

Stoffe und Grundstoffe

G. Job, Institut für Physikalische Chemie, Universität Hamburg, Bundesstraße 45, 20146 Hamburg

1. Einleitung

Die Versuche, den Aufbau der Stoffe und ihre sich oft sinnfällig vollziehenden Wandlungen zu verstehen, reichen weit ins Altertum zurück. Schon bei den Griechen entstand neben der Idee einer allem Stofflichen zugrundeliegenden *Urmaterie* die Vorstellung, daß die Dinge unserer Umwelt aus wechselnden Anteilen verschiedener *Urstoffe* aufgebaut sind. Der erste, der diesen Gedanken schärfer gefaßt hat, war unseres Wissens vor zweieinhalbtausend Jahren *Empedokles* in Sizilien. Er lehrte, daß alle Substanzen, etwa Blut, Fleisch, Knochen, aus wenigen *Elementen* zusammengefügt sind, die er in Erde, Wasser, Luft und Feuer verkörpert sah [1]. Sein in Athen lebender Zeitgenosse *Anaxagoras* begnügte sich nicht mit vier Elementen, sondern stellte sich vor "..., daß die Urstoffe zahllos seien. Denn, so erklärte er, sämtliche homogenen Substanzen entstünden und vergingen nur durch Mischung und Entmischung" [2].

Eine Synthese der verschiedenen überlieferten Ansichten mit eigenen Überlegungen und Beobachtungen gab *Aristoteles* [3]. Er sah einen gestaffelten Aufbau vor, indem aus den Elementen durch eine besondere Art der Vereinigung (*mixis*) zunächst *homogene* Substanzen und aus diesen dann in einer nächsten Stufe (*synthesis*) *heterogene* Gemenge gebildet sein sollten, die u.U. so feinkörnig sind, daß sie Gleichförmigkeit vortäuschen. Mit diesem gestuften Aufbau hatte er verblüffenderweise eine Struktur der stofflichen Welt in ihren Grundzügen spekulativ richtig erfaßt, die zweitausend Jahre später, gestützt auf viel umfassendere und genauere empirische Kenntnisse, zur herrschenden wissenschaftlichen Auffassung werden sollte.

War schon die stoffliche Beschaffenheit der Welt schwer zu erfassen, so galt das erst recht für den stofflichen Wandel und seine Ursachen. Es ist erst rund 100 Jahre her, seit man diesen Wandlungen Maß und Zahl zuordnen kann und ihre Abhängigkeit von verschiedenerlei äußeren Einflüssen versteht. Fragen dieser Art werden der Thermodynamik zugerechnet, in der sie ein eigenes Teilgebiet bilden, das unter dem Namen chemische Thermodynamik bekannt ist. Die Sprache und Symbolik dieses Gebietes sind jedoch dem Naturwissenschaftler in der Regel so wenig vertraut, daß hier ein Stück Übersetzungsarbeit zu leisten ist. Es ist das Ziel des vorliegenden Aufsatzes, ja des ganzen Heftes, die wesentlichen Aussagen dieses Gebietes in eine gewohntere Sprache zu übertragen.

2. Stoffliche Bezugssysteme

In der Physik gilt ein Naturgesetz nur dann als allgemeingültig, wenn es invariant ist gegen gewisse als grundlegend betrachtete Transformationen, etwa den Übergang in ein anderes, gegen das erste verschobenes, verdrehtes oder bewegtes räumliches Bezugssystem. Entsprechend sind die allgemeinen Gesetze, die das Verhalten der Stoffe regeln, so zu formulieren, daß sie unabhängig sind von dem gewählten "stofflichen Bezugssystem". Das bedeutet, wie wir sehen werden, daß sie unabhängig sein müssen davon, aus welchen stofflichen Bestandteilen man sich die betrachteten Stoffe zusammengesetzt denkt. Diese Bestandteile liegen nämlich nach ihrer Art ebenso wenig eindeutig fest wie die Achsen der vertrauten räumlichen Koordinatensysteme, sie sind vielmehr in gewissem Umfang frei wählbar. Sogar ihre Anzahl liegt nicht ein für alle Mal fest, sondern ist von unserem jeweiligen Kenntnisstand abhängig. Wie die im Prinzip frei wählbaren Koordinaten eines räumlichen Bezugssystems bilden die Bestandteile, in die man sich alle Stoffe zerlegt denkt, die sogenannten *Grundstoffe*, die Koordinatenachsen eines stofflichen Bezugssystems. Die Werte, die die Koordinaten eines Stoffes haben, werden dabei durch die Mengen gegeben, mit denen die einzelnen Bestandteile in ihm vertreten sind. Um das auseinanderzusetzen, gehen wir zunächst näher auf die Struktur der Stoffwelt ein.

