

Armin Börner

Chemie

Verbindungen
fürs Leben

wbg **THEISS**

Armin Börner

Chemie

Verbindungen fürs Leben

wbgTHEISS

Imrpessum

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.de> abrufbar.

Das Werk ist in allen seinen Teilen urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung in und Verarbeitung durch elektronische Systeme.

wbg Theiss ist ein Imprint der wbg.

© 2019 by wbg (Wissenschaftliche Buchgesellschaft), Darmstadt Die Herausgabe des Werkes wurde durch die Vereinsmitglieder der wbg ermöglicht.

Lektorat: Ulrike Hollmann, Hambergen; Dr. Beatrix Föllner, Nettetal

Grafik: Oliver Zeidler, Rostock

Registererstellung: Dr. Beatrix Föllner, Nettetal

Gestaltung und Satz: Anja Harms, Oberursel

Einbandabbildung: Netzwerk: koto_feja/iStock,

Blockchain: LuckyStep48/iStock

Einbandgestaltung: Vogelsang Design, Aachen

Besuchen Sie uns im Internet: www.wbg-wissenverbindet.de

ISBN 978-3-8062-3884-6

Elektronisch sind folgende Ausgaben erhältlich:

eBook (PDF): 978-3-8062-3940-9

eBook (epub): 978-3-8062-3941-6

Menü

[Buch lesen](#)

[Innentitel](#)

[Inhaltsverzeichnis](#)

[Informationen zum Buch](#)

[Informationen zum Autor](#)

[Impressum](#)

Inhalt

Einleitung

1 Die Formelsprache der Chemie - Symbole als Fenster zur molekularen Welt

- 1.1 Verbundene Elemente
- 1.2 Chemische Formeln und räumliche Perspektive
- 1.3 Reaktionsgleichungen beschreiben den Verkehr auf molekularer Ebene

2 Auf der Suche nach den Elementen des Lebens

- 2.1 Am Anfang stand der Kohlenstoff
- 2.2 Nur der Kohlenstoff kann es
- 2.3 Probleme mit dem freien Elektronenpaar - Stickstoff
- 2.4 Zu viel Appetit auf Sauerstoff - Phosphor
- 2.5 Eingeklemmt zwischen Sand und künstlicher Intelligenz - Silicium
- 2.6 Es wird immer metallischer - Bor
- 2.7 Ein Wort zum Sauerstoff
- 2.8 Was folgt daraus?

3 Man ist, was man isst

- 3.1 Die Qualle und die Strukturierung des Chaos
- 3.2 Wanderungen durch das Periodensystem
- 3.3 Änderung der Rahmenbedingungen

4 Theoretisches Intermezzo, in dem lange Ketten und Ringe im Mittelpunkt stehen

- 4.1 Dehydrierung versus Dehydratisierung – ein warnendes Beispiel für Begriffshygiene
- 4.2 Lange Ketten und die Frage: Warum sind Pflanzenöle flüssig?
- 4.3 Noch mehr fettige Angelegenheiten
- 4.4 Warum Sie überhaupt lesen können, was in diesem Buch steht
- 4.5 Kohlenstoffringe und Wasserstoffatome am Äquator
- 4.6 Die Grenzen der chemischen Formelsprache und der Tatbestand der Mesomerie

5 Funktionelle Gruppen als Bedingung des Lebens und als Totengräber des energiereichen Kohlenstoffs

- 5.1 Funktionelle Gruppen mit Sauerstoff
- 5.2 Die Hydroxygruppe am Beginn allen Lebens
- 5.3 Die Carbonylgruppe als zentrale Schaltstelle in der Chemie des Lebens
- 5.4 Die Carbonylgruppe in voller Aktion und die Frage, weshalb Fischfleisch weiß ist
- 5.5 Die zeitweilige Zählung der unruhestiftenden Carbonylgruppe und die molekulare Wiege der Zivilisation

6 Die friedliche Kooperation von pH-Antipoden

- 6.1 Carbonsäuren und Amine
- 6.2 Aminocarbonsäuren
- 6.3 Die Welt der Proteine

7 Die Entsorgung von Stickstoff

- 7.1 Federn, Schuppen, Haare und Nylon
- 7.2 Ammoniak, Harnsäure und anderer stickstoffhaltiger Abfall

8 Alice im Spiegelland

9 ATP - das Molekül des Lebens

10 Wie harmloses Wasser zur Furie werden kann und warum Enzyme so groß sind

11 Kohlenhydrate, Fette und Proteine: Was sollen wir essen?

12 Gerüche und Düfte: Was macht der Zucker in diesem Zusammenhang?

13 Sauerstoffradikale

13.1 Wenn Radikale zum Verhängnis werden

13.2 Radikale in der Malerei

13.3 Leben und Sterben mit Sauerstoff - ein Fazit

14 Wie die Farbe in die Welt kommt

15 Chemische Allianzen

16 Virtuose Genetik

16.1 Das Henne-oder-Ei-Problem der Genetik - vom Einfachen zum Komplexen

16.2 Beihilfe zum Informationstransfer - Epigenetik

16.3 Wer bin ich und wenn ja, wie viele? - Stabilität versus Variabilität

17 Zusammenschau und Einblicke in eine komplexe Welt

18 Was kommt nach dem Kohlenstoff?

Zitierte Literatur und weiterführende Bemerkungen

Bildnachweis

Namensregister

Stichwortregister

Man könnte die Menschen in zwei Klassen abteilen; in solche, die sich auf eine Metapher und 2) in solche, die sich auf eine Formel verstehn. Deren, die sich auf beides verstehn, sind zu wenige, sie machen keine Klasse aus.

