



COPYRIGHTED MATERIAL



Faszination Chemie

HANS-JÜRGEN QUADBECK-SEEGER

Man muss wissen, woher man kommt, um zu verstehen, wo man sich befindet, und um begründet vermuten zu können, wohin die Entwicklung gehen könnte. In diesem Sinne ist ein historischer Rückblick nicht nur notwendig, sondern sogar zwingend. Die Wurzeln der Chemie reichen zurück bis in die Zeit der vorsokratischen griechischen Philosophen im 6. und 5. Jahrhundert v. Chr. Diese versuchten, die Welt frei von Religionen und Mythen nur mit Verstand und logischem Denken zu erklären. Eine wichtige Frage war: Woraus besteht die Welt? Empedokles bot eine einfache, aber überzeugende Hypothese mit den bekannten vier Elementen an: Erde und Wasser sowie Luft und Feuer (Abb. 1). Verschiedene Mischungsverhältnisse und Umwandlungsarten sollten die Vielfalt der uns umgebenden Stoffe erklären. Um dem Paradoxon der unendlichen Teilbarkeit zu entgehen, stellte Demokrit die Hypothese von den nicht weiter teilbaren „Atomen“ auf. Der scharfsinnige Denker hatte recht. Aber wie viele Arten von Atomen es gab, davon hatte er keine Ahnung. Er schätzte, es müssten sehr, sehr viele sein.

Dieser Wissensstand währte über 2300 Jahre. Die Alchemie des Mittelalters brachte zwar zahlreiche Einzelerkenntnisse zuwege, aber die Fülle verwirrte mehr als sie Ordnung brachte. Erst die mit der Aufklärung beginnenden systematischen Experimente mit dem Gebot der Reproduzierbarkeit trennten Spekulation von gesichertem Wissen. Dennoch war es ein mühsamer, steiniger Weg, auf dem es nur langsam vo-



Abb. 1 Das Weltbild des Empedokles (er lebte zwischen 485 und 420 v. Chr. – die genauen Daten sind nicht bekannt): die vier Elemente Erde, Wasser, Luft und Feuer.



rang. Zwar wurden z. B. zu Lebzeiten Goethes (1749–1832) 32 Elemente entdeckt, bei seinem Tod waren jedoch erst 55 der 92 natürlichen Elemente bekannt. Man war noch weit davon entfernt, die Frage nach der Zusammensetzung der Welt beantworten zu können. Neue Methoden, wie die Spektroskopie und Nutzung der Röntgenstrahlung brachten weitere Fortschritte. Doch erst 1925 entdeckten Walter Noddack und Ida Tacke mit dem Rhenium (Re) das letzte der natürlichen Elemente. Die Zahl 92 hätte Demokrit in Anbetracht der stofflichen Vielfalt sicher enttäuscht. Die verhältnismäßig kleine Zahl war und ist jedoch gerade deswegen eine der größten Überraschungen, ebenso wie die unumstößliche Verlässlichkeit dieses Wissens.

Die Beantwortung der Frage, woraus die Welt besteht, gilt zu Recht als eine der größten intellektuellen Leistungen der Menschheit. Nun kennen wir alle Bausteine, und zwar nicht nur die der Erde. Im ganzen Universum finden sich keine weiteren Elemente, und nirgendwo herrschen andere Gesetzmäßigkeiten als jene, die wir hier auf der Erde ermittelt und experimentell überprüft haben (Abb. 2).

In der Mitte des 19. Jahrhunderts brannte der damals noch kleinen „chemical community“ noch eine andere Frage auf den Nägeln. Die Physik als Lehre und Wissenschaft von den Kräften, die die Natur beherrschen, hatte klare Gesetzmäßigkeiten, wie die Faraday’schen Gesetze oder die schönen Maxwell’schen Gleichungen erkannt. In der Chemie nahm das Wissen zu wie Heu auf dem Heuwagen. Von Ordnung war kaum eine Spur zu erkennen. Im Jahr 1869 schlug Dmitri Iwanowitsch Mendelejew sein berühmtes Periodensystem vor. Der deutsche Chemiker J. L. Meyer kam zu ähnlichen Überlegungen. Lücken wurden wagemutig mit der Prognose noch zu entdeckender Elemente gefüllt. Als Clemens Winkler 1886 daraufhin nach gezielter Suche das Germanium entdeckte, wurden die letzten Zweifel ausgeräumt. Aufgrund von Röntgenspektren konnte der junge Engländer Henry Moseley 1913 die Reihenfolge endgültig und zweifelsfrei festlegen.

