. In C wordt over zo'n situatie opgemerkt dat deze op twee manieren kan worden opgevat: ofwel *statisch*, waarbij "elk joodmolecuul blijft zitten waar het zit", ofwel *dynamisch*,

> "[...] dat wil zeggen dat per seconde evenveel joodmoleculen van de ene vloeistof naar de andere vloeistof verhuizen als omgekeerd."
> (C, 1984, 4V, p.142)

Hierna volgt een beschrijving van een analoog experiment, waarbij gebruik is gemaakt van radioactief jood. De bedoeling is om aan te tonen dat de keuze tussen statisch en dynamisch in het voordeel van de laatste opvatting moet uitvallen. Dit 'bewijs' verloopt via een redenering waarin het waarnemen van radioactiviteit in een vloeistoflaag, die reeds een evenwichtsconcentratie van niet-radioactief jood bevatte, centraal staat. In R&F en in K&G is een soortgelijk betoog opgenomen. Niet vermeld wordt dat na verloop van tijd de hoeveelheid radioactiviteit in beide lagen constant zal worden. Deze toestand kan echter opnieuw als een statische toestand worden gezien: er treden dan immers geen veranderingen meer op.

Zoals gezegd heeft de dynamische opvatting het karakter van een model dat dus niet experimenteel bewezen kan worden. Via de beschreven redenering kan men trachten om dit model *aannemelijk* te maken. De waargenomen radioactiviteit kan gezien worden als een bevestiging van de theorie dat deeltjes in een vloeistof zich kunnen verplaatsen en daarbij in dit geval ook een grenslaag kunnen passeren. Daarmee wordt de hypothese van doorgaande verhuizingen in twee richtingen ondersteund. De proef *bewijst echter niet* dat dergelijke verhuizingen nog plaatsvinden, nadat de evenwichtsverdelingen van radioactief en niet-radioactief jood zijn bereikt. Voor wat betreft chemische evenwichten vergt

---

[8]Zie §3.3: hierbij is formule (5) vervangen door de relatie 'concentratiebreuk=K'.
[9]R&F (1985, 4V, p.197-198); C (1984, 4V, p.142-145); K&G (1983, 4H, p.191-194). Overigens was een bespreking van dynamisch evenwicht lange tijd gangbaar in het kader van de behandeling van fase-overgangen in het natuurkundeonderwijs. Recent komt zo'n bespreking alleen nog voor in Middelink (1979), p.195-196. Dit betreft een schoolboek voor bovenbouw VWO/HAVO.

de theorie bovendien nog een aantal aanpassingen, waarbij moleculen zich niet alleen verplaatsen, maar ook worden omgezet.

In plaats van de dynamische evenwichtsopvatting als model te onderwijzen, heeft men gekozen voor methoden die erop gericht zijn om leerlingen te overtuigen van de 'werkelijkheid' van deze visie. In dit kader past niet alleen de beschreven radioactiviteits-proef[10], maar ook de behandeling van simulaties en analogieën van een dynamisch evenwicht.

Het bekendste simulatievoorbeeld is een proef waarin leerlingen water verplaatsen tussen twee reservoirs met behulp van bekertjes[11]. Naast deze en andere proeven en spelletjes worden tegenwoordig ook simulatieprogramma's voor computers aangeboden en beschreven[12]. In al deze simulaties is het dynamisch model als *uitgangspunt* gekozen. Een motivering van dit model komt niet aan de orde. In plaats daarvan tracht men de opvatting dat in een toestand van chemisch evenwicht (nog steeds) processen plaatsvinden via concrete voorstellingen aanschouwelijk en als feit aannemelijk te maken. Overigens impliceert de keuze voor simulaties m.i. aanvaarding van de onmogelijkheid om het dynamische karakter via waarnemingen aan een chemisch evenwicht als feit te bewijzen.

Bij analogieën gaat het om systemen en situaties van niet-chemische aard waarin sprake is van elkaar tegenwerkende of opheffende processen. Een schoolvoorbeeld in dit verband is een rij voor een loket met een constante lengte van 12 personen (C, 1984, 4V, p.143). In dit voorbeeld en in de meeste andere wordt een *stationaire toestand* beschreven, waarin aan- en afvoer elkaar compenseren[13]. De bedoeling van de behandeling van analogieën kan zijn om het dynamisch model in een breder verband te plaatsen (koppeling met leefwereld). Analogieën kunnen net als simulaties ook tot doel hebben om het dynamisch model aanschouwelijk voor te stellen. Omdat deze analogieën meestal op stationaire toestanden betrekking hebben en niet op een dynamisch evenwicht in chemische zin, kan het gebruik ervan een misleidende invloed hebben op de begripsvorming van leerlingen in verband met een chemisch evenwicht (dit wordt ook betoogd door Johnstone et al., 1977).

---

[10]Een poging om leerlingen met een ander experiment (zonder toepassing van radioactiviteit) te overtuigen van het dynamische karakter van chemisch evenwicht wordt beschreven door Bertelsbeck & Von Freyberg (1988).

[11]Een eerste beschrijving van dit experiment komt van Sorum (1948). Later zijn varianten beschreven door Martin (1976) en Hansen (1984). Het eerste Nederlandse schoolboek waarin een versie is opgenomen is G& (1971, 4V, p.210). Tegenwoordig staan versies van deze proef in C (1984, 4V, p.145) en K&G (1983, 4H, p.191).

[12]Andere simulatieproeven (of -spelletjes) zijn beschreven door Docters van Leeuwen (1967), Battino (1975), Harsch (1984) en Umans (1983a). In het NICL-Overzicht Natuurwetenschappen VO (1989, p.42-45) worden vijf verschillende programma's aangeboden waarin een dynamisch evenwicht wordt gesimuleerd. Elders worden simulatieprogramma's o.a. beschreven door Kober (1987) en Cullen Jr. (1989).

[13]Voorbeelden van andere analogieën staan in Umans (1982 en 1983b), Broekhuisen (1983) en Olney (1988). Hoewel de auteurs in deze artikelen zelf spreken over analogieën, drukt de term 'metafoor' (beeldspraak) wellicht beter uit dat de beschreven voorbeelden geen betrekking hebben op chemische systemen.

Na de invoering wordt het dynamisch model toegepast om verklaringen te geven voor het ontstaan van chemisch evenwicht en voor het herstel ervan na een verstoring. Hierop zal ik in §7.3 nader ingaan. Bovendien functioneert het model in een verklaring voor het zogenoemde 'aflopen' van een chemisch evenwicht: als één der betrokken stoffen voortdurend aan het reactiesysteem wordt onttrokken, kan één van de twee tegengestelde reacties niet langer plaatsvinden waardoor een volledige omzetting optreedt[14].

6.4 Gesprekken met docenten

Analogieën

Om docenten voor te bereiden op het werken met de derde versie van de leerlingentekst heb ik hen tijdens nascholingsbijeenkomsten geïnformeerd over ervaringen met de eerdere versies van deze tekst. In dat kader liet ik hen een gedeelte van protocol 5.I (zie §5.3) bestuderen. Naar aanleiding van de redenering van Leo in 9 ("Waarom zullen bepaalde moleculen van dezelfde stof wel omzetten en de andere niet?", etc.) stelde ik de vraag:

"Hoe zou je als docent op een dergelijke uiting van een leerling reageren?"

Ik vroeg me af of de docenten hierin het identiciteitsprobleem zouden herkennen en hoe zij daarmee om zouden gaan. Nadat zij enige tijd over een antwoord hadden kunnen nadenken, voerde ik met hen het volgende gesprek:

protocol 6.I

1 B. Ik zou 't probleem willen vereenvoudigen tot iets wat leerlingen zich kunnen voorstellen. Bijvoorbeeld: een lokaal vol met leerlingen, die los rond lopen en elkaar kunnen beetpakken. Loslopende leerlingen herken je bijvoorbeeld als moleculen met een rose kleur. Leerlingen hebben de neiging om elkaar te gaan beetpakken. Als leerlingen elkaar beetpakken als paren, herken je dat bijvoorbeeld aan een blauwe kleur. Als 't bijvoorbeeld erg koud is, houden leerlingen elkaar langer beet, zodat ze elkaar een beetje kunnen opwarmen. (...) Je kunt hier wel wat tegen inbrengen, maar zo zou ik 't probleem willen vereenvoudigen. Ik zou er denk ik niet uitkomen door alleen maar over die robalaat, blauwbaliet, water en chloride te blijven praten.

2 J.v.D. Dus je gebruikt een analogie...

3 C. Ik zou spontaan willen reageren op die leerling, en zo introduceer ik 't altijd in de klas: dit is een reactie die loopt niet tot het einde door; d'r is nog beginstof aanwezig. Er zijn twee mogelijke verklaringen zeg ik dan altijd: of de rest van de moleculen hebben geen zin om te reageren of er is een andere verklaring. Dan laat ik de klas bakkeleien of ze dat logisch vinden. Dat is de enige manier denk ik om eruit te komen.

[14]Zie R&F (1985, 4V, p.202); C (1984, 4V, p.147); K&G (1983, 4H, p.197).

4 B. Maar dat is toch een verschil in eigenschap: het wel of niet zin hebben.
5 C. Ja, dat ziet iedereen in, dat dat nonsens is. Dat kan niet.
6 J.v.D. En wat komt er dan uit? Of wat laat jij eruit komen?
7 C. Een soort frustrerende terugreactie, die alles wat opgebouwd wordt onmiddellijk weer afbreekt. Tegen deze leerling zou ik zeggen: *zie je 't nou* echt *van kleur veranderen?* Want hij zit te wachten tot 't blauw wordt. Daar zou ik op doorgaan.
8 J.v.D. Deze leerlingen kwamen er op grond van hun waarnemingen toen niet uit.
9 E. Kun je ze op weg brengen door 't af te koelen van 90 tot 55, en dan op 55 te houden? Dan heb je eigenlijk 't zelfde, want 't moet rose worden, en dan stopt 't ook halverwege. Want dan ga je juist de terugreactie laten verlopen. (...)
Ik heb zoveel tegen op voorstellingen waarbij moleculen iets willen. Ik vind dat een verwerpelijk beginsel, maar voor zoiets neig ik er toch het meest toe om te zeggen van: je hebt onder deze omstandigheden eigenlijk te maken met moleculen die niet weten wat ze willen. Of naar de ene of naar de andere kant. Dan weer de jas uit, en dan weer de jas aan.
10 J.v.D. Dat lijkt een beetje op die leerlingen in dat lokaal van [B.].
11 E. Ja, daarom spreekt 't me eigenlijk wel aan, alleen bij dat verhaal is 't minder wil, is 't meer toevalsfactoren en dat vind ik leuker. Je kunt er zo een beetje een voorstelling van maken. Iets wat je vreemd is een beetje voorstellen totdat het je wat vertrouwder wordt. 't Probleem is dan meestal dat je dan werkt naar een vertrouwdheid en niet tot een begrip of iets dergelijks.

In dit gesprek gaan C. (in 7) en E. (in 9) in op de betrokken proef. Zij geven manieren aan om de leerling te overtuigen van de onvolledigheid van de omzetting als zodanig. Daarentegen grijpt B. 'Leo's probleem' direct aan om de dynamische evenwichtsopvatting met behulp van een analogie te introduceren (1). Hij motiveert zijn keuze op grond van een zeker onvermogen ("Ik zou er..."). C. geeft in 3 aan dat hij deze opvatting wil invoeren door een corpusculaire redenering. Welke "andere verklaring" zijn leerlingen bedenken, komt in dit gesprek niet naar voren. In 11 komt E. terug op de analogie van B. Hij wordt aangesproken door het statistische kenmerk van diens analogie ("toevalsfactoren"). E. streeft naar een zekere "vertrouwdheid", maar hij betwijfelt of dit tot "begrip" leidt. In het niet-weergegeven vervolg van dit gesprek gaven A. en C. aan welke analogieën zij in dit verband geschikt vinden.

Ik interpreteer dit gesprek in samenhang met de manier waarop het dynamisch model in recente leergangen is opgenomen: ook deze docenten trachten de dynamische evenwichtsopvatting via concrete voorstellingen aannemelijk te maken en kiezen hierbij eveneens voor analogieën[15].

[15]Dat de keuze voor een analogie kan leiden tot blokkerende onderwijssituaties, had ik in een eerder stadium van het onderzoek op indringende wijze ervaren. Een docent wilde de opvatting dat er in een niet-evenwichtsperiode twee tegengestelde reacties plaats-

Onvermogen
In het vervolg van dezelfde bijeenkomst kwam een discussie-opdracht aan de orde, die ik had ontworpen met het oog op de problematiek van de invoering van het dynamisch model. Hierin citeerde ik uit leergang C:

> "Als er een 'heengaande' en een 'teruggaande' reactie optreedt en de snelheden waarmee deze twee reacties verlopen zijn gelijk, dan heeft een dynamisch evenwicht zich ingesteld." (C, 1984, 4V, p.146)

Hierna stelde ik de volgende vraag:

> "Vinden jullie dat er een 'heengaande' en een 'teruggaande' reactie optreedt in de reageerbuis als die op 55°C wordt gehouden?
> Zo nee, waarom niet? Zo ja, waaruit blijkt dit?"

Met deze vraag refereerde ik aan de eerder op deze bijeenkomst uitgevoerde robalaatproeven (§5.3). Ik wilde aansluiten op de verfeitelijking van het dynamisch model in schoolboeken en nagaan hoe docenten stonden tegenover de mogelijkheid om de dynamische opvatting experimenteel te bewijzen. De vraag leidde tot het volgende gesprek:

protocol 6.II

1	D.	Ik zie dat niet. Ik zie geen heen- en teruggaande reactie.
2	J.v.D.	Nee, en je vindt ook niet dat er een heengaande en een teruggaande reactie optreedt bij die situatie?
3	D.	Ja, dat hoeft niet.
4	C.	Nou ik vind van wel hoor.
5	E.	Vanuit mijn chemische kennis en ervaring zeg ik wel, heb ik geen enkele reden om dat niet aan te nemen. (...)
6	D.	Nee, maar kun je 't zien?
7	C.	Nee.
8	D.	Nee, o.k., dan zijn we 't daarover eens. (...)
9	A.	Ik vind het niet logisch vanuit de experimenten die je gedaan hebt (...) dat er op het moment van 55 graden, dat er een heengaande reactie en een teruggaande reactie is.
10	E.	Het blijkt niet uit deze proef, maar gewoon uit je chemische ervaring.

---

vinden aannemelijk maken door te zeggen: "Ik bedoel, als dit lokaal gevuld is met 50 personen en d'r lopen door die deur 10 naar buiten per minuut en door die deur 5 naar binnen..." Een leerling onderbrak hem echter: "Is dat reactie? Dat is toch geen reactie?" De docent vervolgde: "Nee, da's ook wel zo, maar 't gaat wel om het verdwijnen en verschijnen van deeltjes. En daar kan ik natuurlijk ook wel mensen voor gebruiken. Hierdoor verdwijnen er per minuut 5 en daar komen d'r 10 per minuut binnen. Wat gebeurt er dan hier met de hoeveelheid in 't lokaal? Die wordt steeds meer. Daar is weinig aan te doen." Hierop reageerde de leerling echter: "Nou, deur dicht doen", waarna de discussie in gelach smoorde.

11 J.v.D. Bedoel je dat je bij andere proeven hebt ervaren dat dat zo is?
12 E. Je wordt tijdens de opleiding zo gedrogeerd met deze stelling (...) je bent zo gewend in deze termen en beelden te spreken. Naar jouw idee klopt alles ermee; 't is voor jou een redelijk consistent verhaal geworden.
13 A. Maar dan heb je wel een hele kloof tussen de leerlingen en jou, want die hebben die achtergrond niet, dus je kunt ook niet met goede argumenten komen om te zeggen: *om die en die reden is het zo.* (...)
14 C. Vanuit de warmtebeweging: de moleculen blauwbaliet en robalaat zitten in hetzelfde bakje, ze hebben dezelfde temperatuur, ze hebben dezelfde energieverdeling (...) het kan dus niet zo zijn dat er niks gebeurt. Dat is voor iedereen...
15 A. Nou dat kan ik niet duidelijk maken.
16 C. ... duidelijk. Het blijkt nergens uit, maar het is logisch.
17 J.v.D. Daar zet je al een stap dat je zegt: ik kan het niet waarnemen.
18 C. Nee, ik kan 't niet waarnemen (...)
19 B. Je kunt hier zeggen: ik kan aannemen dat het een statisch evenwicht is, maar ik kan het *verklaren* met een dynamisch evenwicht. Da's het enige. Ik kan niet aangeven waarom het met alle geweld dynamisch is en niet statisch.

De docenten zijn het er over eens dat je het optreden van reacties in een evenwichtssituatie niet kunt waarnemen (zie 8). Het gesprek richt zich voornamelijk op de vraag op welke gronden deze reacties toegekend kunnen worden. In dit verband getuigen E., A. en B. (in respectievelijk 12, 13 en 19) van een zekere onmacht: hoewel ze zelf als chemicus overtuigd zijn geraakt van deze opvatting, zijn ze niet in staat om argumenten ervoor te expliciteren. A. wijst dan ook op een onderwijsprobleem (in 13). B. geeft in 19 niet aan *welke* verklaring het dynamisch model biedt.

Uit deze twee gesprekken trek ik de conclusie dat A., B. en E. de invoering van het dynamisch model als een onderwijsprobleem beschouwen. Zij hebben gebrek aan argumenten om deze opvatting als model te onderwijzen. Hun keuze voor analogieredeneringen in protocol 6.I interpreteer ik in verband met dit onvermogen. Daarentegen kiest C. ervoor om het dynamisch model in te voeren door gebruik te maken van corpusculaire argumenten, waarbij hij in 14 leek te verwijzen naar de theorie van Clausius (zie §6.2). Hij stelde bovendien dat deze aanpak zijn leerlingen aanspreekt (14 en 16).

Op grond van deze gesprekken en de beschreven analyse van recente leergangen concludeer ik dat *niet alleen voor leerlingen, maar ook voor docenten op herkenbare wijze moet worden aangegeven waarop de invoering van het dynamisch model in onderwijs gebaseerd kan worden.* Wat voor leerlingen en docenten een 'herkenbare wijze' is, moet uit het onderzoek naar voren komen.

6.5 Dynamisch evenwicht n.a.v. temperatuurvariatie

Opzet leerlingentekst (eerste versie)
Bij het ontwerpen van de eerste versie heb ik de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Op grond van de in §6.1 beschreven ervaringen van De Vos en van Mertens ging ik er vanuit dat leerlingen op een dynamisch evenwichtsopvatting zouden overgaan op basis van het inzicht dat aan alle voorwaarden voor het optreden van *beide* reacties voldaan is.
- Om na te gaan of dit model voor leerlingen en docenten een herkenbare functie zou kunnen krijgen, liet ik hen het gegeven dat enige tijd na verstoring van een evenwichtstoestand een nieuwe evenwichtstoestand wordt ingesteld, aan de hand van dit model verklaren. Ervaringen met dit aspect van de gekozen opzet komen in §7.4 aan de orde.

Bij de robalaatproeven met temperatuurvariatie (§4.3 en §5.3) treden chemische reacties op in een *homogeen systeem*. Bij de keuze van deze proeven hebben ervaringen uit literatuur (§3.4) en preconceptie-onderzoek (§6.1) een rol gespeeld (links-rechts scheiding respectievelijk kringlopen). Een heterogeen systeem zou leerlingen kunnen aanzetten tot redeneringen waarin reacties ruimtelijk worden gescheiden. In een homogeen systeem ontbreken grensvlakken waardoor een ruimtelijke scheiding mogelijk minder voor de hand ligt. Leerlingen zouden bovendien kunnen redeneren dat er in een heterogeen systeem geen of onvoldoende contact tussen reactanten is, waardoor niet voldaan is aan een reactievoorwaarde. Een dergelijke complicatie zou het toekennen van het gelijktijdig optreden van tegengestelde reacties in zo'n systeem kunnen blokkeren. De keuze voor een homogeen systeem hing dus samen met de wens om het dynamisch model voor leerlingen aanvaardbaar te maken.

Na de robalaatproeven werd de relatie tussen kleur, temperatuur en samenstelling van de oplossing via een aantal vragen aan de orde gesteld (§5.3). Hierna volgde deze opdracht:

"a) Welke reactie zal optreden als we de oplossing verwarmen van 50°C tot 60°C?
b) En als we de oplossing afkoelen van 60°C tot 50°C?
Stel: één van de reageerbuizen wordt voortdurend op 55°C gehouden.
c) Leg uit dat in principe dan zowel de [ene reactie] als de [andere reactie] kan verlopen.
d) Denken jullie dat één van beide of beide reacties ook verlopen als de temperatuur 55°C blijft?"

Via a) en b) zou duidelijk moeten worden dat 55°C in principe een geschikte temperatuur is voor beide reacties. Bij c) moest bovendien de vaststelling dat alle betrokken stoffen bij deze temperatuur in de oplossing aanwezig zijn, functioneren. Door middel van d) wilde ik nagaan of leerlingen op grond van de hierdoor ontstane principemogelijkheid zouden besluiten om beide reacties toe te kennen. Indien zij de constatering dat bij constante temperatuur de kleur van de oplossing niet verandert voorop zouden stellen, zou een dergelijke toekenning geblokkeerd kunnen worden.

In het vervolg van deze versie werd een aantal vragen gesteld vanuit de hypothese dat twee tegengestelde reacties plaatsvinden. Daarbij werd ook ingegaan op situaties bij andere temperaturen dan 55°C en bij temperatuur*veranderingen*. Uiteindelijk werd meegedeeld:

> "Hoewel je het niet kunt zien, nemen we aan dat er steeds twee reacties tegelijkertijd verlopen, zowel bij constante temperatuur als tijdens temperatuurverandering."

Ervaringen
Nadat zij op a) en b) de verwachte antwoorden hadden gegeven, voerde een groep naar aanleiding van c) en d) een discussie, waarin de leerlingen onderscheid maakten tussen een oplossing die op 55°C "wordt gehouden" en één die op 55°C "blijft". In het eerste geval "koelt-ie een beetje af en dan warm je 'm weer op". Hierdoor zijn er "kleine temperatuurschommelingen" zodat de reacties kunnen optreden. Over de tweede mogelijkheid zei een leerlinge:

protocol 6.III

1	inge	Als de temperatuur *blijft*, dan is 't altijd 55 graden...
2	joop	Ja.
3	inge	... dus geen van die twee reacties.
4	joop	Nee, d'r wordt... d'r is geen reactie... geen van beide. (...)
5	leo	Nee, da's... d'r kunnen best reacties verlopen.
6	inge	Ja, het kan toch heen en weer gaan?
7	leo	Ja, het kan heen en weer gaan.
8	joop	Oh ja (...) in één deel van de stof wordt 't iets warmer, bijvoorbeeld aan de oppervlakte wordt d'r wat meer...
9	inge	Nou, als dat tegelijkertijd gebeurt, dan geen kleurverandering.
10	joop	... of bijvoorbeeld aan de buitenkanten, die zijn wat warmer, en de binnenkanten zijn wat kouder.
11	inge	Maar als-ie maar iedere keer op 't zelfde moment gebeuren, iedere keer, dan komt er geen kleurverandering. (...)
12	joop	Als-ie inderdaad op temperatuur wordt gehouden, door steeds iets minder, steeds iets meer, dan zal je inderdaad... Maar stel dat 't overal echt 55 graden blijft, gewoon overal absoluut constant, dan verloopt er gewoon nergens een reactie.

Ondanks de koppeling van het optreden van reacties aan een macroscopische grootheid (temperatuurverschil), lijken de leerlingen niet-waarneembare reacties wel te kunnen accepteren. In 9 en 11 beredeneert inge expliciet dat er "geen kleurverandering" zal optreden, als twee processen tegelijkertijd optreden. Het is daarbij echter niet duidelijk of zij doelt op de twee reacties (die "heen en weer gaan"; 6 en 7) of op verwarmen en afkoelen ("wat warmer (...) wat kouder"; 10).

In dit gesprek konden de leerlingen het tegelijkertijd optreden van beide reacties alleen accepteren als er in de oplossing lokale temperatuurverschillen voorkomen. Ondanks de keuze van een homogeen systeem werd met name door joop

een ruimtelijke scheiding aangebracht tussen de twee mogelijke reacties. Daarmee leek zijn redenering op de eerder beschreven voorstelling ten aanzien van een verdampingsevenwicht, waarbij verdampen en condenseren weliswaar tegelijkertijd, maar op verschillende plaatsen optreden (zie §6.1).

Deze groep ging dus (nog) niet over op een dynamische evenwichtsopvatting. In andere groepen voerde de geciteerde vragenreeks wel tot produktiviteit op dit punt. In een aantal gesprekken waarin dit m.i. het geval was, maakten de betrokken leerlingen gebruik van *corpusculaire noties*, ofschoon deze in de leerlingentekst niet voorkwamen. Ik bespreek twee voorbeelden. In één groep maakte een leerlinge het volgende onderscheid:

protocol 6.IV

1 ans Er is in totaal geen reactie meer, want er is geen kleurverandering, maar er is nog wel een reactie, binnenin...
2 paul Daarom moeten ze allebei even snel verlopen.

In het vervolg van het gesprek werd deze zienswijze afgewogen tegen de opvatting dat er geen reactie verloopt. Twee van de drie groepsleden wilden het optreden van twee reacties afwijzen. Eén van hen zei:

3 paul Het lijkt me gewoon logisch van nee.
4 ans Het is helemaal niet logisch (...) maar de moleculen bewegen nog wel, dus ze kunnen elkaar nog raken.

Hoewel zij zich niet uitspreekt over mogelijke gevolgen van het "raken", verduidelijkt ans m.i. met deze laatste uitspraak het onderscheid dat ze in 1 maakt: ik associeer het eenvoudige corpusculaire botsingsmodel dat zij in 4 formuleert met haar "reactie binnenin". In het vervolg van het gesprek namen haar groepsgenoten haar standpunt over, zonder dat hierover verder gediscussieerd werd.

Ik beschouw de uitspraak van ans in 4 als een corpusculair motief voor het toekennen van een reactie: hiermee wordt aangegeven dat op corpusculair niveau voldaan is aan de voorwaarden voor een reactie. Over de mogelijke gelijktijdigheid van twee reacties sprak zij zich niet uit. In een andere groep werd dit aspect wel besproken. Hier beweerde een leerling:

protocol 6.V

1 rik Ja, allebei, ze verlopen allebei tegelijk (...)
2 piet Allebei tegelijk? Dat kan niet! Hoe kan dat nou tegelijk?
3 rik Die reacties lopen altijd samen en bij temperatuurverandering gaat de een sneller dan de ander (...)
4 piet Tegelijk? Gaat het bijvoorbeeld eerst van [robalaat naar blauwbaliet en water] en dan eh, daarna heeft die stof opeens weer even zin om eh, weer normaal te worden?
5 rik Je moet een stof niet als een ding zien maar als miljarden deeltjes en enkele van die deeltjes voegen zich samen tot [robalaat] en enkele deeltjes splitsen zich weer.

> De dynamische opvatting is voor rik vanaf 1 vanzelfsprekend. Piet maakt eerst bezwaar tegen de gelijktijdigheid van twee reacties (2) en geeft met 4 aan dat hij statistisch gedrag op stofniveau buiten beschouwing wil laten, hetgeen aan rik een reactie ontlokt. In het vervolg van het gesprek accepteerde piet de visie van rik, zonder de discussie voort te zetten.

In riks redenering (5) kunnen identieke deeltjes op hetzelfde moment bij verschillende processen betrokken zijn. Daarmee omvat zijn redenering statistische noties en stemt deze overeen met de in §6.2 geciteerde verklaring van Pfaundler voor de onvolledigheid van een omzetting. Het door ans in het vorige protocol geformuleerde botsingsmodel speelt ook een rol in deze verklaring. Bij ans ontbraken echter de aspecten omkeerbaarheid en identiciteit.

Hoewel de geciteerde vragen niet op corpusculaire redeneringen gericht waren, blijkt uit deze protocollen dat leerlingen in sommige gevallen toch corpusculaire argumenten in de gesprekken inbrachten[16]. Op zichzelf is dit niet zo vreemd, gezien de aandacht die corpusculaire begrippen in het voorafgaande onderwijs doorgaans krijgen. De weergegeven protocollen zijn wat mij betreft echter belangrijk, omdat hieruit blijkt dat leerlingen via corpusculaire argumentaties in staat zijn om een dynamische evenwichtsopvatting te accepteren. De overeenkomsten met historische argumentaties versterken wat mij betreft het belang van deze protocollen: het gaat hierin dus niet om incidentele redeneringen van een enkele leerling. In §6.7 bespreek ik consequenties van deze ervaringen (zie ook Van Driel et al., 1990).

6.6 Dynamisch evenwicht n.a.v. toevoegingen

Opzet leerlingentekst (tweede en derde versie)

In de tweede en derde versie van de leerlingentekst werd het begrip chemisch evenwicht ingevoerd na de robalaatproeven en de hierbij horende schema's (§4.4), en de tabel-opdracht (§5.5). In de tweede versie van de leerlingentekst kwamen geen corpusculaire termen voor. Net als in de eerste versie werd het dynamisch model ook toegepast in verband met 'verstoringen' van evenwichtstoestanden. In de derde versie was deze toepassingsmogelijkheid buiten beschouwing gelaten (zie verder §7.5). Daarentegen kwamen hierin wel corpusculaire termen voor in verband met de problematisering van identiciteit (§5.4).

In beide versies had de eerste omschrijving van chemisch evenwicht in de tekst betrekking op de aanwezigheid van alle bij een omkeerbare reactie betrokken stoffen in constante concentraties. Daarna werd in de tekst van beide versies opgemerkt dat in een evenwichtstoestand in het robalaatsysteem twee reacties (waarvan de schema's werden gegeven) "mogelijk zijn". Hierna volgde de vraag[17]:

---

[16]Eenzelfde ervaring had ik ook opgedaan ten aanzien van de onvolledigheid van omzettingen (zie protocol 5.I; §5.3).

[17]De weergegeven vraag is afkomstig uit de derde versie. In de tweede versie was gekozen voor een enigszins afwijkende opzet (zie bijlage A).

"Denken jullie dat deze reacties ook inderdaad zullen plaatsvinden? Licht toe."

Net als in de eerste versie had ik corpusculaire termen in deze vraag bewust vermeden. Bij de eerste versie had ik redeneringen verwacht op basis van het inzicht dat voldaan is aan alle voorwaarden voor het optreden van *beide* reacties (§6.5). In de praktijk bleken leerlingen de invoering van een dynamisch model echter bij voorkeur te baseren op een corpusculaire redenering, ook al werd deze niet via de tekst aangereikt. Door in de tweede en de derde versie een overeenkomstige vraag te stellen, wilde ik nagaan in hoeverre de ervaringen bij de eerste versie reproduceerbaar waren. Daarbij hield ik rekening met verschillen tussen de drie versies: in de eerste versie stond temperatuurvariatie centraal bij de proeven over omkeerbaarheid en onvolledigheid; in de tweede en derde versie was gekozen voor toevoegingen. Bovendien kwamen in de derde versie, zoals gezegd, bij andere opdrachten wel corpusculaire termen in de tekst voor.

Overigens werd uiteindelijk in beide versies van de tekst meegedeeld dat chemici aannemen dat in evenwichtssituaties twee tegengestelde reacties gelijktijdig optreden.

Ervaringen

Zowel in §4.4 als in §5.5 zijn situaties beschreven waarin het toekennen van één of twee (tegengestelde) reacties aan de orde kwam, zonder dat de leerlingentekst hierop gericht was. In beide paragrafen ging het om een anomalie als gevolg van de gelijktijdige aanwezigheid in één (homogene) oplossing van twee stoffen die onder de gegeven omstandigheden met elkaar zouden moeten kunnen reageren, terwijl deze reactie niet merkbaar optrad. Met name in §5.5 bleek dat leerlingen soms het optreden van een reactie in zo'n oplossing gingen veronderstellen, teneinde deze anomalie te verklaren. Dat deze reactie in dit geval niet gepaard ging met een kleurverandering werd in sommige gevallen niet geproblematiseerd (zie protocol 5.IV). In andere groepen werd expliciet gesteld dat de vorming van blauwbaliet in dit geval "niet zichtbaar" is. Hierbij baseerden leerlingen het toekennen van een reactie niet expliciet op corpusculaire argumenten. Daarentegen redeneerden zij dat aan alle voorwaarden voor het optreden van de betrokken reactie voldaan was.

Naar aanleiding van de geciteerde vraag ("Denken jullie, etc.") vond in een groep waarin tot aan deze vraag nog niet gesproken was in termen van twee gelijktijdige en tegengestelde reacties, de volgende discussie plaats:

protocol 6.VI

1	roel	Nee, want de concentraties veranderen niet.
2	rob	Maar als ze even hard de ene kant op gebeuren als de andere kant op...
3	roel	Ja, dan blijft 't gelijk.
4	rob	Ik zie geen reden waarom die reacties *niet* plaats zouden vinden.
5	henk	Omdat je dat dan wel zou zien. (...)
6	rob	Ja kijk, als je blauwbaliet en water wordt robalaat en chloride, maar ondertussen wordt robalaat plus...

7	henk	Nee, een andere, ergens aan de andere kant van de reageerbuis.
8	rob	... wordt robalaat en chloride blauwbaliet en water; dus uiteindelijk lijkt het alsof er niks verandert, terwijl het toch aan 't reageren is.
9	J.v.D.	Maar je kunt toch veel makkelijker zeggen dat er niks gebeurt, dat er niks reageert?
10	rob	Nee, maar die stoffen reageren wel als je ze bij elkaar doet...
11	henk	Dus waarom zouden ze...
12	rob	Waarom zouden ze dan niet reageren als ze al bij elkaar zitten?
13	J.v.D.	Ja.
14	henk	Vind ik een logische redenatie... was ik niet zo snel opgekomen.

In 4 impliceert rob dat voldaan is aan de voorwaarden voor het verlopen van *beide* reacties. Roel en henk wijzen echter op de afwezigheid van veranderingen (zie 1 en 5). In 6 geeft rob een redenering, waarin beide reacties tegelijkertijd optreden ("ondertussen"). Henk brengt hierin een ruimtelijke scheiding aan. In 9 daag ik rob uit zijn standpunt nog eens te verdedigen. De argumentatie die hij dan geeft, zie ik als een aanvulling op zijn uitspraak in 4. Hij expliciteert daarbij een reactievoorwaarde ("bij elkaar zitten" in 12).

