

Anhang C

Zu Richard P. Feynman



Abbildung C.1: Richard P. Feynman (1918 – 1988).

Richard P. Feynman wurde 1918 in Brooklyn geboren; seinen Ph. D. erhielt er 1942 an der Universität Princeton. Trotz seines jugendlichen Alters spielte er während des Zweiten Weltkriegs eine massgebliche Rolle beim Manhattan-Projekt in Los Alamos.¹ In der Folgezeit lehrte er in Cornell und am California Institute of Technology (Caltech). 1965 erhielt er für seine Arbeiten zur Quantenelektrodynamik zusammen mit Sin-Itaro Tomonaga und Julian Schwinger den Nobelpreis für Physik.

¹Manhattan-Projekt war der Deckname der USA für die geheime Entwicklung der ersten Atombombe.

Diese Auszeichnung wurde ihm für seine Beiträge zur Lösung von Problemen der Theorie der Quantenelektrodynamik verliehen. Darüber hinaus entwickelte er eine mathematische Theorie zur Erklärung des Phänomens der Suprafluidität in flüssigem Helium. Anschliessend leistete er zusammen mit Murray Gell-Mann grundlegende Arbeit auf dem Gebiet der schwachen Wechselwirkung, etwa dem Betazerfall. Später spielte Feynman eine Schlüsselrolle bei der Entwicklung der Theorie der Quarks, als er sein Partonenmodell hochenergetischer Kollisionsprozesse bei Protonen vorlegte.

Überdies führte Feynman grundlegende neue Rechenverfahren und -schreibweisen in die Physik ein – insbesondere die allgegenwärtigen Feynman-Diagramme, die in vielleicht höherem Masse als alle anderen Formalisierungen in der jüngeren Geschichte der Naturwissenschaft die Art und Weise veränderten, wie man grundlegende physikalische Prozesse und Begriffe fasst und berechnet.

Feynman war ein erstaunlich erfolgreicher Pädagoge. Besonders stolz war er persönlich auf die Oersted Medal for Teaching, die ihm 1972 zusätzlich zu seinen zahlreichen anderen Auszeichnungen verliehen wurde. Im *Scientific American* beschrieb ein Kritiker *The Feynman Lectures on Physics* (California Institute of Technology, 1963 ff.; dt.: Richard P. Feynman, Vorlesungen über Physik. München: Oldenbourg, 1991 ff.) als "schwere, aber nahrhafte und äusserst wohlschmeckende Kost. Nach 25 Jahren sind sie *das* Handbuch für Dozenten und die Elite der Studienanfänger." Um das Verständnis für Physik in der Öffentlichkeit zu fördern, veröffentlichte Feynman *The Character of Physical Law* (Cambridge, Mass.: M.I.T. Press, 1967; dt.: Vom Wesen physikalischer Gesetze. München: Piper, 1990) und *Q.E.D.: – The Strange Theory of Light and Matter* (Princeton: Princeton University Press, 1985; dt.: QED – Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie. München: Piper, 1988). Darüber hinaus war er Mitverfasser zahlreicher anspruchsvoller Veröffentlichungen, die zu klassischen Nachschlagewerken und Lehrbüchern für Forscher und Studenten wurden.

Richard Feynman war zudem eine führende Persönlichkeit des öffentlichen Lebens. Seine Mitarbeit in der Challenger-Kommission ist allgemein bekannt, insbesondere sein berühmter Nachweis der Anfälligkeit von Dichtungsringen mit rundem Querschnitt für Kälte, ein elegantes Experiment, für das er nichts weiter als ein Glas eisgekühltes Wasser brauchte. Seine Tätigkeit im California State Curriculum Committee in den sechziger Jahren, in deren Verlauf er massive Einwände gegen die Mittelmässigkeit von Lehrbüchern vorbrachte, ist nicht so bekannt.

Eine Aufzählung Richard Feynmans zahlloser wissenschaftlicher Leistungen und erzieherischer Erfolge kann jedoch das Wesen dieses Menschen nicht annähernd erfassen. Jeder Leser selbst seiner technischsten Veröffentlichungen weiss, wie sehr Feynmans lebhafteste, vielseitige Persönlichkeit sein ganzes Wirken prägte. Er war nicht nur Physiker, sondern reparierte zeitweise Radios, knackte Schlösser, war Künstler, Tänzer, Bongospieler und entzifferte sogar Hieroglyphen der Mayas. Seine Neugierde auf die Welt, in der wir leben, in der er lebte, war unerschöpflich, und er war der Empiriker par excellence.

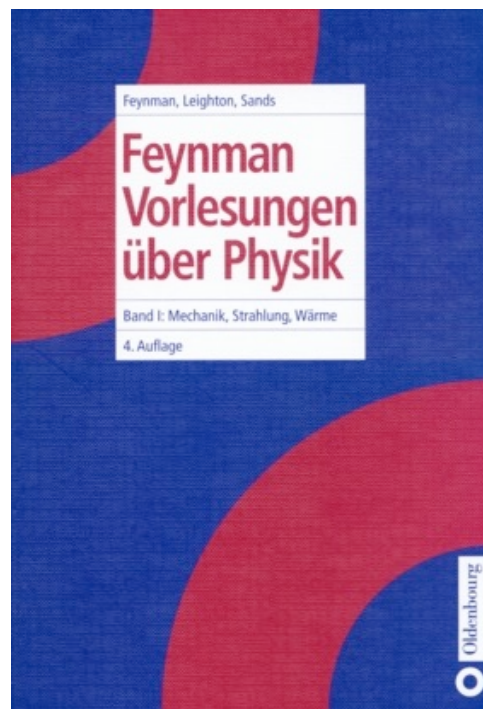
Richard Feynman starb am 15. Februar 1988 in Los Angeles.

Anhang D

Das Teilchenmodell aus Richard Feynmans Sicht

Dieser Anhang beinhaltet das erste Kapitel aus dem Buch:

Feynman, R.P., Leighton, R.B., Sands, M.: Feynman Vorlesungen über Physik, Band I: Mechanik, Strahlung, Wärme (2003), Oldenbourg.



Dieses Werk, d.h. alle drei Bände davon, ist ein Klassiker unter den Physiklehrbüchern für das Hochschulniveau. Feynman ist bekannt für seine Fähigkeit, die Dinge anschaulich erklären zu können, dabei aber keineswegs die fachliche Richtigkeit beiseite zu lassen. Damit folgt er ganz einem Zitat Einsteins: *Wir sollten uns bemühen, die physikalische Welt so einfach wie möglich zu beschreiben – aber nicht einfacher!*

1 *Atome in Bewegung*

1–1 Einleitung

Dieser Zweijahreskurs über Physik wird unter dem Gesichtspunkt dargeboten, daß der Leser Physiker werden wird. Das ist natürlich nicht notwendigerweise der Fall, aber es ist eine Annahme, die jeder Professor in jedem Fachgebiet macht. Wenn Sie Physiker werden wollen, dann haben Sie viel zu studieren: zweihundert Jahre des sich am schnellsten entwickelnden Wissensgebietes, das es gibt. So viel Wissen, daß Sie denken, daß Sie nicht alles in vier Jahren lernen können; und Sie können es gewiß nicht. Sie werden auch fortgeschrittene Studien durchführen müssen.

