

Peter Atkins

Die wundersame Welt der Chemie

Peter Atkins

Die wundersame Welt der Chemie

Aus dem Englischen übersetzt
von Jürgen Schröder

Reclam

Titel der englischen Originalausgabe:
Peter Atkins: What Is Chemistry? Oxford: Oxford University Press,
2013.



MIX
Papier aus verantwortungsvollen Quellen
FSC® C105673

Alle Rechte vorbehalten

© für die deutschsprachige Ausgabe

2016 Philipp Reclam jun. GmbH & Co. KG, Stuttgart

Die Übersetzung erscheint mit Genehmigung der Oxford University Press, Oxford. *What Is Chemistry? First Edition* was originally published in English in 2013. This translation is published by arrangement with Oxford University Press.

© Peter Atkins Limited 2013

Umschlagabbildung: © Dreamstime.com

Gesamtherstellung: Reclam, Ditzingen. Printed in Germany 2016

RECLAM ist eine eingetragene Marke der

Philipp Reclam jun. GmbH & Co. KG, Stuttgart

ISBN 978-3-15-011070-6

Auch als E-Book erhältlich

www.reclam.de

Inhalt

Vorwort 7

1 Ihre Ursprünge, ihr Anwendungsbereich und Aufbau 12

2 Ihre Prinzipien: Atome und Moleküle 28

3 Ihre Prinzipien: Energie und Entropie 46

4 Ihre Reaktionen 60

5 Ihre Techniken 80

6 Ihre Leistungen 97

7 Ihre Zukunft 123

Periodensystem der Elemente 137

Glossar 139

Register 143

Vorwort

Ich hoffe, Ihnen die Augen zu öffnen und Ihnen ein faszinierendes, in intellektueller und ökonomischer Hinsicht bedeutendes Universum zu zeigen: die Welt der Chemie. Die Chemie hat zugegebenermaßen einen traurigen Ruf. Man erinnert sich an sie aus der Schulzeit als ein Fach, das weitgehend unverständlich war, reich an Fakten, aber arm an Verständnis, muffig und so weit von der wirklichen Welt der Ereignisse und Genüsse entfernt, dass es wenig lohnenswert erschien, sich mit ihren unsaubereren Begriffen, Zaubersprüchen, Rezepten und Regeln abzumühen. Im späteren Leben wird dieser traurige Ruf häufig noch trauriger durch das Bewusstsein der Auswirkung scheußlicher Chemikalien auf die Umwelt, welche in die freie Natur entweichen und Unheil über zartgrüne, kleebedeckte, bukolische Wiesen bringen, die zuvor die Heimat des glänzenden Klatschmohns und des tänzelnden Schmetterlings gewesen waren; die die Ufer, an denen einst wilder Thymian wuchs, in unwirtlichen Schlamm verwandeln, während dort, wo klare Bäche flossen, toxischer Schlick und gesundheitsschädlicher Schlamm entstehen; und den äolisch entzückenden Duft der Luft durch beißende Schärfe ersetzen und im Allgemeinen alles verschandeln.

Das alles will ich ändern. Ich möchte Sie ermutigen, die Chemie neu zu betrachten, durch moderne, unvoreingenommene Augen, so dass diese Erinnerungen und Einstellungen weggewischt und durch Verständnis und Wertschätzung ersetzt werden. Ich möchte Ihnen die Welt aus der Perspektive eines Chemikers zeigen, ich möchte, dass Sie ihre zentralen Begriffe verstehen und sehen, auf welche Weise ein Chemiker nicht nur zu unseren materiellen Annehmlichkeiten beiträgt, sondern auch zur menschlichen Kultur. Ich möchte darlegen, wie Chemiker denken und wie das,

was sie über die Materie – alle Formen von Materie, von Steinen bis hin zu Menschen – herausfinden, unsere Wahrnehmung der Welt angenehmer macht. Ich möchte Ihnen zeigen, wie Chemiker eine bestimmte Form von Materie nehmen, die sie vielleicht aus der Erde gesaugt oder ausgegraben oder vom Himmel gepflückt haben, und sie in eine andere Form verwandeln, etwa um uns zu kleiden, zu ernähren oder Trost zu spenden.

Ich möchte Ihnen den Gedanken nahebringen, dass die Chemie die Infrastruktur der modernen Welt liefert. Es gibt kaum einen Gegenstand des Alltagslebens, der nicht durch sie bereitgestellt wird oder auf den Materialien beruht, die sie geschaffen hat. Nimmt man die Chemie und ihren funktionellen Ableger, die chemische Industrie, weg, so nimmt man die Metalle und andere Baumaterialien weg, die Halbleiter der Computer und des Kommunikationswesens, die Brennstoffe der Heizung, der Stromerzeugung und des Transportwesens, die Textilien von Kleidern und Wohnungseinrichtungen und die künstlichen Pigmente unserer flammend bunten Welt. Nimmt man ihre Beiträge zur Landwirtschaft weg, so lässt man Menschen sterben, denn die Industrie stellt Dünger und Pestizide bereit, die es ermöglichen, auch mit kleiner werdenden Ackerflächen ansteigende Bevölkerungszahlen zu ernähren. Nimmt man ihren pharmazeutischen Zweig weg, so lässt man Schmerzen zu, da es keine Anästhetika mehr gibt, und verweigert Menschen die Aussicht auf Genesung, da Medikamente fehlen. Stellen Sie sich eine Welt vor, in der es keine chemischen Produkte gibt (einschließlich reinen Wassers): Sie sind in die Steinzeit zurückgeworfen noch vor der Bronzezeit: keine Metalle, keine Brennstoffe außer Holz, keine Textilien außer Pelzen, keine Medikamente außer Kräutern, keine Berechnungsverfahren außer mit Ihren Fingern, und sehr wenig Nahrung.