Heinrich von Kleist

Einleitung

Wussten Sie eigentlich, dass „Vitamin C“ gar kein Amin ist? Es mag zwar lebensnotwendig sein, wie der erste Teil des Begriffes *vita* (lat. „Leben“) andeutet, aber ein Amin, wie das Wort endet, ist es definitiv nicht! Amine sind als chemisch nahe Verwandte des hochgiftigen und stechend riechenden Ammoniaks meist ebenfalls stinkende und aggressive Stoffe, die im Körper schnell umgewandelt werden, ehe sie Schaden anrichten können. Auch ein anderer Name für Vitamin C, „L-Ascorbinsäure“, gibt uns keinen Hinweis darauf, dass es gesund sein könnte. Der Stoff hilft zugegebenermaßen gegen Skorbut, deshalb auch die Herleitung aus dem lateinischen *scorbutus*, eine Krankheit früherer Seefahrer, bei der zuerst das Zahnfleisch blutet und am Ende die Zähne ausfallen. Bei dem Stichwort Säure aber müssten wir schwere gesundheitliche Beeinträchtigungen befürchten, denn die L-Ascorbinsäure ist noch saurer als die Essigsäure, vor der bekanntlich auf jeder Flasche im Haushalt gewarnt wird: „Außer Reichweite von Kindern aufbewahren!“

Nehmen wir ein anderes Beispiel. Sie haben sicherlich schon gehört, dass *Omega-3-Fettsäuren* gesund sein sollen, fast keine Ernährungsberatung kommt ohne diesen Hinweis aus, obwohl auf vielen Grabsteinen und Friedhofstüren in Deutschland neben dem griechischen Buchstaben α auch ein ω steht. Auch über „freie Radikale“, die einen besonders schlimmen Ruf haben, haben Sie

bestimmt schon gelesen. Gesundheitsbewusste Menschen versuchen ihnen mit viel frischem Obst und Gemüse auf den Leib zu rücken. Ungeachtet dessen nehmen wir mit jedem Atemzug unzählige dieser offenbar sehr gefährlichen Radikale in Form des Sauerstoffs zu uns.

Ja, was ist denn hier los? Man versucht, sich richtig zu ernähren und nun diese Verwirrung! Diese Begriffe, die heutzutage in den meisten Gesundheitslehren eine zentrale Rolle spielen, haben ihren Ursprung in der Chemie, genauer gesagt in der organischen Chemie. Wenn man verstehen möchte, was hinter den Begriffen steckt, ist es angebracht, dort einmal nachzuschauen, nach dem Motto: Erklärung bietet die Chemie! Doch davor schrecken fast alle zurück.

„Chemie habe ich nie verstanden.“ Das ist der Satz, den ich am häufigsten höre, wenn ich mich im Gespräch als Professor für Organische Chemie und bekennender Chemiefan oute. Dabei geben sich Lehrende an Schulen und Universitäten redlich Mühe, ihre Schützlinge in die Grundlagen dieser Naturwissenschaft einzuweihen. Es ist ein offenes Geheimnis, dass die meisten Menschen grundlegende Verständnisprobleme haben, wenn es um die Chemie geht. Schlimmer noch, die meisten stehen ihr äußerst skeptisch gegenüber. Das ist verständlich, wenn man die schlechte Presse kennt, die sie in der Öffentlichkeit hat. Danach vergiftet die Chemie in erster Linie unsere Umwelt. Ein paar Segnungen der Chemieindustrie werden zwar anerkannt, prinzipiell wird jedoch ein Hin oder Zurück – so eindeutig ist die Richtung des gesellschaftlichen Diskurses nicht – zur „chemiefreien Natur“ angemahnt.¹

Darüber hinaus ist die Fachsprache des Chemikers verwirrend und offensichtlich nur Eingeweihten verständlich. Man kann hin und wieder die Nachrichtensprecherin bedauern, wenn sie, die sonst so

redegewandt ist, beim Aussprechen des langen und komplizierten Namens einer Chemikalie, die schon wieder irgendwo die Umwelt verpestet hat, ins Stocken gerät. Da geht „Dioxin“ viel leichter von der Zunge, nicht nur weil das Wort kürzer ist, sondern weil die giftige Verwandtschaft zum „Toxin“ (altgriech. τοξικός *toxikós*, „giftiger“ [Pfeil]) auf der Hand liegt. Aber gibt es diese Verwandtschaft wirklich? Nein! Die beiden Begriffe, Dioxin und Toxin, haben etymologisch überhaupt nichts miteinander zu tun. Nach dem Klang eines Wortes sollte man in der Chemie nicht gehen. So ist zum Beispiel eine mit dem Dioxin verwandte Chemikalie, die sich vom „freundlich“ klingenden „Furan“ ableitet, vergleichbar giftig, klingt aber harmlos.²

Doch wer kann das alles wissen, zumal sich auch das intellektuell herausfordernde Feuilleton angesehener Tages- oder Wochenzeitungen eigentlich nie mit chemischen Sachverhalten beschäftigt? Ist diese Naturwissenschaft irrelevant!?* Dieser Zustand ist sogar nachvollziehbar, denn viele Medienleute und andere öffentlich wirksame Kultur- und Geisteswissenschaftler haben in der Schule das Fach Chemie meist schon frühzeitig abgewählt.** Das bleibt nicht ohne Folgen. Durch die explosionsartige Vermehrung des Wissens und den mithilfe des Internets fast unbegrenzten Zugang dazu steht der moderne Mensch allein und hilflos inmitten einer überbordenden Ratgeberliteratur. Der Medienwissenschaftler Norbert Bolz schlussfolgert daraus, „dass die Differenz zwischen dem, was man als Information erfasst, und dem, was man operativ beherrscht, immer größer wird“.³ Allergische Abwehrreflexe gegen die intellektuellen Zumutungen der Naturwissenschaften sind die logische Konsequenz. Obwohl Naturwissenschaften und Technik die hoch entwickelten Gesellschaften dominieren,

spielen sie immer weniger eine Rolle bei der lebensweltlichen Orientierung.

