Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin *125/126 (2016), 123–149*

Dietmar Linke

Einfachheit in der Chemie? – „Lasst, die ihr eintretet, alle Hoffnung fahren!“ – Oder doch nicht ganz?

1. Vorbemerkungen

Der Beitrag war so erbeten worden, dass Leitlinien der historischen Entwicklung der Chemie als Fachdisziplin aufgezeigt werden, um daraus Belege für die erhoffte „Einfachheit als Wirk-, Erkenntnis- und Gestaltungsprinzip in der Chemie“ finden zu können. – Nach Albert Einstein die Dinge so einfach wie möglich, aber nicht einfacher darzustellen, das ist ohnehin das Anliegen für die schulische (Lutz 1995) bzw. – in meiner Berufspraxis – universitäre Lehre zu den Grundlagen der Chemie. Im Forschungsalltag, bei mir über Jahrzehnte betreffend die Entwicklung nichtmetallischer anorganischer Glas- und Keramik-Werkstoffe, stößt man allerdings bei dem Bemühen um „Einfachheit“ bald an Grenzen. Die hohen Anforderungen an Spezialwerkstoffe erfordern Kompromisse bei vielen Eigenschafts-Kennwerten, deren gemeinsame Optimierung im gewünschten Sinne sich manchmal wegen gegenläufiger Abhängigkeiten sogar ausschließt.

Zur „verführerischen Illusion *einfacher* Konzepte“ hat unser Mitglied Charles Coutelle treffend Stellung genommen, wenn er in der Kurzfassung zu seinem in diesem Band enthaltenen Beitrag schreibt:

> „Durch Vereinfachung reduzieren wir die Ganzheit der objektiven Realität auf den Teil, den wir für den untersuchten Gegenstand ... als das Wesentliche zu erkennen meinen. Wir vernachlässigen dabei bewusst die objektiven komplexen Zusammenhänge in neben-, über- und untergeordneten Ebenen.“ (Coutelle 2014)

Die Geschichte der Chemie gibt zahlreiche Beispiele dafür, wie man sich einerseits im Wesen eines Vorgangs irren kann, wie andererseits solche Misserfolge neue oder erweiterte Ansätze befördern und so das Wesentliche immer klarer hervortreten lassen.

2. Was ist Chemie? Wie steht man zu ihr?

Chemie ist die Lehre von den Stoffen, ihrem Aufbau und ihren Reaktionen mit anderen Stoffen. Im Zentrum der Aufmerksamkeit stehen dabei seit jeher die reaktionsbedingten *Stoffwandlungen* und die dabei geltenden Gesetzmäßigkeiten. Auch wenn die Chemie in der Öffentlichkeit meist verkannt, wenn nicht gar verteufelt wird, bleibt unbestritten, dass sie als Querschnittsdisziplin nicht nur für andere Naturwissenschaften von großer Bedeutung ist, sondern auch für Wirtschaft und Technik, somit aus unserem Leben kaum weggedacht werden kann.

Dem schlichten Oberbegriff „Chemie" verbunden fühlen sich allein in Deutschland mehrere wissenschaftliche Gesellschaften.[1] Allein in der „Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V. (GDCh)" mit mehr als 30.000 Mitgliedern arbeiten 28 Fachgruppen und Sektionen, dazu Arbeitsgemeinschaften und gemeinsame Arbeitsgruppen mit anderen Fachgesellschaften, wie der „Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie (DECHEMA)" mit über 5.800 Mitgliedern sowie der „Deutschen Bunsengesellschaft für Physikalische Chemie" mit 1.300 Mitgliedern. Zum Beispiel wird die „Arbeitsgemeinschaft Theoretische Chemie" von drei wissenschaftlichen Gesellschaften zugleich getragen, der GDCh, der „Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG)" und der Bunsengesellschaft. Schon diese Differenzierung deutet ganz unterschiedliche Zielstellungen und Arbeitsweisen an. Sie sind zwar überwiegend naturwissenschaftlich ausgerichtet, oft aber auch – wie die DECHEMA – stark ingenieurmäßig-verfahrenstechnisch orientiert. Manche Syntheseprogramme für Substanzen mit besonderen Strukturen – etwa die Nachbildung der hochsymmetrischen Platonischen Körper Tetrahedran, Cuban, Dodecahedran – sind sogar künstlerisch-ästhetisch ambitioniert (Hoffmann 1995). In der Umkehrung finden Künstler in der Chemie Anregungen für ihre Werke, bis hin zu Ausstellungen „Chemie in Skulpturen" (Vízi 1990). Was noch das Ästhetische der Chemie betrifft, geht ein Biochemiker – zugegeben ziemlich euphorisch – sogar soweit, der chemischen Sprache (gemeint ist wohl vor allem die Formelsprache – D.L.) *„eine große ästhetische Schönheit"* zuzusprechen (Kornberg 1987).[2] – Jedenfalls haben sich bei aller Zugehörigkeit zur Chemie ihre vielen Richtungen so unterschiedlich entwickelt, dass „Einfachheit" wohl immer nur für Teilgebiete gelten könnte.

---

1 Internet-Abruf 15.06.2015.

2 Im Original: *„Chemical language has great esthetic beauty and links the physical sciences to the biological sciences."*

Im allgemeinen steht man der Chemie reserviert gegenüber, verbreitet ist der Wunsch, möglichst „alles ohne Chemie“ bekommen zu können. Wer aber erst einmal verinnerlicht hat, dass alles Leben in uns und das meiste Geschehen um uns herum wesentlich durch Chemie bestimmt wird[3], sollte einsehen, dass dieser Traum beim besten Willen nicht zu erfüllen ist. Zur Aversion gegen die Chemie trägt bei vielen das Gefühl der Unverständlichkeit der komplizierten Formelsprache bei, bei Schülern und Studienanfängern dazu noch die Abneigung vor den als zu schwer empfundenen Stöchiometrie- und anderen Textaufgaben. Selbige erfordern neben Elementarmathematik allerdings tatsächlich logisches Denken – welche Wissenschaft verlangt das nicht? – und dazu noch das ungewohnte Springen zwischen Stoff*massen* (z.B. in Milli*gramm*) und Stoff*mengen* (z.B. in Milli*mol*), also zwischen der alltäglichen „Makrowelt“ und der befremdlichen atomar-molekularen „Mikrowelt“ (Vogelezang/Rehm 2011). Hier durchdringen sich zwei Ebenen, die makroskopische der handhabbaren Substanzen und die mikroskopische, die zugrundeliegende Einheiten (Atome, Moleküle/Molekülteile, Elementarteilchen[4]) betrachtet, um die Prozesse besser verstehen zu können. Den der Chemie gegenüber Reservierten muss man allerdings zugestehen, dass chemische Prozesse schon angesichts der bisher bekannten über 100 Millionen Substanzen sehr mannigfaltig sind. Summa summarum: Die Hoffnung auf eine „einfache Chemie“ wird bei vielen nur gering sein!

3. Wie steht es um die Philosophie der Chemie?

Schon in der Frühzeit der Quantenmechanik verwies der englische Physiker Paul Adrian Maurice Dirac (1902–1984) darauf, dass zwar nun die gesamte mathematische Theorie der Chemie bekannt wäre, nur die überaus komplizierten Gleichungen nicht gelöst werden könnten (Dirac 1929). Implizit gilt damit damals wie heute, dass die Chemie in ihren Grundlagen nicht einfach auf Physik oder Mathematik zu reduzieren sei, sondern selbst spezifische Aspekte einbringe (Hoffmann 2007; Earley 2008; Brakel 2014). Dass Gebiete wie die theoretische Chemie oder die instrumentelle Analytik sehr stark durch Physik und Mathematik bestimmt werden, bleibt natürlich unbestritten.

---

3 Auch die GDCh ist hier um Aufklärung bemüht, z.B. durch (Mädefessel-Herrmann, Hammar, Quadbeck-Seeger 2004).

4 Bei den Elementarteilchen genügt dem Chemiker meist das klassische Trio „Elektron – Proton – Neutron“.

Was allerdings die Philosophie der Chemie betrifft, sind Chemiker über mindestens 150 Jahre weitgehend stumm geblieben; selbst für den größten Teil des 20. Jahrhunderts wird vom *„poor cousin“* gesprochen, dem armseligen Cousin der Wissenschaftsphilosophie (Bensaude-Vincent 2014). Der US-amerikanische Nobelpreisträger Roald Hoffmann (geb. 1937) sieht einen der Gründe für diese Blässe unserer Zunft im langen Nachwirken der strikten Ablehnung der um 1800 aufgekommenen Naturphilosophie (Hoffmann 1988), wie sie etwa Friedrich Wilhelm Joseph von Schelling (1775–1854) oder Henrik Steffens (1773–1845) vertraten. Deren Ansichten waren den deutschen Experimentalchemikern viel zu spekulativ. Bei Justus von Liebig (1803–1873) heißt es, *„die Thätigkeit, das Wirken der Naturphilosophen war die Pestilenz, der schwarze Tod des Jahrhunderts“* (Liebig 1840). Goethe, geneigt zu philosophischen Naturbetrachtungen, spricht dennoch von der „igelborstigen Metaphysik“, die Steffens in seinen „Grundzügen der philosophischen Naturwissenschaft“ (1806) ausgebreitet habe (Goethe 1806). Formulierungen wie *„der Diamant sei nichts anderes als ein zu sich selbst gekommener Quarz“* mussten praktische Chemiker natürlich abstoßen (Wöhler 1863). In der Sache gleich ablehnend, aber vornehm-akademisch äußerte sich Emil Du Bois-Reymond (1818–96) noch Jahrzehnte später, am 4. Juli 1872, in der Leibniz-Sitzung der Akademie der Wissenschaften, wie es aus einem von unserem Mitglied Siegfried Wollgast edierten Band hervorgeht (Wollgast 1974). Die Zeit war noch nicht reif für die heutige ausgewogene Bewertung (Ruben 1976). Nach Hoffmann führte das Vorbild von „Justus Liebig’s Annalen der Chemie“ über Deutschland weit hinaus zu einem sehr unpersönlichen Publikations-Stil, beschränkt auf die bloße Mitteilung gesicherter Befunde, ohne persönliche Eindrücke oder gar „Visionen“ der Autoren. Die Akzeptanz neuer „Theorien“ war nur sehr zurückhaltend; für philosophische Verallgemeinerungen fehlte sie lange ganz. – Solchen noch in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts spürbaren Defiziten tritt verdienstvoll die seit gut 20 Jahren erscheinende Zeitschrift HYLE[5] entgegen. Joachim Schummer (geb. 1963), von Anfang an als Herausgeber fungierend, legte auch eine einschlägige Bibliographie mit etwa 260 Arbeiten von DDR-Autoren vor (Schummer 1996), die einen Beitrag unseres Mitglieds Hubert Laitko (geb. 1935) ergänzt (Laitko 1995).