Technische Fortschritte erfordern die Verfügbarkeit von Materialien mit neuen und ausgeklügelten Eigenschaften, seien es eher elektrische, magnetische, optische oder mechanische Eigenschaften oder einfach nur eine höhere Reinheit. Fortschritte bei der Erhaltung der menschlichen Gesundheit, die in der Lage sind, die Beanspruchung der physischen Infrastruktur von Krankenhäusern und ihrer hochentwickelten, teuren Gerätschaften zu reduzieren, hängen von der Entdeckung und der Herstellung besserer, raffinierterer Medikamente ab. Es wird keine Fortschritte bei der Erzeugung, Verwendung und Erhaltung von Energie geben, ohne dass die Chemie die materielle Infrastruktur dafür liefert.

Es versteht sich jedoch von selbst, dass der außerordentliche Unterschied zwischen der unbearbeiteten Natur und dem, wozu die Chemie sie verwandelt, um unser Leben zu verbessern und zu verlängern, einen Preis hat, und es ist dieser Preis, der uns beunruhigt und zu Recht die Grundlage unserer Ängste vor den Umweltfolgen der Chemie darstellt. Ganz grob betrachtet, steigern die Produkte der Chemie unsere Fähigkeit, zu töten und zu verstümmeln, denn die Waffentechnik wird dadurch verbessert, dass neue Sprengstoffe und andere Wirkstoffe vervollkommen werden. Der unbestreitbare Einfluss, den Produkte und Produktionsprozesse auf die Umwelt haben, stellt häufig eine beständige und stärker zum Ausdruck gebrachte Sorge dar. Die Chemie verschafft der Gesellschaft die Fähigkeit, durch Regierungsentscheidungen effektiver Krieg zu führen, aufgrund wirtschaftlichen Drucks Produkte aggressiver herzustellen und sich persönlich zu entscheiden, noch mehr zu verschwenden, und schadet dadurch unserem einzigartigen und unersetzlichen Ökosystem.

Dieser Sorge werde ich mich auf diesen Seiten zuwenden, denn sie ist eine logische Folge des Fortschritts bei der Herstellung chemischer Produkte und des Vorhandenseins

nicht nur dieser Produkte, sondern auch des bei der Herstellung entstehenden Abfalls in der Umwelt gewesen. Man sollte jedoch ein ausgewogenes Bild von der Chemie vor Augen haben, und nicht nur eine einzelne schwarze Facette. Ohne Chemie wäre das Leben scheußlich, bestialisch und kurz. Mit der Chemie kann es bequem, unterhaltsam und wohlgenährt sein. Das Transportwesen kann effektiv sein; Kleidung kann verführerisch sein. Das Leben kann länger dauern. Ohne die dunkle und negative Seite der Chemie zu ignorieren, werde ich Sie dazu anregen, die strahlende und positive Seite ebenfalls anzuerkennen.

Bei allen diesen Beiträgen gibt es noch eine andere Dimension: die des Verstehens. Die Chemie liefert Einblicke ins Innere der Materie, indem sie zeigt, wie sich die Dinge verhalten. Ein Chemiker kann eine Rose anblicken und verstehen, warum sie rot ist, und auf ein Blatt sehen und verstehen, warum es grün ist. Ein Chemiker kann Glas ansehen und verstehen, warum es zerbrechlich ist, und einen Stoff betrachten und verstehen, warum er geschmeidig ist. Die Herrlichkeiten der Natur können natürlich auch ohne dieses innere Wissen erlebt werden, genauso wie sich die Musik auch ohne Analyse genießen lässt; aber das Verständnis, das die Chemie in die Eigenschaften der Materie in all ihren Formen einbringt, kann im geeigneten Moment zur Anwendung kommen, wodurch ein tieferer Genuss erreicht wird. Ich werde versuchen, Ihnen einen Teil dieses Verständnisses nahezubringen und zu zeigen, dass selbst eine kleine Dosis Chemie ihren täglichen Genuss steigern wird.

