



Zellen: Die Grundeinheiten des Lebens

1

Was bedeutet es eigentlich, zu leben? Petunien, Menschen und Algenschlamm sind alleamt lebendig – Steine, Sand und Sommerbrise dagegen nicht. Was aber sind die grundlegenden Eigenschaften, die Lebewesen charakterisieren und von unbelebter Materie unterscheiden?

Die Antwort hängt an einer Grundtatsache, die heute als selbstverständlich betrachtet wird, die jedoch bei ihrer Entdeckung vor mehr als 175 Jahren eine Revolution in der Denkweise darstellte. Alle Lebewesen (oder *Organismen*) bestehen aus **Zellen** – kleinen, membranumhüllten Einheiten, die mit einer konzentrierten wässrigen Lösung von Chemikalien gefüllt sind und die die außergewöhnliche Fähigkeit besitzen, Kopien von sich selbst anzufertigen, indem sie wachsen und sich teilen. Die einfachsten Lebensformen sind Einzelzellen. Höhere Organismen wie wir selbst sind Zellgemeinschaften, die durch Wachstum und Teilung aus einer einzigen Ursprungszelle hervorgegangen sind. Jedes Tier oder jede Pflanze stellt eine riesige Kolonie aus verschiedenen Zellen dar, die spezielle Funktionen ausüben und durch komplizierte Kommunikationssysteme koordiniert werden.

Zellen sind demnach die Grundeinheiten des Lebens. Wir müssen uns folglich mit *Zellbiologie* beschäftigen – der Beobachtung von Zellen, ihrer Struktur, ihrer Funktion und ihres Verhaltens –, um eine Antwort auf die Frage zu finden, was Leben ist und wie es funktioniert. Mit einem tieferen Verständnis von Zellen können wir beginnen, die großen historischen Fragestellungen über das Leben auf der Erde anzugehen: der rätselhafte Ursprung, die überwältigende, in Milliarden Jahren der Evolution erschaffene Vielfalt und das Vordringen in jede erdenkliche Umgebung auf dem Planeten. Gleichzeitig kann uns die Zellbiologie auch Antworten auf Fragen zu uns selbst liefern: Woher kommen wir? Wie entwickeln wir uns aus einer einzigen befruchteten Eizelle? Wie ähnlich sind wir uns untereinander – obwohl sich jeder von allen anderen Menschen auf der Erde unterscheidet? Warum werden wir krank, warum altern wir und sterben?

In diesem Kapitel stellen wir das Konzept von Zellen vor: Was sie sind, woher sie kommen und wie wir so viel über sie herausgefunden haben. Wir beginnen damit, uns die vielfältigen Gestalten anzusehen, die Zellen annehmen können, und werfen einen kurzen Blick auf die chemische Maschinerie, die alle Zellen gemeinsam haben. Anschließend besprechen wir, wie Zellen unter dem Mikroskop sichtbar gemacht werden und was man erkennt, wenn man forschend in sie hineinblickt. Zum Schluss werden wir erörtern, wie man die Ähnlichkeiten von Lebewesen verwenden kann, um ein zusammenhängendes Verständnis von allen Lebensformen auf der Erde zu erhalten – vom winzigsten Bakterium bis hin zur mächtigsten Eiche.

Kapitelinhalt

- 1.1 Einheit und Vielfalt von Zellen
- 1.2 Zellen unter dem Mikroskop
- 1.3 Die Prokaryotenzelle
- 1.4 Die Eukaryotenzelle
- 1.5 Modellorganismen

1.1 Einheit und Vielfalt von Zellen

Biologen schätzen, dass es auf unserem Planeten bis zu 100 Millionen verschiedene Arten von Lebewesen gibt – Organismen, so verschieden wie ein Delfin und eine Rose oder ein Bakterium und ein Schmetterling. Auch Zellen unterscheiden sich erheblich in ihrer Form und Funktion. Tierzellen unterscheiden sich von Pflanzenzellen, und selbst Zellen innerhalb eines einzelnen vielzelligen Organismus können sich völlig im Aussehen und ihrer Aktivität unterscheiden. Doch wie sie sich auch unterscheiden: Alle Zellen teilen grundlegende chemische Vorgänge und andere allgemeine Eigenschaften.