In dit gesprek accepteerde rob het dynamisch model omdat naar zijn mening voldaan is aan de voorwaarden voor het optreden van beide reacties. Dat deze reacties niet worden waargenomen verklaarde hij door te stellen dat beide tegelijkertijd en met even grote snelheid optreden. Hij maakte in dit gesprek geen expliciet gebruik van corpusculaire termen, hoewel zijn uitspraak in 2 corpusculair geïnterpreteerd kan worden ("ze" kan zowel op deeltjes als op reacties slaan).

Voorbeelden waarbij leerlingen expliciet het *gelijktijdig* optreden van twee tegengestelde reacties toekenden, kwamen in het onderzoek niet veelvuldig voor. Daarom vind ik het van belang dat een andere leerling (henk in 14) door robs redenering werd overtuigd. Hieruit leid ik af dat een dergelijke redenering het dynamisch model ook voor andere leerlingen acceptabel kan maken.

In de schriftelijke groepsantwoorden van circa 80 groepen (ongeveer gelijk verdeeld over de tweede en de derde versie) werd de geciteerde vraag overwegend bevestigend beantwoord. Slechts 8 groepen antwoordden ontkennend en wezen daarbij op een verband tussen het optreden van een reactie en waarneembare veranderingen, bijvoorbeeld:

"Nee, als ze reageren, verandert de concentratie."

De bevestigende antwoorden werden zelden met corpusculaire argumenten onderbouwd. Daarentegen overheersten redeneringen waarin gesteld werd dat voldaan is aan alle voorwaarden voor het optreden van beide reacties (§6.3). Een kenmerkend antwoord luidde:

"Ja, als de stoffen bij elkaar aanwezig zijn, reageren ze altijd met elkaar."

Ook vermeldden veel groepen bij een bevestiging de voorwaarde dat beide reacties met even grote snelheid moeten optreden, omdat anders de concentraties en/of de kleur zouden veranderen.

Uit deze ervaringen concludeer ik dat de meerderheid van de leerlingen op grond van het onderwijsaanbod er toe over is gegaan om het optreden van reacties in een evenwichtstoestand te veronderstellen, zonder daarbij (expliciet) gebruik te maken van corpusculaire argumenten. Deze conclusie geldt zowel voor de tweede als de derde versie, ofschoon de problematisering van corpusculaire identiciteit slechts in de derde versie voorkwam.

Deze ervaringen wijken dus af van die met de eerste versie, waarin leerlingen een voorkeur voor corpusculaire redeneringen leken te hebben. Ik heb in het onderzoeksmateriaal geen aanknopingspunten gevonden om dit verschil te verbinden met het onderscheid tussen temperatuurvariatie in de eerste versie en toevoegingen in de tweede en derde versie. Ik concludeer daarom dat de twee in §6.3 beschreven redeneerwijzen op basis waarvan het dynamisch model kan worden ingevoerd, in de onderwijspraktijk door leerlingen beide gekozen zijn.

6.7 Dynamisch evenwicht als verklaring voor onvolledigheid

Opzet leerlingentekst (derde versie)
In de derde versie is gekozen voor een opzet waarin de onvolledigheid van reacties werd aangegrepen voor problematisering van de begrippen overmaat en identiciteit (§5.4). De keuze voor problematisering op corpusculair niveau was mede bepaald door ervaringen met de eerste versie, waarbij bleek dat sommige leerlingen via corpusculaire redeneringen overgingen op een dynamische evenwichtsopvatting (§6.5). *Op grond hiervan vermoedde ik dat het dynamisch model een voor leerlingen zinvolle verklaring voor de onvolledigheid van een omzetting zou kunnen bieden, waardoor het model voor hen en hun docenten een herkenbare functie zou kunnen krijgen*[18].

Na de proeven met de 'dubbele overmaat' en de hieraan gekoppelde uitspraken van Michiel (§5.4) werd het identiciteits-probleem in het vervolg van de tekst nog tweemaal aan de orde gesteld. Naar aanleiding van de tabelopdracht (§5.5) werd aan de leerlingen gevraagd hun mening te geven over de volgende stellingen:

1. *"Iedere keer blijven er na het toevoegen water <u>en</u> blauwbaliet-ionen in de oplossing aanwezig. Niet alle watermoleculen en blauwbaliet-ionen reageren dus met elkaar."*
2. *"Dat doen ze wel, maar de robalaat- en chloride-ionen die gevormd worden, reageren weer met elkaar tot blauwbaliet en water."*

De eerste stelling bevestigt de onvolledige omzetting, die in een statisch corpusculair beeld wordt vertaald. Ik verwachtte dat een dergelijk beeld leerlingen niet zou aanspreken. In de tweede stelling wordt de omkeerbaarheid van de reactie in corpusculaire termen verwoord en daardoor in verband gebracht met de onvolledigheid, die uit de tabel naar voren kwam. Het onderschrijven van

[18]Zie ook §6.4. Dit vermoeden wordt bevestigd door een artikel van Arndt, waarin zij aanbeveelt om dynamisch evenwicht als verklaring aan te bieden na een "Konfrontation mit dem (überraschenden) Phänomen des unvollständigen Stoffumsatzes" (Arndt, 1988, p.286-288).

deze stelling impliceert een toekenning van de terugreactie. Een volledig dynamisch model in termen van twee gelijktijdige tegengestelde reacties wordt in de tweede stelling echter niet verwoord.

Ik verwachtte dat leerlingen de tweede stelling zouden onderschrijven en wilde nagaan of zij in onderwijsgesprekken zouden overgaan op een min of meer statistische corpusculaire beschouwing. Mogelijk zouden leerlingen ook het gelijktijdige verloop van de reactie van blauwbaliet en water toekennen. Deze opdracht zou dus kunnen bijdragen aan ontwikkelingen in het reactiebegrip en daarmee samenhangende corpusculaire begrippen. Voor mij bood deze opdracht mogelijkheden om na te gaan welke argumentaties daarbij produktief dan wel blokkerend zouden werken.

Nadat het dynamisch model in een later stadium van de tekst expliciet aan de orde was geweest (via een vraag en een mededeling; zie §6.6), werd aan leerlingen gevraagd:

"Hoe zouden jullie nu op Michiels uitspraak reageren?"

Door deze vraag wilde ik nagaan of leerlingen Michiels uitspraak in verband met het dynamisch model zouden kunnen brengen en zo ja, op welke wijze. Hun antwoorden zouden opnieuw een indicatie kunnen geven omtrent ontwikkelingen in hun reactie- en corpusculaire begrippen.

Ervaringen

In een groep vond een discussie plaats over de twee stellingen. Eén leerling wees de eerste stelling af:

protocol 6.VII

1 arie Nee, d'r ontstaan telkens nieuwe watermoleculen.

Op verzoek van zijn groepsgenoten lichtte hij dit later toe:

2 arie Nou, ik denk dat (...) bij de eerste reactie zeg maar, als je daarvan kunt spreken, de eerste keer dat je ze bij mekaar doet, dat er dan een stel achterblijven ook al zou je een goeie verhouding hebben. Ik denk gewoon, ze reageren wel allemaal, alleen d'r ontstaan steeds weer nieuwe.

Zijn groepsgenoten gaven hem gelijk, waarna de tweede stelling tot het volgende gesprekje leidde:

3 arie Da's dus onzin, da's dezelfde vraag en omgekeerd.
4 bert Hier, kijk blauwbaliet plus water wordt robalaat plus chloride; robalaat plus chloride wordt blauwbaliet plus water. Dus d'r komt weer blauwbaliet plus water bij. Dus het zijn niet dezelfde moleculen die overblijven, maar die ontstaan weer.
5 arie Steeds nieuwe.
6 bert 't Zijn dus nieuwe die ontstaan, die blauwbaliet en water.
7 dirk Telkens nieuwe water en blauwbalietionen, moleculen...

Formuleringen als "telkens nieuwe" (1 en 7), "niet dezelfde" (4), "steeds (weer) nieuwe" (2 en 5) passen niet bij het statische corpusculaire beeld van de eerste stelling. Hoewel de betrokken leerlingen het gelijktijdig optreden van twee reacties niet expliciet toekennen, spreken arie en bert via het gebruik van de termen 'ontstaan weer' en 'ontstaan nieuwe' (2, 4, 6) over voortdurende omzettingen op corpusculair niveau.

In dit gesprek zetten de leerlingen een belangrijke stap in de richting van de beoogde statistische corpusculaire opvatting: ze redeneerden dat de voortdurende aanwezigheid van een zekere, in de tijd constante hoeveelheid stof niet hoeft te corresponderen met een gesloten verzameling moleculen.

In een andere groep werd de docent ingeschakeld. Eén leerlinge van deze groep bracht haar probleem met de tweede stelling als volgt onder woorden:

protocol 6.VIII

1 nel Maar waarom reageren niet alle robalaat en chloride-ionen tot water plus blauwbaliet? Ik geloof niet dat ik deze reactie helemaal begrijp. Ik snap niet wat er nou allemaal verdwijnt en wat er weer terugkomt en zo.

Met hulp van de docent werd eerst vastgesteld dat water en blauwbaliet inderdaad steeds aanwezig zullen zijn. Daarna zei de docent over de tweede zin van de eerste stelling ("Niet alle ... reageren ..."):

2 H. Ik bedoel, het is onzin om te denken dat sommige deeltjes wel zullen reageren, maar andere niet. Dat is onzin.

Hierna werd de tweede stelling besproken:

3 nel Nee, maar (...) waarom reageren ze dan niet allemaal weer met elkaar tot blauwbaliet en water? Dat je een constante reactie...
4 H. Dan zou 't weer teruglopen ja... ze reageren zowel de ene kant op als de andere kant op.
5 nel Maar niet allemaal dus.
6 ina Niet allemaal.
7 H. Nee, maar wel continu.
8 anja Maar dan zou 't toch één keer allemaal blauw worden?
9 nel En dan weer helemaal rose en dan weer helemaal blauw.
10 ina Ja, maar dat gebeurt niet.

In dit fragment constateert nel een tegenstrijdigheid tussen de aanwezigheid van robalaat en chloride en de mogelijkheid van wat zij "een constante reactie" (3) noemt. Nadat H. in 7 deze mogelijkheid bevestigt, brengen anja, nel en ina deze tegenstrijdigheid met elkaar duidelijk onder woorden: als er reacties optreden, moeten er oscillerende kleurveranderingen zichtbaar zijn en dat was bij de proeven niet het geval, zoals ina (10) terecht opmerkt.

In 8 en 9 wordt een reactiebegrip verwoord dat ik wil aanduiden met de term *knipperlichtreactie*. Hierin kunnen reacties slechts *volledig, na elkaar en waarneembaar* plaatsvinden. Een dergelijke opvatting vertoont dus kenmerken van het reactiebegrip uit voorafgaand onderwijs. Ik kom hier nog op terug. De docent vervolgde het gesprek aldus:

11 H. Nee, want de snelheid, maar nu loop ik een beetje vooruit, de snelheid waarmee de ene reactie verloopt is gelijk aan die waarmee de teruggaande reactie verloopt. Dus bijvoorbeeld die blauwbaliet-moleculen worden net zo snel gevormd, net zo veel per seconde worden er gevormd, als dat er weer reageren.

Deze uitleg sprak de leerlingen niet aan. Nel en loes gaven te kennen 'het nu niet meer te snappen'. Even later ondernam H. een nieuwe poging:

12 H. De reactie is omkeerbaar, ja? Nou, je hebt gezien (...) dat je altijd zowel het een als het ander, blauwbaliet als robalaat in de oplossing hebt, ja? (...) Het zou dus kunnen zijn dat een gedeelte van de ionen, of moleculen, of die deeltjes in het algemeen, wel reageerden maar andere niet. Nou dat is heel onwaarschijnlijk, want die deeltjes zijn identiek. Dus het is heel onwaarschijnlijk om te denken dat die dáár zitten dat toevallig wel doen, maar die niet bijvoorbeeld. Wat je ook kunt veronderstellen (...) dat ze weliswaar allemaal reageren, maar dat de robalaat en chloride-ionen die ontstaan ook weer terugreageren tot blauwbaliet en water en dat die blauwbaliet en water weer terugreageren tot robalaat en chloride, enzovoort.
13 ina Ja, dat klopt. Dat is toch gewoon een kringloop?
14 anja Een eeuwig voortdurende reactie, die kan niet stoppen (...)
15 H. Ja precies, dat noemen ze dus, wat hier staat, een chemisch evenwicht. *[wijst op de volgende bladzijde van de leerlingentekst]*
16 nel Maar het is dus maar weer een deel van alle moleculen die aanwezig zijn die heen en weer blijven reageren.
17 H. Nee, allemaal (...) omdat de snelheid van de ene reactie, dus waarmee bijvoorbeeld de blauwbalietionen verdwijnen, is even groot als de snelheid waarmee de blauwbalietionen weer ontstaan uit die robalaationen. Dus per seconde verdwijnen er tien en er ontstaan er tien...
18 nel Maar ze vinden gelijkertijd plaats?
19 H. Dus netto blijven er evenveel.
20 loes Bestaat er wel zo'n reactie?
21 H. Jazeker, ontzettend veel reacties zijn zo.
22 anja En hoe stop je 'm dan?
23 loes Hier, dan zet je een potje neer en dat verandert alsmaar?
24 H. Ja.
25 loes Dat is leuk.
26 H. Dat stop je niet.

27	ina	Dus 't wordt de hele tijd blauw, rose, blauw, rose, of dat niet?
28	H.	Nee.
29	nel	Nee, omdat evenveel verdwijnen en weer bijkomen (...)
30	anja	Dus blijft de kleur gelijk maar d'r gaat hartstikke wilde gedoe allemaal binnenin.

In 12 brengt H. een statistisch-corpusculaire voorstelling ter sprake. Naar aanleiding van nels vraag (16) herhaalt hij dat alle deeltjes hierbij betrokken zijn. De snelheidsredenering ("even groot"; 17) hanteert hij m.i. om de afwezigheid van kleurveranderingen te kunnen verklaren. Nel vraagt expliciet naar de gelijktijdigheid van beide reacties, maar krijgt geen antwoord omdat ook loes H.'s aandacht vraagt. Loes verwoordt ook in deze fase nog een knipperlichtredenering, evenals ina (27). Nel en anja lijken deze opvatting in 29 en 30 losgelaten te hebben

Anja maakte de dynamische opvatting voor zichzelf aanvaardbaar door een onderscheid tussen een 'buitenkant' waaraan de kleur gelijk blijft, en een 'binnenkant' waarin reacties ("hartstikke wilde gedoe"; 30) optreden. Geen van de gespreksdeelnemers ging op deze uitspraak in. In het vervolg van het gesprek stelden de leerlingen opnieuw verschillende vragen aan H. Door in geen van zijn antwoorden expliciet uit te spreken dat beide reacties *tegelijkertijd* en *niet-waarneembaar* optreden, liet H. de knipperlichtredenering onbedoeld nog toe. Na enige tijd kwam loes dan ook terug op haar vraag uit 20:

31	loes	Zou je die proef met het chemisch evenwicht kunnen maken?
32	H.	Ja natuurlijk, in feite heb je 'm al gemaakt.
33	loes	Nee, want je moest elke keer iets toevoegen.
34	nel	Dan was er toch ook, d'r is altijd chemisch evenwicht als je blauwbaliet en robalaat bij elkaar gooit.
35	loes	Ja, maar het was toch de bedoeling dat dat spul uit zichzelf was beginnen te reageren?
36	nel	Ja, maar dat kun je niet zien!
37	H.	Ik denk toch dat je iets verkeerd ziet: kijk het gaat bij dat evenwicht erom dat je aan de buitenkant niets meer ziet, je ziet gewoon een oplossing die rose is of die blauw is.
38	anja	Daar binnenin...
39	loes	Ooooh *[op een toon van 'nu snap ik het!']*
40	H.	Maar precies, daar binnenin, jij snapt het, daar binnenin daar verlopen wel steeds twee reacties, namelijk de reactie waarbij uit blauwbaliet en water robalaat en chloride wordt gevormd en de omgekeerde. Alleen omdat ze met gelijke snelheden verlopen, zie je d'r niks van; je ziet niet dat-ie blauwer of roser wordt.
41	loes	En hoe weten ze dan dat het er eigenlijk wel is?
42	H.	Omdat blijkt dat je (...) van alle vier de stoffen heb je iets aanwezig in dat mengsel (...) dat kan onder andere verklaard worden door aan te nemen dat er een evenwicht is, dat er reacties verlopen.
43	loes	Ja, maar dat kunnen ze niet zo maar zien.
44	H.	Nee, dat kun je ook niet zien.

45	ina	Ze reageren dus niet gelijk, gelijkertijd? Wel na elkaar, maar heel snel.
46	H.	Nee, ze reageren wel gelijkertijd.
47	anja	Wel gelijk, gaat alsmaar door.
48	nel	Ja.

Loes hanteert de knipperlicht-redenering. In 35 scherpt zij deze aan via de voorwaarde "uit zichzelf". Nel gaat hier tegenin: in 36 zegt zij als eerste in het hele gesprek expliciet dat het hier om niet-waarneembare reacties gaat. Daarmee forceert zij een doorbraak: H. herkent nu blijkbaar loes' argumentatie en formuleert in 37 een redenering die goed past bij die van anja uit 30. Deze haakt hier dan ook op in (38), waarmee ze loes kennelijk aanspreekt.
Loes reageert kritisch op H.'s argumentatie in 40: welk criterium hanteren "ze" (chemici?) om aan te nemen dat er reacties optreden, als deze niet zichtbaar zijn? Hierop antwoordt H. met een verwijzing naar de gelijktijdige aanwezigheid van alle stoffen, op basis waarvan hij de optredende reacties toekent. Loes lijkt niet geheel overtuigd door deze redenering, maar aanvaardt de niet-waarneembaarheid van de reacties op H.'s gezag en op dat van "ze". Ina formuleert in 45 een voorstelling waarin 'ze' gescheiden in de tijd reageren. Zij kan hierbij zowel op deeltjes als op reacties doelen. H. en anja lijken vanuit de laatste interpretatiemogelijkheid te redeneren.

In dit gesprek werd de mogelijkheid dat een reactie niet-waarneembaar optreedt voor tenminste twee (nel en anja) en mogelijk zelfs drie (loes) van de vier leerlingen aanvaardbaar, doordat zij onderscheid maakten tussen waarnemingen ('buitenkant') en (corpusculaire) voorstellingen van de 'binnenkant' van het reactiesysteem. Deze voorstellingen functioneerden voor een aantal leerlingen dus produktief bij het toekennen van een reactie.

Hierop voortbouwend kan worden beargumenteerd dat in een toestand van chemisch evenwicht beide reacties tegelijkertijd optreden. Ik meen dat in dit protocol slechts nel en (mogelijk) anja een dergelijke stap zetten. Zij brachten deze voorstelling echter niet expliciet in verband met de onvolledigheid van de omzetting. Hoewel deze problematiek in het begin van het gesprek (1-6) aan de orde was, kwam geen van de gespreksdeelnemers (inclusief H.) hier later op terug. Daardoor is het twijfelachtig of het dynamisch model voor de leerlingen de verklarende functie heeft gehad, die ik beoogd had. Wellicht heeft H. deze bedoeling niet herkend.

Uit de verzamelde schriftelijke groepsantwoorden op deze opdracht bleek dat de eerste stelling weinig en de tweede veel aanhang kreeg. Net als in protocol 6.VII gebruikten enkele groepen termen als 'steeds weer' en 'telkens nieuwe'. In een paar groepen werd expliciet opgeschreven dat je de betrokken reactie(s) 'niet ziet'. Veel groepen formuleerden een redenering, waarin eerst de ene reactie optreedt en dan de terugreactie. Het optreden van beide tegengestelde reacties wordt hier dus in de tijd gescheiden.

Verwijzingen naar een knipperlichtreactie trof ik zowel aan in enkele schriftelijke antwoorden als in gesprekken van andere groepen. Zo motiveerde een groep hun afwijzing van de tweede stelling als volgt:

> "Nee, anders zou het alsmaar heen en weer reageren: rose, blauw, rose, blauw, enz."

Aan het einde van deze versie van de leerlingentekst werd aan leerlingen gevraagd om opnieuw hun mening over Michiels uitspraak te geven. Sommige schriftelijke antwoorden hadden betrekking op het begrip overmaat, terwijl in andere op de identiciteit werd ingegaan. Ik geef van beide een sprekend voorbeeld:

> "[...] er was geen overmaat, maar doordat de reacties omkeerbaar waren ontstonden telkens weer dezelfde stoffen."

> "[...] ijzer(III) en thiocyanaationen reageren tot rodanide. Dit gebeurt niet allemaal tegelijk. En ondertussen rodanide weer tot ijzer(III) en thiocyanaationen. Het lijkt alsof sommige ijzer(III) en thiocyanaationen niet met elkaar reageren, maar dit is niet het geval."

In het eerste antwoord wordt het begrip overmaat voor deze situatie ongeschikt geacht. Een expliciet dynamisch model wordt echter niet verwoord. In het tweede antwoord wordt weer een onderscheid tussen waarnemingen en een corpusculaire voorstelling geformuleerd. Bovendien wordt via het woord "ondertussen" expliciet gewezen op de gelijktijdigheid van beide tegengestelde corpusculaire veranderingen.

Het grootste deel van de verzamelde antwoorden op deze vraag kon ik echter niet in verband brengen met een produktieve ontwikkeling ten aanzien van het begrip reactie en/of corpusculaire begrippen. Vaak werd een kort antwoord gegeven, dat voor verschillende uitleg vatbaar was (bijvoorbeeld "Nog steeds met hem eens"). Hieruit concludeer ik niet direct dat de beoogde ontwikkelingen niet zijn opgetreden. Eerder beschouw ik de gestelde vraag ongeschikt als onderzoeksinstrument.

Ervaringen van en met docenten

Ik wilde nagaan of de docenten in deze leerlingentekst de beoogde functie van het dynamisch model in verband met de onvolledigheid van omzettingen hadden herkend. Vanwege de in §6.4 gesignaleerde problematiek was ik benieuwd of zij zich door de leerlingentekst in staat gesteld voelden om de invoering van dit model door leerlingen te begeleiden.

Hiertoe bracht ik deze invoeringsproblematiek ter sprake tijdens een bespreking van hun ervaringen als docent met de leerlingentekst. Bovendien nam ik in het eerder genoemde evaluatieformulier (§2.3) twee vragen op vanuit mijn belangstelling voor mogelijke ontwikkelingen op dit punt bij zowel leerlingen als docenten:

1. "Heb je gemerkt dat leerlingen moeite hebben met het toekennen van twee chemische reacties aan een toestand waarin geen waarneembare verandering optreedt?"
2. "Heb je de indruk gekregen dat Michiels probleem [uiteindelijk] voor je leerlingen was opgelost? Zo ja, kun je aangeven waarop die indruk berust?"

Op deze vragen kom ik hieronder terug. Uit de discussie tijdens de genoemde bespreking citeer ik het volgende fragment:

protocol 6.IX

1 F. Ook al gaat het om twee reacties, dan spreken leerlingen vaak over *de reactie*. En dan vinden ze het gezeur als je dat verbetert.
2 W.d.V. De reactie is dan een soort ding, dat heen en weer kan.
3 F. Ja, de reactie is nog steeds één ding voor ze, het zijn er geen twee.
4 I. Het kan dan heen of terug gaan en niet allebei tegelijk.
5 J.v.D. Wij kunnen ook niet praten in gelijktijdigheden.
6 I. Maar als wij een dubbele pijl zetten, denken wij er meer bij dan de leerlingen.
7 J. Of omgekeerd. Eén van mijn leerlingen snapte dat niet toen ze net bezig waren met dat omkeerbare. Heel verbaasd zei ze: *Ja maar ik zie helemaal niet dat-ie eerst rose wordt en dan weer blauw en dan weer rose en dan weer blauw*. Die miste echt dat knipperlicht.
8 W.d.V. Het woord omkeerbaar is op zich al heen en terug.
9 J. In de tijd gescheiden heen en terug. Je kunt niet op weg zijn naar Texel en met dezelfde boot al weer op de terugweg, of zo.
10 W.d.V. Het omkeren doe je pas als je d'r bent.
11 K. Toch is het goed om daar met leerlingen over te praten. Dat het een knipperlicht zou zijn als je het zou kunnen uitvergroten, maar dat er in het vakje ernaast net het omgekeerde zou kunnen gebeuren en zo. Dat is vaak heel verhelderend. Tenminste dat is mijn ervaring (...)
12 L. Voor mij was het heel verhelderend dat een leerling in een groepje dat bezig was met rodanide, zei dat die kleur bij dezelfde intensiteit dus steeds door andere moleculen veroorzaakt werd. Die had het idee: er komen er steeds bij maar die kleur blijft hetzelfde, dus zijn het steeds andere.
13 J.v.D. Dus die kon zo het ogenschijnlijk statische in verband brengen met...
14 L. ... het steeds veranderen.
15 J.v.D. ... het toch verlopen van reacties.
16 L. Die was dus van het heen-en-weer idee af. Maar het was maar één groep. Maar ik heb er wel gebruik van gemaakt bij andere groepjes.

> In dit gesprek noemen docenten een aantal moeilijkheden die ze bij leerlingen hebben geconstateerd. Hier worden bovendien verklaringen voor gezocht (5-10). Tenslotte geven K. en L. argumentaties die volgens hen tot produktiviteit in onderwijssituaties hebben gevoerd ("verhelderend"). In K.'s aanpak worden termen als "knipperlicht" en "vakje" (tijdelijk?) gebruikt, waardoor de argumentatie een zeker analogiekarakter draagt. L. wijst in 12 op een statistische corpusculaire redenering die door een leerling gegeven werd.

De problemen van leerlingen die docenten hier naar voren brachten, zijn in het voorafgaande ook genoemd (gelijktijdigheid, knipperlicht). Dat de betrokken docenten deze problemen in hun klas herkend hebben, waardeer ik in dit verband positief. L. wees op een zekere eigen produktiviteit: hij kon een argumentatie van een leerling gebruiken ten behoeve van andere leerlingen (16). De docenten brachten het dynamisch model in dit gesprek echter niet in verband met een verklaring voor onvolledigheid.

De uit het evaluatieformulier geciteerde vragen leverden sterk uiteenlopende antwoorden op. De eerste vraag werd door ongeveer de helft bevestigend beantwoord. Enkele docenten stelden dat ze hun leerlingen moesten "aanpraten dat er van alles in de reageerbuis gebeurt, terwijl je niets ziet". Anderen bevestigden het ook door F. hierboven verwoorde probleem dat leerlingen veelal spreken over "de reactie" in de meest algemene zin. Daarentegen gaven docenten die "nee" antwoordden op de eerste vraag bijvoorbeeld als toelichting "het is heel aannemelijk: als er deeltjes zijn dan botsen die, dus reactie". Anderen schreven: "dit is even een raar idee, maar als je erover nadenkt is het zo gek nog niet, het verklaart veel."

De tweede vraag leverde enkele uitgesproken negatieve antwoorden op ("leerlingen zien door de bomen het bos niet meer"). Sommige docenten maakten een onderscheid tussen leerlingen voor wie het probleem wel was opgelost en anderen voor wie dit niet geval was. Eén docent bracht de laatste categorie in verband met "leerlingen die zich in één deeltje verplaatsen", hetgeen ik associëer met een niet-statistische corpusculaire opvatting. In de volgende paragraaf kom ik hier op terug. De meeste docenten reageerden echter positief op deze vraag. Twee van hen noemden de omkeerbaarheid van de reactie als de sleutel die voor leerlingen had geleid tot de oplossing van het probleem. Een andere citeerde een leerlingenantwoord: "ze komen allemaal aan bod, maar niet tegelijkertijd". Deze positieve antwoorden wijzen op produktiviteit voor zowel leerlingen als docenten ten aanzien van de relatie tussen onvolledigheid en identiciteit enerzijds en het dynamisch model als verklaring hiervoor anderzijds.

6.8 Discussie en conclusies

De dynamische opvatting van chemisch evenwicht is in dezelfde periode van de vorige eeuw door verschillende chemische onderzoekers via twee verschillende benaderingen ontwikkeld: in één ervan ging het om een verklaring voor de onvolledigheid van chemische omzettingen, terwijl in de ander werd gezocht naar een kwantitatieve beschrijving van chemisch evenwicht.

Bij de invoering van de dynamische evenwichtsopvatting in leergangen werd tot circa 1968 van beide benaderingen gebruik gemaakt. De tweede kwam veel vaker voor dan de eerste. Tegenwoordig blijken beide benaderingen niet meer gekozen te worden. Een gevolg van deze verandering is dat dynamisch evenwicht een op zichzelf staand onderwerp is geworden: het wordt niet voorbereid en het bereidt nergens op voor. Dit uit zich in recente leergangen op verschillende manieren:

- Men tracht dynamisch evenwicht als (experimenteel) feit te bewijzen en negeert daarbij het modelkarakter ervan;
- Via simulaties en analogieën poogt men deze opvatting aanschouwelijk voor te stellen en te verbreden door verbindingen met niet-chemische situaties.

Uit gesprekken met docenten bleek dat zij het modelkarakter van de dynamische opvatting weliswaar onderschrijven, maar zich vaak niet in staat voelen om deze opvatting als model te onderwijzen. Hierdoor nemen sommigen een toevlucht tot het gebruik van analogieën. Ook op andere momenten tijdens het onderzoek kwam een onvermogen van docenten op dit punt naar voren.

Bij het onderzoek zocht ik dan ook motieven van leerlingen *en* docenten voor de invoering van het dynamisch model. Via het onderwijsmateriaal heb ik de bruikbaarheid van een aantal mogelijke motieven onderzocht.

Om het dynamisch model te kunnen invoeren, moeten twee aspecten van het reactiebegrip van leerlingen met name ontwikkeld worden: reacties die niet gepaard gaan met waarnemingen moeten worden *toegekend* en verlopen bovendien *tegelijkertijd*. Uit het onderzoek is gebleken dat het toekennen van een niet-waargenomen reactie leerlingen niet voor grote problemen hoeft te stellen. Dit toekennen, waarin centraal staat dat voldaan is aan de voorwaarden voor het optreden van de betrokken reactie(s), kan op twee verschillende redeneringen berusten: een corpusculaire en één die niet (expliciet) corpusculair is (§6.3). Beide redeneerwijzen werden in de praktijk door leerlingen gehanteerd, waarbij de laatste vooral gekozen werd naar aanleiding van een vraag in de leerlingentekst of in een evenwichtstoestand sprake is van het optreden van chemische reacties (§6.6). Tevens viel op dat leerlingen soms voor een corpusculaire redeneerwijze kozen hoewel deze niet via de leerlingentekst werd aangeboden (§6.5).

Bij redeneerwijzen van dit type bleek een onderscheid tussen 'buitenkant' en 'binnenkant' van een evenwichtssysteem voor zowel leerlingen als docenten produktief te kunnen functioneren (zie protocol 6.IV, 6.VIII en K. in 6.IX). Verder bleken produktieve corpusculaire redeneringen (rik in protocol 6.V, arie en bert in 6.VII en L. in 6.IX) overeenkomsten te vertonen met zekere wetenschaps-historische redeneringen.

De gelijktijdigheid van reacties in het dynamisch model bleek voor veel leerlingen problematisch te zijn. Meestal redeneerden leerlingen in termen van reacties die na elkaar in de tijd optreden. Deze problemen kunnen gedeeltelijk van taalkundige aard zijn: men spreekt veelal eerst over de ene reactie en dan pas over de andere. De gelijktijdigheid van beide reacties kan dan slechts worden uitgedrukt door beide uitspraken expliciet te verbinden met termen als 'ondertussen', 'tegelijkertijd', etc. (zie ook protocol 6.IX). Deze problemen kunnen tevens met corpusculaire voorstellingen te maken hebben: één deeltje

kan natuurlijk maar één verandering tegelijkertijd ondergaan. Indien leerlingen het gedrag van een stof, dat wil zeggen van de volledige verzameling deeltjes, synchroniseren met het gedrag van één deeltje[19], is geen ontwikkeling in het identiciteitsbegrip opgetreden. In dat geval wordt het inzicht dat tegengestelde reacties gelijktijdig kunnen optreden geblokkeerd.

Het onderzoek heeft een alternatief voor het dynamisch model opgeleverd in de vorm van de zogenoemde knipperlichtreactie. Hierin treden reacties waarneembaar, volledig en na elkaar op (§6.7). Een dergelijk reactiebegrip is niet van toepassing op een toestand van chemisch evenwicht. Daarbij is sprake van een tegenstrijdigheid tussen de principemogelijkheid dat beide reacties optreden en het gegeven dat dit optreden in een evenwichtstoestand niet waarneembaar is. Deze tegenstrijdigheid kan worden opgelost door over te gaan op het dynamisch model. De knipperlichtopvatting zou dus vooraf kunnen gaan aan de invoering van dit model.

Door aan het dynamisch model een functie toe te kennen in verband met een verklaring voor de onvolledigheid van omzettingen, wordt toegemoet gekomen aan de constatering dat dit model in recente leergangen een losstaand onderwerp is geworden, waarvan de behandeling gepaard gaat met onderwijsproblemen. Via de derde versie heb ik willen nagaan in hoeverre het dynamisch model voor leerlingen en docenten de bedoelde verklarende functie kan krijgen. Uit het onderzoek is gebleken dat deze functie weliswaar niet altijd herkend is (zie protocol 6.VIII), maar desalniettemin een rol kan spelen bij de invoering van dynamisch evenwicht. In een nieuw onderwijsontwerp, gekoppeld aan nascholing, zou deze functie verstevigd kunnen worden (zie verder §8.1).

[19]Alsof het ene deeltje zich in een spiegelzaal bevindt, waar zijn gedrag momentaan vermenigvuldigd wordt.

hoofdstuk 7

Stabiliteit van chemisch evenwicht

De thema's in de vorige drie hoofdstukken vertoonden een zekere samenhang: onvolledigheid bij omkeerbare reacties kan worden verklaard met behulp van een dynamisch model van chemisch evenwicht. Aan de hand van dit model kan bovendien worden beredeneerd dat verstoring van een ingestelde evenwichtstoestand in veel gevallen zal leiden tot de instelling van een nieuwe evenwichtstoestand. In dit verband spreek ik van de 'stabiliteit' van chemisch evenwicht. In dit hoofdstuk worden mogelijkheden besproken om het dynamisch model toe te passen bij de ontwikkeling van dit stabiliteitskenmerk. Daarbij gaat het niet alleen om een voortgang in de ontwikkeling van het begrip chemisch evenwicht, maar ook om de vraag in hoeverre het dynamisch model aan betekenis voor leerlingen en docenten kan winnen, indien zij het aanwenden voor verklaringen van de stabiliteit van chemisch evenwicht.