Das ist in breiten Pinselstrichen die Reise, auf die ich Sie mitnehmen werde. Ich werde versuchen, Sie von Ihren zum Teil schon vergessenen und vielleicht unangenehmen Erinnerungen an Ihre frühe Begegnung mit der Chemie wegzubringen. Nach der Lektüre dieser Kapitel werden Sie zwar keinen Abschluss in Chemie haben, denn die Chemie ist so-

wohl tief als auch breit, sie ist sowohl quantitativ als auch qualitativ, sie ist sowohl raffiniert als auch oberflächlich. Sie werden jedoch, so hoffe ich, ihre Struktur, ihre Kernbegriffe und ihre Beiträge zur Kultur, zum Wohlbehagen, zur Wirtschaft und zur Welt wertschätzen.

Zum Schluss möchte ich Professor David Phillips vom Imperial College für eine Reihe hilfreicher Bemerkungen danken.

Peter Atkins
Oxford, 2013

1 Ihre Ursprünge, ihr Anwendungsbereich und Aufbau

Nach einem ganz kurzen Blick auf die Ursprünge der Chemie in der Alchimie legt dieses Kapitel dar, dass alle modernen Abhandlungen des Gegenstands sich in Begriffen von Atomen vollziehen, der Währung der modernen Chemie. Als sich die moderne Chemie bildete, spaltete sie sich in eine Reihe von miteinander wechselwirkenden Unterdisziplinen auf, von denen die wichtigsten die physikalische, anorganische und organische Chemie sind, deren Interessengebiete ich beschreibe. Die Chemie ist jedoch eine zentrale Wissenschaft, die ihre Begriffe von der Physik bezieht und die Biologie erhellt. Dieses Einleitungskapitel schließt mit einer Erörterung dessen, welchen Platz die Chemie gegenwärtig in der Landschaft der Wissenschaften innehat.

Habgier. Habgier spornte die Menschheit zu einer außergewöhnlichen Reise an, die heutzutage jeden betrifft. Die besondere Spielart von Habgier, an die ich denke, war die Suche sowohl nach Unsterblichkeit als auch dem Erwerb grenzenloser Reichtümer. Der vermutete Weg zu beidem bestand in der Bearbeitung von Materie, um Elixiere herzustellen, die körperliche Gebrechen überwinden sollten, um Unsterblichkeit zu erreichen und um Rezepte zu erfinden, die mehr oder weniger alles, was eine Ähnlichkeit mit Gold hatte – entweder aufgrund seiner Farbe, wie bei Urin und Sand, oder aufgrund seines Gewichts, wie bei Blei –, in Gold selbst verwandeln sollten. Keines der beiden Ziele wurde zwar je erreicht, aber das ununterbrochene Herumbasteln der Alchimisten an der Materie machte sie in beträchtlicher Weise mit ihr vertraut und stellte, häufig buchstäblich, den Nährboden dar, auf dem sich eine wirkliche Wissenschaft – die Chemie – herausbilden sollte.

Das Hauptinstrument des Übergangs von der Alchimie zur Chemie war die Waage. Die Fähigkeit, Dinge genau zu wiegen, legte das Potential in die Hände der Menschheit, die Materie mit Zahlen zu verknüpfen. Die Bedeutung dieser Leistung sollte nicht unbemerkt bleiben, denn es ist in der Tat ganz außergewöhnlich, dass aussagekräftige Zahlen mit Luft, Wasser, Gold und jeder anderen Art von Materie verknüpft werden können. Auf diese Weise wurde die Untersuchung der Materie und ihrer möglichen Umwandlungen (der gegenwärtige Anwendungsbereich der Chemie) durch die Verknüpfung mit Zahlen in den Bereich der physikalischen Wissenschaften überführt, wo qualitative Begriffe quantitativ übersetzt und streng gegen die Theorien geprüft werden können, die sie umgeben und erhellen.

Das Wiegen von Materie, bevor und nachdem sie sich von einer Substanz in eine andere verwandelt hatte, führte zu dem Hauptbegriff, der allen Erklärungen in der Chemie zugrunde liegt: dem Begriff des *Atoms*. Der Begriff des »Atoms« war im menschlichen Bewusstsein mehr als zwei Jahrtausende ohne festen Grund umhergeschwebt, seitdem die alten Griechen ohne die geringste Spur von Belegen über irgendeine Art von letzter, unteilbarer, partikelförmiger Körnigkeit der Welt spekuliert hatten. Ihre Spekulation erhielt durch John Dalton (1766–1844) eine wissenschaftliche Grundlage, der durch die Analyse der Gewichte von Substanzen vor und nach einer Reaktion den Schluss zog, dass sich die Elemente, die grundlegenden Bausteine der Materie, aus unveränderlichen Atomen zusammensetzen und dass man sie durch das einfache Hilfsmittel des Wiegens nachverfolgen konnte, wenn eine Substanz sich zu einer anderen veränderte.