3. Hierarchie der Stoffe

Wir wollen uns nicht mit tiefgründigen Erörterungen darüber aufhalten, was ein Stoff ist. Für uns genügt es, von dem intuitiven Begriff des Stoffs auszugehen, wie man ihn sich beim alltäglichen Umgang mit diesem Wort bildet. *Stoff* nennen wir, schlicht gesagt, das, woraus wir uns die greifbaren Dinge unserer Umwelt bestehend denken, das formlose, raumerfüllende Etwas, das übrig bleibt, wenn wir von der Gestalt der Dinge absehen. Stoffe gibt es tausenderlei, und wir geben ihnen Namen wie Eisen, Messing, Ton, Gummi, Seife, Milch, um sie einzeln oder als Mitglied einer Klasse zu kennzeichnen. Von *Materie* schlechthin sprechen wir, wenn es uns auf die Art des Stoffes nicht ankommt.

Manche Dinge erscheinen uns stofflich durch und durch einheitlich, etwa ein Trinkglas oder ein Zinnteller. Daneben gibt es andere, die deutlich in ungleichartige Bereiche zerfallen, ohne daß uns dies hindern muß, dennoch von einem einzigen Stoff zu sprechen. Man denke nur an ein Holzbrett oder einen Betonblock. Wir neigen einerseits dazu, auch diese Materialien, die nur in grober Näherung homogen sind, als eigene Stoffe aufzufassen. Andererseits empfinden wir keinen Widerspruch darin, sich dieselben Materialien als aus mehreren Stoffen zusammengesetzt vorzustellen. Das tun wir sogar dann, wenn sie, wie gesüßter Tee oder verdünnter Wein, völlig gleichförmig aussehen. Diese Ambivalenz in der Beschreibung ist ein auffälliges Merkmal unseres Stoffbegriffes, in der sich eine bemerkenswerte Eigenheit der Stoffwelt widerspiegelt.

Die gedankliche Zerlegung eines Stücks Materie in gewisse stoffliche Bestandteile läßt sich grundsätzlich ebenso auf diese Bestandteile selbst anwenden, so daß man dementsprechend Unterbestandteile erhält, die wir selbst wieder als Stoffe bezeichnen können. Das Spiel läßt sich auf verschiedenen Stufen und in verschiedener Weise wiederholen.

Genauer geht es um folgende Eigenschaft, die wir für spätere Überlegungen benötigen. Auf jeder Stufe sind gewisse Stoffe als *Grundstoffe* A, B, C... wählbar, aus denen man sich alle übrigen zu dieser Stufe gehörenden Stoffe aufgebaut denken kann, während keiner der Grundstoffe durch andere seinesgleichen darstellbar sein soll. Jedem Stoff läßt sich auf der jeweiligen Stufe eine *Gehaltsformel*

$$A_{v_1} B_{v_2} C_{v_3} \dots \quad (1)$$

zuordnen, die seine Zusammensetzung aus den Grundstoffen angibt. Die an die Grundstoffsymbole A, B, C... angefügten *Gehaltszahlen* v_1, v_2, v_3, \dots drücken das Mengenverhältnis aus

$$n_A : n_B : n_C : \dots = v_1 : v_2 : v_3 : \dots, \quad (2)$$

mit denen jeder der Grundstoffe am Aufbau beteiligt ist. Dabei lassen wir zunächst noch offen, wie die Menge n eines Stoffes in einer gegebenen Substanzprobe bestimmt ist. Die Gehaltszahlen dürfen formal auch negativ sein, obwohl man sich im allgemeinen bemüht, die Grundstoffe so zu wählen, daß das nicht vorkommt.

Betrachten wir ein konkretes Beispiel. Gefragt, woraus ein Pflasterstein besteht, würde ein Geologe etwa einen Granit oder einen Basalt oder irgendein anderes Gestein nennen. Die Stoffe seiner Welt sind – abgesehen von Gasen und Wässern verschiedener Beschaffenheit – die *Gesteine*, zu denen er das Gletschereis ebenso rechnet wie Torfe und Dünensande. Die Grundstoffe sind für ihn die *Minerale*. Aus ihnen wird die weit größere Vielfalt der Gesteine gebildet, je nach Art, Anteil und Kornausbildung der einzelnen Minerale ein anderes. Als Beispiel für eine “Petrographische Gehaltsformel” möge die des in Abb. 1 dargestellten Granits dienen:



Hier bedeuten die Zahlen den Volumenanteil der geologischen Grundstoffe: Q = Quarz, AlkF = Alkali-Feldspat, Plag = Plagioklas, Bi = Biotit.

