

# 1 Biochemie – was ist das überhaupt?

## In diesem Kapitel...

- Was gehört alles zum Fachgebiet Biochemie?
- Wichtigste Prinzipien
- Verwandtschaftsverhältnisse

*Mit Biologen sprechen Biochemiker über Chemie, mit Chemikern sprechen sie über Biologie. Auf diese Weise verwirren sie beide Gruppen. Sind sie unter sich, sprechen Biochemiker über Baseball.*

Anonym

Wie die Bezeichnung schon vermuten lässt, sind bei der Biochemie zwei naturwissenschaftliche Teilbereiche untrennbar miteinander verzahnt: Die Biologie ist die Wissenschaft der lebenden Organismen, Chemie die Wissenschaft der Atome und Moleküle. Also untersucht die Biochemie *das Verhalten von Atomen und Molekülen innerhalb lebender Organismen*. In den Bereich dieses Fachs fällt die gesamte belebte Materie, die hier vor allem im Hinblick auf ihre chemischen Strukturen und die Reaktionen betrachtet wird, die innerhalb lebender Systeme ablaufen. Wo begegnet man der Biochemie im Alltag? – Überall in den Naturwissenschaften, in der Medizin und in der Landwirtschaft.

In vielerlei Hinsicht ist die Biochemie Bestandteil unseres Alltagslebens, ohne dass wir uns dessen bewusst wären. Schauen wir uns als Beispiel einen Mann mittleren Alters an (der übrigens bemerkenswerte Ähnlichkeit mit dem Autor dieses Buches hat):

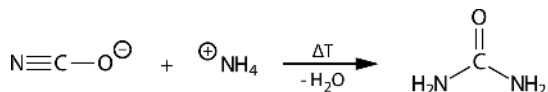
- Er nimmt ein Medikament, um seinen Cholesterinspiegel zu senken. Entwickelt wurde dieses Medikament durch Biochemiker des einen oder anderen Pharmaunternehmens – es hemmt ein Schlüsselenzym der Cholesterin-Biosynthese.
- Er verwendet einen Rasierschaum, der die Barthaare weicher macht. Die entsprechenden Schaumzusätze konnten gezielt entwickelt werden, nachdem die Eigenschaften von Keratin, dem Haarprotein, genauestens untersucht worden waren.
- Er isst mit Vitaminen angereicherte Frühstücksflocken. Die Bedeutung der Vitamine wurde durch die biochemische Ernährungsforschung erkannt.

- Er trägt ein Hemd aus schädlingsresistenter Baumwolle. Biochemiker haben die Baumwollpflanzen biotechnisch verändert, indem Gene ausgewählter Bakterien in das Erbgut der Pflanze eingebracht wurden.
- Nach der Arbeit geht er gerne Angeln. Die Untersuchung der Fisch-DNS (Desoxyribonucleinsäure, nach der englischen Bezeichnung *desoxyribonucleic acid* in der Fachliteratur meist mit DNA abgekürzt) gestattet Rückschlüsse über die Genetik der gesamten Population.
- Vor dem Schlafengehen trinkt er ein Glas Milch. Das verbessert seinen Schlaf, denn die in der Milch vorhandenen Aminosäuren werden in seinem Gehirn zu Signal-Molekülen umgewandelt, die andere Teile seines Gehirns in einen effizienteren Ruhezustand versetzen.

Alle diese Aspekte des Alltags lassen sich auf die Chemie lebender Systeme zurückführen und auf diese Weise auch verstehen. Ziel dieses Buches ist es, Ihnen einen ersten, raschen Überblick über die Verbindungen und die Prozesse zu bieten, die einen so großen Teil unseres Alltagslebens bestimmen. Dieses Buch sollte sich als Ergänzung zu umfangreicheren Lehrbüchern oder auch zur Prüfungsvorbereitung nutzen lassen.

## Biochemie: eine moderne Wissenschaft

Als im frühen neunzehnten Jahrhundert die Chemie als ernstzunehmende wissenschaftliche Disziplin anerkannt wurde, unterschied man kategorisch zwischen *anorganischer* und *organischer* Chemie. Man ging davon aus, organische Verbindungen (die Kohlenstoff und Wasserstoff enthalten) könnten ausschließlich in belebten Systemen entstehen. Doch im Jahr 1828 erhitze Friedrich Wöhler eine als *anorganisch* angesehene Substanz namens Ammoniumcyanat und erzeugte dabei die als *organisch* bezeichnete Verbindung Harnstoff, der zum Beispiel im Urin diverser Säugetiere vorkommt (den Menschen eingeschlossen):