7.1 Inleiding: oriëntatie op stabiliteit

De meeste omkeerbare reacties kunnen in een gesloten systeem na verloop van tijd tot de instelling van een toestand van chemisch evenwicht leiden[1]. De samenstelling van het evenwichtsmengsel hangt, behalve van de betrokken omkeerbare reactie, af van een aantal systeemparameters (temperatuur, druk of volume) en van de aanvangshoeveelheden van de betrokken stoffen.

Indien men de waarde van een systeemparameter wijzigt of een hoeveelheid van één der betrokken stoffen toevoegt of onttrekt, is er geen sprake meer van evenwicht. Na enige tijd zal echter een nieuwe evenwichtstoestand intreden, tenzij men de mogelijkheid hiertoe geblokkeerd heeft[2]. Ik duid de eigenschap dat verstoring van een evenwichtstoestand in het algemeen leidt tot de instelling van een nieuwe, andere evenwichtstoestand, aan met de term *stabiliteit*.

De stabiliteit van een chemisch evenwicht kan experimenteel onderzocht worden. Door een systeem waarin een evenwichtstoestand heerst aan verschillende veranderingen te onderwerpen, kan men vaststellen in welke gevallen nieuwe evenwichtstoestanden resulteren. Verklaringen voor zulke experimentele gegevens kunnen in twee verschillende theoretische kaders worden opgesteld:

- Een kinetisch kader, waarin de argumentatie gebaseerd is op het dynamisch model. Hierin gaat het dus om *modelmatig-kinetische* redeneringen, die overigens niet perse corpusculair hoeven te zijn;

---

[1]Een uitzondering wordt o.a gevormd door omkeerbare reacties waarbij uitsluitend vaste stoffen worden omgezet. Zulke reacties treden onder gefixeerde omstandigheden op.

[2]Een blokkade is bijvoorbeeld mogelijk door een der betrokken stoffen systematisch en volledig aan het systeem te onttrekken. Daarnaast kan uit de zogenoemde fasenregel een belemmering voortkomen: indien chemisch evenwicht heerst in een systeem dat hierdoor slechts één vrijheidsgraad kent en men varieert één systeemparameter, terwijl alle overige systeemparameters constant worden gehouden, dan kan geen nieuwe evenwichtstoestand intreden (zie Bijvoet et al., 1973, p.61-63).

- Een thermodynamisch kader, dat geen dynamisch model van chemisch evenwicht vereist.

In beide kaders wordt een principe voor het optreden van een evenwichtstoestand gehanteerd. Hierbij gaat het respectievelijk om een gelijkheid van reactiesnelheden en om een maximale waarde van de entropie (ofwel een minimale waarde van de Gibbs-energie; zie §3.2). Daarmee kan het al dan niet optreden van een nieuwe evenwichtstoestand na een verstoring worden verklaard.

Indien een nieuwe evenwichtstoestand wordt ingesteld wijkt de evenwichtssamenstelling doorgaans af van de oorspronkelijke. Men spreekt in dit verband wel van een 'evenwichtsverschuiving'. Regelmatigheden in optredende verschuivingen kunnen worden vastgelegd in enkele regels, waarmee wordt aangegeven wat de invloed is van een zekere factor op de evenwichtssamenstelling. Zulke regels kunnen op basis van een empirische studie worden opgesteld.

Om dit te illustreren beschrijf ik het voorbeeld van een slecht oplosbaar zout, zilverchloride, dat in een waterige oplossing in evenwicht verkeert met de samenstellende ionsoorten, Ag^+ en Cl^-. In het algemeen zal verhoging van temperatuur tot gevolg hebben dat een deel van de vaste stof zal dissociëren in ionen. Toevoeging van water (bij constante temperatuur) zal een zelfde effect hebben. Voegt men een goed oplosbaar zout, bijvoorbeeld zilvernitraat toe, dan zal Ag^+ met reeds aanwezig Cl^- reageren onder vorming van extra vast AgCl. In een nieuwe evenwichtstoestand zal de concentratie van Ag^+ (als gevolg van de toevoeging) groter zijn dan in de oude, terwijl voor Cl^- (als gevolg van de omzetting) het omgekeerde geldt. Toevoeging van een hoeveelheid vast zilverchloride zal de evenwichtsconcentraties van de ionen niet veranderen.

Ook de in dit voorbeeld beschreven veranderingen kunnen worden verklaard vanuit de twee genoemde theoretische kaders. In het dynamisch model gaat het dan om redeneringen waarin de snelheden van de twee veronderstelde tegengestelde reacties als gevolg van een verstoring ongelijk worden, om vervolgens weer aan elkaar gelijk te worden. Hiermee gaan zekere veranderingen in de evenwichtssamenstelling gepaard.

In de thermodynamica verlopen redeneringen via veranderingen in entropie en/of Gibbs-energie. Voor kwalitatieve uitspraken omtrent veranderingen van evenwichtssamenstellingen kan gebruik worden gemaakt van het reeds genoemde principe van Le Chatelier (§3.1). Het telkens opnieuw ontstaan van een evenwichtstoestand is in dit principe overigens een uitgangspunt, dat erdoor dus niet wordt verklaard.

Zoals gezegd sluit ik in dit hoofdstuk aan op de thematiek van de vorige hoofdstukken, zodat het hier gaat om de ontwikkeling van stabiliteitskenmerken van chemisch evenwicht op basis van het dynamisch model. Een relatie tussen stabiliteit en thermodynamica blijft verder buiten beschouwing. In het onderstaande zal ik ingaan op wetenschaps-historische en onderwijs-historische ontwikkelingen ten aanzien van stabiliteitsredeneringen in een kinetisch kader. Daarna bespreek ik de opzet van en ervaringen met verschillende versies van de leerlingentekst op dit punt. Het hoofdstuk wordt afgesloten met een analyse van onderwijsproblemen op basis waarvan conclusies en aanbevelingen worden geformuleerd.

7.2 Wetenschaps-historische ontwikkeling

Kinetische beschouwingen van Pfaundler

Pfaundler voerde in 1867 een dynamisch evenwichtsmodel in om daarmee de onvolledigheid van dissociatiereacties te kunnen verklaren. Na de in §6.2 geciteerde hypothese gaf Pfaundler in hetzelfde artikel een moleculair-kinetische beschouwing over partiële dissociatie van een verbinding AB. Hij stelde dat alleen die moleculen AB kunnen splitsen in A en B waarvan de 'interne beweging' voldoende groot is. A en B kunnen echter met elkaar botsen en zullen zich hierbij verenigen tot AB indien de totale bewegingsenergie van het aggregaat beneden de voor splitsing benodigde grens blijft. Na verloop van tijd zal bij constante temperatuur het aantal verenigingen per tijdseenheid gelijk zijn aan het aantal splitsingen in dezelfde tijd, zodat sprake is van evenwicht.

Omdat de gemiddelde bewegingsenergie van moleculen toeneemt met de temperatuur, zal een temperatuurstijging in eerste instantie tot gevolg hebben dat per tijdseenheid het aantal splitsingen toeneemt, terwijl het aantal verenigingen kleiner wordt. Hierdoor neemt het aantal moleculen A en B toe en dat van AB af. Dit leidt bij constant volume tot een stijging van het aantal botsingen tussen A en B en een daling van het aantal splitsingen van AB per tijdseenheid. Na enige tijd ontleden daardoor bij de hogere temperatuur weer evenveel moleculen AB per tijdseenheid als er gevormd worden. Pfaundler hanteerde dus het dynamisch model, waarbij de snelheden van de twee tegengestelde reacties beide onder invloed stonden van twee simultaan werkende factoren: temperatuur en concentratie. De invloeden van deze factoren beredeneerde hij met een corpusculair botsingsmodel[3].

Vervolgens beredeneerde Pfaundler voor een homogeen systeem waarin een evenwicht "AB+C=A+BC" heerst, wat de invloed van toevoeging van AB (bij vrijwel constant volume) is. Dit zal leiden tot een groter aantal botsingen tussen AB en C. Hierdoor zal het aantal moleculen van AB en C afnemen, terwijl dit van BC en van A zal toenemen. Deze toename leidt echter weer tot een toename van het aantal botsingen waarbij BC en A worden omgezet, etc. Er zal een nieuwe evenwichtstoestand intreden, waarin het aantal moleculen C kleiner is dan aanvankelijk. Voor gedeeltelijke verwijdering van een der reactanten geldt een analoge redenering[4]. Pfaundler verklaarde de invloed van stoftoevoer en -afvoer dus door een verband te leggen tussen concentratie en een corpusculair botsingsmodel.

Pfaundler ging in hetzelfde artikel ook in op de hypothese van Williamson, dat tussen moleculen voortdurend atomen worden uitgewisseld (§6.2). Hij stelde dat deze hypothese wel kan dienen ter beschrijving van een evenwichtstoestand, maar tekort schiet voor een verklaring van het intreden van een nieuwe evenwichtstoestand na een verstoring en illustreerde dit met een voorbeeld (Pfaundler, 1867, p.72-75).

---

[3]Pfaundler (1867), p.60-61; zie ook Lund (1968), p.126-127. Pfaundler beredeneerde ook het bestaan van een maximale temperatuur, waarboven alle moleculen ontleden: de toestand van volledige ontleding is dan bereikt. Over een eventuele ondergrens liet hij zich niet uit.

[4]Pfaundler (1867), p.66-69; zie ook Lund (1968), p.127.

Reacties en aanvullingen van Horstmann en Van 't Hoff
Volgens Lund voerde Pfaundler zelf geen experimenten uit om zijn ideeën te onderbouwen en beschreef hij zijn theorie niet met wiskundige formules. Wel was hij goed op de hoogte van de resultaten van andere onderzoekers, getuige zijn verwijzingen naar Berthollet, Sainte-Claire Deville, Clausius, Williamson en Berthelot en Péan de Saint-Gilles. De artikelen van Guldberg en Waage uit 1864 (zie §6.2) kende hij echter hoogstwaarschijnlijk niet (Lund, 1968, p.128).

In een artikel uit 1873 ging Horstmann in op Pfaundlers theorieën. Horstmann trachtte het optreden van een evenwichtstoestand met behulp van het entropiebegrip te verklaren, en besprak vanuit dit kader Pfaundlers aanname dat tegengestelde reacties voortdurend optreden. De discussie die hieruit voortkwam, beschreef ik reeds kort in §3.1. Hier is van belang dat Horstmann kritiek had op Pfaundlers moleculair-kinetische verklaringen voor het herstel van chemisch evenwicht na een temperatuurverandering of het toevoegen/onttrekken van een hierbij betrokken stof.

Horstmann toonde aan dat de redeneringen van Pfaundler in het geval van *heterogene* evenwichten tot conclusies konden leiden die strijdig waren met experimentele gegevens. Zo was bekend dat het toevoegen van vast calciumoxide aan een systeem, waarin (vast) calciumcarbonaat in evenwicht is met calciumoxide en koolstofdioxidegas, *geen* invloed heeft op de evenwichtsdruk van dit gas. Op basis van Pfaundlers theorie zou men echter redeneren dat een dergelijke toevoeging een groter aantal botsingen tussen calciumoxide- en koolstofdioxidemoleculen per tijdseenheid tot gevolg heeft, zodat de koolstofdioxidedruk door deze toevoeging zou moeten *dalen* (Horstmann, 1873, p.205-210).

Volgens Snelders gaf Pfaundler later deze zwakheid toe, maar was hij overtuigd van de mogelijkheid om zijn eigen theorie op dit punt aan te passen. Hij zou hier echter niet in slagen (Snelders, 1977, p.65[5]). In 1884 wist Van 't Hoff in zijn "Études" wel een oplossing te formuleren. Van 't Hoff beschouwde heterogene evenwichten als bijzondere gevallen van homogene evenwichten. Aan een vaste stof die bij een dissociatie-evenwicht betrokken is, kende hij een kleine, maar eindige dampspanning toe, welke bij constante temperatuur een vaste waarde heeft. Zolang een minimale hoeveelheid stof in de vaste fase aanwezig is, zal de gasfase van het systeem met damp van deze stof verzadigd zijn. Toevoeging of onttrekking van vaste stof heeft dan geen invloed op de partiële druk van deze stof[6]. De redeneringen van Pfaundler konden hierdoor met succes worden toegepast, indien werd aangenomen dat de betrokken tegengestelde reacties zich uitsluitend in de (homogene) gasfase afspelen[7].

---

[5]Een ander zwak punt in Pfaundlers theorie betreft de implicatie dat verbindingen in principe steeds vollediger ontleden indien de temperatuur stijgt. Van verschillende verbindingen (bijvoorbeeld acetyleen) was echter al bekend dat de dissociatiegraad *afneemt* bij stijgende temperatuur (Ostwald, 1902, p.103).

[6]Van 't Hoff gaf een analoge beschouwing voor evenwichten in een oplossing waarbij een vaste fase betrokken is; Van 't Hoff (1884), p.136-137.

[7]Deze aanname is later overigens hevig bekritiseerd. De nu geaccepteerde theorie veronderstelt het optreden van omzettingen in heterogene systemen aan grensvlakken. In homogene fasen van het systeem vinden vooral transportprocessen plaats.

7.3 Onderwijs-historische ontwikkeling

Stabiliteit

Stabiliteitsredeneringen zoals die uit de vorige paragraaf komen ook voor in leergangen. Zeer uitvoerig worden ze weergegeven in H (1921). H bespreekt het dissociatie-evenwicht van jodium en introduceert het dynamisch model om de onvolledigheid van de dissociatie te verklaren (zie §5.2 en §6.3). Vervolgens gaat hij in op het effect van temperatuurverhoging op dit evenwicht. Experimenteel blijkt een omzetting van J_2 in J op te treden. Op een wijze die in essentie overeenkomt met die van Pfaundler, wordt beredeneerd dat ook bij een hogere temperatuur een dynamische evenwichtstoestand zal intreden. Hierna legt H uit dat zelfs bij extreme temperaturen evenwicht moet kunnen bestaan. Bij zeer hoge temperaturen zullen botsingen tussen laag-energetische "J-moleculen" wel eens tot vorming van J_2 leiden, net zo als bij lage temperaturen wel eens een hoog-energetisch "J_2-molecuul" zal ontleden. Dit moet leiden tot de aanwezigheid van beide soorten moleculen bij iedere temperatuur, ook al is deze aanwezigheid niet te constateren. Op deze wijze beredeneert H dus dat de omzetting theoretisch onvolledig zal zijn. Daarmee verbindt hij aan zijn model een consequentie die bij Pfaundler ontbrak.

Hierna gaat H in op het effect van toevoegingen aan een homogeen evenwicht bij constante temperatuur. Na een beschrijving van experimenteel vastgestelde samenstellingsveranderingen geeft H een "verklaring van deze feiten" in moleculair-kinetische termen, die volledig overeenstemmen met die van Pfaundler over het 'AB+C'-voorbeeld. Bij een bespreking van heterogene evenwichten past H bovenstaande redeneringen aan op de wijze van Van 't Hoff: een 'constante dampspannings'-redenering, aangevuld met de aanname dat de betrokken reacties optreden in de homogene gasfase van het systeem.

H heeft dus getracht om mogelijkheden van het dynamisch model voor een kwalitatieve beschrijving van chemisch evenwicht uit te werken. Niet alleen de onvolledigheid van een chemische omzetting wordt er mee verklaard, maar ook vragen als 'hoe komt een evenwicht tot stand?'; 'hoe reageert het op zekere veranderingen?' etc., worden aan de hand van dit model besproken. Stabiliteitsredeneringen van dit type komen ook voor bij P (1938, p.67-68) en F (1952, p.213), zij het veel minder uitvoerig. Zo ontbreekt een bespreking van temperatuurverstoringen.

In de meeste andere leergangen uit de periode 1920-1968 wordt de stabiliteit van chemisch evenwicht besproken aan de hand van een niet-thermodynamische omschrijving van het principe van Le Chatelier-Van 't Hoff (§3.3). In recente leergangen wordt de stabiliteit van chemisch evenwicht op verschillende manieren en plaatsen aan de orde gesteld. Soms wordt daarbij een verband gelegd met thermodynamica (zoals in R&F, 1986, 5V, p.77-81, waarin het maximale entropiecriterium wordt gehanteerd). In boeken voor 4-HAVO/VWO komen nog wel kinetische stabiliteitsbeschouwingen op basis van het dynamisch model voor, maar deze zijn veel beknopter dan die in H.

Zo stellen K&G ten aanzien van het evenwicht van NO_2 en N_2O_4 dat de concentratieverhouding van deze gassen verandert onder invloed van de temperatuur, waarbij wordt verwezen naar een uitgevoerde proef. Over deze verandering schrijven de auteurs:

> "Kennelijk is een gevolg van een temperatuurswijziging, dat de twee reactiesnelheden niet meer gelijk zijn. Er is dan geen evenwicht meer: de ene reactie verloopt sneller dan de andere. Toch wordt de snelste reactie weer langzamer en de langzaamste weer sneller tot beide gelijk zijn. Er is dan een nieuwe evenwichtstoestand ontstaan met andere concentraties." (K&G, 1983, 4H, p.196)

Dat beide reacties weer even snel gaan verlopen, wordt zonder argumentatie meegedeeld. Het dynamisch model wordt dus wel gehanteerd, maar verklaringsmogelijkheden die dit model biedt worden niet werkelijk benut. Dit geldt ook voor de bespreking van temperatuurinvloeden in andere leergangen[8].

In R&F worden deze mogelijkheden wel benut als hierin wordt ingegaan op het effect van een toevoeging van B aan een systeem waarin een gasevenwicht $A+B \rightleftarrows C$ heerst:

> "Als we een extra hoeveelheid B in het evenwichtsmengsel brengen, zal (bij constant volume) de *concentratie* van B groter worden. *Daardoor wordt de reactiesnelheid naar rechts groter dan die naar links.* Het evenwicht is verstoord. De concentraties van A en B nemen af en die van C neemt toe. Deze concentratieveranderingen doen *op hun beurt* de reactiesnelheid naar rechts *afnemen* en die naar links *toenemen*. Tót beide reactiesnelheden weer gelijk zijn. Dan is een nieuwe evenwichtstoestand ontstaan, met andere concentraties van A, B en C dan de oorspronkelijke." (R&F, 1985, 4V, p.199)

Kenmerkend in deze redenering is dat reactiesnelheden (bij constante temperatuur) worden bepaald door concentraties van de reagerende stoffen. Een ander kenmerk betreft de samenhang van de twee tegengestelde reacties. Door deze twee kenmerken te combineren, wordt beredeneerd dat *in een niet-evenwichtssituatie beide reacties elkaar wederzijds beïnvloeden en wel zodanig dat de snelste van de twee wordt vertraagd terwijl de traagste wordt versneld. Het resultaat is dat beide snelheden aan elkaar gelijk worden, zodat een nieuwe evenwichtstoestand wordt bereikt.*

Ontstaansmechanisme

Dit type redenering komt ook in de andere leergangen voor, maar niet om het effect van een toevoeging op een evenwicht te verklaren. Wel wordt een mechanisme beschreven dat leidt tot de instelling van een dynamisch evenwicht. Een dergelijk *ontstaansmechanisme* wordt toegelicht met grafieken, waarin de snelheden van beide tegengestelde reacties als functie van de tijd worden weergegeven. In G& is een grafiek voor een omkeerbare reactie $A+B \rightleftarrows C+D$ in een homogeen systeem weergegeven:

---

[8]Zie C (1984, 4V, p.146) en R&F (1985, 4V, p.198-199).

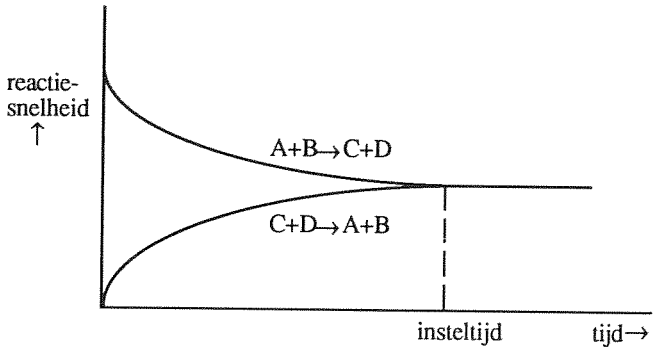

fig. 7a

Deze grafiek wordt toegelicht met een redenering waarin het verloop van beide snelheden wordt verklaard. Het betoog komt volledig overeen met het ontstaansmechanisme uit B (1946; zie §6.3), zij het dat wiskundige formules voor reactiesnelheden in G& ontbreken. In de andere recente leergangen worden grafieken van dezelfde vorm beschreven, die dan betrekking hebben op het verdelingsevenwicht van jood[9].

Reactiesnelheid

De term reactiesnelheid die in figuur 7a bij de verticale as is geplaatst, is in het voorafgaande onderwijs geïntroduceerd. Tot aan het moment waarop grafieken van dit type gepresenteerd worden, wordt reactiesnelheid in alle leergangen gekoppeld aan stofhoeveelheden en/of -concentraties, waarvan veranderingen in de tijd (waarneembaar en/of meetbaar) gevolgd kunnen worden[10].

Ter illustratie een voorbeeld. In R&F wordt een (denkbeeldige) gasreactie van het type A+B→C beschreven. Voor het geval dat A en B reageren in een vat van constant volume, wordt de volgende grafiek geschetst (R&F, 1985, 4V, p.182):

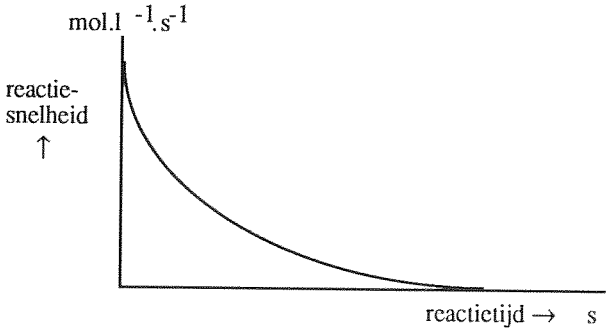

fig. 7b

[9]Zie G& (1985, 4V, p.188) respectievelijk C (1984, 4V, p.145); K&G (1983, 4H, p.194) en R&F (1985, 4V, p.197).

[10]Elders is een artikel verschenen waarin begripsontwikkeling omtrent reactiesnelheid centraal staat; Van Driel & De Vos (1989a).

Deze grafiek wordt in de tekst als volgt toegelicht:

> "Bij de start van een reactie zijn de concentraties van de reagerende deeltjes maximaal. Er is dan immers nog niets omgezet. Dit betekent dat ook de startsnelheid van de reactie maximaal zal zijn. Hierdoor wordt direct na het begin van de reactie een groot aantal deeltjes per seconde omgezet. Als gevolg daarvan gaan de concentraties van de reagerende deeltjes snel dalen. Hierdoor loopt de reactiesnelheid direct na de start vrij snel terug. Tegen het einde van de reactie is de reactiesnelheid bijna nul."
> (R&F, 1985, 4V, p.181)

De vorm van deze grafiek is typerend voor een reactie in een homogeen systeem[11].

Figuur 7b verschilt principieel van figuur 7a, omdat in 7a het verloop van twee snelheden van *toegekende* reacties is geschetst. Indien men het concentratieverloop van één van de stoffen (A, B, C of D), die bij het voorbeeld van 7a betrokken zijn, *experimenteel* in de tijd zou volgen en op basis daarvan een reactiesnelheidsgrafiek zou construeren, dan zou deze binnen het kader van figuur 7a de volgende vorm ('exp.') hebben:

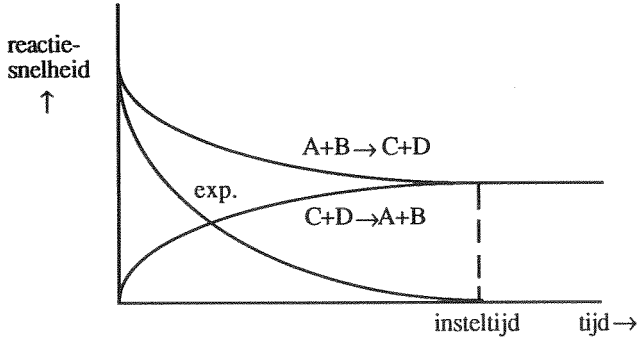

fig. 7c

Alleen in de beginsituatie is de snelheid die aan de reactie A+B→C+D kan worden toegekend (ongeveer) gelijk aan de experimentele snelheid. Vervolgens kan deze experimentele snelheid beschouwd worden als het verschil van de twee toegekende snelheden van de tegengestelde reacties ('netto-snelheid'). In de evenwichtssituatie is de experimentele snelheid nul geworden; terwijl de toegekende snelheden eindig en onderling even groot zijn (dit wordt ook beredeneerd door Arndt, 1988, p.292-293).

De term reactiesnelheid heeft in het geval van toegekende tegengestelde reacties dus geen directe relatie met waarnemingen (zie ook Vogelezang, 1989). Desalniettemin wordt het verloop van de snelheden van zulke reacties geacht van concentraties af te hangen op een wijze, die semi-kwantitatief ook geldt

[11]In heterogene systemen worden snelheden waarmee stoffen (meetbaar) worden omgezet vaak in belangrijke mate bepaald door transport- en grensvlakverschijnselen, hetgeen volledig andere grafieken tot gevolg kan hebben.

voor snelheden van waarneembare reacties (afname van concentratie(s) van uitgangsstof(fen) leidt tot afname van reactiesnelheid, etc.).

Voorlopige afronding
Modelmatig-kinetische beschouwingen worden in schoolboeken veelvuldig gegeven in het kader van een bespreking van het *ontstaan* van een evenwichtstoestand, maar niet vaak om de *stabiliteit* van chemisch evenwicht te verklaren. Door dit wel te doen kan men het dynamisch model een extra dimensie geven, waardoor de betekenis ervan kan toenemen.

Op voorhand is echter duidelijk dat het ontwikkelen van een stabiliteitsbegrip op basis van het dynamisch model onderwijsproblemen met zich mee zal brengen. Uit het voorgaande bleek reeds dat een nieuw begrip reactiesnelheid nodig is. Bovendien worden redeneringen gevergd waarin sprake is van wederzijdse beïnvloeding van snelheden van twee tegengestelde reacties. Deze redeneringen worden gekenmerkt door een complex netwerk van causale relaties, dat ik in §7.6 nader zal analyseren.

7.4 Stabiliteit bij temperatuurverandering

Opzet leerlingentekst (eerste versie)
In de eerste versie van de leerlingentekst waren de robalaatproeven via temperatuurvariatie opgenomen. De mogelijkheid dat in een oplossing van 55°C twee tegengestelde reacties plaatsvinden, werd via een reeks vragen aan de orde gesteld (§6.5).

Hierna werd de eerder onderwezen regel dat de snelheid van een reactie altijd toeneemt indien de temperatuur stijgt, in verband gebracht met de robalaatproeven. Bij temperatuur*verlaging* vindt zichtbaar een reactie plaats, zodat het lijkt alsof de snelheid hiervan toeneemt door deze verlaging. Deze paradox kan worden opgelost door aan te nemen dat er steeds twee tegengestelde reacties plaatsvinden. De waarneembare veranderingen die bij de proeven optreden kunnen dan worden verklaard door aan te nemen dat de snelheden niet in dezelfde mate veranderen: zo wordt de reactie die tijdens temperatuurverlaging *zichtbaar* optreedt blijkbaar minder vertraagd door deze verlaging dan de andere. *Leerlingen zouden dus de regel dat een reactiesnelheid toeneemt indien de temperatuur stijgt, kunnen handhaven door het dynamisch model in te voeren.* Deze onderwijsopzet kreeg gestalte in een vragenreeks, waarvan de opzet elders is beschreven (zie Mertens, 1986, p.25-29).

Hierna werd een nieuw probleem aan de orde gesteld: als de twee snelheden verschillend beïnvloed worden door een temperatuurverandering, kunnen ze dan weer aan elkaar gelijk worden als de temperatuur opnieuw constant wordt, en zo ja, hoe? Deze vragen werden via vervolgopdrachten besproken. De bedoeling hiervan was om leerlingen een mechanisme te laten beredeneren voor de instelling van een nieuwe evenwichtstoestand na een verstoring. Daarmee zouden ze een kinetische verklaring voor de stabiliteit van chemisch evenwicht formuleren. Opgemerkt zij tenslotte dat corpusculaire termen niet voorkwamen in de bedoelde opdrachten.

Ervaringen
Elders is al gerapporteerd dat deze onderwijsopzet in de praktijk niet functioneerde zoals bedoeld (zie Van Driel et al., 1988, p.38-40). In vrijwel alle groepen riepen leerlingen hun docent te hulp. Meestal volgde dan een lange en moeizame discussie, waarin de docent de beoogde redeneringen voor leerlingen aannemelijk probeerde te maken. Er traden vooral problemen op wanneer:

- leerlingen redeneerden dat de snelheid van de ene reactie stijgt als de temperatuur verhoogd wordt (overeenkomstig de kleurverandering), maar dat de snelheid van de andere reactie dan daalt[12]. Bij temperatuurverlaging zou het omgekeerde gelden. Deze leerlingen lieten dus de regel 'temperatuurstijging leidt altijd tot vergroting van reactiesnelheid' los, hetgeen de invoering van het dynamisch model blokkeerde;
- leerlingen niet in staat bleken om te beredeneren dat twee reactiesnelheden die door een temperatuurverandering verschillend van grootte zijn geworden, opnieuw aan elkaar gelijk kunnen worden. Veel leerlingen slaagden er niet in om de invloed van concentratieveranderingen in hun redeneringen te betrekken (wederzijdse beïnvloeding; zie §7.3).

Ik analyseerde de geconstateerde problemen als volgt. In de gevraagde redeneringen staan twee tegengestelde reacties centraal, waarvan het optreden niet ondersteund wordt door waarnemingen. De snelheden van deze hypothetische reacties worden geacht te veranderen onder simultaan werkende invloeden van concentratie *en* temperatuur, volgens regels die ook gelden voor waarneembare reacties (toename van concentratie(s) van uitgangsstof(fen) respectievelijk temperatuur leidt tot stijging van reactiesnelheid). Hierbij lijken de te beredeneren snelheidsveranderingen echter in strijd met waarnemingen:

- Zo moet van een reactie die zichtbaar *begint* plaats te vinden bij temperatuurverlaging, worden aangenomen dat de snelheid ervan *daalt* als gevolg van deze verlaging;
- Van dezelfde reactie moet worden aangenomen dat de snelheid ervan stijgt tijdens een temperatuurstijging, terwijl deze reactie dan juist niet zichtbaar optreedt en de tegengestelde reactie wel;
- Van dezelfde reactie wordt de snelheid bij temperatuurstijging ook positief beïnvloed door optredende concentratieveranderingen. Desalniettemin verloopt de tegengestelde reactie, waarbij concentratie- en temperatuurinvloeden elkaar *tegenwerken*, bij temperatuurstijging zichtbaar en dus *sneller*.

Deze paradoxen werden voor de leerlingen bovendien gecompliceerd doordat:

- zij niet konden begrijpen waardoor de ene reactie meer versneld wordt door een temperatuurstijging dan de andere. Hiervoor is kennis nodig, die in het onderwijs nog niet aan de orde is geweest;
- zij niet konden weten hoe ze de invloeden van temperatuur en concentratie tegen elkaar moesten afwegen. Zo merkte een leerling na een lange discussie op: "maar waarschijnlijk is als de concentratie minder wordt, heeft dat minder invloed op de reactie dan dat de temperatuur hoger wordt".

---

[12]Hackling en Garnett (1985) hebben dezelfde redenering in hun onderzoek aangetroffen.

Daarnaast hadden veel leerlingen (en docenten!) moeite om in termen van simultane invloeden te redeneren. Dit werd soms 'opgelost' door de invloeden van temperatuur en concentratie in de tijd van elkaar te scheiden.

Op grond van deze analyse heb ik besloten om in het vervolg stabiliteitsredeneringen slechts aan de orde te stellen voor situaties waarin de temperatuur constant is. Om deze reden zijn de temperatuurvariatie-proeven in de tweede versie vervangen door proeven waarin de omkeerbaarheid van een reactie via toevoegingen werd bestudeerd.

7.5 Stabiliteit bij toevoegingen

Opzet leerlingentekst (tweede versie)
In de tweede versie van de leerlingentekst werden stabiliteitsredeneringen aan de orde gesteld ná de robalaatproeven via toevoegingen (§4.4) en ná de tabelopdracht (§5.5). Via vragen was de opvatting dat bij deze proeven steeds twee tegengestelde reacties verlopen ter sprake gebracht. Hierover werd in de tekst uiteindelijk opgemerkt (zie ook §6.6):

> "Hoewel je het niet kunt zien, nemen chemici aan dat er steeds twee reacties tegelijkertijd verlopen in de oplossingen bij deze proeven. We geven dit in een schema als volgt weer:
> blauwbaliet+water$\rightleftarrows$robalaat+chloride"

Hierna volgde een reeks vragen over een (hypothetische) situatie waarin de reactie waarbij blauwbaliet gevormd wordt, sneller verloopt dan de reactie waarbij robalaat gevormd wordt. Zo'n situatie zou bijvoorbeeld gerealiseerd kunnen worden door 'chloride' bij constante temperatuur toe te voegen aan een systeem dat aanvankelijk in evenwicht verkeerde.

In de vragenreeks werd het verloop van beide snelheden onder invloed van de optredende concentratieveranderingen aan de orde gesteld. De bedoeling van de vragen was dat de leerlingen zouden beredeneren dat beide snelheden na enige tijd weer aan elkaar gelijk worden (wederzijdse beïnvloeding; zie §7.3). In een volgende opdracht was in de leerlingentekst een assenstelsel weergegeven, waarin de leerlingen het verloop van beide snelheden in de tijd, zoals zij dat eerder hadden beredeneerd, moesten schetsen. Corpusculaire termen kwamen in deze opdrachten niet voor.