Es drängt sich in diesem Zusammenhang ein Bild auf, das der Philosoph Friedrich Nietzsche seinerzeit vom Menschen der Zukunft malte: „Deshalb muss eine höhere Cultur dem Menschen ein Doppelgehirn geben, [...] einmal um Wissenschaft, sodann um Nicht-Wissenschaft zu empfinden.“⁴ Offenbar hat sich dieses Doppelgehirn bisher nicht durchgesetzt. Stattdessen wächst der Abstand zur Wissenschaft. So ist es beunruhigend, wenn mittlerweile viele Ernährungsberater, praktizierende Ärzte und engagierte Umweltschützer die Brücke zwischen beiden Welten nicht mehr finden und ihre Hilflosigkeit in Sachen Chemie eingestehen. Entweder gehen sie auf respektvolle Distanz oder bekunden Ablehnung. Eigentlich kann man das ihnen nicht krummnehmen. Auch viele Menschen, die sich hauptamtlich mit der Chemie beschäftigen, sehen dies vor allem als Möglichkeit, sich vorrangig mit einem stark eingegrenzten Sachgebiet intensiv zu beschäftigen, um daraus berufliches Auskommen, intellektuelle Befriedigung oder sogar hohe gesellschaftliche Reputation, etwa als Professorin oder Professor, zu beziehen.

Ich möchte am Anfang dieses Buches die Behauptung aufstellen, dass Chemie, insbesondere die organische Chemie, viel mehr ist als nur eine Quelle fürs tägliche Brot und das Image. Sie bietet ein Verfahren zur Welterklärung, indem sie das Basiswissen für Biochemie, Verhaltensbiologie, Anthropologie, Medizin und Ökologie liefert. Karl Jaspers, einer der herausragenden Vertreter der Existenzphilosophie, hätte an dieser Stelle von „Existenzerhellung“ gesprochen, wobei er dabei sicher nicht an die Chemie gedacht hat.⁵ Die Chemie benennt Ursachen, wo Begründungen nicht mehr hinreichen.*** Als exakte Naturwissenschaft hat die Chemie den Charme, miteinander zusammenhängende und nachprüfbare

Aussagen zu liefern, gleichzeitig wirkt sie hinein bis in die Geisteswissenschaften und in den Alltag der Menschen, indem sie Narrativbögen, also Kausalerzählungen mit einem roten Faden, zur Verfügung stellt. Chemiekenntnisse können die Welt strukturieren und somit zur Orientierung im täglichen Leben beitragen.

Selbstredend soll in diesem Buch kein einseitiger Chemismus propagiert werden. Es geht auch nicht darum, die Dinge noch komplizierter zu machen. Eine Geschichte ist aber nicht komplett, wenn der Anfang fehlt. Wenn wir über die uns umgebende Welt und damit auch über uns selbst nachdenken wollen, müssen wir die Tatsache akzeptieren, dass wir selbst und unsere Umwelt aus Tausenden von chemischen Verbindungen bestehen, die miteinander in oft noch wenig bekannter und hochkomplexer Weise wechselwirken.⁶ Ob Bratwurst, Pizza oder ein erlesenes Gericht der französischen Küche, Cola, Tee oder ein edler Rotwein, alles, was wir essen und trinken kann mithilfe der Chemie beschrieben werden. Dieser Sachverhalt ist unabhängig davon, ob Sie vegetarisches Essen oder lieber einen deftigen Schweinebraten bevorzugen. Jedes Mal wenn wir Luft holen, nehmen wir eine Menge Sauerstoff zu uns, der irgendetwas in unserem Körper anstellt. Nur was? Und wenn wir wissen, was da passiert, schließt sich umgehend die nächste Frage an: Wer lenkt das alles? Wenn wir in die freie Natur hinausgehen, sind wir umgeben von Farben, deren Entstehung chemischen Prozessen zu verdanken ist. Chemische Duftstoffe wirken nicht nur zwischen Bienen und Pflanzen, sondern bestimmen gleichermaßen das soziale Verhalten von Menschen. Unser Gehirn, das wahrscheinlich komplizierteste Gebilde im Universum, ist aus chemischen Verbindungen aufgebaut. Bewusstsein und Erinnerung haben eine chemische Basis. Diese mentalen Phänomene sind an chemische Verbindungen, speziell an

Lipide und Proteine, die zusammen das Myelin bilden, geknüpft. Alzheimer beim Menschen oder die um die letzte Jahrtausendwende so gefürchtete Krankheit BSE (*bovine spongiforme Enzephalopathie*) bei Rindern lassen sich zuverlässig durch eine veränderte chemische Struktur im Gehirn diagnostizieren.

Wenn wir bewusst leben wollen, müssen wir uns zunächst Wissen, das heißt Begriffe und Zusammenhänge, aneignen, mit dessen Hilfe wir über uns und unsere Umwelt nachdenken können. Ludwig Wittgenstein, der sich über die Sprachanalyse dem Wesen des Menschen nähern wollte, hat es so formuliert: „Was wir nicht denken können, das können wir nicht denken. Wir können also auch nicht sagen, was wir nicht denken können.“⁷ Seine These wird mittlerweile durch die moderne Neurochemie und Neurobiologie gestützt. Er hätte es auch „chemischer“ sagen können: Ohne die chemischen Strukturen in unserem Gehirn, die sich vergleichbar zu einer virtuellen dreidimensionalen Landkarte mit all ihren Autobahnen, Bundesstraßen, Landstraßen und Feldwegen entfaltet, sind wir auch bei bestem Willen nicht in der Lage, über bestimmte Angelegenheiten nachzudenken, geschweige denn sie sprachlich zu benennen. Sie sind *terra incognita*.

Keine Angst, ich möchte Sie nicht mit Orbitaltheorien oder detaillierten Reaktionsmechanismen traktieren, also mit dem, worüber sich Berufschemiker tagsüber den Kopf zerbrechen. Dafür gibt es diese Spezialisten. Mit diesem Wissen werden Sie auch nicht weiterkommen, wenn Ihnen Ihre Hausärztin Aspirin gegen Schmerzen verordnet oder Ihre Zucker- oder Cholesterolverwerte analysiert. Sie sollten aber misstrauisch werden, wenn Ihnen Ihr Apotheker bei einer Erkältung eine Tasse heiße Zitrone empfiehlt, „damit das Vitamin C richtig zur Wirksamkeit gelangt“.