**Abbildung 1.1** Aus Ammoniumcyanat entsteht Harnstoff

Mit diesem Experiment hat Wöhler gezeigt, dass zumindest chemisch gesehen die Grenze zwischen der „belebten“ und der „unbelebten“ Materie unbestreitbar fließend ist. (Manche Naturwissenschaftler sind sogar der Ansicht, die rein willkürlich gezogene Grenze zwischen der Organischen und der Anorganischen Chemie gehöre endgültig abgeschafft, aber das nur nebenbei.) Gegen Ende des neunzehnten Jahrhunderts entspann sich eine ähnliche Kontroverse zwischen Fachleuten der Organischen Chemie, ob für biochemische Reaktionen eine vollständige, intakte, noch lebende Zelle unabdingbar sei oder nicht. 1897 publizierte Hans Büchner eine Methode der alkoholischen Gärung unter Verwendung eines *zellfreien* Extraktes aus Bierhefe. Damit zeigte er, dass sich auch Reaktionen, die gemeinhin in lebenden Systemen ablaufen, durchaus *in vitro* (wörtlich übersetzt: „im Glas“) durchführen lassen, also außerhalb eines lebenden Systems (und eben nicht nur *in vivo*). Reaktionen in lebenden Zellen laufen ab, weil sie durch Enzyme katalysiert werden – wobei das Wort *Enzym* selbst vom griechischen Wort für Hefe abgeleitet ist: ζυμος (*zymos*).

Zu einer eigenständigen Wissenschaft avancierte die Biochemie dann zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts. In den Vereinigten Staaten von Amerika ergab sie sich praktisch aus einem Zusammenschluss der Fachgebiete Physiologische Chemie und Agrikulturchemie; in Deutschland war die Trennung zwischen Organischer Chemie und Biochemie nie so strikt. Derzeit lässt sich das Fachgebiet der Biochemie in drei Hauptzweige aufteilen:

- In der **Stoffwechselbiochemie** betrachtet man vor allem die Umwandlung recht kleiner Biomoleküle ineinander – beispielsweise die Umsetzung von Zucker zu Kohlendioxid und Wasser oder den „Umbau“ von Fetten zu Cholesterin (das übrigens fachsprachlich korrekt als *Cholesterol* zu bezeichnen ist). Stoffwechselbiochemiker befassen sich vor allem mit den einzelnen, durch Enzyme katalysierten Schritten komplexerer Reaktionsfolgen, die dann als *Stoffwechselweg* bezeichnet werden.
- In der **Strukturbiochemie** geht es darum, wie die verschiedenen Moleküle innerhalb einer lebenden Zelle miteinander chemisch gesehen zusammenarbeiten. Strukturbiochemiker versuchen beispielsweise herauszufinden, welchen Einfluss die dreidimensionale Struktur eines Enzyms auf dessen Fähigkeit besitzt, einen einzelnen Reaktionsschritt eines Stoffwechselweges zu katalysieren.
- In der **Molekulargenetik** geht es darum, wie die Informationen des Erbguts in Erscheinung treten und wie diese Informationen ihren Beitrag zur Regulation der verschiedensten Zellfunktionen leisten.

Auch hier sind die Grenzen eher fließend und recht willkürlich gezogen, da die aktuelle Biochemie untrennbar mit anderen Bereichen aus Biologie und Chemie verbunden ist. (Zu nennen sind vor allem die Organische und die Physikalische Chemie, die Physiologie, die Mikrobiologie, die Genetik und die Zellbiologie.)

## Biochemische Informationen extrapolieren

Würden in allen Organismen grundlegend verschiedene chemische Reaktionen ablaufen, wäre die Biochemie wohl keine sonderlich nützliche Wissenschaft. Zum derzeitigen Kenntnisstand ist die Biochemie fest darauf angewiesen, dass sich in einem System gewonnene Informationen zumindest weitgehend auch auf andere Systeme übertragen lassen. Würde der Mensch beispielsweise sein Cholesterin auf grundsätzlich andere Weise erzeugen als andere Säugetiere, wäre es für die Wissenschaft praktisch unmöglich, eine Verbindung oder ein Medikament zu entwickeln, das den Cholesterinspiegel im Blut senkt und so Herzinfälle verhindert. Schließlich wäre es unmöglich, die Millionen unterschiedlicher Verbindungen zu untersuchen, die im menschlichen Körper vorkommen, um eine effektive Behandlungsmethode zu entwickeln. (Außerdem wäre das wohl ethisch zumindest ... bedenklich.) Andererseits können Forscher anhand von Enzymsystemen viele tausend Verbindungen bei *in vitro*-Versuchen darauf überprüfen, ob sie besagtes Enzymsystem hemmen oder nicht. Anschließend lassen sich die wenigen tatsächlich aktiven Verbindungen dann hinsichtlich ihrer Wirksamkeit zunächst an Versuchstieren und letztlich auch am Menschen untersuchen.