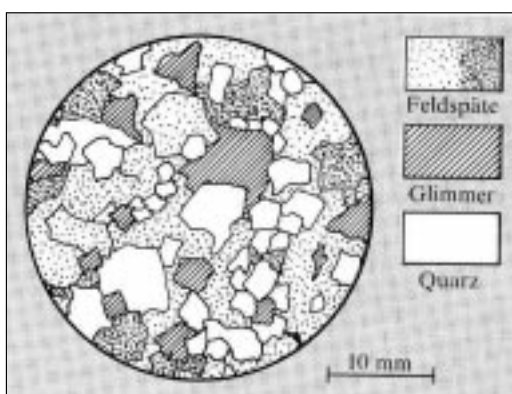


Abb. 1 Gefüge eines Granits. “Modaler” Mineralbestand der abgebildeten Probe in Volumenanteilen rund 30% Quarz, 15% Alkali-Feldspat, 40% Kalknatron-Feldspat (= Plagioklas), 15% Magnesiaglimmer (= Biotit)

Aus der Sicht des Mineralogen wiederum sind die einzelnen Gesteinsbestandteile, also die Grundstoffe des Geologen, ihrerseits zusammengesetzt. So ist für den Mineralogen der in Abb. 1 auftretende Kalknatron-Feldspat, einer der Hauptbestandteile der Basalte und Granite, ein Mischkristall mit wechselnden Anteilen der beiden mineralischen Bestandteile Kalkfeldspat und Natronfeldspat und diese wiederum sind auf einer nächst tieferen Stufe, die Vereinigung verschiedener “Erden”. In unserem Fall sind es “Kiesel-, Ton-, Kalk- und Natronerde” (chemisch $\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{CaO}, \text{Na}_2\text{O}$), alles Namen, die heute durch chemische Fachausdrücke verdrängt worden sind, ohne daß sich dadurch an der Grundidee etwas geändert hätte. Die

Grundstoffe des Mineralogen, aus denen seine Welt aufgebaut ist, sind die sogenannten *Normminerale*. Zu ihnen gehört auch der obengenannte Kalk- und Natronfeldspat. Eine Stufe tiefer sind es dann die schon erwähnten *Erden* zusammen mit einigen anderen Stoffen wie Wasser, Kohlendioxid usw. Man kann eine "Gehaltsformel" für ein Gestein der Reihe nach auf allen drei Stufen angeben und spricht dann von dessen *modalem* Mineralbestand, *normativem* Mineralbestand und seinem *Chemismus*, Ausdrücke, die wir uns nicht zu merken brauchen, da sie uns nur die Stufung selbst verdeutlichen sollen. Wir können die Leiter noch ein, zwei Sprossen weiter hinabsteigen, doch wollen wir dies in einem allgemeineren Zusammenhang erörtern.

4. Die Grundstoffe des Chemikers

Was wir an den Mineralien erörtert haben, ließe sich ähnlich auch an Harzen oder Ölen oder, vielleicht etwas anregender, am Wein oder Bier diskutieren. Auch diese Stoffe sehen wir als aus einfachen Bestandteilen zusammengesetzt an, in die sie sich zerlegen und aus denen sie sich durch *Mischen* rückbilden lassen. Die Grundstoffe derartiger Gemische sind das, was der Chemiker einen "reinen" Stoff oder eine *chemische Substanz* nennt. Als "Gehaltsformel" eines Gemisches sei die eines Schnapses genannt: [Äthanol_{0,2}, Wasser_{0,8}]. Hier sind als relative Mengen nicht, wie es im Spirituosenhandel geschieht, die Volumenverhältnisse angegeben, sondern, wie in der Chemie üblich, die Verhältnisse der Werte der physikalischen Größe "Menge" (Stoffmenge), deren gesetzliche Einheit das Mol ist.

Wie wir nun einerseits auf einer höheren Komplexitätsstufe aus den Gemischen als Grundstoffen den Gesteinen entsprechende (heterogene) *Gemenge* herstellen können, zum Beispiel Tünche aus Kreidemehl und Leimlösung oder Eischnee aus Luft und Eiklar, so können wir umgekehrt die chemischen Substanzen mit entsprechend energischen Mitteln in Grundstoffe einer niedrigeren Stufe zerlegen oder daraus bilden. Für den Chemiker sind dies die rund 100 chemischen Elemente: Wasserstoff H, Helium He, ... Kohlenstoff C, Stickstoff N, Sauerstoff O usw. Eine wichtige, für das Grundstoff-Problem allerdings unerhebliche Besonderheit ist, daß das Mengenverhältnis der Elemente in den Bruttoformeln der Einzelstoffe nicht stetig veränderlich, sondern ganzzahlig gequantelt ist, eine Eigenschaft, die als "Gesetz von den konstanten und multiplen Proportionen" bekannt ist. Durch passende Wahl des Mengenmaßes läßt sich erreichen, daß die Gehaltszahlen selbst ganzzahlig werden, etwa



