

Jürgen-Hinrich Fuhrhop
und Tianyu Wang

WILEY-VCH

Sieben Moleküle

Die chemischen Elemente und das Leben



Inhaltsverzeichnis

Vorwort

Einleitung: SCHÖPFeN und Waglule Tyatohre

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

1 Wasser: Alles fließt oder die Wandlungsphase eins

Überblick

1.1 SCHÖPFeN: Protonen, Wasserstoff, Sauerstoff und Elektronen

1.2 Cluster

1.3 Auf der Erde und über der Erde

1.4 Rohrsysteme und Pumpen

1.5 Bewegliche elektrische Ladungen (Ionen)

Fragen zum Wasser

2 Glucose: Fünfzehn Milliarden Tonnen nachwachsender Rohstoff im Jahr

Überblick

2.1 Glucose: Struktur, Eigenschaften, Reaktivität

2.2 Cellulose

2.3 Stärke

2.4 Zucker

Fragen zur Glucose

3 Lecithin: Fünf Nanometer Fettmembran

Überblick

3.1 Fettsäuren

3.2 Fette

3.3 Lecithinmembranen und Magenschleimhaut

3.4 Cholesterin als flüssigkristalline Einheit

Fragen zu Lecithin und Steroiden

Teil 2 Molekulare Module für chemische Wechselwirkungen, Nerven, Muskeln, Atmung und das Sehen

4 Tyrosin: In Proteinen zwischen Proteinen

Überblick

4.1 α ,L-Aminosäuren und Phenol als Modul der Proteine

4.2 Polyphenole

4.3 Tyrosin in Proteinen

4.4 Tyrosinphosphat

Fragen zu Tyrosin

5 ATP: Phosphatchemie des Denkens und Fühlens, der Bewegung und der Zellteilung

Überblick

5.1 Aminopurin-Motive

[5.2 Die Pseudorotation der \(Desoxy-\)ribose](#)

[5.3 DNS \(Desoxyribonucleinsäure\).](#)

[5.4 Phosphorsäureanhydride und cyclische Ester](#)

[Fragen zu ATP](#)

[6 Oxyhäm: Sauerstoff transportieren und aktivieren](#)

[Überblick](#)

[6.1 Sauerstoff, Sulfid und Eisen](#)

[6.2 Pyrrol, Pyridin und ihre \$\pi\$ -Elektronen](#)

[6.3 Chlorophyll und Protoporphyrin](#)

[6.4 Oxyhäm](#)

[Fragen zu Oxyhäm](#)

[7 Retinal: ... und sah, dass es gut war](#)

[Überblick](#)

[Fragen zu Retinal](#)

[Epilog: Mit unseren sieben Molekülen erreichen wir viel](#)

[Anhang: Stichworte zur Lösung der Aufgaben](#)

[Kapitel 1](#)

[Kapitel 2](#)

[Kapitel 3](#)

[Kapitel 4](#)

[Kapitel 5](#)

[Kapitel 6](#)

Kapitel 7

Register

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 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.

Print ISBN 9783527320998

Epdf ISBN 978-3-527-62694-6

Epub ISBN 978-3-527-65994-4

Mobi ISBN 978-3-527-65993-7

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 „Familienname“ *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 Erbmateriels 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 außerdem 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 Eilecithin 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 Hafenarbeiter 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 Atomschale, 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. *protos*, „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

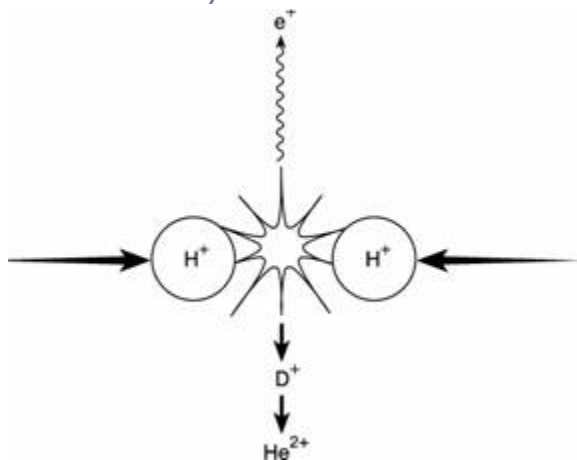
positiven Ladungen so groß, dass das Proton zerfällt: Ein positiv geladenes Positron mit viel Energie und kaum Masse wird abgestrahlt, zurück bleibt ein elektroneutrales, stabileres Neutron (n). Positronen sind 2000-mal leichter als Protonen; Positronenstrahlung ist energiereich mit einer Wellenlänge 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 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 51f und 102f).

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 hochgestellte 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.

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.)



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 $^{15}\text{Phosphor}$, $^{11}\text{Natrium}$, $^{19}\text{Kalium}$ und $^{20}\text{Calcium}$, 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, $\text{pn} = {}^2\text{H}^+$, ist bei der Kernfusion einigermaßen aktiv und sorgt für schwere Elemente mit gerader Massenzahl.²⁶ 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 Energie, 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}Mg und ^{26}Fe . Magnesium wurde in der Evolution zum Metall des

Chlorophylls, das in Photosynthese Sauerstoffmoleküle, O₂, 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 bildhaftsuggestive 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 Raumausfüllung 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 Atomkerne 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 entweder 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 $+\frac{1}{2}$ oder $-\frac{1}{2}$. (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 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](#)).

