

Eleni Daoutsali, Martin Setter

17. Berzelius

„Es ist schwer Berzelius‘ Verdienste zu würdigen, seine Bedeutung zu schildern. Er spielt eine derart alleinstehende, man könnte fast sagen, alleinherrschende Rolle in der Chemie wie keiner vor ihm und keiner nach ihm“ [1].

JÖNS JACOB BERZELIUS (1779 – 1848) war ein schwedischer Chemiker, der die Chemie maßgeblich beeinflusst hat, durch ihn erhielt die Chemie zu Beginn des 19. Jahrhunderts ihre stärksten Impulse. Seine Bedeutung lässt sich aus heutiger Sicht vor allem auf seine analytischen Tätigkeiten sowie die Entwicklung der chemischen Zeichensprache zurückführen, die heute noch Anwendung findet. Das komplexe Sprach- und Ausdruckssystem, aufgrund dessen BERZELIUS auch als „Vater der Chemie“ bezeichnet wurde [1], hängt eng mit seinen immer genaueren Bestimmungen der Atommassen zusammen. Doch bis zur heutigen Symbolsprache war es noch ein weiter Weg.

Die griechischen Naturphilosophen machten sich über die Materie und Stoffumwandlungsprozesse tiefgehende Gedanken. Dabei gingen sie von der „Vier-Elemente-Theorie“ aus: die Welt sollte aus Feuer, Erde, Wasser und Luft und den verschiedenen Mischungen dieser vier Elemente bestehen (vgl. Abb. 17.1).

Später im Mittelalter entwickelten die Alchemisten, die sich hauptsächlich mit der Herstellung von Gold aus unedlen Stoffen beschäftigten, eine Art nur von ihnen zu lesende Geheimsprache und Geheimschrift. So haben auch sie für die bis dahin entdeckten Elemente spezifische Zeichen verwendet (vgl. Abb. 17.2).

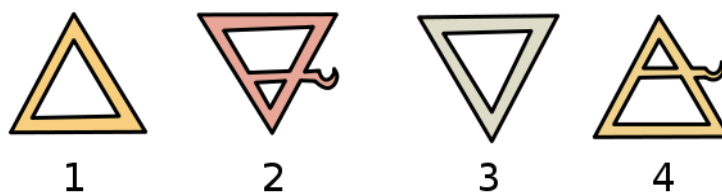


Abb. 17.1: Erste chemische Symbole der Griechen für Feuer, Erde, Wasser und Luft [2]

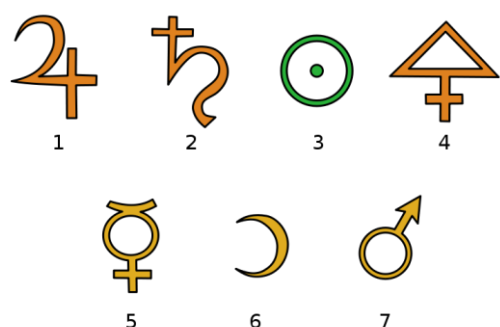


Abb. 17.2: Erste Elementsymbole für Zinn, Blei, Gold, Schwefel, Quecksilber, Silber und Eisen [2]

Die Schritte, die die Chemie zur exakten Wissenschaft durchlaufen musste, sind eng mit der Entwicklung eines Symbol- und Zeichensystems verknüpft ([1], [3]). In der Menschheitsgeschichte gilt der Schriftspracherwerb als größter Schritt für die Entwicklung einer Hochkultur - Gleiches lässt sich für das Fach Chemie postulieren. Eine Schriftsprache soll demzufolge logisch in sich aufgebaut sein, allgemein zugänglich sein und dem wissenschaftlichen Austausch und der Kommunikation dienen. Einige Stationen des geschichtlichen Werdegangs zur chemischen Symbolsprache beschreibt MARTIN SETTER in seiner Masterarbeit [4].

BERZELIUS kam zur Chemie, als der große Umbruch von der Phlogistontheorie STAHLs zur modernen Oxidationstheorie nach LAVOISIER (1743-1794) gerade beendet war. Dessen früher Tod im Jahr 1794 bedeutete für die Entwicklung der Chemie eine gewisse Stagnation. Erst DAVY (1778 – 1829), DALTON (1766 – 1844) und BERZELIUS brachten neue Impulse: „Die Entwicklung der Wissenschaften erfordert von Zeit zu Zeit ein großes Talent, das die Erfahrungen und Entdeckungen von anderen zusammenfasst, ordnet, das Gemeinsame in den verschiedenen Teilen des Wissenschaftsgebietes sieht und aus all diesen die Grundlage zur Weiterentwicklung schafft. Ein solches Talent war Lavoisier gewesen und auch auf Berzelius wartete eine ähnliche Aufgabe“ [1]. BERZELIUS setzte einige Impulse von großer Bedeutung, zu denen die Atommassenbestimmung, der elektrochemische Dualismus, sowie die Elementaranalyse zählen. Alle münden in der chemischen Zeichensprache und werden daher näher erläutert.

17.1 Historische Symbole für Elemente und Verbindungen

Zur Übermittlung von Wissen aus einem bestimmten Zeitabschnitt der Menschheitsgeschichte sowie zwischen Personen dient die Schriftsprache. Es existierten bereits sehr früh

Symbole zur Wissensvermittlung. Der Ursprung der alchemistischen Symbole wird auf das 9. bis 7. Jahrhundert v. Chr. datiert [5] und sieht ihren Ursprung in der babylonischen Astrologie (vgl. Abb. 17.3). Die Symbole für Planeten standen in Verbindung mit Metallen, so auch die Gestirne für unterschiedliche Gottheiten. Das Symbol ♂ repräsentierte dabei den Planeten und die Gottheit Mars, welche mit Eisen verbunden wurden. Das Symbol erhält eine tiefere Bedeutung, da Mars der Kriegsgott ist: somit steht das Zeichen ♂ auch für Waffen und Männlichkeit – eine Bedeutung, die sich bis heute hält [6].

Analog dazu stand die Zuordnung der Metalle zu den Tierkreiszeichen. Diese Symbolik der Metalle wurde durch die Araber aufgegriffen und erweitert, sodass aus der eindeutigen Zuordnung im Laufe der Zeit ein komplexes Symbolsystem entstand, das nur Eingeweihten ihre Bedeutung offenbarte: „In einer Zeit, in welcher Wissen und Gelehrsamkeit im Besitze von wenigen bevorzugten oder sich wenigstens bevorzugt dünkender Volkskasten war, ist es nicht zu verwundern, wenn Mitglieder dieser Kasten eifrig dafür sorgten, dass ihr Wissen in gewissem Sinne Geheimwissen blieb“ [7].

Gestirn/ Gottheit	planetares Zeichen	zugeordnetes Metall
Sonne	☉ / ☼	Gold
Mond	☾	Silber
Jupiter	♃	Zinn
Merkur	☿	Quecksilber
Mars	♂	Eisen
Venus	♀	Kupfer
Saturn	♄	Blei

Abb. 17.3: Alchemistische Symbole für einige vor 2000 Jahren bekannte Metalle [8]

Eine weitere Ausdifferenzierung der Symbole durch den Kontakt und Konflikt von Christentum und Islam schlägt sich in einer anderen Symbolvielfalt nieder (vgl. Abb. 17.4.). Durch die Verwendung von geheimnisvollen Symbolen sollte zum einen das Verbot der Alchemie durch den Papst Johannes XXII aus dem Jahr 1317 umgangen, zum anderen das chemische Wissen vor Spionage geschützt werden [6]. Eine weitere Einteilung der Symbole nach ihrem Ursprung wird in aristotelische Elementsymbole, Tierkreiszeichen, Planetenzeichen, Buchstaben und geometrische Figuren vorgenommen [6].



Abb. 17.4: Symbolvielfalt für Gold [8]

Phlogistontheorie. BOYLE forderte im 17. Jahrhundert, dass die Chemie aus dem Schatten einer Hilfswissenschaft der Medizin heraustreten und sich „mit der Erkenntnis der Zusammensetzung, Umwandlung und Zerlegung der Körper, mit der Erforschung der Erscheinungen, welche bei ihrer Umwandlung und Zerlegung auftreten, mit den Gesetzen, nach welchen diese Vorgänge sich vollziehen, und mit der Bestimmung, inwiefern die Eigenschaften der Körper von ihrer Zusammensetzung abhängen, beschäftigen solle“ [8]. Diese Forderung wurde im 17. Jahrhundert von STAHL aufgegriffen. Bei der Betrachtung von Verbrennungsvorgängen wurde qualitativ „die Gewichtsabnahme des Ausgangsstoffes“ über das Entweichen des sogenannten Phlogistons aus dem Brennstoff erklärt. Die erste auf systematischen Beobachtungen basierende Theorie, die „Phlogistontheorie“, führte zu einer gewissen Verwissenschaftlichung der Chemie. Für die systematische Beschreibung von chemischen Reaktionen bedurfte es aber einer von den alchemistischen Symbolen abweichende Darstellungsmöglichkeit ([5], [6], [8]).

Die nun entstehenden Symbole (vgl. Abb. 17.5) weisen noch eine klare Verwandtschaft zu den Symbolen der Alchemie auf, sie versuchen dennoch, über Reduktion der Symbolvielfalt und einer systematischen Variation Aussagen über die Zusammensetzung der Stoffe zu tätigen [6]. Diese alchemistischen Symbole waren willkürliche Figuren und hatten wenig mit der tatsächlichen Zusammensetzung der entsprechenden Substanzen zu tun.



