

HOOFDSTUK I. HET ONDERZOEKEN VAN EEN VERANDEREND SYSTEEM

Techniek en wetenschap

De mens heeft twee redenen om de natuur te bestuderen: de noodzaak om in zijn levensbehoeften te voorzien en zijn ingeschapen nieuwsgierigheid. In het vroegste stadium van zijn bestaan was de mens volkomen afhankelijk van zijn omgeving, en dat in elke tijd van het jaar. Door zich een tweede huid te verwerven, zijn kleding en woning, en een tweede hart, het vuur, verminderde hij zijn afhankelijkheid. Nog beter werd het, toen hij leerde dieren te houden, gewassen te veredelen, gesteenten en ertsen om te vormen tot bruikbaar materiaal. Langzamerhand had hij minder tijd nodig voor zijn eerste levensbehoeften; vooral specialisatie droeg daartoe belangrijk bij. Nu won de tweede beweegreden om de natuur te bestuderen aan betekenis: onderzoek om het weten alleen. Toch blijft altijd een wisselwerking tussen techniek en wetenschap bestaan. Inzichten verkregen uit zuiver wetenschappelijk onderzoek leiden vaak tot nieuwe toepassingen, terwijl "technische verbeteringen" niet zelden dieper inzicht als resultaat hebben.

De verwondering

Je kunt naar aanleiding van proeven, bijvoorbeeld over koper of nikkel met salpeterzuur, op verschillende manieren reageren: alleen maar genieten van wat er te zien is, of je verwonderd afvragen wat er precies gebeurt en waarom. Deze laatste mogelijkheid is typisch voor de mens. Het is dan ook verwondering of juist wijsgerige verwondering geweest die de mensheid in staat heeft gesteld zich vanaf het primitieve stadium verder te ontwikkelen. Een mooi voorbeeld van deze verwondering werd geleverd door een leerling van een middelbare school in Hannover, Paul Georg Tegtmeier. Hij maakte kennis met een germaanse heldensage, die gaat over de strijd tussen Wieland en Amilas, ongeveer tweeduizend jaar geleden. De laatste daagde Wieland uit een zwaard te smeden, waarmee hij het beroemde harnas van Amilas zou kunnen

doorklieven. Als het niet zou lukken, zou Wieland worden gedood.

Wieland smeedde toen een abnormaal groot zwaard, vijlde het tot zeer fijn ijzervijsel, mengde dit vijsel met meel en melk, en gaf dat aan uitgehongerde vogels te eten. Daarna won hij het ijzer weer terug door de ontlasting van de vogels te verhitten en smeedde een tweede, kleiner zwaard. Ook dit vijlde hij fijn en na de derde bewerking verkreeg hij een derde zwaard, dat nog kleiner was. Dit zwaard noemde hij Mimung en met Mimung doorkliefde Wieland met één slag het voortreffelijke harnas, terwijl het door Amilas werd gedragen.

Misschien ben je, net als de meeste mensen, geneigd je schouders op te halen over dit verhaal en over te gaan tot de orde van de dag. Maar Paul verbaasde zich over de vreemde handelingen van Wieland en ging er vanuit, dat in zo'n sage een gebeurtenis, hoe verminkt ook, moest zijn overgeleverd. Daarom bouwde hij zelf een kolenbrandersoven naar het voorbeeld van ongeveer 2000 jaar geleden, dat bij Salzgitter was opgegraven. In deze oven probeerde hij uit ijzererts ijzer te winnen. De kwaliteit was erbarmelijk, vooral door de aanwezigheid van veel slak, steenachtige verontreinigingen.

Door het ijzer te smeden werd een groot deel van de slak verwijderd en de kwaliteit van het metaal sterk verbeterd. Hiermee had Paul verklaard, waarom Wieland zo'n groot zwaard smeedde: door de bewerking verdween veel van de verontreinigingen; en bij de volgende handelingen zou nog metaal verloren gaan.

Omdat Paul niet zoveel ijzer verkregen had, kocht hij voor zijn verdere proeven ijzer, dat in samenstelling zo goed mogelijk overeenkwam met zijn eigen ijzer. Hij liet nu zijn ijzerpoeder gemengd met meel door kippen consumeren. De ontlasting van deze kippen werd in een oven van de Technische Hogeschool te Hannover uitgesmolten. Daarbij kwamen twee dingen aan het licht. Ten eerste bleek dat de gesmolten resten van de ontlasting een dun vloeibaar laagje vormde, dat het ijzer tegen oxidatie beschermde. Ten tweede was in het ijzer zoveel koolstof terecht gekomen, dat het tot staal kon worden verwerkt. Staal wordt namelijk gemaakt door ijzer, met wat koolstof gemengd, te smelten en dan plotseling af te koelen door het in water uit te gieten.