Parallel zu der Herkulesaufgabe „Periodensystem“ erkundeten die Chemiker mit leidenschaftlichem Forschungseifer



Abb. 2 Das Periodensystem der Elemente gilt für das gesamte Universum.

die Eigenschaften der Elemente und ihrer Verbindungen. Das Periodensystem lieferte zwar wertvolle Hinweise, aber eben nur Hinweise. Es bestätigte sich immer mehr: Jedes Element ist ein Individuum mit ganz charakteristischen Eigenheiten. Man sieht es den jeweiligen Atomen nicht an, was in ihnen steckt. Erst in den Verbindungen mit anderen Elementen geben sie ihre Geheimnisse preis. Das ist Last und Chance zugleich. Verallgemeinernde Regeln lassen keine sicheren Prognosen zu. Alle Vermutungen müssen experimentell überprüft werden. Dabei besteht die Chance, neue, abweichende Eigenschaften zu entdecken. Diese können von großem Nutzen sein, wie gleich erläutert wird.

Die chemische Bindung, das eigentliche Mysterium der Chemie, kommt in zwei ganz unterschiedlichen Formen vor. Sie erfolgt durch die Wechselwirkung von Elektronen der äußeren Hülle der Atome. Bei der ionischen Bindung gibt ein Atom ein oder mehrere Elektronen an ein anderes Atom ab. Die Bindung ist dann die Folge elektrostatischer Anziehung. So besteht Kochsalz bekanntlich aus positiven Natriumionen und negativen Chlorionen. Die sogenannte kovalente Bindung entsteht dagegen, wenn zwei Atome sich zwei Elektronen teilen. Dieses „Bindungspaar“ vereint die beiden Atome zu einem Molekül.

Schon in der frühen Phase der Chemie fiel die herausragende Rolle des Kohlenstoffs auf. Dieses Element war in der Lage, eine Vielzahl unterschiedlicher kovalenter Bindungen einzugehen. Es wurde als das zentrale Element des Lebens erkannt. Seine Eigenschaften wichen so signifikant von allen anderen Elementen ab, dass die „Organische Chemie“ eine Sonderrolle einnahm. Sie galt zunächst als die Chemie des Lebens, wurde später aber umgewidmet als die Chemie des Kohlenstoffs.

Die Chemie in Lebewesen war für das begrenzte Wissen in der frühen Phase der Entwicklung zu kompliziert, um sie wirklich verstehen zu können. Den ersten Schub erhielt die Organische Chemie durch die Synthese von Farbstoffen. Diese waren sowohl für industrielle Nutzung als auch für die Wis-

senschaft von prägender Bedeutung. Ohne die schnell wachsende Palette von Farbstoffen hätte Robert Koch die krankheitserregenden Mikroorganismen nicht entdeckt (Abb. 3). Die Farbstofffabriken bildeten das Fundament für die aufstrebende chemische Industrie. Zwei Aspekte waren von übergeordneter Bedeutung. Erstens: Es zeigte sich, dass bereits kleine Änderungen am Molekül große Unterschiede in den Eigenschaften und Wirkungen zur Folge hatten. Daraus ergab sich zweitens, dass die Forschung sorgfältig und systematisch zu erfolgen hatte, um das optimale Molekül für den jeweiligen Zweck zu finden. Die sogenannte Angewandte Forschung richtet sich im Wesentlichen nach diesen Zielen.

Als zunächst eher zufällig die ersten synthetischen Medikamente entdeckt wurden, bekamen diese Aspekte noch größere Bedeutung. Die Suche nach neuen Wirkstoffen glich einem Fischzug nach optimalen Kandidaten in einem rasch wachsenden Meer von Molekülen. Mit der Metapher von Schloss und Schlüssel hat Emil Fischer die Bedeutung des „optimalen“ Wirkstoffs anschaulich beschrieben. Da das Schloss in der Regel nicht ausreichend bekannt war, blieb die Forschung auf das Konzept von Versuch und Irrtum angewiesen.