in den Formeln für Wasser oder Kalk. Dieser Befund war seinerzeit einer der wichtigen Gründe dafür, sich die Materie nicht stetig, sondern gequantelt vorzustellen, und zwar meist naiv mechanistisch aus kleinen, beweglichen, geometrischen Gebilden, den Atomen, die sich zunächst zu kleineren Gruppen, den Molekülen, und darüber hinaus zu weitläufigen Netz- und Gitterwerken zusammenschließen vermögen und so die Materie aufbauen.

Die Angabe von Art und Anteil der Bestandteile reicht, wie schon bei den Gesteinen, nur sehr selten hin, um den jeweiligen Stoff vollständig zu kennzeichnen, so daß weitere Merkmale herangezogen werden müssen. Der Petrograph denkt dabei vornehmlich an die Art, wie die Mineralkörner zusammengefügt sind, der Chemiker an die räumliche Verknüpfung der als kleine Kugeln vorgestellten Atome. In den chemischen Formeln wird diese "Struktur" oft durch Bindestriche, Klammern, usw. oder auch nur eine bestimmte Gruppierung der Elementsymbole angedeutet. Zur Verdeutlichung sei lediglich ein Beispiel unter unzähligen genannt, und zwar das wissenschaftsgeschichtlich bedeutsame Stoffpaar *Ammoniumcyanat* und *Harnstoff*. Das erste ist ein anorganisches Salz, das zweite ein biologisches Produkt. Beide Stoffe haben dieselbe Bruttoformel, nämlich CH_4ON_2 , während ihre Strukturformeln sich unterscheiden (Abb. 2). Die Umwandlung des Ammoniumcyanats in Harnstoff vor 150 Jahren durch *Wöhler* erregte Aufsehen, weil sie zeigte, daß organische Stoffe auch ohne Hilfe von Lebewesen aus anorganischen gebildet werden können.

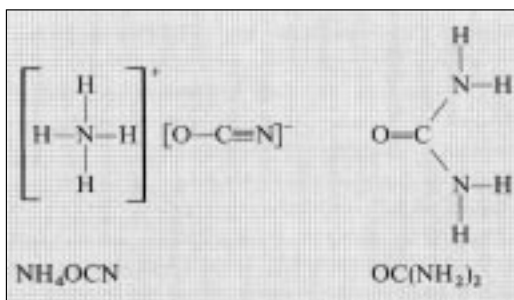


Abb. 2 Strukturformeln von Ammoniumcyanat links und Harnstoff rechts als Beispiel zweier verschiedener Stoffe gleicher Zusammensetzung. Oben: Ausführliche "Valenzstrichformel", unten: Kurzform

Im allgemeinen erwarten wir, daß ein Stoff sich "rein darstellen" und in Flaschen abfüllen läßt. Diese Sicht ist jedoch etwas zu eng, da es durchaus Substanzen gibt, die sich so gar nicht fassen lassen, in ihrem

sonstigen physikalischen und chemischen Verhalten aber ganz dem gleichen, was man üblicherweise Stoff nennt. Hierzu gehört zum Beispiel die wirkliche Kohlensäure H_2CO_3 , die in wäßrigen Kohlendioxid-Lösungen in Spuren entsteht und deren Name fälschlicherweise auf ihre Stammsubstanz, das CO_2 , angewandt wird. Die Kohlensäure ist beständig genug, um neben dem tausendfachen Überschuß an CO_2 nachgewiesen werden zu können, sie ist aber zu kurzlebig, um rein dargestellt werden zu können. Ein anderes Beispiel (unter vielen) ist das FeO , eines der drei bekannten Eisenoxide und wichtiger Bestandteil zahlreicher Minerale, das in reiner Form ebenfalls nicht vorkommt. In maximaler Anreicherung bildet es den Hauptbestandteil (94% neben Fe_2O_3) eines "Wüstit" genannten, schwarzen Mischoxids.

