

8.7 Exkurs: Wasser, Alkohole, Nukleinsäuren und Proteine – vier Beispiele für die Bedeutung der Wasserstoffbrücken

Wasserstoffbrücken haben eine grosse Bedeutung. Sie sind die Ursache für eine Reihe «abnormer» Eigenschaften, die bei zahlreichen Verbindungen beobachtet werden: z. B. auffallend hohe Schmelz- und Siedetemperaturen mancher Wasserstoff-Verbindungen (HF, H₂O, NH₃, Alkohole, Carbonsäuren usw.), ausgeprägte Mischbarkeit niederer Alkohole und Carbonsäuren mit Wasser (Abschnitt 8.5), geringere Dichte von Eis als von flüssigem Wasser usw. Auch die Struktur vieler Festkörper, die Festigkeit fasriger Stoffe wie Cellulose oder Nylon sowie die Reaktionsfähigkeit bestimmter Verbindungen, wie z. B. Biokatalysatoren (Enzyme; Abschnitt 21.3), werden durch Wasserstoffbrücken verursacht. Eine besonders bedeutsame Rolle spielen sie schliesslich beim Aufbau der Proteine (Eiweisse; Abschnitt 21.3) und der als Träger der Erbeigenschaften wichtigen Nukleinsäuren (Exkurs 21.6).

Die Anomalie des Wassers

Wasser hat für den Stoffhaushalt von Lebewesen eine grosse Bedeutung. Ohne Wasser kein Leben auf der Erde! Diese herausragende Stellung ist die Folge mehrerer einzigartiger Eigenschaften, die letztlich alle auf die Struktur des Wasser-Moleküls und seine Fähigkeit, starke Wasserstoffbrücken zu bilden, zurückzuführen sind. Wäre das Wasser-Molekül nicht gewinkelt, hätte Wasser eine Siedetemperatur von etwa -100°C .

Im Eis ist jedes Sauerstoff-Atom tetraedrisch von vier Wasserstoff-Atomen umgeben, von denen zwei durch Elektronenpaarbindungen und zwei durch Wasserstoffbrücken gebunden werden¹ (Abb. 8.13 und 8.14). Dies ergibt eine sehr voluminöse, lockere Kristallstruktur, deren Dichte kleiner ist als die von Wasser bei 4°C . Beim Schmelzen bricht die Gitterordnung zusammen, und die Moleküle können in die Zwischenräume der Eisstruktur gelangen, sodass Wasser bei 0°C eine höhere Dichte hat als Eis. Bei weiterem Erwärmen nimmt einerseits der Raumbedarf durch die stärkere Wärmebewegung der Teilchen zu, andererseits wird die durch Wasserstoffbrücken verursachte lockere Struktur immer mehr gestört. Dadurch lagern sich die Moleküle enger zusammen. Der zweite Effekt dominiert bis $t = 4^{\circ}\text{C}$, sodass Wasser bei dieser Temperatur seine grösste Dichte aufweist. Dieses Dichtemaximum verhindert im Winter ein Durchfrieren auch von flachen Gewässern. Das Wasser unter 4°C ist leichter und gefriert an der Oberfläche eines Gewässers, wobei das gebildete Eis ein weiteres Durchfrieren nach unten verhindert. In der Tiefe hingegen sammelt sich das dichte Wasser bei 4°C . Mit steigender Temperatur über 4°C nimmt die Wärmebewegung der Wasser-Moleküle weiter zu und damit die Dichte ab.

