

# Einführung in die Zelle

Was bedeutet es eigentlich, zu „leben“? Menschen, Petunien und Algen sind allesamt lebendig – Steine, Sand und Wind dagegen nicht. Was aber sind die grundlegenden Eigenschaften, die Lebewesen von unbelebter Materie unterscheiden?

Die Antwort beginnt mit einer Tatsache, die Biologen heute als selbstverständlich betrachten, die jedoch bei ihrer Entdeckung vor 170 Jahren eine Revolution in der Denkweise darstellte. Alle Lebewesen bestehen aus **Zellen** – kleinen, membranumhüllten Einheiten, die mit einer konzentrierten wässrigen Lösung von großen und kleinen Molekülen gefüllt sind und die außergewöhnliche Fähigkeit besitzen, Kopien von sich selbst anzufertigen, indem sie wachsen und sich teilen. Die einfachsten Lebensformen sind Einzelzellen. Höhere Organismen wie z. B. der Mensch sind Zellgemeinschaften, die durch Wachstum und Teilung aus einer einzigen Ursprungszelle hervorgehen. Jedes Tier, jede Pflanze und jeder Pilz 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, und wir müssen uns folglich mit *Zellbiologie* beschäftigen, um eine Antwort auf die Frage zu finden, was Leben ist und wie es funktioniert. Mit einem tieferen Einblick in Struktur, Arbeitsweise, Verhalten und Evolution von Zellen können wir beginnen, die großen historischen Fragestellungen über das Leben auf der Erde anzugehen: seinen rätselhaften Ursprung, seine überwältigende Vielfalt und sein Vordringen in jede erdenkliche Umgebung. Gleichzeitig kann uns die Zellbiologie auch Antworten auf Fragen zu uns selbst liefern: Woher stammen wir? Wie entwickeln wir uns aus einer einzigen befruchteten Eizelle? Wie stark unterscheidet sich jeder Einzelne von uns von allen anderen Menschen auf der Erde? Warum werden wir krank, warum altern wir und sterben?

Wir beginnen dieses Kapitel damit, uns die vielfältigen Gestalten anzusehen, die Zellen aufweisen können, und werfen einen kurzen Blick auf die chemische Maschinerie, die allen Zellen gemein ist. 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 größten Eiche.

## 1.1 Gleichheit und Vielfalt von Zellen

Zellbiologen sprechen häufig von „der Zelle“, ohne sich auf eine bestimmte Zelle festzulegen. Aber Zellen sind nicht alle gleich, sondern können äußerst verschieden sein. Auf der Welt gibt es schätzungsweise mindestens 10 Millionen – vielleicht sogar 100 Millionen – verschiedene Arten von Lebewesen. Bevor wir uns

### Gleichheit und Vielfalt von Zellen

- Zellen variieren enorm in ihrem Aussehen und ihren Funktionen
- Die grundlegende Chemie ist bei allen lebenden Zellen sehr ähnlich
- Alle heutigen Zellen stammen von derselben Urzelle ab
- Gene liefern die Anweisungen für die Gestalt, die Funktion und das komplexe Verhalten von Zellen

### Zellen unter dem Mikroskop

- Die Erfindung des Lichtmikroskops führte zur Entdeckung von Zellen
- Zellen, Organellen und sogar Moleküle können im Mikroskop betrachtet werden

### Die Prokaryotenzelle

- Prokaryoten sind die vielseitigsten Organismen
- Die Prokaryoten gliedern sich in zwei Domänen: Eubakterien und Archaea

### Die Eukaryotenzelle

- Der Zellkern ist der Informationsspeicher der Zelle
- Mitochondrien erzeugen aus Nahrung nutzbare Energie für die Zelle
- Chloroplasten fangen Energie aus Sonnenlicht ein
- Innere Membranen schaffen intrazelluläre Kompartimente mit unterschiedlichen Funktionen
- Das Cytosol ist ein konzentriertes wässriges Gel aus großen und kleinen Molekülen
- Das Cytoskelett ermöglicht gerichtete Bewegungen der Zelle
- Das Cytoplasma ist keineswegs statisch
- Eukaryotenzellen könnten als Räuber entstanden sein