5. Ionen

Viele chemische Substanzen gelten als aus Ionen aufgebaut, also gleichsam aus Stoffen einer etwas niedrigeren Stufe. So das Kochsalz NaCl oder der Kalkstein CaCO_3 , die man, um die ionische Struktur zu verdeutlichen, auch als



formuliert. Die eckigen Klammern werden bei den einfach gebauten Ionen gewöhnlich weggelassen, was wir hier, wo ungleichrangige Stoffe nebeneinander vorkommen, der Deutlichkeit halber nicht tun wollen. Auch die Metalle ließen sich hier einreihen, etwa Silber und Zink:



in denen Elektronen e den negativen Partner bilden. Die einzelnen Ionensorten einschließlich der Elektronen verhalten sich nun in Gemischen, seien es kristalline Phasen, Lösungen oder Plasmen, tatsächlich weitgehend wie selbständige Stoffe, so daß es sich empfiehlt, sie auch als solche zu behandeln, obwohl sie sich rein nur vorübergehend und nur in unwägbar Mengen konzentrieren lassen. Ihre Ladung treibt sie unwiderstehlich auseinander. Die elektromagnetische Wechselwirkung erzwingt bei den uns gewohnten Handhabungen mit großer Strenge Elektroneutralität aller Materiebereiche und läßt ladungsmäßig nur geringste Überschüsse der positiven gegenüber den negativen Ionen oder umgekehrt zu, läßt aber sonst alle Freiheiten offen, die auch ungeladene Stoffe haben.

In den Formeln der Metalle taucht nun ein Stoff auf, dessen Zusammensetzung sich nicht mittels der chemischen Elemente ausdrücken läßt: Die Elektronen. Man ist also gezwungen, einen neuen Grundstoff einzuführen. Als nächstliegend bieten sich hierfür die Elektronen selbst an. Negativen Ionen wie Chlorid- oder Phosphationen wären dann folgerichtig die Gehaltsformeln



zuzuweisen, positiven Ionen, etwa Natrium- oder Uranylionen, denen Elektronen fehlen, entsprechend die Formeln



Hätten wir dagegen statt des Stoffs e , d.h. statt der Elektronen, die Ionen H^+ , oder anders gesagt, die Protonen p als Grundstoff gewählt, bekämen wir etwas andere Formeln. In ihnen stünde statt e der Ausdruck $\text{H}_1 p_{-1}$, da dieser gerade die Elektronen beschreibt:



Uranyl- und Ammoniumionen zum Beispiel wären dann



Wir stoßen hier zum ersten Mal auf ein Beispiel, wo erstens verschiedene Sätze von Grundstoffen zur Wahl stehen, und zweitens negative Gehaltszahlen vorkommen. Die gedankliche Zerlegung eines Stoffs in seine Bestandteile entspricht der Zerlegung eines Vektors in seine Komponenten, wobei die Grundstoffe die Rolle der Basisvektoren spielen. Wie man jeden beliebigen, aber vollständigen Satz linear unabhängiger Vektoren als Basis wählen kann, so kann man auch bei der Wahl der Grundstoffe innerhalb bestimmter Grenzen nach Belieben verfahren, wobei es gleichgültig ist, ob die als Grundstoffe gewählten Stoffe wirklich vorkommen oder nur erdacht sind. Die "Erden" der Mineralogen bilden zum Beispiel eine den Elementen der Chemiker äquivalente Basis, so daß sich die chemische Zusammensetzung eines beliebigen

Stoffes auch auf dieser Grundlage beschreiben ließe. Gediegenes Eisen und Luftsauerstoff hätten in dieser Darstellung, in der Fe_2O_3 und das fiktive FeO beide als Grundstoffe vorkommen, die Formel



Die Mineralogen tun das allerdings nicht, sondern benutzen die einfacheren und zweckmäßigeren chemischen Symbole.

6. Die Grundstoffe des Physikers

Wir haben an verschiedenartigen Beispielen gesehen, daß ein Stoff, der zunächst als einheitlich betrachtet wurde, in einem anderen Zusammenhang zusammengesetzt erscheint. Seine Bestandteile liegen dabei keineswegs von vornherein fest. Dieses Spiel läßt sich fast beliebig fortsetzen. Was sich in den Händen des Chemikers als eine einheitliche Molekelsorte darbietet, braucht bei Verfeinerung oder Abwandlung der Beobachtung oder der Meßverfahren nicht einheitlich zu bleiben. Es kann ein Gemisch werden. Wenn die Gemischbestandteile einander so ähnlich sind, daß sie auf Eingriffe praktisch immer gleich reagieren, oder wenn sie sich so schnell ineinander umwandeln, daß die zeitliche Auflösung der Meßverfahren nicht hinreicht, sie getrennt zu fassen, so ist das Gemisch als solches nicht zu erkennen. "Reiner" molekularer Wasserstoff bildet hierfür ein schönes Beispiel. Aus ihm läßt sich ein ungewohnter Bestandteil, nämlich Parawasserstoff, der zu 25% im gewöhnlichen Wasserstoff enthalten ist, abtrennen, also rein darstellen und wochenlang aufbewahren. Die Moleküle dieses Parawasserstoffs unterscheiden sich von den restlichen 75% des Wasserstoffs, des Orthowasserstoffs, in der gegenseitigen Ausrichtung der Kernspins der beiden Protonen des Wasserstoffmoleküls. Schmelz- und Siedepunkt des Parawasserstoffs liegen um rund 1% niedriger als die entsprechenden Daten des unzerlegten Wasserstoffs.