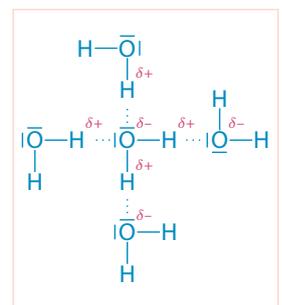


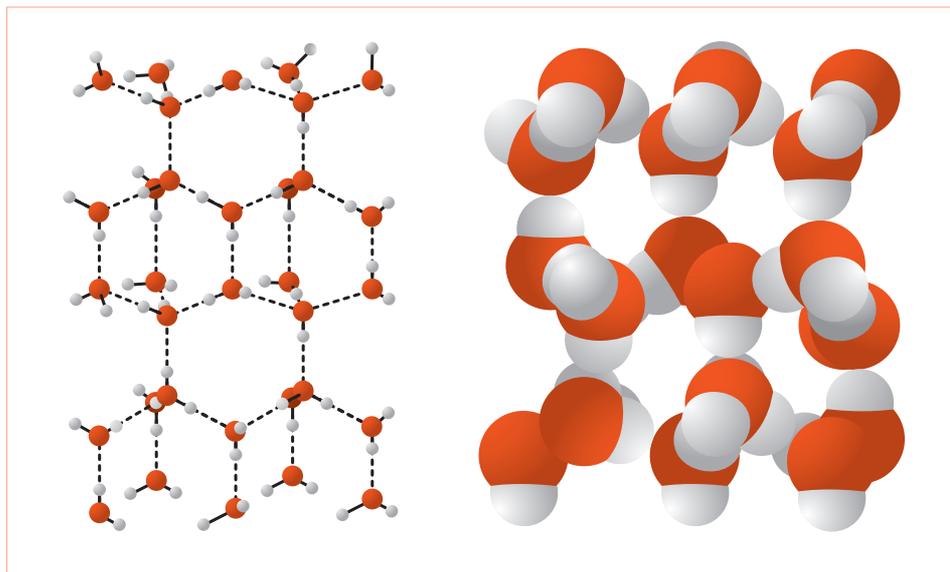
Abb. 8.13

Schematische Darstellung der Eisstruktur. Vier Wasser-Moleküle sind durch vier H-Brücken an jeweils ein H₂O-Molekül gebunden (Tetraederstruktur).

¹ Die Anordnung entspricht nicht einem regelmässigen Tetraeder, da die Bindungslänge O-H beträchtlich kürzer ist als der O-H-Abstand in den Wasserstoffbrücken.

Abb. 8.14

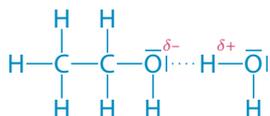
Struktur von Eis. Links Kugel-Stab-Modell (H-Brücken als schwarz gestrichelte Linien); rechts Kalottenmodell



Alkoholische Getränke

Trinkalkohol (Ethanol², C₂H₅OH) ist in jedem Verhältnis mit Wasser mischbar, da er nicht nur zwischen den eigenen, sondern auch mit Wasser-Molekülen Wasserstoffbrücken ausbilden kann (über die Mischbarkeit molekularer Stoffe vgl. Abschnitt 8.5).

Wasserstoffbrücke zwischen einem Ethanol- und einem Wasser-Molekül:



Nukleinsäuren

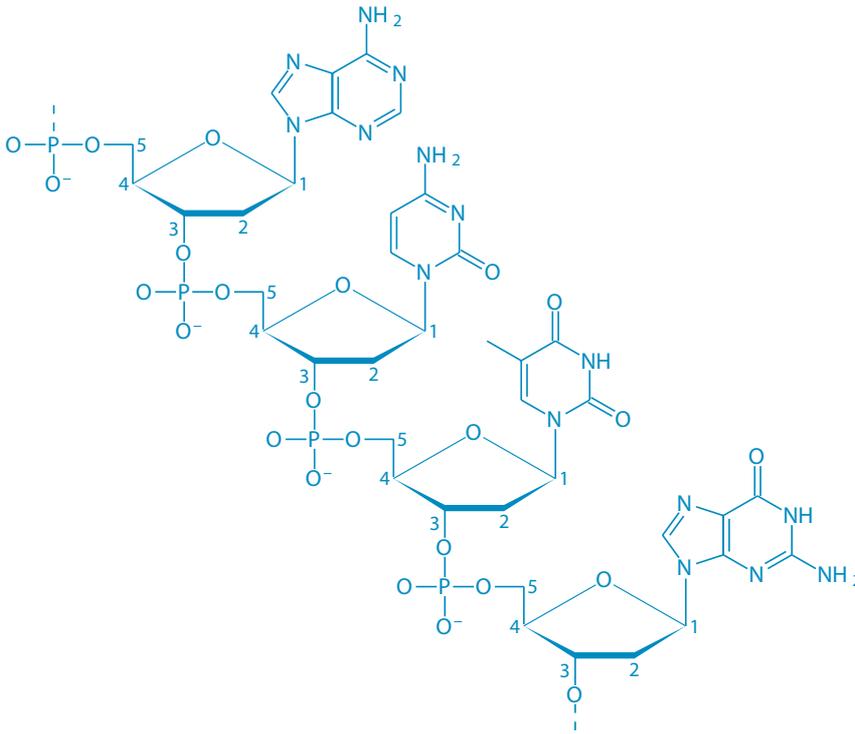
Die im Zellkern enthaltenen Desoxyribonukleinsäuren (DNA³), kurz Nukleinsäuren genannt, tragen die genetische Information eines Lebewesens (Informationen für die Synthese von Proteinen). Sie bestehen aus langen, monoton aufgebauten Ketten (–PO₃[–]–C₅H₇O₂–PO₃[–]–C₅H₇O₂–), wobei an jede C₅H₇O₂-Einheit eine der vier Nucleobasen Adenin A, Thymin T, Cytosin C oder Guanin G gebunden ist.

