

dingtem Sauerstoffmangel in Gytja, bei Sauerstofffreiheit in Sapropel um. Vielleicht bilden Sapropel Erdöl und Sapropel sowie Gytja Kerogen^[45]. In den Faulschlamm sedimentieren gleichzeitig Tonminerale. Das Erdöl ist im Laufe der Zeit aus den Tonmineralen ausgetreten und findet sich in porösen Gesteinen, z. B. in Sandstein.

Weiβ und Roloff^[46] zeigten, daß Hämin im Schichtgitter des Montmorillonits, als Kation eingelagert, nicht nur bis 200 °C wie im freien Zustand, sondern bis etwa 300 °C beständig ist. Tonminerale wirken aber bereits über 200 °C auf organische Stoffe katalytisch. Aus organischen Ammonium-Ionen, die aus faulem Eiweiß stammen können, entstehen im Schichtgitter des Montmorillonits bei über 200 °C Kohlenwasserstoffe, deren Gemisch durchaus dem Erdöl und dem Erdgas entspricht^[47]. Das gleiche gilt für in Montmorillonit eingelagertes Eiweiß. Montmorillonit mit organischen Ammonium-Ionen nimmt auch Fette auf. In allen Fällen entstehen bei über 200 °C die Kohlenwasserstoffe.

Im Laboratorium kann man also Erdöl aus organischen Ammonium-Ionen, Eiweiß und Fetten durch die katalytische Wirkung des Montmorillonits herstellen. Gilt das auch in der Natur?

Wir haben in einer Reihe von Ölschiefern die Tonminerale bestimmt^[48]. Im Ölschiefer lag bei hohem geologischen Alter (Kambrium bis Jura) Illit und bei niedrigem geologischen Alter (Jura bis Mitteleozän) Montmorillonit vor. Im jungen Ölschiefer von Messel aus dem Mitteleozän liegt das Kerogen mindestens zum Teil zwischen den Silicatschichten des Montmorillonits.

Auch Illite haben eine große Oberfläche und können katalytisch wirken. Die geologische Reihenfolge spricht aber dafür, daß primär das Kerogen im Montmorillonit entstand und langsam auswanderte, während der Montmorillonit durch Kaliumaufnahme und Erhöhung der Schichtladung in Illit überging. Vielleicht ist auch das freie Erdöl aus dem Kerogen der Ölschiefer entstanden.

[45] K. Krejci-Graf: Erdöl. 2. Aufl., Springer, Berlin 1955.

[46] Armin Weiβ u. G. Roloff, Z. Naturforsch. 19b, 533 (1964).

Beim Erhitzen eines Montmorillonits mit organischen Ammonium-Ionen hinterbleibt ein Ammonium-montmorillonit. Dieser geht oberhalb 350 °C bei Luftaustausch in einen H-Montmorillonit über^[47]. Die H-Ionen wandern in die Silicatschichten, wahrscheinlich in die Oktaederschicht, und der Montmorillonit verliert sein innerkristallines Quellvermögen, wie ja auch Pyrophyllit und Talk nicht mehr quellen können.

Im Trinidad-Asphalt fanden wir^[48] ein nicht quellfähiges Schichtsilicat mit einem Schichtabstand des Illits von 9,9 Å, das aber pro Formeleinheit nur 0,34 K enthielt. Vielleicht liegt hier ein Montmorillonit vor mit 0,34 Kalium-Ionen, der durch die Temperatur von etwa 300 °C, bei der das Kerogen entstand und zum Asphalt ausgetrieben wurde, das Quellvermögen verloren hatte.

Es besteht auch die Möglichkeit, daß Montmorillonit oder allgemein die Tonminerale bei der Entstehung des Lebens auf der Erde als Katalysatoren beteiligt waren. Vor drei oder vier Milliarden Jahren hatte die Erde wahrscheinlich eine „Uratmosphäre“ aus Wasserstoff, Methan, Ammoniak und Wasser. Die nicht durch Sauerstoff, wie heute, absorbierte Ultraviolettstrahlung der Sonne und elektrische Entladungen bildeten in dieser Atmosphäre die Bausteine der lebenswichtigen Verbindungen des Eiweißes und der Nucleinsäuren, z. B. Formaldehyd, Blausäure, Glycin, Alanin, Asparaginsäure, Adenin, Zucker u. a. m. Algen und Mikroorganismen sind in Gesteinen schon vor drei Milliarden Jahren nachgewiesen worden^[49]. Vielleicht haben die Tonminerale, die schon im Präkambrium existierten, die Bildung der höhermolekularen „lebensfähigen“ Verbindungen katalysiert^[50].

Eingegangen am 4. März 1968 [A 653]

[47] Armin Weiβ u. G. Roloff, Int. Clay Conf., Proc. Stockholm 2, 373 (1963).

[48] H. Friedrich u. U. Hofmann, Z. Naturforsch. 21b, 912 (1966).

[49] Vgl. F. Oberlies u. A. A. Prashnowsky, Naturwissenschaften 55, 25 (1968).

[50] U. Hofmann, Ber. dtsch. keram. Ges. 38, 201 (1961).

Element und Verbindung. Zur Wissenschaftsgeschichte zweier chemischer Grundbegriffe^[**]

VON E. STRÖKER^[*]

Es mag der Wunsch bestehen, die reine Materialhistorie durch einen geschichtlichen Aspekt zu ergänzen, der die Vergangenheit der Chemie nicht nur als ehrwürdiges Arsenal früheren Faktenwissens in Sicht bringt, sondern der diejenigen Denkformen vergegenwärtigt,

[*] Prof. Dr. Elisabeth Ströker
Seminar für Philosophie der Technischen Universität
33 Braunschweig, Pockelsstraße 14

[**] Nach einem Vortrag auf der Hauptversammlung der Gesellschaft Deutscher Chemiker in Berlin (18.–23. September 1967).

die allererst zu solchem Wissen geführt haben. Diese Denkformen aber sind niemals ein schlechthin Vergangenes: sie finden sich niedergeschlagen auch noch in den gegenwärtigen Methoden der Wissenschaft, sedimentiert selbst noch in ihren heutigen Begriffen.