5 Gr. hyle, Materie, Urstoff im Sinne der ionischen Naturphilosophie.

4. Frühe Entwicklungsstufen der Chemie auf ihrem Wege zu einer ernstzunehmenden Disziplin

Károly Simonyi (1916–2001) bringt in seinem Kompendium zur Physikgeschichte ein Beispiel für eine moderne Reifeprüfung in Physik und nennt zu jeder Aufgabe die Jahreszahl zwischen 200 v. d. Zw. und 1850, in dem das jeweils zur Lösung benötigte Gesetz bekannt wurde. Danach hätte ein sehr gebildeter junger Mann schon 1690 etwa 50% der Punkte erreichen und mit Glück zum Studium zugelassen werden können (Simonyi 1995). In der Chemie wäre das undenkbar; vergleichbare Gesetze gab es bis 1690 nicht!

Das folgende Jahrhundert führte immerhin zu Erkenntnissen, die Antoine Laurent Lavoisier (geb. 1743, hingerichtet 1794) im Revolutionsjahr 1789 in seinem wahrlich auch die Chemie revolutionierenden Band „Traité élémentaire de chimie“ resümieren ließen:

> „Alle Wissenschaften bestehen notwendigerweise aus drei Dingen: Aus der Reihe der Fakten, die die Wissenschaft begründen, aus den Ideen, die sie auslösen, aus den Worten, durch die sie ausgedrückt werden“.

Um die Fortschritte in diesen 100 Jahren zu verstehen, sollten dem Dreiklang *Fakten/Ideen/Worte* noch mit Alexander von Humboldt (1769–1859) die in Band 2 seines „Kosmos“ erwähnten *„Ahnungen“* vorangestellt werden[6], etwa die *Prinzipien* der 5-, 4- und 3-Elementen-Lehren der frühen griechischen Atomistik bzw. der Alchemie. Die Versuche einer Zuordnung neuer realer Stoffe, also Elemente und Verbindungen im heutigen Sinne, zu den tradierten *Prinzipien* – Erde/Wasser/Feuer/Luft/(Äther) bzw. Quecksilber/Schwefel/Salz – hatten durch Mystizismus und bewusste Geheimniskrämerei zwangsläufig in eine Sackgasse geführt. Schon relativ früh erkannt hatte das Robert Boyle (1627–1691), der Mitbegründer der Royal Society, der in seiner Schrift „Der skeptische Chemiker“ (1661) wichtige Fragen stellte, wie sie im Anhang zum Nachdruck seines Werks zusammengefasst sind (Boyle 1983):

1. Ist das Feuer der „allgemeine Analysator“ aller Körper?
2. Sind die Erhitzungsprodukte, die man so erhält, wirklich Elemente oder Prinzipien?
3. Ist die Zahl der Produkte, die man als Elemente oder Prinzipien ansprach, wirklich drei oder vier oder fünf?
4. Gibt es wirklich das, was man Element Salz, Element Schwefel, Element Quecksilber nennen könnte?
5. Gibt es überhaupt wirkliche Elemente oder Prinzipien?

---

6 *„Überall geht ein früheres Ahnen dem späteren Wissen voraus.“*

Zwei Beispiele für die Zeitspanne zwischen dem späten 17. und dem Ende des 18. Jahrhunderts sollen belegen, wie diese *„Ahnungen“* eine systematische Zusammenstellung und Bewertung von Fakten anregten, auch wenn sie letztlich – mit dem Selbstbewusstsein von heute – nur als „empirische Erfolge unzutreffender theoretischer Ansätze“ (Carrier 1992) eingestuft werden. Dass allerdings damit verbundene Hypothesen dennoch wertvoll sind, brachte schon Georg Christoph Lichtenberg (1742–1799) in seinen Aphorismen in Erinnerung:

> „Man muss Hypothesen und Theorien haben, um seine Kenntnisse zu organisieren, sonst bleibt alles bloßer Schutt, und solche Gelehrten gibt es in Menge.“

4.1 Die „Phlogistonlehre“ zum Thema: Wie erfolgen Verbrennungsvorgänge?

Entsprechend der um 1700 von Georg Ernst Stahl (1659–1734) propagierten Lehre ist das Phlogiston (gr. das Brennliche) in allen brennbaren Stoffen enthalten. Es entweicht bei der Verbrennung. Das führt bei Schwefel zu Phlogiston und dephlogistiertem Schwefel (= Schwefeldioxid SO_2), bei Metallen zu Phlogiston und Metallkalk (= Metalloxid). Umgekehrt war Phlogiston zuzugeben, z.B. in Form von als reich daran geltender Kohle, um aus Metallkalk wieder das Metall zu erhalten. Das aus heutiger Sicht natürlich elementare Metall war in dieser Lehre also zusammengesetzt, das Metalloxid dagegen wurde als Element betrachtet. Quantitativ stand die Phlogistonlehre somit „auf dem Kopf“; sie verhält sich zur Oxidationslehre Lavoisiers wie das Ptolemäische System in der Astronomie zur Kopernikanischen Wende (Tab. 1).

Tab. 1: Vergleich fundamentaler Aussagen der Phlogistonlehre mit denen von Lavoisier zur Verbrennung

Aussagen von Stahl	Aussagen von Lavoisier
Die Verbrennung beruht auf dem Entweichen von Phlogiston	Die Verbrennung beruht auf einer Verbindung mit Sauerstoff
Wasser ist ein Element; seine Verbindungen mit der ebenfalls elementaren „Erde“ sind Säuren, Basen, Salze	Wasser ist kein Element
Die „Metallkalke“ sind Elemente	Die „Metallkalke“ (heute: Metalloxide) sind aus Metallen und Sauerstoff zusammengesetzt
Die Metalle sind Verbindungen aus den Elementen „Metallkalk“ und Phlogiston	Die Metalle sind keine Verbindungen, sondern Elemente

Mit Hilfe des ominösen, gar mit einer „negativen Masse“ behafteten Phlogiston ließen sich die heute *Redoxreaktionen* genannten Vorgänge als umkehrbare Prozesse formulieren. Diese qualitativ neue Grundlage der Chemie kann als erste chemische Theorie überhaupt gelten (Remane 2010). Ersetzt man heute Phlogiston durch das Elektron als reduzierendes Agens, erscheint alles durchaus plausibel. Auf der Suche nach reinem Phlogiston wurden viele neue Stoffe erschlossen, z.B. auch die Gase Sauerstoff und Wasserstoff entdeckt. So erwies sich eine 100 Jahre wirkende Hypothese zwar als falsch, aber doch als sehr nützlich, was uns an Friedrich Schillers Ausspruch erinnert: *„Wir gelangen nur selten anders als durch Extreme zur Wahrheit.“* – Extrem war auch das 1789 vom Ehepaar Lavoisier inszenierte Gericht: Der alte Mann „Phlogiston“ wurde nach Anklage durch den Jüngling „Sauerstoff“ zum Feuertod verurteilt, und Madame Lavoisier im Priestergewande verbrannte Schriften des schon 65 Jahre zuvor verstorbenen Angeklagten (Szabadváry 1973). Dessen ungeachtet existierte seine Lehre noch etliche Jahre neben der von Lavoisier (Chang 2010).

4.2 Die „Verwandtschaftstafeln“ zum Thema: Welche Stoffe reagieren miteinander?

Étienne-François Geoffroy der Ältere (1672–1731), erläuterte 1718 in Paris, vor der Königlichen Akademie der Wissenschaften, seine „Tables des différents rapports observés en chimie entre différents substances“, die sogenannten „Verwandtschaftstafeln“. Danach sei die Affinität einer bestimmten Substanz gegenüber einer anderen (d.h. ihre Neigung zur Reaktion, bei ihm umschrieben als „Rapport“) eine feststehende Größe:

> „Man bemerkt in der Chemie verschiedene Rapports unter den Körpern, welche verursachen, dass sich gewisse Substanzen mit dem einen Körper lieber verbinden als mit dem andern. ... Sind zwei Substanzen miteinander gemischt und kommt eine dritte hinzu, welche mit dem einen oder mit dem anderen Bestandteile näheren Rapport hat, so verbindet er sich mit ihm und lässt den anderen Bestandteil fahren. ... Dieses Gesetz ist von der äußersten Wichtigkeit in der Chemie: man kann fast keinen Schritt in derselben tun, ohne auf solche Rapporte zu stoßen. ...“ (Bugge 1961).

