

Jürgen-Hinrich Fuhrhop und Tianyu Wang

Sieben Moleküle

Die chemischen Elemente
und das Leben



**WILEY-
VCH**

WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

*Jürgen-Hinrich Fuhrhop
und Tianyu Wang*
Sieben Moleküle

***Beachten Sie bitte auch
weitere interessante Titel
zu diesem Thema***

Gossauer, A.

Struktur und Reaktivität der Biomoleküle
Eine Einführung in die Organische Chemie

2006

ISBN: 978-3-906390-29-1

Quadbeck-Seeger, H.-J.

Das historische Periodensystem – Wer hat was entdeckt?

2006

ISBN: 978-3-527-31679-3

Quadbeck-Seeger, H.-J.

Die Welt der Elemente – Die Elemente der Welt

2006

ISBN: 978-3-527-31789-9

Winter, A.

Organische Chemie für Dummies

2006

ISBN: 978-3-527-70292-3

Mädefessel-Herrmann, K., Hammar, F., Quadbeck-Seeger, H.-J., GDCh (Hrsg.)

Chemie rund um die Uhr
Das Buch zum Jahr der Chemie

2004

ISBN: 978-3-527-30970-2

Arni, A.

Verständliche Chemie
für Basisunterricht und Selbststudium

2003

ISBN: 978-3-527-30605-3

Jürgen-Hinrich Fuhrhop und Tianyu Wang

Sieben Moleküle

Die chemischen Elemente
und das Leben



**WILEY-
VCH**

WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

Autoren

Prof. Dr. Jürgen-H. Fuhrhop

Organische Chemie
Freie Universität Berlin
Takustraße 3
14195 Berlin

Tianyu Wang

Inst. Chemie & Biochemie
FU Berlin
Takustraße 3
14195 Berlin

1. Auflage 2009

■ Alle Bücher von Wiley-VCH werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

© 2009 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Printed in the Federal Republic of Germany

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Satz K+V Fotosatz GmbH, Beerfelden

Druck Betz-Druck GmbH, Darmstadt

Bindung Litges & Dopf GmbH, Heppenheim

Umschlaggestaltung Adam Design, Weinheim

ISBN 978-3-527-32099-8

Inhaltsverzeichnis

Vorwort VII

Einleitung 1

**Teil 1 Die biologischen Materialien:
Flüssiges Wasser, Rohre, Gele und Membranen 3**

1 Wasser: Alles fließt oder die Wandlungsphase eins 5

Überblick 5

1.1 SCHÖPFEN: Protonen, Wasserstoff, Sauerstoff und Elektronen 6

1.2 Cluster 18

1.3 Auf der Erde und über der Erde 29

1.4 Rohrsysteme und Pumpen 41

1.5 Bewegliche elektrische Ladungen (Ionen) 53

Fragen zum Wasser 58

**2 Glucose: Fünfzehn Milliarden Tonnen
nachwachsender Rohstoff im Jahr 59**

Überblick 59

2.1 Glucose: Struktur, Eigenschaften, Reaktivität 61

2.2 Cellulose 79

2.3 Stärke 89

2.4 Zucker 94

Fragen zur Glucose 106

3 Lecithin: Fünf Nanometer Fettmembran 107

Überblick 107

3.1 Fettsäuren 109

3.2 Fette 125

3.3 Lecithinmembranen und Magenschleimhaut 134

3.4 Cholesterin als flüssigkristalline Einheit 148

Fragen zu Lecithin und Steroiden 156

Teil 2	Molekulare Module für chemische Wechselwirkungen, Nerven, Muskeln, Atmung und das Sehen	157
4	Tyrosin: In Proteinen zwischen Proteinen	159
	Überblick	159
4.1	α ,L-Aminosäuren und Phenol als Modul der Proteine	161
4.2	Polyphenole	186
4.3	Tyrosin in Proteinen	193
4.4	Tyrosinphosphat	207
	Fragen zu Tyrosin	215
5	ATP: Phosphatchemie des Denkens und Fühlens, der Bewegung und der Zellteilung	217
	Überblick	217
5.1	Aminopurin-Motive	221
5.2	Die Pseudorotation der (Desoxy-)ribose	229
5.3	DNS (Desoxyribonucleinsäure)	231
5.4	Phosphorsäureanhydride und cyclische Ester	238
	Fragen zu ATP	257
6	Oxyhäm: Sauerstoff transportieren und aktivieren	259
	Überblick	260
6.1	Sauerstoff, Sulfid und Eisen	260
6.2	Pyrrol, Pyridin und ihre π -Elektronen	269
6.3	Chlorophyll und Protoporphyrin	274
6.4	Oxyhäm	278
	Fragen zu Oxyhäm	290
7	Retinal: ... und sah, dass es gut war	291
	Überblick	291
	Fragen zu Retinal	305
	Epilog: Mit unseren sieben Molekülen erreichen wir viel	307
	Anhang: Stichworte zur Lösung der Aufgaben	309
	Register	315

Vorwort

Dieses Buch stellt sieben Moleküle vor und folgt ihnen durch die kapillären oder muskulösen Wasserrohre des Menschen bis ins Gehirn, die Herzgefäße und die Geschlechtsorgane. Diesem Ansatz zugrunde liegt die Überzeugung, dass Schüler der Chemie und interessierte Laien die „organische Chemie“ vor allem im Zusammenhang mit dem Trinkwasser, dem Blutkreislauf und dem Zellwasser erleben sollten.

Das Molekül *Wasser* ist eine Pyramide mit zwei Protonen und zwei Elektronenpaaren an den Ecken. Im Zentrum hält ein relativ schweres Sauerstoffatom diese vier Elementarteilchen zwar zusammen, bleibt aber selbst wirkungslos nach außen. *Glucose* ist starrer Sechsring aus Kohlenstoffatomen, der von einem wasserfreundlichen OH-Ring umgeben ist, dessen Oberfläche aber wasserabstoßend ist wie ein Fett. Die Aufgabe von Glucoseketten ist es, die Rohrsysteme der Pflanzen und körnige Nahrungsstoffe aufzubauen. Glucosemoleküle sind die einzige Energiequelle des Gehirns. Biologische Zellmembranen sind aus molekularen Doppelschichten des *Lecithins* aufgebaut und erzeugen mit Natrium- und Kalium-Ionen die elektrischen Potenziale für Nerven- und Muskelströme. Nummer vier ist *Tyrosin*, eine Aminosäure mit holzigem Phenolcharakter und führt uns in die Welt der Proteine, Farbstoffe, Radikalbildner und molekularen Anker. Der Benzolring des Tyrosins dominiert die Welt der Neurotransmitter und der künstlichen Arzneimittel, die störende Aktivitäten von Proteinen blockieren. Ohne das Phosphat aus *ATP* gibt es keinen Gedanken, kein Gefühl, keine Bewegung und keine Zellteilung. Kein Lebenszeichen des Menschen läuft ohne Phosphat, das mit seinen negativen Ladungen die positiven Natrium- und Kaliumströme antreibt und steuert, und damit die Basis zu unserer Existenz legt. *Oxyhäm* transportiert das Oxidationsmittel Sauerstoff im reduzierenden Blutstrom und setzt in den Zellen atomaren Sauerstoff frei, der Glucose und Fette in Wasser bei 37 °C verbrennt. Da kommt die Energie her, die wir zur Erzeugung der Nerven- und Muskelströme brauchen. *Retinal* schließlich leitet den magischen Sehprozess der Tiere und Menschen ein, der farbige, bewegliche Bilder im Hirn entstehen lässt.

Das alles tun die sieben Moleküle für alle Menschen – und zwar großzügigerweise seit wenigstens zweihunderttausend Jahren, obwohl man von ihnen erst seit höchstens hundert Jahren weiß.

Die Autoren dieses Buches, bewundern und lieben Gestalt, Arbeit und Ausdauer der sieben Moleküle und vieler ihrer nahen Verwandten über die Maßen. Wir hoffen, mit diesem Buch den Geist dankbaren Staunens dem geneigten Leser und den noch Lernenden in der Schule nahe zu bringen.

Wir danken der Freien Universität Berlin für uneingeschränkte Unterstützung und Dr. Claus Endisch und den Teilnehmern seines Chemieleistungskurses an der Bertha-von-Suttner-Oberschule in Berlin-Reinickendorf für ihre Anregungen.

Oktober 2008, Berlin

Jürgen Fuhrhop · Tianyu Wang

Einleitung: SCHÖPFEN und Waglule Tyatohre

Waglule Tyatohre ist eine für dieses Buch erfundene, pseudo-chemische Formel, die die Namen von sieben Molekülen zusammenfasst. Alle sieben spielen in der täglichen Arbeit der Pflanzen, Tiere und Menschen, die man „Leben“ nennt, anspruchsvolle Hauptrollen. Der „Vorname“ *Waglule* bezieht sich auf die *Baumaterialien* Wasser, *Glucose* und *Lecithin* für biologische Rohrleitungssysteme der Bäume und Gehirne, der „Familiename“ *Tyatohre* bezeichnet die *funktionellen Teile (Module) biologischer Maschinen*, die den Verkehr der Güter und Nachrichten in den Wasserrohren betreiben, nämlich *Tyrosin*, *ATP*, *Oxyhäm* und *Retinal*.