Anliegen dieses Buches ist es, mittlerweile verschüttetes und wahrscheinlich nie angewendetes Wissen aus Ihrem

Chemieunterricht hervorzukramen und am Beispiel unserer Lebenswelt zu interpretieren. Gleichgültig, ob Sie noch studieren, Arzt, Ökobäuerin, Koch oder Rentnerin sind, ich verspreche Ihnen, dass Sie nach der Lektüre einen völlig neuen Blick auf sich selbst und die Sie umgebende Natur haben werden.

Nachdem Sie dieses Buch gelesen haben, werden Sie wissen, was uralte Höhlenzeichnungen in Spanien, die Erfindung der räumlichen Perspektive während der Renaissance und die Formelsprache der Chemie gemeinsam haben. Sie werden weiterhin erfahren haben, warum Erdöl Millionen von Jahren unbeschadet in der Erde liegen konnte, bis wir es heutzutage innerhalb von Sekundenbruchteilen in unseren Autos verbrennen können. Auf der anderen Seite möchte ich Ihnen erzählen, warum Stoffwechselfvorgänge unterschiedlich schnell in unserem Körper ablaufen und dass eine oftmals diagnostizierte „Dehydrierung“ nichts, aber auch überhaupt nichts mit krankhaftem Wasserverlust zu tun hat, was uns Sportreporter und Mediziner so gern einreden möchten. Wir wollen uns fragen, warum sich in unseren geografischen Breiten die Laubblätter im Oktober bunt färben und letztendlich abfallen. Die Antwort soll über die romantischen, aber unbefriedigenden Verszeilen von Theodor Storm: „Das ist der Herbst; die Blätter fliegen ...“,⁸ hinausreichen. Gleichzeitig sollen Sie verstehen, weshalb es für Menschen, aber auch für eine Robbe oder einen Wal besser ist, Fette anstelle von Kohlenhydraten unter der Haut zu speichern. Die Antwort wird uns geradewegs zum Problem von scheiternden Diäten führen. Wir wollen uns der Bedeutung des Kochens aus chemischer Sicht nähern und den Einfluss von Zucker auf die Entscheidungsfreudigkeit von Richtern an einem israelischen Bewährungsgericht analysieren. In einem gesonderten Kapitel werden wir Ähnlichkeiten bei der

Energieversorgung in biologischen Zellen mit wirtschaftlichen Abläufen in modernen Gesellschaften wie der *Just-in-time-Lieferung* von Vorprodukten herausfinden. Wir wollen auch den Fragen nachgehen, warum Koalas in Australien so friedliche Zeitgenossen sind, weshalb ein „blauer Fleck“, also ein Hämatom, alle Farben des Regenbogens annimmt und warum der berühmte Geiger Niccolò Paganini so verflixt schwierige Stücke mit der Violine spielen konnte.

Um die Antworten zu verstehen, müssen wir uns auf die Chemie und ihre Besonderheiten einlassen. Sie werden in diesem Zusammenhang die Symbolsprache, also die berühmten chemischen Formeln, kennen- und auch interpretieren lernen. Chemische Formeln sind nicht nur Fenster in die Welt der Atome und Moleküle, sondern verbinden auch gleichzeitig dieses geheimnisvolle Universum mit unserer erfahrbaren Lebenswelt. Die Formeln sind ausgesprochen logisch, aber, und davor hat der britische Kulturwissenschaftler Terry Eagleton gewarnt: „Eine chemische Formel verstehe ich nicht dadurch, dass ich mich in sie einfühle. Das zu glauben, wäre ein krass romantischer Irrtum über das Wesen des Verstehens.“⁹ Wir müssen uns daher die Mühe machen und uns einige Grundlagen der Formelentstehung vor Augen führen. Aber keine Angst, Sie werden in diesem Buch nur dann auf Formeln stoßen, wenn sie wirklich notwendig sind, und wir werden dann gemeinsam nur deren Besonderheiten analysieren. Teile einer chemischen Formel, die für unsere Diskussion nicht relevant sind, werden einfach mit R, das bedeutet „Rest“, abgekürzt.* Gleichzeitig werde ich Ihnen erzählen, warum im letzten Jahrhundert die vertrauten, oftmals sehr poetischen Trivialnamen in der modernen Chemie keine Perspektive mehr hatten.

Ich möchte Sie auf die Sonderstellung des Kohlenstoffs hinweisen und erklären, warum sich ausgerechnet dieses Element und seine Verbindungen aus der Vielzahl der Elemente, die das Periodensystem der chemischen Elemente (abgekürzt PSE) noch zu bieten hat, durchsetzen konnte. Offenbar haben wir es mit einer Form von Evolution zu tun. Evolution würden Sie an dieser Stelle möglicherweise nicht vermuten. Der Grundsatz von Herbert Spencer: *survival of the fittest*, der die Evolutionstheorie von Charles Darwin am besten auf den Punkt bringt, ist aus der Biologie bekannt. Dass „Gene“ Träger der Erbinformation sind und an nachfolgende Generationen leicht verändert weitergegeben werden – daran haben wir uns gewöhnt. Dass es sogar „Meme“, also Bewusstseinsinhalte (zum Beispiel Ideen), die soziokulturell vererbt werden, gibt, haben wir zur Kenntnis genommen, seit es uns Richard Dawkins erklärt hat.¹⁰ Solche Schöpfungen des Menschen finden wir beispielgebend in den großen Weltreligionen, die sich, nachdem sie ihre punktuellen Anfangsstadien überwunden hatten, über historisch lange Zeiträume reproduzieren konnten und gleichzeitig kontinuierlich an veränderte Rahmenbedingungen anpassten, sozusagen ihre kulturelle DNA veränderten. Nun soll es sogar eine chemische Evolution auf dem Gebiet der Atome und Moleküle geben? Wir werden uns daran gewöhnen müssen, dass Leben auf der Erde nicht erst mit Einzellern wie Viren, Archaeobakterien und Bakterien begann, sondern dass die Chemie davor, die Wechselwirkungen zwischen Atomen und Molekülen, eine ganz wichtige Voraussetzung für Entwicklung war und bis heute ist.