Erstaunlicherweise ist es trotz der so umfangreichen Arbeit, welche in der Physik geleistet wurde, möglich, die außerordentlich große Anzahl von Resultaten zu einem großen Teil zu kondensieren, d. h. *Gesetze* zu finden, die all unser Wissen zusammenfassen. Trotzdem sind die Gesetze so schwer zu verstehen, daß es unfair wäre, Sie auf den Weg zur Entdeckung dieses gewaltigen Gebietes zu senden ohne einen Plan oder einen Umriß der Beziehung eines Teiles des Wissenschaftsgebietes zu den anderen. Im Anschluß an diese einleitenden Bemerkungen werden daher in den ersten drei Kapiteln die Beziehung der Physik zu den anderen Wissenschaften, die Beziehungen der Wissenschaften untereinander und die Bedeutung der Wissenschaft umrissen. Das wird uns helfen, ein „Gefühl“ für unser Gebiet zu erwerben.

Sie mögen fragen, warum wir nicht Physik unterrichten können, indem wir auf Seite eins die Grundgesetze aufzeichnen und danach zeigen, wie sie unter allen möglichen Umständen funktionieren, wie wir es ja im Falle der Euklidischen Geometrie tun, wo wir alle Axiome am Anfang bringen und dann alle Arten von Schlüssen ziehen. (Sie sind also nicht damit zufrieden, Physik in vier Jahren zu lernen; Sie wollen dieses Gebiet in vier Minuten erlernen?) Wir können aber aus zwei Gründen nicht so vorgehen. Erstens *kennen* wir noch gar nicht alle Grundgesetze: Die Grenze unserer Ignoranz verschiebt sich ununterbrochen. Zweitens beinhaltet die genaue Formulierung der Gesetze der Physik einige sehr ungewöhnliche Ideen, zu deren Beschreibung höhere Mathematik erforderlich ist. Darum ist ein beachtliches vorbereitendes Training nötig, um wenigstens zu verstehen, was die verwendeten *Wörter* bedeuten. Also ist es nicht möglich, jenen Weg zu beschreiten. Wir müssen Schritt um Schritt in die Physik eindringen.

Jedes Stück oder Teil der gesamten Natur ist immer nur eine *Approximation* an die gesamte Wahrheit oder an die gesamte Wahrheit wie wir sie kennen. Tatsächlich ist alles, was wir wissen, eine Approximation, weil *wir wissen, daß uns noch nicht alle Gesetze bekannt sind*. Darum müssen auch viele Dinge gelernt werden, die später wieder „ungelernt“ oder korrigiert werden müssen.

Das Prinzip der Wissenschaft, fast die Definition, ist folgendes: *Das Experiment ist der Prüfstein allen Wissens*. Das Experiment ist der *einzigste Richter* über wissenschaftliche „Wahrheit“. Aber was ist die Quelle von Wissen? Woher stammen die Gesetze, welche geprüft werden sollen? Das Experiment selber hilft uns, die Gesetze aufzustellen, in dem Sinn, daß es uns Hinweise gibt. Jedoch benötigen wir auch die *Phantasie*, um aus den Hinweisen die großen Verallgemeinerungen zu finden; um die wunderbaren, einfachen und sonderbaren Gesetzmäßigkeiten hinter den Dingen zu erraten und danach durch das Experiment zu prüfen, ob wir richtig geraten haben. Dieser Prozeß der *Phantasie* ist so kompliziert, daß eine Arbeitsteilung in der Physik notwendig wurde: Da gibt

es die *theoretischen* Physiker, welche Vorstellungen entwickeln, Schlüsse ziehen und – ohne zu experimentieren – neue Gesetze erraten; weiterhin gibt es die *Experimentalphysiker*, welche experimentieren, Vorstellungen entwickeln, schließen und raten.

Wir haben gesagt, daß die Naturgesetze nur angenähert richtig sind: daß wir zuerst die „falschen“ und danach die „richtigen“ finden. Wie kann aber ein Experiment „falsch“ sein? Zunächst einmal auf ganz triviale Weise durch unbemerkte Fehler an den Meßapparaturen. Aber diese Dinge können leicht behoben und durch wiederholte Kontrollen eliminiert werden. Wenn wir von solchen primitiven Dingen absehen, wie *können* dann noch immer die Resultate eines Experimentes falsch sein? Nur indem diese ungenau sind. Z. B. scheint sich die Masse eines Objektes nie zu ändern: Ein rotierender Kreisel hat das gleiche Gewicht wie der ruhende Kreisel. Also wurde ein „Gesetz“ erfunden: Die Masse ist konstant, unabhängig von der Geschwindigkeit. Von diesem „Gesetz“ wissen wir jetzt, daß es nicht zutrifft. Die Masse nimmt mit zunehmender Geschwindigkeit zu, jedoch entstehen merkliche Massenzunahmen erst bei Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit. Ein *richtiges* Gesetz lautet also: Wenn ein Objekt mit einer Geschwindigkeit geringer als einhundertsechzig Kilometer pro Sekunde bewegt wird, ist die Masse bis auf ein Millionstel konstant. In einer solchen approximierten Form ist dies ein gültiges Gesetz. Also wird mancher in der Praxis denken, daß die neue Form des Gesetzes keine wesentliche Änderung darstellt. Darauf kann man sowohl mit ja als auch mit nein antworten. Bei normalen Geschwindigkeiten können wir das geänderte Gesetz vergessen und das einfache Gesetz von der konstanten Masse als eine gute Approximation benutzen. Aber bei hohen Geschwindigkeiten ist dies falsch, und je größer die Geschwindigkeit, desto ungenauer ist es.

Schließlich, und das ist sehr interessant, liegen wir *philosophisch vollkommen falsch* mit der angenäherten Form des Gesetzes. Unser gesamtes Weltbild muß geändert werden, selbst wenn sich die Masse nur geringfügig ändert! Es ist eine eigenartige Sache mit der Philosophie oder den Ideen hinter den Gesetzen. Selbst ein sehr geringfügiger Effekt verlangt mitunter grundsätzliche Änderungen unserer Vorstellungen.

Was sollen wir nun zuerst lehren? Sollen wir das korrekte, aber unvertraute Gesetz mit seinen eigenartigen und schwierig zu begreifenden Ideen (wie wir es z. B. in der Relativitätstheorie, im vierdimensionalen Raum-Zeit-System usw. vorliegen haben) lehren? Oder sollen wir zuerst das einfache Gesetz von der „konstanten Masse“, welches nur einfache Vorstellungen beinhaltet und eine Näherung darstellt, bringen? Der erste Weg ist sicher aufregender und wunderbarer und macht mehr Spaß. Jedoch ist der zweite Weg leichter zu beschreiten, und er ist ein erster Schritt zu einem echten Verständnis der umfassenderen Vorstellung. Dieser Gesichtspunkt taucht beim Unterrichten der Physik immer wieder auf. Zu verschiedenen Zeiten werden wir verschieden vorgehen, aber es ist in jedem Abschnitt wertvoll, zu lernen, was jetzt bekannt ist, wie exakt es ist, wie es sich in alles andere einfügt und wie es geändert werden muß, wenn wir mehr wissen.

Fahren wir nun fort mit unserem Umriss oder allgemeinen Plan unseres heutigen Verständnisses der Wissenschaft (insbesondere der Physik, aber auch anderer Wissenschaften am Rande). Das wird uns bei der späteren Behandlung besonderer Punkte Vorstellungen über den Hintergrund vermitteln und zeigen, warum diese interessant sind und wie sie in das Gesamtbild passen. Was *ist* also unser Gesamtbild von der Welt?