In diesem Abschnitt ziehen wir Bilanz über die Unterschiede und Gemeinsamkeiten von Zellen. Außerdem besprechen wir, wie sich alle heutigen Zellen aus einem gemeinsamen Vorfahren entwickeln konnten.

1.1.1 Zellen variieren enorm in ihrem Aussehen und ihren Funktionen

Wenn wir Zellen untereinander vergleichen wollen, ist die Größe offensichtlich einer der besten Startpunkte. Eine Bakterienzelle – etwa ein *Lactobacillus* in einem Stück Käse – ist nur ein paar **Mikrometer** (μm) lang. Das ist etwa 25-mal kleiner als die Dicke eines menschlichen Haars. Am anderen Ende des Spektrums hat ein Frosch-Ei, das ebenfalls eine einzelne Zelle ist, einen Durchmesser von 1 Millimeter (mm). Würde man sie maßstabsgerecht vergrößern, sodass der *Lactobacillus* so groß wie ein Mensch wäre, hätte das Frosch-Ei eine Höhe von 800 Metern (m).

Genauso stark variieren Zellen in ihrer Form (Abb. 1-1). So ist beispielsweise eine typische Nervenzelle im Gehirn unwahrscheinlich lang. Sie sendet ihre elektrischen Signale entlang eines dünnen Fortsatzes (ein Axon), das 10 000-mal länger als dick ist, und sie empfängt Signale von anderen Zellen über zahlreiche kürzere Fortsätze, die von ihrem Zellkörper entspringen wie die Zweige eines Baums (siehe Abb. 1-1A). Andererseits sieht ein Pantoffeltierchen (*Paramecium*), das in einem Teich lebt, wie ein U-Boot aus und ist

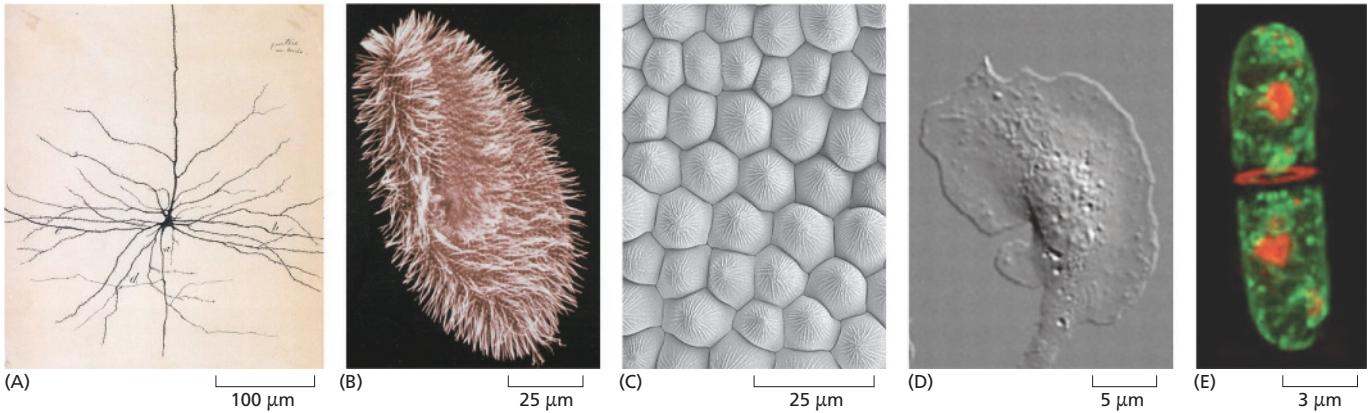


Abb. 1-1 Zellen erscheinen in einer Vielfalt von Formen und Größen.