Ervaringen
In één groep werd na een lange discussie, waarin de docent het initiatief had, vastgesteld dat een situatie waarin de blauwbalietvorming sneller verloopt dan de robalaatvorming, moet leiden tot een stijging van de concentraties van blauwbaliet en water en een daling van de concentraties van robalaat en chloride. In de leerlingentekst werd vervolgens gevraagd naar de consequentie van deze veranderingen voor de snelheid van de reactie blauwbaliet+water$\rightarrow$robalaat+chloride. Hierop ontstond de volgende discussie[13]:

[13]In plaats van concentratie werd in de tekst de term molariteit gehanteerd.

protocol 7.1

1	kees	De snelheid neemt op den duur af, of niet?
2	fred	Ja, maar dat klopt toch niet. Dan zou 't juist sneller moeten worden, want de molariteit neemt toe. Dus zou de reactie sneller moeten worden.
3	kees	Ja, ja.
4	fred	Maar dat gaat-ie niet, want in 't begin gaat-ie kedeng, opeens snel, later op wordt-ie heel langzaam.
5	kees	Waarom?
6	max	Dat is gewoon zo.
7	fred	Dat heb je gezien.
8	hans	Nee, maar de molariteit wordt toch meer?
9	fred	Ja o.k., maar de snelheid van de reactie niet (...) je ziet toch dat-ie in 't begin hoppa heel snel verkleurt en naderhand steeds langzamer.

Op dit punt stokte de discussie. De leerlingen probeerden hun docent in te schakelen, maar die bleek tijdelijk niet beschikbaar. Daarna probeerde fred het gesprek voort te zetten:

10	fred	Als 't goed is moet de molariteit, als die groter wordt dan wordt de snelheid van de reactie wordt dan groter.
11	max	Ja, wordt dan groter als 't goed... ja maar die ander, neemt de molariteit af, dus wordt de reactiesnelheid kleiner.
12	fred	Ja.
13	kees	Zie, nou zeg je opeens wat anders als daamet.
14	fred	Nee, ik zeg hetzelfde.
15	kees	Net zei je dat we gezien hadden dat 't...
16	fred	Oh, wel nee, ja in de praktijk, ja o.k.
17	kees	Dit is toch praktijk man, we hebben toch al die proefjes gedaan?
18	fred	Nou, dit is theorie gewoon.

Fred constateert als eerste een conflict tussen de ervaring dat reactiesnelheden bij proeven altijd afnemen in de loop van de tijd en de regel dat een molariteits-toename van reactanten tot stijging van reactiesnelheid leidt (2). Vervolgens proberen hij en max een redenering op te bouwen voor *beide* reacties (10-12). Kees dwingt fred om een onderscheid tussen praktijk en theorie in te voeren (16-18). Hoewel zo'n onderscheid in dit verband zinvol is, slaagt fred er niet in om het verder uit te werken.

De tegenstelling theorie-praktijk speelde opnieuw een rol toen even later discussie ontstond over de snelheid van robalaat+chloride→blauwbaliet+water. Hierover zei max:

19	max	Kleiner natuurlijk, als die ander groter wordt.
20	kees	Nee, als de ene kleiner wordt, dan wordt de andere toch ook kleiner?

Toen hij even later geconfronteerd werd met de opvatting van max, zei de docent (G.):

21	G.	Als de één groter wordt, dat hoeft toch niet direct invloed op de ander te hebben?
22	max	Tuurlijk wel.
23	G.	Oh, vertel eens waarom? (...)
24	max	Als de ene reactie sneller gaat, ja? Dan wordt de molariteit groter.
25	G.	Ja, van? Van de stof die ontstaat, daar bij die ene reactie.
26	max	Ja, en die ander wordt-ie kleiner; en hoe kleiner de molariteit, hoe langzamer de reactie.
27	G.	Dus 't gevolg van het feit dat een reactie sneller gaat dan de ander, is dat uiteindelijk die ene reactie steeds langzamer zal gaan en die andere steeds sneller.
28	max	Nog een keer? (...)
29	G.	Nou, probeer ik jullie weer in verwarring te maken, want 't kan best zijn dat ik gelijk heb (...) ik kan beweren: kijk, als nou die ene reactie sneller verloopt dan ontstaat er dus een hele hoop van die stof die bij die reactie ontstaat.
30	max	Ja.
31	G.	Betekent dat die molariteit toeneemt en dat... en die molariteit is van belang nou net voor de andere reactie. Is dat zo?
32	max	Ja.
33	G.	Dus dan zou die dus steeds sneller gaan.
34	max	Nou weet ik 't helemaal niet meer! Nou bedankt!
35	kees	Leuk hoor, leuk. We snapten 't nog...

Kees lijkt uit te gaan van de gedachte dat er *twee* reacties optreden, waarbij hij de eerder genoemde ervaringsregel op de snelheden van beide toepast (20). Voor hem blijft reactiesnelheid dus aan waarnemingen gekoppeld. Max lijkt op een ander spoor te zitten en wordt door G. uitgedaagd om zijn opvatting te expliciteren. De poging die max dan onderneemt, strandt echter doordat G. (in 27) een paradox formuleert, die door max niet doorzien wordt. G. probeert zijn stelling nog toe te lichten (29, 31), maar deze aanpak leidt niet meer tot een voortgang in het gesprek (34, 35). Hierna werd de discussie niet verder voortgezet.

De hierop volgende opdracht waarin grafieken moesten worden geschetst, leverde deze groep ook veel problemen. Slechts na corrigerend ingrijpen van G. kwam de beoogde schets tot stand. Uit het gesprek dat de groep hierover met G. voerde, trok ik de conclusie dat deze opdracht voor hen niet produktief gefunctioneerd had. Ze leken de schets slechts op gezag van G. over te nemen.

Uit het bovenstaande gesprek, uit gesprekken in andere groepen en uit schriftelijke groepsantwoorden concludeerde ik dat leerlingen niet of nauwelijks door de beoogde stabiliteitsargumentaties werden aangesproken. Zij kwamen aan de hand van de leerlingentekst en (meestal) de hulp van hun docent in het algemeen niet verder dan een 'napraten zonder inzicht' van deze argumentatie. Kenmerkend hiervoor beschouw ik de regelmaat waarmee leerlingen spraken en schreven over 'de' reactie, 'de' molariteit, 'de' (reactie-)snelheid, zonder aan

te geven waarop dit bepalend lidwoord betrekking had. Zeldzaam waren voorbeelden waarin leerlingen spraken van *twee* reacties en/of -snelheden en nog zeldzamer de voorbeelden waarin hiertussen zinvolle verbanden werden geformuleerd. Op grond hiervan heb ik besloten om stabiliteitsredeneringen op basis van het dynamisch model in de derde versie van de leerlingentekst nog slechts een marginale rol te laten vervullen.

7.6 Analyse en conclusies

Causale redeneringen
De geconstateerde moeilijkheden worden m.i. in de eerste plaats veroorzaakt doordat in de beoogde stabiliteitsredeneringen moet worden uitgegaan van een (niet-bewijsbare) hypothese, i.c. het dynamisch model. Bovendien zijn deze redeneringen van een complexe aard. Zij vormen een netwerk van causale relaties, dat ik in een schema als volgt kan weergeven:

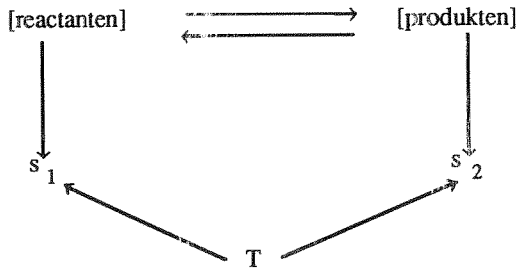

fig. 7d Toelichting: [...] heeft betrekking op concentraties, *s* op reactiesnelheden en *T* op temperatuur.

De enkele pijlen in dit schema geven 'positieve' causale relaties aan: een toename van een variabele veroorzaakt een toename van een andere variabele. De 'dubbele pijl' wijst op de samenhang tussen de concentraties van reactanten en produkten: bij constant volume impliceert een concentratiestijging van reactanten een concentratiedaling van produkten en omgekeerd. Het schema is overigens vereenvoudigd doordat afzonderlijke reactanten en/of produkten niet zijn onderscheiden. Bovendien is een relatie tussen temperatuur en reactiewarmtes buiten beschouwing gelaten.

Dit schema is bij de beschreven proeven op een bepaalde manier met handelingen en waarnemingen verbonden: de mogelijke handelingen omvatten in de tweede versie het toevoegen van ofwel water ofwel 'chloride' (beide kleurloos) en in de eerste versie het wijzigen van de temperatuur. Waarneembaar zijn kleurveranderingen die als concentratieveranderingen van robalaat en/of blauwbaliet *en* als verschil tussen de reactiesnelheden (s_1-s_2) kunnen worden geïnterpreteerd.

De simultane invloeden van temperatuur en concentraties op de reactiesnelheden komen in dit schema naar voren doordat bij iedere snelheid twee pijlen aankomen. Door de temperatuurinvloed buiten beschouwing te laten (tweede versie), wordt het schema vereenvoudigd. In beide gevallen is het sche-

ma als geheel een complex netwerk, waarin causale relaties niet uitsluitend volgens lineaire ketens verbonden zijn.

De redeneringen van leerlingen en docenten kenmerkten zich in de praktijk echter voornamelijk door een lineaire causaliteit. Zo werd het simultane effect van temperatuur en concentratie bij de eerste versie meestal genegeerd: leerlingen en docenten redeneerden bij voorkeur in termen van temperatuur-invloed *of* concentratie-invloed.

Bij de tweede versie deden leerlingen meestal slechts uitspraken over één van beide snelheden en zelden over een samenhang tussen (veranderingen in) beide snelheden. In protocol 7.I verwoordde G. een dergelijke samenhang (27), maar deze redenering werd niet overgenomen door de leerlingen. In datzelfde protocol probeerde max op verschillende momenten een samenhang onder woorden te brengen (zie 11, 19, 24, 26). Max kwam echter niet tot de conclusie dat beide snelheden uiteindelijk aan elkaar gelijk zouden moeten worden.

Dat leerlingen (maar ook docenten) bij voorkeur lineair causaal redeneren is ook beschreven door Rozier en Viennot (1990). Zij stelden vast dat indien sprake is van simultaan werkende invloeden, het aantal variabelen veelal gereduceerd wordt door er één of meer buiten beschouwing te laten of door enkele variabelen met elkaar te combineren. Voor dit soort onvolledige en/of aangepaste redeneringen hanteren zij de term "soft qualitative reasoning".

Consequenties

De mogelijkheden om aan de hand van het dynamisch model te beredeneren dat na een verstoring van een evenwichtstoestand een nieuwe evenwichtstoestand ontstaat, bleken door leerlingen die met mijn leerlingenteksten werkten niet of nauwelijks benut te worden. Ik ga er vanuit dat de omvang van de geconstateerde problemen samenhangt met de door mij gekozen onderwijsvorm, waarin leerlingen zo veel mogelijk zelf verklaringen opstellen. Ik had gehoopt dat hierdoor het dynamisch model voor hen aan betekenis zou winnen, maar moet concluderen dat dit niet het geval is geweest. Voor mij is daarmee een reden om dit model voor deze leerlingen aan de orde te stellen, ter discussie komen te staan.

Achteraf kan ik bij mijn onderwijsopzet de volgende kanttekeningen plaatsen:

- In de opdrachten met vragenreeksen werden causale relaties tussen twee factoren vraag voor vraag aan de orde gesteld. Dit heeft het lineair causaal redeneren vermoedelijk bevorderd. Een anders gestructureerde vraagstelling zou leerlingen meer ruimte kunnen bieden voor redeneringen waarin zij de samenhang tussen verschillende factoren tot uiting brengen. Welke structurering hiervoor geschikt is, is wat mij betreft een vraag.
- Een vraagstelling in corpusculaire termen had voordelen kunnen bieden. Een corpusculair model maakt de tegengestelde reacties voorstelbaar, door de snelheden van beide in termen van aantallen omgezette moleculen per tijd- en ruimte-eenheid te representeren. Een relatie als $s_{netto}=s_1-s_2$ kan dan verbonden worden met verschillen in deze aantallen, waardoor een onderscheid tussen waarneming ('netto') en model (s_1-s_2) mogelijk duidelijker wordt.

- Ik had aan leerlingen grafieken kunnen voorleggen waarin het verloop van beide snelheden reeds is geschetst. Vervolgens had ik hen kunnen vragen om het verloop van deze snelheden te verklaren. Dit had wellicht meer redeneringen van het beoogde type opgeleverd.
- De ontwikkeling van het stabiliteitsbegrip zou op een ruimere ervaringsbasis gegrond kunnen worden. Dat wil zeggen: leerlingen proeven laten uitvoeren waaruit naar voren komt, dat na iedere ingreep een nieuwe evenwichtssituatie resulteert. Deze suggestie is ook door Wheeler en Kass (1978) geformuleerd. Variaties op de in §5.4 beschreven rodanideproeven kunnen voor dit doel worden aangewend[14].
- Voorafgaand aan redeneringen betreffende evenwichtsverstoringen zou een ontstaansmechanisme (§7.3) aan de orde kunnen komen. De hierbij horende redeneringen zijn van hetzelfde type als die, welke nodig zijn om de invloed van een toevoeging te verklaren, maar hebben betrekking op een minder complexe situatie.

Het lijkt mij echter hoe dan ook niet zinvol om in 4-HAVO/VWO de invloed van temperatuur op evenwicht te bespreken aan de hand van modelmatig-kinetische argumentaties. Een bespreking hiervan dient met het begrip reactiewarmte verbonden te worden (zie verder §8.5).

De beschreven onderzoeksresultaten hebben consequenties voor de (na)scholing van docenten. Verschillende deelnemers aan de nascholingscursus vertelden, dat zij gewend waren om stabiliteitsredeneringen aan de hand van modelmatig-kinetische argumentaties en hierbij horende grafieken (zoals fig. 7a) in hun onderwijs te hanteren. Enkele docenten die met de derde versie van de leerlingentekst hadden gewerkt, vroegen zich af waarom zulke grafieken hierin niet waren opgenomen, "want dat helpt toch zo goed".

Ik vermoed dat deze docenten zich, net als ik bij het ontwerpen van de eerste versie, onvoldoende realiseren hoe gecompliceerd het netwerk van causale relaties (fig. 7d) is, vooral in het geval van temperatuurvariatie. Daarnaast ga ik er vanuit dat zij een onderwijsvorm hanteerden waarin hun kennis via uitleg werd overgedragen aan leerlingen. In dat geval worden de in mijn onderzoek geconstateerde problemen van leerlingen met deze redeneringen waarschijnlijk niet of nauwelijks opgemerkt.

Indien docenten echter streven naar een vergroting van de betrokkenheid van leerlingen bij het onderwijs, en in dat kader kiezen voor een onderwijsvorm waarin het van belang is dat leerlingen zelf verklaringen kunnen en willen formuleren, moeten de motieven om kinetische stabiliteitsredeneringen buiten de leerlingentekst te laten voor hen herkenbaar gemaakt worden. Hiertoe zouden de eigen ervaringen van docenten op dit gebied als uitgangspunt moeten dienen. Door deze te bespreken in verband met de hier beschreven onderzoeksresultaten zou een bezinning op mogelijkheden en beperkingen van kinetische stabiliteitsredeneringen kunnen plaatsvinden.

---

[14]Zie bijvoorbeeld C (1985, 5/6V, 1-8, p.53). Een andere geschikte proef wordt beschreven door Blissett (1988). Hierin worden verstoringen in het N_2O_4/NO_2-systeem via een computer gevolgd.

hoofdstuk 8

Conclusies en aanbevelingen ten aanzien van chemisch evenwicht

In dit hoofdstuk wordt de beschrijving van ontwikkelingen van chemische begrippen afgerond. Ik formuleer onderzoeksconclusies en aanbevelingen voor nader onderzoek. Eerst beschrijf ik een didactische structuur voor een kwalitatief chemisch evenwichtsbegrip op basis van het empirisch onderzoek dat in de vorige vier hoofdstukken is beschreven. Deze didactische structuur wordt vergeleken met de behandeling van een kwalitatief evenwichtsbegrip, die nu gebruikelijk is in 4-HAVO/VWO. Hieruit volgen aanbevelingen voor wijzigingen in de vigerende leerplannen en examenprogramma's.

Vervolgens beschrijf ik enkele kenmerken van de gangbare invoering van het begrip chemische reactie in het Nederlandse voortgezet onderwijs. Ik wijs op een aantal aspecten die weinig aandacht krijgen en formuleer in dit verband alternatieve routes voor begripsontwikkeling en consequenties hiervan voor de introductie van chemisch evenwicht. De uitwerking van deze alternatieven biedt mogelijkheden voor vervolgonderzoek.

Hierna ga ik in op kwantitatieve aspecten van chemisch evenwicht. In eerste instantie verken ik de onderwijsroutes die in leergangen, binnen de kaders van vigerende leerplannen en examenprogramma's, worden gehanteerd bij de invoering van de relatie 'concentratiebreuk=K' (zie ook §3.3). Bij deze verkenning plaats ik een aantal kanttekeningen. Tenslotte formuleer ik een onderwijsvoorstel, hetgeen een optie voor didactisch onderzoek inhoudt.

8.1 Een didactische structuur van chemisch evenwicht

Didactische structuur

In §3.5 is een onderzoek aangekondigd naar een aantal aspecten van het begrip chemische reactie in 4-HAVO/VWO. In de tussenliggende hoofdstukken zijn ontwikkelingen beschreven ten aanzien van de aspecten omkeerbaarheid en onvolledigheid van chemische reacties en ten aanzien van het toekennen van gelijktijdig optredende reacties. Daarbij kwamen bovendien relaties tussen de verschillende aspecten naar voren. In deze paragraaf worden de onderzoeksresultaten in de vorm van een didactische structuur met elkaar verbonden. Hierin figureren chemische begrippen waarvan inhoud en onderlinge samenhang in het kader van begripsontwikkeling worden omschreven (§2.2). Uit de didactische structuur volgt een reeks concrete suggesties voor onderwijs, voor toetsen en voor nascholing.

Kringloopreactie. De mogelijkheid om een chemische omzetting ongedaan te maken komt naar voren in een zogenoemde kringloopreactie (§4.2). Dit begrip vooronderstelt een elementbegrip. Bij een kringloopreactie worden stoffen die in eerste instantie verdwenen, later teruggevormd. Eveneens worden aanvan-

kelijk gevormde reactieprodukten weer omgezet. De twee reactievergelijkingen (of -schema's) van de betrokken omzettingen zijn elkaars omgekeerde.

Omkeerbare reactie. In veel gevallen kan de omkering van een chemische omzetting plaatsvinden door de waarde van één systeemvariabele te wijzigen. In dat geval is sprake van een omkeerbare reactie (§4.2). Het opstellen van reactievergelijkingen brengt in dit geval een anomalie aan het licht, met name indien omkering onder invloed van stoftoevoer heeft plaatsgevonden. Dit illustreer ik aan de hand van een reactie van het type A+B→C+D in een homogeen systeem. Stel dat toevoeging van A aan B leidt tot de vorming van C en D, terwijl toevoeging van C aan het ontstane reactiemengsel vorming van A en B tot gevolg heeft. Een vraag die tot de bedoelde anomalie leidt, heeft betrekking op deze laatste toevoeging: waarom is het nodig om C toe te voegen om een reactie met D tot A en B te laten optreden, indien C en D vóór deze toevoeging beide reeds aanwezig waren?

Identiciteit (1). Vertaald in corpusculaire termen levert deze anomalie de volgende vraag op: onderscheiden zich de 'toegevoegde C-deeltjes' van de reeds aanwezige? Daarmee komt de identiciteit van deze corpuscula (§5.1) ter discussie te staan.

Empirische onvolledigheid. Aan de hand van het hiervoor genoemde voorbeeld beschrijf ik tevens de onvolledigheid van chemische omzetting. Nadat een merkbare omzetting van A en B in C en D is opgetreden, treedt een toestand in waarin geen veranderingen waarneembaar zijn. Uit een analyse van het reactiemengsel blijkt dat zowel A als B aanwezig zijn.

Overmaat. Door dit resultaat komt de betekenis van het begrip overmaat, als 'hoeveelheid overgebleven reactant' ter discussie te staan (§5.4). De betrokken vraag luidt of van zowel A als B een overmaat gebruikt was.

Identiciteit (2). Deze vraag heeft op corpusculair niveau (opnieuw) consequenties voor de identiciteit: reageren sommige 'A-deeltjes' en 'B-deeltjes' wel met elkaar en andere niet?

Door problematisering van overmaat en/of identiciteit wordt een vraag opgeroepen naar een verklaring voor de onvolledigheid van de omzetting van A en B in C en D.

Chemisch evenwicht (als verschijnselterm). Nadat B en A onvolledig gereageerd hebben onder vorming van C en D is een toestand ontstaan waarin alle vier de betrokken reactanten aanwezig waren (en bleven). In het beschreven systeem is daarmee voldaan aan de voorwaarden voor het optreden van zowel de reactie A+B→C+D als de reactie C+D→A+B. Er is dan sprake van chemisch evenwicht.

Tegengestelde reacties. Door aan te nemen dat beide reacties in een evenwichtstoestand inderdaad optreden, wordt de anomalie opgelost dat een reactie slechts optreedt indien een *extra* hoeveelheid van één der betrokken reactanten wordt toegevoegd. Aangezien de argumentatie voor beide reacties analoog verloopt, moet het tegelijkertijd optreden van beide worden verondersteld. Daarmee wordt het begrip tegengestelde reacties ontwikkeld (§6.3).

Dynamisch evenwicht. Het gegeven dat in een evenwichtstoestand geen veranderingen waarneembaar zijn, lijkt in strijd met het toekennen van tegengestelde reacties. Door te stellen dat beide reacties met even grote snelheid plaatsvinden en daarmee elkaars effect opheffen wordt deze strijdigheid opge-

lost. In dit verband krijgt de modelterm dynamisch evenwicht betekenis. Het dynamisch model geeft een verklaring voor de onvolledigheid van een omzetting in een evenwichtstoestand: doordat beide reacties tegelijkertijd blijven optreden, is het uitgesloten dat één (of meer) van de betrokken reactanten na verloop van tijd volledig wordt omgezet.

Identiciteit (3). Het toekennen van tegengestelde reacties heeft consequenties voor de corpusculaire identiciteit: de aanname dat deeltjes van dezelfde soort in geen enkel opzicht (behalve ruimte en beweging) verschillen moet nu ook in verband worden gebracht met het begrip *tijd*. De redenering luidt dat verschillen in plaats en beweging ertoe leiden dat op een zeker moment ergens een 'A-deeltje' en een 'B-deeltje' ontstaan, terwijl op datzelfde moment elders een *ander* 'A-deeltje' en een *ander* 'B-deeltje' verdwijnen. De omvang van de verzameling 'A-deeltjes' is in het beschouwde systeem in de tijd weliswaar constant, maar de verzameling zelf is niet gesloten: het zijn 'telkens andere deeltjes'. Op deze wijze wordt het identiciteitsbegrip uitgebreid met *statistische* noties.

Knipperlichtreactie. Een andere oplossing voor het probleem dat bij 'omkeerbare reactie' is beschreven, leidt tot de ontwikkeling van het begrip knipperlichtreactie. Hierin wordt aangenomen dat de twee reacties A+B→C+D en C+D→A+B telkens na elkaar, volledig en waarneembaar optreden (§6.7). Een dergelijke opvatting past echter niet bij een reële evenwichtssituatie, waarin geen veranderingen waarneembaar zijn. Daardoor is (opnieuw) sprake van een anomalie tussen de principemogelijkheid dat reacties kunnen optreden en het gegeven dat dit optreden niet wordt ondersteund door waarnemingen. Deze wordt opgelost door de invoering van het dynamisch model. De onvolledigheid van de omzetting volgt tenslotte als een (toetsbare) voorspelling uit dit model. Hiermee wordt een alternatieve route voor begripsontwikkeling aangegeven: via *knipperlichtreactie* krijgen de begrippen *omkeerbare reactie* en *tegengestelde reacties* betekenis, waarna het aspect *onvolledigheid* aan de orde komt.

Theoretische onvolledigheid. Een omkeerbare reactie verloopt niet slechts onder zeer bepaalde praktische omstandigheden onvolledig. Uit het dynamisch model volgt dat, zolang aan de voorwaarden voor het optreden van beide reacties voldaan is, geen van alle betrokken reactanten volledig kan verdwijnen, ook al is hun aanwezigheid niet meer praktisch aantoonbaar. In die zin is sprake van theoretische onvolledigheid.

Dit aspect kan op verschillende manieren gestalte krijgen in de hierboven geschetste lijnen: voorafgaand aan de introductie van het dynamisch model kan de theoretische onvolledigheid op een probleemstellende wijze worden aangeboden (§5.5) om het toekennen van tegengestelde reacties voor te bereiden. Daarnaast kan, zoals hiervoor is aangegeven, theoretische onvolledigheid volgen uit een redenering op basis van het dynamisch model.

Stabiliteit. Het dynamisch model geeft ook een verklaring voor het ontstaan van een (nieuwe) evenwichtstoestand en biedt daardoor mogelijkheden voor de ontwikkeling van het aspect stabiliteit van chemisch evenwicht. In dit verband moet het begrip tegengestelde reacties worden uitgebreid met een aantal eigenschappen betreffende de *snelheden* van beide reacties. Kenmerkend voor kinetische stabiliteitsredeneringen is dat de snelheden van beide reacties elkaar onder invloed van concentratieveranderingen wederzijds beïnvloeden op een zodanige wijze dat snelheidsverschillen in principe worden genivelleerd (§7.3).

Stabiliteitsredeneringen waarbij temperatuurveranderingen een rol spelen moeten worden verbonden met energiekenmerken van tegengestelde reacties en (eventueel) van corpusculaire modellen. Deze kenmerken zijn in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten.

Suggesties voor het ontwerpen van onderwijs voor 4-HAVO/VWO
De didactische structuur biedt aanknopingspunten voor onderwijsmateriaal. Ik geef enkele concrete suggesties:

- Er dienen proeven ontworpen te worden die door leerlingen zowel in een 'kringloopversie' als in een 'omkeerbare versie' kunnen worden uitgevoerd. Concrete mogelijkheden zijn de verhitting van een (rose gekleurd) hydraat van cobaltchloride in vaste toestand, waarna het watervrij gemaakte zout met water bevochtigd wordt. Daarnaast worden de robalaatproeven onder invloed van temperatuurvariatie uitgevoerd (§4.3). Via vragen dienen overeenkomsten en verschillen tussen beide varianten aan de orde te komen.
  Bij het onderscheiden van omkeerbare reacties en fase-overgangen, zijn proeven van belang waarbij de omkeerbaarheid onder invloed van toevoegingen optreedt. Hiertoe acht ik de robalaatproeven beschreven in §4.4 geschikt. Via vragen over reactieschema's of -vergelijkingen kan problematisering van het begrip omkeerbare reactie worden nagestreefd.
- Er bestaan verschillende proeven waaruit de onvolledigheid van een chemische omzetting naar voren komt. Voorbeelden zijn beschreven in §5.2 (gasdissociaties; gedeeltelijk geïoniseerde elektrolyten) en in §5.3 en §5.4 ('robalaat' via temperatuurvariatie respectievelijk 'rodanide' via toevoegingen). Problematisering van onvolledigheid kan via zekere redeneringen en/of vragenreeksen worden nagestreefd (zie §5.2 respectievelijk §5.4).
- De invoering van het dynamisch model dient gebaseerd te worden op de omkeerbaarheid én de onvolledigheid van zekere chemische reacties. Het toekennen van tegengestelde reacties lijkt in tegenspraak met de afwezigheid van waarnemingen die op het optreden van deze reacties duiden. Daar staat tegenover dat door deze toekenning de eerder genoemde problemen kunnen worden opgelost. Duidelijk moet worden dat een statische opvatting (in een evenwichtstoestand treedt geen reactie op) ook legitiem is, naast de dynamische opvatting. Omdat in beide opvattingen een verschillend reactiebegrip gehanteerd wordt, sluiten zij elkaar niet uit.
- In verband met het aspect theoretische onvolledigheid speelt het dynamisch model een belangrijke rol. In dit verband kan een analyse van meetgegevens een probleemstellende functie hebben (zoals in de tabelopdracht, beschreven in §5.5).
- De ontwikkeling van stabiliteitskenmerken van chemisch evenwicht op basis van het dynamisch model is in het onderzoek problematisch gebleken. De verschillende benaderingen in de eerste en tweede versie van de leerlingentekst (§7.4 en §7.5) bleken weinig succesvol. Desalniettemin heeft het onderzoek enkele belangwekkende resultaten opgeleverd. Eén daarvan is dat situaties waarin temperatuur en concentratie de snelheden van beide tegengestelde reacties simultaan beïnvloeden in eerste instantie buiten beschouwing dienen te blijven. In gevallen waarbij de temperatuur constant is, kunnen beide reacties eerst afzonderlijk worden benaderd: de snelheid van $A+B \rightarrow C+D$

wordt vergroot indien de concentraties van A en/of B toenemen, terwijl de snelheid van C+D→A+B toeneemt indien de concentraties van C en/of D stijgen. In het vervolg kan een verband tussen de snelheden van beide reacties aan de orde komen. Voor concrete aanbevelingen voor nieuw onderwijs verwijs ik naar §7.6.

Suggesties voor toetsen
Bij constructivistisch georiënteerd onderwijs past een manier van toetsen, waarin de essentie van begripsontwikkeling (§2.1) gerespecteerd wordt. Dat betekent onder meer dat gesloten toetsen, met van te voren opgestelde en nauwkeurig gespecificeerde antwoordmodellen slechts bruikbaar zijn om na te gaan of leerlingen zekere conventies en/of feiten beheersen. Daarentegen zal de docent de leerling ook in een toetssituatie als gesprekspartner moeten accepteren: de toets moet ruimte bieden voor argumentaties die niet volledig overeenstemmen met (school-)chemische opvattingen, maar wel blijk geven van begripsontwikkeling.

In mijn leerlingentekst worden begrippen ingevoerd aan de hand van enkele (praktische) voorbeelden. Via mededelingen in de tekst hebben deze begrippen, conform de randvoorwaarden van de leerplannen, een gegeneraliseerde status gekregen. Dit biedt de mogelijkheid om vragen te stellen over voorbeelden van omkeerbare reacties en evenwichtssystemen die in het onderwijs niet aan de orde zijn gesteld. Leerlingen moeten dan laten zien dat ze in staat zijn om deze voorbeelden te interpreteren met behulp van de in het onderwijs ontwikkelde begrippen. Enkele concrete voorbeelden van dergelijke toetsopgaven zijn opgenomen in bijlage E.

Een toetsvorm die in dit verband ook geschikt kan zijn, omvat de uitvoering van proeven. Daarbij kan het waarnemen en het interpreteren van waarnemingen worden getoetst. Eventueel kunnen opdrachten aan leerlingen verstrekt worden, waarin zij een proef moeten ontwerpen en uitvoeren teneinde een gegeven hypothese te toetsen. In een variant op deze toetsvorm voeren leerlingen in groepen enkele proeven uit, waarna zij individueel een aantal schriftelijke vragen hierover moeten beantwoorden.

Suggesties voor nascholing
De beschreven didactische structuur biedt tevens mogelijkheden om suggesties voor nascholing te formuleren. Van speciaal belang daarbij zijn kenmerken waarin deze structuur afwijkt van de bestaande onderwijstraditie, zoals die bijvoorbeeld tot uiting komt in recente leergangen. Het gaat vooral om de volgende zaken:

- Het onderscheid tussen kringloopreacties en omkeerbare reacties dat in §4.2 beschreven is, wordt niet uitgewerkt in school- of studieboeken. Dit onderscheid dient in nascholing, bijvoorbeeld via discussie-opdrachten, aan de orde te komen. Duidelijk moet worden in welke zin een onderscheid gemaakt kan worden en waarom dit onderscheid van belang is.
- De mogelijkheden om zowel de omkeerbaarheid als de onvolledigheid van chemische omzettingen te problematiseren en naar aanleiding daarvan dynamisch evenwicht als verklarend model in te voeren, wordt in recente leergangen niet toegepast. Docenten moeten zich bewust worden van deze

mogelijkheden, waarbij een verwijzing naar de wetenschaps-historische ontwikkeling op dit gebied zinvol lijkt (§5.2 en §6.2).

- Indien docenten in de verklaring voor onvolledigheid een geschikte aanleiding voor de invoering van het dynamisch model herkennen, verminderen mogelijk hun onderwijsproblemen op dit gebied (§6.4). Chemiedidactische bezwaren tegen de in recente leergangen gebezigde analogieën, simulaties en 'bewijspogingen' kunnen in dit licht voor hen betekenis krijgen. Daarbij lijkt het tevens zinvol om aandacht te besteden aan de in §6.3 beschreven onderwijs-historische ontwikkeling.
  Het is van belang dat docenten het begrip knipperlichtreactie, dat in de chemie niet wordt beschreven, leren kennen en inzicht krijgen in motieven waarmee leerlingen dit begrip kunnen invoeren respectievelijk afwijzen.
- Conform een conclusie in §7.6 is het belangrijk om in nascholing aandacht te besteden aan problemen die kunnen optreden bij de ontwikkeling van stabiliteitskenmerken van chemisch evenwicht. In gangbare leergangen worden deze problemen onvoldoende onderkend. Reactiesnelheidsgrafieken zoals afgebeeld in figuur 7a komen in al deze leergangen voor en lijken bovendien intensief gebruikt te worden in de onderwijspraktijk. Via nascholing kan een bezinning op de betekenis en functie hiervan plaatsvinden. Zodoende worden docenten mogelijk aanspreekbaar voor de gesignaleerde problemen.

8.2 Kwalitatief chemisch evenwicht in leerplannen en leergangen

In de vigerende leerplannen voor 4- en 5-HAVO en 4-VWO wordt in het kader van een kwalitatieve omschrijving van chemisch evenwicht "dynamisch evenwicht" genoemd naast "statisch evenwicht", zonder dat één van beide termen nader wordt omschreven. Als "suggesties" worden hierbij genoemd: "gebruik tracer, simulatieproef, I_2 in benzine en water". In de examenprogramma's van beide schooltypes komt wel een omschrijving voor als hierin gesteld wordt dat een "kandidaat moet [...] weten dat een chemisch evenwicht kan worden opgevat als een dynamisch evenwicht tussen twee tegengesteld gerichte reacties" (zie bijlage B).

In geen van deze documenten wordt aangegeven welke functie(s) het dynamisch model van chemisch evenwicht zou moeten of kunnen vervullen. *Het lijkt er daarentegen op dat dynamisch evenwicht als een op zich staand feit gekend moet worden.* Hieronder formuleer ik mogelijke functies van het dynamisch evenwicht in het scheikunde-onderwijs voor HAVO en VWO. Voor de invoering van dynamisch evenwicht baseer ik me op de didactische structuur uit §8.1. Daarna geef ik mogelijkheden aan om het dynamisch model ook in het vervolg van het onderwijs te laten functioneren.