Die sieben Moleküle enthalten insgesamt sieben verschiedenen Atomsorten, nämlich Schwefel, S, Kohlenstoff, C, Wasserstoff, H, Sauerstoff, O, Phosphor, P, Eisen, Fe, und Stickstoff, N. Daraus haben wir ein neues Kunstwort geformt, nämlich „SCHÖPFEN“. Der Doppelpunkt über dem O symbolisiert dabei die Elektronenpaare, die die Elemente zu Molekülen „verbinden“.

Chemikergehirne sind voll von Merkwörtern wie „SCHÖPFEN“ und „*Waglule Tyatohre*“. Sie erwiesen sich, zumindest im Zusammenhang mit der deutschen Sprache, als nützlich, um abstrakte Zusammenhänge zwischen abstrakten Namen nicht zu vergessen.

Mit *Waglule Tyatohre* kennen Sie die molekularen Hauptpersonen des täglichen Lebens. Der Rest ist Kochsalz und anderes „triviales“ Beiwerk. SCHÖPFEN erfasst das Innere der Moleküle, den Charakter und das Seelenleben der Hauptpersonen. Über CHO verfügen mit Ausnahme des Wassers alle unsere sieben Moleküle: diese Elemente bauen die Rohrsysteme der Bäume, des Nervensystems, der Muskeln und des Blutkreislaufs auf. N kommt immer ins Spiel, wenn individuelle Beziehungen zwischen den Molekülen geknüpft werden, zum Beispiel zwischen den Basen des Erbmaterials oder den Aminosäuren der Proteine. P ist das Element des elektrischen Stroms der Nerven und Muskeln, des Denkens, Fühlens, Sehens und der Zellteilung. Fe und S erledigen das Verbrennen der Nahrung und liefern die Energie für Tier und Mensch.

Wir berichten über Moleküle und verzichten dabei nicht auf die genaue Beschreibung ihres Aussehens und ihres Charakters. Das bedeutet, dass wir die dazu notwendigen chemischen Formalismen einführen und unentwegt benutzen. Verschiedene „Moleküle“ unterscheiden sich durch die Art und Anordnung der Atome. In den sieben Molekülen WaGluLe TyAtOhRe bewegen sich außer-

dem Atome und Elektronen wie Teile einer Maschine oder intelligente Ampelsysteme eines Verkehrsnetzes. Auch das wird dargestellt. Wenn Sie das Buch verarbeitet haben, sollten Sie die Strukturen der sieben Moleküle Waglule Tyatohre auswendig wissen und ihren Charakter, ihre Tätigkeit beschreiben können. Sie werden wissen, was das Retinal im Auge mit Lichtquanten tut, wie Eileithin in Wasser spontan Zellmembranen bildet und warum die Neuronen im Gehirn mehrfach ungesättigte Fettsäuren brauchen. Sie werden den Sauerstoff in den sich ewig erneuernden Erythrocyten des Bluts vom aggressiven Sauerstoff in den Zellen unterscheiden können. Die Kenntnis der „*sieben Moleküle*“ ist der Schlüssel zur Welt der biologisch und medizinisch wirksamen Stoffe.

Dieses Buch will Ihnen als naturwissenschaftlich interessiertem Laien oder als Schüler mit dem Chemieunterricht im Nacken zeigen, wie sieben wichtige und reizvoll unterschiedliche Moleküle des Lebens sich im Alltag verhalten, wie und wo sie dem Lebenden ermöglichen, die Welt zu denken, zu fühlen und sich sehend in ihr zu bewegen. Sie sollen die Moleküle des Körpers und ihre Wasserwege kennen lernen und auch erfahren, wo Hindernisse, Überlastungen oder fehlende Hafnarbeiter stören, ja das Leben bedrohen.

Diese Grundkenntnisse könnten auch die staatlichen, von den Bürgern bezahlten Schulen mit ihren Chemielehrern und -lehrerinnen vermitteln. Sie tun es aber, wie wir meinen, nur unzureichend. Stunde um Stunde vergeht der Chemieunterricht mit der Beobachtung von Farbumschlägen bei der Titration von Säuren und Basen, mit dem Auswendiglernen des Periodensystems der Elemente, der Diskussion abstrakter Elektronenschalen, mit der Fällung von Salzen und mit sinnentleertem Vokabellernen. Das erworbene formale Wissen von der Chemie bleibt im Leben, beim Denken, Fühlen, Essen, Arbeiten, Lieben und Leiden so irrelevant, wie es schon während der Schulzeit empfunden wurde. Es wird schnell vergessen, zur Unkenntnis gesellt sich stumpfes Desinteresse.

Die Autoren dieses Buchs sind enthusiastische Chemiker, die sich trotz, nicht wegen des Schulunterrichts für ihr Fach entschieden haben. Ein wenig hoffen sie, dass die Lehrinhalte der Schulen sich ändern lassen und dass die Einstellung der Menschen gegenüber der Wissenschaft von den Stoffen, der Chemie, einmal so freundlich wird, wie es zum Beispiel die glorreichen sieben Moleküle verdienen.

Denn warum lassen sich Bäume wie Menschen auf ein so langes Leben ein? Weil ihnen die Moleküle in jeder Sekunde süßes Leben und frische Nahrung in die Wasserwege der Wurzeln, Stämme und Blätter, der Muskeln, Nerven und Gehirne tragen und ihnen die Möglichkeit geben, zu wachsen und auf der wunderbaren Erde zu gedeihen!

Teil 1

Die biologischen Materialien:

Flüssiges Wasser, Rohre, Gele und Membranen

1

Wasser: Alles fließt oder die Wandlungsphase eins

Alles fließt (Platons Zusammenfassung der Lehre Heraklits)

Wasser: Wandlungsphase eins (I ging, das Chinesische Buch der Wandlungen)

Überblick

- 1.1 Die Materie des Universums besteht zu 92,4% aus den Protonen (p) und 7,3% α -Teilchen (p_2n_2) der Sterne und den entsprechenden Atomen Wasserstoff und Helium im interstellaren Raum. Die Elemente SCHÖPFEN entstehen zusammen mit etwa hundert anderen zu insgesamt 0,3% in großen Sternen durch Fusion der Protonen ($p=H^+$) und Neutronen (n), nachdem die Umwandlung von Protonen in Neutronen und Positronenstrahlung viel Energie freigesetzt hat.

Chemische Bindungen entstehen im interstellaren Raum. Sie entsprechen Elektronenpaaren geringfügiger Masse, aber großer elektromagnetischer Energie, die sich als Wellen in begrenzten Räumen („Orbitalen“) zwischen den Atomkernen bewegen. Das häufigste Molekül des Weltalls ist Wasserstoff, H_2 , danach kommt, mindestens hundertmal seltener, das Wasser. Alles Wasser des Weltraums ist sehr kaltes Eis, das flüssige Wasser der Erde bildet eine Ausnahme. Alles Erdwasser stammt aus dem Weltraum. Seine Gesamtmenge ist seit sechs Milliarden Jahren unverändert. Das Sauerstoffmolekül der Luft stammt aus der Biochemie des Wassers auf der Erde und enthält eine Dreifachbindung und zwei ungepaarte Elektronen („Biradikal“) in antibindenden Orbitalen.

- 1.2 Das Wassermolekül ist eine Pyramide mit einem Volumen von etwa $0,3 \text{ nm}^3$. 18 mL oder 1 mol enthalten 6×10^{23} Moleküle mit je zwei negativen Elektronenpaaren und zwei positiven Protonen an den Ecken. Das schwere Sauerstoffatom im Zentrum der Wasserpyramide wirkt kaum nach außen, es fixiert lediglich Elektronen und Protonen, die sich über Wasserstoffbrücken erst zu pentameren, eisartigen, dann zu flüssigen hexameren Clustern verbinden. Diese Cluster bestimmen den sehr hohen Siedepunkt, die sehr geringe Viskosität, die Inkompressibilität, die hohe Dichte und die hohe Dielektrizitätskonstante des flüssigen Wassers.

- 1.3 Am Tage verdampft die Sonne das Wasser der Meere und setzt damit das Klima der Erde in Gang. Das Wasser kondensiert zu Tröpfchen (0–2 km Höhe) und Eiskriställchen (2–12 km Höhe), wenn es sich in der Atmosphäre der Kälte des Weltraums nähert. Winde entstehen, an kalten Bergwänden regnen die Wolken ab und das Wasser sammelt sich in Flüssen, Seen und im Boden. Etwa 3% des Wassers werden zu Süßwasser (10^7 km^3). Wasser ist nicht farblos, sondern schwach blau. Stehendes Wasser hat ab etwa 5 m Tiefe eine Temperatur von 4°C . Abfließendes und wellenbewegtes Wasser wird zur Erzeugung elektrischen Stroms über rotierende Turbinen genutzt.
- 1.4 Trinkwasser wird über unterirdische Rohrsysteme mit Pumpen zu den Menschen in den Städten gefördert, über Kanalsysteme in Abwasserbecken geleitet, dort gereinigt und wieder in die Flüsse geleitet. Im Menschen fließt das vom Herzen gepumpte Blut vorwiegend in Kapillaren.
- 1.5 Kochsalz und andere Salze zerfallen im Wasser in elektrisch geladene Teilchen (Ionen), die für Nerven- und Muskelströme in Gehirn und Körper der Tiere verantwortlich sind.