Eine solche Tafel (Diderots Enzyklopädie 1995) weist zum Beispiel 19 Spalten für die jeweiligen Stoffe (Elemente und Verbindungen) auf und nennt darunter in bis zu neun Zeilen die betreffenden Partner, und zwar so, dass jeweils der dem oberen Stoff nächststehende auch am meisten mit ihm wahlverwandt sei und die übrigen aus ihrer Verbindung ausscheide. So löst

CCD_61055-5-Inhalt

Salpetersäure (HNO_3) gut das Eisen, schlecht das Silber. Elementares Eisen, als Pulver eingerührt in eine Lösung von Silbernitrat, fällt also elementares Silber aus und geht selbst als Nitrat in Lösung. Man hoffte, über diese Tafeln alle Umsetzungen in ein brauchbares Schema einzuordnen; sie waren bis in das 19. Jahrhundert hinein beliebt, trotz schon früher einsetzender Kritik.[7] Claude Louis Comte Berthollet (1748–1822) teilte um 1800 mit, dass die Wahlverwandtschaft von der Temperatur abhängen müsse und von den Stoff-Konzentrationen, die bei ihm noch als „Massen" benannt wurden.

Leopold Gmelin (1788–1853) nennt in seinem Werk zur „theoretischen" Chemie (Gmelin 1817/19) als Synonyme „Chemische Kraft, Verwandtschaft, Wahlverwandtschaft, Wahlanziehung, affinitas, attractie electiva, affinité, Affinität." Die Affinität, die ja mit präzisierter Bedeutung (siehe 5.1) noch heute für die Triebkraft chemischer Reaktionen steht, wird in seinem Werk zentraler Begriff, so unbestimmt er auch noch war. – Mit dem Blick von heute konnten ohne tiefere Einsichten in Thermodynamik und Kinetik bestenfalls solche Reaktionen in ein Affinitäts-Schema passen, die ohne nennenswerte Aktivierungsenergie ablaufen, z.B. viele Reaktionen in wässriger Lösung (Neutralisations- und Redoxreaktionen). Die „Vereinfachung" zur Erklärung des Reaktionsgeschehens war also viel zu umfassend. Bis zum Affinitätsbegriff der Moderne (1882/84) von Hermann von Helmholtz (1821–1894) und Jacobus Henricus van't Hoff (1852–1911) war noch ein weiter Weg. Danach sollen Umsetzungen zwischen Stoffen immer dann freiwillig verlaufen, wenn – vereinfacht ausgedrückt – die freie molare Reaktionsenthalpie $\Delta_r G$ negative Werte annimmt: $\Delta_r G = \Delta_r H - \Delta_r S < 0$ (mit H = Enthalpie, S = Entropie, r für Reaktion).

Wie die Phlogistonlehre war das Konzept der Wahlverwandtschaft auf Dauer nicht zu halten, dennoch aber anregend, nicht nur für die damals gern als „Scheidekünstler" bezeichneten Chemiker selbst, sondern auch in literarischer und philosophischer Hinsicht, so 1809 bei Goethes Gesellschaftsroman „Wahlverwandtschaften" (Adler 1987) und fast zeitgleich bei Georg Wilhelm Friedrich Hegel (1770–1831), wenn er ausführt,

> „... bei dem chemischen Objekt gehört die ... Beziehung auf anderes und die Art und Weise dieser Beziehung seiner Natur an. ... Im Lebendigen steht das Geschlechtsverhältnis unter diesem Schema, so wie es auch für die geistigen Verhältnisse der Liebe, Freundschaft usw. die formale Grundlage ausmacht." (Hegel 1812)

7 So hatte Lavoisier 1789 den Ansatz in seinem „Traité" als zwar sehr wichtig bewertet, aber als noch allzu unausgereift.

4.3 Zurück zu den Fakten/Ideen/Worten

Oft zitiert wird die – damals schon nicht mehr ganz zutreffende – Meinung von Immanuel Kant (1724–1804), dass die Chemie wegen ihres Verzichts auf Mathematik *„eher systematische Kunst, als Wissenschaft heißen"* sollte (Kant 1786). Einer seiner Hörer, Jeremias Benjamin Richter (1762–1807), war motiviert, das in Ansätzen vorhandene quantitative chemische Experimentieren durch stärkeres Einbeziehen der Mathematik zu befördern. Bald nach seiner Habilitation „De uso matheseos in chymia" (1789) erschien ein dreibändiges Werk (Richter 1792), dessen Wirkung aber nicht überschätzt werden sollte. Ferenc Szabadváry (1923–2006) vermerkt, wie mühsam es schon im 1. Band war, die verworrenen Rechnungen zu verstehen. Band 2 und 3 lagen gar noch unaufgeschnitten in der Budapester Universitätsbibliothek (Szabadváry 1966). Ein Durchbruch im Sinne Kants war das Werk wohl nicht.[8]

Dennoch drängte das stürmische Anwachsen der experimentellen *Fakten* der „antiphlogistischen" Chemie auf neue Ideen der Verallgemeinerung, und zwar auch auf Grundlage neuer *Worte*, d.h. Begriffe und Systeme, etwa durch

- verbindliche Nomenklaturregeln, 1787 ausgearbeitet durch eine Viererkommission[9],
- die Neufassung des Elementbegriffs und die Vorlage einer Element-Tabelle 1789 (A. L. Lavoisier),
- das Gesetz der konstanten Proportionen 1794/99 (Joseph Louis Proust, 1754–1826),
- eine erste Tabelle von Atomgewichten[10] 1805 (John Dalton, 1766–1844),
- die Atomhypothese und das Gesetz der multiplen Proportionen 1808/09 (J. Dalton),
- die Avogadro-Hypothese 1811 (Amadeo Avogadro, 1776–1856),
- den Übergang zu weitgehend modernen Elementsymbolen 1813 (Jöns Jacob Berzelius, 1779–1848).

Damit gab es zwar gute Bedingungen, um neue Probleme anzugehen, die Entwicklung war aber nicht so folgerichtig, wie es die Reihe der Jahreszah-

---

8 Immerhin informierte Berthollet 1803 die Fachwelt über Richters Ergebnisse.

9 C. L. C. Berthollet, Antoine François de Fourcroy (1755–1809), A. L. Lavoisier, Guyton de Morveau (1737–1816).

10 Heute ist an sich statt „Atomgewicht" der Begriff „relative Atommasse" verbindlich, worauf hier verzichtet wird.

len erwarten ließe. Besonders störten die Kontroversen über die Atomgewichte und die daraus zu ermittelnden Molekular- und Äquivalentgewichte.

Tab. 2: Atomgewicht des Calciums (heute: 40,078 g/mol) zwischen 1808 und 1860 (Daten nach Kippenhahn 1998)

Jahr	1808	1810	1810	1814	1815	1827	1827	1828	1828	1835	1843	1845	1860
Arel	35	35	38	37,2	156	78	39,2	78,5	78	78,5	39	78	39

Um hierbei weiterzukommen, fand 1860 in Karlsruhe der 1. Internationale Chemikerkongress statt. Dort rückte die Verteilung einer 1858 entstandenen Schrift von Stanislao Cannizaro (1826–1910), „Sunto di un corso di Filosofia Chimica“[11], endlich den heuristischen Wert der Avogadro-Hypothese ins rechte Licht und befruchtete das spätere Wirken von Kongressteilnehmern wie Dmitrij Ivanovič Mendeleev (1834–1907) und Julius Lothar Meyer (1830–1895). Dennoch ging Jakob Volhard (1834–1910), ein bekannter Liebig-Schüler, hart ins Gericht mit dem um 1860 erreichten Stand:

> „Man hat sich in der Chemie daran gewöhnt, jede Anschauungsweise, die eine nur einigermaßen klare Vorstellung von chemischen Erscheinungen gibt, Theorie zu nennen. Über das Wesen der chemischen Kraft, über die Natur der Verwandtschaft gibt uns keine der neueren Theorien irgend welchen Aufschluss, von einer Theorie im wahren Sinne des Wortes kann also eigentlich nicht die Rede sein. ...“ (Volhard 1863)

5. Auswahl „wesentlicher“ Problemstellungen der Chemie im 19. und dem 1. Drittel des 20. Jahrhunderts

5.1 Warum reagieren Stoffe miteinander, warum mal mehr, mal weniger?

Affinität und klassische Thermodynamik wurden zwar in 4.2 erwähnt, das Volhard-Zitat nötigt uns aber, darauf zurückzukommen. Schließlich findet man selten derart gravierende Gegensätze zwischen Erwartung und Realität wie bei dem Begriff der chemischen Affinität. Heute wissen wir, dass viele Reaktionen unterbleiben, die eigentlich wegen $\Delta_r G < 0$ freiwillig ablaufen sollten. Ihrem tatsächlichen Ablauf stehen aber oft beträchtliche Aktivie-

11 „Abriss aus einem Lehrgang der philosophischen Chemie“; Italienisch war damals eine der gängigen Chemikersprachen.

rungsenergien entgegen, die von den Partnern allein nicht aufgebracht werden können.[12]

Stark gehemmt ist die Knallgas-Reaktion zwischen Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser: Ohne äußere Beeinflussung findet bei Raumtemperatur über nahezu unendlich lange Zeit *keine* Umsetzung statt. Umso größer war das Aufsehen, als Johann Wolfgang Döbereiner (1780–1849) berichtete, dass sich ein Luft-Wasserstoff-Gemisch im Kontakt mit feinverteiltem Platin augenblicklich entzündet (Döbereiner 1823). Diese nach den Worten des damaligen „Chemiepapstes" J. J. Berzelius *„in jeder Hinsicht wichtigste und, wenn ich mich des Ausdrucks bedienen darf, brillanteste Entdeckung im Laufe des vergangenen Jahres"* (Berzelius 1824/25) wurde auch chemiefernen Kreisen geläufig. Zehntausende Feuerzeuge (Abb. 1) zogen in die Haushalte ein, die es sich leisten konnten und nicht Angst hatten vor Schwefelsäure und Wasserstoff im Wohnzimmer.