Man beachte die sehr unterschiedlichen Maßstäbe dieser mikroskopischen Aufnahmen. (A) Zeichnung einer einzelnen Nervenzelle aus einem Säugetiergehirn. Diese Zelle hat einen einzigen, unverzweigten Fortsatz (Axon), der nach oben aus der Abbildung ragt und über den die Zelle elektrische Signale an andere Nervenzellen sendet. Sie besitzt außerdem eine riesige Anzahl verzweigter Fortsätze (Dendriten), über die sie Signale von 100 000 anderen Nervenzellen empfängt. (B) *Paramecium* (Pantoffeltierchen). Dieses Protozoon stellt eine große einzelne Zelle dar, die mithilfe schlaggerender Cilien an ihrer Oberfläche schwimmt. (C) Die Oberfläche eines Blütenblatts des Löwenmäulchens zeigt eine regelmäßige Anordnung von dicht gepackten Zellen. (D) Ein Makrophag breitet sich auf der kontrollierenden Suche nach eindringen-

den Organismen durch tierisches Gewebe aus. (E) Schnappschuss einer sich teilenden Spalthefe. Das mittlere Septum (mit einem Fluoreszenzfarbstoff rot angefärbt) bildet eine Wand zwischen den beiden Kernen (die ebenfalls rot angefärbt sind), die auf die beiden Tochterzellen verteilt wurden. Die Zellmembranen sind in diesem Bild mit einem grünen Fluoreszenzfarbstoff angefärbt. (A, Herederos de Santiago Ramón y Cajal, 1899; B, freundlicherweise von Anne Aubusson Fleury, Michel Laurent und André Adoutte zur Verfügung gestellt; C, freundlicherweise von Kim Findlay zur Verfügung gestellt; D, aus P.J. Hanley et al., Proc. Natl. Acad. Sci. USA 107:12145–12150, 2010 mit freundlicher Genehmigung der National Academy of Sciences der USA; E, freundlicherweise von Janos Demeter und Shelley Sazer zur Verfügung gestellt.)

mit Tausenden von *Cilien* bedeckt. Diese haarähnlichen Anhängsel bewegen die Zelle durch ihr wellenförmiges, koordiniertes Schlagen voran, wobei sie sich um ihre Längsachse dreht (Abb. 1-1B). Eine Zelle in der Oberflächenschicht einer Pflanze ist ein gedrungenes, unbewegliches Prisma, umgeben von einer festen Wand aus Cellulose mit einer äußeren Hülle aus wasserundurchlässigem Wachs (Abb. 1-1C). Im Gegensatz dazu kriecht ein Makrophage im Körper eines Tiers durch die Gewebe, nimmt ständig andere Formen an und verschlingt umhersuchend Gewebetrümmer, fremde Mikroorganismen und tote oder sterbende Zellen (Abb. 1-1D). Eine Spaltheife ist stäbchenförmig (Abb. 1-1E), während eine Backhefe (auch Knospungshefe, engl. *budding yeast*) wunderbar kugelförmig ist (siehe Abb. 1-14). Es gibt weitere unzählige Beispiele.

Zellen variieren auch sehr stark in ihren chemischen Bedürfnissen. Manche benötigen Sauerstoff, um zu leben – für andere ist er tödlich. Einige brauchen als Rohstoffe nur wenig mehr als Kohlendioxid (CO_2), Sonnenlicht und Wasser – andere benötigen ein komplexes Gemisch aus Molekülen, die von anderen Zellen hergestellt werden.

Diese Unterschiede in Größe, Form und chemischen Bedürfnissen spiegeln oft Unterschiede in der Zellfunktion wider. Manche sind spezialisierte Fabriken, die bestimmte Substanzen wie Hormone, Stärke, Fett, Latex oder Farbpigmente produzieren. Andere – beispielsweise Muskelzellen – sind Motoren, die Kraftstoff verbrennen, um mechanische Arbeit zu verrichten. Wieder andere sind Stromgeneratoren, wie die abgewandelten Muskelzellen im Zitteraal.

