

Die einzigartigen Substanzen Kohlenstoff und Wasser

P. Ulmschneider, Vom Urknall zum modernen Menschen, DOI 10.1007/978-3-642-29926-1_4,
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

Ohne die außergewöhnlichen Eigenschaften des Elements Kohlenstoff und des Lösungsmittels Wasser gäbe es kein Leben. Kohlenstoff bildet die Grundlage der *Organischen Chemie*, deren vielfältige Verbindungen die Bausteine des Lebens umfassen. Leben ohne Wasser ist so wenig vorstellbar, dass die Suche nach Leben fast gleichbedeutend mit der Suche nach *flüssigem Wasser* ist. Warum nehmen diese Substanzen solch eine überragende Sonderstellung ein?

4.1 Die chemischen Elemente

In unserem Universum besteht die Materie – bis zu den entferntesten Galaxien und Quasaren – überall aus denselben chemischen Elementen wie auf der Erde. Geht man davon aus, dass Leben auf Materie basiert und auch anderswo im Weltall auftritt, dürfte es überall aus denselben *chemischen Elementen* aufgebaut sein, d. h. aus Substanzen, die aus einer bestimmten Atomsorte bestehen. Atome unterscheiden sich in der Anzahl (*Ordnungszahl*) der im Atomkern vorhandenen positiv geladenen Protonen. Diese entspricht wegen der Ladungsneutralität auch der Zahl der negativ geladenen Elektronen in der Elektronenhülle (als Beispiel eines Helium Atoms s. Abb. 1.17). Darüber hinaus treten Atome als verschiedene *Isotope* auf, da in den Atomkernen noch eine wechselnde Zahl ungeladener Neutronen vorkommt.

Aufgereiht nach der Ordnungszahl zeigt Abb. 4.1 das Periodensystem der derzeit bekannten 118 chemischen Elemente. Diese Anordnung geht auf das Bohr'sche Schalenmodell der Elektronenhülle zurück, bei dem die innerste K-Schale maximal 2, die L-Schale maximal 8 etc. Elektronen besitzen kann. Von den aufgeführten Elementen kommen 94 natürlich vor, während die anderen künstlich erzeugt wurden. Letztere sind instabil und zerfallen wieder nach kurzer Zeit. Unter irdischen Temperatur- und Druckbedingungen treten die meisten Elemente als feste Substanzen auf, zwei sind flüssig, der Rest gasförmig.

4.2 Für das Leben wichtige Elemente

Die wichtigsten in biologischen Organismen vorkommenden Elemente zeigt Abb. 4.2. Erkennbar ist, dass nur eine geringe Zahl der meist leichteren chemischen Elemente genutzt wird. Für das Leben unerlässlich sind Kohlenstoff (C), Stickstoff (N), Sauerstoff (O), Wasserstoff (H), Schwefel (S) und Phosphor (P), die in Lipiden, Proteinen und Nukleinsäuren sowie im Wasser auftreten. Die Elemente Kalium (K), Natrium (Na) und Chlor (Cl) werden beim Ionentransport und Stoffwechsel eingesetzt, Calcium (Ca) und Magnesium (Mg) für den Knochenbau verwendet. Eine weitere wichtige Gruppe von Elementen stellen die essenziellen Spurenelemente dar, zu denen z. B. Eisen (Fe) gehört, das im Hämoglobin zum Sauerstofftransport beiträgt.

		Gruppe																	
Periode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	Schale
1	H 1																	He 2	K
2	Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10	L
3	Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18	M
4	K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36	N
5	Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54	O
6	Cs 55	Ba 56		Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86	P
7	Fr 87	Ra 88		Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Ds 110	Rg 111	Cn 112	Uut 113	Uuq 114	Uup 115	Uuh 116	Uus 117	Uuo 118	Q
Lanthanoide			La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71		
Actinoide			Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103		
fest gasförmig flüssig künstliches Element																			

■ Abb. 4.1 Periodensystem der chemischen Elemente

■ Abb. 4.2 Für das Leben wesentliche Elemente und essenzielle Spurenelemente

H																	He						
Li	Be																	B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg																	Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr						
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe						
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn						
Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Uup	Uuq	Uuh	Uus	Uuo						
			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu						
			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr						

wesentliche Elemente

essenzielle Spurenelemente

Wie bereits erwähnt (Abschn. 2.8), sind Kohlenstoff und Wasser, verglichen mit den Metallen und Silicaten leichtflüchtige Substanzen. Sie sind erst spät als sogenanntes „late veneer“ durch Planetesimale mit exzentrischen Bahnen bei der Auflösung der Planetesimalscheibe auf die Erde gekommen (Kleine 2011; Albarede et al. 2013).