Atome sind heutzutage die Währung der Chemie. Fast jede Erklärung in der Chemie nimmt auf sie Bezug, entweder als einzelne oder zusammengebunden in den Kombinationen, die wir *Moleküle* nennen. Atome sind die Bestand-

teile aller Materie: Alles, was man sehen und berühren kann, besteht aus Atomen. So klein sie auch sind, ist es doch ganz verkehrt zu sagen, dass sie für das bloße Auge unsichtbar sind. Schauen Sie einen Baum an: Sie sehen Atome. Betrachten Sie einen Stuhl: Sie sehen Atome. Sehen Sie sich diese Seite an: Sie sehen Atome (selbst wenn diese Seite auf einem Bildschirm erscheint). Berühren Sie Ihr Gesicht: Sie berühren Atome. Berühren Sie einen Stoff: Sie berühren Atome. Freilich ist ein einzelnes Atom zu klein, um es zu sehen: Aber die Materie ist aus Bataillonen von ihnen aufgebaut, und die wimmelnden Bataillone sind für das bloße Auge als die Substanzen sichtbar, die uns umgeben. Später jedoch, in Kapitel 5, werde ich erklären, wie Chemiker heutzutage sogar Bilder *einzelner* Atome sehen können.

Es gibt gerade einmal etwas mehr als 100 verschiedene Typen von Atomen. Was ich genau unter »Typ« verstehe, werde ich im nächsten Kapitel erklären, wenn wir gemeinsam in sie hineinblicken und ihre unterschiedlichen inneren Strukturen identifizieren, die sie als verschieden auszeichnen. Genauso wie es die Elemente Wasserstoff, Kohlenstoff, Eisen usw. gibt, gibt es daher Wasserstoffatome, Kohlenstoffatome, Eisenatome usw. bis hinauf zum zuletzt entdeckten Element, das im Jahr 2013 das völlig nutzlose und äußerst kurzlebige 114. Element Livermorium ist. (Um genau zu sein: Es ist das Element 116, aber zwei, die ihm vorangehen, warten noch auf ihre Entdeckung.) Die Grundidee in der Chemie besteht darin, dass, wenn sich eine Substanz zu einer anderen verändert, die Atome selbst sich nicht verändern: Sie tauschen nur ihre Partner aus oder gehen in neue Anordnungen ein. In der Chemie geht es ausschließlich um Scheidung und Wiederverheiratung.

Obwohl »Atom« unschneidbar bedeutet, können Atome auseinandergeschnitten werden. Selbst Lehnstuhlüberlegungen führen zu diesem Schluss, denn die Existenz ver-

schiedener Typen von Atomen impliziert, dass diese verschiedene Strukturen haben, weshalb es mit hinreichender Erfindungsgabe wahrscheinlich ist, dass ein Atom auseinander gesprengt werden kann und die sogenannten *subatomaren Teilchen*, aus denen es gebildet ist, identifiziert werden können. Das Experiment bestätigt diese Vermutung, und in Kapitel 2 werden wir etwas von der Innenausstattung der Atome und damit von den Ursprüngen ihrer verschiedenen Persönlichkeiten sehen. An dieser Stelle stützt sich die Chemie am stärksten auf die Physik, denn die Physiker enträtselten die Struktur von Atomen, und die Chemiker nutzen diese Information, um die Moleküle, die sie bilden, und die Reaktionen, in die sie eingehen, zu erklären.

Die letzte Bemerkung verweist auf den Anwendungsbereich der Chemie. Sie impliziert, dass es zum Verständnis der Chemie notwendig ist, Begriffe aus der Physik zu importieren. Das ist tatsächlich der Fall, und die Chemie stützt sich in erheblichem Maße auf zahlreiche Begriffe, die von Physikern entwickelt wurden (umgekehrt liefern wir Chemiker ihnen die Materie, um Wunder zu wirken). In diesem ganzen Austausch gibt es zwei Importe von erheblicher Bedeutung, von denen sich der eine auf das Verhalten einzelner Atome und ihrer subatomaren Bestandteile bezieht und der andere auf große Mengen, das heißt auf greifbar große Formen von Materie, wie zum Beispiel einen Wasserkrug oder einen Eisenklotz. Technischer ausgedrückt, handelt es sich jeweils um die *mikroskopische* und die *makroskopische* Welt.

Der entscheidende Import aus der Physik zur Erklärung der Eigenschaften der mikroskopischen Welt einzelner Atome und Moleküle ist die *Quantenmechanik*. Obwohl ein

Großteil der Chemie im 19. Jahrhundert entwickelt wurde, verstand man damals nur schlecht, warum manche Dinge stattfanden und andere nicht. Zu jener Zeit stand Isaac Newtons »klassische Mechanik«, die mathematischen Verfahren zur Erklärung der Bewegung von Körpern, an oberster Stelle, da sie so erfolgreich bei der Erklärung der Umlaufbahnen der Planeten und des Flugs von Kugeln war. Außerdem gab es die Erwartung, dass man, wenn Planeten und Kugeln auf Atome abgespeckt wurden, chemische Erklärungen finden würde und dass der Gültigkeitsbereich von Newtons Theorien auch die Chemie umfassen würde. Newtons fruchtlose Konzentration auf alchemistische Kunstgriffe war vielleicht ein Zeichen dafür, dass er derselben Meinung war. Am Ende des 19. und im frühen 20. Jahrhundert wurde jedoch entdeckt, dass dieses Abspecken von Planeten und Kugeln auf Atome das völlige Scheitern der klassischen Mechanik zur Folge hatte: Sogar die Begriffe, auf denen Newtons Mechanik gründete, zerbröckelten bei der Anwendung auf Atome und ihre Bestandteile. Von dieser Art sind die Gefahren unvorsichtiger Extrapolation.