1.1

SCHÖPFEN: Protonen, Wasserstoff, Sauerstoff und Elektronen

Die sieben Atome oder Elemente, aus denen die sieben Moleküle bestehen, wurden von den Alchemisten und Chemikern Schwefel (engl. *sulphur*), Kohlenstoff (*carbon*), Wasserstoff (*hydrogen*), Sauerstoff (*oxygen*), Phosphor (*phosphorus*), Eisen (*iron*) und Stickstoff (*nitrogen*) getauft und haben als Symbol dazu die weltweit gebräuchlichen Abkürzungen *S*, *C*, *H*, *O*, *P*, *Fe*, *N* bekommen. Jedes dieser Atome hat einen Atomkern, der aus den Sternen stammt und eine Atomhülle, die mit Elektronen aus dem interstellaren Raum gefüllt ist. Masse und Energie des Universums sind in den Sternen konzentriert, der interstellare Weltraum ist eine kalte Leere mit Staub und Strahlung und Planeten wie der Erde.

Die Erde hat vor sechs Milliarden Jahren viele Wassermoleküle aus dem Weltall an der Oberfläche gesammelt und etwa zwei Milliarden Jahre später begonnen, im warmen Sonnenschein Bäume, Gehirne und viele andere organisierte Systeme aus Wasser und den sieben Elementen entstehen zu lassen. Wie das geschehen konnte, wird wohl ewig ungeklärt bleiben. Im Laufe der Menschheitsgeschichte jedenfalls ist mit den sieben Molekülen nichts passiert: Es waren von Anfang an dieselben mit immer den gleichen Funktionen. Nie wird man mit letzter Gewissheit erfahren, wie die Evolution vor Milliarden Jahren begann und ablief. In Bezug auf die Entstehung der Elemente aber genügt die Beobachtung der Sterne von heute unter der vernünftigen Annahme, dass dort seit sechs Milliarden Jahren die gleichen Prozesse ablaufen. Ein ähnliches „Prinzip des Aktualismus“ gilt für die Entstehung der Erdkruste und des Erdinneren. Die Gegenwart ist ein Fenster zur Vergangenheit – Erosion, Klima und Vulkanismus, Physik und Chemie der Sterne und des interstellaren Raums

sind elementar einfach und werden von immer den gleichen chemischen und physikalischen Gesetzen gesteuert. Gesteinsschichten und Gebirge, die heute langsam wachsen oder verschwinden, haben das schon immer so getan. Die astronomische und geologische Geschichtsschreibung ist deshalb glaubwürdig und nachvollziehbar, wenn man von der unvorstellbaren Umwandlung von Energie zu Protonen in einem einzigen „Urknall“ einmal absieht.

Über die Herkunft des Atomkerns des Wasserstoffs, H^+ , ist nichts weiter zu sagen, als dass er als Proton (p) „schon immer da“ war. In allen Sternen liegt dieser einfachste aller Bausteine der Materie als nackter Atomkern vor, daher auch die Bezeichnung „Proton“ (griech. *protyl*, „Urstoff“). Aus ihm sind alle anderen Atomkerne durch Fusion in den Sternen entstanden. Heute besteht die Materie des Weltalls zu 92,4 Gewichtsprozent aus Protonen mit einem Durchmesser von etwa einem Femtometer (10^{-15} m). Das Proton trägt eine positive elektrische Elementarladung und hat die relative Atommasse Eins. Alle anderen Atomarten sind Vielfache der Elementarmasse des Protons. Auch zwei von drei Atomkernen des Wassers, H_2O , sind Protonen.

Bei Sternentemperaturen von tausenden bis Milliarden Grad und bei der extrem dichten Packung der Protonen in den Sternen werden die Abstoßungskräfte zwischen den positiven Ladungen so groß, dass das Proton zerfällt: Ein positiv geladenes Positron mit viel Energie und kaum Masse wird abgestrahlt, zurück bleibt ein elektroneutrales, stabileres Neutron (n). Positronen sind 2000-mal leichter als Protonen; Positronenstrahlung ist energiereich mit einer Wellenlänge von etwa 10^{-12} m, 100 000-mal energiereicher als die energiereichste ultraviolette Strahlung der Sonne mit einer Wellenlänge von etwa 10^{-7} m oder 100 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9}$ m). Das Positron existiert auf der Erde nicht, aber man kann es in Cyclotrons künstlich herstellen und benutzen, um die Wanderung des Wassers und der Glucose im Gehirn und im Körper zu verfolgen (Seite 51 f und 102 f).

Das Neutron (n) reagiert in den Sternen spontan mit einem zweiten Proton zu einem Deuteron (pn; griech. *deutero*, „das Zweite“). Die einfachste und häufigste „Fusion“ der Atomkerne in den Sternen ist damit erfolgt. Es folgt eine weitere Fusion zweier Deuteronen zu α -Teilchen (p_2n_2) oder Heliumkernen He^{2+} . Das ist alles, was die meisten Sterne, zum Beispiel unsere Sonne, können: Sie verschmelzen Wasserstoff zu Heliumkernen und setzen dabei viel Energie frei. 99,7% der Masse des Weltalls sind damit erfasst: 92,4% sind die „ursprünglichen“ Wasserstoffkerne, 7,3% sind Heliumkerne aus dieser einen Fusion. Dabei gilt immer, dass man Reaktionen im Universum nie in der Vergangenheitsform schildern sollte, denn sie laufen – wie schon gesagt – heute genauso ab wie vor Milliarden Jahren (Abb. 1.1).

Die nächsten Elemente des Alls stammen aus dem CNO-Fusionszyklus in den großen Sternen. Kohlenstoff (${}_6C$), Stickstoff (${}_7N$) und Sauerstoff (${}_8O$) stammen aus der Fusion von zwei 4He -Kernen zum kurzlebigen Berylliumkern 8Be , der zunächst ein weiteres α -Teilchen (p_2n_2) aufnimmt und Kohlenstoff ${}^{12}C$ bildet. Aus ${}^{12}C$ und pn wird dann Stickstoff ${}^{14}N$, aus ${}^{12}C$ und Deuterium p_2n_2 wird Sauerstoff, ${}^{16}O$. Die links tief gestellte Zahl gibt hier die Zahl der Protonen im Kern oder, deutscher, die „Ordnungszahl“ der Elemente an, die links hoch-

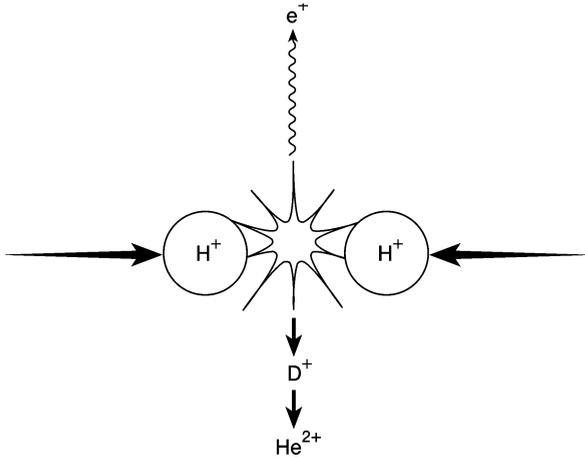


Abb. 1.1 Im Kern der Sonne und anderer Sterne kollidieren zwei Protonen H^+ und erzeugen ein Deuteron, in dem ein Proton und ein Neutron dicht nebeneinander liegen. Die andere positive Ladung wird in Form eines Positrons e^+ abgestrahlt. (Das Positron ist das Antiteilchen des Elektrons.)

gestellte Zahl die Masse des Kerns, also die Summe aus Protonen und Neutronen. Die tief gestellten Zahlen sind identisch mit der Reihenfolge im Periodensystem, das wir hier nicht besprechen, weil wir es nicht brauchen.

Die vier Elemente H, C, N und O genügen bereits, um die Wände der biologischen Wasserrohre, die Zellmembranen und Proteine der Bäume und Menschen, zu formen; zum Aufbau der Pflanzen fehlt eigentlich nur noch Magnesium, ${}_{12}Mg$, das häufigste Metall im Weltall. Für die Nerven- und Muskelströme brauchen wir außerdem ${}_{15}P$ Phosphor, ${}_{11}Na$ Natrium, ${}_{19}K$ Kalium und ${}_{20}Ca$ Calcium, wobei sich Calciumphosphat für Knochen und Zähne als unübertrefflich erwies.