## Prinzipien in der Biochemie wiederholen sich

Auf den ersten Blick könnte es den Eindruck erwecken, die Biochemie sei so kompliziert, dass gar nichts anderes übrig bliebe, als das ganze Zeug stur Heil auswendig zu lernen. Glücklicherweise gibt es eine ganze Reihe von Prinzipien, die in der Biochemie immer wieder auftauchen – und das macht es viel einfacher, die verschiedenen Teilbereiche im Blick zu behalten. Einige der Themen, denen Sie im Rahmen dieses Buches immer wieder begegnen werden, wollen wir uns in den kommenden Abschnitten anschauen.

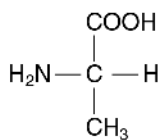
## An biochemischen Reaktionen sind häufig kleine Moleküle beteiligt.

Die Mehrheit aller in der Biochemie wichtigen Moleküle gehören einer von nur vier Kategorien an (Abbildung 1.2). Die meisten dieser Verbindungen sind optisch aktiv; in der Natur tritt meist nur eines der theoretisch möglichen Stereoisomere auf.

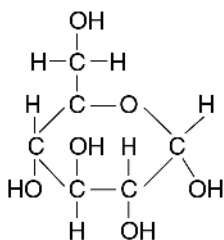
### Tipp

Als **Stereoisomere** bezeichnet man Moleküle mit gleicher Summenformel und gleicher Konstitution – also der gleichen Verknüpfungsreihenfolge der jeweiligen Atome –, die sich in der räumlichen Anordnung ihrer Atome unterscheiden.

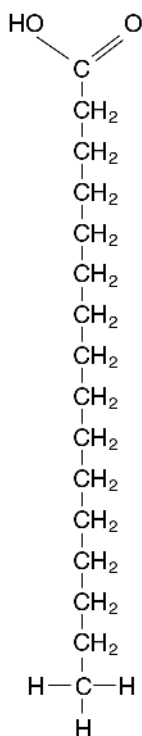
- **Aminosäuren** besitzen alle die gleiche Grundstruktur wie das Beispiel aus Abbildung 1.2. Allgemein weisen die in Lebewesen vorkommenden Aminosäuren (mit wenigen Ausnahmen) stets L-Konfiguration auf. Aminosäuren sind die Grundbausteine der Proteine, sie sind aber auch beim Energiestoffwechsel und bei der Zellkommunikation wichtig. Außerdem spielen sie eine kleine, aber nicht zu vernachlässigende Rolle in den Zellmembranen.
- **Saccharide** (häufig **Kohlenhydrate** genannt) sind Moleküle mit der allgemeinen Summenformel  $C_n(H_2O)_n$ , wobei  $n$  üblicherweise zwischen 3 und 7 liegt. Man findet sie in den verschiedenen Zuckern und diversen Formen der Stärke oder als Baubestandteil der Nucleotide. (Letztere dienen der Zelle zum einen als „Energiewährung“, zum anderen sind sie die Grundbausteine der genetischen Information; s. u.) Auch in einigen Bestandteilen sämtlicher Zellmembranen treten sie auf. Saccharide stellen die zentralen Komponenten der energieproduzierenden Stoffwechselwege der Biologie.
- **Lipide** sind mit eng verwandt mit den Kohlenwasserstoffen (= Verbindungen, die ausschließlich aus Kohlenstoff- und Wasserstoff-Atomen aufgebaut sind), auch wenn sie meist noch weitere Atome außer C und H enthalten. Charakteristisch für Lipide ist, dass sie einen polaren (oder sogar geladenen) „Kopf“ und einen (meist recht langen) unpolaren Kohlenwasserstoff-„Schwanz“ besitzen; letzterer sorgt für eine nur sehr begrenzte Löslichkeit in Wasser. Sie sind essentielle Komponenten sämtlicher Membranen und spielen eine wichtige Rolle bei der Energiespeicherung von Pflanzen und Tieren gleichermaßen.