Im folgenden wird also keine Bestandsaufnahme dessen beabsichtigt, was jeweils zu verschiedenen Zeiten als Element und was als Verbindung angesehen wurde. Diese Betrachtung sei vielmehr ausschließlich orien-

tiert an wenigen typischen, klar voneinander abgrenzbaren Denkweisen, die im Laufe der Chemiegeschichte sich im Gebrauch der Begriffe „Element“ und „Verbindung“ ausgeprägt haben. Dabei sollen die alchemistischen Elementenlehren außer Betracht bleiben und die beiden Begriffe nur soweit verfolgt werden, wie ihre Entwicklungsgeschichte für die chemische Wissenschaft bedeutsam geworden ist.

*

Die Geschichte gerade dieser beiden Begriffe reicht weit in die Vergangenheit zurück. In der ionischen Philosophie des fünften vorchristlichen Jahrhunderts begegnet man bereits der ersten „Elementenlehre“, die für die Chemie sogar bis in die Renaissancezeit hinein eine wichtige Rolle spielte.

Von ihrem Schöpfer *Empedokles*, einem Anhänger der Pythagoräer, sind Bruchstücke eines Gedichtes „Über die Natur“ erhalten, in dem er nach den *rhizomata*, den „Wurzeln“ aller Dinge fragt. *Empedokles* faßt sie als vier Gottheiten (daß es gerade vier sind, dürfte aus der orphisch-pythagoräischen Tradition zu erklären sein, in der die Vier eine heilige Zahl war): das Feuer, die Erde, die Luft und das Wasser; aus ihnen denkt er sich alles Seiende zusammengesetzt. Die Dinge haben verschiedenen Anteil an ihnen, darin liegt ihre Verschiedenheit begründet. Ihre Zusammensetzung kann sich ändern; und auf Mischung und Austausch der Anteile beruhen auch die qualitativen Veränderungen, beruhen Entstehen und Vergehen. Die vier „Wurzeln“ selbst sind für sich nach Art und Menge unveränderlich. Wahrscheinlich hat *Empedokles* auch den fortwährenden Austausch von Feuer, Wasser, Erde, Luft schon gedeutet als einen Austausch von kleinen Teilchen, die wegen ihrer Kleinheit nicht wahrnehmbar sind, so daß alle sinnfälligen Veränderungen quantitativer wie qualitativer Art zuletzt in der Bewegung solcher Teilchen begründet sind.

Nun kann gewiß der heutige Chemiker mit dieser noch der archaisch-mythischen Weltanschauung verhafteten Elementenlehre des *Empedokles* nichts anfangen. Aber man vergegenwärtige sich die Fragestellung, der diese Lehre entstammte, um zu sehen, daß ihre Bedeutung weit über den bloßen Inhalt ihrer Aussagen hinausging.

Schon mit der ältesten ionischen Naturphilosophie war ein Denken entstanden, das für die gesamte abendländische Wissenschaft von entscheidender Bedeutung werden sollte. Sich der Welt gegenüberstellend, befragte der Mensch diese Welt im ganzen – was sie sei. Er fand bei dem bloßen Augenschein der Dinge nicht Genüge, sondern suchte nach dem, was hinter ihrem Wandel bleibend, was ihr *hypokeimenon*, das allem Entstehen und Vergehen „Zugrundeliegende“, sei. Und es war diesem ältesten philosophischen Denken eigentümlich, daß es den Grund der Welt nicht länger mehr in Dämonen fand, sondern in stofflichen Prinzipien. *Empedokles* steht mit seiner Lehre bereits in einer längeren Denktradition, wenn er vier solcher Prinzipien annimmt, aus denen die Vielheit und Wechselhaftigkeit der sinnlichen Erscheinungen erklärt

werden soll. Gleichwohl darf er als der Vertreter der ersten Elementenlehre angesehen werden; der Begriff des stofflichen Elements geht auf ihn zurück. Wenn auch später erst *Aristoteles* dafür terminologisch den Ausdruck *stoicheion* einführte, so sind doch faktisch die vier „Wurzeln“ aller Dinge bei *Empedokles* bereits *stoicheia*, Elemente, jedenfalls in demjenigen spezifischen Sinne, wie ihn nicht nur die spätere klassisch-griechische Naturlehre, sondern wie ihn auch die Chemie bis zu *Robert Boyle* verstand. Das aber bedeutet: Elemente sind von nun an Grundstoffe, insofern aus ihrer Zusammensetzung alles Stoffliche hervorgeht und ein jedes in der Natur an ihnen teilhat. Sie selber aber sind ungeworden, unwandelbar, unzerstörbar; und ihre Gesamtmenge im Kosmos muß konstant angenommen werden.

*

Es ist hier den Gründen nicht nachzugehen, welche in der Folgezeit zu jener eigentümlichen Ablösung dieser Elementenlehre geführt haben, die mit den Namen *Leukipp* und *Demokrit* verknüpft ist. Es war das erfolgreichste Moment ihrer Naturphilosophie, daß in ihr die qualitative Verschiedenheit der Elemente getilgt wurde, daß sämtliche stofflichen Qualitäten reduziert wurden auf rein mechanische Bewegungsvorgänge von Korpuskeln einer einzigen Materie. Alle Demokritischen Teilchen sind von gleicher Art, sie unterscheiden sich nur durch Gestalt und Größe. Auch sie sind unveränderlich, ungeworden, unvergänglich gedacht, von endlicher Größe, jedoch unteilbar: *átoma*. Von nun an setzte sich der Begriff des Atoms für die kleinsten, (mechanisch) als unteilbar angenommenen Stoffteilchen durch.

Die Erinnerung an den Atomismus *Demokrits* ist notwendig, obgleich er eine Weiterentwicklung der alten Elementenlehre nicht nur nicht gefördert, sondern den Elementbegriff sogar gänzlich eliminiert hat. Aber gerade weil er es tat und durch die Art und Weise, in der er es tat, sollte er die nachfolgende Erörterung um die Natur der Stoffe nachhaltig mitbestimmen.