Abb. 17.5: Alchemistische Symbole am Ende des 18. Jahrhunderts [8]

Oxidationstheorie. Durch den konsequenten Einsatz der Waage kam LAVOISIER zu dem bekannten neuen Verständnis der Verbrennungsreaktion, führte die Begriffe Oxidation und Oxid ein, fand die saure Reaktion der Nichtmetalloxide bzw. die alkalische Reaktion der Metalloxide, und konnte damit die Phlogistontheorie ad absurdum führen (vgl. Kap. 13). Daraufhin kamen mit HASSENFRATZ und ADET neue Symbole für die Eigenschaften „alkalisch und sauer“ hinzu (vgl. Abb. 17.6). Die Symbole standen für Eigenschaften eines Stoffes: der Kreis \circ für metallische, das Dreieck Δ für alkalische oder erdige Substanzen [8]. Zur Unterscheidung wurde der Anfangsbuchstabe des Elements oder der Verbindung in das Grundsymbol gesetzt: (Kupfer ©). Mit solchen Symbolen versuchte man damals die Reaktion von „Pottasche (∇) mit Essigsäure (\square) zu essigsaurem Kalk ($\nabla \square$) zu beschreiben“ [8].

Den nächsten Entwicklungsschritt der chemischen Symbole vollzog DALTON: Ein Element sollte aus Atomen einer Sorte bestehen, die Anzahl der verschiedenen Atomarten gleich der Anzahl der Elemente sein (vgl. Kap. 14). Die Atomhypothese veranschaulichte DALTON durch Kugeln als Modelle für die von ihm benannten Atome und verwarf folgerichtig die geometrischen Darstellungsweisen zugunsten einer einheitlichen Kreisform (vgl. Abb. 17.7).

SYMBOL	BEDEUTUNG
Dreieck	Δ alkalisch, erdig
Vollkreis	\circ metallisch
Quadrat	\square versäuerbar
Quadrat auf der Spitze	\diamond unbekannt

Abb. 17.6: Zeitgenössische Symbole für Stoffeigenschaften [6]

[219] Erklärung der Tafel.		ELEMENTE.							
		Einfache.							
1. Wasserstoff; rel. Gewicht	1	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
2. Stickstoff	5	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.	16.
3. Kohlenstoff	5								
4. Sauerstoff	7								
5. Phosphor	9								
6. Schwefel	13								
7. Magnesia	20								
21. Ein Atom Wasser oder Dampf, bestehend aus 1 Sauerstoff und 1 Wasserstoff, in physischer Berührung gehalten durch eine starke Affinität und angesehen als umgeben von einer gemeinsamen Wärmesphäre; sein relatives Gewicht.	8								
22. Ein Atom Ammoniak, aus 1 Stickstoff und 1 Wasserstoff	6								
23. Ein Atom Salpetergas, aus 1 Stickstoff und 1 Sauerstoff	12								
24. Ein Atom ölbildendes Gas, aus 1 Kohle und 1 Wasserstoff	6								
25. Ein Atom Kohlenoxyd, aus 1 Kohle und 1 Sauerstoff.	12								
26. Ein Atom Salpetergas, aus 2 Stickstoff und 1 Sauerstoff	17								
27. Ein Atom Salpetersäure, aus 1 Stickstoff und 2 Sauerstoff	19								
28. Ein Atom Kohlensäure, aus 1 Kohle und 2 Sauerstoff	19								
29. Ein Atom Kohlenwasserstoff, aus 1 Kohle u. 2 Wasserstoff	7								

Abb. 17.7: Ausschnitt aus DALTONS erster Atommassentabelle im Jahr 1808 [8]

Dabei wurden Nichtmetall-Atome mit einer geometrischen Markierung im Kreissymbol gekennzeichnet und Metall-Atome mit dem jeweiligen Anfangsbuchstaben im Kreis versehen. DALTON verband die Symbolik nicht nur mit den makroskopischen Stoffen, sondern bezog sie auch auf ein Atom eines Elements. Die Atome eines Elements sind nach seiner Atomhypothese in Größe und Masse untereinander gleich. Allerdings nannte er die kleinsten Einheiten der Verbindungen ebenfalls Atom: „Ein Atom Kohlensäure“. Der Molekülbegriff wurde erst sehr viel später verabredet, als man die Postulate von AVOGADRO verstand (vgl. Kap. 15).

Damit war ein wichtiger Schritt zur quantitativen Verwendung und Deutung der chemischen Zusammensetzung durch neue Symbole vollzogen. Verbindungen konnten nun als Zusammenschluss von Atomen in einem bestimmten stöchiometrischen Verhältnis verstanden werden. Man fand solche Zahlenverhältnisse durch den Vergleich der empirisch ermittelten Massen mit den Atommassen und stellte daraufhin diese ersten Verbindungssymbole dar. DALTON verwendete bei der experimentellen Bestimmung als Referenzgröße die Masse eines Wasserstoff-Atoms und wählte dafür willkürlich den Wert eins. Die ersten Atommassen wurden von ihm im Jahr 1808 im Vergleich zu dieser Referenzgröße gefunden, auf dieser Basis konnten erste Verbindungssymbole postuliert werden (z. B. für das Kohlenstoffdioxid-Molekül das Symbol $\bigcirc\bullet\bigcirc$). An diese Überlegungen anknüpfend vollzog BERZELIUS den nächsten Schritt in der Entwicklung seiner chemischen Symbole.

17.2 JÖNS JACOB BERZELIUS

BERZELIUS wird am 20. August 1779 im schwedischen Wäversunda als Sohn eines Lehrers geboren. Sein Vater verstirbt nach nur vier Jahren (1783) an Tuberkulose und hinterlässt seine Familie in armen Verhältnissen. Seine Mutter heiratet daraufhin 1785 den Pastor Andreas Eckmark, verstirbt jedoch 1787. BERZELIUS – mit acht Jahren nun vollständig verwaist – steht mit seiner Schwester nicht nur vater- und mutterlos, sondern auch mit nur einer sehr kleinen Rente von 200 Reichstalern da. Sie dürfen die Folgejahre bei Eckmark bleiben. Hier bekommt BERZELIUS seinen ersten, wenn auch notdürftigen Unterricht. Der naturhistorische Bereich, vor allem in Gestalt von Pflanzenbestimmungen, nimmt dabei einen großen Stellenwert ein [10]. Hierbei fällt BERZELIUS erstmals durch seine ungewöhnliche Beobachtungsgabe und der Fähigkeit zur Systematik auf.



J. Berzelius.

Abb. 17.8: Portrait Berzelius [9]

Die sorglose Zeit im Eckmarkschen Haus ist vorüber, als dieser neu heiratet und BERZELIUS mit seiner Schwester aufgrund von Platzmangel gehen müssen. Im Hause ihres Onkels Magnus Sjösteen hat es BERZELIUS schwer – Sjösteens alkoholranke Frau hat die sieben eigenen und zwei Pflegekinder nicht im Griff [11]. So sind die Jahre in der Obhut der Familie Sjösteen für BERZELIUS geprägt von Demütigungen und Pein, da er von seinen Geschwistern mehr als „beschwerlicher Kostgänger“ denn als Verwandter betrachtet und behandelt wurde [10]. Ausgleich findet er in Naturstudien und dem Hausunterricht.

Mit dreizehn Jahren (1793) besucht er das Gymnasium in Linköping. Während seiner Schulzeit kann BERZELIUS nicht in allen inhaltlichen Bereichen durch gute Leistungen auf sich aufmerksam machen. Seine nur spärliche Schulbildung, geprägt durch wechselnde Lehrer, hat zu viele Lücken in seiner Grundbildung zur Folge. Er kann sich darüber hinaus nicht ereifern, in den für ihn uninteressanten Fächern den Lernrückstand aufzuarbeiten. Im Bereich der Naturwissenschaften besitzt er dagegen eine große Begabung und zeigt ein hohes Interesse. Im Sommer 1796 verlässt er das Gymnasium. Das Abschlusszeugnis bescheinigt ihm, dass er „mit glücklichen Naturanlagen weniger gute Sitten verbände, und das er ein Jüngling wäre, der nur zu zweifelhaften Hoffnungen berechtigte“ [10].

Mit 17 Jahren schreibt er sich in der medizinischen Fakultät der Universität Uppsala ein. Er muss seine Studien jedoch für ein Jahr aus finanziellen Gründen unterbrechen, um erneut als Hauslehrer zu arbeiten. Er lernt dabei Französisch, Deutsch und Englisch; dieses Wissen vervollständigt er soweit, dass er spätere Veröffentlichungen in deutscher und französischer Sprache vornehmen kann [1]. Im Jahr 1798 nimmt er sein Studium wieder auf.

In direkten Kontakt mit der Chemie kommt BERZELIUS in Form eines Pflichtexamens an der Universität, durch das er fast durchgefallen wäre. „Von der Chemie hatte ich damals so wenig begriffen, dass der Professor der Chemie nach langem und sarkastischem Tentamen erklärte, dass er mich durchfallen lassen werde, wenn ich nicht von den anderen Professoren, besonders von dem der Physik, gute Zeugnisse erhalten würde“ (BERZELIUS zitiert nach [1]).

Die Chemie und die chemische Analyse entdeckt BERZELIUS in experimentellen Arbeiten im Labor, die keiner strengen Aufsicht unterworfen sind. Nach Fertigstellung der vorgeschriebenen Versuche führt er aus der Literatur entnommene Versuche selbständig durch. Mit Hilfe kleiner „Bestechungen“ des Institutsdieners kann er jederzeit die Laboratorien nutzen [1]. In dieser Zeit verfasst er seine ersten wissenschaftlichen Arbeiten.