Invoering van dynamisch evenwicht

Uit een analyse van recente leergangen (§6.3) kwam naar voren, dat hierin geprobeerd wordt om het dynamisch karakter van chemisch evenwicht aannemelijk te maken door 'bewijs-proeven' en voorstelbaar te maken door simulaties (conform de suggesties uit de leerplannen). Bovendien probeert men dynamisch evenwicht in te bedden in een reeds bekende zienswijze door het optreden van tegengestelde processen aan te wijzen in niet-chemische (even-

wichts-)situaties. Vervolgens wordt dynamisch evenwicht benut voor verklaringen van het 'aflopen' van een chemisch evenwicht (§6.3), het ontstaan van een evenwichtstoestand en van een nieuwe evenwichtstoestand na een 'verstoring' (§7.3).

Het merendeel van de in de beschreven didactische structuur opgenomen begrippen komt niet voor in leergangen, en evenmin in leerplannen en examenprogramma's. Het begrip omkeerbare reactie omvat in het gangbare onderwijs ook de begrippen kringloopreactie en tegengestelde reacties uit de didactische structuur. Het aspect (theoretische) onvolledigheid en de hierdoor te problematiseren begrippen overmaat en identiciteit worden niet expliciet aan de orde gesteld. Chemisch evenwicht wordt in 4-HAVO/VWO doorgaans alleen in modeltermen en zelden op verschijnselniveau omschreven. De stabiliteit komt aan de orde via de genoemde kinetische verklaringen voor het (opnieuw) ontstaan van een chemisch evenwicht.

Het huidige onderwijs wordt gekenmerkt door een structuur waarin het begrip omkeerbare reactie na een invoering aan de hand van proeven, impliciet modelmatig wordt geïnterpreteerd ('tegengestelde reacties'; zie §8.1) om dynamisch evenwicht te kunnen introduceren. Argumenten voor deze invoering worden ontleend aan de genoemde bewijspogingen, zodat het modelkarakter van de dynamische opvatting wordt genegeerd. Vervolgens wordt dynamisch evenwicht verbonden met het begrip reactiesnelheid, dat (opnieuw impliciet) modelmatig wordt geïnterpreteerd voor een verklaring van de stabiliteit van chemisch evenwicht.

In de didactische structuur wordt de invoering van dynamisch evenwicht als modelopvatting gekoppeld aan de omkeerbaarheid en de onvolledigheid van chemische omzettingen, waarbij de begrippen overmaat en identiciteit worden geproblematiseerd. Dit onderzoeksresultaat formuleer ik als een aanbeveling ten behoeve van de ontwerpers van leerplannen en examenprogramma's en de auteurs van leergangen. *Hiermee krijgt dynamisch evenwicht een functie als verklarend model, die in de huidige leerplan- en schoolboeksituatie ontbreekt.*

Het dynamisch model kan voor leerlingen betekenis krijgen als zij het kunnen benutten ter verklaring van verschillende situaties of als basis voor de invoering van nieuwe begrippen. Een geschikte verklaringsmogelijkheid wordt zoals gezegd geboden door de onvolledigheidsproblematiek. Ook het 'aflopen' van een chemisch evenwicht behoort tot de mogelijkheden. Verklaringen voor stabiliteit lijken daarentegen echter minder aantrekkelijk (§7.6). Hieronder bespreek ik andere verbanden waarin het dynamisch model voor leerlingen zou kunnen functioneren.

Dynamisch evenwicht in verband met kinetiek

In §3.3 is een breuk tussen kwalitatief en kwantitatief chemisch evenwicht in de vigerende leerplannen beschreven. Deze breuk is ontstaan doordat de afleiding op basis van reactiesnelheidsvergelijkingen van een vergelijking ter beschrijving van evenwichtssamenstellingen k/k'=*concentratiebreuk*=K, (5), niet langer is voorgeschreven. Bij deze afleiding was het dynamisch model een uitgangspunt en daarmee vervulde dit model een belangrijke functie bij de ontwikkeling van een kwantitatief evenwichtsbegrip (zie bijvoorbeeld de aanpak uit B, beschreven in §6.3). In recente leergangen wordt de relatie 'concentratiebreuk=K' gehan-

teerd. Deze wordt op verschillende manieren ingevoerd. Bij geen ervan speelt het dynamisch model een rol (zie verder §8.4). *In recente leergangen bieden kwantitatieve beschrijvingen van chemisch evenwicht dus geen mogelijkheden om dynamisch evenwicht toe te passen.*

Uit het bovenstaande blijkt dat toepassingsmogelijkheden van dynamisch evenwicht in het voortgezet onderwijs momenteel beperkt zijn. Hierdoor komt de invoering van dynamisch evenwicht in dit onderwijs ter discussie te staan. Ik zie echter andere dan de tot dusver genoemde mogelijkheden om dit model te legitimeren.

Uit de beschrijving in hoofdstuk 6 kwam naar voren dat het dynamisch model gekenmerkt wordt door het *toekennen* van *gelijktijdig* optredende (tegengestelde) reacties. Een soortgelijke zienswijze is van toepassing op talloze voorbeelden van *katalyse:* daarbij kan het gelijktijdig optreden van meerdere, niet-waarneembare reacties worden verondersteld, waarbij de katalysator steeds zowel wordt omgezet als geregenereerd. Net als met het dynamisch model kan met deze zienswijze een verschijnsel worden verklaard: niet het onverwachte voortijdige einde van een reactie, maar een merkwaardige snelheidstoename.

Op een meer algemeen niveau speelt het toekennen van niet-waargenomen reacties een belangrijke rol bij het opstellen van *reactiemechanismen* (§3.2). Daarbij zijn naast stoichiometrische en energetische noties ook structuurchemische inzichten van belang. Het mechanisme van een omzetting die stoichiometrisch beschreven wordt met een schema $A+B \rightarrow C$, kan bijvoorbeeld bestaan uit de reacties $A+B \rightarrow X$ en $X \rightarrow C$. Indien de vorming en de omzetting van X niet gepaard gaan met waarnemingen, hetgeen doorgaans het geval is, wordt het optreden van deze twee reacties toegekend. Om deze afwezigheid van waarnemingen te kunnen verklaren moet bovendien worden aangenomen dat beide gelijktijdig plaatsvinden.

Het toekennen van gelijktijdig optredende reacties in een reactiemechanisme vergt een modelbegrip van chemische reacties, dat ook van toepassing is in het dynamisch model van chemisch evenwicht. Door dit modelbegrip worden de onderwerpen chemisch evenwicht, katalyse en reactiemechanisme met elkaar verbonden.

Deze verbinding kan in onderwijs worden gelegd door eerst voorbeelden van katalyse en dynamisch evenwicht met elkaar te vergelijken. In de ontworpen leerlingenteksten waren enkele praktische voorbeelden van katalyse opgenomen, die voorafgingen aan de invoering van omkeerbare reacties en chemisch evenwicht (zie bijlage A). De mogelijkheid dat in het geval van katalyse twee reacties tegelijkertijd plaatsvinden, werd daarbij naar aanleiding van enkele proeven via een reeks vragen aan de orde gesteld.

Hierbij bleek dat leerlingen het toekennen van reacties baseerden op een argumentatie waarin het idee centraal stond, dat voldaan was aan alle voorwaarden voor het optreden van deze reacties. Daarbij werden zowel corpusculaire als niet-corpusculaire redeneringen gehanteerd. Deze ervaringen komen overeen met die in §6.6. Het inzicht dat twee reacties tegelijkertijd plaatsvinden bleek op problemen te stuiten. Veel leerlingen redeneerden dat een tweede reactie pas kan optreden nadat de eerste heeft plaatsgevonden, etc. In dit verband werden ook 'knipperlicht'-achtige argumentaties gegeven. De gekozen

voorbeelden en enkele ervaringen in de onderwijspraktijk zijn elders uitvoeriger beschreven (zie Van Driel & De Vos, 1989b).

In een vervolg zouden voorbeelden van reactiemechanismen aan de orde kunnen komen, waarbij niet alleen verklaringen voor snelheidsbeïnvloeding worden gezocht, maar ook voor het ontstaan van zekere stoffen als reactieprodukt. Het opstellen van reactiemechanismen moet in verband worden gebracht met reactiesnelheidsmetingen. De rol van structuurchemische en energetische inzichten bij het opstellen van zulke mechanismen biedt een mogelijkheid om begripsontwikkeling ten aanzien van structuurchemie, thermodynamica en reactiekinetiek met elkaar te verbinden.

Er zijn dus motieven om in leerplannen en leergangen het dynamisch model van chemisch evenwicht te verbinden met de ontwikkeling van tijdsafhankelijke proceskenmerken van het reactiebegrip. Daarmee kan de legitimering van het dynamisch model verstevigd worden.

8.3 Alternatieven voor leerplannen en vakstructuur

Bij het onderzoek naar een didactische structuur ben ik uitgegaan van de bestaande vakstructuur. Tevens zijn de vigerende leerplannen voor HAVO en VWO als kaderstellend geaccepteerd. Een consequentie van deze keuze is dat de wijze waarop het begrip chemische reactie in 3-HAVO/VWO wordt ingevoerd als uitgangspunt is gehanteerd.

Op deze plaats wil ik enkele kenmerken van de gangbare introductie van chemische reacties bespreken en daarbij laten zien dat energie-effecten, stofhoeveelheids- en proceskenmerken van het reactiebegrip in eerste instantie weinig aandacht krijgen. Vervolgens wil ik mogelijkheden beschrijven om deze aspecten al in een vroeg stadium van het onderwijs te ontwikkelen en consequenties daarvan aangeven voor de invoering van het begrip chemisch evenwicht. Hieruit volgen mogelijkheden voor nieuw chemiedidactisch onderzoek.

Onderbelichte aspecten van chemische reacties

Terwijl benadrukt wordt dat chemische reacties moeten worden gezien als stofomzettingen ('stoffen verdwijnen en nieuwe stoffen ontstaan'), krijgt het gezichtspunt dat chemische reacties gepaard gaan met *energie-effecten* weinig aandacht. Illustratief in dit verband is de wijze waarop de verbranding van een stukje magnesiumlint in leergangen wordt besproken: in plaats van het zeer spectaculaire lichtverschijnsel wordt de nauwelijks opvallende verschijning van een wit poeder centraal gesteld[1].

Chemische begrippen worden in het algemeen op een *kwalitatief niveau* geïntroduceerd. Als kwantitatieve aspecten van de betrokken begrippen aan de orde komen, gebeurt dit doorgaans in tweede instantie. Zo worden chemische reacties kwalitatief als stofomzettingen geïntroduceerd, waarna o.a. de regel wordt ingevoerd dat stoffen volgens een constante massaverhouding bij een chemische reactie betrokken zijn. De volgorde kwalitatief-kwantitatief wordt ook aangehouden bij de invoering van chemisch evenwicht (§3.3).

---

[1]Zie bijvoorbeeld C (3HV, 1983, p. 34-36) en R&F (3HV, 1984, p.24-28).

Praktische voorbeelden van chemische reacties hebben in het beginonderwijs veelal betrekking op waterige systemen waarin de betrokken reacties *zeer snel* optreden (zuur-base reacties, neerslagreacties). Vanuit kinetisch oogpunt zijn deze reacties moeilijk toegankelijk. De ontwikkeling van kinetische begrippen wordt door deze voorbeelden dan ook niet bevorderd. Door de keuze voor verdunde, waterige systemen vallen energie-effecten van de betrokken reacties zelden op: door de ongewoon grote soortelijke warmte van water komen deze effecten bij de uitgevoerde proeven zelden tot uiting in opvallende temperatuurveranderingen.

Verdonk betoogt dat de keuze voor snelle, aflopende reacties in verdunde, waterige systemen samenhing met de wens om kwantitatieve chemische analyse in het scheikunde-onderwijs op de HBS te behandelen. Daarnaast zijn in verband met kwalitatieve chemische analyse (identificatie van stoffen) vooral uitzonderlijke reacties gekozen, die niet representatief zijn voor chemische reacties in het algemeen (Verdonk, 1986, p.30-31).

Door uit te gaan van de gangbare introductie van chemische reacties is het door mij onderzochte evenwichtsbegrip kwalitatief en nog niet verbonden met energie. Daarbij is de introductie van het dynamisch model bemoeilijkt doordat leerlingen nog nauwelijks kennis hadden gemaakt met kinetische aspecten van het reactiebegrip. Hieronder wil ik mogelijkheden noemen om kinetische, energetische en stofhoeveelheidsaspecten van het reactiebegrip te ontwikkelen, met het oog op de invoering van chemisch evenwicht.

Ontwikkeling van tijdsafhankelijke proceskenmerken

Door proceskenmerken van chemische reacties in een vroeg stadium van het onderwijs te bestuderen, kunnen leerlingen hun reactiebegrip verdiepen. Hiervan kan vervolgens worden geprofiteerd bij de invoering van dynamisch evenwicht: dit begrip kan dan worden ingebed in een reeds ontwikkeld kader.

Om aandacht aan proceskenmerken te kunnen besteden, moeten proeven worden ontworpen, waarin gedurende een bepaalde periode verschijnselen waarneembaar zijn die in verband met chemische reacties geïnterpreteerd kunnen worden. Daartoe kunnen alternatieve uitvoeringen van bekende schoolproeven dienen waarin de tijdschaal is aangepast. Zo heeft De Vos een petrischaal-versie ontworpen van de neerslagreactie van loodnitraat en kaliumjodide, die in een reageerbuis vrijwel momentaan optreedt. In zijn versie vinden oplos-, transport- en reactieverschijnselen in ruimte en tijd gescheiden plaats (De Vos, 1985, p.51-54). Een reeks andere in dit verband geschikte petrischaalproeven is onlangs beschreven door Popp (1989, p.94-129). Ook de in §8.2 vermelde katalyseproeven kunnen hier genoemd worden, evenals proeven waarbij oscillerende reacties of klokreacties optreden[2].

In de genoemde gevallen gaat het om proeven waarbij de verschijnselen als boeiend ervaren kunnen worden en vragen oproepen. Via antwoorden op deze vragen kan een kinetisch reactiebegrip ontstaan. Daarbij moet een onderscheid tussen reactie als stoichiometrische omzetting en reactie als aanduiding voor een (deel-)proces naar voren komen. Deelprocessen kunnen aanvankelijk met waar-

[2]Voorbeelden hiervan worden bescheven in Burnett (1982), Lambert & Fina (1984), Ludwig & Klein (1986) en Epstein (1987).

nemingen verbonden zijn, maar zullen in een later stadium ook moeten worden toegekend. Simultaan kan een eenvoudig corpusculair botsingsmodel worden ontwikkeld, waarbij uitbreiding met statistische en structuurchemische noties tot de mogelijkheden behoort (§8.2). Op deze wijze wordt tevens de invoering van dynamisch evenwicht voorbereid.

Ontwikkeling van energiekenmerken
Ik wil hier niet pleiten voor een vervroegde behandeling van de klassieke chemische thermodynamica in 3- of 4-HAVO/VWO. Uit verschillende onderzoeken is immers al gebleken, dat de ontwikkeling van thermodynamische begrippen zowel in het voortgezet als in het universitaire onderwijs op grote leer- en onderwijsproblemen kan stuiten[3]. Ik vermoed echter dat thermodynamische begrippen kunnen worden *voorbereid*, door in een eerder stadium van het scheikunde-onderwijs meer aandacht aan energiekenmerken van chemische reacties te besteden.

Energieaspecten van aflopende chemische reacties dienen niet achter, maar vanaf het begin van het scheikunde-onderwijs naast het stofomzettingskarakter geplaatst te worden. Daarbij gaat het enerzijds om de toevoer van energie in verschillende vormen die veelal nodig is om chemische reacties te laten plaatsvinden (elektrolyse; verhitting). Anderzijds gaat het om de energie die vrijkomt bij het optreden van zekere chemische reacties. Uit toepassingen hiervan (batterijen, brandstoffen) blijkt het maatschappelijke belang van deze reacties. Daarnaast blijken er reacties te bestaan die spontaan optreden, waarbij energie uit de omgeving wordt opgenomen.

Uit proeven met omkeerbare reacties kan blijken dat een volledige omzetting in de ene richting gepaard gaat met het vrijkomen van energie, terwijl een volledige omzetting in de tegengestelde richting toevoer van energie vergt. Vanuit dit gezichtspunt kunnen de omzettingen bij zulke reacties nader onderzocht worden. Gasreacties in een gesloten systeem lijken geschikt om vast te stellen wat het effect van toevoer van een zekere hoeveelheid energie op de temperatuur van het systeem is. Door temperatuurveranderingen te interpreteren in verband met energie-effecten van optredende chemische omzettingen, kan worden vastgesteld dat er een zekere relatie bestaat tussen energie respectievelijk temperatuur en omzettingsgraad.

Na de invoering van chemisch evenwicht als verschijnsel in verband met de onvolledigheid van omkeerbare reacties, kunnen evenwichtsverschijnselen vanuit een energie-oogpunt worden benaderd. Chemisch evenwicht kan in dit kader als een 'natuurlijke' eindtoestand worden beschouwd, waarbij het dynamisch model achterwege kan blijven. Corpusculaire begrippen zijn in dit verband evenmin relevant.

Hiermee is een mogelijkheid aangegeven om stabiliteits- en 'verschuivings'-aspecten van het evenwichtsbegrip te ontwikkelen met behulp van energieken-

---

[3]Zie bijvoorbeeld Terpstra et al. (1989) over de ontwikkeling van een thermodynamisch begrip warmte in 5-VWO; Van Keulen (1988) over het begrip kookpunt in een thermodynamische context op een universitair practicum en Rozier & Viennot (1990) over redeneringen aan de hand van de ideale gaswet door docenten en universitaire studenten.

merken van chemische reacties. Daarmee zou een alternatief beschikbaar komen voor het kinetische kader, dat in dit verband problematisch functioneerde (§7.6).

Simultane ontwikkeling van kwalitatieve en kwantitatieve begrippen
De traditie om begrippen op een kwalitatief niveau te introduceren en pas daarna kwantitatieve aspecten aan de orde te stellen is in mijn onderzoek gerespecteerd. Op dit punt is echter een alternatief denkbaar, waarin kwantitatieve en kwalitatieve noties simultaan ontwikkeld worden. In het geval van chemisch evenwicht kan een kwantitatief begrip 'stofhoeveelheid' vanaf het begin een belangrijke rol spelen.

Daartoe kunnen in eerste instantie *heterogene* evenwichten bestudeerd worden, waarbij relaties tussen *hoeveelheden* reactanten onderzocht worden: in het geval van een evenwicht $A(s) \rightleftarrows B(g)+C(s)$ kan worden vastgesteld dat toevoeging van A bij constante druk en temperatuur niet leidt tot een vergroting van de hoeveelheid van het gas B. Toevoeging van B onder constante temperatuur en druk en een toename van het volume, heeft geen invloed op de aanwezige hoeveelheden van de vaste stoffen A en C. Indien B wordt bijgeperst bij constant volume treden hierin echter wel veranderingen op. Niet de massa van B, maar de massa *per volume* van dit gas is dus van belang. Hierdoor kan een notie van de invloed van *concentratie* ontstaan.

Vervolgens worden homogene systemen op hun afhankelijkheid van hoeveelheden respectievelijk concentraties onderzocht. Daarbij blijkt dat, net als bij B in het hiervoor beschreven voorbeeld, concentratieveranderingen zekere invloeden op de samenstelling van een evenwichtsmengsel hebben. Voor deze samenstellingsveranderingen kunnen regels worden opgesteld. Op basis hiervan kan eventueel een verband tussen evenwichtsconcentraties van de vorm 'concentratiebreuk=K' worden ingevoerd. Deze mogelijkheid bespreek ik in de volgende paragraaf.

Chemiedidactisch onderzoek zou uit moeten wijzen in hoeverre de hier geschetste voorstellen ten aanzien van een vroegere ontwikkeling van proces-, energie- en stofhoeveelheidskenmerken van chemische reacties in de onderwijspraktijk haalbaar blijken. De organisatie van een dergelijk onderzoek zal op bepaalde punten moeten afwijken van het door mij verrichte onderzoek, omdat het ontwerpen van 'inpasbaar' onderwijsmateriaal in dit geval niet mogelijk lijkt. Gezien het onconventionele karakter van de voorstellen moet een intensieve relatie tussen nascholing en onderzoek worden nagestreefd.

8.4 Kwantitatief chemisch evenwicht in leerplannen en leergangen

Bij beschrijvingen van kwantitatieve aspecten van chemisch evenwicht in schoolboeken voor de hoogste klassen van HAVO en VWO staat de relatie 'concentratiebreuk=K' centraal (§3.3). Deze relatie wordt tevens expliciet genoemd in de vigerende leerplannen en examenprogramma's voor deze schooltypes. Berekeningen ermee zijn eveneens voorgeschreven. Op welke wijze deze relatie ingevoerd dient te worden, is niet aangegeven. In deze paragraaf bespreek ik manieren waarop 'concentratiebreuk=K' in leergangen ingevoerd werd en

wordt. Eerst ga ik in op een afleiding op basis van kinetiek, die tegenwoordig nog zelden wordt gehanteerd[4]. In recente leergangen wordt deze relatie op basis van thermodynamica of als een meetverband ingevoerd. Beide routes bespreek ik kort.

Kinetische afleiding
Het was in Nederlandse scheikundeleergangen lange tijd gebruikelijk om via reactiesnelheidsvergelijkingen een formule af te leiden waarin het quotiënt van twee reactiesnelheidscoëfficiënten gelijk is aan de waarde van een concentratiebreuk bij evenwicht. In dit verband werd de evenwichtsconstante K ingevoerd (vergelijking (5); §8.2). Deze afleiding is veelvuldig bekritiseerd, o.a. in tijdschriften over scheikunde-onderwijs, en vermoedelijk onder invloed daarvan in onbruik geraakt. De kritiek op de gebruikelijke afleiding betreft in grote lijnen het volgende:

- Stoichiometrische coëfficiënten uit reactievergelijkingen werden gelijkgesteld aan exponenten in reactie*snelheids*vergelijkingen. Deze gelijkstelling is in het algemeen echter niet geoorloofd. Slechts voor enkele chemische reacties treedt de genoemde gelijkheid in de praktijk op. Een experimenteel te bepalen 'orde' van een reactie moet principieel worden onderscheiden van de stoichiometrie van die reactie.
- De evenwichtsconstante werd zoals gezegd ingevoerd als een quotiënt van twee reactiesnelheidscoëfficiënten. Zulke coëfficiënten worden experimenteel in niet-evenwichtssituaties bepaald. Het quotiënt ervan voldoet zelden aan de genoemde gelijkheid. Indien dit het wel geval is, is sprake van toeval[5].

In enkele leergangen werd een kinetische afleiding gegeven voor een omkeerbare reactie waarbij de genoemde gelijkheden toevallig beide optreden, waarna vervolgens (zonder afleiding) het *resultaat* van deze afleiding *in het algemeen* van toepassing werd verklaard. In dit verband werd vergelijking (5) geponeerd.

Dit is in feite ook de procedure die door Van 't Hoff in zijn "Études de Dynamique Chimique" (1884) werd gehanteerd. Hij koos de omkeerbare reactie $2NO_2 \rightleftarrows N_2O_4$ als voorbeeld (Van 't Hoff, 1884, p.125-126). Bij zijn beschrijving van reactiekinetiek in de "Études" gaf Van 't Hoff voorbeelden van experimenteel bepaalde reactiesnelheidsvergelijkingen, waarin exponenten voorkwamen die *niet* gelijk waren aan stoichiometrische coëfficiënten uit reactievergelijkingen (Van 't Hoff, 1884, p.27-30). Hij moet dus geweten hebben dat de algemeenheid van de door hem gegeven kinetische afleiding discutabel was. Enkele jaren later heeft Van 't Hoff een thermodynamische afleiding van 'concentratiebreuk=K' gepubliceerd (Van 't Hoff, 1886, p.14-18). Hij is daarna niet meer teruggekomen op de kinetische afleiding.

Van 't Hoffs "Études" kan worden gezien als het eerste studieboek op het gebied van de fysische chemie. Mogelijk achtte Van 't Hoff de genoemde kinetische afleiding, hoewel wetenschappelijk gezien dubieus, voor onderwijs geschikt vanwege de mathematische eenvoud ervan. Later is een onderwijstraditie ontstaan waarin een kinetische aanpak werd gehanteerd, die meestal leek

---

[4]Alleen in K&G (1983, 4V, p.102-104) is deze afleiding als 'extra-stof' nog opgenomen.
[5]Een meer uitvoerige bespreking van deze twee punten wordt o.a. gegeven door Laidler (1987), p.10-14 respectievelijk 286-287.

op die van Van 't Hoff in de "Études", maar die werd aangeduid als de 'Wet van Guldberg en Waage'[6].

In §3.2 heb ik aangegeven dat op basis van een kinetische beschouwing de formule $k_1k_2k_3.../k'_1k'_2k'_3...=concentratiebreuk=K$, (4), ter beschrijving van chemisch evenwicht kan worden afgeleid. Door hieruit de in kinetisch opzicht essentiële relatie met snelheidscoëfficiënten van elementaire reacties (k_1, etc.) te verwijderen, wordt 'concentratiebreuk=K' verkregen. De in §3.2 genoemde aanpak is weliswaar wetenschappelijk geaccepteerd, maar vergt inzicht in zekere principes uit de statische mechanica en is om die reden in mijn ogen ongeschikt voor het voortgezet onderwijs. Een kinetische afleiding van 'concentratiebreuk=K' en/of (5) op de wijze van Van 't Hoff acht ik evenmin wenselijk, ook niet indien deze wordt beperkt tot voorbeelden waarvoor deze afleiding geoorloofd lijkt. Deze afleiding geeft een onjuist beeld van de reactiekinetiek en kan de ontwikkeling van kinetische begrippen in negatieve zin beïnvloeden.

Thermodynamische afleiding

In Nederlandse scheikundeleergangen vanaf de jaren '50 komen af en toe kritische opmerkingen voor ten aanzien van de algemene geldigheid van de kinetische afleiding volgens de Wet van Guldberg en Waage. Daarbij wordt vaak verwezen naar de mogelijkheid om een soortgelijke evenwichtsvergelijking uit de thermodynamica af te leiden, zonder dat een dergelijke afleiding wordt gegeven. Ten aanzien hiervan wordt gesteld dat deze 'te moeilijk' is[7].

In één recente leergang wordt een op thermodynamica gebaseerde afleiding van 'concentratiebreuk=K' weergegeven (C, 1985, 5/6V, 1-8, p.45-50). Er is gekozen voor een opzet waarin het begrip entropie centraal staat. Uiteindelijk wordt hierin een formule gepresenteerd, die als een variant op formule (3) uit §3.2 $(-\Delta G°/RT=ln\ (concentratiebreuk)=ln\ K_c)$ gezien kan worden. In deze variant figureren de begrippen entropie en enthalpie, terwijl het begrip Gibbs-energie is vermeden.

De aanpak in deze leergang wijkt op een aantal punten wezenlijk af van een 'correcte' thermodynamische afleiding, waaraan in §3.2 is gerefereerd. In de eerste plaats is differentiaalrekening vermeden. Dit is echter essentiëel in de in §3.2 bedoelde afleiding. Daarnaast worden een aantal wezenlijke formules (bijvoorbeeld voor de totale entropieverandering en voor een relatie tussen entropie en "realiseringsmogelijkheden") zonder meer geponeerd, zodat van een volledige afleiding geen sprake is. Mijn conclusie is dan ook dat in dit geval niet van een afleiding in thermodynamische zin gesproken kan worden.

Ik acht een werkelijk thermodynamische afleiding van 'concentratiebreuk=K' en/of formule (3) onhaalbaar voor het voortgezet onderwijs. Met dit standpunt sluit ik mij aan bij een standpunt dat ook in verschillende artikelen is ingenomen[8]. Ik verwijs daarbij bovendien naar de in voetnoot 3 genoemde arti-

---

[6]Mogelijk hangt deze naamgeving samen met het gegeven dat Van 't Hoff bij zijn kinetische 'afleiding' van 'concentratiebreuk=K' in de "Études" o.a. naar Guldberg en Waage verwees.

[7]Zie M&B (1960, deel B, p.79), F&J (1975, 4V, p.148) en K&G (1984, 5V, p.51).

[8]Bijvoorbeeld in Brunt (1941), Wright (1965), De Vos (1981), Harris (1982) en Braun (1987).

kelen, waarin leer- en onderwijsproblemen met betrekking tot 'eenvoudige' thermodynamische begrippen worden besproken.

Empirische invoering
Vanaf de jaren '60 wordt een alternatieve invoeringswijze voor 'concentratiebreuk=K' zowel in leergangen als in literatuur beschreven[9]. Hierin figureert een tabel waarin evenwichtsconcentraties van een zeker chemisch systeem in verschillende evenwichtstoestanden bij één temperatuur zijn verzameld. Meestal kiest men het evenwicht van waterstofjodide, waterstof en jooddamp. Door de evenwichtsconcentraties van de drie betrokken stoffen verschillende mathematische bewerkingen te laten ondergaan, komt naar voren dat het quotiënt $[HI]^2/[H_2].[I_2]$ steeds (vrijwel) dezelfde waarde aanneemt[10]. Op grond hiervan wordt een vergelijking 'concentratiebreuk=K' eerst voor het betrokken evenwicht en daarna in een algemene vorm opgesteld.

In K&G is voor een soortgelijke aanpak gekozen. De overgang van een uitdrukking voor het waterstofjodide-evenwicht naar één voor een omkeerbare reactie met stoichiometrische coëfficiënten *m, n, p* en *q* verloopt via de zin "het is bewezen dat [...] geldt..." (K&G, 1983, 4H, p.197-198). In R&F staat het evenwicht $2NO_2 \rightleftarrows N_2O_4$ centraal. Hierin wordt de behandeling afgesloten met de volgende opmerking:

> "Het is veel moeilijker af te leiden dat juist de concentratiebreuk $[NO_2]^2/[N_2O_4]$ een constante waarde heeft bij constante temperatuur. Waarom is niet $[NO_2]/[N_2O_4]$ of $2[NO_2]/[N_2O_4]$ constant? Omdat de correcte afleiding hiervan zeer lastig is laten we deze achterwege."
> (R&F, 1986, 5V, p.76)

Hiermee wordt op een wat mij betreft belangrijk bezwaar van deze aanpak gewezen: weliswaar blijkt dat (meegedeelde) meetgegevens via een berekening in een bepaald verband tot een constante uitkomst voeren, maar leerlingen kunnen dit resultaat slechts aanvaarden, zonder het te kunnen begrijpen. Bovendien is een hieraan voorafgaande vraag niet aan de orde geweest: waarom zou er gezocht moeten worden naar een verband tussen concentraties dat bij constante temperatuur een constante uitkomst te zien geeft? Voor leerlingen is er geen aanleiding gecreëerd om naar zo'n verband te gaan zoeken. Evenmin beschikken zij over een theoretisch kader waarbinnen een gevonden verband geïnterpreteerd kan worden.

Ik concludeer dan ook dat deze invoeringswijze eigenlijk neerkomt op het poneren van de relatie 'concentratiebreuk=K', gekoppeld aan een poging tot verificatie aan de hand van één praktijkvoorbeeld.

---

[9]Bijvoorbeeld in de leergang van Pimentel (1963), p.151-153 en door Wright (1965), p.15.

[10]Mogelijkheden om de nodige berekeningen vlot uit te voeren en daarbij ook andere evenwichtssystemen te onderzoeken, nemen sterk toe indien de computer wordt ingeschakeld. Onlangs is door Brosnan een zogenoemd spreadsheet-programma beschreven dat deze mogelijkheden biedt (Brosnan, 1989, p.39-41). Braun (1987) heeft een variant beschreven waarin leerlingen zelf metingen verrichten aan evenwichten van azijnzuur in waterige oplossingen.

8.5 Bezwaren en alternatieven

Doordat een afleiding op basis van snelheidsvergelijkingen verlaten is, is vergelijking (5) komen te vervallen. De invoering van de vervangende relatie 'concentratiebreuk=K' is in recente leergangen echter problematisch. Dit roept de vraag op naar de legitimering van deze relatie in het voortgezet onderwijs. Als de invoering ervan problematisch is, moet deze relatie gelegitimeerd worden doordat zij in dit onderwijs belangrijke functies vervult. Hieronder zal ik toepassingen van 'concentratiebreuk=K' in leergangen voor voortgezet onderwijs bespreken.

Toepassingen van kwantitatief chemisch evenwicht
Deze toepassingen komen bij vier onderwerpen naar voren: bij gasevenwichten (met veel voorbeelden uit de industriële chemie); bij elektrodepotentialen in het kader van elektrochemie; bij oplosbaarheidsprodukten van slecht-oplosbare elektrolyten en bij oplossingen van zwakke zuren en/of zwakke basen. In alle gevallen betreft het berekeningen van evenwichtsconcentraties en/of -constantes. Tegen deze toepassingen heb ik twee verschillende bezwaren:

- Slechts in zeer verdunde systemen is de toepassing van 'concentratiebreuk=K' geoorloofd. In principe moet een activiteitenbreuk worden toegepast (§3.2). Voor de genoemde toepassingsgebieden betekent dit, dat berekeningen aan de hand van 'concentratiebreuk=K' in het geval van industriële voorbeelden en bij het berekenen van elektrodepotentialen doorgaans tot onzinnige uitkomsten leiden.
  Zo neemt de waarde van de 'evenwichtsconstante' in het geval van het ammoniakevenwicht bij een temperatuur van 500°C toe met een factor 10 indien de druk toeneemt van 50 tot 1000 bar[11]. Bij drukken boven 100 bar is de relatie 'concentratiebreuk=K' volstrekt betekenisloos, omdat de betrokken gassen zich dan verre van ideaal gedragen.
  Ook bij toepassingen in de elektrochemie treedt vaak een enorm verschil op tussen gemeten elektrodepotentialen en potentialen die op basis van een evenwichtsvergelijking zijn berekend. Voor deze afwijkingen gelden uiteenlopende verklaringen (zie Verdonk, 1989, p.9-13).
  Een consequentie van het bovenstaande is dat 'concentratiebreuk=K' in scheikunde-onderwijs op HBO- of universitair niveau vaak al vroeg wordt vervangen door een relatie 'K=activiteitenbreuk'.
- Ook bij pH- en oplosbaarheidsberekeningen is de relatie 'concentratiebreuk=K' slechts beperkt geldig. In deze gevallen zijn de betrokken concentraties doorgaans echter zo gering, dat discrepanties tussen berekeningen en metingen in het algemeen veel minder groot zijn dan in de hierboven genoemde gevallen.
  Uit zulke berekeningen kan bijvoorbeeld naar voren komen dat de pH van een zogenoemde bufferoplossing betrekkelijk weinig verandert, indien hier-

[11]Reële meetgegevens van dit evenwicht onder industriële omstandigheden zijn opgenomen in een opgave uit C (1985, 5/6V, 1-8, p.59). De drukafhankelijkheid van de evenwichtsconstante wordt in deze opgave echter (opzettelijk?) buiten beschouwing gelaten.

aan niet al te grote hoeveelheden van zure- of basische oplossingen worden toegevoegd. Om dit inzicht bij leerlingen te ontwikkelen geef ik echter de voorkeur aan een opzet waarin zij in eerste instantie zelf de pH's van bufferoplossingen meten en de invloeden hierop van de genoemde toevoegingen via proeven vaststellen. Vervolgens kunnen zij een verklaring voor deze verschijnselen opstellen, waarbij het buffersysteem wordt geanalyseerd in termen van de chemische reacties die als gevolg van de toevoegingen optreden. Zo'n analyse kan leiden tot semi-kwantitatieve uitspraken ('toevoeging van zoveel zuur zal de pH in geringe mate verlagen'). Hierbij kan 'concentratiebreuk=K' achterwege blijven.
Mijn bezwaren betreffen dan ook vooral de leerwaarde van de gangbare evenwichtsberekeningen. De door leerlingen uitgevoerde berekeningen bieden weliswaar een geschikte oefengelegenheid voor toetssituaties, maar dat mag op zich geen reden zijn om ze in het onderwijs aan de orde te stellen.