Das vorliegende Buch soll die Vorzüge einer angeregten Plauderei mit den mentalen Anstrengungen angewandter Naturwissenschaft verbinden. Es kann als Lesebuch und gleichermaßen als einführendes oder ergänzendes

Lehrbuch dienen. Das Buch ist für jene geschrieben, die sich auch ohne ein Chemiestudium für die Abläufe im eigenen Körper und für die belebte Natur interessieren. Auch Lehrende der Chemie, Biochemie, Biologie und Medizin werden Argumente finden, warum die Chemie jenseits von mehr oder weniger abgelegenen Wissensinseln ein gehöriges Rationalisierungspotential besitzt. Sie ist nicht vorrangig das, „was knallt und stinkt“, sondern zuallererst ein Mittel, um zu verstehen, warum wir selbst und unsere Umwelt so aussehen und funktionieren, wie wir es täglich erfahren. Die angebotene chemische Bildung soll dabei im Sinne des großen Naturforschers Alexander von Humboldt helfen, „soviel Welt als möglich zu ergreifen und so eng, als [man] nur kann, mit sich zu verbinden“.¹¹

Mein besonderes Anliegen ist es, vor allem weniger chemieaffine Menschen davon zu überzeugen, dass sich ein klein wenig Verständnis der Chemie lohnt, weil sich daraus neue und meist sehr überraschende Zusammenhänge ergeben. Zitate aus dem kulturwissenschaftlichen, darunter auch philosophischen Bereich sollen bezeugen, dass sie sich als Fortsetzung der Chemie mit anderen Mitteln interpretieren lassen. In einigen Fällen sollen allzu freizügige Adaptionen aus der naturwissenschaftlichen Fachsprache in die Alltagssprache kritisch beleuchtet werden. Diese Methodik soll dazu beitragen, die neuen Erkenntnisse in bereits Bekanntes einzubetten und damit die Scheu vor der Chemie abzubauen. Chemische Fachbegriffe und Abläufe auf molekularer Ebene werden hin und wieder in verständliche Metaphern und Allegorien übersetzt. Dazu zählt auch der fast schon trivial anmutende Rückgriff auf Verkehrszeichen, die ich nutzen möchte, um den Verkehr auf molekularer Ebene zu deuten. Für näher Interessierte habe ich in den Fußnoten zusätzliche Beispiele beschrieben und für Fortgeschrittene werden vertiefende Erklärungen im Literaturteil angeboten.

Natürlich war es ein Wagnis für mich, die gewohnten Pfade der organischen Chemie zu verlassen. Das Ziel und das damit verbundene Risiko eines solchen Vorhabens hat der Physiker Erwin Schrödinger im Vorwort seiner Schrift über die biologischen Grundlagen der Vererbung, „Was ist Leben?“, beschrieben: „[...] daß einige von uns sich an die Zusammenschau von Tatsachen und Theorien wagen, auch wenn ihr Wissen teilweise aus zweiter Hand stammt und unvollständig ist – und sie Gefahr laufen, sich lächerlich zu machen [ist notwendig, um] unser gesamtes Wissensgut zu einer Ganzheit zu verbinden.“¹²

Dieses Buch ist im Laufe von einigen Jahren parallel zu meinen Fachvorlesungen an der Universität Rostock entstanden. Ich danke allen, die durch Diskussionen und Anregungen beitrugen, verschiedene Aspekte tiefer zu durchdenken, und mich auf zusätzliche Beispiele aufmerksam gemacht haben. Zuallererst möchte ich meinen beiden Töchtern Anna und Lisa danken, die aufgrund ihrer Expertisen in den Kulturwissenschaften mir eine Reihe wertvoller Hinweise aus diesen für mich etwas ferner liegenden Sachgebieten gegeben haben. Gisela Boeck und Christian Vogel haben das Manuskript kritisch und sehr akribisch gelesen; beiden bin ich für viele und höchst interessante Anregungen zu großem Dank verpflichtet. Bei den Kolleginnen und Kollegen Uwe Bornscheuer, Robert Franke, Detlef Heller, Jens Holz, Klaus Neymeyr, Stefan Meldau, Bettina Ohse, Axel Schulz, Wolfram Seidel, Andreas Seidel-Morgenstern, Anke Spannenberg und Joachim Wagner möchte ich mich für zahllose Anmerkungen und Hinweise auf chemischem bzw. biologischem Gebiet bedanken. Elisabetta Alberico, Haijun Jiao, Uwe Rosenthal, Ivan Shuklov und Baoxin Zhang danke ich für die Unterstützung bei fremdsprachlichen Übersetzungen von Begriffen und Zitaten. Mein Dank gilt ebenso Stephan Rüther für die vielfältigen Anregungen aus

seinem philologischen Wissensfundus, namentlich von Gräzismen und Latinismen mit Bezug zur Chemie.

Dieses Buch wäre nicht in der vorliegenden Form erschienen ohne das kompetente und konsequente Lektorat von Ulrike Hollmann. Sie hat viele Scharfen erkannt und ausgewetzt. Beatrix Föllner hat das Manuskript sehr sorgfältig für den Druck vorbereitet. Im gleichen Maße bin ich Oliver Zeidler für die äußerst professionelle Hilfe bei der Überarbeitung der Abbildungen zu Dank verpflichtet. Darüber hinaus hat er mir unschätzbare Rechtsbeihilfe bei der Drucklegung geleistet. Fatoumata Diop danke ich zusammen mit dem Verlag wbg Theiss für den Mut, dieses Wagnis einzugehen und Naturwissenschaften auf weniger ausgetretenen Wegen zu erkunden.

Last but not least danke ich Barbara Heller und Matthias Beller vom Leibniz-Institut für Katalyse für das immerwährende Interesse und die finanzielle Unterstützung.