Der Abschluss seines Examens stellt einen Wendepunkt im Leben von BERZELIUS dar. Neben der Möglichkeit, als praktischer Arzt zu arbeiten und Geld zu verdienen, steht die unbezahlte Arbeit in der Medizin, Botanik und Pharmazie an der Universität Stockholm, wo er seiner Leidenschaft zur Chemie nachgehen kann. Er entscheidet sich dafür, als unbezahlter Adjunkt (1802) zu arbeiten, was unter der Berücksichtigung seiner bisherigen finanziellen Situation umso erstaunlicher anmutet. Die aus der Not geborenen Nebentätigkeiten bringen ihm allerdings auch einen Nutzen ein: Er kann seine experimentellen Fähigkeiten bei der Analyse von Mineralwasser vertiefen und erlernt durch den Kontakt zu einem Instrumentenmacher die Kunst des Glasblasens [10]. Diese Fähigkeiten bildeten die Grundsteine seiner späteren experimentellen analytischen Arbeiten. Nur zwei Jahre nach seinem Examen, reichte er im Jahr 1804 seine Doktorarbeit über „Effekte von galvanischer Elektrizität auf Patienten“ ein.

BERZELIUS machte sich im Folgenden vor allem um die Einführung einer neuen chemischen Zeichensprache verdient. Diese neue Zeichensprache wird sich deshalb den alten Symbolen weit überlegen zeigen, da sie sowohl die qualitative als auch die quantitative Zusammensetzung einer Verbindung aus ihren Elementen berücksichtigte. Unter dem Titel "Experiments on the Nature of Hydrogen and of Ammonia" veröffentlichte er seinen Vorschlag [1]. 1807 wird er zum ordentlichen Professor für Pharmazie und Medizin an der Universität Stockholm berufen und 1810, mit nur 28 Jahren, übernimmt BERZELIUS den Lehrstuhl für Chemie am neuge-

schaffenem „karolinischen medico-chirurgischen Institut“. Die ordentliche Professur mit regelmäßigem Einkommen ermöglichte es ihm, sich ganz seinen wissenschaftlichen Aufgaben im Fachgebiet der Chemie zu widmen.

Sein Aufstieg, der mit der Aufnahme in die Akademie der Wissenschaften 1808 deutlich wird, fällt zusammen mit einer Umbruchphase in Schweden. BERZELIUS' Lehrer waren zu Universitätszeiten noch Anhänger der Phlogistonchemie und auch die Akademie der Wissenschaften weigerte sich lange, die Ideen LAVOISIERS anzunehmen. BERZELIUS' Sprachkenntnisse erlaubten es ihm hingegen, die Entwicklung der Chemie außerhalb Schwedens zu verfolgen. So kommt er in Berührung mit LAVOISIERS neuen Überlegungen, indem er FOURCROYS „*Philosophie chimique*“ liest [12].

Es ist nur folgerichtig, dass nach Aufgabe der Phlogistonchemie gerade er als Analytiker und moderner Chemiker in die wissenschaftliche Laufbahn berufen wurde. Es folgt im Alter von 30-40 Jahren die Schaffensperiode, in der er die chemische Zeichensprache und den elektrochemischen Dualismus entwickelt, die Atommassen immer genauer bestimmt [1]. „In der darauf folgenden Periode seines Lebens wurde Berzelius zum großen Organisator der Chemie. Jährlich fasste er die wissenschaftlichen Ergebnisse der Welt zusammen und kritisierte sie. Sein Urteil vermochte Theorien und Personen zu vernichten oder zu ermutigen, anzuspornen oder zu zerschmettern“ [1]. Die jahrzehntelange harte Arbeit im Labor und das Einatmen von gesundheitsschädlichen Dämpfen haben ihm starkes Rheuma eingebracht, am Ende seines Lebens ist er an einen Rollstuhl gefesselt. Er verstirbt im Jahre 1848 schlafend über einer Lektüre.

17.3 Buchstabensymbole und deren Bedeutung

Um chemische Vorgänge möglichst einfach und übersichtlich, aber trotzdem umfassend beschreiben zu können, hat BERZELIUS die neue chemische Zeichensprache eingeführt: „Jedem Element entspricht ein Zeichen, und zwar der erste oder die zwei ersten Buchstaben des lateinischen, seltener griechischen Wortes dafür; so steht das Zeichen H für Wasserstoff (Hydrogenium), C für Kohlenstoff (Carbonium), Ag für Silber (Argentum), Hg für Quecksilber (Hydrargyrum), etc.“ [12]. Durch Aneinanderfügen der Buchstabensymbole werden die chemischen Verbindungen gekennzeichnet (vgl. Abb. 17.9).

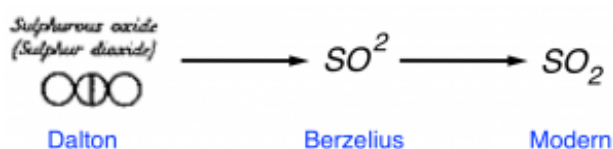


Abb. 17.9: Vergleich von Symbolen für das SO_2 -Molekül [2]

„Durch Nebeneinanderstellung dieser Zeichen und durch Anfügen der Atomzahl, wenn letztere mehr als 1 beträgt, werden die chemischen Verbindungen formuliert, z.B. H_2O Wasser, SO_2 schweflige Säure, CO_2 Kohlensäure, $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{CO}_2$ kohlensaures Natron, etc.“ [12]. Die Zahl der Sauerstoffatome kennzeichnete BERZELIUS zuerst mit Vorliebe durch Punkte im Verbindungssymbol, die Zahl der Schwefel-Atome in Verbindungen durch Kommata, beispielsweise im „Zweifach-Schwefeleisen Fe “ [12].

Einen besonderen Sinn und Zweck verband BERZELIUS mit durchstrichenen Symbolen, die ausdrücken sollten, dass die betroffenen Elemente als „Doppelatome“ auftreten oder, wie er sagt, „dass sie zusammenhängend bleiben“; dies galt beispielsweise für „das Wasser HO “, für das „Chlor in der wasserfreien Überchlorsäure ClO “, für das „Eisen im Oxyd FeO_3 “ [13]. Der Grund für diese Schreibweise war, dass er vom „Doppelatom Sauerstoff“ als Einheit ausging, das in Verbindungen erhalten bleiben sollte.

Bestimmung der Massenverhältnisse. „Berzelius ist ein ruhiger, ausdauernder Forscher und kein kühner Entdecker“ [10]. Das Talent für Entdeckungen kann ihm trotzdem nicht abgesprochen werden – so entdeckte er Cer (1803), Selen (1818) und Thorium (1829). Er sieht jedoch, dass zur Wissenschaft nicht nur das Auffinden neuer Substanzen gehört, sondern auch die Weiterentwicklung theoretischer Inhaltsfelder [10]. Dazu zählt das Gebiet der chemischen Proportionen, das den Hauptteil BERZELIUS' analytischen Werkes ausmacht. In einem Zeitraum von 10 Jahren analysiert er etwa 2000 verschiedene Verbindungen.

Im Jahr 1807 beginnt er mit seinen analytischen Bestimmungen der Massenverhältnisse von Elementen in Verbindungen. Die Basis dafür stellen sowohl Überlegungen von RICHTER als auch von LAVOISIER und PROUST dar (vgl. Kap. 13). RICHTER führt aus, dass die „gute Analyse einiger Salze die Mittel an die Hand gibt, die Zusammensetzung aller andern Salze danach zu berechnen“ (RICHTER zitiert nach [14]). BERZELIUS ergänzt die Untersuchungen von Salzen und Neutralisationsreaktionen um die Fällungsreaktionen. In den Folgejahren führte er umfangreiche experimentelle Arbeiten durch, mit deren Ergebnisse er immer genauere Messwerte in seinen Atommassentabellen zusammenstellte.

Gleichzeitig zu diesen Arbeiten begründete BERZELIUS seine Theorie vom „Dualismus der Atome“. Schon 1802 erkannte er, dass Alkalisalze zu anderen Substanzen umgesetzt werden, wenn man sie elektrolysiert. Ausgangspunkt hierfür war die Entdeckung der Voltaschen Säule als erste brauchbare Spannungsquelle. 1819 veröffentlichte er seine Erkenntnisse und gilt seit-

her als der Schöpfer der "dualistischen Theorie". Nach seiner Meinung ist die Elektrizität das "Primum movens" der chemischen Reaktionen [14]. Er ging davon aus, dass „eine gewisse Verwandtschaft die Vereinigung zweier Atome in Folge der elektrischen Eigenschaften bewirkt“. Je nachdem welcher Pol in den Körpern vorherrschend ist, unterteilte BERZELIUS die Substanzen in „elektropositive und elektronegative Körper“. Dabei zählte er den Sauerstoff zu den „elektronegativen Körpern und bezeichnete seine Verbindungen als Säuren und Oxide“ [14]. In seinen Augen beruhten Neutralisationsreaktionen auf dem „Ausgleich der entgegengesetzten Elektrizitäten“ [14].

Auch die Synthese von Wasser aus Wasserstoff und Sauerstoff beflügelte seine Aktivitäten. So gelangten GAY-LUSSAC und HUMBOLDT zu der Erkenntnis, dass sich Gase entweder in gleichen Volumina oder in ganzzahligen Vielfachen zueinander verbinden und postulierten das Gesetz der konstanten und multiplen Volumenverhältnisse (vgl. Kap. 14):

2 Volumteile Wasserstoff + 1 Volumteil Sauerstoff \rightarrow 2 Volumteile Wasserdampf

Diese empirische Feststellung kann mit einer rein atomaren Betrachtung nicht erklärt werden, die Gasteilchen (heute: Moleküle) müssten sich teilen können, was nach Postulaten von DALTON unzulässig war. BERZELIUS hingegen akzeptiert die empirischen Belege hinsichtlich der Volumina und beginnt, „Atomvolumina“ zu diskutieren: „Was in der einen Theorie *Atom* heißt, nennt die andere *Volumen*. Dem gegenwärtigen Stand unseres Wissens gemäß hat die Volumentheorie den Vorteil, dass sie auf einer gut bewährten Tatsache fußt, die Atomtheorie hingegen baut auf Vermutung auf“ (BERZELIUS zitiert nach [12]).