Im frühen 20. Jahrhundert, um 1927, entstand dann eine neue Mechanik, die sich als äußerst erfolgreich für die Erklärung des Verhaltens von Atomen und subatomaren Teilchen erwies. Bis zum heutigen Tag wurde die Quantenmechanik weder in ihrer Vorhersagekraft noch in ihrer numerischen Präzision überboten. Die Tatsache, dass sie weitgehend unverständlich geblieben ist, ist zwar zugegebenermaßen ein verdrießlicher Mangel, aber zu gegebener Zeit werde ich mein Bestes tun, um aus ihr das zu destillieren, was für das Verständnis des Verhaltens von Atomen und damit der ganzen Chemie notwendig ist. Wir werden sehen, dass Chemiker beim Rühren und Kochen ihrer Flüssigkeiten die Atome dazu bringen, sich gemäß den sonderbaren Gesetzen der Quantenmechanik zu verhalten.

Der andere entscheidende Import aus der Physik, mit dem in diesem Fall die Eigenschaften der makroskopischen Welt massiver Materie erklärt werden sollen, ist die *Thermodynamik*. Die Thermodynamik ist die Wissenschaft von der Energie und ihren möglichen Umwandlungen. Sie entstand zum größten Teil durch die Abhängigkeit der viktorianischen Epoche von der Dampfmaschine, die Gesellschaften sowohl im wörtlichen als auch im ökonomischen Sinne vorantrieb, sich aber bald als entscheidender Teil des Gewebes der Chemie herausstellte. Der materielle Stoff unseres Gegenstands sind Atome, aber die Veränderungen, die sie durchlaufen, werden kontrolliert und angetrieben von Energie. Wir werden sehen, dass beim Verbrennen von Kraftstoff nicht nur Energie freigesetzt wird – ein offensichtlicher, nützlicher, aber primitiver Aspekt der Rolle, die Energie in der Chemie spielt –, sondern auch, dass sie bestimmt, wie sich Atome im Allgemeinen verhalten, welche Strukturen sie bilden können, welche Veränderungen ihres Aufbaus sie durchlaufen können und mit welcher Geschwindigkeit diese Veränderungen auftreten können. In einem subtilen Sinne erweist sich die Energie auch als Triebkraft der Chemie, nämlich insofern, als Reaktionen durch sie auf eine Weise angetrieben werden, die ich in Kapitel 3 erklären werde. Da Energie so eng mit der eigentlichen Struktur der Chemie verknüpft ist, sollte es nicht überraschen, dass die Thermodynamik trotz ihrer Ursprünge im Ingenieurwesen eine Rolle spielt.

Während die Chemie für ihre Erklärungen nach unten in die Physik hineingreift (und durch die Physik noch weiter nach unten in die Mathematik zum Zwecke ihrer quantitativen Formulierung), greift sie für viele ihrer außergewöhnlichsten Anwendungen nach oben in die Biologie. Das sollte nicht überraschen, denn die Biologie ist bloß eine Weiterentwicklung der Chemie. Bevor die Biologen über diese Bemerkung – die von derselben Art zu sein scheint, wie die

Behauptung, dass die Soziologie eine Weiterentwicklung der Teilchenphysik ist – in Empörung ausbrechen, möchte ich sie gerne präzisieren. Organismen sind aus Atomen und Molekülen aufgebaut, und diese Strukturen werden von der Chemie erklärt. Organismen funktionieren, das heißt sind lebendig, kraft des komplexen Netzwerks von Reaktionen, die in ihnen stattfinden, und diese Reaktionen werden von der Chemie erklärt. Organismen reproduzieren sich, indem sie molekulare Strukturen und Reaktionen nutzen, die beide zur Chemie gehören. Organismen reagieren auf ihre Umgebung, wie zum Beispiel durch den Geruchs- und Gesichtssinn, durch Veränderungen der Molekülstruktur, und daher sind diese Reaktionen – alle unsere fünf oder mehr Sinne – Weiterentwicklungen der Chemie. Selbst jenes hypermakroskopische Phänomen, die Evolution und die Entstehung der Arten, kann als eine komplizierte Ausarbeitung der Folgen des Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik betrachtet werden und ist damit ein Aspekt der Chemie. Einige Organismen, ich denke in erster Linie an Menschen, denken über das Wesen der Welt nach, und die geistigen Prozesse, die diesen Gedanken zugrunde liegen und sich in ihnen manifestieren, sind das Ergebnis komplexer Netzwerke chemischer Reaktionen. Daher ist die Biologie tatsächlich eine Weiterentwicklung der Chemie. Was auch immer meine wirkliche Überzeugung ist, so werde ich nicht mit Nachdruck die Ansicht vertreten, dass alles, was für Biologen von Interesse ist, wie zum Beispiel das Verhalten von Tieren im Allgemeinen, auch bloß erweiterte Chemie ist, sondern mich auf die Behauptung beschränken, dass alle Strukturen, Reaktionen und Prozesse von Organismen chemischer Natur sind. Die Chemie durchdringt also die Biologie und hat auf unermessliche Weise zu unserem Verständnis von Organismen beigetragen.