### Modellorganismen

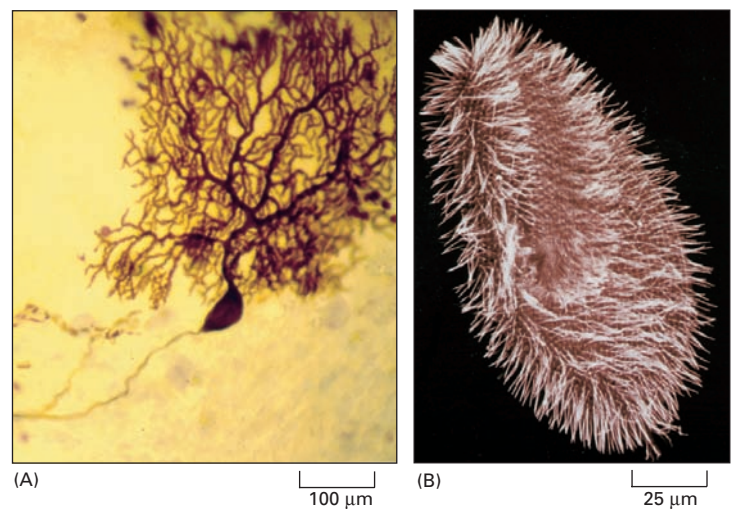
- *E. coli* ist das bevorzugte Studienobjekt der Molekularbiologen
- Sprosshefe ist eine einfache Eukaryotenzelle
- *Arabidopsis* wurde aus 300.000 Arten als Modellpflanze ausgewählt
- Das Tierreich wird bei den Modellorganismen durch eine Fliege, einen Wurm, eine Maus und den Menschen repräsentiert
- Der Vergleich von Genomsequenzen deckt das gemeinsame Erbe des Lebens auf

eingehender mit Zellbiologie beschäftigen, müssen wir zunächst eine Bestandsaufnahme machen: Was haben die Zellen all dieser Arten gemeinsam, das Bakterium mit den Zellen des Schmetterlings, der Rose oder des Delfins? Und worin unterscheiden sie sich?

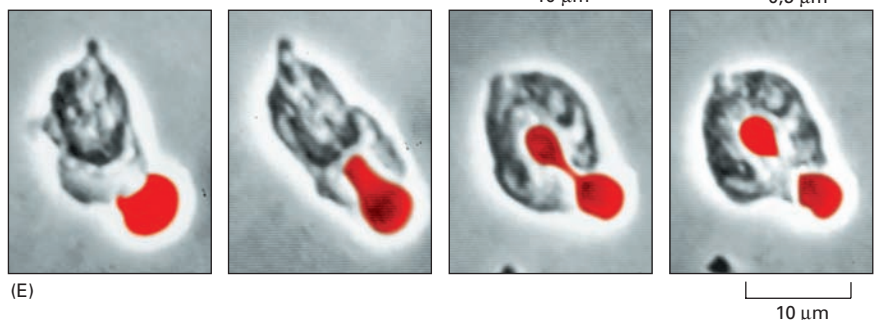
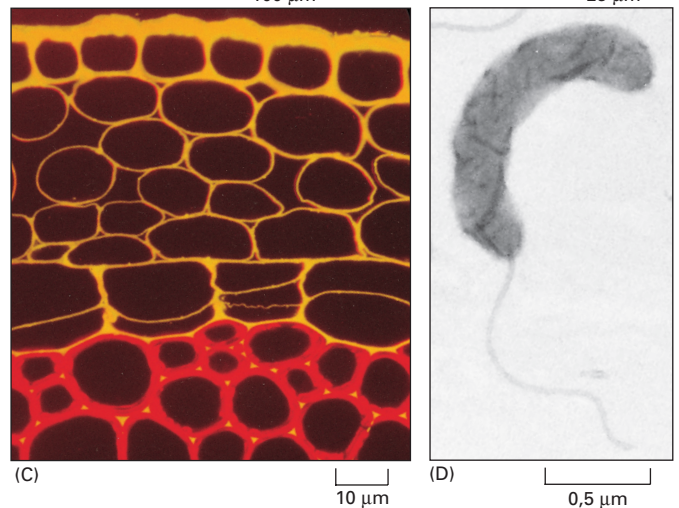
### 1.1.1 Zellen variieren enorm in ihrem Aussehen und ihren Funktionen