Für die Zusammensetzung eines Wasser-Moleküls gilt das Symbol H_2O . AVOGADRO löst das Problem der Teilung von Gasteilchen, indem er annimmt, dass Gase nicht atomar (O-Atom, H-Atom), sondern in Molekülen (O_2 -Molekül, H_2 -Molekül) vorliegen (vgl. Kap. 14) und formuliert seine Gastheorie: Im gleichen Volumen aller Gase ist bei konstantem Druck und Temperatur die Anzahl der Teilchen gleich. Die Annahme von Molekülen wird von BERZELIUS abgelehnt. Er unterscheidet bei seinen Analysen nicht zwischen Atomen und Molekülen und erklärt die Volumenveränderung damit, dass Gase an Volumen verlieren, sobald sie Verbindungen eingehen [12]. Als Basis seiner Arbeiten kann bei BERZELIUS allerdings ein atomistisches Verständnis angesehen werden: Er fordert die „Undurchdringlichkeit von Atomen, die Verbindungen sollten durch Nebeneinanderlagern von Atomen entstehen“ [14].

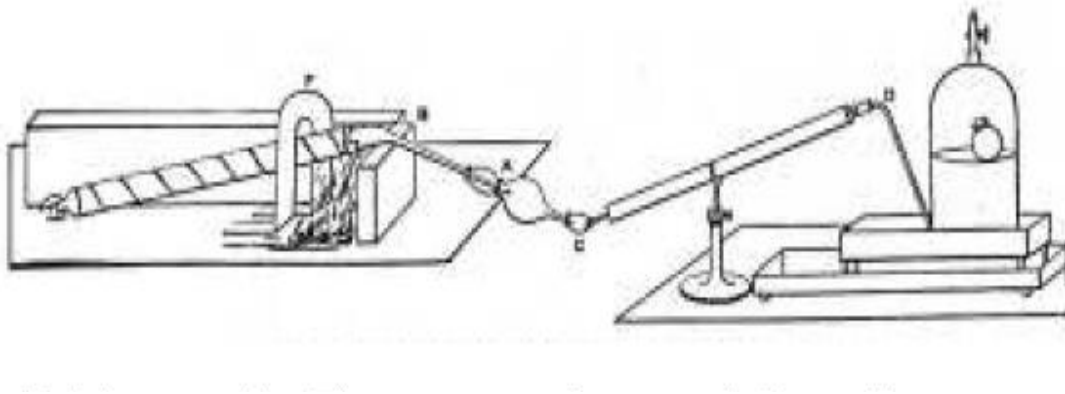


Abb. 17.10: Zeichnung der Elementaranalyse nach BERZELIUS [16]

Elementaranalyse. BERZELIUS schreibt der Bestimmung der Massenverhältnisse und der Berechnung der Atommassen eine grundlegende Bedeutung zu, die Theorie der konstanten Proportionen in Verbindungen sei das „aufgehende Licht“ in der Chemie. Doch ohne eine experimentelle Bestimmung „konnte auf diese Morgenröte kein Tag folgen“ [15]. Die Schwierigkeiten der experimentellen Bestimmung liegen vor allem in den ungenügenden Methoden.

Deshalb entwickelte BERZELIUS die Verbrennungs- oder Elementaranalyse: Eine genau gewogene Portion einer organischen Substanz ist vollständig im Sauerstoffstrom umzusetzen, die gasförmigen Verbrennungsprodukte Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid werden aufgefangen (vgl. Abb. 17.10). Dabei hatte er besondere Probleme, mit seinem Experimentiergerät die Volumina entstehender Gase zu messen, ohne Verluste zu verzeichnen. Dies führte dazu, dass die Ergebnisse stark von den Fähigkeiten des Experimentators abhingen. Er sah voraus, „dass diejenigen Zahlen, die mich nun so angestrengte Arbeit und so viele auf ungleichen Wegen angestellte Versuche kosteten, in einer künftigen Zeit mit besseren Mitteln und geringerer Mühe genauer erhalten werden würden und so das Resultat meiner Arbeit ein Gegenstand des Tadels werden könne“ [15].

LIEBIG arbeitete zur selben Zeit in Giessen und hatte dieselben Probleme. Anstelle des Auffangens von Gasen (vgl. Abb. 16.10), absorbierte er Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid an geeigneten Chemikalien: an wasserfreies Calciumchlorid bzw. in konzentrierter Kalilauge. Für die Absorption an Kalilauge entwickelte er einen speziellen Fünf-Kugel-Apparat und führte viele Tests durch, bis er sicher war, dass die konzentrierte Kalilauge das Gas Kohlenstoffdioxid vollständig umsetzte (vgl. Kap. 18).

BERZELIUS schlug aufgrund der theoretischen Voraussetzungen der Gesetze von den konstanten und multiplen Proportionen verschiedene Wege vor, die Zusammensetzung beliebiger Verbindungen zu bestimmen: zum einen durch die Elementaranalyse, zum anderen durch Reduktion oder Zersetzung und die darauf folgende gravimetrische Analyse. Aus den gemessenen Massenanteilen lassen sich die prozentualen Massenanteile der Elemente aufgrund der bekannten Atommassen errechnen (vgl. Kap. 18). Allerdings bezieht er seine Werte auf die relative Masse eines Sauerstoff-Atoms mit der Einheit 100, während DALTON die Zahl 1 für die relative Masse eines H-Atoms wählte (vgl. Abb. 17.11)

Name.	Formel.	O=100.	H=1.
Sauerstoff	O	100,000	16,026
Wasserstoff	H	6,2398	1,000
	H	12,4796	2,000
Stickstoff	N	88,518	14,186
	N	177,036	28,372
Schwefel	S	201,165	32,239
	S	402,330	64,478
Phosphor	P	196,155	31,436
	P	392,310	62,872
Chlor	Cl	221,325	35,470
	Cl	442,650	70,940
Jod	J	768,781	123,206
	J	1537,562	246,412
Fluor	F	116,900	18,734
	F	233,800	37,469
Kohlenstoff	C	76,437	12,250
	C	152,875	24,500
Bor	B	135,983	21,793
	B	271,966	43,586

Abb. 17.11:

Atommassentabelle von
BERZELIUS aus dem Jahr
1828 [13]

BERZELIUS diskutierte zu den Analysen zusätzlich die „Oxidationsgrade“ von Metallen in Metalloxiden. So ergab die Reduktion von schwarzem und rotem Kupferoxid durch Wasserstoff verschiedene Messwerte (vgl. Abb. 17.12). Diese Messwerte zeigten zwei verschiedene „Oxidationsgrade des Kupfers“ und damit zwei verschiedene Kupferoxide an: Eine Verbindung des ersten Oxidationsgrades, die vom Zahlenverhältnis der Kupfer- und Sauerstoff-Atome von 1 : 1 ausgeht, bezeichnet BERZELIUS als ‚Kupferoxyd‘ (heute: Kupfer-II-oxid), die zweite Verbindung als ‚Kupferoxydul‘ (heute: Kupfer-I-oxid) [14].

„In dem Kupferoxydul sind 100 Th. Kupfer mit 12,63 Th. Sauerstoff verbunden; es besteht also aus 88,78 proc. Metall und 11,22 Sauerstoff, oder aus 1 Doppelatom Kupfer und 1 At. Sauerstoff, Cu_2O , und sein Atom wiegt 891,390“ [17].

Abb. 17.12: Analyseresultate bei Kupferoxiden [14]

Das Kupferoxydul besteht aus:		
	Procente.	Atome.
Kupfer	88,78	2
Sauerstoff	11,22	1
Atomgewicht: 891,390 = CuO oder Cu.		

Das Kupferoxyd besteht aus:		
	Procente.	Atome.
Kupfer	79,83	1
Sauerstoff	20,17	1
Atomgewicht: 495,695 = CuO oder Cu.		

„Im Kupferoxyd sind 100 Theile Metall mit 25,266 Sauerstoff verbunden, es enthält also 79,83 Prozent Kupfer und 20,17 proc. Sauerstoff, oder es besteht aus 1 At. Kupfer und 1 At. Sauerstoff. Ein Atom CuO wiegt 495,695“ [17].

Berechnet man mit heutigen Vereinbarungen die Masse des Cu-Atoms aus den prozentualen Anteilen von BERZELIUS (vgl. Abb. 16.12), so gelangt man zu $m(\text{Cu-Atom}) = 63,3$. Der heutige Tabellenwert ist mit $m(1 \text{ Cu-Atom}) = 63,546$ u sehr ähnlich.

Der elektrochemische Dualismus. BERZELIUS entwickelt die Theorie des elektrochemischen Dualismus, mit deren Hilfe er meint, die Chemie vollständig erklären zu können. „Durch den Einfluss der Elektrizität auf die Theorien der Chemie hat diese Wissenschaft eine Umwälzung erlitten, und ihre Ansichten wurden erweitert und berichtigt, auf eine für das Ganze wichtigere Art als je vorher geschehen, weder durch Stahl’s noch durch Lavoisier’s Lehre“ [18]. Er greift dafür die Gedanken von DAVY auf, der in der Elektrizität den Grund dafür sieht, dass Stoffe untereinander reagieren, und verbindet sie mit einer atomistischen Sichtweise [19]. Er postuliert, dass die Elektrizität nicht erst bei „Berührung von zwei Körpern“ entsteht, sondern eine Eigenschaft eines jeden Atoms ist und schreibt jedem Atom zwei elektrische Pole zu.