Nach der Bildung der α -Teilchen (Heliumkerne) und der Atomkerne von C, N, O kollabieren die großen Sterne und erhitzen sich weiter. Neue Zyklen beginnen, denen jetzt Kohlenstoff-, Neon-, Sauerstoff- und Silicium-Kerne als Ausgangsstoffe dienen, wobei die letzten drei der sieben Elemente, nämlich Phosphor (${}_{15}P$), Schwefel (${}_{16}S$), und Eisen (${}_{26}Fe$), ebenso wie Natrium (${}_{11}Na$), Magnesium (${}_{12}Mg$), Kalium (${}_{19}K$), und Calcium (${}_{20}Ca$) gebildet werden. All das läuft träge ab, die Ausbeuten sind miserabel. Die Sterne, auch die schweren und sehr heißen, bleiben überwiegend (99,7%!) bei Protonen und Heliumkernen stehen, ihre Zusammensetzung ähnelt der der Sonne. Nur die Zwischenstufe der Deuteronen, $pn = {}^2H^+$, ist bei der Kernfusion einigermaßen aktiv und sorgt für schwere Elemente mit gerader Massenzahl. ${}_{26}Fe$ Eisen ist das letzte Element, mit dessen Bildung die Sterne noch Energie gewinnen, das also „freiwillig“ hergestellt wird. Danach kommen Cobalt (${}_{27}Co$) und Nickel (${}_{28}Ni$), für deren Bildung schon ein wenig Energie zugeschossen werden muss. Die schweren Elemente wie Platin, Gold, Quecksilber und Blei kosten die Sterne sehr viel Ener-

gie, werden in Fusionen nur selten erreicht und zerplatzen außerdem in heißen Sternen leicht wieder. Wasserstoff- und Heliumkerne dominieren deshalb die Weltallmaterie; die leichten Elemente bis zum Eisen sind tausend- (CNOSFe) bis millionenfach (P) seltener und die schweren Elemente jenseits vom Eisen gar milliardenfach weniger vorhanden als Protonen.

Das häufigste Metall ist merkwürdigerweise nicht das erste Metall mit einer geraden Ordnungszahl (Beryllium, ${}_{4}\text{Be}$, das aus reaktionsfreudigen Deuteronen direkt zugänglich ist, aber in großer Hitze leicht zerfällt) sondern gleichauf das zweite und dritte, Magnesium und Eisen, ${}_{12}\text{Mg}$ und ${}_{26}\text{Fe}$. Magnesium wurde in der Evolution zum Metall des Chlorophylls, das in Photosynthese Sauerstoffmoleküle, O_2 , produziert, Eisen lagerte sich in den Blutfarbstoff Häm ein, der das gleiche Sauerstoffmolekül zur Verbrennung der Nahrungsstoffe in Mensch und Tier nutzt (Abb. 1.2).

Die Atomkerne *SCHOPFeN* sind damit im Weltall vorhanden. Die Sterne haben materiell beigesteuert, was sie konnten, um Voraussetzungen für die biologische Evolution auf der Erde zu schaffen. Nun dampfen die Atomkerne ins kalte Universum ab, treffen auf „Weltraumstrahlung“ mit einem hohen Anteil negativ geladener Elektronen und fangen diese, weit entfernt von den heißen Sternen, in einer „Schale“ um den Kern herum ein. Atomkerne werden so zu Atomen, dann zu Molekülen. Das Eintreten der Elektronenpaare in die Atomschale symbolisieren wir in diesem Buch durch einen Doppelpunkt im Zentrum von *SCHOPFeN* und erhalten so das in der deutschen Sprache bildhaft-suggestive Wort „*SCHÖPFeN*“ für die sieben Atombausteine des Lebens.

Das I-Ging-Schöpfungsspiel der Chinesen mit Yin und Yang hat damit begonnen, wobei Yin der primären Kraft der Ausdehnung des Universums entspricht, Yang der des Zusammenziehens. Die schweren, massehaltigen Atomkerne (Yang) haben einen zusammenziehenden (zentripetalen) Effekt und ziehen die leichten Elektronen (Yin) an. Die Wellenstrahlung der Elektronen wirkt zentrifugal, strebt Raumauffüllung an (Yin). Kerne liegen innen (Yang), die Elektronen außen (Yin), Kerne sind harte (Yang) Materie, Elektronen haben einen weichen (Yin), diffusen Wellencharakter, Elektronen sind negativ (Yin) geladen und tendieren zu chemischen Bindungen, zu „sozialem“ (Yin) Kontakt mit Nachbarn. Kernen ist die Chemie fremd, sie führen ein abgeschirmtes Eigenleben (Yang) (Abb. 1.3).

Wir kommen zur Chemie, zum Spiel der Elektronen miteinander, das Atome aneinander bindet, sie zu Molekülen zusammenfügt. Elektronen haben den gleichen Doppelcharakter wie die Positronen: sie sind einerseits leichte Teilchen mit einer Ladung und einer unbegrenzten Lebensdauer, die sich mit Magnetfeldern beschleunigen und mit Wasser hydratisieren lassen. Andererseits sind Elektronen eine energiereiche Wellenstrahlung mit einer Wellenlänge von 10^{-12} m oder 1 pm ($1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$). Im Atom wiegen die Elektronen fast nichts und bewegen sich mit Geschwindigkeiten von 3000 km/s. Nahe an den Atomkernen schwirren sie als „Elektronenwolken“ und bilden chemische Bindungen zwischen den Atomkernen aus. Aus zwei Wasserstoffatomen wird so zum Beispiel ein Wasserstoffmolekül, H_2 . Die Elektronen lokalisieren sich dabei entwe-

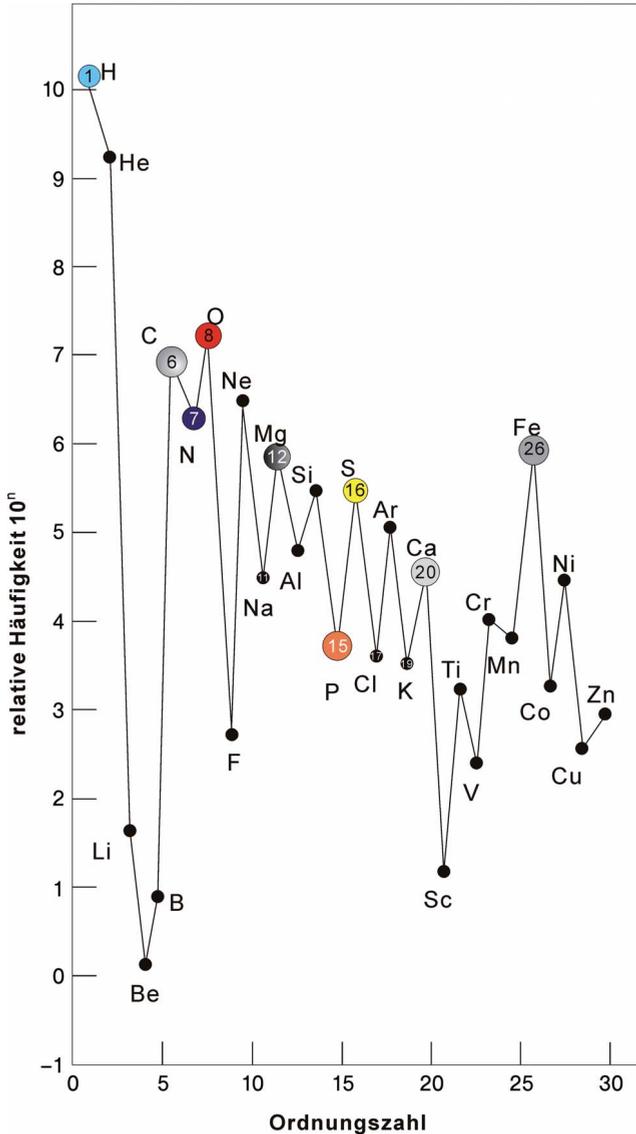


Abb. 1.2 Relative Häufigkeit der Elemente der Sonne bis zum Zink. Sie wurde aus dem Emissionsspektrum dieses Sterns abgeleitet. Wasserstoff ist zehnmals häufiger als Helium und 10^{10} -mal häufiger als Beryllium (Be). Fünf Elemente unserer sieben Moleküle sind

etwa 10^3 - bis 10^4 -mal seltener als H, P ist 10^6 -mal seltener. Die sieben Elemente der sieben Moleküle haben die Ordnungszahlen 1 (H), 6 (C), 7 (N), 8 (O), 15 (P), 16 (S) und 26 (Fe).