Verdere proeven kon Paul niet meer nemen, omdat men aan de Technische Hogeschool wel erg geschrokken was van de geur. Maar hij had bewezen dat de werkwijze uit de sage wel degelijk een door en door geharde staalsoort op kon leveren, en daarmee ook, dat een ogenblik van verwondering het begin kan zijn van een ontdekking.

(Dit verhaal is verteld naar een artikel uit "Archimedes", I, 1, pag. 4.)

Kunde is ouder dan kennis

Wielands zwaard was geen staaltje van technische wetenschap, maar het resultaat van een aantal waarschijnlijk toevallig verworven kundigheden. Het verschil tussen wetenschap en kunde is, dat in de wetenschap niet alleen het hoe, maar vooral het waarom van de verschijnselen wordt bestudeerd. Een belangrijk gevolg is daarbij, dat op grond van verklaringen voor bepaalde verschijnselen voorspellingen kunnen worden gedaan.

Een mooi voorbeeld hiervan is de verklaring voor drijven en zinken van voorwerpen. Het inzicht begint pas lang na de ervaring, dat alle houten voorwerpen drijven, en stenen zinken, ongeacht de grootte. Als we bedenken, dat de mensheid meer dan een miljoen jaar oud is, verbazen we ons erover, dat het begrip soortelijke massa pas dateert van Archimedes (ca 250 voor Christus). Maar de verklaring maakt het ons mogelijk te voorspellen, dat een ijzeren boot kan blijven drijven, als hij maar hoog genoeg is.

Om te laten zien, dat het werken met wetenschappelijke begrippen moeilijk kan zijn, volgt hier een raadsel: In een bootje bevinden zich een man en een grote steen. Het bootje ligt in een vijver; op de wand van deze vijver is een merk aangebracht, precies op de waterlijn. Nu laat de man de steen voorzichtig over de rand van het bootje in de vijver zakken zonder dat het water opspat. Komt het water boven, onder, of op het merk te staan?

We hebben dit raadsel losweg aan een aantal mensen, waaronder hoogleraren, voorgelegd. Het resultaat was niet zoveel beter dan wat een gemiddelde klas ervan maakt. De oorzaak ligt waarschijnlijk in het feit, dat het begrip soortelijke massa tamelijk abstract is. Onder abstract verstaan we: losgemaakt van het direct waarneembare. We kunnen namelijk aan een steen wel voelen dat hij zwaar is, en hem ruwweg vergelijken met andere zaken, maar in grensgevallen komen we met dergelijke schattingen niet meer uit. Er zijn dan twee van elkaar onafhankelijke metingen nodig, die van het gewicht en van het volume. De soortelijke massa is dan: gewicht (beter massa) gedeeld door volume, en het is dus een afgeleide grootheid.

In de wetenschap nu is het werken met afgeleide grootheden heel gebruikelijk en belangrijk. Het belang is gelegen in de mogelijkheid nieuwe regelmatigheden te ontdekken, bepaalde verschijnselen beter te begrijpen en vooral voorspellingen te doen.

Oefenvraagstuk over soortelijke massa:

Een leraar vraagt: "Drijft deze ijzeren kogel op kwik?"

Leo, die net het begrip soortelijke massa bestudeerd heeft: "Op die vraag kan ik pas antwoorden als ik de soortelijke massa's weet".

Leraar: "De soortelijke massa van kwik is 13.6, die van ijzer 7.9".

Leo: "Dan kunnen er wel bijna twee ijzeren kogels op kwik drijven".

Waar zit de fout?

De ontwikkeling van de natuurwetenschappen

In de manier waarop de mens naar zijn omgeving kijkt is een voortdurende ontwikkeling. Het begrip soortelijke massa is daarvan een goed voorbeeld. Zelf ben je onder de invloed van je omgeving al veel verder dan de geleerden van enkele eeuwen geleden. (In Rembrandt's tijd bijvoorbeeld hoorden breuken op de universiteit thuis.)

Toch is er nog een tamelijk grote afstand tussen de kennis uit het leven van alledag en de natuurwetenschap. Dat komt voor een deel door het feit, dat voor de ontwikkeling van je verstand tijd nodig is. Veel belangrijker is toch wel, dat we niet zonder meer gericht zijn op wetenschappelijke activiteit. Om daarop wel ingesteld te raken is het goed, een ogenblik stil te staan bij de ontwikkeling van de natuurwetenschap, waaruit we de abstractie al noemden.