Beginnen wir mit der Größe. Eine Bakterienzelle – etwa ein *Lactobacillus* in einem Stück Käse – ist nur ein paar Mikrometer ( $\mu\text{m}$ ) lang. Ein Frosch-Ei, das ebenfalls eine einzelne Zelle ist, hat einen Durchmesser von 1 Millimeter. Würde man sie maßstabgerecht vergrößern, sodass der *Lactobacillus* so groß wie ein Mensch wäre, hätte das Frosch-Ei eine Höhe von 800 Metern.

Genauso stark variieren Zellen in ihrem Aussehen und ihren Funktionen. Betrachten Sie die Zellen in Abb. 1-1. Eine typische Nervenzelle im Gehirn ist



**Abb. 1-1** Einige Beispiele für die Vielfalt von Zellformen und -größen. (A) Eine Nervenzelle aus dem Kleinhirn, dem Gehirnteil, der Bewegungsabläufe kontrolliert, besitzt eine riesige Anzahl verzweigter Fortsätze, über die sie Signale von 100.000 anderen Nervenzellen empfängt. (B) *Paramecium* (Pantoffeltierchen). Dieses Protozoon stellt eine große einzelne Zelle dar, die mithilfe schlagender Cilien an ihrer Oberfläche schwimmt. (C) Schnitt durch einen jungen Pflanzenstiel. Cellulose (rot) und Pektin (orange) sind zwei typische Bestandteile der pflanzlichen Zellwand. Die äußerste Zellschicht befindet sich am oberen Rand des Photos. (D) Ein winziges Bakterium, *Bdellovibrio bacteriovorus*, das sich mithilfe einer einzigen endständigen Geißel fortbewegt. Dieses Bakterium greift andere, größere Bakterien an, tötet sie und ernährt sich von ihnen. (E) Eine menschliche weiße Blutzelle (ein neutrophiler Granulocyt), die sich einem roten Blutkörperchen nähert und es verschlingt. (A, mit freundlicher Genehmigung von Constantino Sotelo; B, mit freundlicher Genehmigung von Anne Fleury, Michel Laurent und André Adoutte; D, mit freundlicher Genehmigung von Murry Stein; E, mit freundlicher Genehmigung von Stephen E. Malawista und Anne de Boisfleury Chevance.)



unwahrscheinlich lang. Sie besitzt einen dünnen Fortsatz, der 10.000-mal länger als dick ist. An ihm wandern die elektrischen Signale entlang, die die Zelle ausstrahlt. Signale von anderen Zellen empfängt sie über zahlreiche kürzere Fortsätze, die von ihrem Zellkörper entspringen wie die Zweige eines Baums. Ein Pantoffeltierchen (*Paramecium*) in einem Tropfen Teichwasser sieht aus wie ein U-Boot und ist mit Zehntausenden von *Cilien* bedeckt. Diese haarähnlichen Anhängsel bewegen die Zelle durch ihr wellenförmiges Schlagen voran, wobei sie sich um ihre Längsachse dreht. Eine Zelle in der Oberflächenschicht einer Pflanze ist unbeweglich und umgibt sich mit einer festen Wand aus Cellulose sowie einer äußeren Hülle aus wasserundurchlässigem Wachs. Ein *Bdellovibrio*-Bakterium ist ein würstchenförmiger Torpedo, der von einer rotierenden korkenzieherartigen *Geißel* angetrieben wird. Sie befindet sich am hinteren Ende der Zelle und wirkt wie ein Propeller. Ein neutrophiler Granulozyt oder Makrophage im Körper eines Tiers kriecht durch die Gewebe, nimmt ständig andere Formen an und verschlingt Gewebstrümmer, fremde Mikroorganismen und tote oder sterbende Zellen.