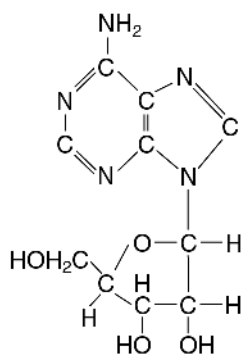
Alanin,  
eine Aminosäure



Glucose,  
ein Kohlenhydrat



## Palmitinsäure, ein Lipid



Adenosin,  
ein Nucleosid

### Abbildung 1.2 Ausgewählte (kleine) Biomoleküle

- **Nucleoside** und **Nucleotide** enthalten eine Kohlenhydrat-Komponente, die an eine von vier aus Kohlenstoff- und Stickstoff-Atomen aufgebaute cyclische Verbindung gebunden ist; diese C- und N-Ringe werden als „Nucleinbasen“, „Nucleobasen“ oder häufig nur kurz als „Basen“ bezeichnet. Nucleoside und Nucleotide stellen sozusagen die „Energiewährung“ der Zelle dar und bergen, zu langen DNA- oder RNA-Ketten verknüpft (= polymerisiert), die genetische Information der betreffenden Zelle.

### Warnung

Passen Sie auf, was Sie meinen, wenn Sie den Begriff „Basen“ verwenden! Beziehen Sie sich allgemein auf Verbindungen, die den pH-Wert wässriger Lösungen steigern (also auf „Basen“ im Sinne der allgemeinen Chemie), oder geht es tatsächlich um die *Nucleinbasen*? Das sollten Sie *nie* verwechseln.

## Polymere in lebenden Systemen

In der Zelle werden einzelne Aminosäuren, Kohlenhydrate und Nucleotide häufig zu **Polymeren** verknüpft. Polymere sind große Moleküle, die dadurch entstehen, dass einzelne *Untereinheiten* eine lange Kette bilden. (Die einzelnen Untereinheiten sind dann meist in der Art „Kopfende-ans-Fußende“ angeordnet.) Für diese Kettenbildung gibt es mehrere gute Gründe:

- **Synthese-Ökonomie:** Chemische Reaktionen laufen in lebenden Zellen sehr viel schneller und spezifischer ab als das bei „normalen“ organischen Reaktionen im Labor der Fall ist. Geschwindigkeit und Spezifität ergeben sich dabei durch die Enzyme, die die betreffenden Reaktionen *katalysieren*. Wie schafft es die Zelle, all die Katalysatoren herzustellen, die zur Aufrechterhaltung des Zustands „lebendig“ nötig sind? Entweder werden diese Enzyme „eines nach dem anderen“ angefertigt, oder man verlegt sich auf Massenproduktion. Letztere Vorgehensweise ist sehr viel effizienter, wie das folgende Beispiel zeigen dürfte:

Angenommen, ein lebendes System sei auf 100 Katalysatoren angewiesen. Es wäre natürlich denkbar, dass jeder dieser Katalysatoren einzeln synthetisiert wird. Aber woher kämen dann die Katalysatoren, die erforderlich wären, um die Katalysatoren herzustellen? Für 100 Katalysatoren bräuchte man (mindestens) 100 weitere Katalysatoren, die ihrerseits dann wieder

(mindestens) 100 zusätzliche Katalysatoren benötigen würden, und so weiter. Eine lebende Zelle bräuchte also Katalysatoren in gewaltiger Anzahl – genau genommen: mehr Katalysatoren, als bislang überhaupt (organische) Moleküle bekannt sind (oder sogar mehr Katalysatoren als das gesamte bekannte Universum an Atome enthält). Aber was, wenn die betreffenden Katalysatoren „serienmäßig“ hergestellt würden? Wollte man beispielsweise Aminosäuren miteinander verknüpfen, wobei diese Verknüpfungsreaktion immer nach dem gleichen Schema abläuft, würde ein einzelner Mechanismus ausreichen, um 20 verschiedene Aminosäuren über die gleiche Reaktion miteinander zu verknüpfen. Sollen zwei Aminosäuren miteinander verbunden werden, ergeben sich so  $20 \times 20 = 400$  mögliche **Dimere** (also Moleküle, die aus zwei einander ähnlichen oder sogar identischen Untereinheiten aufgebaut sind); bei drei Aminosäuren kommt man schon auf  $20 \times 20 \times 20 = 8000$  **Trimere** (aus drei Untereinheiten aufgebaut) und so weiter. Da ein einzelnes Protein leicht aus 1000 oder mehr Aminosäuren bestehen kann, die zu einer langen Kette verknüpft sind, lässt sich aus einer relativ bescheidenen Anzahl verschiedener Monomere eine gewaltige Anzahl verschiedenster Katalysatoren aufbauen.