1–2 Materie ist aus Atomen aufgebaut

Wenn in einer Sintflut alle wissenschaftlichen Kenntnisse zerstört würden und nur ein Satz an die nächste Generation von Lebewesen weitergereicht werden könnte, welche Aussage würde die größte Information in den wenigsten Worten enthalten? Ich bin davon überzeugt, daß dies die *Atomhypothese* (oder welchen Namen sie auch immer hat) wäre, die besagt, *daß alle Dinge aus Atomen aufgebaut sind – aus kleinen Teilchen, die in permanenter Bewegung sind, einander anziehen, wenn sie ein klein wenig voneinander entfernt sind, sich aber gegenseitig abstoßen, wenn sie aneinander gepreßt werden.* In diesem einen Satz werden Sie mit ein wenig Phantasie und Nachdenken eine *enorme* Menge an Information über die Welt entdecken.

Zur Illustration der Macht der Atomidee nehmen wir an, daß wir einen Wassertropfen von sechs Millimeter Kantenlänge haben. Wenn wir diesen Tropfen aus der Nähe betrachten, sehen wir nichts als Wasser – glattes, kontinuierliches Wasser. Selbst mit der ungefähr zweitausendfachen Vergrößerung, die wir mit dem besten Lichtmikroskop erzielen können, wird der Tropfen von nun ungefähr zwölf Meter Kantenlänge (etwa die Größe eines großen Zimmers) aus der Nähe betrachtet *noch immer* relativ glattes Wasser sein, jedoch schwimmen hier und da Dinge herum, die etwa die Gestalt eines Rugbys haben. Sehr interessant. Es sind Pantoffeltierchen. Vielleicht wird man an diesem Punkt so neugierig über sie mit ihren sich windenden Cilien und ihren sich verdrehenden Körpern, daß man mit noch stärkerer Vergrößerung in diese Körper hineinschauen möchte. Aber das ist natürlich ein Thema der Biologie und interessiert hier zunächst nicht. Zur näheren Betrachtung wollen wir das Wasser noch einmal zweitausendfach vergrößern. Nun hat der Wassertropfen eine Ausdehnung von etwa vierundzwanzig Kilometern, und wenn wir sehr genau hinschauen, sehen wir ein wimmelndes Etwas, das keine glatte Erscheinung mehr besitzt. Es sieht so aus wie eine Zuschauermenge bei einem Fußballspiel, die aus einiger Entfernung betrachtet wird. Um dieses wimmelnde Etwas besser zu erkennen, vergrößern wir noch einmal zweihundertfünfzigfach und sehen danach etwa die in Fig. 1–1 abgebildete Struktur. Dies ist ein Bild von Wasser, eine Milliarde mal vergrößert, jedoch in verschiedener Hinsicht idealisiert.

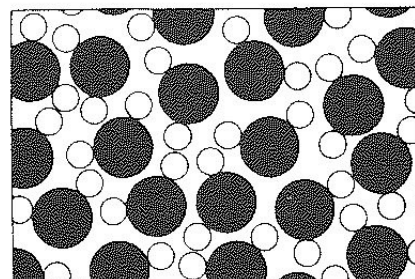


Fig. 1–1. Wasser, 10^9 mal vergrößert.

Zunächst einmal sind alle Teilchen einfacherweise mit scharfen Konturen gezeichnet, und das ist ungenau. Dann ist aus Gründen der einfacheren Darstellung eine zweidimensionale Anordnung gezeichnet worden; jedoch bewegen sich die Teilchen in drei Dimensionen. Die zwei verschiedenen Flecke oder Kreise stellen die Atome des Sauerstoffs (schwarz) und des Wasserstoffs (weiß) dar. Jedes Sauerstoffatom ist an zwei Wasserstoffatome gebunden. (Jede kleine Gruppe, bestehend aus einem Sauerstoff- und zwei Wasserstoffatomen, wird ein Molekül genannt.) Weiterhin ist das Bild insofern idealisiert, als die natürlichen Teilchen kontinuierlich umeinander hopsen und springen, sich drehen

und verdrehen. Man muß sich das Ganze eher als ein dynamisches als ein statisches Bild vorstellen. Etwas anderes, was in einer Zeichnung nicht realisiert werden kann, ist, daß die Teilchen aneinanderhängen, sie ziehen einander an: das eine wird von dem anderen angezogen etc. Die gesamte Gruppe ist sozusagen „zusammengeklebt“. Andererseits können die Teilchen nicht ineinander gedrückt werden. Wenn man sie zu hart aufeinander preßt, dann stoßen sie einander ab.

Die Atome haben einen Radius von 1 oder 2×10^{-8} cm. Nun wird 10^{-8} cm ein *Ångström* genannt (dies ist lediglich ein anderer Name dafür), somit sagen wir, daß die Atome einen Radius von 1 bis 2 Ångström (Å) haben. Eine andere Methode, sich ihre Größe zu merken, ist folgende: Wenn ein Apfel auf die Größe der Erde vergrößert wird, dann haben die Atome des Apfels etwa die natürliche Größe des Apfels.

Stellen wir uns also diesen großen Wassertropfen vor mit all den aneinander geketteten, zitternden Teilchen, welche sich miteinander bewegen. Das Wasser behält sein Volumen bei; es fällt wegen der Anziehung zwischen den Molekülen nicht auseinander. Wenn sich der Tropfen auf einer schiefen Ebene befindet, wo er sich von einem Platz zum anderen bewegen kann, wird das Wasser fließen, aber es wird nicht einfach verschwinden – Dinge fliegen nicht einfach auseinander – wegen der molekularen Anziehung. Nun ist die zitternde Bewegung das, was wir als *Wärme* darstellen: Wenn wir die Temperatur erhöhen, verstärken wir die Bewegung. Wird das Wasser erhitzt, so wird das Zittern verstärkt und das Volumen zwischen den Atomen vergrößert. Bei weiterer Erwärmung wird der Punkt erreicht, an dem die Anziehung zwischen den Molekülen nicht mehr zum Zusammenhalt ausreicht, dann *fliegen* sie auseinander und werden voneinander getrennt. Das ist natürlich der Herstellungsprozeß von Wasserdampf; bei Temperaturerhöhung fliegen die Teilchen aufgrund der heftigeren Bewegung auseinander.

In Fig. 1–2 haben wir ein Bild von Wasserdampf. Dieses Bild ist in einer Beziehung ungenau: Bei normalem atmosphärischem Druck befinden sich vielleicht nur ganz wenige Moleküle in einem gesamten Raum, und ganz gewiß würden keine drei Moleküle in einem Raum der Bildgröße vorhanden sein. Die meisten Gebiete dieser Größe werden gar keine enthalten – aber wir haben zufällig zweieinhalb oder drei in unserem Bild (nur damit es nicht vollkommen leer ist). Im Dampf erkennen wir die charakteristischen Moleküle viel besser als im Wasser. Zur Vereinfachung haben wir die Moleküle so gezeichnet, daß die Wasserstoffatome einen 120° -Winkel bilden. Tatsächlich beträgt dieser Winkel $105^\circ 3'$, und der Abstand zwischen den Zentren des Wasserstoff- und des Sauerstoffatoms beträgt 0,957 Å, wir kennen also dieses Molekül recht genau.