De beschreven toepassingen van 'concentratiebreuk=K' kunnen wat mij betreft nauwelijks een legitimering vormen voor de invoering van deze relatie in het voortgezet onderwijs. Hoewel ik niet wil uitsluiten dat de genoemde berekeningen met deze relatie kunnen bijdragen aan begripsontwikkeling in chemische zin, moet er in mijn ogen gezocht worden naar toepassingsgebieden waarin deze relatie op een voor leerlingen zinvolle manier kan functioneren. Mogelijkheden zie ik o.a. bij de behandeling van biochemische systemen. Daarentegen is een motief om 'concentratiebreuk=K' uit het voortgezet onderwijs te verwijderen, dat daarmee voorkomen wordt dat sommige leerlingen deze relatie in vervolgonderwijs weer moeten 'afleren'.

Een onderwijsvoorstel
Bij het construeren van onderwijs dat als vervolg op de door mij ontworpen leerlingentekst over chemisch evenwicht zou kunnen functioneren, zou ik (industriële) bereidingsvraagstukken waarbij chemisch evenwicht van belang is, centraal willen plaatsen. Daarbij krijgt het onvolledigheidsaspect van de betreffende chemische omzettingen opnieuw veel aandacht. *Terwijl in mijn leerlingentekst het signaleren en verklaren van onvolledigheid voorop staat, kan het in een vervolg vooral gaan om de vraag hoe een zekere omzetting zo volledig mogelijk en zo snel mogelijk zou kunnen plaatsvinden.* Daarmee wordt de evenwichtsproblematiek tevens in een maatschappelijke context geplaatst.

In dit kader is het vooral van belang om aandacht te besteden aan de invloeden die verschillende factoren (temperatuur, druk of volume, stofhoeveelheden) hebben op evenwichtssamenstellingen (zie ook §7.1). Mogelijkheden om een omzetting vrijwel volledig te laten optreden ('aflopen van een evenwicht'), spelen hierbij eveneens een rol. In een onderwijsopzet zouden leerlingen in eerste instantie proeven uit kunnen voeren waarbij effecten van toevoegingen van reactanten, van volumeveranderingen en van temperatuurveranderingen op eerder ingestelde evenwichtstoestanden worden onderzocht. Daarbij kan worden volstaan met een visuele, kwalitatieve interpretatie van de proefresultaten. Naar aanleiding hiervan kunnen *empirische regels* worden opgesteld, waarin invloeden van de genoemde factoren op evenwichtssamenstellingen worden samengevat.

In verband met de invloed van temperatuur op evenwichtssamenstelling moet aandacht besteed worden aan het begrip reactiewarmte. Daarbij dienen de begrippen exotherm en endotherm, die eerder in het onderwijs aan de orde zijn geweest, toegepast te worden op omkeerbare reacties. Als de omzetting in de ene richting endotherm is, moet de omzetting in tegengestelde richting exotherm zijn (Wet van Hess). Door veranderingen in evenwichtssamenstellingen die onder invloed van temperatuurveranderingen optreden te bestuderen, kan de ervaringsregel worden opgesteld dat temperatuurverhoging bevorderlijk is voor een omzetting in de 'endotherme richting' (zie ook §8.3).

Een omschrijving van het principe van Le Chatelier in algemene termen dient hierbij echter buiten beschouwing te blijven. Een correcte formulering van dit principe is namelijk slechts mogelijk op basis van een reeks thermodynamische differentiaalvergelijkingen, die in het voortgezet onderwijs niet behandeld worden[12].

Met de aldus verkregen regels kan de vraag hoe een zekere omzetting in principe zo volledig en zo snel mogelijk kan plaatsvinden, beantwoord worden. Hierbij kunnen omzettingen aan de orde komen die industrieel gezien belangrijk zijn (geweest). Het klassieke voorbeeld van de ammoniaksynthese blijft in dit verband zeer geschikt: naast de invloeden van zowel druk als temperatuur op de opbrengst, spelen kinetische factoren een belangrijke rol (§3.2). Hieruit kan voor leerlingen blijken dat vaak een compromis moet worden gezocht tussen de strevingen naar een hoge opbrengst en naar een grote reactiesnelheid. Door de ammoniaksynthese in haar maatschappelijk-historische context te plaatsen, waarin voedselvoorziening en oorlogsdreiging voorop stonden, kan bovendien inzicht in een relatie tussen chemie en samenleving worden ontwikkeld (zie Molenaar & Kooiman, 1986, p.64-85).

Ook andere industriële processen kunnen aan de hand van de bedoelde empirische regels worden besproken (bijvoorbeeld de bereidingen van zwavelzuur en van esters). Daarnaast is het mogelijk om leerlingen een praktijkopdracht te geven waarin zij moeten trachten om een zekere synthese uit te voeren en daarbij de omstandigheden zo te kiezen, dat zo snel mogelijk een zo groot mogelijke opbrengst wordt verkregen. Door de feitelijk verkregen opbrengst te bepalen, kan de gevolgde syntheseprocedure worden geëvalueerd.

In deze onderwijsopzet gaat het vooral om het vaststellen van trends (verandering van een factor in een zekere richting leidt tot vergroting en/of versnelling van produktie). Kwantitatieve bepalingen (van concentraties en/of temperatuur) kunnen in dit verband een rol spelen. De relatie 'concentratiebreuk=K' kan echter achterwege blijven. Het ontwerpen van onderwijsmateriaal volgens de geschetste opzet zou gepaard moeten gaan met chemiedidactisch onderzoek, gericht op het verkrijgen van een didactische structuur.

---

[12]Zo'n formulering is bijvoorbeeld opgenomen in Bijvoet et al. (1973), p.124-129. Zie ook §3.1.

hoofdstuk 9

Nabeschouwing

In deze nabeschouwing geef ik eerst een beschrijving van het proces dat ik als onderzoeker in de loop van het onderzoek heb doorgemaakt ten aanzien van enkele uitgangspunten, beschreven in de eerste twee hoofdstukken. Vervolgens breng ik de resultaten van het onderzoek in verband met de gehanteerde werkwijze. Tenslotte evalueer ik het onderzoek in verband met de in §1.1 beschreven onderwijsproblemen. In dat kader ga ik in op verdiensten en tekortkomingen van het ontworpen onderwijsmateriaal. Ook bespreek ik in dit licht de keuze om het empirische onderzoek binnen de grenzen van de vigerende leerplannen uit te voeren.

9.1 Ontwikkeling in het onderzoek

Aan het begin van hoofdstuk 2 gaf ik aan dat het kader waarin het onderzoek is uitgevoerd voor mij geen vaststaand gegeven was. Ten aanzien van verschillende uitgangspunten is een aandachtsverschuiving opgetreden. In deze paragraaf beschrijf ik om welke verschuivingen het gaat en waardoor deze beïnvloed zijn.

In de eerste fase van het onderzoek was mijn aandacht vooral gericht op het *ontwerpen van een leerlingentekst*. Hiertoe analyseerde ik bestaande schoolboeken, chemische begrippen (aan de hand van wetenschappelijke literatuur) en artikelen over onderwijs in chemisch evenwicht. Ook het eerste preconceptieonderzoek (§2.3) stond in dit kader: uitingen van leerlingen werden verzameld om opvattingen over het begrip chemische reactie te inventariseren, teneinde hiermee rekening te kunnen houden bij het ontwerpen van onderwijsmateriaal.

Bij het opzetten van de leerlingentekst ging het er mij vooral om de betrokkenheid van leerlingen bij hun onderwijs te vergroten door hen zelf proeven te laten uitvoeren (eigen ervaringen met chemische verschijnselen) en door hen in groepen onderling te laten discussiëren. De tekst was bedoeld om deze werkwijze mogelijk te maken. In het onderzoeksmateriaal dat ik verzamelde tijdens de uitvoering van de eerste versie van de leerlingentekst zocht ik vooral naar zwakke punten en onduidelijkheden in de tekst, om die vervolgens te kunnen verbeteren. Ik merkte daarbij dat de leerlingen regelmatig op een voor mij verrassende manier met opdrachten in de tekst omgingen. Soms gingen zij op zoek naar een verklaring, terwijl in de tekst gevraagd werd naar een beschrijving van waarnemingen. In een enkel geval stelden zij daarbij vragen in corpusculaire termen, hoewel deze in de tekst waren vermeden (protocol 5.I). Ook op andere momenten maakten leerlingen gebruik van corpusculaire argumenten, hetgeen tot produktieve onderwijssituaties kon leiden (protocollen 6.IV en 6.V). Door deze ervaringen verschoof mijn aandacht naar de *eigen vragen en argumentaties van leerlingen*. Bovendien werden hierdoor bij mij vragen opgeroepen ten aanzien van de *wetenschaps-historische ontwikkeling* van chemisch evenwicht.

De eerste versie van de leerlingentekst probeerde ik zo in te richten dat de docent zo weinig mogelijk hoefde te ondersteunen. Ik merkte echter al gauw dat leerlingen hun docent toch vaak inschakelden, vooral als een onderlinge discussie vastliep op meningsverschillen of als de tekst niet begrepen werd. De docent trachtte dan de optredende blokkades op te heffen en speelde zodoende een belangrijke rol in verband met het wel of niet optreden van begripsontwikkeling. Hierdoor ben ik in het onderzoek geleidelijk meer gaan letten op manieren waarop docenten in de onderwijspraktijk met de leerlingentekst omgingen en op de gesprekken die zij met leerlingen voerden. Anders gezegd: *ook het spreken en handelen van docenten werd object van onderzoek.*

Met deze verschuiving hing een andere samen: aanvankelijk verbond ik een ingreep van de docent met een zwak punt in de leerlingentekst. Later bracht ik de deelname aan gesprekken met leerlingen ook in verband met *de betrokkenheid van docenten:* om deze te vergroten ging ik docenten stimuleren tot een actieve deelname aan discussies met leerlingen. In dit verband kreeg ook de nascholingscursus gestalte.

De eerste versie van deze cursus werd ontworpen naast de tweede versie van de leerlingentekst (zie §2.3). *In de eerste cursus lag de nadruk op de leerlingentekst:* ik besprak achtergronden bij het ontwerpen van de tekst, liet de docenten met de tekst zelf kennismaken en besprak in een latere fase de ervaringen van de docenten met de tekst in hun onderwijspraktijk. *De tweede cursus was veel meer gericht op chemiedidactiek-onderwijs.* In dit kader werden chemische begrippen geproblematiseerd aan de hand van fragmenten uit leergangen en/of uitingen van leerlingen. Ook wetenschaps-historische zaken kwamen hierbij aan de orde.

Deze verschuiving hing samen met het geleidelijk gestalte krijgen van de didactische structuur. Hierdoor kon ik ervaringen met de leerlingenteksten in verband brengen met onderwijsproblemen die door docenten zelf werden geformuleerd (bijvoorbeeld in de protocollen 6.I en 6.II). Ik merkte dat de didactische 'preconcepties' van docenten ten aanzien van chemisch evenwicht samenhingen met de manieren waarop dit onderwerp in recente leergangen wordt besproken. In dit verband nam mijn belangstelling voor de *onderwijshistorische ontwikkeling* van chemisch evenwicht toe. Ik wilde nagaan hoe de huidige leerplan- en leergangsituatie gegroeid is en welke zaken hierop van invloed zijn geweest.

Samengevat komt het proces dat ik heb doorgemaakt erop neer dat ik geleidelijk een samenhang ben gaan zien tussen verschillende aspecten van het onderzoek: tussen de invloeden van docent en leerlingentekst op begripsontwikkeling in onderwijs; tussen begripsontwikkeling in wetenschap en in onderwijs; tussen het ontwerpen van een leerlingentekst en van een nascholingscursus, etc.

Ik meen dat het in het belang is van chemiedidactiek als jonge wetenschappelijke discipline dat ik mijn proces in deze beschrijf: andere onderzoekers herkennen hier misschien hun eigen proces in en kunnen er wellicht voordeel uit putten. Ik heb er echter voor gekozen om dit proefschrift niet te structureren volgens het beschreven proces, omdat dit de leesbaarheid en de overzichtelijkheid van het verslag in negatieve zin zou beïnvloeden. Deze keuze hangt

samen met mijn verwachting dat veel lezers van dit proefschrift zelf geen chemiedidactisch onderzoek zullen uitvoeren.

9.2 Evaluatie van onderzoek in verband met werkwijze

Nu de resultaten van het onderzoek beschreven zijn, wil ik deze in verband met de in het onderzoek gehanteerde werkwijze evalueren. Deze evaluatie beperk ik tot de in §8.1 beschreven didactische structuur. Hieronder ga ik vooral in op de aspecten generaliseerbaarheid en representativiteit in dit onderzoek en op de keuze voor kwalitatief onderzoek.

Ik beschouw de verkregen didactische structuur als een resultaat van gegeneraliseerde onderzoekservaring. Om dit toe te lichten, verwijs ik naar de opmerkingen in §2.4 over het proces waarbij zo'n structuur gestalte krijgt. Hierbij is gekozen voor de gefundeerde theorie-benadering: het onderzoeksmateriaal, waartoe ik ook wetenschappelijke literatuur (chemisch, wetenschapshistorisch en -filosofisch) reken, is telkens vergeleken met eerder verkregen didactische hypotheses, zodat verscherping of bijstelling hiervan mogelijk was. De aldus verkregen inzichten hebben een interpersoonlijke status doordat analyses altijd in samenwerking met andere onderzoekers werden uitgevoerd. Generalisatie is dus op diverse manieren opgetreden: door materiaal van verschillende aard met elkaar te vergelijken (protocollen, schriftelijke antwoorden, chemische literatuur); door hypotheses in een volgende 'ronde' te toetsen en door analyseresultaten in teamverband vast te stellen.

De representativiteit van het door mij onderzochte materiaal is discutabel voor wat betreft dat deel van het materiaal dat in onderwijssituaties is verzameld. Ik heb hierin immers slechts een beperkte hoeveelheid onderzoeksmateriaal kunnen verwerken. Analyses van gesprekken in andere groepen hadden tot nieuwe en/of andere inzichten kunnen leiden. Indien additionele versies van leerlingentekst en nascholingscursus waren ontworpen, was nieuw onderzoeksmateriaal verkregen, waaruit wijzigingen in de didactische structuur hadden kunnen volgen.

In het licht van het bovenstaande zal ik trachten de status van de verkregen didactische structuur aan te geven. In §2.2 heb ik een didactische structuur omschreven als *een stelsel van chemische begrippen, waarvan inhoud en samenhang in het kader van begripsontwikkeling beschreven worden.* Daarbij heb ik aan zo'n structuur de eis gesteld dat hieraan beschrijvingen, verklaringen en voorspellingen van zowel produktiviteit als blokkades ten aanzien van begripsontwikkeling ontleend moeten kunnen worden. In die zin heb ik een didactische structuur een element van een (chemie-)didactische theorie genoemd. De vraag is dus nu of de in §8.1 beschreven didactische structuur aan deze eis kan voldoen.

Ik meen dat dit tenminste gedeeltelijk het geval is: in de didactische structuur zijn verschillende 'routes' beschreven die in de onderwijspraktijk van 4-HAVO/VWO zowel leerbaar als onderwijsbaar zijn gebleken. Voorts biedt deze structuur de mogelijkheid om redeneringen en gesprekken in onderwijssituaties te interpreteren, waarbij produktiviteit en/of blokkades kunnen worden aangewezen. Dit geldt niet alleen voor de protocollen die in de hoofdstukken 4 t/m 7 zijn weergegeven, maar ook voor een groot aantal van de in dit onderzoek

verzamelde schriftelijke antwoorden. Daarnaast bood de didactische structuur een gezichtspunt bij de analyse van leergangen en leerplannen (§8.2). *Op grond hiervan is de verkregen didactische structuur in mijn ogen een kwalitatieve, beschrijvende theorie, met beperkte verklarende en voorspellende mogelijkheden.*

Uiteindelijk bepaalt de lezer echter de status van dit onderzoeksresultaat (zie ook Wester, 1987, p.40). Ieder doet dit in zijn of haar eigen context. Zo bepalen andere (chemie-)didactische onderzoekers de wetenschappelijke status. Vanuit hun eigen onderzoeksachtergrond kunnen zij zich uitspreken over de vraag in hoeverre de door mij verkregen didactische structuur een bijdrage vormt aan chemiedidactische theorievorming. Docenten kunnen deze structuur beoordelen op mogelijkheden tot het begrijpen en oplossen van onderwijsproblemen op het gebied van chemisch evenwicht. Opstellers van leerplannen moeten bepalen in hoeverre de op deze structuur gebaseerde adviezen (§8.2) voor hen relevant zijn.

Tenslotte wil ik terugkomen op de keuze voor kwalitatief onderzoek. In §2.4 heb ik deze keuze gekoppeld aan het doel van het onderzoek. Daarbij stelde ik dat de ontwikkeling van een didactische structuur geblokkeerd zou kunnen worden indien onderzoeksmateriaal in een vroeg stadium van het onderzoek aan statistische procedures onderworpen zouden worden.

De vraag of het zin heeft om het in dit proefschrift beschreven onderzoek volgens een kwantitatieve aanpak voort te zetten, wil ik verbinden met mogelijke toepassingen van de onderzoeksresultaten. In het vorige hoofdstuk heb ik toepassingen beschreven voor het ontwerpen van onderwijs, toetsen, nascholing en leerplannen. Ik meen dat het in verband met deze toepassingen weinig zinvol is om te streven naar een 'gekwantificeerde' didactische structuur. Dit licht ik toe aan de hand van een voorbeeld.

Uit vervolgonderzoek zou kunnen blijken dat een bepaald percentage van de leerlingen uit een zekere representatieve populatie van (bijvoorbeeld) 4-HAVO, naar aanleiding van een zekere vraag in een bepaald stadium van het onderwijs een knipperlichtredenering verwoordt. De vraag is welk belang een dergelijk onderzoeksresultaat heeft. Ten eerste is het getalsmatige resultaat uitsluitend geldig voor de vraag die in het onderzoek gesteld is in dat stadium van het onderwijs. En ook al zou een docent deze vraag letterlijk in een onderwijssituatie stellen, dan is op voorhand onbekend *welke* leerlingen deze redenering zullen geven. Voor een docent is het daarentegen van groot belang om deze redenering in concrete situaties te herkennen, te begrijpen en erover met de betrokken leerling(en) in gesprek te gaan en daarbij te weten welke redeneringen van zijn kant tot produktiviteit kunnen voeren, welke proeven in dit verband kunnen functioneren, etc. Op het niveau van leerplannen en schoolboeken geldt een soortgelijke redenering: bij het ontwerpen hiervan staat de inhoud van de begrippen en hun samenhang in de didactische structuur centraal en is een (contextafhankelijke) gekwantificeerde weergave van opvattingen en redeneringen van ondergeschikt belang.

Een ander type vervolgonderzoek zou gericht kunnen zijn op de vergelijking van onderwijs dat volgens mijn didactische structuur is ontworpen met bestaand onderwijs. In dat geval is kwantitatief onderzoek noodzakelijk. Daaruit zou bijvoorbeeld kunnen blijken dat het percentage leerlingen dat een knipper-

lichtredenering verwoordt hoger is na afloop van één van beide onderwijsconstructies. Ook de waarde van zo'n gegeven acht ik echter gering. Een knipperlichtredenering is in mijn ogen geen 'misconceptie'. Het kan voor veel leerlingen zelfs een noodzakelijk stadium in hun begripsontwikkeling zijn. Daarentegen kunnen leerlingen in termen van een dynamisch evenwicht spreken, zonder dat bij hen begripsontwikkeling is opgetreden (napraten zonder inzicht).

Kwantitatief vergelijkend onderzoek zou ook voorgesteld kunnen worden om de betrokkenheid van leerlingen vast te stellen. Gezien mijn opvatting van betrokkenheid (§1.1) gaat het daarbij niet zozeer om enquêtes waarin leerlingen kunnen aangeven in hoeverre zij onderwijs(-materiaal) als leuk, zinvol en/of interessant hebben ervaren. Daarentegen zou nagegaan moeten worden in hoeverre leerlingen aan het onderwijs betekenis hebben kunnen geven, waarbij het ook gaat om buitenschoolse situaties en om effecten op lange termijn. Om dit type vervolgonderzoek te kunnen verrichten, moet een geschikt instrument gezocht of ontwikkeld worden om betrokkenheid, zoals zojuist omschreven, te 'meten'. In de volgende paragraaf doe ik op basis van mijn onderzoek enkele kwalitatieve uitspraken over betrokkenheid.

9.3 Evaluatie van onderzoek in verband met onderwijsproblemen

In hoofdstuk 1 heb ik laten zien dat het onderzoek geïnspireerd is door een aantal onderwijsproblemen. In deze slotparagraaf probeer ik aan te geven in hoeverre het door mij verrichte onderzoek een bijdrage heeft geleverd aan het oplossen van deze problemen. Daarbij bespreek ik achtereenvolgens het ontworpen onderwijsmateriaal en de verkregen didactische structuur. Tenslotte formuleer ik een alternatieve onderzoeksstrategie.

Onderwijsmateriaal

In §1.1 typeerde ik de problemen in het bestaande scheikunde-onderwijs in HAVO en VWO als een gebrek aan betrokkenheid van leerlingen bij dit onderwijs. In het onderzoek heb ik onderwijs ontworpen waarin het herkennen en oplossen van (chemische) problemen door in groepjes werkende leerlingen centraal stond (§2.3). Hieronder wil ik aangeven in hoeverre dit onderwijs kan bijdragen tot vergroting van betrokkenheid. Daarbij baseer ik me in de eerste plaats op ervaringen met het door mij ontworpen onderwijsmateriaal. Het gaat dan om mijn persoonlijke ervaringen als onderzoeker en om de ervaringen van docenten, zoals zij die bij nascholingsbijeenkomsten en op een evaluatieformulier verwoordden. Deze ervaringen vergelijk ik met die van enkele andere onderzoekers.

De gekozen organisatievorm was erop gericht leerlingen zelf (gedeeltelijk) verantwoordelijkheid te leren dragen voor hun vorderingen. Daarmee zou een algemeen onderwijsdoel gediend worden. Dit geldt ook voor doelen als leren samenwerken en discussiëren. Ten aanzien van deze doelen rapporteerden docenten overwegend positieve ervaringen.

In het ontworpen onderwijs speelden confrontaties van leerlingen met voor hen herkenbare chemische problemen een belangrijke rol. Daartoe waren verschillende proeven en vragenreeksen opgenomen. Indien problemen herkend werden, leidde dit veelal tot heftige discussies en/of emotionele reacties van

leerlingen. In veel van zulke gevallen was de nieuwsgierigheid van de betrokken leerlingen geprikkeld: zo kon verbazing over een proefresultaat leiden tot een verklaringsbehoefte. Meestal bood het onderwijsmateriaal leerlingen enige ruimte om verschillende, eigen verklaringen te formuleren. Daarbij werd aan docenten gevraagd om niet direct 'de juiste verklaring' te presenteren.

Op het gebied van de uitvoering van proeven bestond voor leerlingen meestal niet veel ruimte voor een eigen aanpak. Op enkele uitzonderingen na werden de proeven in de leerlingentekst in detail voorgeschreven. Ik acht het echter wenselijk om leerlingen vaker zelf beargumenteerde beslissingen over de uitvoering van proeven te laten nemen. Daarmee zou niet alleen een bijdrage worden geleverd aan de ontwikkeling van praktische chemische werkwijzen, maar ook verwacht ik een positief effect op hun betrokkenheid.

De onderwijswerkelijkheid bracht naar voren dat leerlingen lang niet altijd werden aangesproken door een aangeboden probleem. In veel gevallen wisten zij bijvoorbeeld een confrontatie tussen hun actuele opvattingen en het resultaat van een proef te vermijden, waarbij zij o.a. de in §2.1 beschreven mechanismen hanteerden. Hoewel het beoogde effect van het onderwijsmateriaal hierdoor werd gemist, waardeer ik dit gedrag niet negatief. Mensen moeten immers de vrijheid hebben om zelf te bepalen wat zij als een probleem ervaren. Ik beschouw het niet alleen als zinloos, maar vooral als verwerpelijk om te streven naar een onderwijsconstructie waarin het leerproces van iedere betrokkene op dezelfde, voorspelbare wijze verloopt. Aan de andere kant ligt hier wel een beperking van een probleemstellende onderwijsopzet.

Nadat leerlingen een probleem hadden ervaren, wilden ze dit doorgaans ook oplossen, en liefst zo snel mogelijk. Kant-en-klare oplossingen werden in de leerlingentekst echter niet aangeboden. Bovendien had ik, zoals gezegd, docenten aangeraden om terughoudend te zijn met uitleg. Hierdoor ontstond regelmatig onvrede bij leerlingen: zij vroegen vaak om concrete verklaringen en verloren hun betrokkenheid indien verklaringen niet (direct) werden aangereikt. Soms gingen zij zich hierdoor onzeker voelen of ergerden zij zich aan de opeenvolging van opdrachten in de leerlingentekst, waarin zij geen structuur meer herkenden. Als een oplossing in een latere fase van het onderwijs aan de orde kwam, was het oorspronkelijke probleem door veel leerlingen vergeten (zie bijvoorbeeld §6.7).

Om deze moeilijkheden het hoofd te bieden kan een docent, nadat een chemisch probleem door leerlingen geconstateerd en grondig besproken is, een bespreking met een groep leerlingen (of met de gehele klas) voeren, waarin gezocht wordt naar een oplossing. Desnoods moet de docent uiteindelijk een acceptabele oplossing presenteren, waarbij hij moet trachten om 'verfeitelijking' van een gegeven verklaring of model te vermijden. In een later stadium kan hij een bespreking richten op reflectie. Daarbij is het de bedoeling dat door een terugblik verbanden tussen verschillende zaken (proeven, problemen, verklaringen, begrippen, etc.) zichtbaar worden. In mijn onderzoek bleek dat schriftelijke opdrachten die op reflectie gericht waren, niet functioneerden zonder tussenkomst van een docent.

Om deze taken te kunnen vervullen is het van groot belang dat de docent inzicht heeft in de didactische structuur. Daarmee wordt het belang van de combinatie van onderwijsvernieuwing met nascholing nog eens onderstreept.

In §2.3 vermeldde ik de keuze voor inpasbaarheid qua inhoud en tijdsbesteding. Dit laatste betekende dat voor de uitvoering van de volledige leerlingentekst, conform het vigerende leerplan voor 4-VWO (bijlage B), 15 lesuren (inclusief toetsing) waren geraamd. In de praktijk bleek deze planning niet haalbaar: gemiddeld waren 17 tot 18 lesuren nodig. Docenten schreven deze uitloop toe aan factoren van uiteenlopende aard:

- In de betrokken periode van het schooljaar (april-juni) wordt het lesrooster veelvuldig onderbroken in verband met vakanties en examenperiodes. De hierdoor optredende versnippering had tot gevolg dat leerlingen in de les veel tijd verloren met zich opnieuw in te werken. Dit bezwaar geldt dus niet specifiek voor mijn leerlingentekst.
- In een aantal groepen (met name in VWO-klassen) leidde de betrokkenheid van leerlingen tot langdurige en diepgaande discussies.
- In groepen waar de betrokkenheid gering was, trad tijdverlies op doordat de leerlingen hun aandacht slechts een deel van de lestijd aan de tekst wijdden.
- Docenten die weinig ervaring hadden met zelfstandig groepswerk gaven aan dat ze het moeilijk vonden om het tempo van de leerlingen te bewaken. Bij deze docenten was de uitloop inderdaad groter dan bij docenten die op dit gebied meer ervaren waren.

De hierboven beschreven positieve en negatieve ervaringen met het ontworpen onderwijsmateriaal komen in grote lijnen overeen met die van De Vos (1985) en De Jong (1990). De eerste wijst o.a. op de noodzaak dat docenten op "essentiële momenten" ingrijpen om de ontwikkeling van begrippen bij leerlingen te beïnvloeden (De Vos, 1985, p.142). De tweede spreekt in dit verband zelfs van een "dilemma [...] tussen uitleggend en probleemgericht onderwijs". Hij vermoedt dat uitleggend onderwijs geleidelijk meer achterwege kan blijven indien de gewenning van leerlingen en docenten aan een onderwijsvorm waarin leerlingen in groepen zelfstandig werkzaam zijn, toeneemt (De Jong, 1990, p.148).

Mijn conclusie ten aanzien van het ontwerpen van onderwijs luidt dat een organisatievorm moet worden gevonden, waarbij periodes waarin leerlingen met chemische problemen 'worstelen' op een evenwichtige wijze worden afgewisseld met fasen waarin de docent een centrale rol vervult bij het bespreken en het helpen oplossen van deze problemen. Indien leerlingen in groepen werken zal het evenwicht tussen deze periodes per groep verschillend zijn: sommige groepen zullen de docent weinig nodig hebben, anderen daarentegen (zeer) veel. Tenslotte dient de docent een initiërende rol in een reflectieproces te spelen.

Relatie tussen didactische structuur en bestaande (school-)vakstructuur

In §3.5 heb ik gewezen op een spanningsveld in het empirische onderzoek als gevolg van de keuze om hierin de randvoorwaarden van vigerende leerplannen en examenprogramma's te respecteren. Hierdoor waren niet alleen grenzen aangegeven voor de invoering van een kwalitatief begrip chemisch evenwicht, maar ook lag de beginsituatie van de leerlingen min of meer vast: in het leerplan gaan zekere aspecten van het reactiebegrip immers vooraf aan chemisch evenwicht, terwijl andere nog niet of nauwelijks genoemd worden (§8.3).

In dit licht zie ik de verkregen didactische structuur als een middel om aan te geven op welke wijze binnen de genoemde grenzen begripsontwikkeling ten aanzien van kwalitatief chemisch evenwicht kan optreden. In §8.2 heb ik suggesties genoemd ter verbetering van de structuur van de vigerende leerplannen, waarbij het centrale begrip uit deze leerplannen, dynamisch evenwicht, gehandhaafd kon blijven. Anders gezegd: het bleek mogelijk om een didactische structuur te verkrijgen die min of meer past bij de inhoud van de vigerende leerplannen.

Uit een analyse van de bestaande (school-)vakstructuur (§3.3) is echter naar voren gekomen dat de relatie tussen kwalitatief en kwantitatief chemisch evenwicht hierin problematisch is. Dit roept de vraag op of het verstandig is om in een eventueel vervolgonderzoek op het gebied van kwantitatief chemisch evenwicht opnieuw de grenzen van de leerplannen te accepteren. De kans is groot dat in dat geval een didactische structuur wordt verkregen, die mogelijk wel past bij deze leerplannen, maar niet bij de didactische structuur uit §8.1. *Daarmee komt de in §1.3 gekozen strategie ter discussie te staan, waarin onderdelen van de bestaande (school-)vakstructuur stuk voor stuk aan didactisch onderzoek worden onderworpen.*

Een andere onderzoeksstrategie

In dit onderzoek zijn leerplannen en leergangen beschouwd vanuit het gezichtspunt dat hierin opgenomen onderwerpen in het onderwijs gefundeerd moeten worden ingevoerd en bovendien moeten functioneren in een breder kader. Op deze wijze kan een (impliciet aanwezige) vakstructuur zichtbaar worden gemaakt. Tevens komen knelpunten aan het licht, wanneer niet voldaan is aan de genoemde structuureisen. Ten aanzien van chemisch evenwicht zijn zulke knelpunten beschreven in §8.2 en §8.4. Zij konden geanalyseerd worden in verband met een studie van de onderwijs-historische ontwikkeling.

Deze aanpak biedt mogelijkheden voor een andere onderzoeksstrategie. In eerste instantie kan de vakstructuur als geheel op deze wijze geanalyseerd worden[1]. Vervolgens moet worden nagegaan of gesignaleerde knelpunten kunnen worden opgeheven door begrippen die in de bestaande vakstructuur voorkomen op een andere wijze met elkaar te verbinden, waardoor een bijgestelde vakstructuur ontstaat. Daarnaast moeten alternatieven voor de bestaande vakstructuur overwogen worden, waarbij andere begrippen of andere volgordes van en relaties tussen begrippen worden gehanteerd (zie bijvoorbeeld §8.3).

Een analyse van de vakstructuur kan ook de uitgangspunten waarop deze gebaseerd is ter discussie stellen. Dan moet worden beslist of deze uitgangspunten nog aanvaardbaar zijn, of dat ze vervangen moeten worden door andere. Eén van de uitgangspunten van de bestaande vakstructuur betreft de keuze om begrippen in een generale betekenis in te voeren: zo gaat het in 3-HAVO/VWO direct om chemische reacties in algemene zin. Dit uitgangspunt past bij een onderwijsvisie waarin resultaten en reconstructies van wetenschappelijk onderzoek worden overgedragen (§2.2), maar biedt weinig ruimte voor de in §2.1 beschreven opvatting dat lerenden kennis moeten construeren in plaats van

[1]Het artikel van De Vos & Verdonk (1990) beschouw ik als een eerste, nog vrij ruwe, analyse van de bestaande vakstructuur.

consumeren. Het genoemde uitgangspunt past evenmin bij doelstellingen van scheikunde-onderwijs om leerlingen voor te bereiden op wetenschap of maatschappij. Daarmee lijkt één van de pijlers van de bestaande vakstructuur aan vervanging toe te zijn.