- **Reaktions-Ökonomie:** Monomere zu Makromolekülen zu verknüpfen ist vor allem dann ökonomisch, wenn die Monomere über vergleichbare chemische Prozesse vereinigt werden können. Enthalten die Monomere unterschiedliche funktionelle Gruppen, würde die Synthese eines entsprechenden Polymers auch unterschiedliche Katalysatoren erfordern, je nachdem, welches Monomer gerade an die bereits bestehende Kette angehängt werden soll. Offenkundig ist es, rein wirtschaftlich gesehen, viel sinnvoller, einen Katalysator zu verwenden, der für alle der (häufig wirklich *sehr* zahlreichen) Kettenbausteine gleichermaßen brauchbar ist.
- **Stabilität der Zelle:** Hier spielen die Eigenschaften von Wasser eine wichtige Rolle. Werden beispielsweise Erythrocyten (also rote Blutkörperchen) in destilliertes Wasser eingebracht, platzen sie. Wasser durchdringt die Zellmembran und strömt ins Innere. Allgemein strömt Wasser stets von *der* Seite einer Membran, auf der sich die Lösung mit geringerer Konzentration befindet, zu der Seite mit höherer Konzentration: Auf der Seite mit höherer Konzentration herrscht ein höherer *osmotischer Druck*. Die Zelle muss Energie aufwenden, um diesen Druck aufrecht zu erhalten. Der osmotische Druck eines Systems ist ausschließlich von der *Anzahl* der im Wasser gelösten Atome, Ionen oder Moleküle abhängig, nicht von deren Größe. Also bewirken 100 Moleküle eines Kohlenhydrat-Monomers (eines



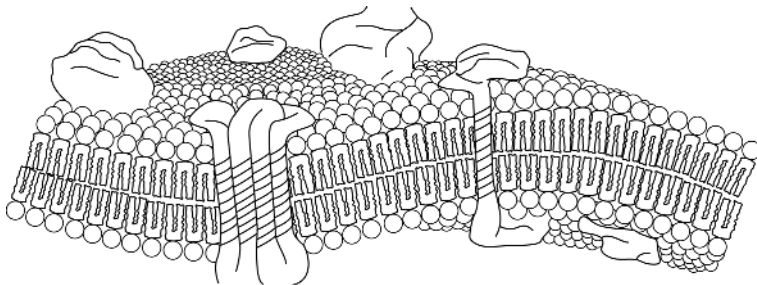
Zuckers) den gleichen osmotischen Druck wie 100 Polysaccharid-Moleküle, die aus jeweils 100 Monomeren aufgebaut sind. Letztere hingegen können aber eben das Hundertfache an Energie speichern.

## Zellmembranen

Organismen besitzen eine „Innenseite“ und eine „Außenseite“. Die Edukte und Produkte biochemischer Reaktionen werden entweder für die weitere Verwendung im Inneren der Zelle aufbewahrt oder sie werden ausgeschieden bzw. ausgeschleust. Membranen bestehen aus einer Lipid-Doppelschicht wie in Abbildung 1.3 dargestellt; in dieser Lipid-Doppelschicht sind noch diverse Proteine gelöst. Die Außenflächen dieser Doppelschicht bestehen jeweils aus den meist geladenen, zumindest aber polaren „Köpfen“ der beteiligten Lipid-Moleküle, die entsprechend mit dem umgebenden Lösungsmittel Wasser polare Wechselwirkungen eingehen können, während im Inneren der Doppelschicht unpolare Wechselwirkungen der Kohlenwasserstoff-„Schwänze“ der beteiligten Lipide erfolgen. Abgesehen davon, dass derlei Membranen jeweils die einzelnen Zellen begrenzen, werden sie zur Energieerzeugung genutzt und dienen dazu, einzelne Reaktionsräume innerhalb einer Zelle bei Bedarf voneinander getrennt zu halten.

### BEISPIEL

Die in eukaryotischen Zellen vorhandenen leistungsstarken Verdauungsenzyme werden in durch Membranen vom Rest der Zelle abgeteilten *Kompartimenten* aufbewahrt, den **Lysosomen**. Die Substrate für diese Enzyme werden dann jeweils gezielt in die Lysosomen eingebracht.