Manche Abwandlungen spezialisieren eine Zelle so stark, dass sie aufhört, sich zu vermehren, also keine Nachkommen produziert. Für eine Zellart, die ein Einzeldasein führt, wären solche Spezialisierungen sinnlos. In einem vielzelligen Organismus herrscht jedoch Arbeitsteilung unter den Zellen. Dies ermöglicht es einigen Zellen, sich extrem stark auf bestimmte Aufgaben zu spezialisieren. Allerdings können sie viele ihrer Grundbedürfnisse nicht mehr selbst decken und sind deshalb auf andere Zellen im Organismus angewiesen. Sogar das grundlegendste Bedürfnis von allen, die Weitergabe der genetischen Anweisungen an die nächste Generation, wird an Spezialisten abgetreten – an Eizellen und Spermien.

1.1.2 Die grundlegende Chemie ist bei allen lebenden Zellen ähnlich

Trotz der außergewöhnlichen Vielfalt an Pflanzen und Tieren haben die Menschen schon von jeher erkannt, dass diese Organismen etwas gemeinsam haben – etwas, das sie berechtigt, Lebewesen genannt zu werden. Doch während es relativ leichtfiel, Leben zu erkennen, war es viel schwieriger zu sagen, in welcher Weise sich alle Lebewesen ähneln. Lehrbücher mussten sich damit zufriedengeben, Leben mithilfe abstrakter Begriffe zu definieren, wie Wachstum, Fortpflanzung und der Fähigkeit, sich aktiv als Reaktion auf die Umwelt zu ändern.

Die Entdeckungen von Biochemikern und Molekularbiologen lieferten eine elegante Lösung für diese unangenehme Situation. Auch wenn Zellen aller Lebewesen bei äußerer Betrachtung unendlich verschieden erscheinen, sind sie sich im Inneren grundsätzlich ähnlich. Wir wissen heute, dass sich Zellen in einem erstaunlichen Ausmaß in den Details ihrer Chemie gleichen. Alle Zellen bestehen aus denselben Arten von Molekülen, die an denselben Typen chemischer Reaktionen teilnehmen (s. Kap. 2). Bei allen Organismen werden die genetischen Informationen (in der Form von *Genen*) in DNA-Molekülen gespeichert. Diese Information ist in demselben chemischen Code geschrieben, aus den gleichen chemischen Bausteinen zusammengesetzt, im Wesentlichen von der gleichen chemischen Maschinerie ausgewertet und auf die gleiche Weise repliziert, wenn sich eine Zelle oder ein Organismus fortpflanzt. In jeder Zelle bestehen die langen **DNA**-Polymerketten aus dem gleichen Satz von vier Monomeren, den *Nukleotiden*, aufgereiht in unterschiedlichen Abfolgen (Sequenzen) wie Buchstaben eines Alphabets. Die Information, die in diesen DNA-Molekülen gespeichert ist, wird in einen verwandten Satz von

Frage 1-1 „Leben“ lässt sich leicht erkennen, aber nur schwer definieren. Ein Biologielehrbuch definiert Lebewesen:

1. Sie sind im Vergleich zu unbelebten Gegenständen aus der Natur hoch organisiert.
 2. Sie zeigen Homöostase und halten ein relativ konstantes inneres Milieu aufrecht.
 3. Sie pflanzen sich fort.
 4. Sie wachsen und entwickeln sich aus einfachen Anfangsstadien.
 5. Sie nehmen Energie und Materie aus der Umgebung auf und wandeln sie um.
 6. Sie reagieren auf Reize.
 7. Sie zeigen Anpassungen an ihre Umwelt.
- Prüfen Sie eine Person, einen Staubsauger und eine Kartoffel auf diese Eigenschaften.