Auch die chemischen Elemente sind zum größten Teil Gemische aus chemisch zwar sehr ähnlichen, aber kernchemisch durchaus unterschiedlichen Bestandteilen, nämlich den Isotopen des jeweiligen Elements. Will man dies bei Zusammensetzungsangaben berücksichtigen – und man muß es heutzutage oft, um zum Beispiel isotonenmarkierte Substanzen zu kennzeichnen – dann schwillt die Zahl der Grundstoffe von rund 100 auf ungefähr das 20fache an, nämlich auf die Zahl der zusammen knapp 2000 bekannten Isotope aller chemischen Elemente, die als Gesamtheit Nuklide genannt werden. Als Beispiel für die "isotopische" Gehaltsformel eines Elements sei die des natürlichen Neons genannt: $\text{Ne} = [{}^{20}\text{Ne}_{0,909} {}^{21}\text{Ne}_{0,003} {}^{22}\text{Ne}_{0,088}]$.

Um Ordnung in die Schar der Nuklide zu bringen, kann man sie als aus Grundstoffen einer noch tieferen Stufe aufgebaut betrachten, nämlich aus den drei bisher namenlosen Substanzen e, p, n, deren "Atome" die Elektronen, die Protonen und die Neutronen sind. Alle drei sind recht ungewöhnliche Stoffe. Wir kennen sie hauptsächlich "gebunden", aber sie sind auch "ungebunden" weit verbreitet, nur nicht auf der Erde. Die ersten beiden bilden in gleichen Anteilen die Hauptbestandteile unserer Sonne, während der dritte nach den Vorstellungen der Astrophysiker in den späten Sternstadien und bei Supernova-Explosionen eine Rolle spielt. Man kann die Stoffe e, p, n sogar rein darstellen, allerdings nicht in wägbaren Mengen, Elektronen und Protonen schon wegen ihrer Ladung nicht, und Neutronen nicht, weil sie durch materielle Wände hindurch diffundieren.

Elektronen kann man relativ leicht als freies Gas gewinnen, indem man sie aus einem Metall durch Glühen verdampft. Einen auf 3000 K aufgeheizten Wolframdraht umgibt das Elektronengas, von dem entstehenden elektrischen Feld wie von Wänden am Entweichen gehindert, in einer nach außen nur unscharf begrenzten, etwa 1 μm dicken Schicht. Der Druck dieses Elektronengases beträgt im Innern der Schicht rund 10^{-6} bar. Aus einer solchen Schicht läßt sich das e-Gas absaugen – am einfachsten elektrisch mittels einer passenden Elektrodenanordnung – und damit als reines Reagenz gewinnen.

Das p-Gas entsteht in merklichen Anteilen bei elektrischen Entladungen in Wasserstoff, aus dem es durch feine Kanäle extrahiert und durch eine geschickte Anordnung von Blenden und Pumpen nachgereinigt werden kann. Wie bei dem e-Gas vermag man auf diese Weise zwar erhebliche Stoffströme zu erreichen, jedoch das reine p-Gas wegen seiner Ladung nirgendwo anzureichern.

Diese Schwierigkeit gibt es beim n-Gas nicht, dafür gibt es eine andere. Keine Barriere hält es zurück, genauer gesagt, fast keine. Äußerst langsame und damit äußerst kalte Neutronen ($T < 10^{-3}$ K) werden etwa an Kupferoberflächen reflektiert, so daß man ein extrem kaltes n-Gas tatsächlich durch Kanäle leiten und wie andere gasförmige Stoffe auch in Gefäße einsperren kann. Verbindet man ein solches evakuiertes Gefäß durch einen gewinkelten Kanal mit dem Innern eines Reaktors als Quelle thermischer Neutronen, so sammeln sich ihre langsamsten Vertreter ganz von selbst bis zu einem bestimmten Gleichgewicht im Gefäß an, weil die schnellen auf dem Wege dahin durch die Wände ausbrechen und in der Abschirmung absorbiert werden. Wegen des magnetischen Moments, wenn es auch sehr klein ist, kann ein sehr kaltes n-Gas grundsätzlich auch mittels inhomogener magnetischer Felder gehandhabt werden.