**Abbildung 1.3** Die Zellmembran

## Reaktionstypen in der Biochemie

Auch wenn es viele verschiedene biochemische Reaktionen gibt, lassen sie sich doch alle in erfreulich wenige *Reaktionstypen* einteilen:

- **Oxidation und Reduktion:** Ein Beispiel ist die Umwandlung eines Alkohols in ein Aldehyd oder umgekehrt.
- **Verschiebung funktioneller Gruppen innerhalb eines Moleküls oder Austausch funktioneller Gruppen zwischen verschiedenen Molekülen:** Ein Beispiel, das Ihnen häufig begegnen wird, ist der Transfer eines Phosphat-Restes (einer Phosphat-Gruppe) von einem Sauerstoff-Atom auf ein anderes.
- **Addition oder Eliminierung/Abspaltung von Wasser:** In diese Kategorie fällt beispielsweise die Hydrolyse einer Amidbindung, so dass man je eine freie Amino- und eine freie Carboxylgruppe erhält.
- **Reaktionen unter Bindungsspaltung:** Von besonderer Bedeutung sind hier die Reaktionen, in denen eine Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindung (C-C-Bindung) aufgebrochen wird.

### Tipp

Die Komplexität des Lebens an sich lässt sich also nicht auf eine unüberschaubare Vielfalt von Reaktionen zurückführen, sondern vielmehr auf diese vier einfachen Reaktionstypen, die in den verschiedensten Situationen und unter den unterschiedlichsten Gegebenheiten ablaufen.

### BEISPIEL

Die Addition von Wasser an eine C-C-Doppelbindung stellt einen Schritt beim Abbau *verschiedener* Verbindungen dar, darunter Saccharide, Lipide und Aminosäuren.

## Die Regulierung biochemischer Reaktionen

Mischt man Benzin und Sauerstoff, kann man damit ein Fahrzeug antreiben oder eine Explosion herbeiführen. Der Unterschied ergibt sich vor allem dadurch, dass der Zustrom an Benzin gesteuert wird. Beim Fahrzeug reguliert man mit dem Gaspedal die Menge an Benzin, die in den Brennraum einströmt. Genau wie beim Autofahren ist es auch in der Biochemie wichtig, dass die Reaktionen weder zu rasch noch zu langsam ablaufen – und dass

die richtigen Reaktionen eingeleitet werden, sobald sie für das weitere Funktionieren der Zelle unerlässlich werden.

## Große Moleküle liefern Zellinformationen

Die Grundlage zur Regelung sämtlicher biochemischen Reaktionen liegt letztendlich in der genetischen Information, die in der DNA verschlüsselt ist. Diese Information wird unter regulierten Bedingungen abgerufen und umgesetzt („exprimiert“), so dass je nach Bedarf gerade *die* Enzyme bereitgestellt werden, die in der jeweils aktuellen Situation von der Zelle benötigt werden – sei es aufgrund eines akuten Energiebedarfs für die Replikation oder was auch immer. Die Information liegt dabei in einer langen Kette aus strukturell ähnlichen Untereinheiten gespeichert vor. Bei jeder dieser Untereinheiten handelt es sich um eines der vier Nucleotide der Nucleinsäuren.

## Schwache Wechselwirkungen und strukturelle Stabilität

Biochemische Systeme sind häufig sehr temperaturempfindlich. Erhitzt man eine Leber auf etwas mehr als 37 °C, kommt die enzymatische Aktivität dieses Organs praktisch vollständig zum Erliegen. (Das gilt natürlich auch für ein Stück Leber in der Pfanne.) Eine derart moderate Temperatur reicht keineswegs aus, *kovalente* Bindungen zu zerstören, also warum sind die Enzyme so empfindlich? Weil die Aktivität und die Struktur der betreffenden Enzyme auch von den *nicht*-kovalenten Wechselwirkungen (Van-der-Waals-Kräfte, Wasserstoffbrückenbindungen) abhängen, die deutlich schwächer sind als kovalente Bindungen und daher meist als „schwache Wechselwirkungen“ bezeichnet werden. Die Stabilität biologischer Strukturen ergibt sich dabei aus der *Summe* all dieser schwachen Wechselwirkungen.

## Biochemische Reaktionen sind „Abwärts-Reaktionen“

Letztendlich hängt das Leben auf der Erde von einigen selbst *nicht lebenden* Energiequellen ab.

- Am bekanntesten ist zweifellos die Sonne, deren Energie hier auf der Erde im Rahmen der **Photosynthese** aufgefangen und genutzt wird: Die Energie des Lichtes wird zur Synthese von Biomolekülen genutzt, insbesondere diverser Kohlenhydrate/Zucker.