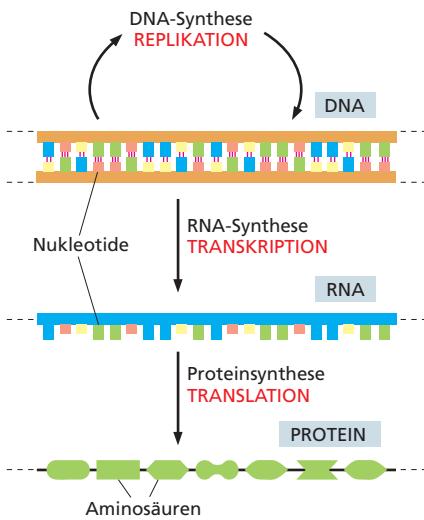


Abb. 1-2 In allen lebenden Zellen fließt die genetische Information von der DNA zur RNA (Transkription) und von der RNA zum Protein (Translation) – eine Organisation, die man das **zentrale Dogma** nennt. Die Nukleotidsequenz in einem bestimmten Abschnitt der DNA (ein Gen) wird in ein RNA-Molekül umgeschrieben (transkribiert), das dann wiederum in die Aminosäurekette eines Proteins übersetzt (translatiert) wird. Es ist nur ein kleiner Teil des Gens, der RNA und des Proteins gezeigt.

RNA genannten Polymeren umgeschrieben oder *transkribiert*. Obwohl viele dieser RNA-Moleküle ihre eigenen regulatorischen, strukturellen oder chemischen Aktivitäten besitzen, werden die meisten von ihnen in eine andere Art von Polymeren *translatiert*, die man *Proteine* nennt. Dieser Informationsfluss – DNA über RNA zum Protein – ist von so grundlegender Bedeutung für das Leben, dass er als das zentrale Dogma bezeichnet wird (Abb. 1-2).

Das Aussehen und Verhalten einer Zelle wird größtenteils von ihren Proteinen bestimmt, die als Strukturelemente, chemische Katalysatoren, molekulare Motoren und vieles mehr dienen. Proteine werden aus *Aminosäuren* gebildet und alle Lebewesen verwenden zur Herstellung von Proteinen denselben Satz aus 20 Aminosäuren. Je nach Protein werden die Aminosäuren in unterschiedlicher Reihenfolge verknüpft. Die Aminosäureabfolge – oder Sequenz – verleiht den Proteinmolekülen ihre unverwechselbare dreidimensionale Struktur oder *Konformation*, genauso wie verschiedene Buchstabenabfolgen unterschiedliche Wörter ergeben. Auf diese Weise hat dieselbe elementare biochemische Maschinerie die gesamte Bandbreite an Lebewesen auf der Erde hervorgebracht (Abb. 1-3).