Für dieses Beispiel einer reaktionsfördernden Wirkung und ähnliche spätere Belege prägte 1835 J. J. Berzelius den Ausdruck „Katalysis"; die

Abb. 1: Döbereiner-Feuerzeug in Funktion

Der aus Zink und verdünnter Schwefelsäure entwickelte Wasserstoffstrom mischt sich auf dem kurzen Weg zum Platinkontakt mit Luft; das Gemisch entzündet sich dort. Die sonst kaum sichtbare Wasserstoffflamme wurde durch etwas Kochsalz an der Austrittsdüse angefärbt (Foto D. Linke, 1964).

12 Zum Glück für uns ist das so, sonst würde organisch gebundener Kohlenstoff, also wir selbst wie auch Fauna und Flora insgesamt, durch Luftsauerstoff letztlich gemäß $C + O_2 \rightarrow CO_2$ in Kohlenstoffdioxid überführt!

zum Absenken der Aktivierungsenergie(n) führenden Stoffe wurden als *Katalysatoren* bekannt. Wie sie allerdings wirkten, blieb noch lange im Dunkeln. Heute verlaufen großtechnische Verfahren überwiegend katalytisch. Für die Ammoniak-Synthese nach Haber-Bosch (ab 1913), die für Düngemittel und somit für die menschliche Ernährung unverzichtbar wurde, testeten Alwin Mittasch (1869–1953) und Mitarbeiter etwa 3.000 Stoffgemische in knapp 20.000 (!) Prüfversuchen. Schließlich wurden „Mehrstoff-Schmelzkatalysatoren auf Basis Eisen“ ausgewählt. Erst fast 100 Jahre später war dann das Vielstufen-Reaktionsdiagramm dieser Synthese durch Gerhard Ertl (geb. 1936) und seinen Arbeitskreis aufgeklärt und 2007 mit dem Nobelpreis gewürdigt worden (Ertl 2008). Welch multidisziplinäre Zusammenarbeit und welch erheblicher apparativer Aufwand dafür notwendig war, belegt der Jubiläumsband über „100 Jahre Fritz-Haber-Institut“ (Steinhauser, James, Hoffmann, Friedrich 2011)!

Zur Frage der „Einfachheit“ bei dieser anscheinend simplen Reaktion, $N_2 + 3\ H_2 \rightarrow 2\ NH_3$: Zum Problem, von der Brutto*gleichung* zum Reaktions*mechanismus* vorzudringen, zitiert Hoffmann (1995) den schwedischen Chemiker Sture Forsén (geb. 1932), der einem Theaterbesucher die Aufgabe stellt, die „Hamlet“-Handlung zu erläutern, nachdem man ihm nur die Eröffnungs-Szene des ersten und die Schluss-Szene des letzten Akts zeigte. Kaum sind die Hauptpersonen eingeführt, fällt der Vorhang; hebt er sich wieder, sieht man „Leichen“ und Überlebende. *Was mag inzwischen geschehen sein?* – Da die Kompliziertheit des Ertl-Diagramms erst durch Einsatz modernster Methoden aufgeklärt werden konnte, sollte man frühere Interpretationsversuche für diesen Prozess und für andere Katalysen nachsichtig bewerten. Das „Ockham razor“, den scharfen Verstand als Erkenntnisprinzip (Hörz 2010), setzte man sicherlich ein im guten Glauben an nicht allzu komplizierte Verhältnisse. – Generell sollte man auch heute in der Chemie nicht zu früh „rasieren“; weiterführende Studien könnten neue Aspekte aufzeigen für den beschwerlichen Weg hin zum Wesentlichen (Hoffmann, Minkin, Carpenter 1997).

5.2 Welches ist das wahre Ordnungsprinzip für die wachsende Zahl der als chemische Elemente erkannten Stoffe?

Heute ist die Antwort natürlich trivial; die gewünschte Ordnung schafft das als Einstieg in die Welt der Chemie „einfache“ und gut verstandene Periodensystem der Elemente (PSE). Mühsam war aber der Weg zu ihm. Die Elemente nach ihrem Atomgewicht aufzureihen, war durch das Durchein-

ander der Atomgewichts-Skalen erschwert. – Hier kommt noch einmal Döbereiner ins Spiel, der zu Recht in der Garde der gut 200 „Fackelträger der Chemie“ figuriert (Smith 1949) und auch vom Deutschen Museum München in eine kleine Auswahl deutscher Forscher und Erfinder aufgenommen wurde (Anonym 1985). Die von Johann Wolfgang Goethe, dem Amts-Vorgesetzten Döbereiners, erbetene Analyse des in Dornburg/Saale anstehenden Coelestin (Strontiumsulfat $SrSO_4$) ergab 1816 das erste Beispiel für eine später so genannte Döbereinersche Triade, nämlich bei den Erdalkalimetallen Calcium – Strontium – Barium. Hier wächst das Atomgewicht so, dass der Wert für Strontium gerade das arithmetische Mittel der Werte für Calcium und Barium ist (Döbereiner 1816a).[13] Die bis 1829 hinzugekommenen Triaden, Lithium – Natrium – Kalium, Schwefel – Selen – Tellur sowie Chlor – Brom – Iod, ließen erahnen, dass sich über Element-Ähnlichkeiten die Reihe der Atomgewichte weiter strukturieren ließe.[14] Es vergingen aber noch 40 Jahre mit anderen Entwürfen, bis 1869 die Urform des heutigen PSE durch D. I. Mendeleev und kurz darauf durch J. L. Meyer vorgestellt wurde (Seubert 1895). Man schien dem *Wesentlichen* der Element-Systematisierung äußerst nahe gekommen zu sein! Mitnichten!! – Alle PSE-Varianten beruhten auf der Annahme, die Elemente nach ihrem steigenden Atomgewicht richtig anordnen zu können. Das war wiederum ein heuristisch sehr wertvoller, aber letztlich doch „unzureichender empirischer Ansatz“. Einige Elementpaare, wie Kalium/Argon, Iod/Tellur, Nickel/Cobalt, bekamen nämlich Plätze im System zugewiesen, die sich mit denen ihrer Nachbarn nicht vertrugen. Diese Diskrepanzen wurden erst im 20. Jahrhundert durch die Fortschritte der Atomphysik ausgeräumt. Danach „beschert“ gelegentlich die elementspezifische Isotopenverteilung dem Element mit der *niedrigeren* Ordnungszahl ein *höheres* Atomgewicht als dem Folge-Element, dann nämlich, wenn sein Anteil schwererer Isotope relativ hoch ist. Auch andere Probleme lösten sich mit

- dem Wirkungsquantum h (1899/1900) von Max Planck (1858–1947),
- den Atommodellen (1913/16) von Niels Henrik David Bohr (1885–1962) und Arnold Sommerfeld (1868–1951),

13 Relativ konsistente Atomgewichte konnte Döbereiner übrigens seiner großen (40 x 240 cm!), als Leporello gestalteten Tabelle mit eigenen Analysenwerten und Literaturangaben entnehmen (Döbereiner 1816b).

14 Zur zeitbedingten Begrenztheit des Triadenkonzepts sei verwiesen auf (Meyer 1895) und (Linke 1981).

– dem Nachweis und der Charakterisierung der „chemisch relevanten“ Elementarteilchen e, p, n (1897–1932)[15],
– dem Ausschließungsprinzip 1924/25 von Wolfgang Pauli (1900–1958),
– den Vorstellungen von Werner Heisenberg (1901–1976), Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger (1887–1961) und P. A. M. Dirac zur Quanten- bzw. Wellenmechanik 1925/27,

auf erstaunliche, keineswegs immer leichtverständliche Weise. Mit dem Moseleyschen Gesetz[16] (1913) gelang auch die eindeutige Ermittlung der Kernladungs-, also Ordnungszahlen der Elemente aus der jeweiligen Wellenlänge ihrer K_α-Röntgenlinie. Nun konnte man gezielt darangehen, bestehende Lücken im PSE zu schließen. – Für manche Naturwissenschaftler, wie zum Beispiel für den Zoologen und Naturphilosophen Max Hartmann (1876–1962), war durch diese Erfolge der Quantenmechanik *„die Chemie in Physik aufgegangen“* (Hartmann 1948). Manch andere folgten dieser reduktionistischen Auffassung nicht, wie sie ja eigentlich schon 1929 Dirac verworfen hatte (siehe 3.). Ergänzend zu den dort gegebenen Beispielen für die relative Eigenständigkeit der Chemie sei im Zusammenhang mit dem PSE noch verwiesen auf Scerri (2007). Nach ihm hatte Bohr 1913 für sein Modell selbst auch schon chemische Argumente genutzt.

6. Ist denn nun die heutige Chemie „einfach“?

Diese Frage ist auch deshalb nicht leicht zu beantworten, da „Einfachheit“ selbst viele Aspekte hat (Sommerfeld et al. 2010), mithin ähnlich unbestimmt ist wie manche der chemieüblichen Begriffe – Energie, Stabilität, Reaktivität, Bindung, Wertigkeit, Ladung –, die überhaupt erst nach Präzisierung einen heuristischen Wert bekommen.

Zunächst, nachdem wesentliches Rüstzeug durch Physik, Mathematik und durch die Chemiker selbst bereitgestellt worden war, ließ die „neue“ Chemie auch Quantensprünge erwarten, im übertragenen Sinne natürlich! Das quantenmechanisch begründete PSE hatte ja über die richtige Anordnung der Elemente hinaus auch neue Zugänge zum qualitativen Verständnis der Eigenschaftsverläufe innerhalb der Perioden bzw. der Haupt- und Nebengruppen gebracht. Wie chemische Bindungen durch Überlappung der kombinierenden Elektronenzustände zustande kommen, also zum näheren

15 Elektron (e) 1897 durch Joseph John Thomson (1856–1949), Proton (p) 1917 durch Ernest Rutherford (1871–1937), Neutron (n) 1932 durch James Chadwick (1891–1974).
16 Henry Gwyn Jeffreys Moseley (geb. 1887, gefallen 1915), britischer Physiker.