*

In fruchtbarer Weise fortgeführt wird die Diskussion freilich vom schärfsten Gegner des *Demokrit*, von *Aristoteles*. Von der Chemiegeschichte nicht angemessen gewürdigt und durchweg nur des Rückfalls in die alte Vierelementenlehre geziehen, ist *Aristoteles* hier um so nachdrücklicher zu berücksichtigen als Schöpfer einer Naturlehre, die gerade auch auf das spätere chemische Denken stark eingewirkt hat. Probleme des Stoffes und der stofflichen Veränderung hatten in der aristotelischen Philosophie ihren ausgezeichneten Rang. *hyle*, der Begriff des Stoffes, ist erst durch *Aristoteles* genau bestimmt und für die spätere Wissenschaft konzipiert worden.

Aber Stoff ist für *Aristoteles* immer schon qualitativ bestimmter Stoff. Eine einzige qualitätslose Materie anzunehmen, deren *átoma* jeweils nur verschieden geformt, angeordnet und mechanisch bewegt sein sollen – dieses korpuskularkinetische Modell des *Demokrit*

leidet für *Aristoteles* unter seiner völligen Unvereinbarkeit mit den Gegebenheiten der erfahrbaren Wirklichkeit. Das aristotelische Hauptargument gegen *Demokrit* kommt ganz entschieden von einem Anwalt der sinnlich gegebenen Welt: In ihr gibt es ja nicht Atomanhäufung, sondern qualitative Vielfalt, nicht nur mechanische Bewegung, sondern auch Entwicklung und Wandel, Werden und Vergehen.

Aristoteles hat als erster deutlich den Unterschied gesehen zwischen Gemisch und dem, was später chemische Verbindung heißt; er präzisiert den griechischen Ausdruck *mixis* ausdrücklich im Sinne der chemischen Verbindung und grenzt ihn klar gegenüber Gemisch ab, für das er das Wort *synthesis* verwendet ^[1]. (Die deutschen Termini haben also genau umgekehrte Bedeutung.)

Gerade an der *mixis*, der Verbindung also, muß aber für *Aristoteles* die Atomistik scheitern; sie vermag nach seiner Ansicht gar nicht das erstaunliche Ereignis der *henosis*, des „Einswerdens“ verschiedener Stoffe zu dem substantiell völlig neuartigen Stoff der *mixis* zu erklären. Denn die Qualitäten einer *mixis* setzen sich ja nicht summativ aus den Eigentümlichkeiten der Ausgangsstoffe zusammen, sondern sind gänzlich neuer und anderer Art. *Aristoteles* nimmt deshalb an, daß in der *mixis* die Ausgangsstoffe gar nicht unverändert erhalten geblieben sein können, auch nicht in kleinsten Teilchen, denn sonst wäre die Verbindung ja nur eine makroskopische Fiktion und in Wahrheit doch nur ein Gemisch der *atoma* der Ausgangsstoffe. Aber *Aristoteles* weiß auch bereits sehr wohl, daß man aus einer Verbindung die Ausgangssubstanzen zurückgewinnen kann, also können diese in der *mixis* nicht verlorengegangen oder zerstört worden sein. Die Möglichkeit der Zerlegung einer Verbindung in ihre Bestandteile verlangt demnach nun die gegenteilige Annahme von derjenigen, die aus ihrer neuen substantiellen Beschaffenheit folgt: Das Problem der *mixis* führt in dem Augenblick, indem es erstmals klar gesehen und ausgesprochen wird, sogleich in eine Aporie.

Aristoteles versucht sie, knapp skizziert, folgendermaßen zu lösen: Zwar ist aus den Ausgangsstoffen in der *mixis* ein ganz neuer Stoff entstanden, *dynamei* aber, „potentiell“, sind die Bestandteile auch in der Verbindung da (denn sie sind ja nicht da als das, was sie vorher waren), wahrscheinlich haben sie bei dem Einswerden zur *mixis* eine innere Veränderung erlitten. Sie sind jedoch in der Verbindung auch nicht zugrundegegangen, besteht ja jederzeit die Möglichkeit, sie durch Zerlegen der Verbindung zurückzugewinnen.

Unzweideutig wurden so erstmalig Fragen aufgeworfen, welche die Chemie später nachhaltig beschäftigt haben. Freilich wäre es verfehlt, *Aristoteles* als Chemiker beurteilen zu wollen, um ihn dann unschwer als Dilettanten abtun zu können. Die aristotelische Lehre von der *mixis* ist ausdrücklich als philosophische Prinzipienörterung zu nehmen, und das heißt im vorliegenden Fall: sie zielt nicht ab auf die Klärung chemischer Tatbestände, sondern auf die Klärung derje-

nigen Begriffe, die allererst nötig sind, damit nach den Tatbeständen präzise gefragt werden kann. Nicht welcher Stoff und woraus er eine *mixis* sei, ist das Problem, sondern wie die *mixis* schlechthin als bestehend zu denken sei.

*

Die Frage dagegen, ob denn überhaupt eine *mixis* begriffen werden könne als ein Stoff, der „aus“ anderen „besteht“, ist erst eine spätere Differenzierung des aristotelischen Problems. *Aristoteles* hat seine Prinzipien Diskussion noch ganz im Bereich des gewöhnlichen Sprachgebrauchs geführt. Darin ist es aber fraglos selbstverständlich, daß eine Verbindung aus den Stoffen, aus denen sie entstand, auch besteht. (Wie ja auch heute noch der Chemiker sagt, daß etwa Salzsäure aus Wasserstoff und Chlor „besteht“, und er verbindet mit dieser Ausdrucksweise durchaus einen Sinn.)