Waarnemen en beschrijven

Je hebt aan het bestuderen van een brandende kaars gezien hoeveel waarnemingen kunnen worden verricht aan zo'n vertrouwd verschijnsel en ook, hoe moeilijk het is goed waar te nemen. De aandacht die je opbrengt, wordt overigens wel beloond. Bij de kaars bijvoorbeeld kom je door de gebeurtenissen rond de pit nauwkeurig waar te nemen op het spoor van de werking. Niet alle waarnemingen zijn overigens even belangrijk. Door verstandig te kijken leer je onderscheid te maken tussen hoofd- en bijzaken: je leert gericht waar te nemen. Daarbij zijn vroegere ervaringen van groot belang. De eigenschappen en omstandigheden die een wezenlijke invloed uitoefenen op het verschijnsel dat je bestudeert, noemen we significante grootheden. Of iets significant is, hangt af van wat je weten wilt.

Vraag: Is de intensiteit van het vuur significant voor het verschijnsel "verbranden"?

Het zoeken naar regelmaat

Soms vallen bij het waarnemen bepaalde gelijkenissen op. De proeven over het ontleden van stoffen waren voor je verzameld uit talloze experimenten

van vroegere onderzoekers, maar bij een nieuw onderzoek zal de regelmaat meestal niet zo groot zijn. Je moet je waarnemingen dan rangschikken in de hoop, er een bepaald patroon in te vinden. Vaak kun je de proeven wel zo kiezen, dat de kans op regelmaat groot is.

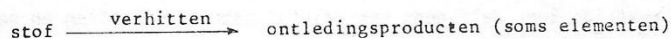
Een goed voorbeeld vormt het onderzoek naar verbrandingsverschijnselen. Bij alle verbrandingen is namelijk lucht nodig. Het optreden van vuur is geen significante grootheid, want stoffen als houtskool kunnen fel, matig en zelfs zonder vuurverschijnselen dezelfde reactieproducten (verbrandingsproducten) geven.

Het is in dit verband goed eraan te herinneren, dat in de natuurwetenschap de woorden een wat andere betekenis kunnen hebben dan in het dagelijkse leven. Op bladzijde 7 zagen we, dat het begrip stof in de natuurwetenschap nauwer is dan daarbuiten. Bij het woord verbranding is juist het omgekeerde het geval: het begrip is verruimd tot alle reacties van stoffen met lucht (zuurstof). De reden daarvoor is, dat de stofverandering veel belangrijker is dan het vuur, dat deze reactie kan begeleiden.

Deze begripsverruiming is dus ook weer het gevolg van abstractie: het direct waarneembare vuurverschijnsel, dat voor ons echt bij een verbranding hoorde, wordt als minder belangrijk gezien; we maken de stofverandering los van de bijkomende verschijnselen, en noemen alle soortgelijke stofveranderingen verbranding. Om deze reden spreken we ook over verbranding in ons lichaam.

De regelmaat bij ontledingen en verbrandingsverschijnselen kunnen we nu als volgt opschrijven:

ontleding:



verbranding:



N.B. Als een stof aan de lucht verhit wordt, is het soms moeilijk om te zeggen of er ontleding of verbranding is opgetreden.

Vraag: Kunnen verbrandingsproducten elementen zijn?

Het zoeken naar een verklaring

Waarom smelt water bij 0° en paradichloorbenzeen bij 53° C ?

Waarom brandt een kaars veel rustiger dan een voetzoeker?

Het zal duidelijk zijn, dat het waarnemen van regelmaat of van verschillen nog geen verklaring inhoudt. Voor een werkelijke verklaring is nodig, dat we de oorzaken van de verschijnselen kennen. Dit is voor natuurverschijnselen meestal erg moeilijk, vaak zelfs onmogelijk. Wel kunnen we vaak zinvolle veronderstellingen maken, waardoor verschijnselen van uiteenlopende aard met elkaar in verband worden gebracht. Zo'n veronderstelling heet een hypothese. Een aantal van zulke veronderstellingen, in een logisch verband geplaatst en getoetst aan verdere proeven, noemt men een theorie. De bevestigende proeven zijn heel anders tot stand gekomen dan het onderzoek, dat tot een hypothese leidt: op grond van een hypothese of van een theorie wordt namelijk een voorspelling gedaan. Aan de hand van de nieuwe proeven blijkt dan, of de theorie waarde heeft. Als het resultaat van de proef overeen komt met de voorspelling, heeft de theorie inderdaad zin.