Die Elektrolyse solle in seiner Theorie die Art der Pole anzeigen: „Also offenbare die Elektrolyse den elektrischen Zustand der Atome, die positiv dominierten Atome wandern zur negativ geladenen Elektrode und die negativ dominierten Atome zur positiv geladenen Elektrode“ [19]. Seiner Ansicht nach sind auch Verbindungen bzw. deren Teilchen nicht elektrisch neutral, sondern sind immer dipolar, die Verwandtschaft der Elemente zueinander bedeute einen ähnlichen elektrischen Zustand. Die Affinität der Atome, sich zu verbinden, lasse sich durch die Intensität der Polarisation erklären: „Er ordnete die elektrochemische Spannungsreihe nach

der Stärke der elektrischen Ladung der Elemente, der Sauerstoff ist dabei das elektronegativste und das Kalium das elektropositivste Element. Die Vereinigung von Elementen muss über die Reaktion unterschiedlich geladener Atome erfolgen“ [19]. Daraus solle resultieren, „dass jede chemische Verbindung einzig und allein von zwei entgegengesetzten Kräften, der positiven und negativen Elektrizität abhängt, und dass also jede Verbindung aus zwei durch die Wirkung ihrer elektrochemischen Reaktion vereinigten Teilen zusammengesetzt sein muss, da es keine dritte Kraft gibt“ (BERZELIUS zitiert nach [19]). Diese dualistische Auffassung wird bei der Benennung von Verbindungen konsequent weitergeführt.

Chemische Symbole für Elemente und Verbindungen. Als Regel zur Aufstellung der Symbole für ein Element gibt BERZELIUS an, dass jeweils der erste Buchstabe der lateinischen Bezeichnung des Elements zu wählen ist. „Um ohne Wortumschweif ausdrücken zu können, wie ein Körper zusammengesetzt ist in Beziehung auf die chemischen Proportionen, bediene ich mich (gewisser) Formeln, in welchen jeder einzelne Körper bezeichnet ist mit dem Buchstaben welcher neben ihm in der ersten Tafel steht (vgl. Abb. 17.13). Man wählt den Anfangsbuchstaben vom lateinischen Namen des Körpers; wenn aber mehrere Körper Namen mit dem nämlichen Buchstaben anfangen, und einer dieser Körper gehört zur Klasse der Metalloide, so bedient man sich des Buchstabens ohne einen Zusatz für diesen, oder wenn er gemeinschaftlich seyn sollte, so setzt man dafür den ersten Consonanten zu, der beiden Namen nicht gemeinschaftlich ist, z.B. C = Kohle; Cu = Kupfer; Co = Cobalt; S = Sulphuricum; Sb = Stibium; Sn = Stannum“ [18].

Die Proportionen der Massen in Verbindungen sollen in chemischen Symbolen mit der Verwendung von Ziffern verdeutlicht werden. Es sind dabei zwei Unterscheidungen möglich. Die Darstellung der „Verhältnistheile des Körpers“ [18] wird entweder durch vorangestellte Ziffern verdeutlicht, „z.B. $S + 3O$ = Schwefelsäure; $Fe + 4S$ = gemeiner Schwefelkies. Oder es werden die Ziffern für das entsprechende Element hochgestellt angehängt, wie z.B. „ $SO^3 + CuO$ = *schwefelsaures Kupferoxydyl*“ [18].

Der Theorie des elektrochemischen Dualismus zufolge lassen sich alle Stoffe nach ihrer elektrischen Zusammensetzung unterscheiden und müssen in einer bestimmten Art dargestellt werden. Dabei sind Stoffe anhand sogenannter „Ordnungen“ einzuteilen. So gibt es Verbindungen erster, zweiter und dritter Ordnung.

Namen.	Zeichen.	Gewicht.	Minimum.	Maximum.
Oxygenium	O.	100		
Sulphuricum	S.	201	200	210
Phosphoricum	P.	167,512	167,3	—
Muriaticum	M.	139,56	—	152,7
Fluoricum	F.	60	30	—
Boracicum	B.	73,27	—	—
Carbonicum	C.	74,91	73,6	75,5
Nitricum	N.	79,54	75,5	—
Hydrogenium	H.	6,636	—	7,63
Arsenicum	As.	839,9	—	852,2
Molybdaenum	Mo.	601,56	—	—
Chromium	Ch.	708,05	—	—
Wolframium	W.	2424,24	—	—
Tellurium	Te.	806,48	—	819
Stibium	Sb.	1613	—	—
Tantalum	Ta.	—	—	—
Titanium	Ti.	1804?	—	—
Silicium	Si.	*) 304,35	202,9	—

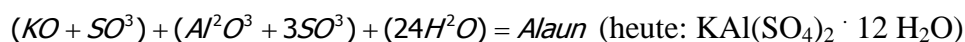
*) In meiner zuerst ausgegebenen Tabelle hatte ich den Sauerstoffgehalt der Kieselerde berechnet zu 48 pCt. nach meinem directen Versuch mit Kieseisen. Hier habe ich ihn berechnet nach den in der vor-

Abb. 17.13: Ausschnitt aus der „ersten Tafel zur Benennung von Körpern“ [18]

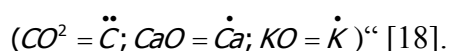
1. *Verbindungen erster Ordnung* beschreiben Verbindungen, die nur aus zwei „zusammengeführten Elementen“ bestehen, nach BERZELIUS die basischen Oxide (Metalloxide) und die sauren Oxide (Nichtmetalloxide). Für die Schreibweise der chemischen Formeln gilt, dass der elektropositive Bestandteil immer an erster Stelle geschrieben und durch ein Pluszeichen vom elektronegativen getrennt wird: $S + 3O = \text{Schwefelsäure}$ für ein Schwefelsäure-Molekül (heute: H_2SO_4), ein weiteres Beispiel: $Cu + O = \text{Kupferoxid}$. Der „elektronegative Sauerstoff“ steht immer an letzter Stelle, das Pluszeichen zeigt die angenommene dualistische Zusammensetzung aus elektropositiven und elektronegativen Anteilen an.

2. *Verbindungen zweiter Ordnung* bestehen aus der Verbindung „zweier Körper erster Ordnung“, beispielsweise in Salzen. Um Verbindungen zweiter Ordnung darzustellen wird das Pluszeichen der ersten Ordnung weggelassen, um wieder nur je einen „positiv und einen negativ geladenen Körper“ zu erhalten: „ $SO^3 + CuO = \text{schwefelsaures Kupferoxyd}$ “ (heute: $CuSO_4$).

3. Zu den *Verbindungen dritter Ordnung* gehören die Doppelsalze, wie die Alaune:



Diese Schreibweisen werden BERZELIUS jedoch zu kompliziert, sein Ziel ist eine Vereinfachung und er schlägt dazu vor: „Zum Ausdruck mannigfaltig zusammengesetzter Körper paßt es besser, das Zeichen des Oxygens O auszuschließen und mit Punkten über dem Radical anzudeuten, dass es oxydirt sey und wie viel Volumina Sauerstoff es enthält:



Als Ausnahme von dieser Vereinfachung formuliert BERZELIUS Oxide, bei denen zwei „Volumina Radical mit einem Volumen Sauerstoff“ verbunden sind. Dieser Fall ist beispielsweise beim Wassermolekül gegeben: es wird nach BERZELIUS H^2O geschrieben und soll nicht als \dot{H}^2 verkürzt werden. Den Vorteil der Schreibweise, in dem je „ein Volum Sauerstoff (O)“ durch einen Punkt dargestellt wird, wird in der verkürzten Schreibweise bei Doppelsalzen gesehen, wie beispielsweise beim Alaun: $(\ddot{K} \ddot{S} + 3 \ddot{Al} \ddot{S} + 24H^2O)$ [18].

BERZELIUS' Zeichensprache vermag die Massenanteile reagierender Stoffe angemessen durch chemische Formeln darzustellen, doch über die Struktur der Stoffe machen sie keine Aussage. Dies kritisiert auch DALTON. Er lehnt die Schreibweise von BERZELIUS mit dem Verweis auf eine rein synoptische Schreibweise ab [12]. Auch LIEBIG äußert diese Kritik in einem Brief an BERZELIUS: „Da wir nicht wissen, ob das Kalium in dem schwefelsauren Kali [gemeint ist Kaliumsulfat, K_2SO_4] als Kali [gemeint ist K_2O] oder $SO_4 + K_2$ ist, so kommt es zuletzt darauf an sich eine *Vorstellung* zu schaffen, wodurch alle Verbindungen in einem harmonischen System vereinigt sind. Die Formel $3 SO_4 + Al_2$ wäre anlog $3Cl_2 + Al_2$, kurz die Chemie würde von bewunderungswürdiger Einfachheit werden. Ich fühle, daß die Zeit nicht fern ist, wo man zu dieser *Vorstellung* seine Zuflucht nehmen muß“ (LIEBIG, zitiert nach [20])

17.4 Chemiedidaktische Relevanz

Die chemische Symbolsprache ist *das* Kommunikationsmittel im Fach Chemie schlechthin und genau aus diesem Grund ist sie wesentlicher Inhalt jeder Ausbildung im Fach Chemie. Doch viele Schüler und Erwachsene empfinden dieses Kommunikationsmittel als schwierig zu verstehen, sie glauben, man müsse chemische Formeln auswendig lernen.