Unter dem Einfluß von *Aristoteles* festigte sich eine Haltung des Fragens, die bis weit in das 17. Jahrhundert die Diskussion um die Zusammensetzung der Materie beherrscht hat. Diese Diskussion fand, wenn gleich durch das Vorherrschen alchemistischer Anschauungen nicht selten unterbrochen, im wesentlichen in zwei deutlich getrennten philosophischen Lagern statt, ohne daß sie zunächst auf die chemische Erfahrung bezogen wurde.

Zum einen lebte mit der stoischen Philosophie die Lehre *Demokrits* wieder auf und fand ihre Fortsetzung im sogenannten Philosophischen Atomismus, welcher jedoch seinem Grundkonzept nach keine Aussicht haben konnte, das aristotelische Problem zu lösen: wie nämlich das Entstehen von chemischen Verbindungen aus den Elementen und ihre Zerlegungsmöglichkeit in diese zu begreifen sei; bot ja der Atomismus nicht einmal die Möglichkeit, diese beiden Stoffkategorien zu unterscheiden.

Wegen dieses Unterschieds aber, der erst durch *Aristoteles* klar als solcher zu Bewußtsein gekommen war, entbrannte auf der anderen Seite, die gewöhnlich als Aristotelismus gekennzeichnet wird, der heftige Streit um das Problem der Teilbarkeit der Stoffe, dem ja mit dem Hinweis auf *Demokrits* qualitätslose Atome einer einzigen Materie zunächst nicht gedient war. Mindestens schienen sich doch die chemisch kleinsten Teilchen eines Stoffes von denen eines anderen auch qualitativ zu unterscheiden. Diese Annahme spezifischer kleinster Teilchen eines jeden Stoffes, der *minima naturalia*, hat durch das ganze Mittelalter hindurch eine beachtliche Rolle gespielt, zumal erst mit ihr die Frage Gewicht erhalten konnte, was eigentlich mit den *minima naturalia* der Elemente geschehe, wenn diese eine *mixis* (*mistio*) eingehen und wie denn ein solches *minimum naturale* einer Verbindung zu denken sei. – Unschwer erkennen wir heute in den *minima naturalia* der *Aristoteles*-Tradition die begrifflichen Vorläufer der Moleküle in der Chemie. Wie denn auch die Unterscheidung von Atom und Molekül nur möglich werden konnte im Rahmen der *minima*-Lehre; sie hatte im Atomismus demokritischer Prägung keinen Raum.

*

[1] Arist. De gen. et corr. 328a 1–3.

Ein zweifacher Umstand rechtfertigt es, daß wir uns sogleich *R. Boyle* zuwenden: Er war es, der um die Mitte des 17. Jahrhunderts nach gründlicher Auseinandersetzung mit den überlieferten Elementenlehren den Begriff des chemischen Elements völlig neu konzipierte in einer Weise, daß damit die Chemie endlich ein neues Forschungsfeld als empirische Wissenschaft fand; und *Boyle* war es auch, der in einem bemerkenswerten Vermittlungsversuch zwischen Atomismus und *minima-naturalia*-Lehre vorerst die Schwierigkeiten zu beheben vermochte, die sich auf beiden Seiten der präzisen begrifflichen Fassung der chemischen Verbindung entgegengestellt hatten.

Knüpfen wir zunächst an diesen letzten Versuch an, für den *Boyle* allerdings auf wichtige Vorarbeiten *D. Sennerts* und *P. Gassendis* zurückgreifen konnte. Hatten bislang die Atome der Atomisten in ihrer qualitativen Ununterschiedenheit als zuwenig „chemisch“ gegolten, um als kleinste Bausteine der stofflichen Welt akzeptiert zu werden, so leisteten doch wiederum die wenigen Grundprinzipien dieser Lehre – Größe, Gestalt und Bewegung – einer mechanistischen Betrachtungsweise ihren Dienst, wie sie damals in der Physik ihres Erfolges zunehmend sicherer wurde. Von daher versteht sich der Versuch *Boyles*, in der Chemie abermals alle Qualitäten auf mechanische Prinzipien zu reduzieren, dennoch aber zu berücksichtigen, daß dem Chemiker mit *Demokrits* Anhäufungen von Atomen ja augenscheinlich nicht gedient war: er führte für die elementaren Stoffe den Begriff der „Textur“ (texture) ein, des atomaren Musters gleichsam, das allein durch geometrische und topologische Daten der kleinsten demokritischen Teilchen bestimmt gedacht werden sollte; und chemische Verbindungen ließen sich dann deuten als Zusammentreten mehrerer Texturen und deren Umorganisation vermöge der Partikelbewegung zu einer „Struktur“ (structure), eines Musters also, an dem heterogen gestaltete Partikeln teilhaben [2].

Damit hatte eine eigentümliche Synthese von Atomismus und *minima-naturalia*-Lehre ihren Abschluß gefunden. Ließ sie einerseits der *minima-naturalia*-Lehre ihr Recht, auf stoffspezifischen Teilchen zu beharren, so suchte sie doch eben diese Spezifität ihrerseits mit Hilfe der Korpuskeln, ihrer Textur und Struktur, zu erklären. War zwar diese Erklärung mechanischer Art, so vermochte sie doch den Widerstand gegen eine solche Erklärung an entscheidender Stelle zu schwächen: Der demokritische Gedanke bloßer Anhäufung von Korpuskeln wird ja abgelöst von der Auffassung der Struktur; an die Stelle des ungeordneten Aggregats tritt die Organisation der Teilchen zum Gefüge. Der von *Boyle* eingeführte und für die Chemie so eminent wichtige Begriff der Struktur brachte vorerst den jahrhundertealten Streit zum Verstummen, der um die Vereinigung von Elementen zu chemischen Verbindungen entbrannt war.

*

[2] The Works of the Honourable Robert Boyle. 1. Aufl. 1772. Nachdruck Hildesheim 1964–1966, Bd. 1, S. 493ff.; Bd. 3, S. 17ff. und 49ff.