Wir haben uns bei den stofflichen Eigenschaften der drei neuen Grundstoffe e, p und n länger aufgehalten, weil diese zwar als Grundstoffe verwendet, der Stoffcharakter ihnen aber verwehrt wird. In den Symbolen e, p, n sieht man meist nur die "Atome" der Stoffe e, p, n, nämlich das Elektron, das Proton und das Neutron, nicht aber die Stoffe selbst. Wie sich nun die Elemente und deren Isotope einschließlich der daraus gebildeten Ionen aus den Grundstoffen e, p, n zusammensetzen, zeigt an einigen Beispielen die Tabelle 1.

Tabelle 1 Beispiele kernchemischer Gehaltsformeln.

übliches Symbol		Gehaltsformel
abgekürzt	vollständig	
H	${}^1_1\text{H}^0$	pe
H ⁻	${}^1_1\text{H}^{1-}$	pe ₂
D	${}^2_1\text{H}^0$	pne
${}^{12}_6\text{C}^{6+}$	${}^{12}_6\text{C}^{6+}$	p ₆ n ₆
${}^{35}_{17}\text{Cl}^-$	${}^{35}_{17}\text{Cl}^{1-}$	p ₁₇ n ₁₈ e ₁₈
${}^{40}_{20}\text{Ca}^{++}$	${}^{40}_{20}\text{Ca}^{2+}$	p ₂₀ n ₂₀ e ₁₈

7. Stoffumwandlungen

Vergegenwärtigen wir uns noch einmal die Idee, die dem Begriff des Grundstoffs zugrunde liegt. Mit seiner Hilfe soll die unübersehbare, ja verwirrende Mannigfaltigkeit der stofflichen Welt dadurch geordnet und übersichtlich gemacht werden, daß die Vielfalt der Stoffe als Kombination relativ weniger Stoffe, eben der Grundstoffe, begriffen wird. Wie aber findet man die Grundstoffe und wie erkennt man, wieviele man braucht? Das Mittel hierzu sind Stoffumwandlungen. Dabei begnügt man sich nicht mit jenen Umwandlungen, die auch ohne unser bewußtes Zutun ablaufen und die wir deshalb als "natürlich" empfinden. Man versucht vielmehr, mit allen zur Verfügung stehenden Mitteln Stoffumwandlungen zu erzwingen, gleichgültig wie "künstlich" oder "natürlich" diese uns erscheinen mögen – kurzum man treibt Chemie. Die beobachteten Stoffumwandlungen versucht man dann so zu beschreiben, daß sie als bloße Änderungen der Zusammensetzung aus irgendwelchen Grundstoffen erscheinen. Art und Menge der Grundstoffe bleiben dabei ungeändert, sie bleiben erhalten. Diesem Vorgehen verdankt nicht nur das von der Chemie aufgestellte Periodensystem der Elemente seine Existenz, sondern ebenso die Größe "Menge" selbst, mit deren Hilfe äquivalente Mengen unterschiedlicher Stoffe erklärt werden.

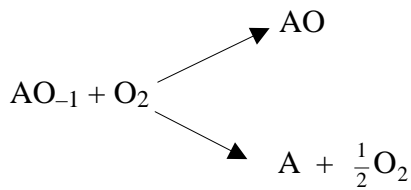
Die vertrauten chemischen Reaktionsgleichungen drücken dieses Vorgehen in einem ebenso einfachen wie wirksamen Kalkül aus. Dabei braucht man nicht einmal die innere Struktur und die Sinnvollheit dieses Kalküls zu begreifen, um ihn dennoch operativ handhaben zu können. Betrachten wir zum Beispiel die Verbrennungsreaktionen



Die Symbolik ist so suggestiv, daß sie kaum der Erklärung bedarf: Die Grundstoffe werden durch Symbole repräsentiert, hier C und O, und ihre Kombinationen durch unterschiedliches Zusammenfügen dieser Symbole. Auf der linken Seite der Reaktionsgleichung tritt jedes Grundstoff-Symbol ebenso oft auf wie auf der rechten, wobei die Indizes Mengenverhältnisse anzeigen, ganz analog wie die "stöchiometrischen" Koeffizienten vor den Symbolen. Jede Reaktionsgleichung drückt somit klar und unmißverständlich aus, daß eine Stoffumwandlung als der Übergang von einer Anordnung oder Kombination der Grundstoffe in eine andere betrachtet wird, wobei die Menge jedes einzelnen Grundstoffs erhalten bleibt.