Verständnis der „Mikrowelt“ des Reaktionsablaufs, dazu hat die Quantenchemie sehr viel geleistet. Dennoch bleibt man für tiefere Einblicke in die Mannigfaltigkeit der Bindungs- und Strukturtypen einerseits, in die Reaktionsabläufe der Chemie andererseits, in der Regel auf mehr oder weniger weitgehende Näherungen angewiesen. Schon bei Nobelpreisträger Ilja Prigogine (1917–2003) heißt es verallgemeinernd:

> „Seit den Anfängen der abendländischen Wissenschaft haben wir in dem Glauben an die ‚Einfachheit' des Mikroskopischen gelebt, was immer diese mikroskopische Beschreibung besagen mag: Moleküle, Atome, Elementarteilchen. ... Wenn es in der Physik und Chemie irgendwo Einfachheit gibt, dann nicht in den mikroskopischen Modellen. Eher liegt sie in den idealisierten makroskopischen Darstellungen ...“ (Prigogine 1979/80)

Nach Schummer (2012) erfordert die Komplexität der Verhältnisse bei der „mathematischen Chemie“ – im Unterschied zur „mathematischen Physik“ – das enge Zusammenwirken der Theoretiker mit den Experimentalchemikern, wobei er ausdrücklich verweist auf den heuristischen Wert von Symmetriebetrachtungen, wie sie schon seit jeher Kristallographie bzw. Mineralogie beförderten.

6.1 Wie verinnerlicht der „normale“ Chemiker die Quantenmechanik? Wer hilft ihm dabei?

Der „normale“ Chemiker nutzt die Erkenntnisse der Quanten- bzw. Wellenmechanik mit einem gewissen Pragmatismus! Der Festkörperchemiker Hans Georg von Schnering (1931–2010) rechtfertigte das wie folgt:

> „Der Bauer, der zu Lebzeiten ernten will, kann nicht auf die ab-initio-Theorie des Wetters warten, Chemiker, wie Bauern, glauben an Regeln, verstehen aber diese listig nach Bedarf zu deuten.“ (Schnering 1981)

In der anorganischen Chemie kennt man z.B.: Mehrfachbindungsregel, Oktettregel, (8-N)-Regel nach Hume-Rothery, Radienquotientenregel, Schrägbeziehung. Dutzende weitere lassen sich nennen (Hardt 1987). Natürlich nimmt der Chemiker außer solchen Regeln auch das aus neuen Theorien auf, was ihm förderlich erscheint. Hilfestellung gaben ihm dabei seit über 70 Jahren begnadete, gleichermaßen in Chemie, Physik und Mathematik bewanderte Persönlichkeiten, indem sie versuchten, durch die Quantenmechanik die ausufernde Vielfalt und Komplexität der empirisch-experimentell erschlossenen stofflichen Welt zu „bändigen“.

CCD_61055_61055 - Sig006 - Inhalt_FB 005 - Schöndruck - DBg_5 - 22.01.2016 - Black

Eine besondere Rolle kam und kommt hier dem US-amerikanischem Chemie- und Friedens-Nobelpreisträger Linus Carl Pauling (1901–1994) zu, und das vor allem durch seine in viele Sprachen übersetzten und in mehreren Auflagen seit 1939 bzw. 1947 erschienenen Bücher (Pauling 1962a, b)[17].– Pauling, nach Promotion „summa cum laude“ als Guggenheim-Stipendiat 1926 für zwei Jahre nach Europa gekommen, um seine Studien bei A. Sommerfeld in München, N. Bohr in Kopenhagen und E. Schrödinger in Wien fortzusetzen, war bald vertraut mit der Quantenmechanik und darüber hinaus sehr motiviert, sie stärker auf die Chemie anzuwenden. Ihm war bewusst, dass die Darstellung des für Chemiker komplizierten Stoffes ein unkonventionelles Herangehen erfordere. 1939 heißt es im Vorwort zu seiner „Nature...“:

> „Obwohl nun viele der neueren Fortschritte der Strukturchemie der Quantenmechanik zu verdanken waren, reifte in mir der Gedanke, dass es gelingen müsste, die neueren Entwicklungen auch ohne höhere Mathematik gründlich und befriedigend darzustellen. ... Nur in ganz wenigen Fällen kam man z.B. durch exakte Lösung der Schrödinger-Gleichung zu chemisch bedeutungsvollen Ergebnissen. Vielmehr hat man die bisherigen Fortschritte in der Hauptsache durch weitgehend chemische Überlegungen erzielt – durch ein einfaches Postulat, das durch den Vergleich mit empirischen Befunden geprüft und dann zu Voraussagen verwandt wurde ... Beim Schreiben über ein so kompliziertes Gebiet fühlte ich mich in erster Linie verpflichtet, die Theorie der chemischen Bindung, so wie ich sie sehe, so einfach wie möglich darzustellen.“

Der Buchtext nennt bei aller Vereinfachung aber klar die dadurch bedingten Einschränkungen. Bei vielen Nutzern wurde und wird das oft nicht bedacht, z.B., wenn man etwa bei Eisen in den Oxidationsstufen Eisen(II) oder Eisen(III) glaubt, dass tatsächlich zwei- bzw. dreifach geladene Teilchen Fe^{2+} und Fe^{3+} in den Verbindungen existieren und dabei vergisst, dass nach der Elektroneutralitätsregel gemäß Pauling ein Ladungsausgleich zu deutlich kleineren effektiven Ladungen der vorliegenden Atome erfolgt.[18] – Im Vorwort späterer Auflagen wird die zunehmende Rolle der Quantenmechanik in der Chemie vermerkt, wenn auch weiterhin mit Einschränkungen. So heißt es 1959:

---

17 Dass im September 2014 auf der Tagung der „European Society for the History of Science“ in Lissabon eine Sektion speziell die Rolle der „Natur der chemischen Bindung“ behandelte, spricht für den überragenden Einfluss dieses Werkes!

18 Das bestätigen folgerichtig röntgenspektroskopische Bestimmungen der effektiven Ladungen.

> „Die meisten der hier aufgezeigten Gesetzmäßigkeiten sind recht unzureichende Näherungen und lassen nur selten quantitative Voraussagen zu. Doch haben wir bislang nichts Besseres ...“

Dementsprechend heißt es bei Hoffmann (1988) zur Gedankenwelt der Chemiker:

> „Die meisten nützlichen Konzepte in der Chemie sind unpräzise, z.B. die Aromatizität, die funktionelle Gruppe, der sterische Effekt und die Molekülspannung; reduziert auf Physik, verflüchtigen sie sich. Aber sie waren und sind der Quell wunderbarer Chemie.“

Und an anderer Stelle (Hoffmann/Laszlo 1991):

> „Wir [die Chemiker – D. L.] tendieren dazu, Moleküle so darzustellen, als seien sie normale Objekte des täglichen Lebens: Mit einer gewissen Größe, einer Härte oder Weichheit, mit messbaren Affinitäten zu anderen Atomen oder Elektronen und so weiter. Das ist etwas naiv, unvermeidbar und liebenswert – dem Glauben an Engel in vergangenen Jahrhunderten nicht unähnlich...“

Nehmen wir zur Illustration der Probleme der Chemie, Sachverhalte möglichst gut widerzuspiegeln, als Beispiel die Bindungspolarität bei Siliciumdioxid, einem der – in verschiedenen Modifikationen vorkommenden – häufigsten Stoffe der Erdkruste: Nach den Elektronegativitäts-Werten für Silicium und Sauerstoff kommt SiO_2 ein Bindungstyp zu mit etwa 50% Ionenbeziehungs- und 50% Atombindungs-Anteil. Die Zwickmühle wird offenbar: Soll man sich zur Beschreibung für ein Ionenmodell „Si^{4+}/O^{2-}“ entscheiden, für ein Kovalenzmodell „$Si^{\pm 0}O_2^{\pm 0}$“ oder für die zutreffendere, aber vage Aussage „weder/noch“? Beide Extreme sind jedenfalls gleichermaßen „weltfremd“, da die effektive Ladung für Sauerstoff in SiO_2 zu etwa –0,8 ermittelt wurde, für Silicium zu ungefähr +1,7. Ähnlich diffus vollzieht sich in der Fachliteratur auch die Aufteilung der hochgenau messbaren Bindungslängen (Atomkernabstände) auf Atom- oder Ionenradien, wobei man sich auf einen einmal festgelegten Radius für ein Bezugs-Ion oder -Atom bezieht, der dann die Ermittlung des anderen „Radius“ ermöglicht. Wilhelm Ockham würde ein solches Verfahren sicher energisch ablehnen und die Methode der Festkörperphysiker empfehlen, gleich nur mit den gemessenen Abständen zu arbeiten! Da aber für eine erste Einführung in die geometrische Kristallchemie und für die Stoffsystematisierung konstante Radien und fiktive Teilchenladungen bequem sind, verfährt man oft genug so. – Hier haben wir eines der zahlreichen Beispiele dafür, dass man sich zugunsten einer angestrebten „Einfachheit“ bewusst von der Wahrheit entfernt, im

Sinne einer Simplifizierung der komplexen Sachverhalte. Vielleicht sollte man als „Pragmatismus“ benennen, was die Chemie nicht selten wissentlich auf an sich überholten oder aus Sicht der Physik unzulässigen Prämissen ruhen lässt. – Zumindest für die Lehre wie auch für die Anwendbarkeit chemischer Kenntnisse in Nachbardisziplinen ist das eine Erleichterung, obwohl sie für den Erkenntnisfortschritt nicht gerade förderlich ist.