-
- * Noch im Jahr 2002 konnte der Professor für Englische Literatur und Kultur Dietrich Schwanitz in seinem Buch *„Bildung. Alles, was man wissen muß“* (Goldmann Verlag, München) urteilen: „So bedauerlich es manchem erscheinen mag: Naturwissenschaftliche Kenntnisse müssen zwar nicht versteckt werden, aber zur Bildung gehören sie nicht.“ Daran hat sich auch 15 Jahre später nichts geändert.
 - ** Diese Tendenz spiegelt sich folgerichtig in der Berichterstattung über chemische Themen in den Medien im Rahmen von Naturwissenschaften, Medizin und Technik wider. Hier stehen 3 % Chemithemen zehnmals mehr Themen aus der Medizin gegenüber. Die Biologie bringt es auf viermal mehr Themen und selbst die Physik liegt noch vor der Chemie (H. Wormer, *Nachrichten aus der Chemie*, 2015, 63, 1155).
 - *** Das Präfix „be“ in Begründung hat die Bedeutung „bei“ oder „nahe“, was eine abschwächende Wirkung auf das Stammwort „Grund“ hat. Eine Begründung ist daher meist subjektiven Intentionen unterworfen. Eine „Ursache“ (auch Ursprung, Urgeschehen) beschreibt hingegen tiefere und objektive Zusammenhänge, die wir subjektiv nicht beeinflussen können.
 - * „R“ hat den Vorzug, dass kein Element des chemischen Periodensystems mit diesem Symbol belegt wurde. Auf diese Weise vermeiden wir

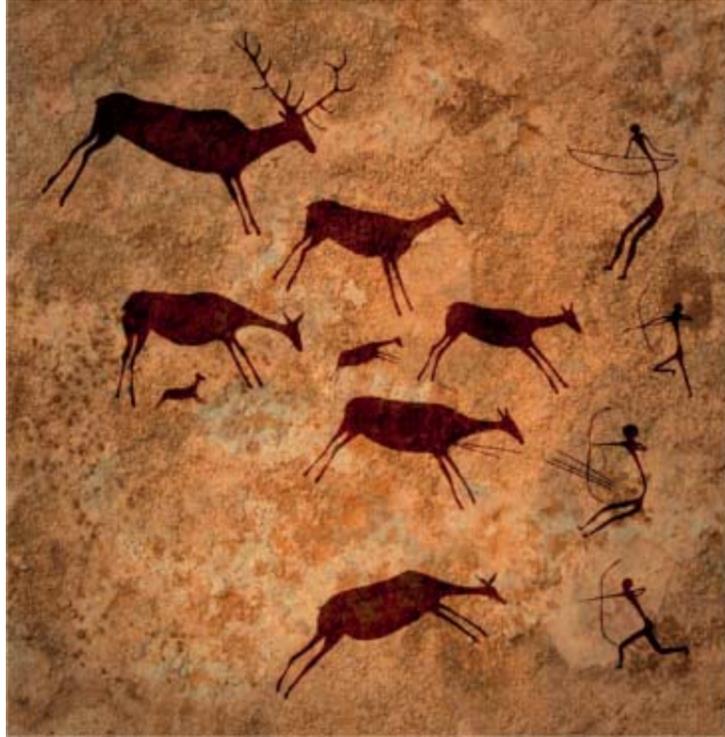
Missverständnisse.

1 Die Formelsprache der Chemie – Symbole als Fenster zur molekularen Welt

1.1 Verbundene Elemente

Im ersten Kapitel wollen wir der Frage nachgehen, was Höhlenzeichnungen aus der Altsteinzeit, die Entdeckung der räumlichen Perspektive während der Renaissance und die Formelsprache der Chemie gemeinsam haben.

Beim Betrachten der berühmten Malereien in den Höhlen des spanischen Ortes Valtorta sind wir fasziniert von der Realitätsnähe der dargestellten Bilder. Auch nach ca. 13.000 Jahren erkennen wir sofort Rehe, Hirsche und Menschen mit Pfeil und Bogen. Wir können uns sogar ohne viel Fantasie die Dramatik der dargestellten Jagdszenen vorstellen.



Höhlenmalerei in Valtorta (Spanien) (ca. 11.000 Jahre v. Chr.)



Relief mit ptolemäischem Hieroglyphentext am Tempel von Kom Ombo (Oberägypten) (ca. 304 bis 31 v. Chr.)

Wir würden sie heute in ähnlicher Weise malen, wenn wir keine anderen Aufzeichnungsgeräte, zum Beispiel einen Fotoapparat, zur Verfügung hätten. Fotos liefern sehr detaillierte Abbildungen, aber aufgrund der Unmenge an Details gehen beim flüchtigen Betrachten viele Informationen verloren. Aufgrund unterschiedlicher Vorkenntnisse und Vorlieben nehmen unterschiedliche Betrachter unterschiedliche Aspekte wahr.

Angenommen, die Künstler der letzten Eiszeit hätten schon eine Schriftsprache verwendet, so würde es uns heute schwerfallen, deren Intentionen und Aussagen zu verstehen. Es würde uns ergehen wie den Entdeckern der ägyptischen Hieroglyphen im Doppeltempel von Kom Ombo am östlichen Nilufer in Oberägypten. Dort sind menschenähnliche Wesen umgeben von rätselhaften Zeichen in den Stein eingraviert. Deren Deutung gelang erst nach Jahren mühseliger Entschlüsselungstätigkeit, und bis heute sind die wenigsten von uns in der Lage, diese Schriftzeichen zu lesen. Auch unsere modernen Schriftsprachen basieren auf Symbolen, die irgendwann einmal eine reale Bedeutung hatten, mittlerweile aber so abstrakt sind, dass wir ihre Interpretation erst mühsam in der Schule erlernen müssen.¹³

Die allerersten Symbolsprachen, mit denen unsere Vorfahren über die sie umgebende Welt hinausdrängten, sind hingegen viel anschaulicher. Auch Kinder zeichnen konsequent einfach, wenn sie beispielsweise einen Menschen darstellen wollen. Heraus kommen dabei die berühmten Strichmännchen, deren Bedeutung so eindeutig ist, dass sie als standardisierte Piktogramme überall auf der Welt auf Flughäfen oder Bahnhöfen Anwendung finden.