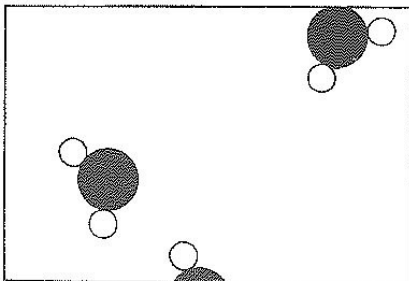


Fig. 1–2. Wasserdampf.

Wir wollen nun einige der Eigenschaften von Wasserdampf und anderer Gase kennenlernen. Die voneinander getrennten Moleküle werden gegen die Wände stoßen. Stellen Sie sich ein Zimmer vor, in dem etwa hundert Tennisbälle in ständiger Bewegung herumspringen. Wenn sie die Wand bombardieren, wird dadurch die Wand etwas weggeschoben. (Na-

türlich würden wir die Wand zurückschieben müssen.) Das bedeutet, daß das Gas eine schwankende, ungleichmäßige Kraft ausübt, die jedoch durch unsere groben Sinne (wir sind ja nicht milliardenfach vergrößert) nur als ein *mittlerer Druck* empfunden wird. Um ein Gas in einen Behälter einzuschließen, müssen wir einen Druck ausüben. Fig. 1–3 zeigt ein in allen Lehrbüchern benutztes Gefäß für die Gasaufbewahrung: einen Zylinder mit einem Kolben darin. Die Gestalt der Wassermoleküle spielt nun keine Rolle, und somit zeichnen wir sie einfach als Tennisbälle oder als kleine Punkte. Diese Dinge sind in permanenter Bewegung in alle Richtungen. So viele knallen stets auf den Kolben, daß wir diesen mit einer Kraft, genannt *Druck* (tatsächlich ist Druck mal Fläche eine Kraft) belasten müssen, um ihn im Zylinder zu halten. Zweifellos ist diese Kraft proportional der Kolbenfläche, denn wenn wir bei konstanter Anzahl von Molekülen pro Kubikzentimeter die Fläche vergrößern, wird die Anzahl von Kollisionen mit dem Kolben im gleichen Verhältnis vergrößert wie die Fläche.

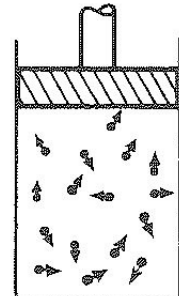


Fig. 1–3

Nun geben wir die doppelte Anzahl von Molekülen in das Gefäß, wir verdoppeln also die Dichte und halten dabei die Geschwindigkeit, d. h. die Temperatur der Moleküle konstant. Dann wird in guter Näherung die Zahl der Kollisionen verdoppelt, und weil jedes Molekül nach einer Kollision die gleiche Energie besitzt wie vorher, ist der Druck proportional der Dichte. Wenn die wahre Natur der zwischenatomaren Kräfte berücksichtigt würde, müßte wegen der Anziehung der Atome eine geringfügige Druckreduzierung und wegen des endlichen Atomvolumens ein kleiner Druckanstieg eingesetzt werden. Trotzdem gilt in sehr guter Näherung bei geringer Dichte, d. h. bei nicht zu vielen Atomen, daß *der Druck proportional der Dichte* ist.

Wir können noch etwas anderes sehen: Wenn wir die Temperatur erhöhen, ohne die Dichte des Gases zu ändern, d. h. wenn wir die Geschwindigkeit der Atome erhöhen, was wird sich ereignen? Nun, die Atome werden kraftvoller aneinander stoßen, weil sie sich schneller bewegen, und zusätzlich werden sie öfter auf die Wände treffen, womit der Druck ansteigen wird. Sie sehen, wie einfach die Ideen der Atomtheorie sind.

Wir wollen nun eine andere Situation betrachten. Angenommen, der Kolben wird nach innen bewegt, so daß die Atome langsam auf einen engeren Raum komprimiert werden. Was ereignet sich, wenn ein Atom auf den bewegten Kolben trifft? Offensichtlich wird das Atom durch diese Kollision an Energie gewinnen. Sie können dies versuchen, indem Sie z. B. einen Tischtennisball auf einen in Richtung des Balles bewegten Schläger auftreffen lassen. Sie werden beobachten, daß der Ball nach der Kollision eine größere Geschwindigkeit als vorher hat. (Ein spezielles Beispiel: Wenn ein Stillstehendes Atom von dem bewegten Kolben getroffen wird, so bewegt es sich danach gewiß.) Also sind die Atome „wärmer“, wenn sie vom Kolben wegfliegen. Daher wird die Geschwindigkeit aller Atome in dem Behälter größer. Das bedeutet, daß *die Temperatur eines Gases erhöht wird, wenn wir das Gas langsam komprimieren*. Also wird eine *langsame Kom-*

pression die Temperatur erhöhen und eine langsame Expansion wird die Temperatur reduzieren.

Wir kehren nun zu unserem Tropfen zurück und beobachten in einer anderen Richtung. Angenommen, die Temperatur unseres Wassertropfens wird reduziert. Angenommen, das Zittern der Moleküle der Atome im Wasser nimmt stetig ab. Wir wissen, daß zwischen den Atomen Anziehungskräfte wirksam sind, so daß sie nach einer Weile nicht mehr in der Lage sind, so gut zu zittern. Was sich bei sehr niedrigen Temperaturen ereignet, ist in Fig. 1–4 dargestellt: Die Moleküle schließen sich in einem neuen Muster, *dem Eis*, zusammen. Dies spezielle schematische Bild von Eis ist falsch, weil es in zwei Dimensionen gezeichnet ist, aber es ist qualitativ richtig. Der interessante Punkt ist, daß dieses Material *für jedes Atom einen spezifischen Platz* hat. Sie können leicht ermessen, wenn irgendwie alle Atome an einem Ende des Tropfens in einer bestimmten Anordnung gehalten werden, jedes Atom an seinem Platz, so ist wegen der Struktur der starren Zwischenbindungen das andere Ende, Kilometer entfernt (in unserem vergrößerten Maßstab), an einer ganz bestimmten Stelle. Wenn wir also eine Eisnadel an einem Ende festhalten, dann wird das andere Ende seiner Verschiebung widerstehen. Das ist anders als bei Wasser, wo die Struktur zerbrochen ist, weil sich die Atome aufgrund des vermehrten Zitterns in alle Richtungen bewegen. Der Unterschied zwischen Festkörpern und Flüssigkeiten besteht also darin, daß die Atome in Festkörpern regelmäßig angeordnet sind, in der sogenannten *kristallinen Anordnung*, und in großen Entfernungen keine willkürlichen Positionen einnehmen; der Ort eines Atoms an einer Seite des Kristalls ist bestimmt durch die Positionen anderer Atome, die sich Millionen Atomabstände entfernt auf der anderen Seite des Kristalls befinden. Fig. 1–4 ist eine erfundene Anordnung für Eis, die zwar einige Eigenschaften von Eis korrekt wiedergibt, die jedoch nicht der wahren Anordnung entspricht. Eine korrekt dargestellte Eigenschaft ist der Teil der Symmetrie, welcher hexagonal ist. Sie können sehen, daß das Bild bei einer Drehung um 120° in der ursprünglichen Form erhalten bleibt. Also existiert eine *Symmetrie* in Eis, die eine Erklärung für die sechskantige Erscheinung von Schneeflocken gibt. Weiterhin wird aus Fig. 1–4 ersichtlich, warum Eis beim Schmelzen zusammenschrumpft. Die gezeigte Kristallstruktur von Eis hat, ebenso wie die wahre Eisstruktur, viele „Löcher“. Wenn die Anordnung zusammenbricht, können diese Löcher durch Moleküle besetzt werden. Die meisten einfachen Substanzen, mit Ausnahme von Letternmetall und Wasser, *dehnen* sich beim Schmelzen aus, weil im festen Zustand die Atome in dichtester Packung vorliegen und nach dem Schmelzen mehr Raum benötigen, um herumzuzittern. Jedoch schrumpft eine offene Struktur zusammen, wie es bei Wasser der Fall ist.