Obwohl jeder Grundstoff dank seiner begrifflichen Konstruktion also eine Mengenerhaltung befolgt, bedeutet das, wie wir wissen, nicht, daß die einzelnen Grundstoffe selbst eindeutig festgelegt sind. So bleibt die Erhaltung der Grundstoffe auch dann unangetastet, wenn man im Beispiel der Reaktion (10) nicht C

und O als Grundstoffe wählt, sondern C und O₂ oder CO und O oder noch andere. Bei der Wahl von CO, das wir der Übersichtlichkeit halber mit A abkürzen, und O z.B. schreiben sich die Reaktionen (10)



Auch hier ist die Mengenerhaltung von A und O offensichtlich erfüllt, wenn man – wie jeder rechnerische Kalkül es selbstverständlich erfordert – die Vorzeichen der Indizes richtig in Rechnung stellt. Wenn auch die Verwendung negativer Indizes unüblich ist und daher vielleicht Befremden auslöst, so funktioniert doch die Beschreibung der Stoffe als Kombinationen von A und O ebenso gut wie mit C und O. Grundstoffe sind eben Koordinaten des stofflichen Bezugssystems und als solche ebenso wenig eindeutig festgelegt wie die Koordinaten eines räumlichen Bezugssystems. Festgelegt ist allein ihre Anzahl, die “Dimension” des stofflichen Bezugssystems. Diese Zahl ist durch die Gesamtheit der jeweils interessierenden, bekannten oder für möglich gehaltenen Stoffumwandlungen bestimmt. Erfährt diese Gesamtheit eine Erweiterung, etwa durch die Entdeckung neuer Stoffe, d.h. von Umwandlungen, in denen diese auftreten, oder durch den Nachweis, daß bis dato für unmöglich gehaltene Umwandlungen doch möglich sind, so wird die Anzahl der Grundstoffe, also die Dimension des stofflichen Bezugssystems im allgemeinen geändert. Sie kann dabei sowohl größer als auch kleiner werden. So erzwang die Entdeckung, daß an den chemischen Stoffumsetzungen meist auch “elektrisch geladene” Stoffe, nämlich Ionen beteiligt sind, die Vermehrung der Anzahl der Grundstoffe um einen, während die Entdeckung der Kernumwandlung, also die Umwandelbarkeit der bis dahin als Grundstoffe verwendeten chemischen Elemente ineinander eine starke Reduktion der Anzahl der Grundstoffe mit sich brachte, nämlich eine Reduktion auf drei Grundstoffe, deren “Atome” die Protonen, Neutronen und Elektronen sind. Inzwischen hat sich die Anzahl der Grundstoffe schon mehrfach wieder geändert, und es ist auch damit zu rechnen, daß das mit Fortschreiten unseres Wissens immer wieder geschieht.

Die offensichtlich konstruktiv bedingte Nicht-Endgültigkeit der Grundstoffe steht in einem merkwürdigen Gegensatz zu einer gefühlsmäßigen Anschauung, die wir von dem zu haben glauben, was ein Grundstoff ist. Schon die simple Tatsache, daß Grundstoffe frei wählbar sind wie die Koordinaten in einem Raum, paßt nicht zu dieser Anschauung und ebenso wenig die unabwendbare Gefahr, mit jeder Ausweitung unseres Wissens neue Grundstoffe wählen zu müssen. Statt daraus den Schluß zu ziehen, daß der Begriff des Grundstoffs eben nicht dazu dient, einen philosophischen Traum zu verwirklichen, sondern nichts ist als ein zweckmäßiges, jedoch außerordentlich wirksames Hilfsmittel, um in die verwirrende Fülle unserer stofflichen Erfahrung einfache Übersicht zu bringen, hängt auch der heutige Physiker nur zu oft dem alten Traum nach, eines Tages doch noch die “richtigen” Grundstoffe, oder wie er es nennt, die “endgültigen Bausteine” der Welt zu finden. Dieser Traum ist aber nicht viel besser als ein Traum, den kein Physiker hat und den er als naive Phantasterei entrüstet von sich weisen würde, nämlich eines Tages doch noch das “endgültige Koordinatensystem” des Raumes oder der Raum-Zeit-Welt zu finden. So wie in einem Vektorraum das Eigentliche die Vektoren sind und jede Basis nur dazu dient, Vektoren bequem und übersichtlich zu bezeichnen, so sind im Bereich des Stofflichen das Eigentliche die Stoffe, während die Grundstoffe nur dazu dienen, die Stoffe bequem und übersichtlich zu bezeichnen.

Literatur

- [1] *Empedokles*, zitiert bei *Aristoteles*, Vorsokratiker-Fragment 31 A 43 in *W. Capelle*: “Vorsokratiker” Stuttgart 1953, S. 191f.
- [2] *Anaxagoras*, zitiert bei *Aristoteles*, Vorsokratiker-Fragment 59 A 43, ebenda, S.261.
- [3] *Aristoteles*, siehe z.B. “Über den Himmel”, III 3, 302a und IV 5, 312a, ferner “Über Werden und Vergehen”, I 10, 327a...328b und II 3, 330a-b