Die folgenden Abbildungen enthalten zur vereinfachten Schreibweise von Kohlenstoffverbindungen Skelettformeln, bei denen die C-Atome und an diese gebundene H-Atome nicht mehr geschrieben werden (vgl. Abschnitt 8.6).

Die DNA liegt im Zellkern als Doppelstrang vor. Dabei lagern sich jeweils zwei Desoxyribonukleinsäure-Moleküle zusammen und bilden eine Doppelhelix. Die Verbindung der beiden fadenförmigen DNA-Moleküle erfolgt über Wasserstoffbrücken zwischen den Basen. Eine solche Doppelhelix gleicht damit einer Wendeltreppe: Die Basen, verbunden durch H-Brücken, bilden die Treppenstufen.

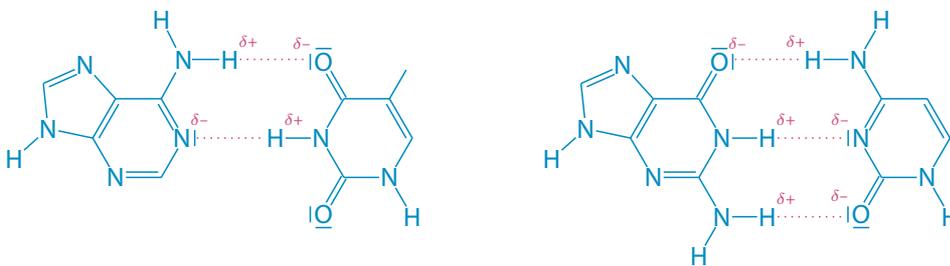
2 Die Hydroxyl-Gruppe –OH ist für die Alkohole kennzeichnend. Deshalb wird sie in den Summenformeln gesondert geschrieben. Also nicht C₂H₆O, sondern C₂H₅OH.

3 A von engl. *acid* = Säure.

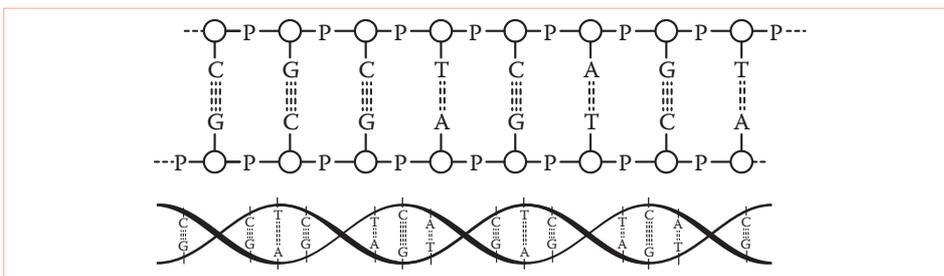

Abb. 8.15

Skelettförmel einer Desoxyribonukleinsäure mit den Basen (von oben nach unten) A, C, T und G; für eine bessere Übersicht wurden die an den C-Atomen gebundenen H-Atome weggelassen (zur Erinnerung: Die C-Atome bilden vier Bindungen aus).

Da die Basenmoleküle unterschiedlich lang sind und beide Makromoleküle genau parallel verlaufen, können H-Brücken ausschliesslich zwischen den komplementären Basen Adenin und Thymin (zwei H-Brücken) sowie zwischen Guanin und Cytosin (drei H-Brücken) ausgebildet werden. Eine Treppenstufe besteht folglich aus dem einen oder dem anderen Basenpaar. Die Unterschiede in der Basenabfolge eines DNA-Doppelstrangs sind für die Individualität eines Lebewesens verantwortlich (vgl. Exkurs 21.6).


Abb. 8.16

Wasserstoffbrücken zwischen den Basen Adenin und Thymin (zwei H-Brücken) bzw. Guanin und Cytosin (drei H-Brücken)