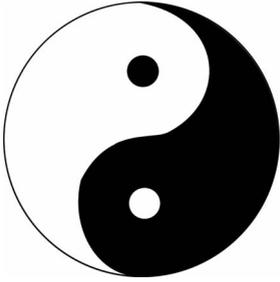


Abb. 1.3 Das Yin-Yang-Modell. Yin ist schwarz und unten, Yang ist weiß und oben. Die Grenze zwischen beiden hat den Charakter einer Welle. Das Weiße hat ein schwarzes Zentrum, das Schwarze ein weißes Zentrum. Alle Dinge sind durch Naturkräfte miteinander verwoben, alle Dinge wandeln sich.

der als einzelne Elektronen oder als ein Elektronenpaar in definierten Raumsegmenten („Orbitalen“), die etwa 2000-mal größer sind als der Atomkern. Zu den Elektronenpaaren in einem einzigen Orbital kommt es trotz der elektrostatischen Abstoßung gleicher Ladungen. Diese „Elektronenkorrelation“ wird in den Modellen der Quantenmechanik in erster Näherung gegenüber der Wechselwirkung der Elektronen mit dem unbeweglichen Kern einfach vernachlässigt oder nur in Form einer geringfügigen „Abschirmung“ der Kernladung durch benachbarte Elektronen berücksichtigt. Wenn der abstoßende Effekt zwischen den Elektronen so gering ist, würde man natürlich nicht nur zwei, sondern mehrere Elektronen in kernnahen Orbitalen erwarten. Das wiederum ist deshalb nicht der Fall, weil die Elektronen in einem Orbital alle gleiche Energie haben, sich aber durch wenigstens eine Quantenzahl unterscheiden müssen – sonst wären sie identisch. Diese Quantenzahl heißt „Spinquantenzahl“ und ihr Betrag ist bei Elektronen entweder $+1/2$ oder $-1/2$. (Modell: Das Elektron rotiert um eine gedachte Achse links oder rechts herum.) Da nur diese beiden Werte möglich sind, können sich immer nur zwei Elektronen in einem Energieraum aufhalten. Akzeptiert man diese Modellvorstellung, kann man sich anschaulich vorstellen, dass die Elektronen auf Grund ihrer schnellen Bewegung um den Kern und einer Rotation um die eigene Achse ein magnetisches Moment komplizierter Struktur erzeugen, das ein positives oder negatives Vorzeichen haben kann. Die geringe Abstoßung zwischen den beweglichen Ladungen könnte dann durch

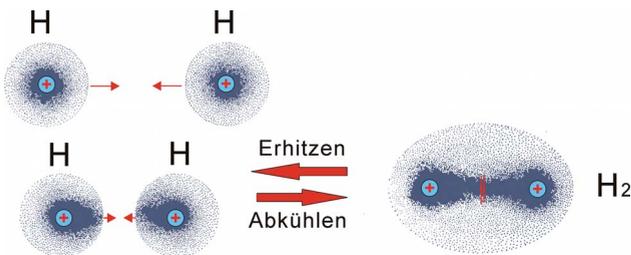


Abb. 1.4 Das Wasserstoffatom H und das Wasserstoffmolekül mit zwei Protonen (+) und Räumen (Orbitalen), die mit Elektronen (-) besetzt sind. Bei der Bildung der Bindung wird Energie frei (\rightarrow), bei Zufuhr hoher Energie (Temperaturen über etwa 1000°C) zerfällt das Molekül in Atome (\leftarrow).

magnetische Anziehung aufgehoben werden. Der langen Rede kurzer Sinn: *Chemische Bindungen bestehen aus Elektronenpaaren zwischen Atomkernen.* Es gibt sie nur im interstellaren Raum, nicht in den Sternen (Abb. 1.4).

Die Physik des Wasserstoffs wird dadurch kompliziert, dass in den Sternen zwei stabile Arten von Wasserstoffkernen („Isotope“) gebildet und in den interstellaren Raum entlassen werden: Protonen $p=H^+$ mit der relativen Atommasse 1 und Deuteronen, $pn=D^+$, mit der relativen Atommasse 2. Beide finden sich im Wasser des Weltraums wieder. „Normales“ Wasser hat zwei Protonen, H_2O , und eine relative Molekülmasse von 18, „schweres“ Wasser HDO , in dem ein Proton durch ein Deuteron ersetzt ist, hat eine relative Molekülmasse von 19 und findet sich im Promillebereich überall. D_2O mit der relativen Molekülmasse 20 gibt es im Weltraum nicht in messbarer Menge. D_2O lässt sich auf der Erde durch einfache, langsame Elektrolyse (Seite 54) von Leitungswasser anreichern. 20 L Wasser geben dann 12 mL 99,9%iges D_2O , das in hoher Konzentration (>50%) stark wachstumshemmend wirkt, weil alle Gleichgewichte, an deren Einstellung Wasser beteiligt ist, langsamer werden. Ein Gramm reines D_2O kostete im Jahr 2006 etwa 10 €.

In der Hauptmasse des Wassers, den Eiswolken im Weltraum, finden sich 0,2% HDO , in den Protonen der Sterne hundertmal weniger (0,002%). Das Erdwasser liegt mit 0,02% HDO dazwischen – das ist zehnmal mehr als in den Sternen, wo das Deuteron geboren und in α -Teilchen umgewandelt wird, und zehnmal weniger als in den gigantischen Wolken aus Eis, wo sich das schwere Wasser sammelt, weil H_2O leichter abdampft als HDO . Der Mittelwert von 0,02% HDO ist in der Geschichte der Wasserwanderung begründet. Das Weltwasser wurde auf Meteoriten als Eis mit 0,2% HDO gesammelt und dann an Ton und Eisenoxide chemisch gebunden, wobei das leichte Wasser H_2O schneller reagierte und sich anreicherte. Diese chemische Bindung des Wassers war die erste Erdreaktion. Nicht gebundenes Wasser mit relativ viel HDO verdampfte hingegen zurück in den Weltraum. Als sich die Erde wegen der großen Gravitationskraft innerhalb des wachsenden Planeten zusammenballte und erhitze, schmolz sie zu einer glühenden Kugel, die Wasserwolken ausstieß. Diese Wolken aber konnten die Erde nicht mehr verlassen, weil deren Gravitationskraft bereits zu groß geworden war, um Wassertropfen oder Eiskriställchen in den Weltraum zu entlassen (Abb. 1.5).

D_2 lässt sich von HD und H_2 mit einem Massenspektrometer unterscheiden. Ein Massenspektrometer ist eine Vakuumkammer, in die die zu untersuchende Probe gesprüht und dort mit einem energiereichen Elektronenstrahl aus einer Kathodenröhre bestrahlt wird. Dieser Strahl schießt ein Elektron aus den verdampften Molekülen heraus und erzeugt einfach positiv geladene Moleküle, so genannte Kationen, im vorliegenden Fall H_2^+ , HD^+ und D_2^+ . Das kationische Gas wird von einer negativ aufgeladenen Metallplatte am Ausgang der Kammer angezogen, durch einen Schlitz gebündelt und als schmaler Molekülstrahl in ein gebogenes Rohr geleitet, das in einem starken Magnetfeld liegt. Dieses Magnetfeld lenkt schwere („träge“) Kationen weniger ab als leichte. Am Ende des Rohrs steht eine Fotoplatte (heute ein Computerchip), welche die nach ihrer

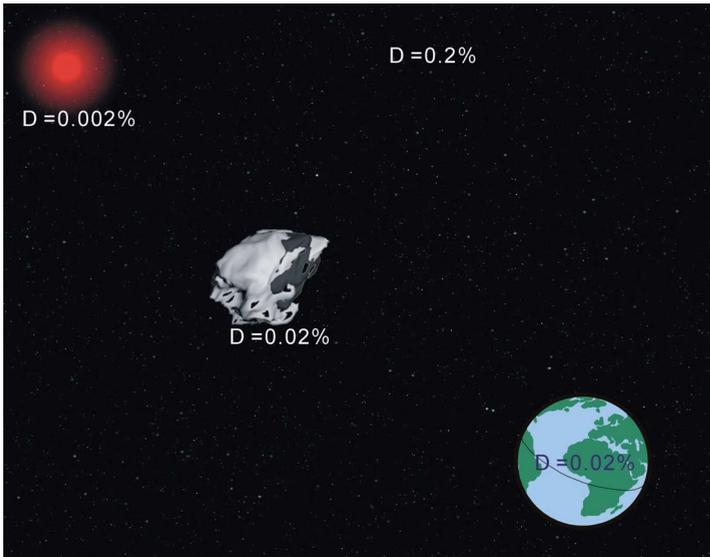


Abb. 1.5 Das Wasser der Erde enthält wie das Wasser in Meteoriten 0,02% Deuterium D. Das Wasser in unserer Sonne ist zehnmals ärmer, das der Eisnebel im Weltraum zehnmals reicher an Deuterium. Erdwasser ist Meteoritenwasser – das ist ein wichtiger Hinweis auf die Entstehungsgeschichte unseres Planeten.

Masse geordneten Molekülstrahlen registriert und mit einem dem Gasstrom zugegebenen Standard vergleicht. Die relativen Massen und die relative Zahl der Teilchen in den voneinander getrennten Gasströmen können so direkt abgelesen werden. Relative Molekülmassen bis etwa 5000 werden unter Anwendung messtechnischer Tricks direkt vermessen (Abb. 1.6).