Doch nicht die Schule ist der erste Kontakt mit der chemischen Symbolsprache. Die meisten Schüler kennen bereits aus ihrem Alltag die Formeln H_2O und CO_2 , können sich jedoch wenig darunter vorstellen. Der Unterricht im Schulfach Chemie hat deshalb deutlich zu machen, was man unter Elementsymbolen, Verhältnis-, Summen- oder Struktursymbolen und chemischen Reaktionssymbolen versteht. So ist es etwa möglich, durch einfache Modellvorstellungen über den Aufbau der Materie den Schülern und Schülerinnen die chemische Symbolsprache näher zu bringen (vgl. Kap. 8 oder [20]). Auch die allgemeinen IUPAC-Regeln und DIN-Normen für die Formulierung von chemischen Symbolen gehören dazu [21].

Der Kernlehrplan im Fach Chemie [22]. Im Kernlehrplan für die Realschule in Nordrhein-Westfalen im Fach Chemie ist die Behandlung der chemischen Symbolsprache nicht strikt einem einzelnen Inhaltsfeld zugeordnet. Vielmehr erstreckt sich die Vermittlung der Symbolsprache über alle Inhaltsfelder hinweg: als Modellvorstellung von Substanzen aufgrund des Teilchenmodells oder des Dalton-Modells, als Vorstellung von chemischen Reaktionen.

Die Kompetenzerwartungen werden in Kompetenzbereiche gegliedert, wobei es zwischen vier Kompetenzbereichen zu unterscheiden gilt. Diese sind: Umgang mit Fachwissen (UF), Erkenntnisgewinnung (E), Kommunikation (K) und Bewertung (B).

Die Kompetenzerwartungen sehen in der ersten Progressionsstufe vor, dass die Schüler

- im Inhaltsfeld 1 (Stoffe und Stoffeigenschaften) Stoffe, Stofftrennungen, Aggregatzustände und Übergänge zwischen ihnen mit Hilfe eines Teilchenmodells erklären können (E7, E8),
- im Inhaltsfeld 2 (Stoff- und Energieumsätze bei chemischen Reaktionen) das Daltonsche Atommodell beschreiben und zur Veranschaulichung nutzen (UF1), chemische Phänomene mit einfachen Modellvorstellungen erklären (E8) und an Beispielen die Bedeutung des Gesetzes von der Erhaltung der Masse durch die konstante Atomanzahl erklären (UF1),
- im Inhaltsfeld 4 (Metalle und Metallgewinnung) die Gesetzmäßigkeit der konstanten Atomanzahlverhältnisse erläutern (UF1) und für Reaktionen entsprechende Reaktionsschemata in Worten und als übliche Reaktionsgleichung formulieren (E8).

Aufbauend auf der ersten Progressionsstufe wird für die Schüler in der zweiten Progressionsstufe vorgesehen, dass sie

- im Inhaltsfeld 4 (Metalle und Metallgewinnung) für eine Redoxreaktion ein Reaktionsschema in Worten und als Reaktionsgleichung formulieren und dabei die Oxidations- und Reduktionsvorgänge im Sinne der Sauerstoffübertragung kennzeichnen können (E8),

- im Inhaltsfeld 5 (Elemente und ihre Ordnung) den Aufbau eines Atoms oder Ions mit Hilfe eines differenzierten Kern-Hülle-Modells beschreiben (UF1), den Unterschied zwischen Atom und Ion darstellen (E7), Vorstellungen zu Atomen, Ionen und Molekülen – auch in ihrer historischen Entwicklung – erläutern und beurteilen können und für gegebene Fragestellungen ein angemessenes Modell zur Erklärung auswählen (B3, E9),
- im Inhaltsfeld 6 (Säuren, Laugen, Salze) den Aufbau von Salzen aus Ionen mit der Ionenbindung und das Lösen von Salzkristallen in Wasser mit dem Modell der Hydratation erklären (E8, UF3), Bildung von Säuren und Basen an Beispielen wie Salzsäure und Ammoniak mit Hilfe eines Modells zum Protonentransfer interpretieren (E7), die Neutralisation durch die Bildung von H_2O -Molekülen erklären und die gelösten Salze benennen können (K7, E8),
- im Inhaltsfeld 7 (Elektrische Energie aus chemischen Reaktionen) einen in Form einer einfachen Reaktionsgleichung dargestellten Redoxprozess in die Teilprozesse Oxidation und Reduktion im Sinne der Elektronenübertragung zerlegen können (E1),
- im Inhaltsfeld 8 (Stoffe als Energieträger) die Begriffe hydrophil und lipophil anhand von Skizzen oder Strukturmodellen anschaulich erläutern (K7) und für die Alkan-Sauerstoff-Reaktionen angemessene Reaktionsgleichungen formulieren können (E8),
- im Inhaltsfeld 9 (Produkte der Chemie) an Modellen und mithilfe von Strukturformeln die Bildung von Makromolekülen aus Monomeren erklären (E7, E8), sowie mit Summen- und Strukturformeln angemessen kommunizieren können (K7).

Anhand der oben angeführten Kompetenzbereiche wird leicht ersichtlich, wie komplex die Einführung der chemischen Symbolsprache ist und nicht in „einem Kapitel“ abgehandelt werden kann. In jedem Fall sollten Modelle und Modellvorstellungen erarbeitet werden und dazu dienen, erste Formeln und Reaktionsgleichungen aus ihnen abzuleiten und sie als Verkürzungen der Modelle zu betrachten [20].

Fachdidaktische Erarbeitung der chemischen Symbolsprache. Die chemische Symbolsprache wird beschrieben als „eine fundamentale Grundlage für ein Chemieverständnis im Chemieunterricht“ [23]. Doch gerade die chemischen Symbole stellen den Scheideweg für Schüler dar. „Es besteht ein Zusammenhang zwischen den Einstellungen der Schülerinnen und Schüler zur chemischen Symbolsprache und zum Chemieunterricht“ ([24], [25]). So beschreiben Erwachsene ihre Schulzeit im Fach Chemie mit der Aussage „Ach da waren so Formeln“. SCHEIBLE geht soweit, dass er sagt: „Die Formel hat uns in Verruf gebracht“ [20]. Die Erarbeitung der chemischen Symbolsprache scheint entscheidend für den Chemieunterricht zu sein.

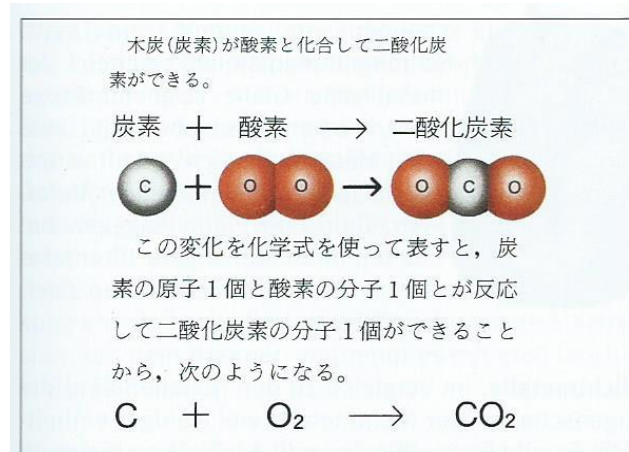
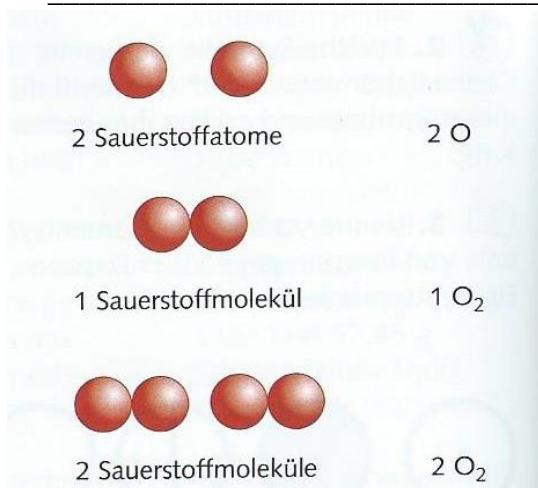


Abb. 17.14: Kennzeichnung von Atomen und Molekülen durch Symbole [26]

Abb. 17.15: Internationale chemische Symbole – sogar in chinesischen Lehrbüchern [27]



Chemische Reaktionen darstellen

Mithilfe des Atommodells von DALTON lässt sich eine chemische Reaktion als Umordnung von Atomen erklären. Allerdings wird eine chemische Reaktion nicht mit Atommodellen dargestellt, sondern mit Reaktionsgleichungen beschrieben. Der Vorteil davon ist, dass solche Reaktionsgleichungen international verständlich sind, weil ihre Schreibweise in allen Ländern gleich ist.