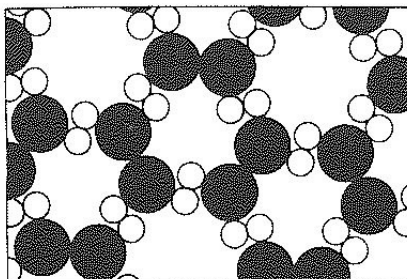


Fig. 1–4. Eis.

Obgleich Eis eine „starre“ kristalline Form hat, kann seine Temperatur verändert werden – Eis besitzt Wärme. Wenn wir wollen, können wir die Wärmemenge ändern. Was ist die Wärme beim Eis? Die Atome stehen nicht still. Sie zittern und vibrieren.

Selbst in der geordneten Struktur, im Kristall, vibrieren die Atome „auf der Stelle“. Bei Temperaturerhöhung werden die Vibrationsamplituden so weit vergrößert, bis sich die Atome aus ihren Positionen losreißen. Wir nennen dies *schmelzen*. Bei Temperaturverringerung bis zum absoluten Nullpunkt nimmt diese Vibration bis auf einen Minimalwert, der *nicht gleich Null* ist, ab. Diese Minimalbewegung, welche Atome haben können, reicht nicht aus, um die Substanz zu schmelzen. Eine Ausnahme ist das Helium, das lediglich seine atomaren Bewegungen so gut wie möglich reduziert. Jedoch besitzt es am absoluten Nullpunkt noch genug Bewegung, um nicht einzufrieren. Helium friert auch am absoluten Nullpunkt nicht, wenn nicht durch Druckerhöhung seine Atome zusammengepreßt werden. Wenn wir den Druck erhöhen, *können* wir Helium erstarren lassen.

1–3 Atomare Prozesse

So weit die Beschreibung von Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen nach der atomaren Vorstellung. Die Atomhypothese beschreibt aber auch *Prozesse*, und somit werden wir nun eine Anzahl von Prozessen vom atomaren Gesichtspunkt betrachten. Der erste Prozeß, den wir betrachten, hängt mit der Oberfläche von Wasser zusammen. Was ereignet sich an der Wasseroberfläche? Unser Bild wird nun komplizierter – und realistischer –, wenn wir annehmen, daß sich die Oberfläche in Luft befindet. Fig. 1–5 zeigt die Oberfläche von Wasser in Luft. Wie vorher sehen wir die Wassermoleküle, welche einen Körper von flüssigem Wasser bilden. Aber nun sehen wir auch die Oberfläche des Wassers. Über der Oberfläche finden wir eine Anzahl von Dingen: Zunächst einmal sind da die Wassermoleküle, wie in Wasserdampf. Das ist *Wasserdampf*, welcher immer über flüssigem Wasser vorhanden ist. (Es existiert ein Gleichgewicht zwischen Wasserdampf und Wasser; dies wird später behandelt.) Zusätzlich finden wir einige andere Moleküle: hier zwei zusammenhängende Sauerstoffatome, welche ein *Sauerstoffmolekül* bilden, und dort zwei ebenfalls zusammenhängende Stickstoffatome, welche zu einem Stickstoffmolekül vereinigt sind. Luft besteht fast ausschließlich aus Stickstoff, Sauerstoff, ein wenig Wasserdampf und geringen Mengen Kohlendioxyd, Argon und anderen Dingen. Also befindet sich oberhalb der Wasseroberfläche die Luft, ein Gas, welches etwas Wasserdampf enthält. Was ereignet sich nun in diesem Bild? Die Moleküle im Wasser zittern immer herum. Von Zeit zu Zeit wird eines an der Oberfläche ein wenig härter als normal getroffen, wodurch es weggeschlagen wird. Das ist in unserem Bild schwer zu erkennen, weil dies ja eine *Momentaufnahme* darstellt. Aber wir können uns vorstellen, daß ein Molekül in Oberflächennähe gerade gestoßen wurde und wegfliegt. Auf diese Weise verschwindet das Wasser, Molekül um Molekül – es verdampft. Aber wenn wir das Wassergefäß oben *schließen*, werden wir nach einer Weile eine große Anzahl von Wassermolekülen zwischen den Luftmolekülen finden. Von Zeit zu Zeit fliegt ein Dampfmolekül in das Wasser und wird dort wieder festgehalten. So sehen wir, daß ein tot und uninteressant aussehendes Ding – ein Glas Wasser mit

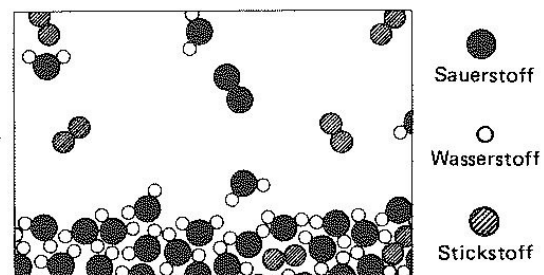


Fig. 1–5. In Luft verdampfendes Wasser.

einem Deckel darauf, das vielleicht schon zwanzig Jahre herumsteht – in Wirklichkeit ein dynamisches und interessantes Phänomen enthält, welches ständig abläuft. Für unsere Augen, unsere groben Augen, ändert sich nichts, aber wenn wir es mit milliardenfacher Vergrößerung sehen könnten, würden wir sehen, daß sich aus seiner eigenen Perspektive die Dinge fortwährend ändern: Moleküle verlassen die Oberfläche und Moleküle kehren in die Oberfläche zurück.

Warum beobachten wir *keine Veränderungen*? Weil genauso viele Moleküle die Oberfläche verlassen wie zurückkommen! Auf die Dauer „geschieht nichts“. Wenn wir den Deckel des Gefäßes abnehmen und die nasse Luft wegblasen und durch trockene Luft ersetzen, so wird noch immer die gleiche Molekülzahl aus der Oberfläche heraustreten wie vorher, weil dies ja von der Molekülbewegung abhängt. Aber nun ist die zurückkehrende Anzahl sehr reduziert, weil sich weniger Wassermoleküle über dem Wasser befinden. Also verlassen mehr die Oberfläche als dahin zurückkehren, und das Wasser verdampft. Wenn man also Wasser verdampfen will, benutze man einen Ventilator!