Oft wird also das „chemische Gefühl“ (*„Wenn ihr's nicht fühlt, ihr werdet's nicht erjagen“!*) der Leitstern. Wie man dieses Jonglieren zwischen logischem Denken und Intuition entwickelt, steht auf einem anderen Blatt. Die sehr umfangreichen Laborpraktika, die früher unseren Studienalltag ausfüllten, waren auf jeden Fall hilfreich, die Theorien der Lehrbücher an den praktischen Erfahrungen zu erproben. Mir selbst, 1958 an der Jenaer Universität immatrikuliert, ist der Übergang von der naturgemäß noch klassisch-stofforientierten Anfänger-Vorlesung für Haupt- und Nebenfächler zu einer auch quantenmechanischen Fundierung des Lehrstoffs noch gut in Erinnerung. Zu dem eindringlichen Rat des Assistenten, in den Semesterferien die Paulingsche „Chemie – Eine Einführung“ zu exzerpieren, kamen die neuartigen Vorlesungen, die uns geboten wurden durch den 1959 nach Jena berufenen Anorganiker, unser Mitglied Lothar Kolditz (geb. 1929), durch seinen Physikochemiker-Kollegen Heinz Dunken (1912–1974), ab 1963 auch durch Roland Paetzold (1931–1982). Im Diplomjahr 1963 war ich dann sehr beeindruckt, wie treffend sich Christa Wolf (1929–2011) in ihrer bekannten Erzählung „Der geteilte Himmel“ zur Wissenschaftlichkeit der Chemie äußerte. Den Chemiker Manfred lässt sie wie folgt zu Wort kommen: *„Überhaupt hat mir seitdem nichts richtigen Spaß gemacht. Bloß mein Beruf, der ist gut. Gerade genug Exaktheit, gerade genug Phantasie.“* (Wolf 1963) – Die „normalen“ Chemiker haben trotz der ihnen damit bescheinigten Exaktheits-Defizite keine Minderwertigkeitskomplexe. Man kann ihnen jedenfalls auch nicht nachsagen, wie weiland Karl Marx den Philosophen, sie hätten die Welt nicht verändert, wenn auch die Losung der DDR-Chemiekonferenz (1958), *„Chemie bringt Brot, Wohlstand, Schönheit!“*[19], einfacher formuliert als realisiert war und Schadensfälle in der chemischen Industrie und in Laboratorien oft genug zu Negativ-Schlagzeilen führten.

19 Vielleicht sollte man „Gesundheit“ ergänzen, angesichts der durch die Chemie erheblich gestiegenen Lebenserwartung!

6.2 Wie einfach kann man die räumliche Struktur chemischer Elemente und Verbindungen darstellen?

Ein wesentliches Stück „Einfachheit“ reklamiert die Chemie für sich durch ihre international verbindliche Nomenklatur und die zugehörige Formelsprache. Einfach ist es auch seit langem, durch verschiedene Verfahren der Elementaranalyse die Bruttoformeln der Stoffe zu bestimmen, etwa $C_6H_{12}O_6$ für das Monosaccharid Glucose (Traubenzucker) oder $C_{12}H_{22}O_{11}$ für das Disaccharid Saccharose (Rohr- oder Rübenzucker). Wesentlich schwieriger war es dagegen, die oft komplizierten Strukturen der Stoffe zu ermitteln und darüber hinaus, sie anschaulich bildlich darzustellen. Heute sind Strukturaufklärungen instrumentell meist eindeutig möglich, sofern die teuren Geräte und die zugehörigen Spezialisten verfügbar sind.

Nun zu der Darstellung der Strukturen der jeweiligen Stoffe: Sie wird – besonders in der organischen und Biochemie – umso komplizierter, je besser sie für die jeweilige Substanz die tatsächliche Elektronendichte und deren Verteilung um die verknüpften Atomkerne widerzuspiegeln versucht. Da somit „Einfachheit“ und „Wahrheit“ gegenläufig zueinander stehen, sind offensichtlich Kompromisse nötig. Jede der verschiedenen Struktur-Visualisierungen ist weder ganz richtig noch ist sie völlig falsch. Das klingt paradox, muss also begründet werden: Übliche Chemielehrbücher zeigen Strukturformeln zweidimensional in der Papierebene oder deuten in perspektivischer Zeichnung die dreidimensionale Verknüpfung der Atome im Raum an. Auch findet man schon in älteren Werken stereoskopische Darstellungen, die allerdings Übung erfordern, um die für das linke bzw. rechte Auge gezeichneten Bilder zusammenzuführen. Sehr erleichtert wurde das durch Zweifarben-Anaglyphen-Raumbilder, die mit entsprechender Brille zu betrachten sind. Wesentlich weiter gehen heute Computer-Programme, die am Bildschirm Molekülstrukturen und Kristallgitter in beliebigen Richtungen zeigen.

Unschlagbar für das „Begreifen“ im wörtlichen Sinne sind natürlich Baukästen zum Zusammenstecken der jeweiligen Anordnungen. Einfach zu gestalten sind Kugel-Stab-Modelle mit Kugeln, die entsprechend der Anzahl ihrer Nachbarn Bohrungen enthalten; über die Stablänge können auch die gemessenen Kernabstände repräsentiert werden. Noch anschaulicher sind Kalotten-(Kugelkappen-)Modelle insofern, als sie veranschaulichen, wie sich die Elektronenhüllen benachbarter Atome durchdringen (Abb. 2). Über die näherungsweise festgelegten Wirkradien wird immerhin ein „Gefühl“ für Gestalt und Raumbedarf der Moleküle vermittelt. So kann man

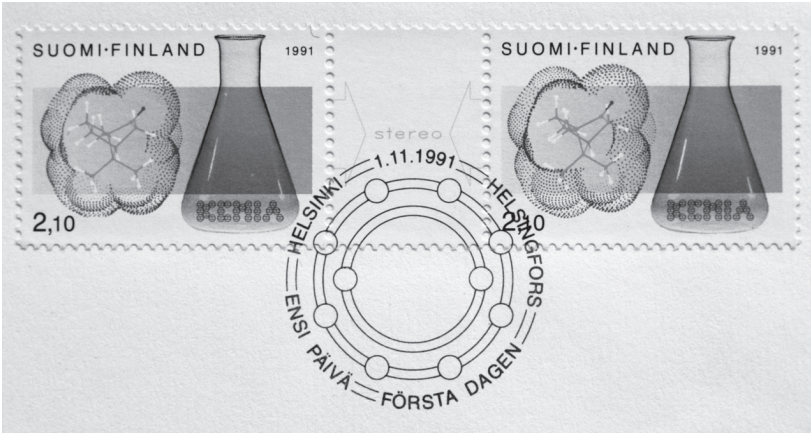

Abb. 2: Kalottenmodell des Camphers (s. Text)

sich am Modell Klarheit verschaffen über mögliche Isomere oder Konformere.[20] Da die Elektronendichten um die Atome nicht abrupt auf Null abfallen, wie es durch die Kalotten impliziert wird, wären Modelle aber erst dann „wahr", wenn sie nur die Kernabstände im Raum andeuteten und durch Punktwolken unterschiedlicher Dichte die Elektronen-Aufenthaltswahrscheinlichkeiten um sie herum. Mit solchen „Punkthaufen" auf den Lehrbuchseiten ist dann allerdings jede Anschaulichkeit verlorengegangen, der Sinn des Modells hat sich in Widersinn verkehrt. Somit bleiben Kalottenmodelle sowie Kugel-Stab-Modelle, die auch für den Aufbau von Kristallgitter-Modellen günstig sind, wohl der beste Kompromiss.

Die Anschaulichkeit der einzelnen Strukturmodelle wird bei Hoffmann (1997[21]) am Beispiel von Campher diskutiert. Dass dieser seit langem bekannte Stoff trotz der einfachen Summenformel $C_{10}H_{16}O$ des Moleküls strukturell nicht ganz leicht zu erschließen ist, ergibt sich schon aus seiner nomenklaturgerechten Bezeichnung als 1,7,7-Trimethyl-bicyclo[2.2.1]heptan-2-on. Von Campher hat sich 1991 auch die finnische Post inspirieren lassen, um des Jahrhundert-Jubiläums der Finnischen Chemischen Gesellschaft zu gedenken (Abb. 2). Auf der stereoskopisch zu betrachtenden Dop-

20 *Isomere:* Unterschiedliche Verknüpfung der Atome bei gleicher Summenformel; *Konformere:* Bei gleicher Atomverknüpfung mögliche unterschiedliche Anordnung von Molekülteilen durch Drehen um Einfachbindungen.

21 Das viel hochwertiger gedruckte US-amerikanische Original „The same and not the same" erschien 1995.

pel-Briefmarke ist ein Kalottenmodell des Camphers abgebildet, durch „Kemia“ und einen Erlenmeyer-Kolben immerhin ein Bezug zur Chemie angedeutet. Auf Marke wie Ersttagsbrief fehlt allerdings jeder Hinweis, dass es sich um Campher handle!