Wir sozial hochentwickelten Organismen, wir Men-

schen, bauen Dinge. Wir fabrizieren Artefakte. Wir bauen die Steine der Erde ab, pumpen die Flüssigkeiten aus der Tiefe und ernten die Gase des Himmels mit dem Ziel, alle diese Rohmaterialien in all das zu verwandeln, was wir begehren. Die Umwandlung dieser Rohmaterialien in Substanzen, die gegossen, mit dem Hammer bearbeitet, gesponnen, zusammengeklebt, gegessen oder einfach verbrannt werden können, ist Teil der Chemie. Die Chemiker mögen zwar beiseitetreten und die Gießer gießen, die Arbeiter mit dem Hammer hämmern, die Former formen und im Allgemeinen die Verarbeiter verarbeiten lassen, um das endgültige Artefakt herzustellen, aber sie sind es, die das Rohmaterial bereitgestellt haben, die Infrastruktur unserer modernen technologischen Gesellschaft, und die einen gewaltigen Beitrag zur weltweiten Wirtschaft und zum Verhalten von Individuen und Nationen geleistet haben.

Wie ich im Vorwort betont habe, gibt es natürlich schwarze Flecken und Kleckse inmitten von all diesem Licht. Die Chemie hat sicherlich zur menschlichen Fähigkeit zum Verstümmeln und Töten beigetragen, und es wäre in dieser Untersuchung zum Wesen der Chemie unangemessen, ihre Bereitstellung von Sprengstoffen, Nervengasen und ihre zufälligen und absichtlichen Belastungen unserer empfindlichen Umwelt unter den Teppich dieser Seiten zu kehren. Ich werde mich mit diesen Fragen später auseinandersetzen, aber im Augenblick – um die Bedeutung des persönlichen Urteils zu betonen – fordere ich Sie auf, alle Beiträge der Chemie zur modernen Welt wegzudenken, wodurch Sie zurück in die mühevollen, gefährlichen, unbehaglichen Steinzeit gelangen, in der den Bestrebungen der Menschen enge Grenzen gesetzt waren, und sich dann die Frage zu stellen, ob die gegenwärtige Düsternis das Licht überwiegt.

* * *

Der Anwendungsbereich der Chemie ist folglich so gewaltig, dass meine Einführung in sie und der Gegenstand selbst sich wie ein gestrandeter Wal ohne Rückgrat chaotisch winden würden, wenn ihnen nicht irgendeine Struktur auferlegt würde. Die Chemiker tendierten zu einer Struktur, die ihnen bei der Durchführung ihrer Tätigkeiten, beim Zusammenschluss in gleichgesinnten Versammlungen und bei der Entwicklung ihrer Verfahren hilft, ganz ähnlich wie einzelne Staaten ihre Politik und Wirtschaft entwickeln. Im Unterschied zu den meisten Staaten sind die Grenzen verschwommen, und häufig werden beachtliche Fortschritte erzielt, wenn sich zwei Kulturen überschneiden. Das ist insbesondere dann der Fall, wenn der Gegenstand so ausgereift ist wie die gegenwärtige Chemie, in der jedes Tätigkeitsfeld gründlich erforscht wird und glückliche Eingebungen wie in der Kunst sich am fruchtbringendsten in ertragreichen, sich überschneidenden Grenzregionen einstellen können und dort, wo die Chemie sich mit anderen Disziplinen überschneidet.

Für unsere Zwecke und um im Sinne dieser Einleitung die allgemeine Struktur der Chemie zu verstehen, ist es nützlich, ihre Unterteilung in verschiedene Zweige wahrzunehmen und deren Anliegen im Allgemeinen zu sehen. Die Unterteilungen der Chemie durchdringen immer noch die Institute von Universitäten, Kurse und Zeitschriften, in denen Entdeckungen berichtet werden, und daher ist ihre Beschreibung immer noch ein wichtiger Bestandteil eines Besucherleitfadens. Aber seien Sie gewarnt: Sowohl die geistigen Grenzen als auch jene der Institute sind im Schmelzen begriffen.

Die allgemeinste, wichtigste und herkömmlichste Unterteilung der Chemie, die immer noch weitgehend befolgt wird, ist die in ihre physikalischen, organischen und anorganischen Zweige.