Nicht geringer aber waren *Boyles* Verdienste um die Neufassung des Elementbegriffs [3]. Von verschiedenen Traditionen überwuchert, wird dieser Begriff nun von *Boyle* erstmalig im Rahmen der empirischen Forschung zur Diskussion gestellt. Experimente sollen endlich entscheiden, ob die als „Elemente“ ausgegebenen Stoffe überhaupt diesen Namen verdienen – oder ob sie nicht vielmehr ihrerseits noch zusammengesetzte Stoffe sind. Denn als Elemente müßten sie sich als „perfectly homogeneous and simple“, als vollkommen gleichförmig und einfach erweisen, nicht aus anderen Stoffen und auch nicht aus einander zusammengesetzt. Und warum schließlich sollte es nur vier Elemente geben? Waren doch bisher nirgends Gründe angegeben worden, die es hätten untersagen können, eine große Anzahl von Elementen für möglich zu halten.

Man ermißt erst vor dem Hintergrund der Tradition den grundlegenden methodischen Wandel, den *Boyle* mit diesen Erwägungen vornahm. Hatten die älteren Lehren die Elemente allein hinsichtlich ihres Vorkommens in allen anderen Stoffen aufgefaßt und sie als Grundstoffe betrachtet, sofern sie als solche für „zusammengesetzte“ Stoffe in Frage gekommen waren, so prüft nun *Boyle* die Elemente daraufhin, was sie als Stoffe in sich selbst und unter anderen Stoffen sind. Indem er aber allein auf die chemische Einfachheit zielt und in ihr die einzige chemisch wesentliche Bestimmung zu sehen verlangt, indem er ferner erstmalig eine große, noch unbestimmte Vielzahl der Elemente als möglich unterstellt, bringt er die Chemie der Folgezeit zu gänzlich neuen Aspekten der Forschung. Er ordnet der Chemie eine Zwecksetzung zu, deren Bedeutung zu seiner Zeit weit weniger selbstverständlich war, als sie uns heute scheint: die Vielzahl der Stoffe zu erforschen unter dem leitenden Gesichtspunkt, welche von ihnen Elemente und welche Verbindungen aus solchen Elementen sind.

Natürlich mußte *Boyles* neuer Elementbegriff Fragen aufwerfen, von deren Beantwortung allererst abhängen konnte, wie und in welchem Sinne andere Stoffe aus Elementen zusammengesetzt gedacht werden mußten; galt es ja, nun zuerst experimentell zu ermitteln, welche Stoffe sich und ob sie sich weiter zerlegen ließen und wieweit dies geschehen könnte. Aus dieser Fragestellung heraus wird begreiflich, daß *Boyle* ungemein anregend auf die analytische Chemie – diese Kennzeichnung stammt nicht zufällig von ihm – gewirkt hat.

Aber: Ließ sich denn analytisch gültig ausmachen, ob ein Stoff einfach oder zusammengesetzt ist? Offenbar würde man doch niemals mit absoluter Sicherheit entscheiden können, ob die gefundenen Zerlegungsprodukte bei einer Analyse wirklich letztthin chemisch einfache Stoffe sind, oder ob nicht vielmehr neue analytische Methoden diese wiederum als zusammengesetzt zeigen würden.

Es liegt ganz in der Konsequenz solcher Bedenken, daß *Boyle* sich nicht zugetraut hat, einige Elemente konkret als solche anzugeben. Der Vorwurf, der ihm

[3] Vgl. [2], Bd. 1, S. 495ff., 530ff., 562.

daraufhin oft gemacht wurde, verkennt und mißachtet diese Bedenken ebenso sehr, wie eine andere, häufig anzutreffende Deutung *Boyles* Ansichten der Elemente überinterpretiert.

Vielfach ist *Boyle* die „analytische Definition“ der Elemente zugeschrieben worden, jene Definition also, die den Begriff des Elements ausdrücklich in Relation zum Stand der analytischen Methoden ihres Auffindens bestimmt und die es ablehnt, von „Elementen an sich“ zu sprechen. Doch läßt sich dies leicht als Anachronismus durchschauen, wie er gerade der Wissenschaftshistorie so leicht unterläuft: Ist es doch ein anderes, unter einem chemischen Element einen Stoff zu verstehen, der einfach ist und sich chemisch nicht weiter zerlegen läßt – ein anderes, ein Element zu definieren als Stoff, der mit den jeweils verfügbaren experimentellen Verfahren nicht weiter zerlegt werden kann. Die Aussage, daß „es chemische Elemente gibt“, hat ersichtlich beide Male verschiedenen Sinn. Im ersten Falle stellt sie eine naturmetaphysische Aussage dar über eine Beschaffenheit der stofflichen Welt, die ihr zudedacht wird. Auf sie aber zielte *Boyle* ab, wenn er behauptete, daß „die Natur von Elementen Gebrauch macht“ (that nature makes use of elements). Dagegen würde erst die zweite Bedeutung jener Aussage, nach welcher die Existenz von chemischen Elementen an deren experimentelle Ausweisbarkeit geknüpft wird, einer analytischen Definition entsprechen. Zwar hat *Boyle* auch sie vorbereitet, aber ausdrücklich gegeben wurde sie erst von *A. L. Lavoisier*.

*

Mit dem Namen *Lavoisier* sind in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts eine Reihe bahnbrechender Leistungen verbunden, deren Wert denen nicht Unrecht gibt, die durch *Lavoisier* eine kopernikanische Wendung des chemischen Denkens insgesamt vollzogen sehen. Die Chemie dankt ihm die erste systematische Ausnutzung quantitativer Methoden, deren konsequente Anwendung zur Widerlegung der Phlogistik und zur Begründung der neuzeitlichen Oxidationslehre führte. Diese aber hatte nicht zuletzt eine einschneidende Reform der Grundanschauungen über Elemente und Verbindungen zur Folge, und dies in einem zweifachen Sinne.