Dat betekent overigens niet, dat de hypothese of theorie ook de werkelijkheid weergeeft. Dit blijkt uit het volgende voorbeeld:

Een groep primitieve indianen wordt door een overstroming uit hun woongebied verdreven, en strijkt neer langs de spoorlijn van Obidos naar Manáus, waar de treinen om 6, 12 en 18 uur langskomen. Omdat zij geen horloges kennen, maar de stand van de zon des te beter, ontstaat de idee, dat de zon het verschijnen van de trein bepaalt. Als hypothese is deze gedachte waardevol, vooral omdat er een voorspelling was gedaan, die uitkwam. Deze voorspelling was, dat in de regentijd geen treinen zouden rijden, omdat dan de lucht alsmaar grauw is. De treinen reden inderdaad niet. De werkelijke oorzaak, namelijk dat het traject door de kans op verzakkingen te gevaarlijk werd, is voor de indiaanse hypothese niet van belang.

Dit verhaal lijkt ver af te staan van de natuurwetenschap, maar naarmate we verder komen zullen de waarde en de beperkingen van onze theorieën duidelijk worden.

Het meedelen van de resultaten

De stadia die hierboven beschreven werden zijn langzamerhand tot ontwikkeling gekomen. Hoewel deze manier van doen ons erg aanspreekt, is het echt niet de enige manier om over de stof en veranderingen na te denken. Vooral in het stadium van de verklaring bestaan er meer mogelijkheden. Het verhaaltje over de Braziliaanse trein is een voorbeeld, maar er zijn veel extremer gevallen bekend. Zo leeft het geloof in boom- en riviergeesten in veel gebieden nog sterk voort. Dat wij van een "westerse" beschaving kunnen spreken komt, omdat wij al eeuwen lang beschikken over de middelen vindingen en gedachten snel aan veel andere mensen mee te delen. De boekdrukkunst heeft in dit opzicht duidelijk een versnellende invloed gehad.

Tegenwoordig houden zich zoveel geleerden en technici bezig met allerlei wetenschappen, dat niemand de stroom van boeken en artikelen ook maar bij benadering kan verwerken. Daarom wordt in toenemende mate gebruik gemaakt van de technische middelen, die maar juist op tijd beschikbaar zijn gekomen: ponskaarten en magneetbanden kunnen op overzichtelijke wijze heel veel gegevens bevatten, die we met behulp van elektronische apparatuur terug kunnen zoeken. We kunnen daarbij heel selectief te werk gaan. Een voorbeeld: iemand is geïnteresseerd in de reactie tussen koper en salpeterzuur. Nu kan hij alle magneetbanden waarover hij beschikt in een computer stoppen; de banden worden afgedraaid en telkens als de woorden koper en salpeterzuur beiden in een uittreksel van een artikel voorkomen, worden titel, tijdschrift en bladzijde daarin uitgetikt op een vel papier. Maar als alleen het woord koper of het woord salpeterzuur wordt genoemd, wordt niets vermeld. Op die manier hoeft de onderzoeker dus niet meer artikelen door te werken dan voor zijn doel noodzakelijk zijn.

Dit literatuuronderzoek is één toepassing van computers, die voor de groei en de beheersing van de wetenschap (en de economie) onmisbaar is geworden. Ook voor onze lessen is de communicatie erg belangrijk. Van de ene kant is de hele cursus tot stand gekomen omdat vroegere onderzoekers en leraren hun bevindingen hebben meegedeeld. We volgen bij ons eigen onderzoek de hoofdlijn van de historische ontwikkeling en laten de meeste zijpaden en vergissingen liggen. Discussies, soms echte ruzies, die ons ook zijn overgeleverd, stellen ons in staat vast te stellen wat extra moeilijke punten zijn geweest. We kunnen daar nu extra aandacht aan besteden. Vooral over de verklaring van verschijnselen krijgen we daardoor extra gegevens.

De communicatie is ook van groot belang voor het ontwikkelen van de lessen zelf: als je jezelf moet uiten door verslagen te schrijven en vragen te beantwoorden, kom je tijdig tot de ontdekking waar de moeilijkheden zitten. Je leraar kan je dan meteen helpen.