Die *physikalische Chemie* liegt an der Schnittstelle von Physik und Chemie (daher ihr Name) und handelt von den Prinzipien der Chemie, die, wie wir gesehen haben, weitgehend aus der Quantenmechanik bestehen, um die Strukturen von Atomen und Molekülen zu erklären, und aus der Thermodynamik, um die Rolle und die Verwendung von Energie zu bestimmen. Außerdem befasst sie sich mit Reaktionsgeschwindigkeiten sowohl auf der makroskopischen als auch auf der mikroskopischen Ebene. Auf letzterer versucht sie, dem Privatleben einzelner Moleküle zu folgen, wenn sie in Reaktionen auseinandergerissen und dann als andere Substanzen wieder neu zusammengesetzt werden. Eine Haupttätigkeit der physikalischen Chemie liegt in ihrem Beitrag zur Interpretation von Forschungstechniken, insbesondere der »Spektroskopie«.

Wie wir in Kapitel 5 sehen werden, nutzt die Spektroskopie verschiedene Arten von Licht, um Informationen aus dem Inneren der Moleküle zu den Augen des Beobachters zu bringen, die zunehmend künstliche Augen sind. Diese Techniken sind inzwischen so weit entwickelt, dass die physikalischen Chemiker ihr ganzes Waffenarsenal, insbesondere die Quantenmechanik, für die Interpretation der Daten zur Anwendung bringen müssen. Die Tätigkeiten der Chemiker und Physiker sind in diesem Bereich tatsächlich so wenig voneinander unterschieden, dass der Name »physikalische Chemie« bei manchen, die das Verhalten einzelner Moleküle mit einem Ansatz untersuchen, der mit dem eines Physikers große Ähnlichkeit hat, häufig in *chemische Physik* übergeht.

Die *organische Chemie* ist derjenige Teil der Chemie, der sich mit Kohlenstoffverbindungen befasst. Die Tatsache, dass ein einziges Element eine ganze Unterteilung bestimmen kann, ist ein Zeugnis für die bedeutungsschwere Mittelmäßigkeit von Kohlenstoff. Kohlenstoff liegt im Mittel-

punkt des Periodensystems, der Landkarte des Chemikers für die chemischen Eigenschaften der Elemente, und ist weitgehend indifferent gegenüber den Bindungen, die er eingeht. Insbesondere begnügt er sich damit, sich mit sich selbst zu verbinden. Infolge seines milden und nicht aggressiven Charakters ist er in der Lage, Ketten und Ringe von verblüffender Komplexität zu bilden. Eine verblüffende Komplexität ist genau das, was Organismen brauchen, wenn sie als lebendig betrachtet werden sollen, und daher sind Kohlenstoffverbindungen die strukturelle und reaktive Infrastruktur des Lebens. Kohlenstoffverbindungen sind so umfangreich – sie zählen gegenwärtig Millionen –, dass es nicht überrascht, dass ein ganzer Zweig der Chemie zu ihrer Erforschung entstanden ist und spezielle Techniken, Nomenklaturesysteme und Einstellungen hervorgebracht hat.

Warum »organisch«? Die Moleküle, die aus Kohlenstoff bestehen, sind (außer bei ein paar Sonderfällen wie dem einfachen Kohlendioxid) derart verwickelt, dass man ursprünglich dachte, dass nur die Natur sie bilden könne. Gemäß dieser »vitalistischen« Ansicht wären sie also die Produkte von Organismen. Der Anfang vom Ende des Vitalismus kam 1828, als gezeigt wurde, dass ein einfaches Mineral in eine charakteristische »organische« Verbindung umgewandelt werden konnte (nämlich Harnstoff). Obwohl eine Zeitlang ein Streit wütete, ist seit damals der Zusatz »organisch« in »organische Chemie« ein Archaismus; aber zweckmäßige Archaismen lassen sich nur schwer beseitigen, und der Begriff hat überlebt, bedeutet aber nichts weiter als »eine Kohlenstoffverbindung«.

Übrig bleiben die restlichen Elemente, die etwa hundert anderen Elemente neben Kohlenstoff. Ihre Erforschung macht das Gebiet der *anorganischen Chemie* aus. Wie man bei einem Zweig eines Fachs, das sich mit über 100 Elementen äußerst unterschiedlicher Persönlichkeit befasst, schon

vermuten kann, ist die anorganische Chemie ein lebendiges, doch ausuferndes Forschungsgebiet. Die Ausuferung wird teilweise durch die Einführung verschiedener Untergebiete des Fachs eingedämmt. Ein wichtiges Untergebiet ist die *Festkörperchemie*, deren Forschungsgegenstand anorganische Festkörper sind, wie zum Beispiel die Materialien, die als Supraleiter dienen, und die Halbleiter, die universelle Berechnungen ermöglicht haben. Es ist schwer, der Analogie zwischen anorganischer Chemie und einem Orchester mit hundert Instrumenten zu widerstehen, wobei der Chemiker als Dirigent und Komponist Symphonien von Kombinationen durch die entsprechende Anordnung der Instrumente zutage fördert.