- Eine weitere Energiequelle liefert die Erde selbst: Mikroorganismen in der Tiefsee, im Erdreich und in anderen Ökosystemen, die (praktisch) kein Sonnenlicht erhalten, können ihren Energiebedarf mithilfe der **Chemosynthese** decken: Durch Oxidation und Reduktion anorganischer Verbindungen wird biologisch nutzbare Energie gewonnen.

Ziel dieser Energieerzeugungs- und -speicherungsprozesse ist die Synthese kohlenstoffreicher organischer Verbindungen, in denen die Kohlenstoff-Atome stärker reduziert sind (also elektronenreicher) als der Kohlenstoff im Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ). Bei Energie liefernden (*exergonischen*) Stoffwechselvorgängen wird dieser elektronenreiche Kohlenstoff oxidiert und die dabei freiwerdende Energie anderweitig verwendet. Ein Teil dieser Energie wird dann dazu genutzt, die bei der Oxidation entstehenden Verbindungen zu komplexen Strukturen umzubauen. Letztendlich wird also die ursprüngliche Energiequelle – etwa das Sonnenlicht – so genutzt, dass lebende Organismen aufrecht erhalten werden und sich fortpflanzen können ... darunter eben auch der Mensch. Die Menge an Energie, die bei diesen Reaktionen *freigesetzt* wird, ist stets geringer als die Energie, die *aufgebracht* werden musste, um die betreffenden Reaktionspartner zu erhalten.

### Tipp

Anders ausgedrückt: Auch für lebende Systeme gilt der **Zweite Hauptsatz der Thermodynamik**, demgemäß spontan ablaufende Reaktionen immer nur „abwärts“ erfolgen, wobei die **Entropie** des Systems (vereinfacht ausgedrückt: dessen „Unordnung“) stets zunimmt.

### BEISPIEL

So herrscht im Molekül Glucose, in dem (unter anderem) sechs Kohlenstoff-Atome kovalent miteinander verbunden sind, ein größeres Maß an Ordnung als beim Produkt von dessen Verstoffwechselung: sechs Molekülen  $\text{CO}_2$ .

## Alle Organismen sind miteinander verwandt

In der **Taxonomie**, der Klassifizierung und Gruppierung von Lebensformen, gelten verschiedene Organismen als ähnlich, wenn sie ähnliche sichtbare Charakteristika aufweisen. Aus diesem Grund wurde die belebte Natur schon

bei den alten Griechen in die Tier- und die Pflanzenwelt eingeteilt. Erst seit recht kurzer Zeit unterscheiden Zellbiologen bei den Organismen zwischen **Eukaryoten** und **Prokaryoten**, also Organismen *mit* und *ohne* Zellkern. Noch jüngeren Datums ist eine vollständig neuartige Taxonomie (entwickelt vor allem von Carl Woese und dessen Mitarbeitern), bei der die Einteilung anhand der Sequenz einer ribosomalen RNA erfolgt. Ribosomale RNA ist für das Leben unverzichtbar, leicht zu identifizieren, lässt sich als „molekulare Uhr“ der Evolution nutzen ... und steckt immer noch voller Überraschungen. Bemerkenswerterweise führt die für die Systematisierung der Natur hilfreichste Unterteilung zu *drei* Haupt-Klassifizierungskategorien, gelegentlich auch als **Domänen** bezeichnet. (Diese Aufteilung hat sich als sinnvoller erwiesen als die klassische Unterscheidung zwischen Tier- und Pflanzenwelt oder Prokaryoten und Eukaryoten.) Man unterscheidet:

- **Eukaryoten/*Eukaryota*:** Diese Domäne dürfte den meisten am vertrautesten sein. Zu den Eukaryoten gehören sämtliche Organismen mit Zellkern: Pflanzen, Tiere und auch ein beachtlicher Teil der Lebensformen, die gelegentlich als *Protisten* bezeichnet werden – Organismen, die erst unter dem Mikroskop sichtbar werden wie etwa Hefen oder manche Algen.
- **Bakterien/*Bacteria*:** In diese zweite Domäne gehören Mikroorganismen *ohne* Zellkern, darunter auch viele bestens bekannte Arten wie etwa *Escherichia coli* oder die Blaualgen (Cyanobakterien).
- **Archaeen/*Archaea*:** Die dritte Domäne unterscheidet sich molekular und biochemisch betrachtet von den Bakterien ebenso sehr wie von den Eukaryoten, zählt aber zu den Prokaryoten (Zellen ohne Zellkern). Diese bemerkenswerten Mikroorganismen besetzen ökologische Nischen, die lange Zeit für zu unwirtlich gehalten wurden – etwa Habitate mit erstaunlich hoher Temperatur, niedrigem Sauerstoff-Gehalt oder extrem hoher Salzkonzentration. Die Biochemie der Archaeen ist einzigartig und noch weitgehend unerforscht. Derzeit scheint es, als sei die Hälfte aller bislang bekannten Gene dieser Organismen ohne jegliches Gegenstück im Genom der Bakterien oder Eukaryoten.