Bedeutsam wurde zum einen eben jene schon erwähnte analytische Definition der Elemente, mit der *Lavoisier* über *Boyle* hinausging. Dessen Einsicht aufgreifend, daß man für keinen Stoff seine elementare Natur sicher behaupten könne, wenn seine chemische Zerlegung nicht gelang, gab *Lavoisier* ihr jedoch eine methodisch entscheidende Fassung, die zugleich eine Wende des Wissenschaftsbewußtseins in der Chemie mit sich brachte. *Lavoisier* tilgte aus *Boyles* Elementbegriff alle metaphysischen Implikationen und orientierte diesen Begriff ausschließlich an der Auskunft des analytischen Experiments: Stoffe sind Elemente, sofern und solange wir keine Mittel haben, sie weiter zu zerlegen. Sie sind also Elemente „pour nous, à notre égard“, für uns und unsere Aspekte; ob die Natur selbst Elemente an sich hervorgebracht hat, ist dage-

gen für die chemische Wissenschaft eine jenseitige Frage^[4].

Bedenkt man nun, daß die Elemente in der chemischen Wissenschaft nicht allein Grundstoffe als eine bestimmte Stoffklasse sind, aus denen andere Stoffe sich aufbauen, sondern daß sie zugleich Grundstoffe in einem weiteren Sinne darstellen, da nämlich die Konzeption der Elemente als solcher auch die Grundlage bildet für Art und Aufbau unseres Wissens von allen übrigen Stoffen, so wird deutlich, daß *Lavoisier* mit seiner analytischen Definition mehr zum Ausdruck gebracht hat als nur seine eigene vorsichtige Zurückhaltung und Selbstkritik. Mit ihr wurde etwas ausgesprochen, dessen prinzipielle Bedeutung erst die spätere, theoretisch fortgeschrittene chemische Wissenschaft erkennen konnte: daß nämlich alle ihre Aussagen sich letztlich nicht beziehen auf Elemente als schlichte Vorgegebenheiten der Natur, sondern auf Fundamentalhypothesen über die Natur der Elemente. Von ihnen haben sich die meisten bis heute glänzend bewährt.

Das zweite Resultat von *Lavoisiers* Reform schließlich, besonders stimulierend für die praktische Forschung, war seine Interpretation der Oxidations- und Reduktionsvorgänge, welche zu einer sachlichen Neubestimmung vieler Elemente und Verbindungen führte^[5]. Substanzen, die früher als chemisch einfach angesehen worden waren, wie das Wasser und die „Metallkalk“ (Metalloxide), erwiesen sich als zerlegbare Verbindungen; und umgekehrt wurden noch von der Phlogistik als Verbindungen aufgefaßte Stoffe nun als Elemente erkannt, so Schwefel, Phosphor, Wasserstoff, Sauerstoff und insbesondere die Metalle. Erst im Hinblick auf die spätere Entwicklung der Chemie ermißt man die Leistung, die *Lavoisier* mit dieser Umgestaltung der Ansichten über Elemente und Verbindungen erbracht hat – gab sie doch den Anstoß zu einer völligen Neuorientierung der stofflichen Systematik.

Die erste chemische Nomenklatur, die *Lavoisier* gemeinsam mit *G. de Morveau*, *C. L. Berthollet* und *A. F. Fourcroy* 1787 schuf, war ganz nach dem Prinzip der neuen Unterscheidung von Element und Verbindung aufgebaut. Daß diese Nomenklatur, wenn auch nicht in Einzelheiten, so doch im Grundsätzlichen ihrer Systematik sich bis heute als brauchbar erwiesen hat, ist ein buchstäblicher Ausdruck für das Niveau chemischer Erkenntnis, wie es durch *Lavoisiers* Arbeit erreicht worden war. Mit ihr war der Anfang zu einer chemischen Fachsprache gemacht, deren Bedeutung uns heute kaum mehr bewußt ist, da wir es längst als Selbstverständlichkeit hinnehmen, daß jede Wissenschaft ihre eigene Fachterminologie hat.

*

Exemplarisch werden auch die Grenzen der Chemie des 18. Jahrhunderts deutlich, speziell im Hinblick auf die Problematik von Element und Verbindung. Nicht

[4] Oeuvres de Lavoisier. Paris 1862, Bd. 1, S. 4.

[5] Vgl. [4], Bd. 2, S. 225–233 und 623–655.

zufällig blieb es bei einer Nomenklatur; indessen alle Versuche, eine Zeichensprache zu konstruieren, fehl-schlagen. Noch fehlte für sie das theoretische Funda-ment, welches erst zu Beginn des 19. Jahrhunderts ent-stand. Der zu seiner Zeit kaum beachtete *J. B. Richter* gab durch seine quantitativen Untersuchungen an Metallionenfällungen, Neutralisierungsreaktionen und doppelten Umsetzungen dem Begriff der chemischen Äquivalenz erstmalig eine klar umgrenzte Bedeutung und schuf die Grundlagen der Stöchiometrie. *J. Dal-ton*s Atomtheorie endlich lieferte die Basis, um *Rich-ter*s stöchiometrische Resultate zu erklären und ersten Einblick zu geben in die quantitative Zusammenset-zung von Verbindungen. *Dalton* hat als erster die große Bedeutung des Atomgewichts erkannt. Seither galt das relative Atomgewicht als wesentliches Kennzeichen eines Elements^[6].

Wenn auch die Gewichtszahlen, die *Dalton* selbst be-stimmte, heute nur noch von historischem Interesse sind, so eröffnete doch seine Theorie ganz entschei-dende Einsichten. Denn nicht nur war der Weg freigegeben zum genauen Studium der chemischen Proportionen einzelner Verbindungen und damit zu quantitativen Erkenntnissen über den Aufbau der stofflichen Welt und ihrer Bildungsgesetze; es waren die Ergebnisse *Daltons* auch eine unabdingbare Voraussetzung für die Konstruktion einer Zeichensymbolik mit wenigen, ganz einfachen syntaktischen Regeln zur Verwendung dieser Zeichen, die berechtigten, im vollen Sinne des Wortes von einer Zeichen- und Formelsprache zu sprechen. Von *Berzelius* weiterentwickelt und bald er-gänzt durch die Strukturformel, dient sie nicht nur als Informationsmittel, sondern gehört auch als ein we-sentliches methodisches Rüstzeug so unveräußerlich zur modernen Chemie, daß diese ohne sie gar nicht vorstellbar wäre. Diese Zeichensprache macht die Grundstruktur chemischen Denkens sinnfällig: die Unterscheidung von Element und Verbindung; jed-wede Systematik, mit der man der Fülle und Vielge-staltigkeit der stofflichen Welt Ordnung und Über-sicht abzugewinnen sucht, ist letzthin an dieser Unter-scheidung orientiert.