Eindeutig zu verstehen sind auch Verkehrszeichen auf unseren Straßen. Man muss nicht die Landessprache kennen, um sie deuten zu können. Nach diesem Prinzip funktioniert auch die Formelsprache der Chemie. Die chemischen Strukturformeln basieren auf Symbolen für die beteiligten Atomsorten und beschreiben deren Beziehungen zueinander.¹⁴ Die Beziehungen sind nicht willkürlich, sondern ergeben sich aus den Eigenschaften der Elemente. Strukturformeln korrespondieren auf diese Weise mit einem physikalisch determinierten Ordnungsrahmen. Die Atomsymbole repräsentieren Elemente, die mit den Abkürzungen ihrer lateinischen Namen wiedergegeben und im Periodensystem der chemischen Elemente (PSE) erfasst werden. Dabei stehen, um die wichtigsten zu nennen, C (*carboneum*) für Kohlenstoff, H (*hydrogenium*) für Wasserstoff, O (*oxygenium*) für Sauerstoff und N (*nitrogenium*) für Stickstoff. Die chemische Symbolsprache auf der Basis von Formeln kann jeder, der sich ein wenig in der Chemie auskennt, interpretieren. Der Begriff des Symbols steht mit dem altgriechischen Wort *συμβάλλειν* *syμβάλλειν* für „zusammenbringen“ und „vergleichen“ in Zusammenhang. Damit wird die Forderung deutlich, dass den chemischen Symbolen ein physikalischer Realitätsgehalt zukommen muss. Tatsächlich geben die chemischen Formeln in diesem Buch die Bindungsverhältnisse und die räumliche Anordnung der Atome in Molekülen mit ungefähr 10⁸-facher Vergrößerung wieder.

Hin und wieder werden in der Chemie auch Molekülmodelle mit Stäbchen und Kugeln verwendet. Diese ergänzen die chemischen Formeln auf sehr praktische Weise, indem sie die relativen Größen von Atomen und deren räumlicher Beziehungen zueinander noch fassbarer abbilden. Dadurch werden geometrische Relationen sichtbar und ein dreidimensionales Abbild der molekularen Struktur entsteht. Im Begriff der chemischen „Verbindung“ wird das strukturbildende Prinzip deutlich hervorgehoben; es wird ersichtlich, dass Teilchen, hier Atome, miteinander *verbunden* worden sind.*

Selbstverständlich kann man einer chemischen Verbindung auch einen Namen geben, aber oftmals sind diese Bezeichnungen ungenau oder sogar falsch. Und wenn sie exakt sind, dann sind sie so kompliziert, dass sie sich kein Mensch merken kann. Chemiker aus der ganzen Welt können sich mittels der Formelsprache auf Tagungen austauschen, wobei es völlig belanglos ist, ob die Konferenz in Tokio, Peking, Bagdad, São Paulo oder Berlin stattfindet und ob das Englisch der Beteiligten glänzend oder nur rudimentär ist.

Das ist aber noch nicht alles, was die chemische Formelsprache so attraktiv und vielseitig macht: Ebenso wie ein Strichmännchen die wichtigsten Merkmale eines realen Menschen mit Kopf, Armen, Rumpf und Beinen wiedergibt, so geben chemische Formeln Auskunft über Art und Anzahl der beteiligten Atome und ihre Bindungsverhältnisse zueinander. Die Realitätsnähe dieser Formeln können wir durch die Kristallstrukturanalyse überprüfen, bei der mittels einer physikalischen Methode, der Röntgenbeugung, Lage und Abstände der einzelnen Atome zueinander exakt ermittelt werden.

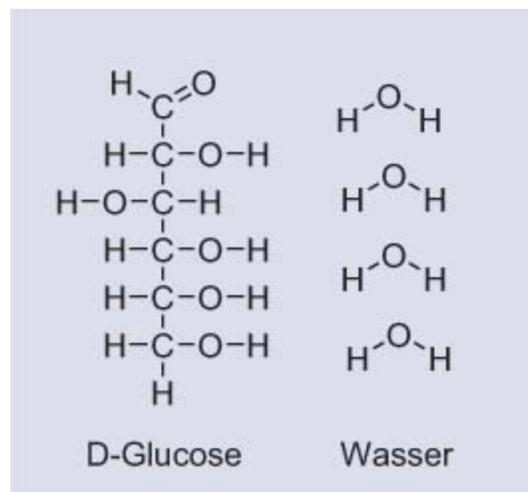
Aus den chemischen Formeln kann man zahlreiche chemische Eigenschaften der betreffenden Verbindung ableiten. Man muss diese Formeln nur interpretieren können. Der Eingeweihte kann dann, ohne ein einziges

chemisches Experiment im Labor zu machen, etwa vorhersagen, ob die Verbindung in Wasser oder in Pflanzenöl löslich ist, wie es um deren saure oder basische Eigenschaften steht oder ob sie brennbar ist. Ein bloßer Name hat bei Weitem nicht diese Aussagekraft.*