Das hat sich erst in den letzten Jahren gewandelt, seitdem die Biochemie die Struktur der Rezeptoren ermitteln kann. Das rationale „drug design“ rückt in greifbare Nähe (Abb. 4). Wer jedoch genauer hinschaut, wird erkennen, dass der Effekt von Serendipity (der glückliche, unvorhergesehene Glücksfall) immer noch eine Rolle spielt. In diesen Zusammenhang passt der Hinweis, dass z. B. alle, wirklich alle im Handel befindlichen Süßstoffe durch Zufall entdeckt wurden. Vielleicht lohnt es doch, jede neue Substanz auf der Zungenspitze zu testen.



Abb. 3 Robert Koch, Begründer der modernen Mikrobiologie, beim Färben von Bakterien mit Anilinfarben.

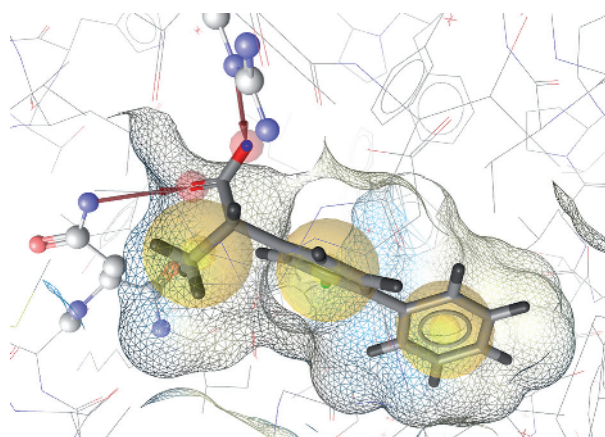


Abb. 4 Mittels Computerprogrammen kann die Wechselwirkung von Zielmolekül (Target) und Wirkstoff simuliert werden.

Die große Wirkung kleiner Änderungen war aus der Wirkstoffforschung hinlänglich bekannt. Das Faszinierende an der Chemie ist das Unerwartete, und zwar gerade dort, wo man alles zu kennen glaubte. Die Anorganiker lieben reine Substanzen und Materialien, insbesondere deren Kristalle. Bei der Untersuchung der reinen Elemente, insbesondere der in der 4. Gruppe stehenden Silicium und Germanium, stellten sie einen ähnlichen Effekt fest. Dabei ging es nicht um Änderungen am Molekül, sondern um Effekte im Kristallgitter. Kleine gezielte „Verunreinigungen“ mit Elementen der 5. Gruppe (Arsen, Antimon) verursachten dramatische Veränderungen der elektrischen Eigenschaften. Das führte letztlich über die Halbleiter zu der beeindruckenden Entwicklung von Computern. Das elektronische Zeitalter ist also letztlich eine Folge von Verschmutzung. Manche mögen jetzt sagen, sie hätten solches immer schon gehaut. Allerdings ist Verschmutzung das falsche Wort, denn es geht um gezielte Dotierung. Wie grundsätzlich wichtig dieses Prinzip ist, zeigt sich ebenso bei den Katalysatoren. Auch hier ist der Stand der Technik im Wesentlichen immer noch die Systematisierung von Versuch und Irrtum.

Eine Überraschung mit weitreichenden Folgen spielte sich bei den Elementen ab, die zu den sogenannten „Seltene Erden“ gehören. Sie sind etwas exotisch und trotzdem glaubte man, ihre Chemie und Legierungen ausreichend zu kennen. Doch 1983 wurde entdeckt, dass sich aus einigen Elementen aus dieser Gruppe extrem starke Magneten herstellen lassen. Die Legierungen aus Neodym, Bor sowie Eisen oder Cobalt fanden zunächst Einsatz beim Bau kleiner, leistungsstarker Elektromotoren. Ohne diese hätte man keine Walkmans bauen können. Diese Magnete sind inzwischen auch in jeder Festplatte von Computern ein entscheidendes Bauelement. Ebenso wichtig ist, dass die Ausbeute der Windkraftwerke von diesen neuen Legierungen wesentlich verbessert wird. Die Seltene Erden sind zwar nicht vom Aussterben bedroht, gehören jedoch mittlerweile zu den begehrtesten Elementen. Ihr Dornröschenschlaf ist zu Ende. Wer hätte das voraussehen können?