In diesem Zusammenhang kommt eine dritte Bedeu-tungskomponente ins Spiel, die die Chemie *Daltons* Eintreten für die Wichtigkeit des Atomgewichts zu danken hat. Dieses blieb nicht bloß eine für jedes Ele-ment charakteristische Zahl, sondern diente auch zur Erforschung etwaiger Beziehungen der Elemente untereinander, die dann in den siebziger Jahren des vorigen Jahrhunderts zur Aufstellung des Perioden-systems der Elemente geführt haben, welches das Grundgerüst für alle weiteren chemischen Systemati-sierungen der Stoffe darstellt. Und wenn auch in-zwischen das Atomgewicht – besser: die Atom-masse – seine einstige fundamentale Bedeutung für dieses System an die Kernladungszahl der Atome abgeben mußte, so bleibt doch als historisch wesentliche Tatsache, daß es zwar nur ein, aber unter mehreren Aspekten doch der wichtigste war,

um es mit einer Systematik der im Laufe der Zeit immer zahlreicher entdeckten Elemente überhaupt zu versuchen.

*

Aus zaghaften Ansätzen heraus – 1817 mit *J. W. Döbereiners* Triadenlehre beginnend, in den fünfziger Jahren von *M. Pettenkofer* und *A. Dumas* kaum mehr-versprechend fortgesetzt – sollte die Suche nach einer zufriedenstellenden Einteilung ein halbes Jahrhundert dauern. Um 1865 hatte *J. A. R. Newlands* von einem „Gesetz der Oktaven“ gesprochen, das er in seiner Aufstellung der Elemente nach Horizontalreihen (ge-mäß steigender Atommasse) und Vertikalreihen (ge-mäß vermeintlicher chemischer Analogie der Ele-mente) gefunden zu haben glaubte^[7]. Anfangs als Spielerei gewertet und mit bissigem kollegialem Spott bedacht, blieb von ihm jedoch der Grundgedanke der Periodizität, der dann vor rund hundert Jahren zum Periodensystem der Elemente von *L. Meyer* und *D. Mendelejew* geführt hat, das sich im Prinzip bis heute als wissenschaftlich fruchtbar gezeigt hat^[8].

Geschichtliche Einzelheiten seiner Entdeckung, seiner Überprüfung und Bewährung, schließlich seine späte-ren Ergänzungen und Korrekturen darzulegen, ist hier nicht der Ort^[9]. Aber es stellt sich im Rahmen unseres Themas die Frage, was dieses System der Elemente für die Chemie bedeutet. Dem heutigen Chemiker mag es längst zu einer Trivialität geworden sein; doch darf der Wissenschaftshistoriker vielleicht daran erinnern, wie wenig selbstverständlich dieses System ist! Denn was will es besagen, daß die Chemie nicht nur überhaupt – wie einige andere Wissenschaften auch – über ein System verfügt, sondern daß dieses erstens ein System der chemischen Elemente ist und daß zweitens es durch ein periodisches Gesetz bestimmt ist?

Daß ausgerechnet in einem Elementensystem das fun-damentale Ordnungsprinzip der Chemie liegt, ist Aus-druck eines Sachverhalts, der für den Chemiker unse-rer Tage ebenfalls längst eine Banalität ist, der jedoch im Laufe vieler vorausgegangener Jahrhunderte erst mühsam aus dem Dunkel mannigfacher verworrener Vorstellungen zu klarem wissenschaftlichem Selbstbe-wußtsein kam: daß nämlich der Chemiker das Insgesamt seiner Forschungsobjekte nur als Element oder als Verbindungen aus Elementen aufzufassen habe und als nichts anderes, daß somit die Frage, wie die stofflichen Substanzen beschaffen seien, für den Che-miker keine andere ist als die Frage nach den Zu-sammensetzungen aus den Elementen.

Was ferner die Periodizität dieses Systems angeht, so sei, um ihre Bedeutung zu veranschaulichen, noch ein-mal an *R. Boyle* erinnert. Kaum dürfte uns Heutigen mehr die Größe der wissenschaftsgeschichtlichen Wir-kung verständlich werden, die einst von ihm ausging,

[7] *J. A. R. Newlands*: On the Discovery of the Periodic Law. London 1884.

[8] *L. Meyer*: Die modernen Theorien der Chemie und ihre Be-deutung für die chemische Mechanik. Breslau 1864, 5. Aufl. 1884; *D. Mendelejew*: Die Grundlagen der Chemie. Petersburg 1869; deutsch: Petersburg 1891, S. 666ff.

[9] Dazu *E. Ströker*: Denkwege der Chemie. Freiburg-München 1967, S. 189ff.

[6] *J. Dalton*: A New System of Chemical Philosophy. London 1808; deutsch von *Fr. Wolff*, Berlin 1812, Bd. 1, S. 237.

als er, die Fesseln der alten Vierelementenlehre sprengend, die Chemie erstmals vor die Möglichkeit einer unbegrenzten Vielzahl von Elementen gestellt und ihr damit Aussicht gemacht hatte auf fortwährende Neuentdeckung von Elementen. – *Boyles* unbestimmte Vielzahl der Elemente wurde durch das Periodensystem zwar nicht grundsätzlich begrenzt, aber sie wurde nach den Prinzipien dieses Systems streng geregelt. War bis dahin jede Entdeckung eines Elements mehr oder weniger zufällig gewesen, jedenfalls durch keine mögliche Vorhersage gelenkt, mußten demgemäß auch seine chemischen Eigenschaften mehr oder weniger willkürlich erscheinen, so bestimmte dagegen nunmehr dieses System durch seine eindeutige Stellenordnung die Richtung des Suchens, es präzierte die Erwartung des Findens neuer Elemente und seiner Verbindungsmöglichkeiten.