## Der gemeinsame Ursprung aller Organismen

Grundlage der Untersuchung sowohl der molekularen Evolution als auch der Taxonomie ist der Ursprung der Organismen. Auch wenn der „Baum des Lebens“ aus Abbildung 1.4 auf den Sequenzen eines einzelnen Gens basiert, lassen sich doch allgemeine Aussagen treffen. So sind die molekularen/biochemischen Eigenschaften der verschiedenen Organismen umso ähnlicher, je näher sie einander auf dem Baum des Lebens angeordnet sind.

### BEISPIEL

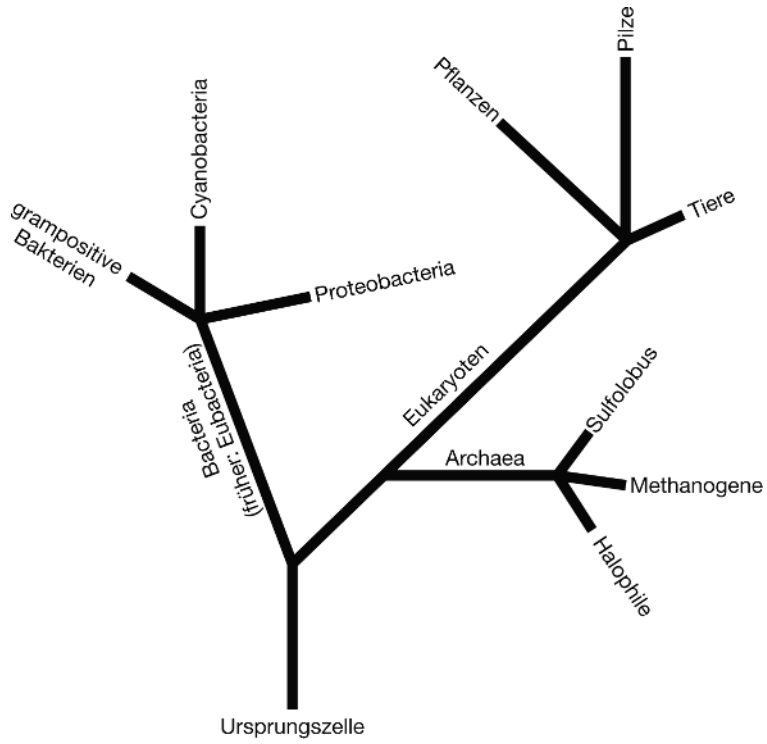
Der menschliche Stoffwechsel ist dem des Schimpansen – eines nahen Verwandten – deutlich ähnlicher als etwa dem der Hefe, die somit als recht weit entfernter Verwandte angesehen werden muss. Andererseits sind die biochemischen Vorgänge im Menschen und in der Hefe einander immer noch deutlich ähnlicher als etwa im Vergleich zu einem Organismus aus der Domäne der Archaeen oder der Bakterien.

Das Ausmaß an „Verwandtschaft“ wirkt sich natürlich drastisch auf die Übertragbarkeit der Biochemie etwa auf Erkrankungen des Menschen aus. Zweifellos ist es ethisch nicht vertretbar, gewisse biochemische Versuche am Menschen durchzuführen, aber Tiere oder auch Kulturen von Tierzellen sind dem Menschen biochemisch ähnlich genug: Dort kann man gemeinsame Prinzipien entdecken und entsprechend nutzen.

### BEISPIEL

So lassen sich die Eigenschaften einiger Gene, die bei Mäusen zu Krankheiten führen, ausgiebig untersuchen und anhand der Ergebnisse potentielle Behandlungsmethoden abschätzen, bevor diese auf den Menschen angewandt werden.

Dieses Vorgehen ist zwar keineswegs narrensicher, aber dennoch findet das Prinzip der biochemischen Ähnlichkeit kontinuierlich Anwendung in der biomedizinischen Forschung, bei der man sich mit der Behandlung von Krankheiten und der Krankheitsprophylaxe befasst.



**Abbildung 1.4** Der Baum des Lebens