Criteria voor verbeteringen in de bestaande vakstructuur of voor alternatieve vakstructuren moeten geleverd worden door didactisch onderzoek: de produktiviteit van een voorgestelde structuur moet onderzocht worden in de onderwijspraktijk. Op deze wijze kan de bestaande vakstructuur op den duur in zijn geheel worden vervangen door één didactische structuur, op basis waarvan het scheikunde-onderwijs voor een zeker schooltype kan worden ingericht. In samenhang hiermee moeten (na)scholingsprogramma's worden opgesteld. Tevens kunnen nieuwe leerplannen en examenprogramma's dan op basis van chemiedidactisch onderzoek worden gefundeerd. Dit zou leiden tot een meer omvattende oplossing van de in §1.1 genoemde onderwijsproblemen.

Literatuur

Adams, C.S. (1940). Teaching problems in presenting the Law of Chemical Equilibrium to Students in Analytical Chemistry. *Journal of Chemical Education, 17*, 22-29.

Allsop, R.T. & N.H. George (1984). Le Chatelier - A redundant principle? *Education in Chemistry, 21*, 54-56.

Antwerpen, A.P. van (1978). Het begrip chemische reactie. *Faraday, 47*, 199-210.

Arndt, B. (1988). Zur Behandlung von Reaktionsgeschwindigkeit und chemischem Gleichgewicht. *Chemie in der Schule, 35*, 286-293.

Ashmore, P.G. (1965). Reaction kinetics and the law of mass action. *Education in Chemistry, 2*, 160-166.

Atkins, P.W. (1986). *Physical Chemistry*. Oxford: Oxford University Press, derde editie.

Ausubel, D.P. (1968). *Educational Psychology: A Cognitive View*. New York: Holt, Rinehart & Winston.

Battino, R. (1975). A Dynamic Lecture Demonstration of Dynamic Equilibrium - The BG System. *Journal of Chemical Education, 52*, 55.

Bereiter, C. (1985). Toward a Solution of the Learning Paradox. *Review of Educational Research, 55*, 201-226.

Berkel, A.A.J. van (1986). Toestandsaanduidingen. *NVON-maandblad, 11*, 2, 18-20.

Bertelsbeck, N. & H.G. Von Freyberg (1988). Zum dynamischen Gleichgewicht. *Der Mathematische und Naturwissenschaftliche Unterricht, 41*, 3, 166-167.

Bijvoet, J.M. (1951). Inleiding - Symposium over Thermodynamica, Utrecht, 31 Oct. 1949. *Faraday, 20*, 41-48.

Bijvoet, J.M., A.F. Peerdeman, A. Schuijff & E.H. Wiebenga (1973). *Korte Inleiding tot de Chemische Thermodynamica*. Groningen: H.D. Tjeenk Willink, vierde druk.

Blissett, E.H. (1988). Illustration of Le Chatelier's Principle applied to the nitrogen dioxide/dinitrogen tetroxide equilibrium using the analogue input to the BBC micro. *School Science Review, 69*, 533-536.

Bodner, G.M. (1986). Constructivism: A Theory of Knowledge. *Journal of Chemical Education, 63*, 873-878.

Boer, W. den & B. van Berkel (1989). *Eenrichtingsverkeer en tweerichtingsverkeer in de chemie*. Utrecht: Rijksuniversiteit Utrecht, bijvakverslag Vakgroep Chemiedidactiek.

Brants, F.E. (1976). Thermodynamisch denken en toch gewoon blijven. *Faraday, 45*, 213-225.

Braun, T.M. (1987). Das Massenwirkungsgesetz - eine alternative Ableitung. *Praxis der Naturwissenschaften-Chemie, 36*, 17-19.

Brosnan T. (1989). Teaching chemistry using spreadsheets (I): Equilibrium thermodynamics. *School Science Review, 70*, 39-47.

Broekhuisen, A.P.M. (1983). Uitlegsels VI: Evenwicht in de discotheek (I). *Faraday, 52*, 79-80.

Brunt, N.A. (1941). Heterogene evenwichten. *Faraday, 11*, 163-169.

Burnett, M.G. (1982). The Mechanism of the Formaldehyde Clock Reaction. *Journal of Chemical Education, 59,* 160-162.

Camacho, M. & R. Good (1989). Problem solving and chemical equilibrium: successful versus unsuccessful performance. *Journal of Research in Science Teaching, 26,* 251-272.

Clausius, R.J.E. (1857). Über die Art der Bewegung, welche wir Wärme nennen. *Poggendorfs Annalen der Physik und Chemie, 100,* 353-380.

Clausius, R.J.E. (1865). Über verschiedene für die Anwendung bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie. *Poggendorfs Annalen der Physik und Chemie, 125,* 353-400.

Cohen, E. (1905). Het Onderwijs in de Chemie aan onze Hoogere Burgerscholen. *Chemisch Weekblad, 2,* 805-819.

Cohen, E. & T. Strengers (1908). De dynamische opvatting van een omkeerbare chemische reaktie. *Chemisch Weekblad, 5,* 594-595 en 719-721.

Cohen, I. (1987). *Various Strategies for the Teaching of the Topics of Chemical Energy and Chemical Equilibrium. Development, Implementation and Evaluation.* Rehovot: Weizman Institute of Science, dissertatie Department of Science Teaching.

Cullen, Jr., J.F. (1989). Computer Simulation of Chemical Equilibrium. *Journal of Chemical Education, 66,* 1023-1025.

David, C.W. (1988). An Elementary Discussion of Chemical Equilibrium. *Journal of Chemical Education, 65,* 407-409.

Docters van Leeuwen, R.A.W. (1967). Een hydrodynamisch analogon van het chemisch evenwicht. *Faraday, 36,* 151-157.

Dranen, J. van (1963). Energie, Entropie en Chemische Reacties. *Faraday, 32,* 47-70.

Driel, J.H. van, W. de Vos & A.H. Verdonk (1988). Op zoek naar een didactische structuur voor de introductie van chemisch evenwicht. *Tijdschrift voor Didactiek der β-wetenschappen, 6,* 24-52.

Driel, J.H. van & W. de Vos (1989a). Sneller, harder, vaker. *NVON-maandblad, 14,* 7, 291-295.

Driel, J.H. van & W. de Vos (1989b). Welke reactie wordt versneld? *NVON-maandblad 14,* 9, 390-394.

Driel, J.H. van, W. de Vos & A.H. Verdonk (1989). Leopold Pfaundler, Michael, Karin und das chemische Gleichgewicht. *Chimica didactica, 15,* 185-204.

Driel, J.H. van, W. de Vos & A.H. Verdonk (1990). Why do some molecules react, while others don't? In: P.L. Lijnse, P. Licht, W. de Vos & A.J. Waarlo (Eds.), *Relating Macroscopic Phenomena to Microscopic Particles.* Utrecht: CDβ Press.

Driver, R. & J. Easley (1978). Pupils and Paradigms: A review of literature related to concept development in adolescent science students. *Studies in Science Education, 5,* 61-84.

Driver, R., E. Guesne & A. Tiberghien (1985). *Children's Ideas in Science.* Milton Keynes: Open University Press.

Driver, R. (1988). Changing conceptions. *Tijdschrift voor Didactiek der β-wetenschappen, 6,* 161-198.

Engel-Clough, E. & R. Driver (1986). A Study of Consistency in the Use of Students' Conceptual Framework Across Different Task Contexts. *Science Education, 70,* 473-496.

Enklaar, J.E. (1906). Eenige opmerkingen naar aanleiding van de voordracht van Prof. E. Cohen over "Het onderwijs in de Chemie aan onze Hoogere Burgerscholen". *Chemisch Weekblad, 3,* 21-30.

Epstein, I.R. (1987). Patterns in Time and Space - Generated by Chemistry. *Chemical and Engineering News, 65,* 3, 24-36.

Feis, R. (1960). Het Principe van Le Chatelier-Van 't Hoff. *Faraday, 29,* 141-143.

Flavell, J.H. (1963). *The Developmental Psychology of Jean Piaget.* New York: Nostrand Reinhold Co.

Frost, A.A. (1941). Effect of Concentration on Reaction Rate and Equilibrium. *Journal of Chemical Education, 18,* 272-274.

Goedhart, M.J. (1990). *Meten: Normen en Waarden.* Utrecht: Rijksuniversiteit Utrecht, dissertatie Vakgroep Chemiedidactiek.

Gold, J. & V. Gold (1985). Le Chatelier's Principle and the laws of Van 't Hoff. *Education in Chemistry, 22,* 82-85.

Gorodetsky, M. & R. Hoz (1985). Changes in the Group Cognitive Structure of Some Chemical Equilibrium Concepts Following a University Course in General Chemistry. *Science Education, 69,* 185-199.

Gorodetsky, M. & E. Gussarsky (1986). Misconceptualization of the chemical equilibrium concept as revealed by different evaluation methods. *European Journal of Science Education, 8,* 427-441.

Guldberg, C.M. & P. Waage (1879). Über die chemische Affinität. *Erdmann's Journal für practische Chemie, 127,* 69-114. In 1899 verschenen in *Ostwald's Klassiker der Exakten Wissenschaften, No. 104,* 126-171. Leipzig: Engelmann.

Gussarksy, E. & M. Gorodetsky (1988). On the Chemical Equilibrium concept: constrained word association and conception. *Journal of Research in Science Teaching, 25,* 319-333.

Hackerman, N. (1946). The Equilibrium Concept in Beginning College Chemistry Courses. *Journal of Chemical Education, 23,* 45-46.

Hackling, M.W. & P.J. Garnett (1985). Misconceptions of Chemical Equilibrium. *European Journal of Science Education, 8,* 427-441.

Hansen, R.C. (1984). Thermodynamic Changes, Kinetics, Equilibrium, and Le Chatelier's Principle. *Journal of Chemical Education, 61,* 804.

Harris, W.F. (1982). Clarifying the Concept of Equilibrium in Chemically Reacting Systems. *Journal of Chemical Education, 59,* 1034-1036.

Harsch, G. (1984). Kinetics and Mechanism - A Games Approach. *Journal of Chemical Education, 61,* 1039-1043.

Hashweh, M.Z. (1986). Toward an explanation of conceptual change. *European Journal of Science Education, 8,* 229-249.

Hashweh, M.Z. (1988). Descriptive studies of Students' conceptions in Science. *Journal of Research in Science Teaching, 25,* 121-134.

Heer, J. de (1957). The Principle of Le Chatelier and Braun. *Journal of Chemical Education, 34,* 375-379.

Hewson, P.W. & M.G.A'B. Hewson (1987). Science teachers' conceptions of teaching: Implications for teacher education. *International Journal of Science Education, 9,* 425-440.

Hildebrand, J.H. (1946). Catalyzing the Approach to Equilibrium. *Journal of Chemical Education, 23,* 589-592.

Hoff, J.H. van 't (1884). *Études de Dynamique Chimique.* Amsterdam: F. Muller & Co.

Hoff, J.H. van 't (1886). Lois de l'équilibre dans l'état dilué, gazeux ou dissous. *Kongliga Svenska Vetenskaps-Akademiens Handlingar, 21,* 17, 3-41. Een Duitse vertaling van G. Bredig (1900) is verschenen in *Ostwald's Klassiker der Exakten Wissenschaften, No. 110,* 3-61. Leipzig: Engelmann.

Horstmann, A.F. (1873). Theorie der Dissociation. *Annalen der Chemie und Pharmacie, 170,* 192-210.

Jager, H. de (1985). *Leren synthetiseren: Symbiose van ambacht en wetenschap.* Utrecht: Rijksuniversiteit Utrecht, dissertatie Vakgroep Chemiedidactiek.

Jager, H. de & A.H. Verdonk (1986). Synthetiseren: Imiteren of experimenteren? In: J.S. ten Brinke, H.P. Hooymayers & G. Kanselaar (Red.), *Vakdidactiek en informatietechnologie in curriculumontwikkeling.* Lisse: Swets & Zeitlinger, 89-100.

Jansen, W., B. Ralle & R. Peper (1984). *Reaktionskinetik und chemisches Gleichgewicht* (Lehrerbuch). Köln: Aulis Verlag.

Jansen, W., H. Fickenfrerichs, B. Flintjer, C. Matuschek, R. Peper-Bienzeisler, B. Ralle & H. Wienekamp (1986). Geschichte der Chemie im Chemieunterricht - das historisch-problemorientierte Unterrichtsverfahren. Teil 1 & 2. *Der Mathematische und Naturwissenschaftliche Unterricht, 39,* 321-330 en 391-397.

Johnstone, A.H., J.J. MacDonald & G. Webb (1977). Chemical Equilibrium and its Conceptual Difficulties. *Education in Chemistry, 14,* 169-171.

Joling, E., H.H. ten Voorde & A.H. Verdonk (1990). Verstudieboeking: De totstandkoming van feiten beschouwd vanuit een didactische optiek. *Tijdschrift voor Didactiek der β-wetenschappen, 8,* geaccepteerd door de redactie.

Jong, O. de (1990). *Rekenen aan reakties.* Utrecht: Rijksuniversiteit Utrecht, dissertatie Vakgroep Chemiedidactiek.

Keulen, J. van (1988). *Dampdruk en Evenwicht.* Utrecht: Rijksuniversiteit Utrecht, doctoraalverslag Vakgroep Chemiedidactiek.

Kober, F. (1987). Computer-Simulation eines Gleichgewichtes. *Praxis der Naturwissenschaften-Chemie, 36,* 20-23.

Koning, J. (1948). *Enige problemen uit de didactiek der natuurwetenschappen in het bijzonder van de scheikunde.* Dordrecht: Retèl & Felkers, dissertatie Rijksuniversiteit Utrecht.

Krupka, R.M., H. Kaplan & K.J. Laidler (1966). Kinetic Consequences of the Principle of Microscopic Reversibility. *Transactions of the Faraday Society, 62,* 2754-2759.

Kruytbosch, D.J. & S.J. Richter (1962). *Schriftelijke opgaven van het eindexamen der hogere burgerscholen-B met vijfjarige cursus.* Groningen: J.B. Wolters, 25e druk.

Laar, J.J. van (1908). Over reactiesnelheden. *Chemisch Weekblad, 5,* 698-705.

Laidler, K.J. (1985). Chemical Kinetics and the Origins of Physical Chemistry. *Archive for History of Exact Sciences, 32,* 1,43-75.

Laidler, K.J. (1987). *Chemical Kinetics.* New York: Harper & Row, derde editie.

Lambert, J.L. & G.T. Fina (1984). Iodine Clock Reaction Mechanisms. *Journal of Chemical Education, 61,* 1037-1038.

Lange, W. de (1936). De wenselijkheid van een andere indeling van de leerstof der scheikunde dan die volgens de elementen. *Faraday, 6,* 115-123.

Lijnse, P.L. (1990). Preconcepten, begripsontwikkeling en basisvorming natuur- en scheikunde. In: K.T. Boersma, P. Licht, P.L. Lijnse & W. de Vos (Red.), *Begripsontwikkeling in het vak natuur- en scheikunde in de basisvorming.* Enschede: SLO, 15-38.

Lindauer, M.W. (1962). The Evolution of the Concept of Chemical Equilibrium from 1775 to 1923. *Journal of Chemical Education, 39,* 384-390.

Ludwig, J. (1985). Is er een verband tussen reactiesnelheid en evenwicht? *NVON-maandblad, 10,* 4, 25-27.

Ludwig, J. & R. Klein (1986). De jodiumklok: een ideale kinetiekproef. *NVON-maandblad, 11,* 6/7, 16-19.

Lund, E.W. & O. Hassel (1964). Guldberg and Waage and the Law of Mass Action. In: *The law of mass action: A centenary volume.* Oslo: Universitatsforlajet, Det Norske Videnskaps-Akademi, 37-46.

Lund, E.W. (1965). Guldberg and Waage and the Law of Mass Action. *Journal of Chemical Education, 42,* 548-550.

Lund, E.W. (1968). "Activated Complex" - A Centenarian? (A tribute to Leopold Pfaundler). *Journal of Chemical Education, 45,* 125-128.

MacWood, G.E. & F.H. Verhoek (1961). How can you tell whether a reaction will occur? *Journal of Chemical Education, 38,* 334-337.

Martin, D.F. (1976). A Mechanical Demonstration of Approach to Equilibrium. *Journal of Chemical Education, 53,* 634.

Maskill, R. & A.F.C. Cachapuz (1989). Learning about the chemistry topic of equilibrium: The use of word association tests to detect developing conceptualizations. *International Journal of Science Education, 11,* 57-69.

Mellon, E.K. (1979). An Apparant Contradiction in the Application of the Principle of Le Chatelier. *Journal of Chemical Education, 56,* 380-381.

Mertens, R.J. (1986). *Evenwicht in beweging.* Utrecht: Rijksuniversiteit Utrecht, doctoraalverslag Vakgroep Chemiedidactiek.

Mertens, R.J., J.H. van Driel & W. de Vos (1987). Experimenten met robalaat. *NVON-maandblad, 12,* 2/3, 68-70.

Middelink, J.W. (1979). *Systematische Natuurkunde* (deel B voor bovenbouw VWO/HAVO). Apeldoorn: Van Walraven, tweede druk.

Miranda, J. de (1955). *Verkenning van de 'terra incognita' tussen practijk en theorie in middelbaar (scheikunde-)onderwijs.* Groningen: J.B. Wolters, dissertatie Rijksuniversiteit Utrecht.

Molenaar, L. & P. Kooiman (1986). *Chemie en Samenleving: Van kleurstof tot kunstmest.* Maastricht, Brussel: Natuur & techniek.

Mysels, K.J. (1956). Textbooks errors VII: The Laws of Reaction Rates and of Equilibrium. *Journal of Chemical Education, 33,* 178-179.

Nash, L.K. (1970). Chemical Equilibrium as a State of Maximal Entropy. *Journal of Chemical Education, 47,* 353-357.

Nernst, W. (1898). *Theoretische Chemie vom Standpunkte der Avogadro'schen Regel und der Thermodynamik.* Stuttgart: Ferdinand Enke, tweede oplage.

NICL (1989). *Overzicht Leermiddelen Natuurwetenschappen V.O.* Enschede: NICL.

Ogborn, J. (1974). For the teaching of thermodynamics in school. *Education in Chemistry, 11,* 11 en 16.

Olney, D.J. (1988). Some Analogies for Teaching Rates/Equilibrium. *Journal of Chemical Education, 65,* 696-697.

Ostwald, W. (1902). *Lehrbuch der Allgemeinen Chemie. Zweiten Bandes; zweiter Teil: Verwandtschaftslehre.* Leipzig: W. Engelmann, tweede oplage.

O&W (1979). *Programma's eindexamens dagscholen, avondscholen en dag-avondscholen v.w.o.-h.a.v.o.-m.a.v.o.* Den Haag: Staatsuitgeverij. Publicatie nr. 92 in de serie "Wetten en Bestuursmaatregelen Onderwijs en Wetenschappen", zesde bijgewerkte druk.

O&W (1983). *Programma Scheikunde Eindexamen v.w.o.* Den Haag: Ministerie van Onderwijs en Wetenschappen. Bijlage 1 van de beschikking VO/AV/J 797.795.

O&W (1984). *Leerplan Scheikunde Rijksscholen voor v.w.o.* Den Haag: Ministerie van Onderwijs en Wetenschappen. Bijlage bij circulaire C 840121 VO/AV/RVO 804.359.

O&W (1986). *Programma Scheikunde Eindexamen h.a.v.o.* Den Haag: Ministerie van Onderwijs en Wetenschappen. Bijlage 1 van de beschikking VO/AV/J 849.659.

O&W (1987). *Leerplan Scheikunde Rijksscholen voor h.a.v.o.* Den Haag: Ministerie van Onderwijs en Wetenschappen; verschenen in *Uitleg Extra,* nr. 100, p. 1-19.

Peeters, F.A.H. (1974). Reactiesnelheden en evenwichten. *Faraday, 43,* 91-94.

Pimentel, G.C. (Ed.) (1963). *Chemistry - An experimental science.* San Fransisco, London: W.H. Freeman & Co.

Pfaundler, L. (1867). Beiträge zur Chemischen Statik. *Poggendorfs Annalen der Physik und Chemie, 131,* 55-85.

Popp, T. (1989). Anorganische Naturlandschaften und deren Verbindung mit Schichten- oder Strukturbildung durch Fällungsreaktionen. In: M. Minssen (Red.), *Strukturbildende Prozesse bei chemischen Reaktionen und natürlichen Vorgängen.* Kiel: IPN, 87-153.

Pope, M. & J.K. Gilbert (1983). Personal experience and the Construction of Knowledge in Science. *Science Education, 67,* 193-203.

Posner, G.J., K.A. Strike, P.W. Hewson & W.A. Gertzog (1982). Accommodation of a Scientific Conception: Toward a Theory of Conceptual Change. *Science Education, 66,* 211-227.

Rozier, S. & L. Viennot (1990). Students' reasoning in thermodynamics. *Tijdschrift voor Didactiek der β-wetenschappen, 8,* 3-19.

Sakmyser, D.D. (1974). Comparision of inductive and deductive programmed instruction on chemical equilibrium for high school chemistry students. *Journal of Research in Science Teaching, 11,* 67-77.

Sandell, E.B. (1959). *Colorimetric Determination of Traces of Metals.* New York: Interscience, derde editie.

Sanderson, R.T. (1964). Principles of Chemical Reaction. *Journal of Chemical Education, 41,* 13-22.

Schmidt, F.K. (1980). Die Triebkraft chemischer Reaktionen. Teil 1 & 2. *Der Mathematische und Naturwissenschaftliche Unterricht, 33,* 154-162 en 197-201.

Schmidt, F.K. (1987). Das Prinzip vom kleinsten Zwang: Nicht mehr zeitgemäß oder sogar falsch? *Praxis der Naturwissenschaften-Chemie, 36,* 26-30.

Smith, P.J.W. & T.J.M. van Keulen (1977). Vrije enthalpie en evenwicht. *Faraday, 46,* 89-96.

Smits, A. & J.P. Wibaut (1908). De dynamische opvatting van een omkeerbare chemische reactie. *Chemisch Weekblad, 5,* 625-626 en 771-772.

Snelders, H.A.M. (1973). De massawerkingswet van Guldberg en Waage. *Natuur en Techniek, 28,* 217-220.

Snelders, H.A.M. (1977). Dissociation, Darwinism and Entropy. *Janus, 64,* 51-75.

Sorum, C.H. (1948). Lecture Demonstrations for General Chemistry: Chemical Equilibrium. *Journal of Chemical Education, 25,* 489.

Spears Jr., L.G. & L.G. Spears (1984). Chemical Storage for Solar Energy Using an Old Color Change Demonstration. *Journal of Chemical Education, 61,* 252-254.

Strong, L.E. & H.F. Halliwell (1970). An Alternative to Free Energy for Undergraduate Instruction. *Journal of Chemical Education, 47,* 347-352.

Terpstra, K.J., H.F. van Sprang & A.H. Verdonk (1989). "Hoe WARM het was en hoe ver..." *Tijdschrift voor Didactiek der β-wetenschappen, 7,* 3-26.

Treptow, R.S. (1980). Le Chatelier's Principle. *Journal of Chemical Education, 57,* 417-420.

Umans, A.J.H. (1982). Uitlegsels IV. *Faraday, 51,* 214-215.

Umans, A.J.H. (1983a). Chemische Simulatiespelen II: Chemisch evenwicht. *Faraday, 52,* 14.

Umans, A.J.H. (1983b). Uitlegsels VI: Evenwicht in de discotheek (II). *Faraday, 52,* 80-81.

Verdonk, A.H. (1986). Basisvorming scheikunde, de noodzaak van nader onderzoek. In: A.H. Verdonk & Jong, W.M. de (Red.), *Werkdocumenten Basisvorming in het onderwijs, WB 14, Scheikunde.* 's Gravenhage: W.R.R., 1-60.

Verdonk, A.H. (1989). Elektrochemie. In: *Fysische Chemie I, inleiding in thermodynamica, elektrochemie, reactiekinetiek.* Utrecht: Rijksuniversiteit Utrecht, collegedictaat Faculteit Scheikunde.

Vet, P.E. van der (1989). *Filosofie van de scheikunde.* Leiden: Martinus Nijhoff.

Vogelezang, M.J. (1989). Twee omschrijvingen van reactiesnelheid bij chemisch evenwicht. *NVON-maandblad, 14,* 68-69.

Vogelezang, M.J. (1990). *Een onverdeelbare eenheid.* Utrecht: CDβ pers, dissertatie Vakgroep Chemiedidactiek.

Voorde, H.H. ten (1977). *Verwoorden en Verstaan.* Den Haag: Staatsuitgeverij, dissertatie Universiteit van Amsterdam.

Voorde, H.H. ten (1979). Empirische didaktiek (VI): Van grondniveau naar beschrijvend niveau in scheikunde-onderwijs: de begrippen 'reagens' en 'reagensindividu'. *Faraday, 48,* 221-239.

Voorde, H.H. ten (1987). Die Überbrückung der Kluft des Nicht-verstehenkönnens: Eine Aufgabe des Unterrichts. *Chimica didactica, 13,* 117-148.

Vos, W. de (1974). Entropie en milieu. *Faraday, 43,* 220-225.

Vos, W. de (1981). Onderwijs naar thermodynamika. *Faraday, 50,* 113-115.

Vos, W. de & A.H. Verdonk (1984). 's Rijks wegen naar een leerplan (1 en 2). *NVON-maandblad, 9,* 2, 35-37 en 6/7, 5-8.

Vos, W. de (1985). *Corpusculum Delicti.* Utrecht: Rijksuniversiteit Utrecht, dissertatie Vakgroep Chemiedidactiek.

Vos, W. de & A.H. Verdonk (1985). A New Road to Reactions, part I. *Journal of Chemical Education, 62,* 238-240.

Vos, W. de (1986). Het belang van vakdidactisch onderzoek voor een samenhangend onderwijsbeleid. *Tijdschrift voor Didactiek der β-wetenschappen, 4,* 186-196.

Vos, W. de (1987). *Chemie in Duizend Vragen* (Leerlingentekst en docententoelichting). Utrecht: Rijksuniversiteit Utrecht, Vakgroep Chemiedidactiek, tiende versie.

Vos, W. de & A.H. Verdonk (1990). Een vakstructuur van het schoolvak scheikunde. *Tijdschrift voor Didactiek der β-wetenschappen, 8,* 19-35.

Vos, W. de (1990). Seven Thoughts on Teaching Molecules. In: P.L. Lijnse, P. Licht, W. de Vos & A.J. Waarlo (Eds.), *Relating Macroscopic Phenomena to Microscopic Particles.* Utrecht: CDβ Press.

Wester, F. (1987). *Strategieën voor kwalitatief onderzoek.* Muiderberg: Coutinho.

Wheeler, A.E. & H. Kass (1978). Student Misconceptions in Chemical Equilibrium. *Science Education, 62,* 223-232.

Wierstra, R.F.A. (1990). *Natuurkunde-onderwijs tussen leefwereld en vakstructuur.* Utrecht: CDβ pers, dissertatie Vakgroep Natuurkundedidactiek.

Williamson, A.W. (1850). Theory of Etherification. *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 37,* 3, 350-356.

Williamson, A.W. (1851-1854). Suggestions for the dynamics of chemistry derived from the theory of etherification. *Notices of the Proceedings at the meetings of the Members of the Royal Institution, vol. i,* 90-94.

Wright, P.G. (1965). Chemical equilibrium and the limited character of its relation to chemical kinetics. *Education in Chemistry, 2,* 14-18.

Wubbels, T. (1990). De opleiding voor leraren in de β-vakken. In: P.L. Lijnse & W. De Vos (Red.), *Didactiek in perspectief.* Utrecht: CDβ Pers, 173-193.

Bijlagen

Bijlage A:
Overzicht van de leerlingenteksten (3 versies)

De paragrafen 1 t/m 7 van iedere versie waren gewijd aan reactiesnelheid en katalyse. Over de opzet ten aanzien van deze onderwerpen is gerapporteerd in Van Driel & De Vos (1989a en 1989b).
In het onderstaande duid ik paragrafen en opdrachten aan in bewoordingen die aansluiten bij de beschrijvingen in de hoofdstukken 4 t/m 7. Hier staan dus geen citaten uit de leerlingenteksten. Tevens verwijs ik naar protocollen die betrekking hebben op een specifieke vraag of proef. Tenslotte worden proeven aangeduid met het symbool ¶.

Eerste versie (1986)

§8 Omkeerbaarheid door temperatuurvariatie (§4.3)
¶ Verhitten van robalaat tot 85°C
'Er treedt een reactie op waarbij robalaat ontleedt in blauwbaliet en water'
'Wat zal er met de kleur gebeuren bij afkoelen?'
¶ Afkoelen tot kamertemperatuur *(prot. 4.II)*
¶ Opnieuw verhitten en afkoelen
Opstellen van reactieschema's

§9.1-9.3 Onvolledigheid bij temperatuurvariatie (§5.3)
¶ Verhitten van robalaat tot 55°C *(prot. 5.I)*
'Welke stoffen zijn bij 55°C aanwezig?'
¶ Gelijktijdig afkoelen van 85°C en verhitten vanaf kamertemperatuur; beide tot 55°C
Vragen over relatie kleur-temperatuur-samenstelling

§9.4-9.6 Dynamisch evenwicht n.a.v. temperatuurvariatie (§6.5)
'Leg uit dat in principe beide reacties bij 55°C kunnen verlopen'
'Denken jullie dat één van beide of beide reacties dan ook verlopen?'
(prot. 6.III; prot. 6.IV; prot. 6.V)
Vragen over beide reacties (en hun snelheden) bij andere temperaturen en bij temperatuurveranderingen
Omschrijving van chemisch evenwicht in termen van aanwezigheid van alle betrokken stoffen in constante concentraties
'Aangenomen wordt dat er steeds twee reacties tegelijkertijd verlopen'

§10 Stabiliteit bij temperatuurverandering (§7.4)
Verloop van beide snelheden in grafieken als functie van tijd als gevolg van temperatuurverhoging
'Kunnen beide snelheden weer aan elkaar gelijk worden, en zo ja, hoe?'
¶ Toevoegen van water aan een evenwichtssysteem van robalaat en blauwbaliet bij 55°C

§11 Samenvatting

Tweede versie (1987)

§8-9.1 Omkeerbaarheid door toevoegingen (§4.4)
¶ Toevoegen van water aan een blauwbaliet-oplossing
¶ Toevoegen van 'chloride' aan de rose geworden oplossing
'Wordt kleur nu veroorzaakt door blauwbaliet of een andere blauwe stof?
(prot. 4.III)
¶ Opnieuw water toevoegen aan de blauw geworden oplossing
Reactieschema's voor beide reacties worden meegedeeld
'Is bij deze proeven sprake van een omkeerbare reactie?'
'Is de elektrolyse van water een omkeerbare reactie?'

§9.2 Theoretische onvolledigheid (§5.5)
Tabel-opdracht
'Blijft van alle betrokken stoffen steeds een beetje aanwezig?'
(prot. 5.IV)

§9.3 Dynamisch evenwicht n.a.v. toevoegingen (§6.6)
Omschrijving van chemisch evenwicht in termen van aanwezigheid van alle betrokken stoffen in constante concentraties
'Leg uit dat in evenwicht beide reacties in principe kunnen verlopen'
'Denken jullie dat één van beide of beide reacties dan ook verlopen?'
'Aangenomen wordt dat er steeds twee reacties tegelijkertijd verlopen'

§9.4-9.5 Stabiliteit bij toevoegingen (§7.5)
'Kunnen beide snelheden na een toevoeging weer aan elkaar gelijk worden, en zo ja, hoe?' *(prot. 7.I)*
Verloop van beide snelheden in grafieken als functie van tijd als gevolg van een toevoeging

§10 Omkeerbaarheid door temperatuurvariatie
¶ Verhitten en afkoelen van robalaat-oplossing tussen 85°C en kamertemperatuur
'Zijn bij 40°C en 60°C alle stoffen in constante concentraties aanwezig?'

§11 Enkele andere evenwichten
Fasenevenwicht, slecht oplosbaar zout, ammoniak

§12 Samenvatting

Derde versie (1988)

§8 Problematisering door onvolledigheid (§5.4)
¶ Overmaat bij reactie van natriumhydroxide en fenolftaleïne
¶ Overmaat bij rodanide-proeven *(prot. 5.II)*
'Van beide stoffen een overmaat genomen?'
'Waarom reageren sommige ionen wel met elkaar en andere niet?' *(prot. 5.III)*

§9-10.1 Omkeerbaarheid door toevoegingen (I) (§4.4)
¶ Toevoegen van water aan een blauwbaliet-oplossing
¶ Toevoegen van 'chloride' aan een robalaat-oplossing
¶ Herhaling van toevoegingen
'Ontstaan robalaat en blauwbaliet steeds opnieuw?'
Opdracht met onvolledige reactieschema's
¶ Toevoegen van zoveel water aan blauwbaliet-oplossing dat deze paars kleurt

§10.2-10.3 Theoretische onvolledigheid (§5.5)
Tabel-opdracht
'Blijft van alle betrokken stoffen steeds een beetje aanwezig?'
Corpusculaire interpretatie via twee stellingen (zie §6.7) *(prot. 6.VII en prot. 6.VIII)*

§10.4 Omkeerbaarheid door toevoegingen (II)
¶ Water toevoegen aan een rodanide-oplossing

§11 Dynamisch evenwicht n.a.v. toevoegingen (§6.6)
Omschrijving van chemisch evenwicht in termen van aanwezigheid van alle betrokken stoffen in constante concentraties
'Beide reacties zijn in evenwichtstoestand mogelijk'
'Denken jullie dat deze reacties ook inderdaad zullen plaatsvinden?' *(prot. 6.VI)*
'Aangenomen wordt dat er steeds twee reacties tegelijkertijd plaatsvinden'
'Hoe staan jullie nu tegenover het idee dat sommige ionen wel en andere niet zouden reageren?' (Michiels uitspraak) (zie §6.7)

§12 Enkele andere evenwichten
Fasenevenwicht, slecht oplosbaar zout, ammoniak

§13 Samenvatting

Bijlage B:
Chemisch evenwicht in leerplannen en examenprogramma's

In 1932 werden voor het eerst "minimumeischen" openbaar gemaakt voor het eindexamen H.B.S.-B met 5-jarige cursus[1]. De eisen waren in drie hoofdstukken verdeeld (algemene zaken; anorganische respectievelijk organische scheikunde). In hoofdstuk 1 staat o.a.:

> "OMKEERBARE REACTIES: Principe van van 't Hoff en le Chatelier, wet van Guldberg en Waage. Verschuiving van het evenwicht door verandering van concentratie bij evenwichten in de oplossingen (alleen qualitatief).
>
> DISSOCIATIE EN DISSOCIATIEGRAAD: Geen getalwaarden der dissociatiegraden. Invloed van temperatuur, druk en concentratie op de dissociatiegraden der homogene systemen. (Alleen qualitatief). Voorbeelden: J_2, H_2O, NO, HJ, NH_3, PCl_5, NH_4Cl; dissociatiespanning der normale carbonaten, zonder getalwaarde."