Zurück zur Fusion der Protonen zu schweren Atomkernen. Wasser enthält neben H auch Sauerstoffatome mit acht Protonen und acht Neutronen im Atomkern. Diese Fusion von acht Deuteronen schaffen über verschiedene Zwischenstu-

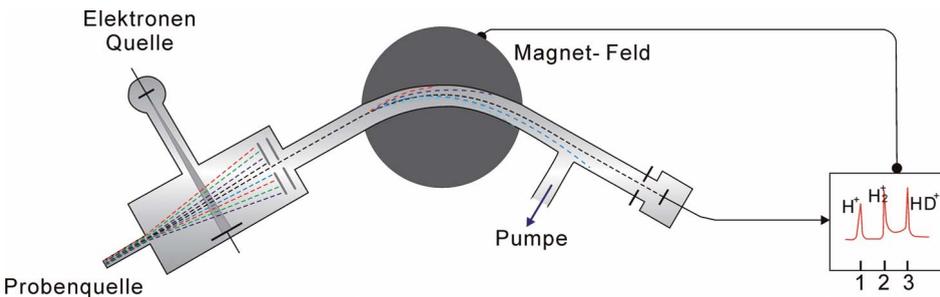


Abb. 1.6 Massenspektrum eines Gemischs aus H_2^+ , HD^+ und H^+ . Die Ionen sind durch Fragmentierung einer Probe beim Beschuss mit energiereichen Elektronen entstanden.

fen große und sehr heiße Sterne im CNO-Zyklus. Die acht Elektronen, die die Protonen neutralisieren, kommen aus der Weltraumstrahlung. Zwei davon sind auf einem inneren, kugelförmigen Orbital lokalisiert, das dem des Wasserstoffs (Seite 11) gleicht, die sechs „Außenelektronen“ des Sauerstoffatoms aber verteilen sich auf vier Orbitale in Tetraeder-Anordnung um den Atomkern herum. Die Tetraederwolke mit dem Sauerstoffkern im Zentrum sorgt für einen optimal weiten Abstand der einander abstoßenden negativen Ladungen der einzelnen Elektronen und der Paare, die sich in jedem Orbital aufhalten. Zwei der Orbitale sind mit je einem Elektronenpaar voll besetzt und haben kein Magnetfeld. In den beiden anderen Orbitalen wartet je ein magnetisches Elektron auf ein weiteres Elektron, das die „bindenden“ Orbitale auffüllt und das Magnetfeld aufhebt. Ein Sauerstoffatom kann nun entweder mit seinesgleichen ein Sauerstoffmolekül, O_2 , bilden oder mit anderen Atomen reagieren.

Im Weltall herrscht ein Überangebot von Wasserstoff; bei Temperaturen über -70°C gibt es dort deshalb keinen elementaren Sauerstoff, sondern ausschließlich Wasser. Zwei Wasserstoffatome lagern dazu ihre Elektronen in die beiden halb leeren Orbitale des Sauerstoffatoms ein und verkleinern den Tetraederwinkel von 109° auf 105° , weil die abstoßende Wirkung der Elektronen zwischen den Protonen kleiner ist als die zwischen zwei ungebundenen Elektronenpaaren (Abb. 1.7).

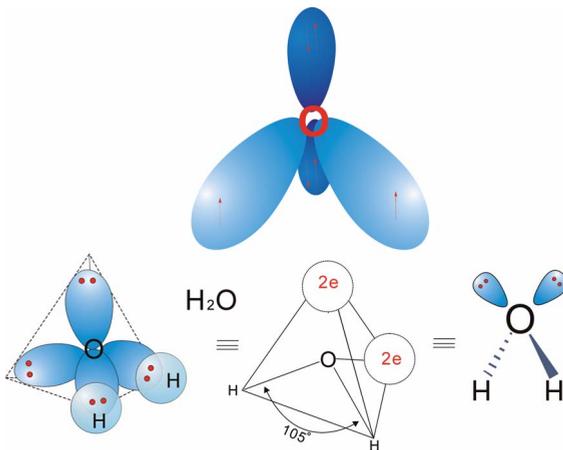


Abb. 1.7 Oben: Das Sauerstoffatom mit sechs Außenelektronen. Nur zwei Orbitale sind halbbesetzt und können Elektronen von anderen Atomen, zum Beispiel von zwei Wasserstoffatomen, aufnehmen. Unten: Die tetraedrische Struktur des Wassers mit dem Sauerstoffatom, O, im Zentrum, den großen „Wasserstoffflügeln“ H^+ vorne und den etwas weniger voluminösen Elektronenpaaren hinten (Modell von Elektronenpaaren in lokalisierten Orbitalen). Alle Orbitale des Sauerstoffs und des Wasserstoffs sind mit Elek-

tronenpaaren besetzt: zwei Paare binden die Wasserstoffatome an den Sauerstoff, zwei weitere Paare sind nur mit dem Sauerstoffatom verbundene „einsame“ oder „nichtbindende“ Elektronenpaare. Der Bindungswinkel ist 105° , also kleiner als der Tetraederwinkel von 109° . Das zeigt, dass ein Teil der Elektronen sich in einem kugelförmigen Orbital befindet, was die Abstoßung der Elektronenpaare und damit den Spreizwinkel des Tetraeders vermindert.

Die Namen „Sauerstoff“ und „oxygen“ (O, griech. *oxygen*, „Säure-Bildner“) beruhen auf einem Irrtum der ersten Chemiker, die Ende des 18. Jahrhunderts darum kämpften, Mystik und Scharlatanerie der Alchimisten (Goldmachen, Stein der Weisen, künstlicher Mensch Homunculus) mithilfe von Waage, Elementaranalyse und Synthese hinter sich zu lassen. Man hatte noch wenig vermessen und glaubte, dass alles, was sauer schmeckt und Eisenpulver auflöst, Sauerstoff enthält. Das stimmt auch für alle biologischen Säuren außer Salzsäure, HCl. Tatsächlich aber sind es die Protonen, die sauer schmecken und biologische Zellen töten.

Das Sauerstoffmolekül, O_2 , tritt, soweit das Weltall vermessen wurde, in größerer Menge nur auf der Erde auf, wo Pflanzen es in der Photosynthese aus dem Wasser mithilfe von Sonnenlicht freisetzen (Seite 274 ff). Die Sonne wandelt hier das Sauerstoffatom des Wassers (elektronenreich; Yin) in das Sauerstoffatom des Sauerstoffmoleküls (elektronenarm; Yang) um. Wasser wurde damit erst auf der Erde zur Wandlungsphase eins, zum Lebensspender.

Sauerstoffatome aus der Photosynthese haben vier innere Elektronen, die nicht nach außen wirken, und vier Einzelelektronen in vier halbbesetzten Außenorbitalen. Wenn sich zwei Sauerstoffatome verbinden, läge die Bildung einer Doppelbindung aus zwei Elektronenpaaren nahe. Dann blieben insgesamt vier nichtbindende Elektronenpaare übrig. Die Sauerstoffatome aber wählen eine andere, energieärmere Variante: Sie bilden eine Dreifachbindung aus, indem zusätzlich zu der Doppelbindung eine dritte Bindung aus „halbierten“ Elektronenpaaren der Sauerstoffatome erzeugt wird. Dabei bleibt jeweils ein einzelnes Elektron pro Atom übrig. Es entsteht ein Biradikal $^{\bullet}O_2$, ein Molekül mit zwei ungepaarten Elektronen. Diese Elektronen befinden sich in einem energiereichen Molekülorbital, das „antibindend“ wirkt. Der Energiegewinn aus der Bildung der Dreifachbindung wird dadurch zum großen Teil aufgehoben, aber eben nicht völlig. Die O–O-Bindungslänge entspricht der einer Doppelbindung und Luftsauerstoff liegt vollkommen in dieser Biradikal-Form vor.

Ungepaarte Elektronen machen das Molekül magnetisch. Dieser „para“magnetische Grundzustand verbietet es dem Sauerstoff, direkt mit diamagnetischen (nicht magnetischen, keine ungepaarten Elektronen besitzenden) organischen Molekülen zu reagieren. Sauerstoff ist zwar ein starkes Oxidationsmittel (Yang) und biologische Zellen sind starke Reduktionsmittel (Yin), trotzdem sind die reduzierenden Wälder und Felder in der Luft stabil, trotzdem können Tiere die Luft einatmen, ohne dabei Schaden zu nehmen. Das ist ausschließlich im paramagnetischen Grundzustand des Sauerstoffs begründet. Chlorgas hat etwa das gleiche Oxidationspotenzial von etwa 1,3 Volt wie Sauerstoff, ist aber diamagnetisch. Eingeatmet zerstört Chlor die menschliche Lunge in wenigen Minuten.

Paramagnetischer Sauerstoff ist schwach blau, was sich besonders in der Flüssigkeit zeigt (Siedepunkt: $-170^{\circ}C$). Das Sauerstoffmolekül absorbiert rotes Licht und wird dabei in einen angeregten Zustand überführt, der keine Dreifach-, sondern die oben vorausgesagte Doppelbindung enthält. Dieser diamagnetische Sauerstoff ist ein viel aggressiveres Oxidationsmittel als das Biradikal. Das Sauerstoffmolekül ist das einzige natürliche Oxidationsmittel auf der Erd-

oberfläche, und es wirkt wegen seines Biradikalcharakters sehr langsam. Der Paramagnetismus des Sauerstoffmoleküls ist jedenfalls eine unbedingte Voraussetzung für das Überleben der Pflanzen und Tiere in einer oxidierenden Atmosphäre (Abb. 1.8).