Zu Beginn der 20er-Jahre des 20. Jahrhunderts befand sich die Chemie der Elemente und Moleküle in blühender Entwicklung. Da stellte Hermann Staudinger eine abenteuerliche Behauptung auf. Wenn kleine Moleküle aneinander gehängt werden und die Ketten eine gewisse Länge haben, zeigen die Materialien völlig neue Eigenschaften. Es entstehen Feststoffe, die statt eines Schmelzpunktes einen Schmelzbereich aufweisen. Beim Abkühlen werden sie wieder fest, ohne ihre Eigenschaften verändert zu haben. Die „Chemiker-Gemeinde“ lehnte diese Vorstellung zunächst geschlossen ab. Dabei handelte es sich nicht einmal um eine Hypothese, sondern um reproduzierbare, experimentell gesicherte Ergebnisse. Dieser klassische Fall von Paradigmenwechsel fand seinen Abschluss mit der Verleihung des Nobelpreises im Jahr 1953 (30 Jahre später). Dieses Beispiel zeigt sehr anschaulich ein besonderes Phänomen der Chemie. Sie schafft sich durch ihre Entdeckungen und Entwicklungen völlig neue Forschungsfelder, für die es keine Vorbilder gibt. Die Makromoleküle der Natur bestehen aus Zuckern (Cellulose, Stärke) und Aminosäuren (Proteine). Die Materialien, die wir heutzutage als Kunststoffe bezeichnen, sind dagegen allein der Chemie zu verdanken (Abb. 5).

Die Polymerchemie hat einen ungeheuren Einfluss auf unseren Lebensstil. Von den vielen Dingen, die die Kunststoffe erst ermöglicht haben, sei nur das „Auto für jedermann“ angeführt. Ohne die kostengünstigen und einfach zu verarbeitenden technischen Kunststoffe wären die Autos viel zu teuer. Ein anderes Beispiel: Nach Untersuchungen von Soziologen hat unseren „Lifestyle“ nichts nachhaltiger geprägt als die Selbstbedienung. Diese Form der Versorgung mit Konsumgütern ist ohne moderne Verpackungstechnologie undenkbar (Abb. 6). Die frühe Entscheidung, dem Kohlenstoff eine Sonderrolle unter den Elementen zuzuschreiben, erweist sich immer wieder als richtig.

Was und wie viel sonst noch braucht ein Lebewesen neben dem Kohlenstoff aus dem Baukasten Periodensystem? Auffallend ist zunächst eine extrem ungleiche Verteilung. Wasserstoff, Sauerstoff und Kohlenstoff machen 98 % aus, mit Stickstoff und Calcium kommen noch 1,6 % hinzu. Die



Abb. 5 Die meisten Chemieprodukte werden aus Erdöl hergestellt, das in Raffinerien aufgearbeitet wird.



Abb. 6 Ohne Kunststoffverpackungen gäbe es keine Selbstbedienung.



Abb. 7 In jedem Smartphone finden sich über 30 Elemente – mehr als in unserem Körper (27 Elemente).

restlichen 0,4 % teilen sich insgesamt noch 22 Spurenelemente. Die Zahl ist erstaunlich gering, wenn man bedenkt, dass ein im Vergleich zu einem lebenden Organismus primitives Gerät wie ein Smartphone weit über 30 Elemente enthält (Abb. 7). Warum sich die Evolution auf so wenige Elemente beschränkte, wird auch die Chemie in der Zukunft beschäftigen. Dahinter versteckt sich nämlich die Frage, ob unsere Lebensform die einzige ist, die das Periodensystem zulässt. Ist ihm oder den Elementen überhaupt anzusehen, dass die Möglichkeit zur Entwicklung von Leben in ihnen steckt? Kohlenstoff wird wegen seiner Vielseitigkeit wohl unverzichtbar sein. Was ist aber sonst noch notwendig? Warum sind so allgegenwärtige Elemente wie Aluminium und Silicium unberücksichtigt geblieben? Könnte es Leben geben, in dem diese leicht verfügbaren Elemente eine Rolle, vielleicht sogar eine wichtige Rolle spielen?