6.3 Nur manches an der Chemie ist einfach, aber nützlich wären Grundkenntnisse schon!

Die Chemie ist insofern „einfach“, als es mit Motivation und Ausdauer möglich ist, ihre wesentlichen Grundlagen und Zusammenhänge zu erkennen und anzuwenden. Das betrifft zum Beispiel

- als Einstieg in die stoffliche Vielfalt der Welt das Periodensystem der Elemente mit den implizit enthaltenen Eigenschafts-Variationen,
- ihre Nomenklatur, besonders bei nicht allzu komplizierten Verbindungen,
- ihre Neigung, durch geeignete Modelle die Strukturen und Symmetriemerkmale von Molekülen und Kristallgittern möglichst anschaulich wiederzugeben, auch Mess-Ergebnisse zu Eigenschaftsänderungen, Reaktionsverläufen möglichst übersichtlich graphisch darzustellen.[22]

Einer meiner Kommilitonen aus alter Zeit antwortete mir unlängst auf meine Anfrage zur „Einfachheit in der Chemie“ in aller Kürze: *„Einfach ist für mich alles, was ich verstanden habe!“* Das gefiel mir als Kriterium! Für ihn als Biochemiker ist folglich der Beitrag unseres Mitglieds Sabine Müller in Band 108 der „Sitzungsberichte“ angenehm-leichte Kost (Müller 2010), für mich, als Anorganiker fern der Biochemie angesiedelt, leider nicht! – Für eine breite Öffentlichkeit wäre unsere generelle Fragestellung dann vielleicht einzuengen auf: *„Was ist für den mündigen Bürger so wichtig in der Chemie, dass es ihm unbedingt verständlich gemacht werden müsste?“* – Derzeit hat man leider schon den Eindruck, dass es für viele Eltern und Schüler hier nur wenig Wichtiges geben könne. Sobald in den höheren Schuljahren das Fach Chemie „abgewählt“ werden kann[23], geschieht das bei über 90% der deutschen Gymnasiasten. Auch an zuständigen Stellen – deren es wegen der weitgehenden Kultur- und Bildungshoheit der einzelnen Bundesländer in Deutschland bekanntlich viele gibt! – sinkt der Stellenwert des Faches. Hierzu heißt es im „Grußwort zum Jahreswechsel 2014/15“ des

22 Ein Fachvortrag in der Chemie ist ohne entsprechende Gleichungen, Formelbilder und Diagramme schwer vorstellbar.

23 Mancherorts wohl sogar muss!

CCD_61055_61055 - Sig006 - Inhalt_FB 005 - Widerdruck - DBg_5 - 22.01.2016 - Black

Vorsitzenden der GDCh-Fachgruppe Chemieunterricht: Man darf *„als deutscher Chemiker befürchten, dass das Fach Chemie in immer mehr Bundesländern in einer Modulbox namens NaWi (Naturwissenschaften) verschwindet und vielleicht niemals wiederauferstehen wird“* (Schleid 2015).

Dass es trotz alledem notwendig und lohnend erscheint, zu wichtigen Fragen der Gegenwart Chemiekenntnisse zu erwerben, dazu abschließend zwei Meinungen von prominenten Fachkollegen:

Heinzwerner Preuß (geb. 1925) vertritt in seinem Buch zur Quantenchemie deren große Bedeutung für unser Denken und Handeln (Preuß 1997):

> „Je mehr ich in den Jahren über die Konsequenzen unseres Naturverständnisses im Rahmen der Wellenmechanik nachdachte, desto mehr wurde mir bewusst, wie vielschichtig die Erkenntnisse sind und wie weitreichend sie unser Leben beeinflussen.“

Die Darstellung des Autors basiert – äußerst verknappt ausgedrückt – auf der Feststellung, dass selbst die komplexesten Strukturen, etwa die des menschlichen Gehirns, aus Atomkernen und Elektronen bestehen und damit aus demselben „Substrat“ wie Moleküle, Viren, Bakterien, Pflanzen und Tiere. Da die Heisenbergsche Unschärferelation im Mikrokosmos ein nicht streng kausales Verhalten in Raum und Zeit konstatiert, ergeben sich Spielräume für Mutationen und eine Weiterentwicklung im Sinne der Evolution:

> „So kann naturwissenschaftliches Wissen – wenn verstanden und zur Einsicht geführt – schon die Grundlage einer Moral und einer Ethik sein. ... Ich bin mir sicher, dass sich auch schon hier der Anfang für eine Sinngebung unserer Existenz finden lässt, soweit es überhaupt möglich ist.“

Zur wünschenswerten Mitentscheidung der Bürger bei chemierelevanten Vorhaben (Hoffmann 1997):

> „... Meine Besorgnis über das chemische Analphabetentum, einem Fehler unseres Bildungssystems, hat zwei andere Ursachen. Erstens: Wenn wir die Funktionsprinzipien unserer Umwelt – insbesondere der Teile dieser Umwelt, die wir selbst hinzugefügt haben – nicht kennen, werden wir entfremdet. Die Entfremdung aus Mangel an Wissen lässt uns verarmen. Sie führt dazu, dass wir uns impotent, handlungsunfähig fühlen. ... Meine zweite Befürchtung bezüglich der chemischen Unwissenheit führt mich zurück zur Demokratie. Die Unkenntnis chemischer Zusammenhänge hemmt den demokratischen Prozess. Ich glaube zutiefst, ... dass die ‚gewöhnlichen Leute’ befähigt werden müssen, Entscheidungen zu treffen, – über Gentechnik oder Mülldeponien, gefährliche oder sichere Fabriken oder darüber, welche Suchtmittel unter Kontrolle behalten werden sollten und welche nicht. Über Vorteile und Nachteile, Möglichkeiten, Nutzen und

> Risiken können sich die Bürger von Experten beraten lassen. Aber nicht die Fachleute haben die Vollmacht, sondern das Volk und seine Vertreter."

Im Klappentext zur deutschen Ausgabe dieses Buches wird ein Rezensent, R. M. Baum, zitiert:

> „Welcher Chemiker hat nicht schon vergeblich versucht, Familie oder Freunden seine Wissenschaft zu erklären? Aus diesem Dilemma erlöst ihn Hoffmanns Buch."

Gibt das nicht doch etwas Hoffnung zurück, dem Dante-Verdikt im Titel nicht unbedingt folgen zu müssen? – Wer die dennoch erforderliche Mühe scheut, auch dem gibt Hoffmann zu bedenken, dass selbst befähigte

> „neue Chemiker, brillante Verwandler unserer Natur, ... nicht das verwirklichen können, dessen sie fähig sind, wenn wir ihren Freunden und Nachbarn – den 99,9 Prozent der Leute, die keine Chemiker sind – nicht beibringen, was die Chemiker da eigentlich tun."

7. Nachbemerkung: Ein wenig eigene Hoffnung

Es gelang mir nicht, den Herausgebern des Vorläuferbandes zur „Einfachheit als Wirk-, Erkenntnis- und Gestaltungsprinzip" (Sommerfeld, et al. 2010) mit einer entsprechend systematischen Dreiteilung dieses Beitrags für klare Wirk-, Erkenntnis- und Gestaltungsprinzipien der Chemie entgegenzukommen. Mir erscheint meine Disziplin zwar durchaus als zielgerichtet-systematisch, aber eben auch als kompromissbereit-pragmatisch. – So bleibt mir nur die Hoffnung, dass einige Aspekte des Beitrags doch nützlich für weitere Diskussionen sein können.

Literatur

Adler, Jeremy (1987), Eine fast magische Anziehungskraft, Goethes „Wahlverwandtschaften" und die Chemie seiner Zeit, 260 S. München: Verlag Beck

Anonym (1985), Forscher und Erfinder aus Naturwissenschaft und Technik im Deutschen Museum, S. 48–49. Bonn: Verlag Inter Nationes

Bensaude-Vincent, Bernadette (2014), Philosophy of Chemistry or Philosophy with Chemistry. HYLE – Int. J. for Philosophy of Chemistry, Jg. 20, 1, S. 58–76

Berzelius, Jacob (1825), Jahresbericht [für 1823 – D.L.] über die Fortschritte der physischen Wissenschaften, 4. Jahrgang, aus dem Schwedischen übersetzt von Friedrich Wöhler, S. 60f. Tübingen: Verlag Heinrich Laupp

Boyle, Robert (1983), Der skeptische Chemiker, Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften 229, Reprint der 1. Ausgabe von 1929, S. 103–105. Leipzig: Akad. Verl.-ges. Geest & Portig

Brakel, Jaap van (2014), Philosophy of Science and Philosophy of Chemistry. HYLE – Int. J. for Philosophy of Chemistry, Jg. 20, 1, S. 11–57

Bugge, Günther (1961), Das Buch der großen Chemiker, Erster Band, S. 221. Weinheim: Verlag Chemie

Carrier, Martin (1992), Cavendishs Version der Phlogistonchemie oder: Über den empirischen Erfolg unzutreffender theoretischer Ansätze, in: Mittelstraß, Jürgen; Stock, Günter (Hg.), Chemie und Geisteswissenschaften, Versuch einer Annäherung, S. 35–52. Berlin: Akademie-Verlag

Chang, Hasok (2010), The Hidden History of Phlogiston, How Philosophical Failure Can Generate Historiographical Refinement. HYLE – Int. J. for Philosophy of Chemistry, Jg. 16, 2, S. 47–79

Coutelle, Charles (2014), Die verführerische Illusion einfacher Konzepte – Kritische Betrachtungen zum Prinzip Einfachheit an Hand von Beispielen aus Molekularbiologie und Medizin, Kurzfassung des Vortrags am 20.11., Leibniz-Sozietät der Wissenschaften

Diderots Enzyklopädie (1995), Die Bildtafeln 1762–77, Erster Band, Tafel 538/539 Laboratoire et table des rapports. Augsburg: Weltbild-Verlag

Dirac, Paul Adrian Maurice (1929), Quantum Mechanics of Many-Electron Systems. Proc. of the Royal Society A 123, S. 714–33, hier S. 714

Döbereiner, Johann Wolfgang (1816 a), Brief an Johann Wolfgang von Goethe vom 30.09. 1816

Döbereiner, Johann Wolfgang (1816 b), Darstellung der Verhältniszahlen der irdischen Elemente zu chemischen Verbindungen (erweiterte Neufassung 1823). Jena: Crökersche Buchhandlung

Döbereiner, Johann Wolfgang (1823), Ueber neu entdeckte höchst merkwürdige Eigenschaften des Platins und die pneumatisch-capillare Thätigkeit gesprungener Gläser, ein Beitrag zur Corpuscularphilosophie. Jena: Verlag A. Schmid

Earley, Joseph E. (2008), How Philosophy of Mind needs Philosophy of Chemistry. HYLE – Int. J. for Philosophy of Chemistry, Jg. 14, 2, S. 1–26

Ertl, Gerhard (2008), Reaktionen an Oberflächen, Vom Atomaren zum Komplexen (Nobelvortrag). Angewandte Chemie Jg. 120, S. 3578–90