Samenvatting: kenmerken van de natuurwetenschap

Na de verwondering, waaraan je eigenlijk niet meer kunt doen dan jezelf openstellen voor nieuwe dingen, zijn voor beoefening van de natuurwetenschap verschillende activiteiten nodig.

- het verzamelen van gegevens door nauwkeurig waarnemen,
- het rangschikken van de gegevens en het zoeken naar regelmaat,
- het zoeken naar een verklaring,
- anderen van de resultaten van het werk op de hoogte stellen.

Nogmaals: techniek en wetenschap

Op bladzijde 4 werden onder "techniek en wetenschap" de beweegredenen genoemd voor ons onderzoek van de natuur. Veel mensen zien tussen deze activiteiten een tamelijk strenge scheiding, vooral als het gaat om het doel dat wordt nastreeft. De wetenschap krijgt dan een tintje van onbaatzuchtigheid, van een edel streven om de geheimen der schepping te ontsluiten; de techniek heeft vooral te maken met het verlangen naar welvaart, naar steeds groter verlangens. Tegenover de welvaart wordt wel-zijn gesteld. Onder welzijn verstaat men dan: wel de genoegens van de techniek, maar niet de lasten. Geen lawaai, geen verontreiniging, geen scherpe tegenstelling tussen rijk en arm. Men is dan geneigd vooral de technici te schuld te geven. Aan de manier waarop de tegenstelling beschreven is, kun je al zien, dat we het niet eens zijn met deze zienswijze. Wij geloven, dat wetenschap en techniek zich ongestoord moeten kunnen ontwikkelen. Er is tussen deze activiteiten een sterke wisselwerking. Een van de mooiste voorbeelden is het onderzoek van bacteriën en andere microorganismen, dat in de medische wetenschap zo belangrijk is: het waarnemen en bestuderen van deze onzichtbare wezentjes kon pas beginnen toen men microscopen kon construeren. Omgekeerd leidde wetenschappelijk onderzoek tot de ontdekking van nieuwe materialen zoals metaallegeringen en halfgeleiders, die nu in de ruimtevaart, maar ook in het dagelijks leven zo'n grote rol spelen. Bij de techniek - die tegenwoordig vrijwel helemaal gebaseerd is op de resultaten van wetenschappelijk onderzoek - hoort natuurlijk ook, dat alle processen zo min mogelijk last veroorzaken. Maar dat kan. De milieubeheersing is geen technisch probleem, het kost alleen veel geld. We kunnen van de mensen afzonderlijk nauwelijks verlangen dat zij meer voor anderen doen dan geëist wordt, vooral als dit kosten meebrengt. Daar komt voor ondernemers bij, dat zij zich uit de markt prijzen als de concurrentie niet mee doet. Het probleem schuift dus al meteen de politiek binnen: de volksvertegenwoordigingen van alle landen waar een bepaald soort fabrieken staan, moeten tegelijkertijd eisen stellen aan veiligheid en zuiverheid van het proces.

1979/80

We komen op dit probleem, omdat je in verband met het verbrandingsonderzoek zelf kunt nadenken over bijvoorbeeld luchtverontreiniging. Je hebt zelf gezien, dat bij sommige reacties gassen vrijkomen. Het bruine gas dat bij de reactie van koper met salpeterzuur vrijkomt stelt ons wel voor het grootste probleem; zowel fabrieken als auto's produceren het. Zelfs vrij weinig van dit gas veroorzaakt met de lucht nieuwe reacties die uiterst schadelijke stoffen opleveren.

In het verbrandingsonderzoek heb je gezien, dat koolstofdioxide met kalkwater een witte vaste stof vormt. Ook voor andere gassen zijn dergelijke reacties mogelijk, zodat de overlast vrijwel kan worden weggenomen.

Je hebt ook bij een gasbrander het verschil gezien tussen verbranding met en zonder extra luchttoevoer. De gele vlam die ontstaat als er weinig lucht is, bevat naast onverbrande koolstof - die je kunt aantonen door een koud voorwerp in de vlam te houden - een ruime verscheidenheid aan halfverbrande stoffen. Iets dergelijks is bij uitlaatgassen van motoren ook het geval. Je gezonde verstand zegt, dat daar iets aan te doen moet zijn, en dat is inderdaad zo. Maar de oplossing die tot dusverre technisch het beste is, kost de individuele automobilist geld, zodat alleen de overheid in kan grijpen.