In der Periodizität dieses Elementensystems liegt gerade seine ganz unvergleichliche Eigentümlichkeit. In der periodischen Wiederkehr einiger weniger Grundeigenschaften, in der geregelten Abwandlung aller sonstigen chemischen und physikalischen Eigenschaften der Elemente liegt letztlich das ordnungstiftende und eigentlich systembildende Moment der chemischen Wissenschaft im ganzen. Denn vermag zwar die Periodizität dieses Systems die Anzahl der Elemente prinzipiell nicht zu begrenzen, so schränkt sie doch die Willkür endlos „neuer“ und immer wieder „anderer“ Elemente nicht bloß ein, sondern schließt sie sogar aus. Zwar erscheint die Frage müßig, ob es eine Chemie als Wissenschaft geben könne, wenn diese nicht über eine zweidimensionale Elementenordnung, sondern lediglich über eine nur eindimensionale Reihung mit lauter „ganz anderen“ Grundstoffen verfügt. Mindestens aber würde sie schwerlich eine Systemwissenschaft sein können wie die faktisch gewordene Chemie.

*

Sie hatte freilich an der Schwelle unseres Jahrhunderts weniger denn je Anlaß, des bislang Erworbenen sicher zu sein. Neuartige Erfahrungen drängten nicht nur über das Erforschte hinaus, sondern zwangen auch zur tiefgreifenden Revision der Fundamente. Die Entdeckung der Radioaktivität an Elementen, die spontan zerfallen, die Auffindung der Kathodenstrahlen und die Aufklärung ihrer korpuskularen Natur ließen das Problem des Atombaus akut werden. Damit war die Unveränderlichkeit und Unteilbarkeit der Atome – und somit auch die Unveränderlichkeit der Elemente – endgültig Illusion geworden.

Als man bald die geheimnisvolle Sprache der Atompektren als Chiffren über den feineren Bau der Materie lesen zu lernen begann und 1913 das Bohrsche Atommodell konzipiert wurde, war der Anfang zu einem neuen Verständnis auch alles dessen gemacht, was in der uralten Frage nach den Elementen und ihren Verbindungen beschlossen lag. Die moderne Atomphysik gab das Rüstzeug, um die bis dahin rätselhafte Ordnung der Elemente im Periodensystem, die Bedingungen ihres Existierens und Reagierens

besser zu begreifen; sie lieferte mit „Atomhülle“, „Atomkern“, „Schalenaufbau der Elektronen“ erste wichtige Begriffe, um dasjenige, was herkömmlicherweise „Eigenschaften“ und „Qualitäten“ der Elemente geheißen hatte, erklärbar zu machen; und sie zeigte schließlich mit dem Pauli-Prinzip auch die Lösung für das Rätsel der Periodizität, die schon *Mendelejew* in immer erneuten und vergeblichen Ansätzen gesucht hatte. So war endlich der wundersame Bauplan des Periodensystems nachkonstruierbar, rational durchschaubar geworden.

*

Allerdings ergaben sich nun auch aus der chemisch wichtigsten Eigenschaft der Elemente, nämlich Verbindungen überhaupt eingehen zu können, neue schwierige Probleme. Noch fehlten in der Bohrschen Atomtheorie ja die zureichenden Mittel, um den Mechanismus der chemischen Bindung aufzuklären. Diejenigen theoretischen Probleme in Angriff zu nehmen, die aus der experimentellen Forschung der Molekülphysik folgten, ist bekanntlich erst mit Hilfe der Wellenmechanik möglich geworden. Mag auch angesichts der uferlosen Schwierigkeiten, die sich einer vollständigen wellenmechanischen Erklärung der chemischen Bindung für alle möglichen Moleküle entgegenstellen, der Zweifel berechtigt sein, ob man von einer Theorie der chemischen Bindung im strengen Sinne sprechen darf, so hat doch die Wellenmechanik heute als Erklärungsgrundlage der chemischen Bindung zu gelten.

Gewiß kann die vorbildliche mathematische Exaktheit dieses Fundaments wohl nicht darüber hinwegtäuschen, daß mit ihm die Welt der Stoffe uns etwas ungeheuer Fremdartiges geworden ist. Elemente und Verbindungen, aus denen sie – langvertrauter Vorstellung gemäß – immer noch besteht, konnten in den Bedingungen ihres Existierens zwar vollständig erklärt werden. Aber das jahrtausendealte Suchen des Naturforschers nach einem Bleibenden, Umwandelbaren der stofflichen Welt sollte sein Ziel nicht finden. Es hat in unseren Tagen der Erkenntnis der prinzipiellen Veränderung, Dauerlosigkeit und Zerstörbarkeit der Materie weichen müssen.

Doch sei abschließend nicht übersehen, daß diese Erkenntnis endlich die Versöhnung eines alten, bis in die Neuzeit ausgetragenen Gegensatzes gebracht hat, wie er am schroffsten schon früh zwischen *Demokrit* und *Aristoteles* aufgeklafft war. Die jüngste Entwicklung der Chemie hat aus der antiken Aporetik hinausgeführt und beide Denkhaltungen im Grundsätzlichen vermittelt. Als Mechanik auf „atomistischer“ Grundlage zwar, ist sie dennoch weit vom demokritischen Konzept abgerückt und fähig geworden, in Strukturen und solche Strukturen dynamisch zu denken. Damit wurde die Forderung des *Aristoteles* endlich erfüllbar: Seine *mixis*, Ausgangspunkt aller künftigen Problematik um die Begriffe „Element“ und „Verbindung“ – sie ist in unseren Tagen widerspruchsfrei denkmöglich geworden.

Eingegangen am 28. September 1967 [A 655]