Kohlenstoff ist vor dem anorganischen Chemiker, der das Periodensystem mit seinen Augen absucht, nicht sicher. Einige der einfacheren Kohlenstoffverbindungen, wie Kohlendioxid, das ich schon erwähnt habe, das Killergas Kohlenmonoxid und Kreide und Kalkstein, die unsere Landschaften bilden, werden von organischen Chemikern aus ihrem Bereich bereitwillig abgetreten, da sie nur von geringem Interesse für sie sind, und werden per Konvention als anorganisch betrachtet. Auf der Grenze zwischen den Untergebieten liegen jedoch Verbindungen, die zwar verwinkelte Verbände von Kohlenstoffatomen sind, aber auch Atome verschiedener Metalle einschließen. Eine Reihe dieser Verbindungen sind in der chemischen Industrie unentbehrliche Katalysatoren; manche sind entscheidend für das Funktionieren von Organismen. Hier liegt das bereichsübergreifende Gebiet der *metallorganischen Chemie*, das im besten Fall eine äußerst fruchtbare Zusammenarbeit zwischen organischen und anorganischen Chemikern darstellt.

* * *

So gestalten sich die drei Haupteinteilungen der Chemie. Diese Liste erschöpft keineswegs alle Möglichkeiten, wie die Chemiker ihr Fach zur besseren Verdaulichkeit aufteilen, aber alle anderen beziehen ihre Technik, Begriffe und Inspiration in unterschiedlichem Maße aus diesen dreien und würzen ihre Mischung mit Aspekten anderer Fächer. Sie alle aufzulisten wäre ein beträchtliches Unterfangen. Es ist jedoch zweckmäßig, die geläufigsten davon zu kennen.

Die *analytische Chemie* ist der moderne Nachkomme der uralten Bemühung, herauszufinden, was es gibt. Was ist in einem Mineral vorhanden? Könnte es Gold sein, oder ist es Hafnium? Was ist in Rohöl vorhanden? Gibt es noch etwas anderes darin als bloße Kohlenhydrate, und welche Kohlenhydrate? Welche Verbindung haben Sie hergestellt? Können Sie die Anordnung ihrer Atome ableiten? All das sind Fragen, die analytische Chemiker im Prinzip zu beantworten versuchen. Obwohl Reagenzgläser, Glaskolben und Retorten immer noch Teil ihres Ansatzes sind, werden jetzt viele ihrer Forschungen mit Hilfe ausgeklügelter Maschinen durchgeführt, wovon einige die Spektroskopie nutzen und andere Techniken, die von anorganischen und physikalischen Chemikern entwickelt wurden. Ich untersuche diese Techniken in Kapitel 4. Ein Abkömmling der analytischen Chemie ist die *forensische Chemie*, in der die Techniken der analytischen Chemie für gerichtliche Zwecke genutzt werden, um verdächtige Personen aufzuspüren oder zu entlasten und um die Tatorte von Verbrechen zu analysieren.

Die *Biochemie* ist die Rückspende der Chemie an die Biologie, wobei manchmal eine Prise anorganischer Chemie hinzukommt. Sie befasst sich gänzlich mit den Strukturen und Reaktionen, aus denen Lebewesen bestehen, wobei die Stoffwechselffade analysiert werden, die Nahrung in Handlungen verwandeln (einschließlich jener Handlungen,

die allein im Gehirn stattfinden: Gedanken). Organismen sind immer noch ein immens wichtiges Reservoir organischer Moleküle, denn die Natur hatte Milliarden Jahre zur Verfügung, um strukturelle Nischen zu erkunden, und Biochemiker spielen eine zentrale Rolle sowohl bei der Entdeckung dessen, was existiert, als auch dabei, herauszufinden, wie es unter der Kontrolle der Arbeiterbienen des Körpers hergestellt wurde, derjenigen Proteine, die wir als Enzyme bezeichnen. Eine anthropozentrische, aber wichtige Sorge im Hinblick auf die Auslöschung von Arten ist, dass dadurch Quellen komplexer Moleküle ausgelöscht werden, für deren Entstehung Millionen von Jahren notwendig waren.

Der Name *industrielle Chemie* spricht für sich selbst. Hier trifft der Chemiker auf den Ingenieur, und Reaktionen in Reagenzgläsern und dergleichen werden in gigantischen Größenordnungen umgesetzt und an die Erfordernisse des Handels angepasst. Industrielle Chemiker leisten einen gewaltigen Beitrag zur Wirtschaft und zum Handel zwischen Staaten. Allein im Vereinigten Königreich tragen Chemikalien 20 Prozent zum Bruttoinlandsprodukt bei, und in den Vereinigten Staaten haben 96 Prozent aller hergestellten Güter direkt mit der Chemie zu tun. Über solche Zahlen, die sich auf hergestellte Chemikalien beziehen, sollte man beinahe wörtlich nicht die Nase rümpfen. Ein Hauptanliegen der heutigen industriellen Chemie ist die *grüne Chemie*, deren Absicht darin besteht, Abfallprodukte zu minimieren, wodurch die Wirtschaft gefördert werden soll, und die Auswirkungen auf die Umwelt zu minimieren, was Akzeptanz und Nachhaltigkeit fördert.

* * *