Gmelin, Leopold (1967), Handbuch der theoretischen Chemie, werkgetreuer Nachdruck der 1. Auflage (1817/19), 3 Bände, 1588 Seiten. Weinheim/Bergstr.: Verlag Chemie

Goethe, Johann Wolfgang von (1806), Brief vom 22.08. an Wilhelm von Humboldt in Rom

Hardt, Horst-Dietrich (1987), Die periodischen Eigenschaften der chemischen Elemente (2. Aufl.), 313 S. Stuttgart/New York: Georg Thieme Verlag

Hartmann, Max (1948), Die philosophischen Grundlagen der Naturwissenschaften, Erkenntnistheorie und Methodologie, 240 S., hier S. 171. Jena: Verlag G. Fischer

Hegel, Georg Friedrich Wilhelm (1965), Wissenschaft der Logik (1812/16), 2. Band: Die subjektive Logik, 3. Buch: Die Lehre vom Begriff, S. 215. Leipzig: Reclam-Verlag

Hörz, Herbert (2010), Philosophischer Reduktionismus oder wissenschaftlich berechtigte Reduktionen? Zu den erkenntnistheoretischen Grundlagen des Prinzips Einfachheit, in: Sitzungsberichte Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Band 108, S. 11–36

Hoffmann, Roald (1988), Die chemische Veröffentlichung – Entwicklung oder Erstarrung im Rituellen? Angewandte Chemie, Jg. 100, S. 1653–1663

Hoffmann, Roald; Laszlo, Pierre (1991), Darstellungen in der Chemie – die Sprache der Chemiker. Angewandte Chemie, Jg. 103, S. 1–16

Hoffmann, Roald (1995), Die Chemie zwischen Natur und Ideal. Spektrum der Wissenschaft, Digest Moderne Chemie, S. 8–17

Hoffmann, Roald (1997), Sein und Schein – Reflexionen über die Chemie, S. 226 f. Weinheim: VCH Verl.-ges.

Hoffmann, Roald; Minkin, Vladimier I.; Carpenter, Barry K. (1997), Ockham's Razor and Chemistry. HYLE – Int. J. for the Philosophy of Chemistry, Jg. 3, S. 3–28

Hoffmann, Roald (2007), What might philosophy of science look like if chemists built it? Synthese 155, S. 321–336

Kant, Immanuel (1786), Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft, S, 4. Riga: J. F. Hartknoch

Kippenhahn, Rudolf (1998), Atom – Forschung zwischen Faszination und Schrecken, S. 51. München: Verlag Piper

Kornberg, Arthur (1987), The Two Cultures, Chemistry and Biology. Biochemistry, Bd. 26, S. 6888

Laitko, Hubert (1996), Chemie und Philosophie: Anmerkungen zur Entwicklung des Gebietes in der Geschichte der DDR, in: Psarros, N.; Ruthenberg, K.; Schummer, J. (Hg.), Philosophie der Chemie. Bestandsaufnahme und Ausblick, S. 32–58. Würzburg: Verlag Königshausen & Neumann

Liebig, Justus von (1840), Ueber das Studium der Naturwissenschaften und über den Zustand der Chemie in Preußen, S. 29. Braunschweig

Linke, Dietmar (1981), Johann Wolfgang Döbereiner und sein Beitrag zur Chemie des 19. Jahrhunderts, Zeitschrift für Chemie, Jg. 21, S. 309–319

Lutz, Bernd (1996), Chemie lehren – Balanceakt zwischen Vereinfachung und Komplexität, Naturwissenschaften im Unterricht – Chemie, Jg. 7, Nr. 36, S. 4–8

Mädefessel-Herrmann, Kristin; Hammar, Friederike; Quadbeck-Seeger, Hans-Jürgen (2004), Chemie rund um die Uhr, 231 S., Weinheim: Verlag Wiley-VCH

Meyer, Lothar {Hg.} (1895), Johann Wolfgang Döbereiner, Max Pettenkofer, Die Anfänge des natürlichen Systems der chemischen Elemente, in: Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften. Leipzig: Verl. W. Engelmann (Reprint Leipzig 1983: Akad. Verl.-ges. Geest & Portig)

Müller, Sabine (2010), Einfachheit biochemischer Komplexität – ein Widerspruch? In: Sommerfeld, Erdmute; Hörz, Herbert; Krause, Werner (Hg.) (2010), Einfachheit als Wirk-, Erkenntnis- und Gestaltungsprinzip, Sitzungsberichte Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Band 108, S. 57–65

Pauling, Linus (1962 a), Die Natur der chemischen Bindung. Weinheim: Verlag Chemie (dt. Übersetzung der 3. Aufl. von: The Nature of the Chemical Bond and the Structure of Molecules and Crystals, 1960 Cornell Univ. Press [1. Aufl. 1939])

Pauling, Linus (1962 b), Chemie – Eine Einführung (4. Aufl.), Weinheim: Verlag Chemie (dt. Übersetzung der 2. Aufl. von: General Chemistry, 1953; 1. US-amer. Aufl. 1947, 1. dt. Aufl. 1956)

Preuß, Heinzwerner (1997), Materie ist nicht materiell, Die Bedeutung der Quantenchemie für unser Denken und Handeln, 239 S., Braunschweig/Wiesbaden: Verlag Vieweg (Zitate im Text S. VI, S. 206 f.)

Prigogine, Ilja (1979/80), Vom Sein zum Werden – Zeit und Komplexität in den Naturwissenschaften (Vorwort). München: Verlag Piper

Remane, Horst (2010), Die Phlogistontheorie von Georg Ernst Stahl, Katalysator für die Herausbildung der modernen wissenschaftlichen Chemie? CHEMKON – Chemie konkret, Forum f. Unterricht u. Didaktik, Jg. 17, S. 75–78

Richter, Jeremias Benjamin (1792), Anfangsgründe der Stöchyometrie oder Meßkunst chymischer Elemente. Breslau/Hirschberg: Verlag J. F. Korn der Ältere

Ruben, Peter (1976), Zur Kritik der romantischen Naturphilosophie F. W. J. Schellings, Wiss. Z. d. FSU Jena, Jg. 25, 1, Ges. u. Sprachw. R., S. 83–89

Scerri, Eric S. (2007), The Periodic Table: Its Story and Its Significance, 368 S., Oxford: Oxford Univ. Press

Schleid, Thomas (2015), Grußwort zum Jahreswechsel 2014/15, CHEMKON – Chemie konkret, Forum f. Unterricht u. Didaktik, Jg. 22, S. 5–6

Schnering, Hans Georg von (1981), Homonucleare Bindungen bei Hauptgruppenelementen. Angewandte Chemie, Jg. 93, S. 44–63

Schummer, Joachim (1996), Bibliographie chemiephilosophischer Literatur der DDR. HYLE, Mitt.-blatt des Arbeitskreises „Philosophie und Chemie“ 2, S. 3–11

Schummer, Joachim (2012), Why Mathematical Chemistry Cannot Copy Mathematical Physics and How to Avoid the Imminent Epistemological Pitfalls. HYLE – Int. J. for the Philosophy of Chemistry, Jg. 18, 1, S. 71–89

Seubert, Karl {Hg.}(1895), Lothar Meyer, D. Mendelejeff, Das natürliche Systems der chemischen Elemente, in: Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften. Leipzig: Verl. W. Engelmann (Reprint Leipzig 1983: Akad. Verl.-ges. Geest & Portig)

Simonyi, Károly (1995): Kulturgeschichte der Physik, von den Anfängen bis 1990 (2. Aufl.), S. 71. Thun/Frankfurt am Main: Verlag H. Deutsch

Smith, Henry Monmouth (1949), Torchbearers of Chemistry, Portraits and Brief Biographies of Scientists Who Have Contributed to the Making of Modern Chemistry, S. 77. New York: Academic Press

Sommerfeld, Erdmute; Hörz, Herbert; Krause, Werner {Hg.}(2010), Einfachheit als Wirk-, Erkenntnis- und Gestaltungsprinzip, 166 S. Sitzungsberichte Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Band 108

Steinhauser, Thomas; James, Jeremias; Hoffmann, Dieter; Friedrich, Bretislav (2011), Hundert Jahre an der Schnittstelle von Chemie und Physik, Das Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft zwischen 1911 und 2011, S. 229–233. Berlin/Boston: Verlag De Gruyter

Szabadváry, Ferenc (1966), Geschichte der analytischen Chemie, S. 116. Budapest: Akadémiai Kiadó

Szabadváry, Ferenc (1973), Antoine Laurent Lavoisier, S. 120 f. Budapest: Akadémiai Kiadó

Vízi, Béla (1990), Kémia szobrokban – Chemistry in Sculptures, S. 1–71, Budapest: ISBN 963 8192 305

Vogelezang, Michiel; Rehm, Markus (2011), Zwei Erkenntnisbereiche, die zu einander gehören – Wie das Verhältnis zwischen der Makro- und der Mikrowelt in der Schule thematisiert werden kann. CHEMKON, Chemie konkret – Forum f. Unterricht u. Didaktik, Jg. 18, S. 173–178

Volhard, Jakob (1863), Die chemische Theorie, geschrieben pro facultate legendi, München 1863, S. 39. Braunschweig: Verlag Vieweg

Wöhler, Friedrich (1863), Brief vom 12.11. an Justus von Liebig, in: Wilhelm Lewicki (Hg.) (1982), Wöhler und Liebig, Briefe von 1829–1873 (2. Aufl., 2. Halbband), S. 150f., Göttingen: Verlag Jürgen Cromm

Wolf, Christa (1963), Der geteilte Himmel – Erzählung (6. Aufl.), S. 70. Halle (Saale): Mitteldeutscher Verlag

Wollgast, Siegfried {Hg.} (1974): Du Bois-Reymond, Emil – Über die Geschichte der Wissenschaft, in: Vorträge über Philosophie und Gesellschaft, S. 45–53. Berlin: Akademie-Verlag