Wir merken, wir sind mittendrin in Zukunftsfragen. Noch eine ganz naheliegende sei erwähnt. Leben wird normalerweise nach drei Kriterien definiert: Reproduzierbarkeit, Stoffwechsel und Reaktionsvermögen auf Umweltreize. Ein ganz wesentliches Merkmal ist darüber hinaus der Wille zum Leben. Jedes Lebewesen will leben. Dieser Lebenswille ist so elementar, dass er im Genom stecken muss. Wo aber ist eine solche materielle Manifestation dafür zu finden? Damit wären wir

bei einem Brückenglied zwischen Naturwissenschaften und Philosophie.

Wir wissen nun zuverlässig, woraus die Welt besteht. Wir kennen auch die Prinzipien, nach denen aus Atomen Moleküle entstehen. Moleküle können zusammenwirken und so funktionale Systeme bilden. Kunststoffe, Dispersionen, Waschmittel, Klebstoffe sowie auch Kosmetika und manches mehr sind solche Systeme, die unser Leben und unseren Lifestyle heute prägen. Gesucht und verbessert werden solche komplexen Produkte vorwiegend empirisch, d. h. durch erfahrungsorientiertes Suchen. Die theoretische Durchdringung der Zusammenhänge macht zwar große Fortschritte, aber wir sind noch weit entfernt von einem zielsicheren Design z. B. neuer Antibiotika oder Katalysatoren.

Das große und erst in den Anfängen verstandene Vorbild sind die biologischen Vorgänge, und zwar auf der molekularen Ebene. Dort kann die höchste Form von funktionalem Wechselspiel molekularer Systeme beobachtet und studiert werden. Die Systeme arbeiten in Selbstorganisation und dennoch – oder deswegen – mit höchster Präzision. Einen „deus ex machina“ gibt es nicht. Es ist fraglich, ob die Fähigkeiten des Menschen je dieses Niveau an Funktionalität und Verlässlichkeit erreichen werden. Auf jeden Fall gibt es noch unendlich viel zu lernen.

Das ist auch notwendig, denn neben den alten Herausforderungen an die Chemie, wie z. B. die Versorgung mit Nahrungsmitteln (Düngemittel, Pflanzenschutz) und die Bereitstellung von neuen Materialien (Kunststoffe, Legierungen)



Abb. 8 Die Menschheit muss mit den Ressourcen des Planeten Erde sparsam und nachhaltig umgehen.



oder die Suche nach neuen Medikamenten kommen neue Probleme mit hoher Dringlichkeit auf uns zu. Der Umweltschutz sowie die Energieumwandlung und -speicherung stehen an vorderster Stelle (Abb. 8).

Wenn wir auf die 200 Jahre zurückblicken, in denen sich die Chemie als Wissenschaft und Industrie entwickelt hat, zeichnen sich die großen Linien ab. Von der Chemie der Elemente und Moleküle ausgehend, hat sich die Chemie der molekularen Systeme entwickelt. Es interessiert nicht nur, wie die Moleküle miteinander reagieren, mindestens so wichtig ist es

zu erkennen und zu nutzen, wie Moleküle selbstorganisierend kooperieren. Lassen sich vielleicht sogar Systeme finden, Informationen molekular zu verschlüsseln, so wie es die Natur mit der DNA eindrucksvoll vormacht? Es gibt Fragen über Fragen. Ein durchgehender Aspekt ist jedoch auffallend: Zu Beginn der Chemie war sie schon ein spannendes, herausforderndes Abenteuer. Und heutzutage? Sie ist es immer noch, wenngleich auf einem ganz anderen Niveau und mit komplexeren Herausforderungen. Dass es so bleiben wird, lässt sich für die Zukunft heute schon sicher voraussagen.