Für eine erste Übungseinheit schauen wir uns D-Glucose, gemeinhin als Traubenzucker bekannt, an. D-Glucose bildet zusammen mit D-Fructose unseren Haushaltszucker, der auch als Saccharose bezeichnet wird (altgriech. σάκχαρον *sákcharon*, „Zucker“). Beide gehören zu den Kohlenhydraten. Was verrät uns das? Um mit Goethes Faust zu sprechen: „Hier stock ich schon! Wer hilft mir weiter fort?“¹⁵ – dem realen molekularen Aufbau der Glucose kommen wir so nicht näher. Nimmt man das Kohlenhydrat beim Wort, müsste es eine wässrige Lösung von Kohle bezeichnen, was es aber nicht ist.** Hydrat ist nämlich nichts anderes als die altgriechische Übersetzung (ὑδὼρ *hýdōr*) von Wasser. Auch das Wort „D-Glucose“ bringt uns nicht wirklich weiter. Aus dem Namen kann man gerade einmal ablesen, dass die damit bezeichnete chemische Verbindung süße Eigenschaften hat, vorausgesetzt man weiß, dass im Wortstamm die altgriechische Bezeichnung γλυκύς *glykýs* für „süß“ steckt. Diese Eigenschaft können wir zwar nicht ohne weitere Kenntnisse aus der chemischen Formel ableiten, obwohl es mittlerweile auch darüber schon Theorien gibt, welchen räumlichen Aufbau eine Verbindung haben muss, damit unsere Zunge sie als süß vermeldet.¹⁶ Aber wir können anhand der Formel sofort sagen, dass die Verbindung gut in Wasser löslich sein muss. Die H-O-Symbole (meist in der Formel zu „HO“ verkürzt), die sogenannten Hydroxygruppen, verweisen auf eine große Ähnlichkeit mit dem Wassermolekül, H-O-H (Summenformel: H₂O). Nach dem in der Chemie geltenden Grundsatz: *Similia similibus solvuntur* (lat. „Ähnliches löst Ähnliches“) können wir

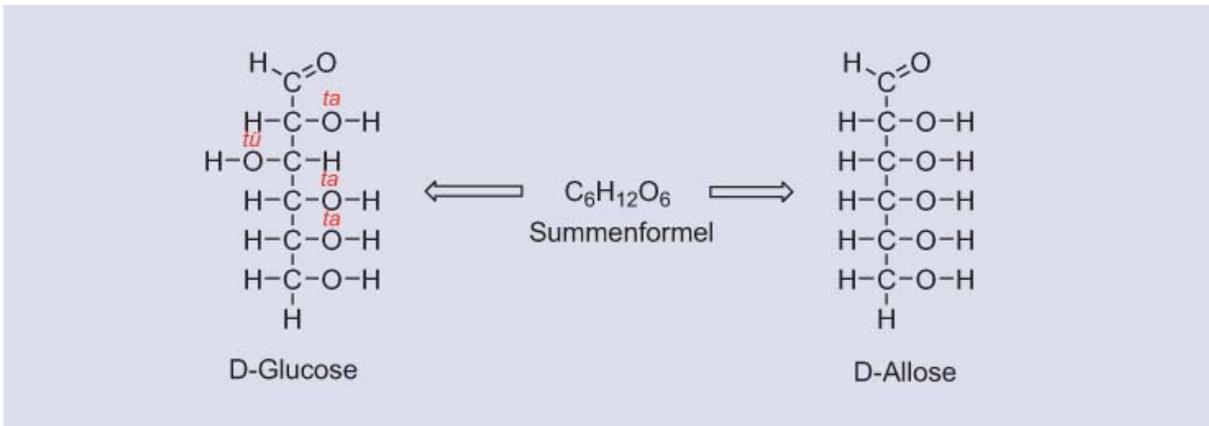
folgerichtig davon ausgehen, dass sich D-Glucose in Wasser auflöst.***

Nun werden Sie sicher sofort einwenden: „Dazu brauche ich keine chemische Formel, das weiß ich aus eigener Erfahrung, wenn ich beispielsweise ein Stück Würfelzucker im Tee auflöse.“ Was die Erfahrung aber nicht hergibt, ist der Aufbau des Moleküls, also die Anordnung der Hydroxygruppen an einer langen Kette, die nachzählbar in der Glucose aus sechs Kohlenstoffatomen besteht. Die Kohlenstoffatome bauen das Rückgrat dieser Verbindung auf, indem sie über chemische Bindungen fest miteinander verknüpft sind. Wir können weiterhin erkennen, dass von den sechs Kohlenstoffen fünf mit jeweils einer Hydroxygruppe verbunden sind.



Oftmals wird die Glucose auch mit ihrer Summenformel $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ beschrieben. Diese verkürzte Darstellung ist zweifelsohne einfacher zu merken, verschweigt uns jedoch wichtige Informationen: In der Strukturformel der D-Glucose zeigt nur eine einzige Hydroxygruppe nach links, die restlichen sind auf der rechten Seite. Offensichtlich könnte es auch anders sein. Und damit haben wir schon ein wichtiges Differenzierungsmerkmal kennengelernt, wie sich D-Glucose von allen anderen wasserlöslichen Zuckern

mit sechs Kohlenstoffatomen, etwa der D-Allose, unterscheidet.¹⁷



D-Allose ist ein Zucker, bei dem in der Strukturformel alle Hydroxygruppen auf der gleichen, hier rechten Seite stehen. Aus dieser Anordnung leitet sich auch der Name Allose ab. Dieser Zucker ist sehr selten und wurde bisher nur im afrikanischen Zuckerbusch (*Protea rubropilosa*) und in der Frischwasseralge *Ochromas malhamensis* nachgewiesen. Die im Schulunterricht oftmals zitierte „Feuerwehr“-Merkregel für die Anordnung der Hydroxygruppen „ta-tü-ta-ta“ in der D-Glucose muss also etwas zu bedeuten haben. Es scheint so, als ob Pflanzen gar keine andere Wahl haben, als während der Fotosynthese mithilfe des Sonnenlichtes D-Glucose herzustellen. D-Allose mit keiner aus der Reihe tanzenden Hydroxygruppe ist irgendwie keine echte Alternative zur Glucose und nur ein Thema für Spezialisten im Pflanzenreich. Ich werde später noch genauer auf die Ursachen hierfür eingehen. Unser Fazit an dieser Stelle lautet: Das für eine gesunde Ernährung so immens wichtige „Zuckerproblem“ ist konkret gesagt ein Glucoseproblem und kein Alloseproblem.

Wir sind bei eingehender Betrachtung der chemischen Formel sogar bei etwas Übung in der Lage vorauszusagen, wie viel Energie man aus Zucker gewinnen kann. Wie man