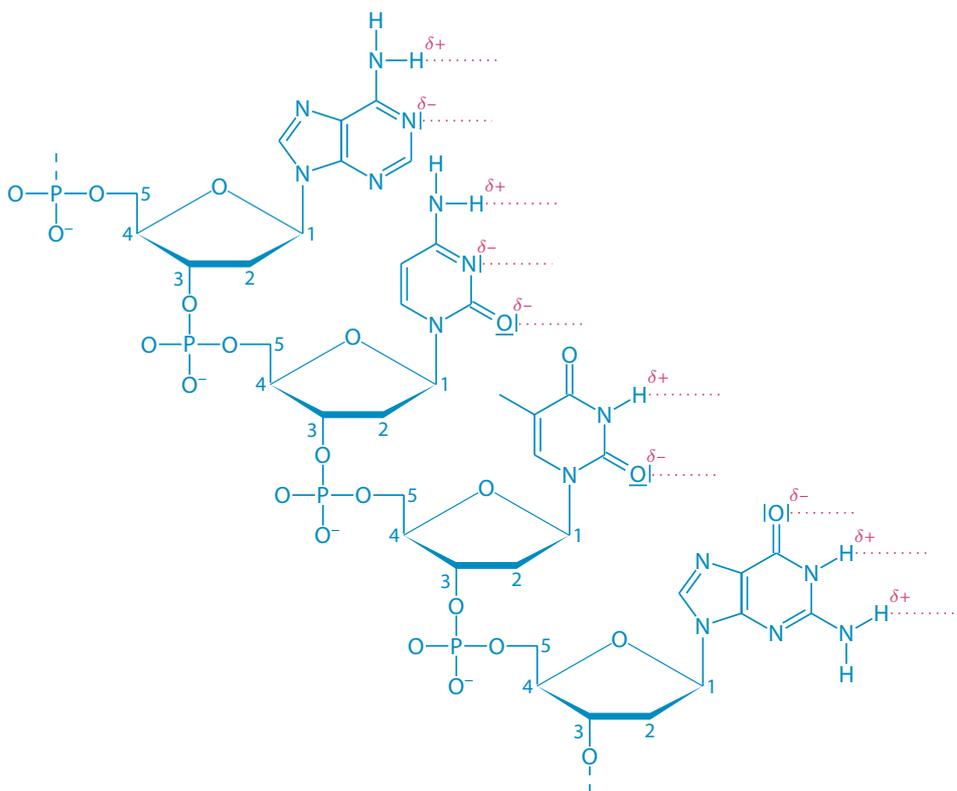

Abb. 8.17

Ausschnitt aus einem DNA-Doppelstrang; oben: linear, unten: als Helix dargestellt. Die punktierten Linien geben H-Brücken wieder, die Kreise symbolisieren die $C_5H_7O_2$ - und P die PO_3 -Einheiten.

Im Doppelstrang der Desoxyribonukleinsäure existieren ausschliesslich die Basenpaare Adenin-Thymin (AT) und Guanin-Cytosin (GC).

Abb. 8.18

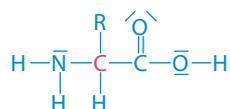
Skelettformel der Desoxyribonukleinsäure mit den Basen (von oben nach unten) A, C, T und G. Die roten, gestrichelten Linien deuten die Wasserstoffbrückenbrücken zum zweiten DNA-Strang an



Proteine

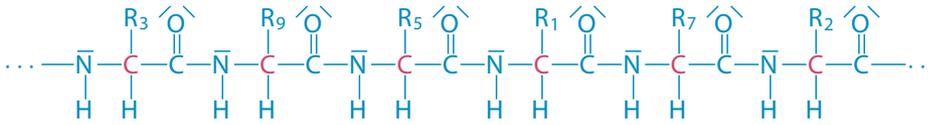
Proteine (Eiweisse) bilden sich aus α -Aminocarbonsäuren (2-Aminocarbonsäuren, «Aminosäuren»). Dabei entstehen lange Moleküle mit der immer gleichen Atomabfolge $-\text{NH}-\text{CH}-\text{CO}-$, Polypeptidketten. An diese Makromoleküle («Riesenmoleküle») sind Reste R gebunden ($-\text{NH}-\text{CHR}-\text{CO}-$), von denen in der Natur zwanzig verschiedene vorkommen. Die Struktur der Proteine ist in lebenden Organismen massgebend für die Fähigkeit, bei bestimmten Reaktionen die Aktivierungsenergie zu vermindern (viele Enzyme sind Biokatalysatoren).

Allgemeine Lewis-Formel einer Aminosäure (R: Rest):



Wie die allgemeine Lewis-Formel einer Aminosäure zeigt, bindet das zentrale C-Atom (rot) immer die beiden Atomgruppen $-\text{COOH}$ (Carboxyl-Gruppe) und $-\text{NH}_2$ (Amino-Gruppe) sowie einen Rest R. Carboxyl- und Amino-Gruppen ermöglichen eine unbegrenzte Zusammenlagerung von Aminosäuren zu langen Ketten, den Proteinen. Die Abfolge der Reste R bestimmt den Charakter und damit die Eigenschaften eines Proteins.