Hier noch etwas anderes: Welche Moleküle verlassen die Oberfläche? Wenn sich ein Molekül entfernt, so kommt dies zustande durch eine zufällige, zusätzliche Ansammlung von ein klein wenig mehr als der normalen Energie, welche es benötigt, um der Anziehung seiner Nachbarn zu entfliehen. Weil die die Oberfläche verlassenden Moleküle mehr als die durchschnittliche Energie besitzen, müssen die zurückgebliebenen Moleküle eine *geringere* durchschnittliche Bewegung haben als zuvor. So *kühlt* sich die Flüssigkeit langsam ab, wenn sie verdampft. Natürlich, wenn ein Molekül des Dampfes aus der Luft in die Oberfläche darunter kommt, erfährt es bei Annäherung an die Oberfläche eine plötzliche starke Anziehung. Dies beschleunigt das ankommende Molekül und resultiert in der Erzeugung von Wärme. Wenn sie weggehen, nehmen sie Wärme mit; bei der Rückkehr erzeugen sie Wärme. Wenn kein Verdampfungsüberschuß vorhanden ist, wird das Wasser natürlich keine Temperaturänderung erfahren. Wenn das Wasser angeblasen wird, um eine Überzahl zu verdampfen, kommt eine Abkühlung zustande. Darum: Blasen Sie die Suppe an, um sie abzukühlen. Man muß natürlich berücksichtigen, daß die gerade beschriebenen Prozesse komplizierter sind als dargestellt. Es geht nicht nur das Wasser in die Luft, sondern von Zeit zu Zeit wird eines der Sauerstoff- oder Stickstoffmoleküle in das Wasser geraten und in der Menge der Wassermoleküle „verlorengehen“ und sich in das Wasser hineinarbeiten. Auf diese Weise wird Luft in Wasser gelöst: Sauerstoff- und Stickstoffmoleküle dringen in das Wasser ein und das Wasser wird Luft enthalten. Wenn wir die Luft plötzlich aus dem Gefäß entfernen, werden die Luftmoleküle das Wasser schneller verlassen als sie hineingegangen sind und dabei Blasen erzeugen. Dies ist sehr schlecht für Taucher, wie Sie vielleicht wissen werden.

Wir gehen nun weiter zu einem anderen Prozeß. In Fig. 1–6 ist, vom atomaren Gesichtspunkt, die Auflösung eines Festkörpers in Wasser gezeigt. Was wird geschehen, wenn wir einen Salzkristall in Wasser bringen?

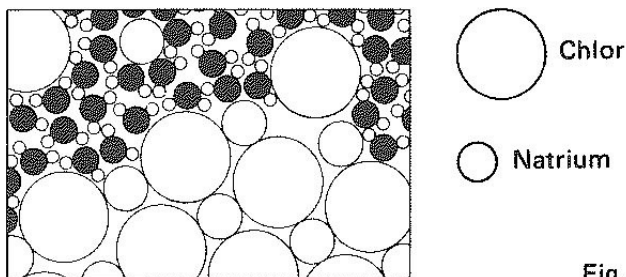


Fig. 1–6. Auflösung von Salz in Wasser.

Kristall	●	○	a (Å)
Steinsalz	Na	Cl	5,64
Sylvin	K	Cl	6,28
	Ag	Cl	5,54
	Mg	O	4,20
Galenit	Pb	S	5,97
	Pb	Se	6,14
	Pb	Te	6,34

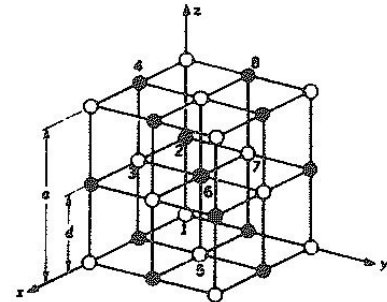


Fig. 1–7

Abstand zum nächsten
Nachbarn $d = a/2$

Salz ist ein Festkörper, ein Kristall mit einer periodischen Anordnung von „Salzatomen“. Fig. 1–7 ist eine Illustration der dreidimensionalen Struktur des gewöhnlichen Salzes, des Natriumchlorids. Genaugenommen ist der Kristall nicht aus Atomen aufgebaut, sondern aus sogenannten *Ionen*. Ein Ion ist ein Atom, das entweder ein paar zusätzliche oder ein paar fehlende Elektronen hat. In einem Salzkristall finden wir Chlorionen (Chloratome mit einem zusätzlichen Elektron) und Natriumionen (Natriumatome, denen ein Elektron fehlt). Die Ionen halten alle durch elektrische Anziehungskräfte im festen Kristall zusammen, aber wenn wir sie in Wasser bringen, merken wir, daß sich wegen der Anziehung der Ionen durch den negativen Sauerstoff und den positiven Wasserstoff einige der Ionen losschütteln. Wir sehen in Fig. 1–6, wie sich ein Chlorion löst und wie andere Atome als Ionen im Wasser schwimmen. Dieses Bild wurde mit einiger Sorgfalt gezeichnet. Z. B. ist zu bemerken, daß die Wasserstoffenden häufiger den Chlorionen zugewandt sind, während die Natriumionen häufiger an den Sauerstoffenden zu finden sind, weil Natrium positiv ist und die Sauerstoffenden des Wassers negativ sind und sie sich elektrisch anziehen. Können wir aus dem Bild bestimmen, ob sich das Salz im Wasser *auföst* oder ob es im Wasser *auskristallisiert*? Das können wir natürlich *nicht* beantworten, denn während einige Atome den Kristall verlassen, siedeln sich andere wieder an. Dieser Prozeß ist ebenso ein *dynamischer* wie die Verdampfung. Er ist abhängig davon, ob im Wasser mehr oder weniger Salz enthalten ist als die zum Gleichgewicht erforderliche Menge. Mit Gleichgewicht meinen wir die Situation, in der die Rate der weggehenden Atome gleich der der ankommenden ist. Wenn sich fast kein Salz im Wasser befindet, werden mehr Atome den Kristall verlassen, und das Salz löst sich auf. Befinden sich andererseits zu viele „Salzatome“ im Wasser, dann werden mehr davon zurückkommen, und das Salz kristallisiert aus.

Nebenbei erwähnen wir, daß der Begriff des *Moleküls* einer Substanz nur angenähert ist und nur für eine gewisse Klasse von Substanzen existiert. Im Fall des Wassers ist es klar, daß tatsächlich drei Atome zusammenhängen. Es ist jedoch nicht so klar für festes Natriumchlorid. Hier haben wir eine Gruppierung von Natrium- und Chlorionen in einem dreidimensionalen Muster. Es existiert hier keine natürliche Gruppierung als „Salzmolekül“.

Kehren wir zu unserer Diskussion von Auflösung und Ausfällung zurück. Wenn wir die Temperatur der Salzlösung erhöhen, dann wird die Rate der abgehenden Atome erhöht; das gleiche gilt für die Rate der zurückkehrenden Atome. Es erweist sich allgemein als sehr schwierig, vorherzusagen, ob der Festkörper mehr oder weniger aufgelöst wird. Bei Temperaturerhöhung werden die meisten Substanzen stärker aufgelöst; bei einigen Substanzen ist es jedoch umgekehrt.

1–4 Chemische Reaktionen

Bei allen bisher beschriebenen Prozessen haben die Atome und die Ionen ihre Partner nicht ausgetauscht, aber es gibt natürlich Umstände, unter denen die Atome ihre Kombinationen ändern und neue Moleküle bilden. Dies ist in Fig. 1–8 illustriert. Ein Prozeß, bei dem eine Umgruppierung der atomaren Partner stattfindet, wird eine *chemische Reaktion* genannt. Die anderen bisher beschriebenen Prozesse sind physikalische Prozesse, jedoch existiert zwischen den beiden keine scharfe Trennung. (Der Natur ist es egal, wie wir es nennen, sie führt die Prozesse einfach aus.) Diese Abbildung soll Kohlenstoff darstellen, der in Sauerstoff verbrennt. Beim Sauerstoff sind zwei Sauerstoffatome stark aneinander gebunden. (Warum halten nicht *drei* oder sogar *vier* zusammen? Das ist eine der ganz besonderen Eigenarten solcher atomarer Prozesse. Atome sind sehr speziell: Sie bevorzugen gewisse besondere Partner, besondere Richtungen usw. Es ist die Aufgabe der Physik, zu analysieren, warum jedes Atom will was es will. Jedenfalls bilden zwei Sauerstoffatome, gesättigt und glücklich, ein Molekül.)