Abb. 1.2 Relative Häufigkeit der Elemente der Sonne bis zum Zink. Sie wurde aus dem Emissionsspektrum dieses Sterns abgeleitet. Wasserstoff ist zehnmal 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).

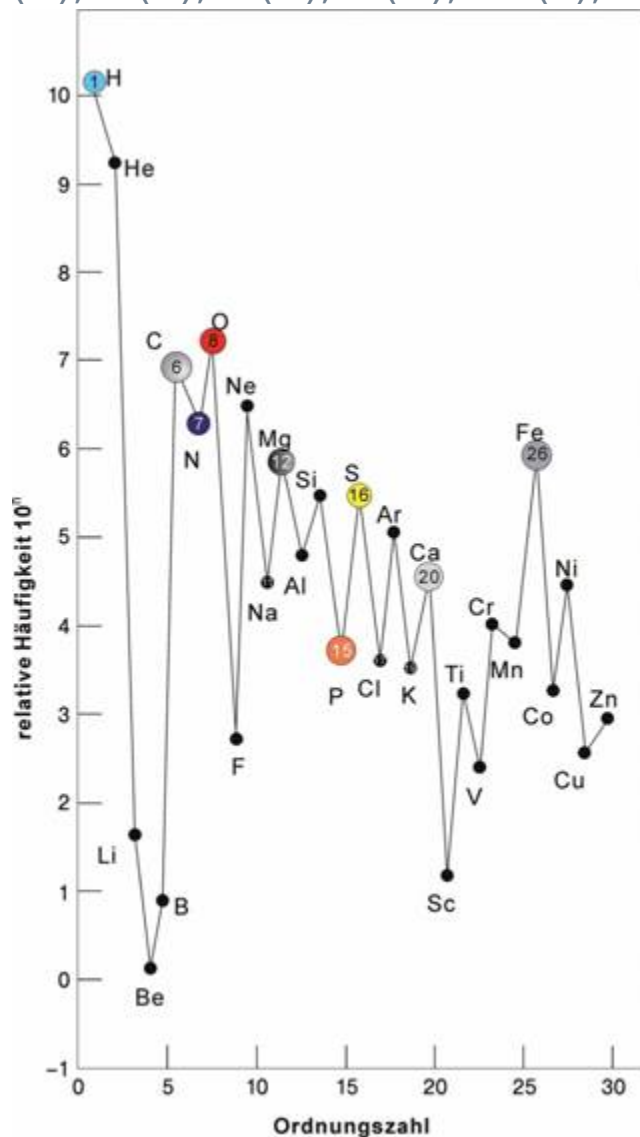
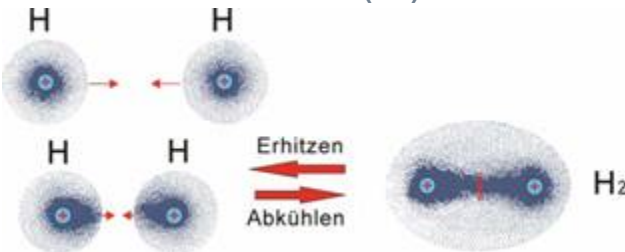


Abb. 1.3 Das Yin-Yang-Modell. Yin ist schwarz und unten, Yang ist weiß und oben. Die Grenze zwischen beiden hat den Charakter einer Welle. Das Weiße hat ein schwarzes Zentrum, das Schwarze ein weißes Zentrum. Alle Dinge sind durch Naturkräfte miteinander verwoben, alle Dinge wandeln sich.



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).



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 $p = \text{H}^+$ mit der relativen Atommasse 1 und Deuteronen, $p_n = \text{D}^+$, 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

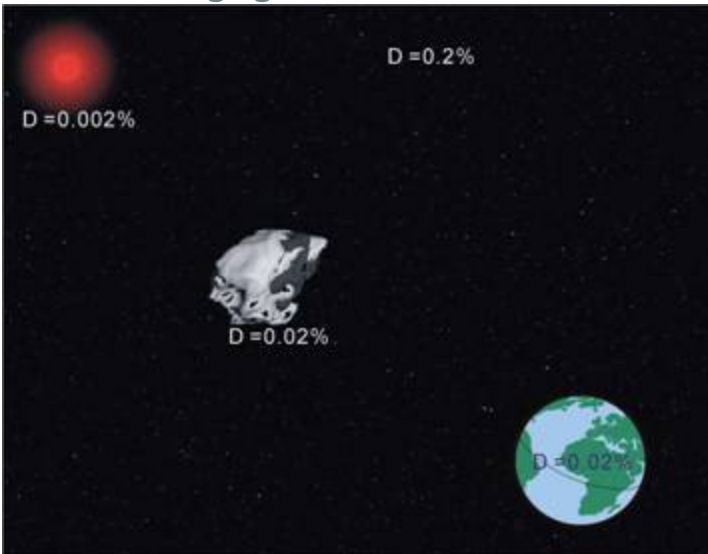
Promillebereich überall. D_2O mit der relativen Molekülmasse 20 gibt es im Weltraum nicht in messbarer Menge. D_2O lässt sich auf der Erde durch einfache, langsame Elektrolyse (Seite 54) von Leitungswasser anreichern. 20 L Wasser geben dann 12 mL 99,9%iges D_2O , das in hoher Konzentration ($>50\%$) 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 Weltraumwasser 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 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](#)).

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



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 Zwischenstufen 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