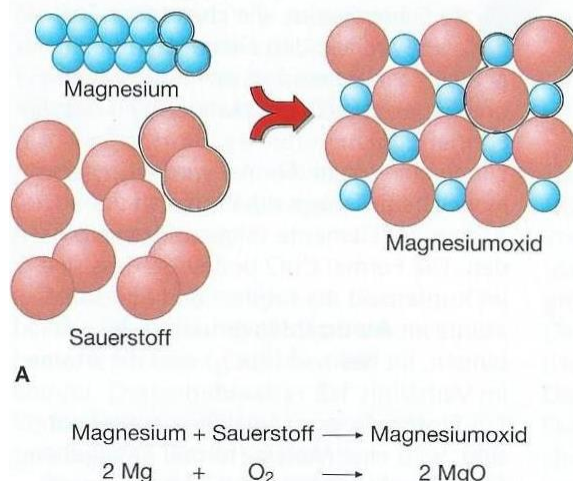


Abb. 17.16: Einrichten von Reaktionssymbolen mit Hilfe von Modellvorstellungen [26]

Zunächst ist zu berücksichtigen, dass die Jugendlichen im Anfangsunterricht die Faktoren und Indizes bei den chemischen Symbolen nicht differenzieren und oft fragen, welche Zahl denn vor das Atomsymbol gestellt und welche Zahl als Index rechts unten notiert wird. Es erscheint also günstig zu sein, zunächst die Anzahl von Atomsymbolen und dann die Anzahl von Molekülsymbolen anschaulich zu machen (vgl. Abb. 17.14). Diese Symbole sind sogar international üblich, auch in chinesischer oder russischer Sprache (vgl. Abb. 17.15).

Um Reaktionsgleichungen einzurichten, sind ebenfalls Modelle vorteilhaft. Es ist wenigstens an einem Beispiel einer Reaktion von Molekülen zu tun und mindestens einmal bei Reaktionen, bei denen Gitterstrukturen auftreten (vgl. Abb. 17.16).

Soll nach BERZELIUS gezeigt werden, wie aus den im Labor ermittelten Massenverhältnissen von Stoffportionen das Zahlenverhältnis der beteiligten Atome abgeleitet wird, ist die Bildung von Magnesiumoxid aus den Elementen geeignet: Man geht vom Massenverhältnis der Elemente aus und leitet durch die bekannten Atommassen das Zahlenverhältnis der Atome und damit die Formel MgO ab (vgl. Abb. 17.17). Es ist im späteren Unterricht nur zu korrigieren, dass Magnesiumoxid nicht aus Atomen, sondern aus Mg^{2+} - und O^{2-} -Ionen aufgebaut ist.

Sind Stoffmenge und Molbegriff eingeführt worden, so ist ein anderer Weg zu gehen (vgl. Abb. 17.18): es können die gemessenen Stoffportionen in Stoffmengen umgerechnet werden. Sind sie gleich groß (in unserem Beispiel $n = 0,14$ mol Atome), dann liegt ebenfalls die Verbindung mit dem Zahlenverhältnis der Atome $= 1 : 1$ vor, also die Formel CaO . Auch hier gilt die Modellvorstellung von Ionen in einem Ionengitter.

Beide historischen Wege zur Ermittlung von chemischen Formeln bleiben für die meisten Schüler und Schülerinnen sehr komplex und man kann diese Wege nicht überzeugend im Anfangsunterricht gehen – meist wegen fehlender Motivation, diese Kalkulationen verstehen zu wollen. Wird der wissenschaftlich aktuelle Weg der Formelermittlung beschritten, indem man den Jugendlichen mitteilt, dass der Experte durch Verfahren der Instrumentellen Analytik die Strukturen von Substanzen erkennt, dann fällt es leichter, aus der bekannten Struktur jeweils die Formel abzuleiten. Man zeigt ihnen beispielsweise das Modell für die Magnesiumoxid-Struktur (vgl. Bild in Abb. 16.17) oder auch nur das Bild, dann können die Lernenden das Zahlenverhältnis $1 : 1$ aus dem Modell ableiten und die Formel MgO finden.

Auch für Molekülstrukturen zeigt man das Molekülmodell der in Frage stehenden Substanz, lässt die Lernenden die Anzahl der verschiedenen Kugeln im Molekülmodell abzählen und kommt so zu den Molekülsymbolen H_2 , O_2 oder H_2O (vgl. erstes Bild in Abb. 17.16), oder zu Formeln wie $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ und CH_3COOH .

Ermittlung einer Verhältnisformel

Da man heute die Atommassen genau kennt, läßt sich aus dem Ergebnis von quantitativen Experimenten das Verhältnis der Atomanzahlen in einer Verbindung berechnen.

Beispiel Magnesiumoxid: MgO. Aus der Atommassentabelle entnimmt man für ein Magnesium-Atom die Masse 24,3 u, für ein Sauerstoff-Atom die Masse 16,0 u. Das *Atommassenverhältnis* ist also:

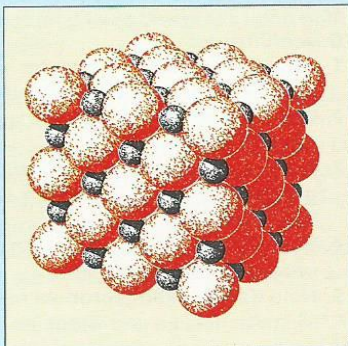
$$\frac{m(1 \text{ Mg})}{m(1 \text{ O})} = \frac{24,3 \text{ u}}{16,0 \text{ u}} = \frac{24,3}{16,0} \quad (1)$$

Bei einem Experiment erhält man aus 1,0 g Magnesium 1,66 g Magnesiumoxid. Das *Massenverhältnis* ist:

$$\frac{m(\text{Magnesium})}{m(\text{Sauerstoff})} = \frac{1,0}{0,66} \quad (2)$$

Damit wir das Massenverhältnis (2) leichter mit dem Atommassenverhältnis (1) vergleichen können, erweitern wir mit 24,3:

$$\frac{1,0 \cdot 24,3}{0,66 \cdot 24,3} = \frac{24,3}{16,0} \quad (3)$$



Das bei der Oxidbildung festgestellte Massenverhältnis ist also *gleich* dem Atommassenverhältnis. Das läßt sich nur verstehen, wenn im Magnesiumoxid gleich viele Magnesium- und Sauerstoff-Atome enthalten sind.

Magnesiumoxid enthält also Magnesium und Sauerstoff im Atomanzahlverhältnis 1:1. Die Verhältnisformel ist deshalb MgO.

Welche Formel hat Calciumoxid?

Gegeben: $m(\text{Ca}) = 5,6 \text{ g}$; $m(\text{O}) = 2,24 \text{ g}$

1. Berechnung der Stoffmengen:

$$n(\text{Ca}) = \frac{m(\text{Ca})}{M(\text{Ca})} = \frac{5,6 \text{ g}}{40 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 0,14 \text{ mol Calcium-Atome.}$$

$$n(\text{O}) = \frac{m(\text{O})}{M(\text{O})} = \frac{2,24 \text{ g}}{16 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 0,14 \text{ mol Sauerstoff-Atome.}$$

2. Berechnung des Stoffmengenverhältnisses:

$$\frac{n(\text{Ca})}{n(\text{O})} = \frac{0,14 \text{ mol}}{0,14 \text{ mol}} = \frac{1}{1}$$

Das Stoffmengenverhältnis $n(\text{Ca}) : n(\text{O})$ beträgt 1 : 1; die Verhältnisformel ist CaO.

Abb. 17.18: Formelermittlung und Molbegriff [27]

Abb. 17.17: Formel-Ableitung

aus dem Massenverhältnis [28]

Im zweiten Schritt kann man die Molekülmodelle mit dem Baukasten bauen lassen und vertieft somit die Anschauung für die chemischen Strukturen und entsprechend abgeleiteten Formeln. Im Vergleich von Kugelpackungen und Molekülmodellen ist allerdings sicher zu stellen, dass die Lernenden diese beiden grundsätzlichen Modellvorstellungen differenzieren – anderenfalls übertragen sie die Molekülvorstellung auf Kristallstrukturen und es kommt zu Fehlvorstellungen von „MgO- oder CaO-Molekülen“ [25].

Bietet man tatsächlich nicht nur Bilder, sondern räumliche Modelle zu Molekülen und Kristallstrukturen an, dann wird der Lernerfolg noch größer: Die Jugendlichen stellen sich räumliche Gebilde vor, die der wissenschaftlichen Modellvorstellung viel näher kommen. Bauvorschriften und Abbildungen solcher Modelle sind in Kapitel 6 und 7 des Buches zu fin-

den, an anderer Stelle ist das durchgängige Strukturorientierte Konzept für Chemieunterricht ausführlich beschrieben [20]. Bei der Verwendung der Strukturmodelle wird schließlich nicht nur das Chemieverständnis verbessert, sondern ganz allgemein das Raumvorstellungsvermögen der Jugendlichen trainiert [29]. Harsch und Schmidt [30 – 31] haben Stereobilder über Kugelpackungen, Kristallstrukturen und Gittersymmetrien geschaffen, die ebenfalls zur Förderung der 3D-Kompetenz im Chemie- sowie im Mathematikunterricht beitragen können.

17.5 Schluss

BERZELIUS hat sicherlich die Chemie des 19. Jahrhunderts entscheidend verändert: Nach Arbeiten von LAVOISIER und DALTON kamen die quantitativen Aspekte zur Untersuchung von neuen Substanzen hinzu, insbesondere akzeptierte und nutzte man das Gesetz von der Erhaltung der Masse bei chemischen Reaktionen und das Gesetz von der Konstanz der Massenverhältnisse der Elemente für viele „daltonide“ Verbindungen (es gab und gibt auch nichtstöchiometrische Verbindungen wie Eisenoxide und Eisensulfide mit variablen Massenverhältnissen). Die genialen Neuerungen von BERZELIUS waren die quantitativen Analysen vieler anorganischer und organischer Verbindungen, aus denen er zum einen die Atommassen immer genauer bestimmte, zum anderen die unterschiedlichen Zusammensetzungen durch erste Buchstaben-symbole ausdrückte. Solche ähnlichen Formeln verwenden wir noch heute – allerdings ohne seine Punkte oder Striche.