Gedachten over verbranding

Al sinds het begin van zijn bestaan heeft de mens zich in daden en gedachten met het vuur bezig gehouden. Het grootste gedeelte van de ongeschreven en geschreven geschiedenis beschouwde hij het licht en de warmte als de belangrijkste factoren ervan. En nog zijn voor veel mensen de waarneembare verschijnselen ook de wezenlijke trekken van verbranding; als is bijzaak, en als naast rook al verbrandingsproducten worden onderkend, hebben ze het nadeel dat ze een schoorsteen of een uitlaat nodig maken. Vanuit het standpunt van de gebruiker is dit ook zo, al zal kennis van de eigenlijke gebeurtenissen tijdens de verbranding het gebruik aanzienlijk efficiënter kunnen maken.

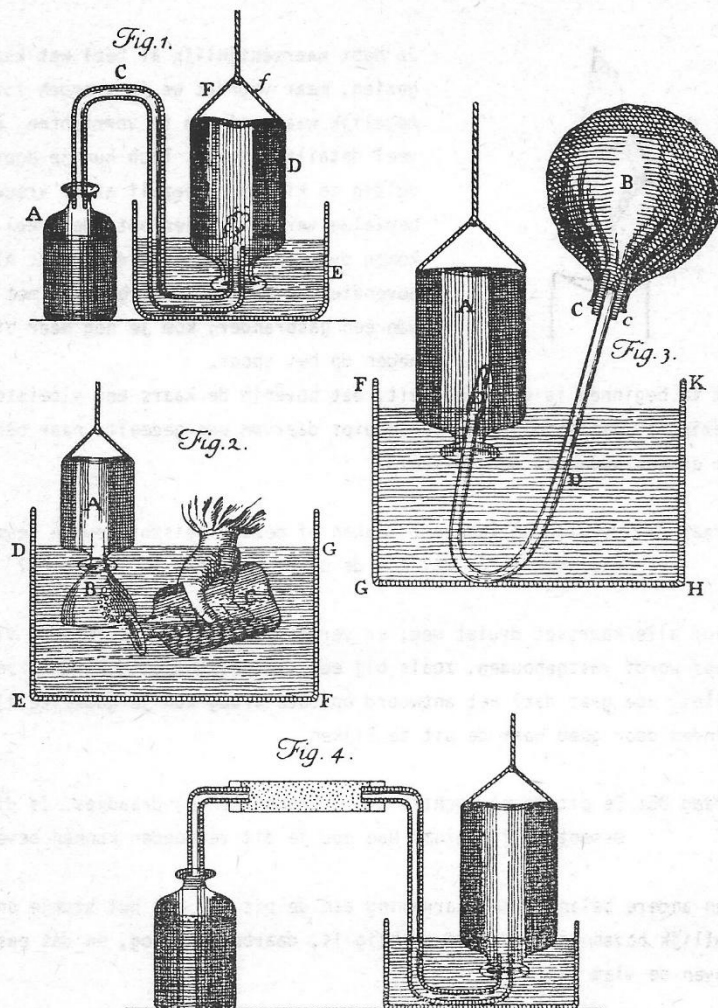
Bij de Grieken werd het vuur beschouwd als één van de vier elementen; de overige waren aarde, water en lucht. Alle andere stoffen zouden zijn samengesteld uit wisselende hoeveelheden van deze elementen, twee aan twee, of in ingewikkelder combinaties. In de tijd die daarop volgde, ontwikkelden de Arabische en later ook de Europese alchemisten het stofbegrip, dat nu nog geldt.

Zij voerden sommige metalen en ook zwavel en koolstof kennen als elementen. Het verschijnsel vuur raakte aanzien op de achtergrond. Maar in de tweede helft van de zeventiende eeuw kwam het vuur toch weer naar voren als een element of minstens als stof. Er werden namen aan gegeven als "brandbare aarde" en "flogiston". Het flogiston werd beschouwd als "vuurstof", niet als het vuur zelf. Het kan bij lage temperaturen in andere stoffen aanwezig zijn, en ontsnapt bij verbranding daaruit in een wervelende beweging. Ook metalen bevatten flogiston, want ze kunnen worden verbrand tot "kalk". (Waarom was de term "oxide" natuurlijk nog niet bekend?)