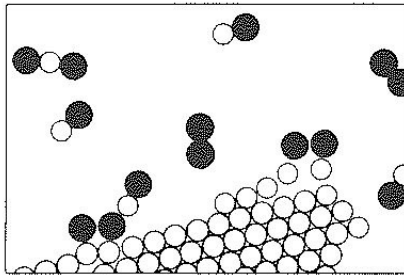


Fig. 1–8. Kohlenstoffverbrennung in Sauerstoff.

Angenommen, die Kohlenstoffatome befinden sich in einem festen Kristall (dies könnte Graphit oder Diamant* sein). Zum Beispiel kann eines der Sauerstoffmoleküle zum Kohlenstoff kommen, und jedes Atom kann ein Kohlenstoffatom auflesen und als neue Kombination „Kohlenstoff-Sauerstoff“ davonfliegen. Dies ist ein Molekül des Gases Kohlenmonoxyd. Es hat den chemischen Namen CO erhalten. Es ist sehr einfach: Die Buchstaben „CO“ sind praktisch ein Bild dieses Moleküls. Aber Kohlenstoff hat eine viel größere Affinität zu Sauerstoff als Sauerstoff zu Sauerstoff oder als Kohlenstoff zu Kohlenstoff. Darum kann bei diesem Prozeß der Sauerstoff mit nur ein klein wenig Energie ankommen, aber Sauerstoff und Kohlenstoff werden mit fürchterlicher Heftigkeit und Erschütterung zusammenknallen und die gesamte Umgebung wird davon Energie auflesen. Auf diese Weise wird eine große Menge Bewegungsenergie, kinetische Energie, erzeugt. Das ist natürlich der Vorgang der *Verbrennung*; wir erhalten *Wärme* aus der Verbindung von Sauerstoff und Kohlenstoff. Die Wärme hat normalerweise die Form von molekularer Bewegung des heißen Gases, aber unter gewissen Umständen kann sie so groß sein, daß sie *Licht* erzeugt. So erhält man *Flammen*.

Es kommt hinzu, daß das Kohlenmonoxyd noch nicht ganz befriedigt ist. Es ist ihm möglich, weiteren Sauerstoff anzuziehen, so daß wir eine viel kompliziertere Reaktion haben können, bei der sich Sauerstoff mit dem Kohlenstoff verbindet, während gleichzeitig eine Kollision mit dem Kohlenmonoxydmolekül stattfindet. Ein Sauerstoffatom könnte sich an das CO anhängen und damit ein Molekül bilden, welches aus einem Kohlenstoff und zwei Sauerstoff besteht. Es wird mit CO_2 bezeichnet und Kohlendioxyd ge-

* Es ist möglich, Diamant in Luft zu verbrennen.

nannt. Wenn wir den Kohlenstoff mit sehr wenig Sauerstoff in einer sehr schnellen Reaktion verbrennen (z. B. in einem Automotormotor, wo die Explosion so schnell ist, daß nicht genügend Zeit zur Bildung von CO_2 vorhanden ist), so wird eine beachtliche Menge Kohlenmonoxyd erzeugt. Bei vielen solcher atomarer Umgruppierungen wird eine große Menge Energie frei, die abhängig von der Art der Reaktion Flammen, Explosionen usw. erzeugt. Die Chemiker haben diese Anordnungen der Atome studiert und gefunden, daß jede Substanz ein Typ einer *Atomgruppierung* ist.

Zur Illustration dieser Idee betrachten wir ein weiteres Beispiel. Wenn wir ein Veilchenbeet betreten, dann wissen wir, was „dieser Geruch“ ist. Es ist eine Art *Molekül* oder *Atomgruppierung*, die sich in unsere Nasen vorgearbeitet hat. Zunächst einmal, wie sind sie bis dahin gekommen? Das ist recht einfach. Wenn der Geruch irgendein Molekül in der Luft ist, welches herumzittert und in alle Richtungen gestoßen wird, dann kann es *zufällig* in unsere Nase gelangt sein. Ganz gewiß hat es keine besondere Vorliebe dafür, in unsere Nase zu gelangen. Es ist lediglich ein hilfloser Teil einer herumstoßenden Menge von Molekülen, und auf seinen ziellosen Wanderungen findet sich dieser Fetzen Materie in unserer Nase wieder.

Chemiker können nun spezielle Moleküle wie das des Veilchengeruchs analysieren und uns die *genaue räumliche Anordnung* der Atome mitteilen. Wir wissen, daß das Kohlendioxidmolekül gerade und symmetrisch ist: $\text{O}-\text{C}-\text{O}$. (Das kann auch leicht mit Hilfe physikalischer Methoden bestimmt werden.) Auch für die wesentlich komplizierteren Atomgruppierungen, welche in der Chemie vorhanden sind, ist es möglich, in einem langen, bemerkenswerten Prozeß von Detektivarbeit die räumlichen Anordnungen der Atome zu bestimmen. Fig. 1–9 ist ein Bild der Luft in der Umgebung eines Veilchens; wiederum finden wir Stickstoff und Sauerstoff in der Luft, und Wasserdampf. (Warum finden wir Wasserdampf? Weil das Veilchen *naß* ist. Alle Pflanzen transpirieren.) Jedoch sehen wir auch ein „Monstrum“, bestehend aus Kohlenstoff-, Wasserstoff- und Sauerstoffatomen, welche ein besonderes Muster ihrer Anordnung gewählt haben.

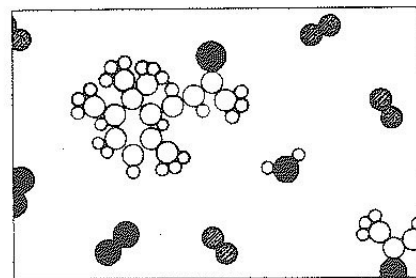


Fig. 1–9. Geruch von Veilchen.

Es ist eine viel kompliziertere Anordnung als die von Kohlendioxid; in der Tat ist es eine enorm komplizierte Anordnung. Leider können wir nicht alles abbilden, was von diesem Molekül wirklich bekannt ist, weil die exakte Anordnung dreidimensional ist, während unser Bild nur zwei Dimensionen besitzt. Die sechs Kohlenstoffe, die einen Ring bilden, formen keinen gleichmäßigen, sondern eine Art „gerunzelten“ Ring. Alle dabei auftretenden Winkel und Abstände sind bekannt. So ist eine chemische *Formel* ganz einfach ein Bild eines solchen Moleküls. Wenn der Chemiker so ein Ding an die Tafel schreibt, dann versucht er, grob gesprochen, in zwei Dimensionen zu „zeichnen“. Zum Beispiel sehen wir einen „Ring“ von sechs Kohlenstoffen, und am Ende hängt eine „Kette“ von Kohlenstoffen mit einem Sauerstoff an vorletzter Stelle, drei Wasserstoffe an diesen Sauerstoff gebunden, zwei Kohlenstoffe und drei Wasserstoffe stehen dort nach oben, usw.