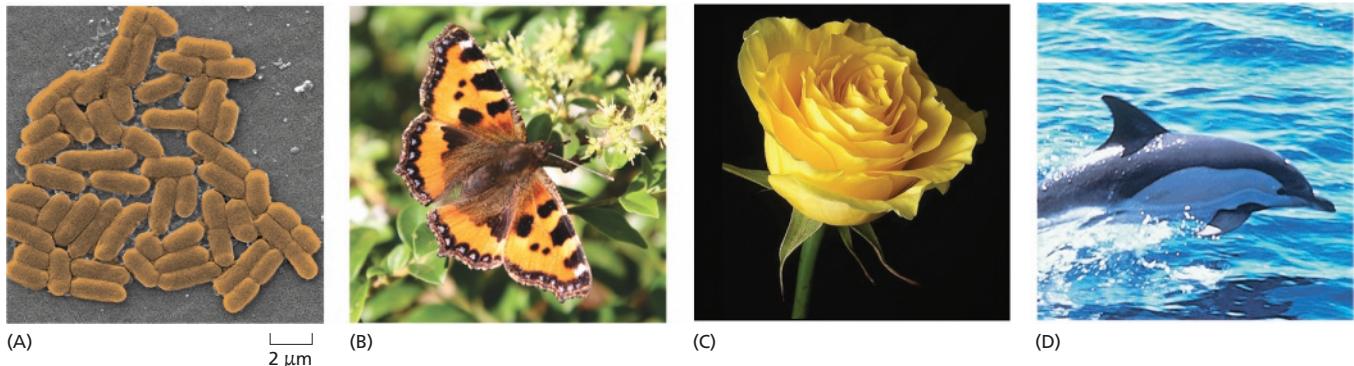


Abb. 1-3 Alle lebenden Organismen sind aus Zellen aufgebaut. (A) Eine Bakterienkolonie, (B) ein Schmetterling, (C) eine Rose und (D) ein Delfin bestehen alle aus Zellen, deren grundlegende Chemie gleich ist und die nach denselben Grundprinzipien arbeiten. (A, freundlicherweise von Janice Carr zur Verfügung gestellt; D, freundlicherweise von Jonathan Gordon, International Fund for Animal Welfare [IFAW], zur Verfügung gestellt.)

1.1.3 Lebende Zellen sind eine sich selbst replizierende Ansammlung von Katalysatoren

Eine der am häufigsten zitierten Eigenschaften von Lebewesen ist ihre Fähigkeit, sich zu reproduzieren. Bei Zellen umfasst dieser Prozess die Duplikation des genetischen Materials und anderer Komponenten und die anschließende Zweitteilung, wodurch ein Paar von Tochterzellen entsteht, die selbst wiederum in der Lage sind, den gleichen Zyklus der Replikation durchzuführen.

Es ist diese besondere Beziehung zwischen DNA, RNA und Proteinen – wie sie das zentrale Dogma beschreibt (siehe Abb. 1-2) – die diese Selbstreplikation möglich macht. DNA enthält Informationen, die letztendlich den Zusammenbau von Proteinen regelt: Die Nukleotidsequenz eines DNA-Moleküls bestimmt die Aminosäuresequenz in einem Protein. Proteine wiederum katalysieren die Replikation der DNA und die Transkripti-

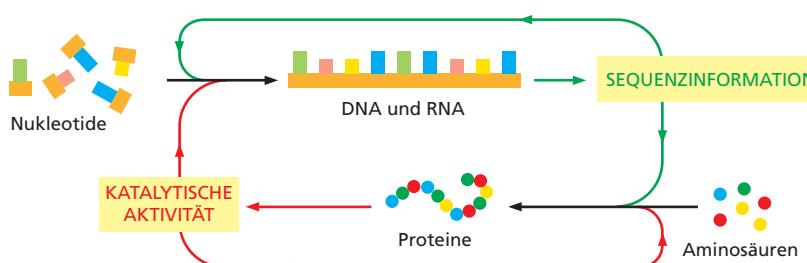


Abb. 1-4 Leben ist ein autokatalytischer Prozess. DNA und RNA stellen die Sequenzinformation (grüne Pfeile) zur Verfügung, die verwendet wird, um Proteine herzustellen und sie selbst zu vervielfältigen. Proteine wiederum stellen die katalytische Aktivität bereit (rote Pfeile), die benötigt wird, um DNA, RNA und sie selbst herzustellen. Zusammen ergeben die Rückkopplungsschleifen das sich selbst vermehrende System, das lebende Zellen mit der Fähigkeit ausstattet, sich selbst zu reproduzieren.

on der RNA, sie sind außerdem an der Translation der RNA in Proteinen beteiligt. Diese Rückkopplungsschleife (*feedback loop*) zwischen Proteinen und Polynukleotiden liegt der Selbstreplikation von Lebewesen zugrunde (Abb. 1-4). Eine ausführliche Erörterung der komplexen gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen DNA, RNA und Proteinen erfolgt in den Kap. 5–8.