Manche Zellen umgeben sich nur mit einer dünnen *Plasmamembran*, andere bedecken diese Membranhülle noch mit einer Schleimschicht, einer festen *Zellwand* oder hartem mineralisierten Material, wie man es beispielsweise im Knochen findet.

Zellen variieren auch sehr stark in ihren chemischen Bedürfnissen und Aktivitäten. Manche benötigen Sauerstoff, um zu leben – für andere ist er tödlich. Einige brauchen als Rohstoffe nur wenig mehr als Luft, Sonnenlicht und Wasser – andere benötigen ein komplexes Gemisch aus Molekülen, die von anderen Zellen hergestellt werden. Manche machen den Eindruck von spezialisierten Fabriken, die bestimmte Substanzen wie Hormone, Stärke, Fett, Latex oder Farbstoffe produzieren. Einige – beispielsweise Muskelzellen – sind Motoren, die Kraftstoff verbrennen, um mechanische Arbeit zu verrichten, oder Stromgeneratoren, wie die abgewandelten Muskelzellen im Zitteraal.

Manche Abwandlungen spezialisieren eine Zelle so stark, dass sie keine Chance mehr hat, irgendwelche Nachkommen zu hinterlassen. 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 sehr 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. Mit der Erfindung des Mikroskops wurde deutlich, dass Pflanzen und Tiere Ansammlungen von Zellen sind, dass Zellen auch als unabhängige Organismen existieren können und dass in der Regel jede Zelle für sich betrachtet lebt – in dem Sinn, dass sie wächst, sich vermehrt, Energie von einer Form in eine andere umwandelt, auf ihre Umwelt reagiert usw. Doch während es relativ leicht fiel, Leben zu erkennen, war es viel schwieriger, zu sagen, in welcher Weise sich alle Lebewesen ähneln. Lehrbücher mussten sich damit zufrieden geben, Leben mithilfe abstrakter Begriffe wie Wachstum und Fortpflanzung zu definieren.

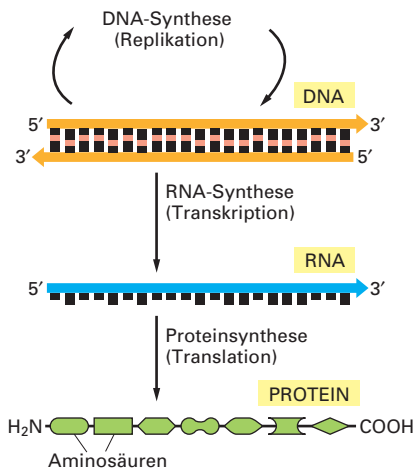
#### Frage 1-1

„Leben“ lässt sich leicht erkennen, aber nur schwer definieren. Im Lexikon wird Leben definiert als „Der Zustand, der Lebewesen von toten Organismen und anorganischer Materie unterscheidet. Er ist hauptsächlich charakterisiert durch Stoffwechsel, Wachstum sowie die Fähigkeit zur Fortpflanzung und zur Reaktion auf Reize“. Biologielehrbücher sind meistens etwas ausführlicher – dort steht häufig als Definition für Lebewesen:

1. Sind im Vergleich zu unbelebten Gegenständen aus der Natur hoch organisiert.
  2. Zeigen Homöostase und halten ein relativ konstantes inneres Milieu aufrecht.
  3. Pflanzen sich fort.
  4. Wachsen und entwickeln sich aus einfachen Anfangsstadien.
  5. Nehmen Energie und Materie aus der Umgebung auf und wandeln sie um.
  6. Reagieren auf Reize.
  7. Zeigen Anpassungen an ihre Umwelt.
- Prüfen Sie sich selbst einen Staubsauger und eine Kartoffel auf diese Eigenschaften.