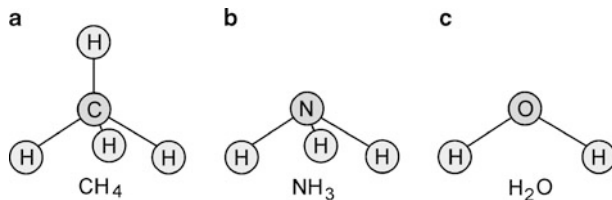
4.3 Die Einzigartigkeit des Elements Kohlenstoff, organische Verbindungen

Unter den chemischen Elementen fällt Kohlenstoff (C) wegen seiner ungewöhnlich großen Zahl von Verbindungen auf. Derzeit sind mehr als 20 Mio. C-Verbindungen – sogenannte *organische Verbindungen* – bekannt, gegenüber nur rund 200.000 *anorganischen Verbindungen* ohne Kohlenstoff. Was ist der Grund für die besonderen Eigenschaften des C-Atoms?

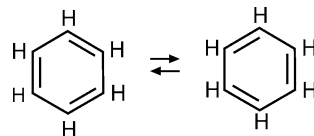
Abbildung 4.3 zeigt drei in der Biologie häufig auftretende Moleküle: Methan (CH₄), Ammoniak (NH₃) und Wasser (H₂O). Diese Stoffe gehen *Atombindungen* ein, wobei die beteiligten

4.3 · Die Einzigartigkeit des Elements Kohlenstoff, organische Verbindungen

■ **Abb. 4.3** Gerichtete Atombindungen bei Methan (a), Ammoniak (b), Wasser (c)



■ **Abb. 4.4** Aromatischer Ring bei Benzol. An den Ecken des Hexagons sind jeweils C-Atome zu denken



Atome C, N, O und H je ein Elektron aus der Atomhülle mit dem Nachbaratom teilen. Diese Bindungen (in Abb. 4.3 durch Striche angedeutet) dehnen sich in feste räumliche Richtungen aus, wobei die langen Striche in der Zeichenebene liegen und die kurzen nach hinten zu denken sind. Damit kann das C-Atom räumliche Strukturen bilden, das N-Atom jedoch nur ebene und das O-Atom sogar nur (etwas abgewinkelte) lineare Gebilde. Der Grund für die große Zahl der organischen Verbindungen beruht also vor allem darauf, dass sich im Raum wesentlich vielfältigere Strukturen aufbauen lassen als in einer Ebene oder entlang eines Fadens.

Die Einmaligkeit des Kohlenstoffatoms besteht darin, dass es typischerweise die stärksten Bindungen aufweist und sogenannte aromatische Ringe bildet. Der in Abb. 4.4 bei Benzol angedeutete Wechsel der Doppelbindungen benachbarter C-Atome findet in Wirklichkeit nicht statt. Es besteht vielmehr eine neuartige, sehr stabile Anordnung, bei der alle C-Bindungen gleichwertig sind. Zusätzlich vertragen sich C-Verbindungen meist gut mit dem häufigsten in der Natur vorkommenden Lösungsmittel, dem Wasser.

Während anorganische Verbindungen meist die Eigenschaften einfacher Festkörper, Flüssigkeiten und Gase besitzen, kommt bei den organischen Verbindungen eine Vielfalt von harten bis weichen, gewebeartigen, wachsartigen und ölartigen Konsistenzen vor. Beispiele sind: Fette, Öle, Proteine, Kohlehydrate, Nukleinsäuren, Alkohole, Enzyme, Vitamine, Hormone etc. Dass keinerlei prinzipiellen Unterschiede zwischen den organischen und anorganischen Substanzen bestehen – wie ursprünglich von der „Lebenskraft-Theorie“ angenommen – bewies 1828 der deutsche Chemiker Friedrich Wöhler. Es gelang ihm die organische Verbindung Harnstoff ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) aus den anorganischen Ausgangsstoffen CO_2 und NH_3 herzustellen.

Zur Illustration der fast unbegrenzten Vielfalt organischer Verbindungen sind in Abb. 4.5 fünf in unserem täglichen Leben auftretende Substanzen dargestellt: das beim Grillen entstehende krebserregende Benzo(a)pyren ($\text{C}_{20}\text{H}_{12}$), das Schmerzmittel Aspirin ($\text{C}_9\text{H}_8\text{O}_4$), die in fast allen pflanzlichen und tierischen Ölen und Fetten enthaltene Ölsäure ($\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$), die Aminosäure Tryptophan ($\text{C}_{11}\text{H}_{12}\text{N}_2\text{O}_2$) und das Adenosinmonophosphat (AMP, $\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_5\text{O}_7\text{P}$).

Bei Tryptophan handelt es sich um eine der 22 Aminosäuren, die als Bausteine der Proteine dienen. Adenosinmonophosphat bildet zusammen mit drei anderen Nukleotiden einen Grundbaustein der Ribonukleinsäure (RNA) und der Desoxyribonukleinsäure (DNA) – den „Gedächtnismolekülen“ des Lebens – (s. Kap. 5). Zudem stellen AMP und das mit zwei zusätzlichen Phosphatgruppen angereicherte Adenosintriphosphat (ATP) die Basis für die Energieversorgung der Zellen dar.