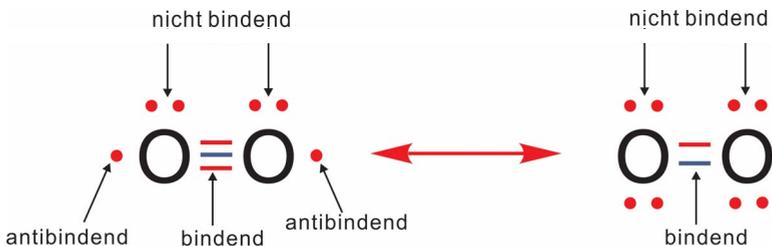


Abb. 1.8 Die beiden Formen des Sauerstoffmoleküls. Links: Der energiearme, magnetische, biradikalische Zustand des Luftsauerstoffs mit sechs bindenden und vier nichtbindenden Elektronen. Damit hat jedes Sauerstoffatom acht Elektronen in seinen vier energiearmen Orbitalen (siehe Abb. 1.19). Die beiden übrig bleibenden Einzelelektronen

finden dort keinen Platz mehr und werden in energiereicheren, antibindenden Orbitalen untergebracht. Rechts: Der angeregte, nicht magnetische Zustand mit vier bindenden (Doppelbindung) und acht nichtbindenden Elektronen. Er entsteht in geringer Ausbeute bei der Einstrahlung von sichtbarem Licht auf den biradikalischen Sauerstoff.

Im Weltall werden Sauerstoffmoleküle kaum beobachtet. Sie reagieren oberhalb von -70°C spontan mit dem allgegenwärtigen Wasserstoff zu Wasser. Das Wasserstoffmolekül H_2 ist das einfachste aller chemisch wirksamen Reduktionsmittel, seine reduzierende Kraft gleicht der von biologischen Organismen. Das elektrochemische Potenzial des Paares $\text{H}_2/2\text{H}^+$ liegt bei null Volt, das der Körperflüssigkeiten des Menschen auch. Das Sauerstoffmolekül ist das einzige Oxidationsmittel des Universums und der Erde. Wasserstoff und Sauerstoff reagieren zu Wasser, wenn sie sich unter geeigneten Bedingungen begegnen.

Für das Sonnenlicht, das die Erde erreicht, ist Wasser der wichtigste Absorber. Etwa 70% der atmosphärischen Absorption beruht auf Wasser. In der Nacht kühlt sich deshalb die nicht bestrahlte Erdhälfte nur langsam ab. Unser Gewächshaus funktioniert deshalb auch bei zeitweiliger Dunkelheit.

Die Wasserbildung im Weltraum lässt sich wegen der Wassermassen in der Atmosphäre nicht direkt beobachten und messen. Satellitengebundene Infrarot-Spektrometer (ISO) aber machen das möglich. Besonders intensive Banden der H_2O - und HDO -Absorptionsbanden finden sich bei Frequenzen von 1595 und 3756 Schwingungen pro Zentimeter (cm^{-1}) bzw. 1403 und 3707 cm^{-1} . Zeitabhängige und quantitative Daten vom relativ nahen Orionnebel belegen, dass dort täglich Wolken aus Eiskristallen neu entstehen, deren Masse 10^{11} km^3 flüssigen Wassers entspricht. Das ist 60-mal mehr Wasser als auf der Erde seit sechs Milliarden Jahren festgehalten wird. Alles Wasser der Erde wird also heute jeden Tag 60-mal in einem einzigen Weltraumnebel geschaffen!

Das Wasser der Erde, ihr leichtestes Molekül, stammt als einziges der sieben nicht aus der biologischen Evolution auf der erkalteten, doch von der Sonne beschienenen Erdoberfläche, sondern war von vorneherein ein integraler Bestandteil des Chemielabors Erde. Dort wurde es vor sechs Milliarden Jahren in die Silicat-, Eisen- und Nickeloxidgitter des Weltraumstaubs eingebaut, aus dem sich der Planet Erde bildete (vorwiegend war das wohl Tonerde), oder es bildete Eismäntel auf den Meteoriten. „Ton“ ist ein Wort germanischen Ursprungs und bedeutet „dicht“. Eine Tonne trockenen Tons sammelt 150 kg Wasser in den Zwischenräumen der Silicatschichten und gibt es unter Hitze- und Druckeinwirkung wieder ab (Abb. 1.9).

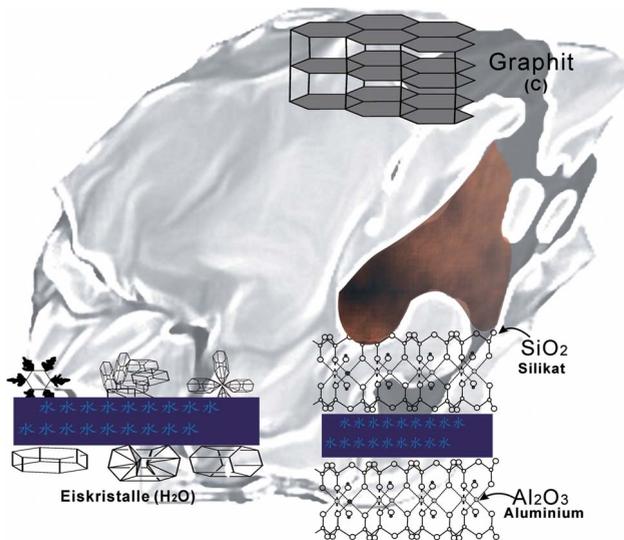


Abb. 1.9 Meteoriten enthalten oft viel Kohlenstoff und Wasser in Form von Graphit bzw. Eiskristallen. Diese Rohstoffe wurden auf der Erde zur Ausgangsbasis der biologischen Evolution; die anorganischen Oxide dominieren die irdische Geologie.

Vor knapp fünf Milliarden Jahren schmolz der Planet Erde dann unter dem Druck der in ihm wirkenden Gravitationskräfte zu einer glühenden Kugel aus viel Eisen- und Nickeloxid (Seite 266) im Kern und Aluminiumsilicaten in der Schale zusammen. Das Wasser wurde entweder chemisch an die Oxide der Erde gebunden oder in Wolken aus Wassertropfen und Eiskristallen gespeichert, die infolge der Schwerkraft der Erde nicht im Weltall „verschwanden“. Das „heute“ entstehende Orionwasser ist „frisches Wasser“ im Vergleich zum Erdwasser: Die Wasser erzeugenden Orionnebel sind nur wenige Lichtjahre von uns entfernt, die Eisnebel sind bestenfalls ein paar Millionen Jahre alt und wachsen noch heute. „Alles fließt“ in der Erdgeschichte – dank Wasser.

Es ist vor allem das Wasser, das Erdklima, biologische Evolution und Menschheitsgeschichte zueinander geführt hat. Die biologische Evolution der anderen sechs Moleküle konnte vor drei bis vier Milliarden Jahren beginnen, als die Erdoberfläche genügend abgekühlt war, um flüssiges Wasser aufnehmen zu können.

1.2 Cluster

Wir kommen zum Molekülbegriff, zum Einzelteilchen des Wassers, H_2O . „Molecula“ ist der letzte lateinische Diminutiv von Masse. Für die alten Römer war das eine verniedlichende Form, „klein“ im Sinne von „äußerst unwichtig“. Chemiker sehen das seit 200 Jahren anders: Das Wort Moooooleeküüüü beherrscht ihr Denken und ihr Berufsleben, es bedeutet für sie etwa: „Zur Sache, Schätzchen!“ oder „Na, Kleines, wir werden das Ding schon schaukeln.“ Jedes Problem, das auf die Dimension der Moleküle reduziert werden kann, ist für den Chemiker anschaulich und lösbar: Er isoliert und reinigt chemische Verbindungen, die aus einer einzigen Molekülsorte bestehen, erarbeitet eine individuelle Strukturformel für das Molekül, was einer absolut genauen, unumstößlichen Vermessung seiner Architektur entspricht, und charakterisiert seine Eigenschaften. Danach wandelt er es in beliebig viele Abkömmlinge („Derivate“) um und verkauft die Nützlichsten als Arzneimittel, Farben, Waschmittel, Parfums, Werkstoffe oder was immer gerade gebraucht wird. Reinigen und Verkaufen – alles kein Problem, solange sich der Chemiker dabei auf eine Molekülsorte zur Zeit beschränken darf. Dann nimmt er sich das nächste und das nächste Molekül vor und wählt wiederum die Nützlichsten für immer neue Zwecke aus. Heute kennt man zwischen 10^7 und 10^8 verschiedene Moleküle, genau weiß das niemand.

Es ist gut, um die unsichtbare Kleinheit und gigantische Zahl der Moleküle zu wissen, was allerdings nicht bedeuten kann, dass man sie sich „vorstellen“ kann. Zahl und Kleinheit sind jenseits der menschlichen Erfahrung.