Wie findet ein Chemiker diese Anordnungen? Er mixt Gläser voll Zeug zusammen, und wenn es rot wird, weiß er, daß es aus einem Wasserstoff und zwei hier angehängten Kohlenstoffen besteht; wenn es jedoch blau wird, dann ist es überhaupt nicht so.

Dies ist tatsächlich eines der phantastischsten Stücke von Detektivarbeit, die je geleistet wurden – organische Chemie. Um die Atomanordnungen in diesen komplizierten Strukturen zu entdecken, beobachtet der Chemiker die Vorgänge beim Mixen zweier verschiedener Substanzen. Der Physiker konnte nie richtig glauben, daß der Chemiker wirklich wußte, wovon er redet, wenn er die Atomanordnungen beschreibt. Seit ungefähr zwanzig Jahren ist es in einigen Fällen möglich, mit Hilfe einer physikalischen Methode solche Moleküle zu betrachten (nicht ganz so komplizierte wie das vorliegende, aber einige, welche Teile davon enthalten), und es wurde möglich, jedes Atom zu lokalisieren, nicht durch Betrachtung von Farben, sondern *durch Messung ihrer Positionen*. Und tatsächlich zeigte sich, daß die Chemiker fast immer recht haben.

Es zeigt sich, daß beim Geruch des Veilchens drei geringfügig verschiedene Moleküle vorhanden sind, die sich nur durch verschiedene Wasserstoffatom-Anordnungen unterscheiden.

Ein Problem in der Chemie ist die Benennung der Substanzen, so daß man weiß, was sie sind. Man finde einen Namen für diese Form! Der Name muß nicht nur die Form mitteilen, er muß auch sagen, daß hier ein Sauerstoffatom ist, dort ein Wasserstoff – genau was und wo jedes Atom ist. Wir sehen also, daß die chemischen Namen komplex sein müssen, um komplett zu sein. Der Name unseres Moleküls in der kompletteren Form, welcher die Struktur wiedergibt, ist 4-[(2, 2, 3, 6)-tetramethyl-5-cyclohexenyl]-3-buten-2-on und dies sagt Ihnen, daß dies die Anordnung ist. Wir können die Schwierigkeiten der Chemiker ermessen und verstehen die Gründe für solch lange Namen. Es ist nicht so, daß sie unverständlich sein wollen, sie haben ein extrem schwieriges Problem, die Moleküle mit Worten zu beschreiben!

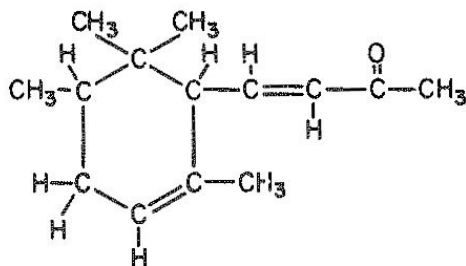


Fig. 1–10. Die abgebildete Substanz ist α-Iron.

Woher wissen wir, daß es Atome gibt? Durch einen der früher erwähnten Tricks: Wir machen die *Hypothese*, daß Atome existieren, und ein Resultat nach dem anderen bestätigt unsere Vorhersage, so wie sie es sollten, *wenn* die Dinge aus Atomen bestehen. Es gibt auch etwas direktere Hinweise. Ein gutes Beispiel dazu ist das folgende: Die Atome sind so klein, daß sie weder mit dem Lichtmikroskop noch mit dem *Elektronenmikroskop* gesehen werden können. (Mit einem Lichtmikroskop können nur viel größere Dinge betrachtet werden.) Wenn nun die Atome immer in Bewegung sind, sagen wir im Wasser, und wir eine große Kugel von irgend etwas in das Wasser bringen, eine Kugel, welche viel größer ist als die Atome, so wird die Kugel herumgeschubst werden – sehr ähnlich wie bei dem Ballspiel, bei welchem ein großer Ball von einer Menge Leute herumgeschubst wird. Die Leute schieben in verschiedene Richtungen, und der Ball bewegt sich im Feld unregelmäßig hin und her. Auf dieselbe Weise wird die oben erwähnte „große Ku-

gel" wegen der Ungleichheit der Kollisionen auf den verschiedenen Seiten bewegt. Wenn wir also sehr kleine Partikel (Kolloide) im Wasser durch ein sehr gutes Mikroskop betrachten, sehen wir ein permanentes Herumzittern der Partikel, welches das Resultat der Bombardierung durch die Atome ist. Dies wird die *Brownsche Bewegung* genannt.

Wir können weitere Beweise für die Atome aus der Struktur von Kristallen sehen. In vielen Fällen stimmen die durch Röntgenanalyse ermittelten räumlichen „Strukturen“ mit den Formen überein, welche die Kristalle in ihren natürlichen Erscheinungen zeigen. Die Winkel zwischen den verschiedenen „Flächen“ eines Kristalls stimmen innerhalb von Bogensekunden überein mit den Winkeln, die aufgrund der Annahme berechnet werden, daß ein Kristall aus vielen „Lagen“ von Atomen aufgebaut ist.

Alles ist aus Atomen aufgebaut. Das ist die Schlüsselhypothese. Die wichtigste Hypothese der gesamten Biologie ist z. B., daß *alles, was Tiere tun, Atome tun*. Mit anderen Worten: *Es gibt kein Verhalten der Lebewesen, das nicht unter dem Gesichtspunkt erklärt werden könnte, daß sie aus Atomen aufgebaut sind, welche physikalischen Gesetzen gehorchen*. Dies war nicht von Anfang an bekannt: Es bedurfte einigen Experimentisierens und Theoretisierens, um diese Hypothese nahezulegen. Jetzt ist sie aber akzeptiert, und es ist die nützlichste Theorie zur Erzeugung neuer Ideen auf dem Gebiet der Biologie.

Wenn ein Stück Stahl oder ein Brocken Salz, bestehend aus aneinandergereihten Atomen, so interessante Eigenschaften haben kann; wenn Wasser – das nichts ist als jene kleinen Tropfen, Meile um Meile auf der Erde das gleiche Ding – Wellen und Schaum bilden kann und strömende Geräusche und eigenartige Muster beim Fließen über Beton formt; wenn all das, all das Leben eines Flusses nichts anderes als ein Haufen Atome sein kann, *wieviel mehr ist dann noch möglich?* Wenn wir die Atome anstelle der immer wiederkehrenden definitiven Muster oder anstelle der kleinen komplexen Klumpen wie dem Veilchengeruch in eine Anordnung bringen, die überall, von Ort zu Ort verschieden ist, die aus verschiedenen Atomen in vielen Kombinationen besteht, *überall anders*, ohne Wiederholung, um wieviel wunderbarer würde sich dieses Ding verhalten? Ist es möglich, daß dieses „Ding“ vor Dir, das auf und ab wandert, das mit Dir redet, aus einem großen Klumpen dieser Atome in einer so komplexen Anordnung besteht, daß seine Kompliziertheit Deine Vorstellungskraft über seine Möglichkeiten in einen Taumel versetzt? Wenn wir sagen, wir sind ein Haufen Atome, dann meinen wir nicht lediglich einen Haufen Atome. Denn ein Haufen Atome, welcher einmalig ist, kann sehr wohl die Möglichkeiten besitzen, die Sie vor sich im Spiegel sehen.