De rol van het flogiston werd door verschillende groepen van chemici wel anders gezien, maar was in elk geval veelzijdig. Metalen zouden er hun glans aan ontleenen, turf en kool hun kleur, olie zijn geur. Fraai is de gedachte over alcohol: het is een verbinding van water en flogiston. Als alcohol brandt, ontwijkt het flogiston, en water blijft over. Of het flogiston ook verantwoordelijk is voor de verschillende toestanden, waarin mensen na gebruik van alcohol kunnen verkeren, is in de oude lectuur niet te vinden. Het grootste bezwaar dat tegen de flogistontheorie aangevoerd kon worden was, dat bij sommige verbrandingsreacties producten ontstaan die zwaarder zijn dan de oorspronkelijke stof, terwijl bij andere reacties juist gewichtsverlies optrad. Althans, dat dacht men, omdat maar heel weinig chemici gelet hadden op de gassen, die bij verbranding kunnen uitwijken. (Denk aan de kaars op de balans.) Als voor deze gassen gecorrigeerd was, zou de theorie voor die tijd wel zin hebben gehad als verklaring, mits men aannam, dat flogiston een heel lichte stof was, lichter nog dan lucht.

Om deze voorwaarde te begrijpen kunnen we aan een luchtballon denken: gevuld met waterstof stijgt hij op, en is zeker in staat de arm van een balans wat omhoog te trekken. Hoewel er bij het leeglopen dus stof met een zeker gewicht ontwijkt, lijkt de ballon zwaarder geworden. Zo konden ook de verbrandingsproducten zwaarder lijken dan de oorspronkelijke stof, als een zeer ijle stof bij de verbranding ontweken was. Sommige chemici dachten bijvoorbeeld inderdaad, dat flogiston hetzelfde was als waterstof.

De opheldering van verbrandingsreactie kon pas goed op gang komen, toen men met gassen leerde werken. In de eerste helft van de achttiende eeuw verbeterden verschillende geleerden de methoden, die al eerder af en toe werden gebruikt. Vooral Cavendish was daarin heel bekwaam.



Tekening uit: "On Factitious Airs" door Henry Cavendish.
De zak B in fig. 3 is een varkensblaas.

137/80

De proeven over verbranding, die je deels alleen gezien, voor een deel ook zelf gedaan hebt, zijn in die tijd door verschillende chemici voor het eerst verricht. De meest volledige reeks werd rond 1760 uitgevoerd door Scheele, die daarbij zuurstof ontdekte. Hij toonde aan, dat de lucht waarin bijvoorbeeld fosfor had gebrand, lichter was geworden. Opmerkelijk was daarbij vooral, dat hij het restant vergeleek met eenzelfde volumen lucht, en niet met de lucht waar hij vanuit was gegaan. Er was dus een bestanddeel overgebleven met een voor dit restant karakteristieke soortelijke massa. Uit de vermindering van het volumen tijdens de reactie met fosfor leidde hij bovendien af, dat ongeveer éénvijfde van de lucht bestaat uit "vuurlucht" (nu zuurstof genoemd). Ook bij de ontleding van kwikoxide, dat in deze tijd nog "kalk van kwik" heette, vond hij deze "vuurlucht". Zijn proeven zijn nu nog waardevol, en wij hebben ze daarom ook gebruikt. Maar Scheeles verklaringen vinden we niet meer zo goed. Hij dacht namelijk, dat warmte bestaat uit flogiston en zuurstof; tijdens het proces zou het flogiston dan met de "kalk" kwik geven, en de zuurstof zou vrijkomen:

$$\text{kalk v. kwik} + \underbrace{(\text{flogiston} + \text{zuurstof})}_{\text{warmte}} \rightarrow \underbrace{(\text{kalk v. kwik} + \text{flogiston})}_{\text{kwik}} + \text{zuurstof}$$

Vraag: Scheele dacht dat warmte bestaat uit flogiston en zuurstof. Hij had de zuurstof kunnen wegen en ook na kunnen gaan dat warmte geen meetbare massa heeft. Wat moest hij dan aannemen over het gewicht van flogiston?

Om verschillende redenen kan men zeggen, dat Lavoisier (1743 - 1794) de moderne scheikunde inleidt. Deze franse inspecteur van de accijnzen heeft op praktisch gebied niet veel nieuws gevonden en geen enkele nieuwe stof ontdekt, maar hij was erg goed op de hoogte van het werk van anderen en dacht zeer logisch. Bovendien maakte hij wel heel consequent gebruik van de balans. Ter bevestiging van zijn theorieën heeft hij een paar heel slimme proeven bedacht. Een minder fijne trek van hem was, dat hij proeven van anderen nadeed en als zijn eigen werk publiceerde; jammer, want ook zonder andermans veren was hij mooi genoeg. Lavoisiers gedachten over verbranding onderschrijven wij nu nog, zij het met een kleine wijziging ten aanzien van het karakter van de zuurstof.