99 von 100 Molekülen des Menschen sind Wassermoleküle. Wie kommt man darauf? Bei einem Gewicht von z. B. 75 kg enthält ein Mensch etwa 50 kg Wasser, was sich aus einer einfachen Bilanz der Volumen des Bluts, des Zellwassers und des Zwischenzell- (interstitiellen) Wassers sowie aus der Analyse der Zusammensetzung von Muskeln und Nerven ergibt. Die restlichen 25 kg, das heißt etwa 35 Gewichtsprozent, sind die Proteine der Muskeln, die Lipide der Nerven, Zellmembranen und Fettgewebe sowie das Calciumphosphat der Knochen. Die durchschnittliche relative Masse der leichtesten dieser Komponenten (Fette, Calciumphosphat) bezogen auf das Wasserstoffatom liegt bei 350, das der Proteine über 1000, das des Wassers bei 18. So kann man grob ansetzen, dass alle anderen Moleküle unseres Körpers im Durchschnitt wenigstens 30-mal schwerer als ein Wassermolekül sind. 1/30 von 35% ist etwa ein Gewichtsprozent. Wenn wir unsere Moleküle zählen, ist nur ein Molekül von hundert etwas anderes als Wasser.

Jedes Mol einer Molekülsorte umfasst 6×10^{23} einzelne Moleküle. 1 mol Wasser, das sind 18 g oder 18 mL, enthält also 6×10^{23} identische Moleküle H_2O . 50 kg oder 50 L Wasser sind dann $6 \times 10^{23} \times 55,5 \times 50 = 1,6 \times 10^{27}$ Moleküle Wasser (der Faktor 55 kommt durch die Umrechnung von 18 mL für ein Mol auf 1000 ml für Mol pro Liter zustande). Die Gesamtzahl aller anderen Moleküle eines durchschnittlich schweren Mannes liegt dann etwa bei 1×10^{26} bis 2×10^{26} Molekülen. Die Zahl der Wassermoleküle in einem erwachsenen Menschen lag zu allen Zeiten in der Größenordnung von 10^{27} ; das durchschnittliche Körpergewicht schwankte immer nur zwischen (ungefähr) 40 und 120 kg. Ein Fettwanst mit 10^{28} Wassermolekülen (600 kg) wurde bisher ebenso wenig beobachtet wie ein Klapperdürer mit nur 10^{26} Molekülen (6 kg). Die Anzahl der Wassermoleküle ist also bei allen Menschen ziemlich gleich, und zwar ungefähr $1,6 \times 10^{27}$; einen qualitativen Unterschied („bessere“ oder „schlechtere“ Wassermoleküle) gibt es schon gar nicht. Für die anderen sechs Moleküle, die in diesem Buch beschrieben werden, gilt das genauso. Lecithin und ATP von Cleopatra, Einstein oder Dschingis Khan unterscheiden sich nicht im Geringsten von Ihrem, freundlicher Leser. Leicht zu analysierende, aber unendlich schwer zu deutende Unterschiede gibt es lediglich zwischen den Anordnungen der Untereinheiten der DNS (Vererbung und Evolution) und, vor allem, zwischen den mehr oder weniger originellen Wasserwegen, die die Synapsen der Nerven des Gehirns (Lernen und Schöpfen) mit den Muskeln (Bewegung und Leben) verbinden.

Beginnen wir also unser Studium der molekularen Welt mit der Zahl der Wassermoleküle in jedem von uns. Was bedeutet 10^{27} ? Zunächst ist das nichts weiter als eine Eins mit 27 Nullen dahinter.

*Die große Zahl lässt sich nicht fühlen.
Das Hirn allein kann damit spielen.*

Ein erster Versuch der Veranschaulichung mit der kapitalistischen Methode des Geldzählens scheitert kläglich. Gäbe es 10^{27} Cent auf der Welt und würde man sie auf die maximal 100 Milliarden (10^{11}) Menschen aller Zeiten gleichmäßig verteilen, so hätte jeder Mensch ein Vermögen von 10^{16} Cent oder 10^{14} Euro zur Verfügung. Das sind hunderttausend Milliarden Euro. So viel Geld (pro Mensch) ergibt keinen Sinn. Der Cent ist offensichtlich ein zu großes Modell für ein Molekül. Nehmen wir stattdessen das gedruckte chinesische Symbol für das Wasser, das Zeichen 水 („schui“) und versuchen, dieses Symbol 10^{27} -mal aufzuschreiben. Der erste Übergang von $10^0 = 1$ zu $10^1 = 10$ Molekülen bedeutet die Addition von 9 Molekülen. Der nächste „Sprung“ von 10^1 auf $10^2 = 100$ Moleküle bedeutet schon 90 水, der Sprung von 10^2 auf 10^3 braucht 900 水, zu 10^4 水 gelangt man nur mit 9000 zusätzlichen 水. Zehntausend oder 10^4 ist bereits der letzte Schritt des I-ming-Systems der Chinesen. Sie lehnten es ab, weiter zu zählen, es dauerte zu lange bis hunderttausend zu zählen, es machte keinen Sinn. Für den wissenden Chinesen begann jenseits von Zehntausend das Unendliche. Wir sind aber noch unendlich weit entfernt von 10^{27} . 10^4 ist nichts dagegen.

Die Anzahl der Moleküle in einer geringen Masse ist so groß, dass sie in Exponentialzahlen aufgeschrieben werden muss und unvorstellbar bleibt. Man

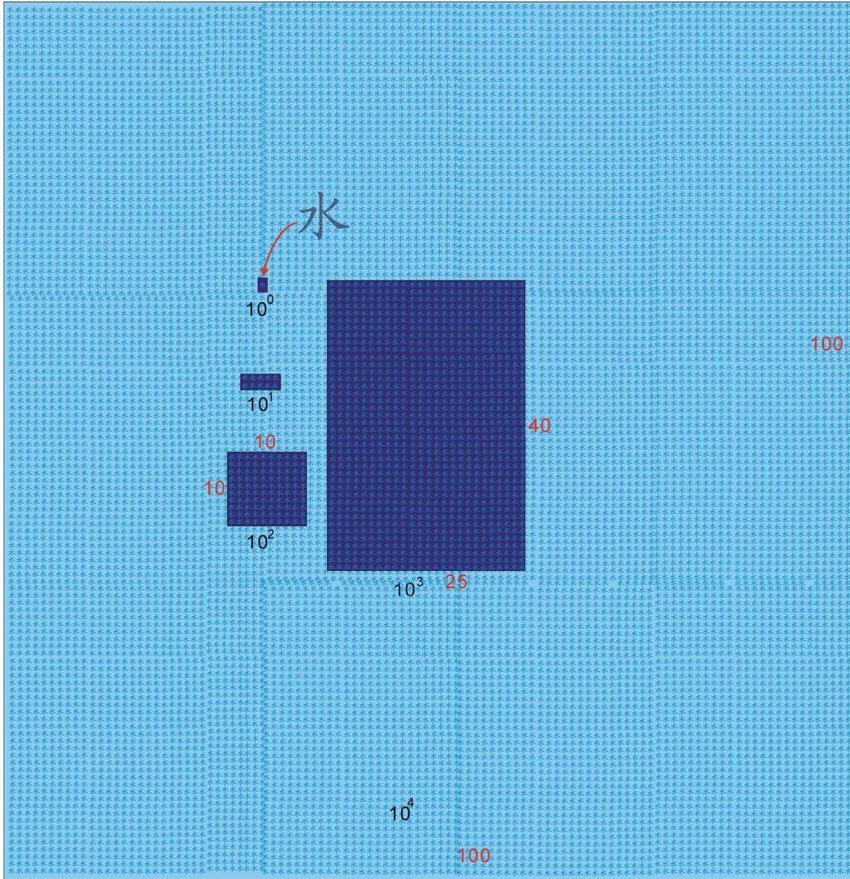


Abb. 1.10 Im Bild ist die Zahl 10 000 veranschaulicht – für die Philosophen Chinas der Sprung ins Unendliche. Bis 10 000 konnte man unter normalen Lebensumständen noch zählen, bis 100 000 nicht mehr, das dauerte auch für das gelassene Gemüt zu lange.

muss hier verinnerlichen, dass jeder letzte Sprung um eine einzige Zahl im Exponenten, also zum Beispiel von 10^{22} auf 10^{23} Moleküle, zehnmal mehr Moleküle bedeutet. Der letzte Sprung bringt immer die entscheidenden 90%. Der letzte Sprung von 10^{26} auf 10^{27} Moleküle entspricht schließlich 900 000 000 000 000 000 000 000 schui-Zeichen 水. Dafür bräuchte man ein Buch, dessen Papieroberfläche 60 Millionen Erdoberflächen entspräche und das größer und schwerer wäre als die Erde selbst (Abb. 1.10).

Auch das kleine schui-Zeichen für Wasser ist also viel zu groß, um die Zahl 10^{27} auf Erden zu veranschaulichen. 18 mL Wasser aber, die gerade so viele Moleküle enthalten, kann sich jeder problemlos vorstellen.

Ebenso wie die große Zahl der Moleküle sind deren winzige Maße leicht zu berechnen, aber nicht zu begreifen. Ein Mol Wasser füllt einen Raum von