Zusätzlich zu ihrer Rolle bei der Polynukleotid- und Proteinsynthese katalysieren Proteine auch eine Vielzahl anderer chemischer Reaktionen, die die Selbstreplikation am Laufen halten, wie es in Abb. 1-4 gezeigt ist. Eine lebende Zelle kann Nährstoffe abbauen und dazu verwenden, daraus sowohl die Bausteine herzustellen, die zur Herstellung von Polynukleotiden, Proteinen und anderen Zellbestandteilen notwendig sind, als auch die Energie zu gewinnen, die benötigt wird, um diese biochemischen Prozesse anzutreiben. Diese lebenswichtigen Stoffwechselvorgänge werden ausführlich in den Kap. 3 und 13 besprochen.

Nur lebende Zellen können diese erstaunlichen Meisterleistungen der Selbstreplikation vollbringen. Viren enthalten ebenso Information in Form von DNA oder RNA, sie können sich aber nicht aus eigener Leistung vermehren. Vielmehr vervielfältigen sie sich, indem sie die Vermehrungsmaschinerie der Zellen, in die sie eindringen, parasitisch ausnutzen. Daher sind Viren nicht wirklich als lebendig zu betrachten. Sie sind sozusagen nur chemische Zombies: Außerhalb ihrer Wirtszellen sind sie inert und inaktiv, sobald sie jedoch Zugang erhalten, können sie eine bösartige Herrschaft ausüben. Den Lebenszyklus von Viren werden wir in Kap. 9 besprechen.

1.1.4 Alle heutigen Zellen stammen von derselben Urzelle ab

Wenn eine Zelle ihre DNA verdoppelt, um sich auf die Zellteilung vorzubereiten, verläuft der Kopiervorgang nicht immer fehlerfrei. Gelegentlich werden die Anweisungen durch *Mutationen* beschädigt, was die Nukleotidsequenz der DNA verändert. Das ist der Grund, weshalb die Tochterzellen der Mutterzelle nicht immer genau gleichen.

Mutationen können Nachkommen mit Verschlechterungen hervorbringen (die Organismen sind weniger gut in der Lage zu überleben und sich zu vermehren) oder mit Verbesserungen (die Organismen sind besser in der Lage zu überleben und sich zu vermehren) oder die Veränderungen verhalten sich neutral (die Organismen sind genetisch zwar verschieden, aber genauso lebensfähig). Der Kampf ums Überleben eliminiert Erstere, begünstigt die Zweiten und toleriert die Dritten. Die Gene der nächsten Generation werden die Gene der Überlebenden sein.

Bei vielen Organismen ist das Vererbungsmuster durch geschlechtliche Fortpflanzung komplizierter, wobei letztendlich zwei Zellen derselben Art miteinander verschmelzen. Die genetischen Karten werden hierbei gemischt und in neuen Kombinationen an die

nächste Generation weitergegeben, um wieder auf ihre Fähigkeit zu überleben und zu reproduzieren getestet zu werden.

Dieses einfache Prinzip von genetischer Veränderung und Selektion, das wiederholt auf Milliarden von Generationen von Zellen einwirkt, ist die Grundlage der **Evolution** – ein Prozess, in dessen Verlauf es allmählich zu einer immer besseren Anpassung der Organismen an ihre Umwelt kommt. Die Evolution liefert eine verblüffende, aber zwingende Erklärung dafür, weshalb sich die heutigen Zellen so stark in ihren grundlegenden Eigenschaften ähneln: Sie haben ihre genetischen Anweisungen alle von derselben Vorläuferzelle geerbt. Diese Urzelle existierte schätzungsweise vor 3,5–3,8 Milliarden Jahren und enthielt vermutlich den Prototyp der universellen Maschinerie des Lebens, das heute auf der Erde vorkommt. Über einen sehr langen Prozess von Mutation und natürlicher Selektion haben sich die Nachkommen dieser Vorläuferzelle allmählich unterschiedlich weiterentwickelt, um so alle Lebensräume auf der Erde mit Organismen zu beleben, die das Potenzial der Maschinerie in einer anscheinend grenzenlosen Vielfalt ausschöpfen.