In hoofdstuk 2 worden verbindingen opgesomd. Bij enkele wordt expliciet vermeld dat "evenwichtsbeschouwingen" met betrekking tot de bereiding ervan gegeven moeten kunnen worden (SO_3, NO_2/N_2O_4, NH_3, CaO). In hoofdstuk 3 komt een soortgelijke opmerking voor bij "esterificatie".

In 1936 werd een nieuw programma van kracht[2]. Hierin waren de onderwerpen omkeerbare reacties en dissociatie en dissociatiegraad vervangen door chemisch evenwicht:

> "CHEMISCH EVENWICHT: Wet van Guldberg en Waage. Principe van Van 't Hoff Le Chatelier. Richting, waarin het evenwicht verschuift door verandering van de concentraties, de gasdruk en de temperatuur."

Toepassingen van chemisch evenwicht worden in hoofdstuk 1 genoemd bij de "ionentheorie" (zwakke zuren en zwakke basen, oplosbaarheidsprodukt) en bij "vraagstukken" (berekeningen van ionisatie- en dissociatiegraden). Bij een aantal chemische verbindingen uit hoofdstuk 2 (J_2, HJ, SO_3, NO_2/N_2O_4, NH_3, CO_2, CaO, e.a.) wordt over de bereiding vermeld "met evenwichtsbeschouwingen". In hoofdstuk 3 komt een dergelijke vermelding ook voor bij de vorming en de hydrolyse van esters. In een nieuw toegevoegd hoofdstuk 4 ("Kennis van enkele stoffen en werkwijzen van maatschappelijk belang") worden de fabricage van ammoniak en zwavelzuur vermeld, waarbij "evenwichtsbeschouwingen" eveneens zijn voorgeschreven.

In 1949 en in 1953 werden enkele wijzigingen op dit programma ingevoerd, die echter nauwelijks consequenties hadden voor chemisch evenwicht. Slechts doordat het programma bij beide wijzigingen werd bekort (zo werd hoofdstuk 4 in 1949 weer geschrapt), vielen enkele chemische verbindingen af waarbij evenwichtsbeschouwingen gegeven moesten worden. In 1953 werd aan

---

[1]Gepubliceerd in *Faraday, 2* (1932), p.104-113.
[2]Gepubliceerd in *Faraday, 5* (1935), p.130-140.

de aanduiding 'evenwichtsbeschouwingen' bij CO_2 en CaO toegevoegd: "alleen op grond van het beginsel van Van 't Hoff en Le Chatelier"[3].

In 1966 ging een nieuw examenprogramma in, dat dezelfde hoofdstukindeling kende als in 1932, 1949 en 1953[4]. De omschrijving van chemisch evenwicht in hoofdstuk 1 is hierin gecombineerd met die van reactiesnelheid en uitvoeriger dan in vorige programma's. Bovendien worden de voornaamste toepassingen van evenwichten hierbij ook genoemd:

> *"Reactie-snelheid en chemisch evenwicht.*
> De invloed van de aard, de toestand en de concentraties van de reagerende stoffen, van licht, van de temperatuur en van de aanwezigheid van katalysatoren op de reactiesnelheid. Wet van Guldberg en Waage. Kinetische afleiding van de formule voor de reactiesnelheid van een homogene reactie van het type A+B; S=k(A)(B).
> Het ontstaan van de evenwichtstoestand. Evenwichtsvoorwaarden in homogene systemen. Evenwichtsconstante (geen afleiding). Invloed van concentratie-, druk- en temperatuursverandering op de ligging van het evenwicht.
> Aflopende reacties. De omstandigheden waardoor een omkeerbare reactie aflopend wordt: o.a. vorming van slecht oplosbare vaste of gasvormige stoffen in een oplossing, wegnemen van gevormde stoffen door chemische agentia; toepassen van extreme druk of temperatuur.
> Dissociatie-evenwicht, verband tussen dissociatiegraad en dichtheid; verband tussen dissociatiegraad en druk.
> Voorbeelden van gasdissociaties: SO_3, NO, N_2O_4, NH_3, HI, H_2O.
> Voorbeelden van evenwichten in oplossing; ionenevenwicht en estervorming.
> Voorbeelden van heterogene evenwichten:
> a. CO_2 + C, $CaCO_3$ (alleen kwalitatief);
> b. weinig oplosbare elektrolyten met hun verzadigde oplossingen (oplosbaarheidsprodukt)."

Daarnaast wordt de term 'evenwichtsbeschouwingen' in de hoofdstukken 2 en 3 genoemd bij een reeks chemische verbindingen (zie hiervoor).

Met de invoering van de mammoetwet publiceert het Ministerie van O&W naast examenprogramma's ook zogenoemde Leerplannen voor rijksscholen. In 1970 verschenen van beide documenten de eerste versies[5]. De omschrijvingen van chemisch evenwicht in de leerplannen en examenprogramma's vielen hierbij samen. In het leerplan voor HAVO wordt chemisch evenwicht genoemd bij het vierde en vijfde leerjaar:

---

[3]Het programma dat in 1953 van kracht werd is afgedrukt in Kruytbosch & Richter (1962), p. XLI-LIV.
[4]Zie *Faraday, 33* (1964), p.148-161.
[5]Deze zijn opgenomen in O&W (1979), p.80-105.

"*Chemisch evenwicht* (alleen kwalitatief): het ontstaan van de evenwichtstoestand. Principe van Van 't Hoff-Le Chatelier. Invloed van concentratie-, druk-, en temperatuurverandering op de ligging van het evenwicht. Aflopende reacties. Vastvriezen van het evenwicht. Toepassing op het contactproces; de bereiding van NH_3 en HNO_3.
Homogene en heterogene evenwichten. Deze laatste beperken tot $CaCO_3$."

Daarnaast komen verwijzingen naar chemisch evenwicht voor bij "esters" en bij "ionenleer". Bij dit laatste onderwerp worden de aanduidingen K_{zuur} en K_{base} gebruikt, waaruit ik afleid dat ook een kwantitatieve behandeling van chemisch evenwicht voorgeschreven was.

Het leerplan voor het vierde en vijfde leerjaar van het VWO is over chemisch evenwicht bijna letterlijk hetzelfde als dat voor 4- en 5-HAVO. Voor het zesde leerjaar is toegevoegd:

"*Evenwichten*: verband tussen evenwichtsconstante en concentraties. Protolysegraad. Vraagstukken hierover."

Op basis van het werk van de Commissie Modernisering Leerplan Scheikunde (CMLS) zijn in de jaren '80 nieuwe examenprogramma's en leerplannen ingevoerd. In het Leerplan Scheikunde Rijksscholen voor VWO worden chemische onderwerpen genoemd, waarbij "suggesties" (voor proeven en ander onderwijsmateriaal) worden gedaan (O&W, 1984) Tevens wordt een aantal lesuren aanbevolen. In het leerplan voor 4-VWO is het vierde onderwerp:

"**Reactiesnelheid en (semi-kwantitatief) chemisch evenwicht**
(15 lesuren)

a. Reactiesnelheid
[...]

b. Omkeerbare reacties
Door veranderingen van concentratie(s) van reactanten, van volume of van temperatuur kan de richting van een reactie worden beïnvloed.
(Suggesties: ICl met Cl_2 en NO_2/N_2O_4)

c. Chemische evenwichten
Statische en dynamische evenwichten.
(Suggesties: gebruik tracer; simulatieproef; I_2 in benzine en water)
Evenwichten tussen fasen en in verzadigde oplossingen.
Het evenwicht $N_2 + 3H_2 \rightleftarrows 2NH_3$.
Ammoniakfabricage.
Effect van onttrekking van een reactant op de evenwichtsconcentraties.
(Geen evenwichtsconstante)."

In het leerplan voor 5- en 6-VWO is chemisch evenwicht als tweede onderwerp opgenomen (6 lesuren):

"Het model van twee tegengesteld gerichte reacties, waarbij bij de ene de enthalpie afneemt, en bij de andere de entropie toeneemt. Concentratiebreuk, evenwichtsconstante. Alleen evenwicht als de waarde van de concentratiebreuk gelijk is aan de evenwichtsconstante (bij dezelfde *T*). Invloed van katalysator, verandering van temperatuur of verandering van volume op de evenwichtsconcentraties.
Homogene en heterogene evenwichten. Oplosbaarheidsprodukt. Berekeningen."

Verder wordt naar chemisch evenwicht verwezen bij "zuren en basen" (o.a. bij bufferberekeningen) en bij "industriële chemie" (via factoren die op industriële processen van invloed zijn; met name wordt de fabricage van ammoniak en zwavelzuur genoemd).

In het Programma Scheikunde Eindexamen VWO dat met ingang van 1987/88 van kracht is geworden, komen 10 rubrieken voor (O&W, 1983). In de derde zijn "Energie, Entropie, Evenwichten" ondergebracht. Hieruit citeer ik:

"De kandidaat moet [...]
3. a. weten dat een chemisch evenwicht kan worden opgevat als een dynamisch evenwicht tussen twee tegengesteld gerichte reacties.
b. met behulp van de evenwichtsvoorwaarde (waarde van de concentratiebreuk in de evenwichtstoestand=*K*) berekeningen kunnen uitvoeren voor een homogeen of heterogeen evenwicht, bijv. het berekenen van een nieuwe concentratie, van *K*, van het percentage omzetting.
c. kunnen beredeneren hoe bij verandering van temperatuur of volume en bij het toevoegen van een katalysator de evenwichtsconcentraties veranderen."

In verband met chemisch evenwicht is verder van belang dat ook in dit programma de fabricage van ammoniak en zwavelzuur genoemd worden bij "industriële chemie" en dat berekeningen met de evenwichtsconstanten van zwakke zuren en zwakke basen voorgeschreven zijn bij "zuren en basen".

Het leerplan voor 4- en 5-HAVO is wat chemisch evenwicht betreft vrijwel identiek aan dat van 4-VWO (O&W, 1987). Er zijn enkele noties over kwantitatief chemisch evenwicht toegevoegd, waardoor het aantal aanbevolen lesuren 18 bedraagt. Het gaat om:

"[...] Concentratiebreuk. Evenwichtsconstante, *K*.
Alleen evenwicht als de waarde van de concentratiebreuk gelijk is aan de evenwichtsconstante (bij dezelfde T).
Vaardigheden: Nagaan of bij gegeven concentratie en gegeven *K* een systeem in evenwicht is. Berekenen van *K* uit de evenwichtsconcentraties."

Ook in dit leerplan komen zwakke zuren, zwakke basen en buffers voor. Kwantitatieve beschouwingen worden in dit kader niet expliciet voorgeschreven. Bij de industriële chemie worden o.a. ammoniak en zwavelzuur genoemd.

Het bij dit leerplan horende examenprogramma (dat ingegaan is in het schooljaar 1988/89) telt 8 rubrieken (O&W, 1986). Chemisch evenwicht vormt hier één rubriek met energie en reactiesnelheid. Ik citeer de tekst onder punt 3:

"De kandidaat moet [...]

3. a. weten dat een chemisch evenwicht kan worden opgevat als een dynamisch evenwicht tussen twee tegengesteld gerichte reacties.
   b. weten dat in een evenwichtssysteem (met of zonder vaste stoffen) de evenwichtsvoorwaarde geldt: de waarde van de concentratie-breuk=K, de evenwichtsconstante bij de betrokken temperatuur.
   c. bij gegeven K en concentraties kunnen afleiden of het systeem in evenwicht is, K uit gegeven evenwichtsconcentraties kunnen berekenen.
   d. weten dat een evenwicht kan aflopen door onttrekking van een reactant."

Ten aanzien van de onderwerpen industriële chemie en zuren en basen stemt de tekst van het examenprogramma overeen met die van het leerplan voor 4- en 5-HAVO, voor zover het om relaties met chemisch evenwicht gaat.

Bijlage C:
Codering van geraadpleegde leergangen

In het onderstaande worden de codes verklaard die voor leergangen gebruikt zijn. Van iedere leergang worden de delen genoemd waarnaar in de tekst verwezen is.

B S.C. Bokhorst (i.s.m. W. de Lange). *Leerboek der Scheikunde ten dienste van Hogere Burgerscholen, Gymnasia en Lycea.* Groningen, Batavia: J.B. Wolters.
Deel IB: Algemene en theoretische scheikunde (bestemd voor 4- en 5-H.B.S.-B en 5- en 6-Gymnasium; 1946; 10de druk).

C J.W. Smilde, G.M. van Hoeve-Brouwer, L.O.F. Pieren, H. Wessels, K. Klosse, H. van Dieten (i.s.m. J.G. Hondebrink). *Chemie.* Groningen: Wolters-Noordhoff.
Delen 3vwo/havo (1983; 2de druk); 4vwo (1984; 2de druk); 5/6vwo, 1-8 (1985; 2de druk).

F G. Faasse. *Leer- en Werkboek voor het Scheikunde Onderwijs op Middelbare Scholen.* Amsterdam, Djakarta: W. Versluys N.V.
Deel II: Bespreking van de elementen en hun eenvoudige verbindingen (1952; 1ste druk).

F&H A. La Fleur & J.H. van der Horst. *Scheikunde voor het Middelbaar en Voorbereidend Hoger Onderwijs.* Zwolle: Tjeenk Willink.
Deel IIB: Algemeene en anorganische scheikunde (1939; 1ste druk).

F&J R. Feis & A.I. Jansen. *Scheikunde voor V.W.O.* Culemborg: Stam/Robijns.
Deel 2 (voor 4-VWO; 1975; 4de druk).

G& J. Groen, H. Hamann, J.W. Schuijl (i.s.m. R.A.W. Docters van Leeuwen, J. Bouma). *Chemie voor voortgezet onderwijs.* Zeist: NIB.
Deel 2-vwo (voor 4-VWO; 1971; 1ste druk).

id. J. Groen, H. Hamann, J.W. Schuijl (i.s.m. A.P. van Antwerpen, B. Arentsen, J. Bouma, R. van 't Land, A.B.M. Termaat). *Scheikunde voor voortgezet onderwijs.* Zeist: NIB.
Delen 1 (voor 3-HAVO/VWO; 1984; 1ste druk); 2v (voor 4-VWO; 1985; 1ste druk).

H H. Hemmes. *Leerboek der Anorganische Scheikunde.* Leiden: E.J. Brill.
Uitgave A (1921; 5de druk).

K& A.J.G. Kaptein, J. Koning, J. de Miranda, J.G. Vogel. *Scheikunde-werkboek.* Groningen, Djakarta: J.B. Wolters.
Deel 1 (1954; 2de druk).

K&G H.P. van Keulen & L.F.J. van Gastel (i.s.m. R.H. Smit). *Chemie in theorie en praktijk*. 's Gravenhage: Nijgh & Van Ditmar Educatief.
Delen 1v/h (voor 3-HAVO/VWO; 1982; 1ste druk); 2h (voor 4-HAVO; 1983; 1ste druk); 2v (voor 4-VWO; 1983; 1ste druk); 3v (voor 5-VWO; 1984; 1ste druk).

K&M I. Krauss-Poppema & A.J. Mast. *Exact Scheikunde*. Amsterdam: Meulenhoff Educatief.
Deel 1 (voor 3-MAVO/HAVO/VWO; 1984; 1ste druk).

M&B G.J. van Meurs & H.P. Baudet. *Scheikunde B*. 's Gravenhage, Rotterdam: Nijgh & Van Ditmar.
Deel: Anorganische scheikunde voor de hoogste klassen van de H.B.S-B en de β-afdeling van het Gymnasium (1960; 11de druk).

P S. Postma. *Scheikunde voor Middelbaar en Voorbereidend Hoger Onderwijs*. Zutphen: W.J. Thieme & Cie.
Deel 1 (1938; 1ste druk).

R&F J. Reiding & P.W. Franken (i.s.m. M.A.W. Kabel-van den Brand). *Chemie Overal*. Culemborg: Educaboek.
Delen 3HV (voor 3-HAVO/VWO; 1984; 1ste druk); 4V (voor 4-VWO; 1985; 1ste druk); 5V (voor 5-VWO; 1986; 1ste druk).

Bijlage D:
Toelichting bij protocollen

Bij de weergave van protocollen heb ik de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Uitspraken worden in chronologische volgorde genummerd.
- Leerlingen worden aangeduid met fictieve namen. Voor jongens zijn jongensnamen en voor meisjes meisjesnamen gekozen.
  Docenten worden aangeduid met hoofdletters. Hierbij worden mannelijke en vrouwelijke docenten niet onderscheiden. Dit is gedaan uit het oogpunt van anonimiteit.
  Sommige leerlingen en docenten treden in meerdere protocollen op. In zulke gevallen heb ik steeds dezelfde naam respectievelijk dezelfde hoofdletter gebruikt. Mijn eigen bijdragen in protocollen zijn herkenbaar aan mijn initialen (J.v.D.). In protocol 6.IX komen enkele uitspraken van Wobbe de Vos (W.d.V.) voor.
- Uitspraken zijn steeds zo letterlijk mogelijk weergegeven. Leestekens, hoofdletters en cursiveringen zijn zoveel mogelijk in overeenstemming met de gebruikte intonatie gehanteerd. Getallen zijn in enkele gevallen met cijfers weergegeven (bijvoorbeeld '1500' in protocol 4.I, waar 'vijftienhonderd' is gezegd).
  Commentaar ter verduidelijking en opmerkingen over intonatie zijn cursief en tussen rechthoekige haken opgenomen (bijvoorbeeld *[stilte]*). In enkele gevallen heb ik een uitspraak aangepast, bijvoorbeeld indien een reële naam werd genoemd. In zo'n geval staat de veranderde tekst tussen rechthoekige haken: [leo].
- Overige toelichting:
  ... heeft betrekking op een korte onderbreking in een uitspraak;
  (...) betekent dat een fragment is overgeslagen. Soms betreft dit slechts enkele woorden. In andere gevallen heb ik één of meerdere uitspraken weggelaten, indien ik deze voor de interpretatie van het protocol van ondergeschikt belang achtte.

Bijlage E:
Enkele voorbeelden van toetsopgaven

De volgende opgaven zijn als "suggesties voor proefwerkopgaven" ter beschikking gesteld aan de docenten die met de tweede en/of de derde versie van de leerlingentekst werkten.

1) Bij de reactie tussen azijnzuur (CH_3COOH) en ethanol (C_2H_5OH) ontstaan water en een stof die ethylacetaat wordt genoemd. De formule van deze stof is $C_4H_8O_2$.

a. Geef deze reactie weer m.b.v. een vergelijking.

Al in 1860 onderzochten de Franse chemici Berthelot en Saint-Gilles deze reactie. Ze mengden een overmaat ethanol met azijnzuur, zodat de azijnzuurmolariteit in het mengsel 3,30 $mol.l^{-1}$ was.
Ze lieten dit mengsel wekenlang staan bij kamertemperatuur. Het volume bleef nagenoeg gelijk. Af en toe bepaalden ze de azijnzuurmolariteit in het mengsel.
Ze kregen de volgende resultaten:

tijd (dagen)	0	1	3	4	5	10	15	22
molariteit azijnzuur ($mol.l^{-1}$)	3,30	2,50	1,90	1,75	1,65	1,55	1,50	1,50

b. Verklaar dat de azijnzuurmolariteit afneemt.
c. Maak een grafiek van het verloop van de azijnzuurmolariteit met de tijd (in dagen).
d. Hoeveel mol ethylacetaat kan uit 1 mol azijnzuur gevormd worden?
e. Bereken de ethylacetaatmolariteit na 3 dagen. (Neem aan dat het totale volume van het mengsel in al die dagen niet verandert).
f. Bereken de ethylacetaatmolariteit ook na 22 dagen.
g. Teken (in je grafiek van c.) een lijn, waarmee je het verloop van de ethylacetaatmolariteit met de tijd (in dagen) aangeeft.
h. Leg uit of er na 22 dagen sprake kan zijn van een chemisch evenwicht.

2) De reactie van jodide met persulfaat die jullie in de eerste vijf paragrafen intensief bestudeerd hebben [zie bijlage A], blijkt *ook* een omkeerbare reactie te zijn:

$$2I^- (aq) + S_2O_8^{2-} (aq) \rightleftarrows I_2 (aq) + 2\ SO_4^{2-} (aq)$$

Bij een proef worden oplossingen van kaliumjodide en kaliumpersulfaat gemengd. Hierbij worden 4,0 mmol jodide en 2,0 mmol persulfaat bij elkaar gebracht.
Op tijdstip t_1 heeft zich een evenwichtstoestand ingesteld.

a. Via welke proeven zou je er echter kunnen komen dat niet alle jodide en persulfaat "op" is?
b. Wat kan je zeggen over het aantal mmol persulfaationen op het tijdstip t_1? Antwoord zo precies mogelijk!

Op tijdstip t_2 wordt 1,0 mmol vast jood toegevoegd aan het evenwichtsmengsel. Het volume verandert hierdoor nagenoeg niet. Op tijdstip t_3 is opnieuw een toestand van chemisch evenwicht ontstaan.

c. Als je de evenwichtstoestand op t_3 vergelijkt met die op t_1, is de jodidemolariteit op t_3 dan groter, even groot of kleiner dan op t_1? Licht je antwoord toe.
d. Dezelfde vraag voor de sulfaatmolariteit.
e. Dezelfde vraag voor de persulfaatmolariteit.

Summary

Introduction

Many secondary school students show a lack of involvement in chemistry education. Both their understanding of and their enthusiasm for chemistry are problematic. In the thesis this problem is related to the common approach to teaching. In this approach, chemical knowledge is supposed to be 'transferred' from teacher and school-book to student. However, this view conflicts with the idea that (chemical) knowledge is a human construction and that learning is a process of constructing and revising concepts. This constructivist point of view, in which learning is seen as 'conceptual development', not only has implications for teaching and curriculum design but also for educational research.

Teaching and curriculum design should be aimed at promoting development of chemical concepts by organizing situations in which students are encouraged to discuss their concepts. Phenomena which students cannot explain in terms of their present concepts are essential in this approach. Therefore, curriculum design involves selecting suitable laboratory experiments as well as formulating questions and texts for students and also instructions for teachers. A teacher should lead a discussion of students, rather then trying to tell them 'the scientific truth' straightaway. Apart from demanding answers to questions, a teacher should encourage students to ask questions themselves. Such an approach is expected to improve involvement of students in chemistry.

Teaching a specific topic requires an educational design in which suitable experiments and questions are embedded. Such a design is not easy to work out. Educational research is needed in order to obtain a description of students' existing concepts relevant to this specific topic and an assessment of developments of these concepts that seem necessary. This requires a content analysis of chemical concepts as well as research into the way students and teachers observe and discuss phenomena and handle their concepts in the classroom. Therefore the analysis of group discussions taking place during chemistry lessons is essential in this research.

In this thesis 'chemical equilibrium' is the central topic. This choice was inspired by a previous research of De Vos. He has studied the introduction of 'chemical reaction', 'substance' and 'element' in relation to the development of particulate concepts in an elementary chemistry course[1]. The introduction of the concept of 'chemical equilibrium' in a later stage of education requires a revision of some of the concepts taught before.

Research design

The research reported on in this thesis was organised as follows: first some concepts related to chemical equilibrium were analysed in chemical terms. School-books dealing with chemical equilibrium were also studied. A first version of an experimental course on chemical equilibrium based on this

[1]See for example the series "A New Road to Reactions" by W. de Vos and A.H. Verdonk (1985-1987); *J. of Chem. Ed.*, *62*, p.238-240 and p.648-650; *63*, p.972-972; *64*, p.692-694 and 1010-1013.

analysis was designed. This version was used in chemistry lessons in two Dutch schools. During these lessons teachers and students, the latter working in small groups (of 3 or 4), were observed. Audio-tape recordings of discussions were made and written out afterwards. The transcripts obtained constituted the main body of research material. Reports written by groups of students were collected as additional material.

Analyses of the material inspired a study of the historical development of the concept of chemical equilibrium, both in science and in education. The combination of these studies and the analysis of group discussions led to a better understanding of learning and teaching problems and of the concept revisions required. As a result, a second, improved version of the experimental course could be designed. Teachers of 11 schools using this course in their classes could now be supported by means of an in-service teacher training course based on research results available at that stage. The process of observing students and teachers, analysing their discussions, etc. was repeated while the second version was used in schools. This time audio-tape recordings of teacher training sessions were also analysed.

Combining the results of these analyses resulted in new versions of both the experimental course and the accompanying teacher training course. The third version of the course was used in 25 schools, while about 40 teachers were involved in teacher training. Both course and training were again studied in the way mentioned above.

Development of a qualitative concept of chemical equilibrium

In elementary chemistry courses in the Netherlands for students aged 14-15 chemical reactions are considered as processes involving the conversion of substances into other substances. Initially, such conversions are always presented as proceeding to completion and as taking place in one direction only. In addition chemical reactions are initially always accompanied by observable effects, such as colour changes, evolution of gases, energy effects, etc. At the particulate level a chemical reaction is considered to be a conversion of molecules of the original species into molecules of new species. Molecules of the same species are regarded as identical, that is: they do not differ from each other in any way except position and motion.

In the second year of chemistry education a qualitative concept of chemical equilibrium is introduced. In school-books this concept is related to the reversibility of chemical reactions: an experiment shows that a certain reaction can take place in two opposite directions one after the other. From this the conclusion is drawn that both reactions take place simultaneously and permanently. The expression 'dynamic equilibrium' is introduced to refer to situations in which both reactions are assumed to take place at the same rate. Although this dynamic view cannot be based on observations, school-books try to 'prove' it *e.g.* by means of simulations and analogies[2]. In this way the dynamic view of chemical equilibrium is presented as a fact, *unrelated* to the

[2]Simulations and analogies can also be found in (amongst others) Sorum (1948), *J. of Chem. Ed., 25*, p.489; Battino (1975), *J. of Chem. Ed., 52*, p.55 and Olney (1988), *J. of Chem. Ed., 65*, p.696-697.

reversibility and the incompleteness of chemical conversions leading to equilibrium. Besides, the incompleteness usually remains implicit.

This approach proved to be popular among teachers, who saw neither a reason nor a possibility to teach dynamic equilibrium otherwise. However, the assumption of a dynamic equilbrium could serve in an explanation of the reversibility and the incompleteness of chemical conversions. *One of the research aims was to explore possibilities for dynamic equilibrium to function as an explanatory model for both students and teachers.* In this context the aspects 'incompleteness' and 'reversibility' were both introduced in the experimental course by means of laboratory experiments performed by students. This approach stimulated students to ask questions concerning both aspects. Many students refused to accept the incompleteness of a chemical conversion, although this followed as a conclusion from observations. They reasoned that reactants cannot be converted partially. Sometimes they supported their view with particulate arguments: why do some molecules react, while others (of the same species) don't? Similar questions were raised by scientists during the scientific development of the chemical equilibrium concept in the second half of the nineteenth century. Nevertheless they are only very rarely included in school-books.

The reversibility of chemical conversions was introduced via experiments in which students added a reactant A to a coloured solution of reactant B. This resulted in a colour change, connected with the appearance of a solute C. Next, addition of D to the reaction mixture led to a reappearance of the colour indicating the presence of B. Most students, though accepting the formation of B, protested against the possibility of A being formed along with B in the latter experiment. They argued, referring to the first experiment, that in that case A and B would react immediately which was not in agreement with their observations. In this situation some students supposed that both colour changes should take place alternately. In the thesis the expression 'flashing light reaction' is used to describe this view.

The questions and reasonings of students mentioned above were connected with the introduction of dynamic equilibrium. This model can now offer an explanation for the incompleteness of a chemical conversion: from the assumption that two opposite reactions take place simultaneously, the students can deduce that none of the substances involved will disappear completely. In addition, on the basis of this assumption they can resolve the anomaly that a perceptible reaction does not take place although all conditions necessary for this reaction are satisfied. By assuming that two opposite reactions take place at the same rate, students can explain the absence of changes at the macroscopic level.

The present research showed that most students accepted the dynamic model as a solution for the problems concerning reversibility and incompleteness. Students usually reasoned that both reactions must take place, because the conditions for these reactions were fulfilled. They used both particulate and non-particulate arguments in order to draw this conclusion[3]. In the first case the idea that molecules of the same species are identical became problematic. Students

[3]Examples of relevant argumentations are given in Van Driel et al. (1990), in: Lijnse et al. (Eds.), *Relating Macroscopic Phenomena to Microscopic Particles*, Utrecht: CDβ Press.

sometimes stated that the total number of molecules remained constant, while the molecules themselves kept changing again and again. Others explicitly mentioned that molecules of the same species can be involved in different transformations at the same time. In this way students introduced statistical notions in their particulate concepts.

Evidence was found that the approach described above appealed to teachers. It offered them possibilities to promote development of their students' concepts. Some of them not only identified a flashing light reaction concept, but they also proved able to discuss this concept with their students in a productive way, that is, without trying to convince them of the 'uncorrectness' of their view, they could make students see its shortcomings themselves. At the same time teachers became aware of new and alternative views on chemical concepts they had studied themselves long ago. In this respect they also 'learned chemistry' through this approach.

Quantitative aspects of chemical equilibrium

Quantitative aspects of chemical equilibrium are included later in the curriculum. These aspects were not studied by means of an experimental course in this research project. Instead, only analyses of old and recent school-books, both Dutch and foreign, were performed. These showed that a quantitative treatment of chemical equilibrium on a kinetic basis has been common for a long time in Western countries. In this approach the so-called 'Law of Mass Action' (in which a certain mathematical relation between concentrations of reactants and products equals an equilibrium constant, K) was derived on the basis of reaction rate equations. Within this approach the dynamic nature of chemical equilibrium formed an indispensable basic assumption. This approach has been frequently criticised from a scientific point of view over a long period of time[4]. In most recent school-books it is no longer used. In this thesis it is argued that a kinetic treatment of the Law of Mass Action is undesirable, since it can have a negative effect on the understanding of reaction kinetics in a later stage of education.

Since the 1960's attempts have been made in school-books to introduce chemical equilibrium on the basis of thermodynamics. In most books for secondary schools such a treatment remains at a qualitative level, describing chemical equilibrium either as a state of maximum entropy or as a situation in which a tendency for 'higher entropy' is being counterbalanced by a tendency for 'lower enthalpy'. These descriptions offer an alternative for the dynamic view of equilibrium. Most school-books do not derive the Law of Mass Action on the basis of thermodynamics. In some books, however, an attempt is made. These attempts are considered undesirable, since they are accompanied by 'simplifications' that make the treatment incomprehensible for those who are not already familiar with thermodynamics. Students can only accept these treatments on the authority of their school-book or teacher.

---

[4]See for example Frost (1941), *J. of Chem. Ed., 18,* p.272-274; Mysels (1956), *J. of Chem. Ed., 33,* p.178-179; Wright (1965), *Ed. in Chem., 2,* 14-18 and Harris (1982), *J. of Chem. Ed., 59,* p.1034-1036.

In recent school-books a mathematical expression of the Law of Mass Action is usually being postulated without a firm basis having been offered. Next, this expression is applied in numerous quantitative problems (on acids and bases, electrochemistry, etc.). Thus students are asked to solve problems with an expression they cannot understand. Chemical equilibrium therefore has become a 'difficult topic' for them. It is important for their school careers, but at the same time it has very little relevance outside the school context. To improve this situation it is proposed in this thesis to connect chemical equilibrium with the production of chemicals in a technological context. In this context the incompleteness of a chemical reaction is a disadvantage, that is considered simultaneously with aspects concerning the rate of chemical conversions. In education students could be asked to design and test an experimental reaction procedure in which as much product is being formed in as little time as possible. This approach may contribute to a situation in which chemical equilibrium becomes a topic that is worth being learned by students as well as being taught by teachers.

Curriculum Vitae

Jan van Driel werd geboren op 14 augustus 1959 in Groningen. Van zijn levensloop is in verband met dit proefschrift het volgende van belang. Hij bezocht van 1971 tot 1975 het Twickel College te Hengelo (O), waarna hij in 1977 het diploma VWO aan het Christelijk Lyceum te Gouda behaalde. In datzelfde jaar begon hij met de studie scheikunde aan de Rijksuniversiteit te Utrecht. In 1980 behaalde hij het kandidaatsexamen S3.

Hierna wijdde hij zich achtereenvolgens aan het behalen van de eerstegraads lesbevoegdheid scheikunde en aan een zeer onbevredigend verlopen bijvak anorganische chemie. Hij hervond zijn plezier in en belangstelling voor de scheikunde in de laatste twee jaar van zijn studie tijdens een keuzevak chemiedidactiek en een bijvak analytische chemie. In deze periode assisteerde hij bovendien op het practicum Meten & Maken 1 voor eerstejaars scheikundestudenten. In augustus 1984 behaalde hij het doctoraalexamen (cum laude).

In dezelfde maand trad hij in dienst als scheikundedocent aan het St. Ignatius College te Purmerend. Ondanks de in §1.1 beschreven problemen heeft hij hier tot 1987 met veel plezier gewerkt. Van 1 april 1985 tot 1 april 1990 was hij werkzaam bij de vakgroep Chemiedidactiek van de Rijksuniversiteit Utrecht. In die periode werd het onderzoek verricht waarvan in dit proefschrift verslag wordt gedaan. Naast dit onderzoek verzorgde hij enkele onderwijstaken. Met name was hij enkele jaren betrokken bij het studie-onderdeel 'Fysische Chemie 1' voor eerstejaars scheikundestudenten. Ook maakte hij enige tijd deel uit van de Introductiecommissie van de faculteit Scheikunde.

Vanaf 1 juli 1990 is hij als docent didactische trainingen verbonden aan de sectie Didactiek en Onderwijsontwikkeling van de Technische Universiteit te Delft.