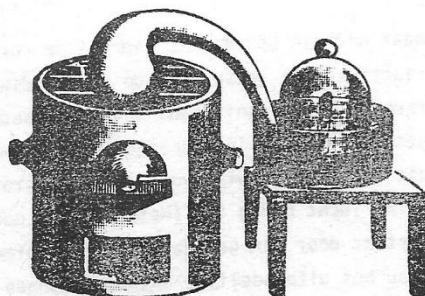
Bij een onderzoek kun je van wegen alleen heil verwachten, als je er van uitgaat, dat tijdens de reactie geen stof verloren gaat en er niets bij komt. We hebben al opgemerkt, dat veel onderzoekers vóór Lavoisier niet letten op zwaarte reactieproducten of op de invloed van de lucht.

Anderen, waar onder Cavendish en Scheele, betrokken deze gemakkelijk ontsnappende stoffen wel degelijk in hun proeven en verklaringen. Voor zover ze bij hun onderzoek gebruik maakten van de balans, moesten ze wel vast geloven in het behoud van massa. Toch was deze opvatting blijkbaar nog niet zo vast geworteld in de wetenschap van die dagen, want Lavoisier schreef nog in 1770: "..... want er wordt bij kunstmatige of natuurlijke veranderingen geen nieuwe stof gevormd, en men kan als vanzelfsprekend aannemen, dat bij iedere bewerking vóór en na de verandering evenveel stof bestaat, dat aard en hoeveelheid van de elementen dezelfde blijven, en dat er alleen wisselingen en wijzigingen optreden" Het feit dat hij onmiddellijk hierna hetzelfde nog eens zegt in andere bewoordingen is wel tekenend voor zijn stijl, maar wijst er ook op dat hij rekening hield met mogelijk misverstand op dit gebied.

Met deze wet van behoud van massa voor ogen liet Lavoisier met behulp van een brandglas verschillende stoffen in gesloten flessen ontbranden. Omdat daarbij geen verandering optrad in het gewicht, kan flogiston geen massa hebben.

Een andere belangrijke proef was de verhitting van "rood lood" (nu menie genoemd, een oxide van lood) met houtskool. Er ontweek een gas met dezelfde eigenschappen als het verbrandingsproduct van houtskool. Hieruit volgt, dat een metaal niet is "een kalk + flogiston" zoals tevoren werd gedacht, maar "een kalk - een lucht".

De proef waarbij de rol van deze "lucht" overduidelijk bleek is beroemd geworden. Lavoisier verhitte in een retort een hoeveelheid kwik in een bekende hoeveelheid lucht (50 kubieke duim). Na enige tijd zag hij rode vlekken en schilfers verschijnen op het kwik.



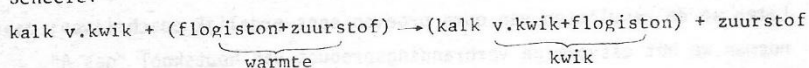
Lavoisiers opstelling voor de verhitting van kwik in een bepaald volumen aan lucht.

Na 12 dagen werden de schilfers niet groter; na afkoelen was bijna éénvijfde van de lucht verdwenen (8 duim²). De oranje-rode stof werd verzameld en verhit: er ontweek 8 duim² van een gas, "veel geschikter om in te ademen of iets in te verbranden dan gewone lucht". Als dit gas weer werd gevoegd bij de 42 duim², die van de lucht waren overgebleven, ontstond weer gewone lucht.

Later noemde Lavoisier het gas "oxygenium". Dit betekent zuurvormer; hoewel verschillende stoffen met zuurstof ook verschillend geaarde producten opleveren, waren de zure reactieproducten van fosfor, zwavel en stikstof namelijk het eerst onderzocht.

De grote ommekeer die Lavoisier in zijn opvatting over de verbranding heeft gebracht, blijkt het duidelijkst, als we zijn reactieschema onder dat van Scheele zetten:

Scheele:



Lavoisier:



Hij rekent dus af met flogiston als stof, en heeft daardoor een beter begrip over de elementen mogelijk gemaakt. Het zal nog een hele tijd duren voordat warmte, waarover Lavoisier toch nog geen juist idee had, en waarvoor de naam flogiston nu misschien nog net zo goed zou zijn, werd gezien als een vorm van energie.

Vraag: Welke consequentie heeft de verbrandingstheorie van Lavoisier voor het elementbegrip met betrekking tot:

- vuur,
- zuurstof,
- metalen.