Ausschnitt aus einem Eiweiss-Molekül:



Ein Protein-Molekül enthält sowohl stark positiv polarisierte Wasserstoff-Atome (Bindung N–H^{δ+}) als auch stark negativ polarisierte Sauerstoff-Atome (C=O^{δ-}). Eine schraubenartige Anordnung eines solchen Makromoleküls ermöglicht die Ausbildung von Wasserstoffbrücken zwischen den Wasserstoff- und den Sauerstoff-Atomen in ein und derselben Kette (intramolekular). Dies ergibt die bei den Proteinen sehr verbreitete α -Helix. Die Seitenketten sind mit R_n bezeichnet.

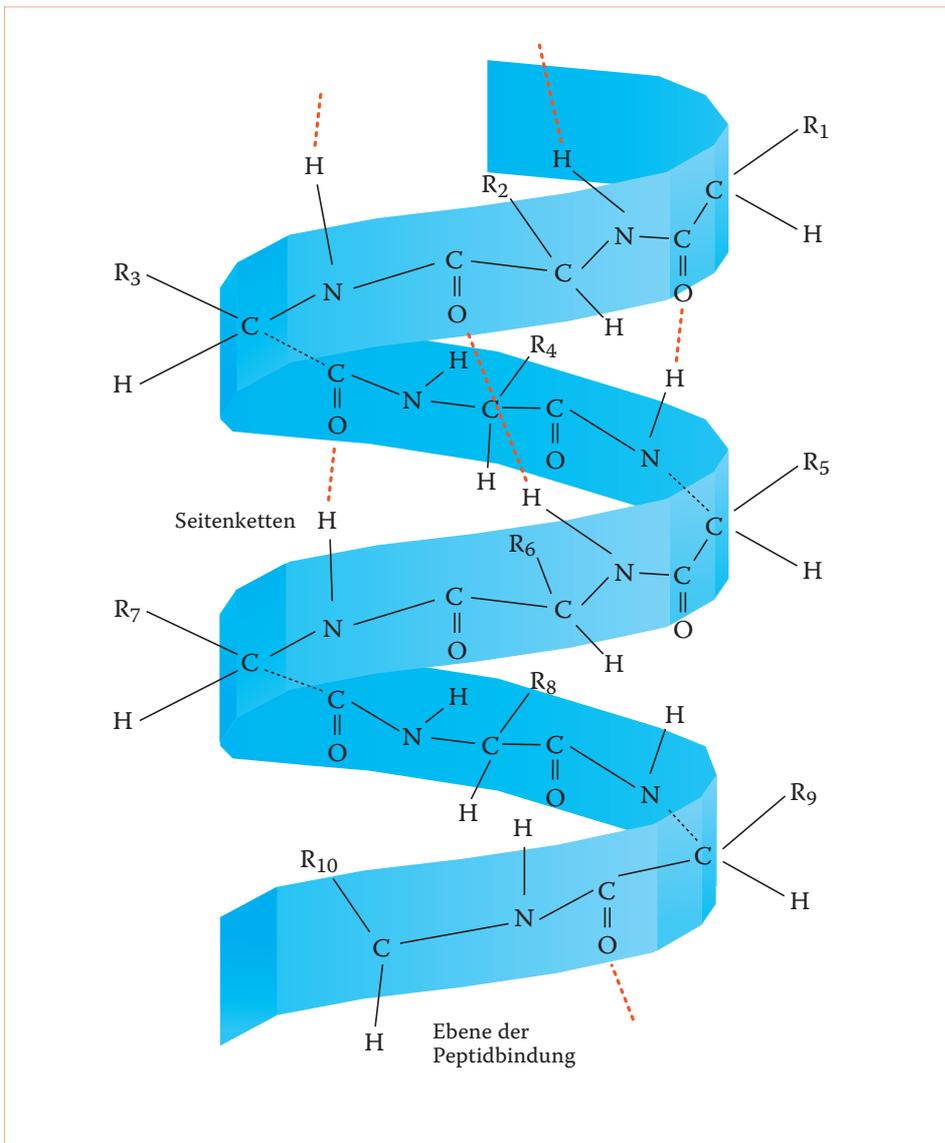


Abb. 8.19

Schraubenförmige Anordnung eines Proteinmoleküls (α -Helix); die roten Punktlinien deuten die H-Brücken an.

Auch die sogenannte Faltblattstruktur wird durch Wasserstoffbrücken gebildet, und zwar zwischen den N–H- und C=O-Gruppen derselben oder verschiedener Poly-