Frage 1-2 Mutationen sind Fehler in der DNA, die die genetische Information der vorherigen Generation verändern. Man stelle sich eine Schuhfabrik vor. Würden Sie erwarten, dass ein Fehler, d. h. eine unbeabsichtigte Veränderung, beim Kopieren der Schuhform zur Herstellung von besseren Schuhen führt? Begründen Sie Ihre Antwort.

1.1.5 Gene liefern die Anweisungen für die Gestalt, die Funktion und das Verhalten von Zellen und Organismen

Das **Genom** einer Zelle – d. h. die gesamte Sequenz von Nukleotiden in der DNA eines Organismus – bildet ein genetisches Programm, das die Zelle anleitet, wie sie zu funktionieren hat. Bei Embryonen von Pflanzen und Tieren regelt das Genom das Wachstum und die Entwicklung des erwachsenen Organismus mit Hunderten verschiedener Zelltypen. Innerhalb einer Pflanze und eines Tieres können diese Zellen sehr unterschiedlich sein, wie wir in Kap. 20 erörtern werden. Fett-, Haut-, Knochen- und Nervenzellen sind so verschieden, wie es Zellen nur sein können. Trotzdem gehen alle diese *differenzierten Zelltypen* während der Embryonalentwicklung aus einer einzigen befruchteten Eizelle hervor, und alle enthalten identische DNA-Kopien. Ihre unterschiedlichen Eigenschaften beruhen darauf, dass die jeweiligen Zellen ihre genetischen Anweisungen auf verschiedene Weise nutzen. Unterschiedliche Zellen *exprimieren* unterschiedliche Gene, d. h., sie nutzen ihre Gene zur Herstellung von bestimmten RNAs und Proteinen, während sie andere RNAs und Proteine nicht herstellen, und zwar in Abhängigkeit von ihrem inneren Zustand und von den Signalen, die sie und ihre Vorläuferzellen aus ihrer Umgebung empfangen haben – hauptsächlich Signale von anderen Zellen des Organismus.

Die DNA ist also nicht einfach ein Einkaufszettel, der auflistet, welche Moleküle jede Zelle machen muss, und eine Zelle ist nicht einfach eine Ansammlung aller Gegenstände auf dem Zettel. In Abhängigkeit von ihrer Umgebung und ihrer Vorgeschichte kann jede Zelle verschiedene biologische Aufgaben ausführen. Dabei benutzt sie die in ihrer DNA verschlüsselte Information selektiv, um ihre Aktivitäten zu steuern. Später in diesem Buch werden wir im Einzelnen sehen, wie die DNA sowohl die Zellbestandteile bestimmt als auch die Regeln festlegt, wann und wo diese Bestandteile hergestellt werden.

1.2 Zellen unter dem Mikroskop

Wir verfügen heute über eine Reihe von leistungsfähigen Techniken, mit denen wir die Prinzipien entschlüsseln können, die der Struktur und Aktivität von Zellen zugrunde liegen. In den Anfängen der Zellbiologie gab es diese modernen Hilfsmittel noch nicht. Die ersten Zellbiologen begannen, indem sie sich Gewebe und Zellen einfach nur anschauten. Dann brachen oder schnitten sie sie auf und versuchten, ihr Inneres zu erforschen. Was sie sahen, war für sie völlig verwirrend: ein Haufen winziger Objekte, deren Zusammenhang mit den Eigenschaften eines Lebewesens wie ein unergründliches Geheimnis erschien. Dennoch war diese Art der visuellen Untersuchung der erste Schritt zum Ver-