Den Schülern und Schülerinnen sollte im Chemieunterricht ein Gespür vermittelt werden, wie schwierig es war, die Begriffe Atom, Ion und Molekül zu erarbeiten, diesen nicht direkt wägbaren Teilchen exakte Massen zuzuordnen, sie bei den großen Zahlen sogar zu zählen und dafür die Theorie von Stoffmengen und Molbegriff zu entwickeln.

Die Symbole von BERZELIUS sind heute so grundlegend für die Chemie, dass sie immer auch im Unterricht Verwendung finden. Hier herrscht jedoch eine große Diskrepanz zwischen den Zielen, die BERZELIUS für die Symbole formuliert hat und der Empfindung von Schülern. Die Symbole schaffen wenig Transparenz und Klarheit, sondern werden zunächst als ‚Geheimsprache der Chemiker‘ verstanden. Viele inhaltliche und methodische Vorschläge der Chemiedidaktik versuchten und versuchen immer noch, die Verständnisprobleme der Schüler bezüglich der chemischen Symbolsprache zu beseitigen (vgl. Abb. 16.14 bis 16.18). Doch auch aktuelle Studien belegen, dass die chemischen Verbindungssymbole immer noch eine ‚Dauerbaustelle‘ im schulischen Kontext sind [32].

Die chemischen Symbole stellen im Unterricht den ‚Scheideweg‘ zwischen Ablehnung und Zuneigung zum Fach Chemie dar. Es zeigt sich, dass chemische Formeln im Unterricht kein tieferes Verständnis der Schüler zu den fachlichen Inhalten produzieren. Die chemische Formel darf nicht nur als „Symbol auswendig gelernt und formal eingesetzt werden, vielmehr muss bei ihrem Gebrauch jeweils der konkrete Inhalt bewusst werden“ [33]. Die Schüler verbinden die Symbole nicht mit Modellen und Modellvorstellungen zu den Strukturen der Stoffe. Diese Informationen sind den Verbindungssymbolen, wie BERZELIUS sie verwendete, nicht direkt zu entnehmen. Es stehen heute jedoch weitere strukturabbildende Symbole zur Verfügung.

Der schwierige Zugang der Schüler und Schülerinnen zu Verbindungssymbolen ist nicht in der von BERZELIUS gewählten komplexen Darstellungsweise begründet. Den eigentlichen Informationsgehalt der Symbole und Formeln, nämlich die Angabe der Atomzahlenverhältnisse, bilden sie früher wie heute einwandfrei ab. Der unterrichtliche Rahmen und die Gestaltung der Einführung der Symbole sind vielmehr für die Annahme und das Verständnis seitens der Schüler entscheidend. Die historische, an BERZELIUS' Analysen ausgerichtete Erarbeitung der Formeln bleibt schwierig und bietet keine realistische unterrichtliche Umsetzung an.

Die Orientierung des Unterrichts an chemische Strukturen wie Kristallgitter und Molekülmodelle stellt eine bessere Möglichkeit dar, um das Verständnis für die Formeln und damit eine positive Einstellung zum Unterricht zu erreichen. Wählt man die ersten Experimente im Anfangsunterricht so aus, dass Strukturmodelle sinnvoll für deren Interpretation eingesetzt werden können [20], leiten Lernende aus den Modellen leicht entsprechende Formeln ab. Empirische Erhebungen haben ergeben, dass auch mit dem von Harsch, Heimann, Benmokhtar und Wagner entwickelten START-Konzept [34] bereits im Chemieanfangsunterricht erstaunlich gute Erfolge beim Verständnis der chemischen Formelsprache erzielt werden können.

Historisch schlossen sich den Errungenschaften von BERZELIUS erst viele Jahrzehnte später mit ARRHENIUS, WERNER und VON LAUE (vgl. Kap. 21, 22 und 23) die Strukturvorstellungen zum Aufbau der Materie an – und damit das wahre Verständnis der Chemie!

Literatur

- [1] Szabadvary, F.: Geschichte der analytischen Chemie. Braunschweig 1966 (Vieweg)
- [2] www.wikipedia.de: Berzelius
- [3] Cordier, V.: Die Chemische Zeichensprache einst und jetzt. Graz 1928 (Leykam)

- [4] Setter, M.: Jöns Jakob Berzelius. Die Entwicklung der chemischen Zeichensprache in der Geschichte und im Unterricht zum Fach Chemie. Münster 2014 (Universität Münster)
- [5] Strube, W.: Der historische Weg der Chemie. Von der Urzeit bis zur industriellen Revolution. Leipzig 1976 (VEB Grundstoffindustrie)
- [6] Musli, S.: Die chemische Formelsprache im Spannungsfeld von Schülerleistung und Lehrererwartung. Münster 2008 (Schöningh)
- [7] Gessman, G.W.: Die Geheimsymbole der Alchymie, Arzneikunde und Astrologie des Mittelalters. Ulm 1959 (Arkana)
- [8] Wachenfeld, I., Stäudel, L., Wöhrmann, H.: Vom alchemistischen Symbol zum Element-„Symbol“ der modernen Chemie. NiU-P/C 29 (1981), 10
- [9] Soederbaum, H.G.: Berzelius. In: Bugge, G.: Das Buch der Grossen Chemiker. Band 1. Weinheim 1979 (Chemie)
- [10] Soederbaum, H.G.: Berzelius werden und wachsen. In: Monographien aus der Geschichte der Chemie Band 3. Leipzig 1970 (Kahlbaum)
- [11] Schwenk, E. F.: Sternstunden der frühen Chemie; Von Johann Rudolph Glauber bis Justus Liebig. München 2000 (Beck)
- [12] Brock, W. H.: Viewegs Geschichte der Chemie. Braunschweig 1997 (Vieweg)
- [13] Berzelius, J. J.: Lehrbuch der Chemie. Dresden 1828
- [14] Berzelius, J. J.: Versuch über die Theorie der chemischen Proportionen und über die chemischen Wirkungen der Electricität; nebst Tabellen über die Atomgewichte der meisten unorganischen Stoffe und deren Zusammensetzungen. Hildesheim 1973 (Gerstenberg, Reproduktion)
- [15] Berzelius, J. J.: Lehrbuch der Chemie. Band 3. Leipzig 1856 (Arnold)
- [16] Heilenz, S.: Eine Führung durch das Liebig-Museum. Gießen 2012
- [17] <http://reader.digitalesammlungen.de/de/fs1/object/goToPage/bsb10707809.html?pageNo=321>
- [18] Berzelius, J. J.: Neues chemisches Mineralsystem. Nürnberg 1847 (Schrag)
- [19] Strube, W.: Der historische Weg der Chemie. Band 2. Von der industriellen Revolution bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts. Leipzig 1981 (VEB Grundstoffindustrie)
- [20] Barke, H.-D.: Konzeption des strukturorientierten Chemieunterrichts. In: Barke, H.-D., Harsch, G. : Chemiedidaktik heute. Lernprozesse in Theorie und Praxis. Berlin, Heidelberg 2001 (Springer)
- [21] Dörrenbächer A.: JUPAC-Regeln und DIN-Normen im Chemieunterricht. Köln 1995 (Aulis)

- [22] www.standardsicherung.schulministerium.nrw.de/lehrplaene/upload/klp_SI/RS/ (abgerufen am 16.03.2014).
- [23] Schmidkunz H.: Von der Wortgleichung zur Symbolgleichung – Ein möglicher Weg zur Einführung der chemischen Zeichensprache und einfacher chemischer Reaktionsgleichungen. NiU Chemie 19 (2008)
- [24] Strehle, N.: Die chemische Symbolsprache und deren Einfluss auf Einstellungen der Schüler und Schülerinnen zum Chemieunterricht. Münster 2002 (Schriftliche Hausarbeit zum ersten Staatsexamen am Institut für Didaktik der Chemie an der WWU Münster)
- [25] Barke, H.-D.: Chemiedidaktik; Diagnose und Korrektur von Schülervorstellungen. Berlin, Heidelberg 2006 (Springer)
- [26] Tegen, H.: Erlebnis Chemie. Braunschweig 2011 (Schroedel)
- [27] Asselborn, W., u.a.: Chemie heute SI. NRW. Braunschweig 2012 (Schroedel)
- [28] Barke, H.-D., u.a.: Chemie heute. Sekundarbereich I. Hannover 1988 (Schroedel)
- [29] Barke, H.-D.: Raumvorstellung zur Struktur von Teilchenverbänden. In: Barke, H.-D., Harsch, G.: Chemiedidaktik kompakt – Lernprozesse in Theorie und Praxis. Berlin, Heidelberg 2011 (Springer)
- [30] Harsch, G., Schmidt, R.: Kristallgeometrie, Packungen und Symmetrie in Stereodarstellungen. Frankfurt und Aarau 1982 (Diesterweg, Salle, Sauerländer)
- [31] Harsch, G.: Stereobilder zum Training des Raumvorstellungsvermögens. In: Barke, H.-D., Harsch, G.: Chemiedidaktik heute. Lernprozesse in Theorie und Praxis. Berlin, Heidelberg 2001 (Springer)
- [32] Bernholt, S., u.a.: Die chemische Formelsprache – (un-)vermeidbare Hürden auf dem Weg zu einer Verständnisentwicklung? CHEMKON 19 (2012), Heft 4
- [33] Hallpap, P., Lux, F., Klein, O.: Die Fachsprache im Chemieunterricht. In: Pfeifer, Peter: Konkrete Fachdidaktik Chemie. München 1997 (Oldenbourg)
- [34] Harsch, G., Heimann, R., Benmokhtar, S, Wagner, A.: Das START-Konzept – Modelle und Formelsprache im Chemieanfangsunterricht. Köln 2014 (Aulis/Stark)