#### 4 Einführung in die Zelle



**Abb. 1-2** In allen lebenden Zellen fließt die genetische Information von der DNA zur RNA (Transkription) und von der RNA zum Protein (Translation). Insgesamt bezeichnet man diese Prozesse als Genexpression.

Die Entdeckungen der Biochemie und Molekularbiologie ließen dieses Problem auf höchst eindrucksvolle Weise verschwinden. Auch wenn sie bei äußerer Betrachtung sehr verschieden erscheinen, sind sich alle Lebewesen im Inneren grundsätzlich ähnlich. Wir wissen, dass Zellen im Hinblick auf ihre Chemie für die meisten grundlegenden Funktionen die gleiche Maschinerie besitzen. Alle Zellen bestehen aus denselben Molekülsorten, die an denselben chemischen Reaktionstypen teilnehmen (s. Kapitel 2). Bei allen Lebewesen werden die genetischen Anweisungen in DNA-Molekülen mit demselben chemischen Code gespeichert, im Wesentlichen von der gleichen chemischen Maschinerie ausgewertet und auf die gleiche Weise vervielfältigt. In jeder Zelle bestehen die langen DNA-Ketten aus den gleichen vier Bausteinen, den sog. *Nucleotiden*. Sie sind wie Buchstaben eines Alphabets in unterschiedlichen Abfolgen hintereinander aufgereiht, um verschiedene Informationen zu speichern und weiterzugeben. In allen Zellen werden die in der DNA verschlüsselten Anweisungen in die chemisch verwandten RNA-Moleküle umgeschrieben oder *transkribiert* (s. Abb. 1-2). Die in den RNA-Molekülen enthaltenen Nachrichten werden dann in eine andere chemische Form übersetzt oder *translatiert*. Dabei entstehen *Protein*-Moleküle, die als Strukturelemente, chemische Katalysatoren oder molekulare Motoren das Verhalten der Zellen bestimmen. Alle Lebewesen verwenden zur Herstellung von Proteinen die gleichen 20 *Aminosäuren*. Je nach Protein werden die Aminosäuren in unterschiedlicher Reihenfolge verknüpft. Die Aminosäureabfolge – oder Sequenz – verleiht den Proteinmolekülen ihre unverwechselbaren chemischen Eigenschaften, genauso wie verschiedene Buchstabenabfolgen unterschiedliche Wörter ergeben. Auf diese Weise wurde die gesamte Bandbreite an Lebewesen von der gleichen grundlegenden biochemischen Maschinerie hervorgebracht (s. Abb. 1-3). Eine ausführliche Erörterung der Struktur und Funktion von Proteinen, RNA und DNA erfolgt in den Kapiteln 4 bis 8.



(A)



(B)



(C)



(D)

**Abb. 1-3** Alle lebenden Organismen sind aus Zellen aufgebaut. Ein Bakterium, ein Schmetterling, eine Rose und ein Delfin bestehen alle aus Zellen, deren grundlegende Chemie gleich ist und die nach denselben Grundprinzipien arbeiten. (A, mit freundlicher Genehmigung von Tony Brain und Science Photo Library; B, mit freundlicher Genehmigung von J. S. und E. J. Woolmer, © Oxford Scientific Films; C, mit freundlicher Genehmigung der John Innes Foundation; D, mit freundlicher Genehmigung von Jonathan Gordon, IFAW.)

Wenn Zellen die Grundeinheiten des Lebens sind, kann folglich nichts weniger als eine Zelle wirklich lebendig genannt werden. Beispielsweise enthalten Viren einige der Molekültypen, die auch in Zellen vorkommen. Sie können sich aber nicht aus eigener Leistung vermehren, sondern vervielfältigen sich, indem sie die Vermehrungsmaschinerie der Zellen, in die sie eindringen, parasitisch ausnutzen. Daher sind Viren sozusagen chemische Zombies – außerhalb ihrer Wirtszellen sind sie inaktiv, sobald sie jedoch Eintritt erhalten, können sie eine bösartige Herrschaft ausüben.

### 1.1.3 Alle heutigen Zellen stammen von derselben Urzelle ab

Eine Zelle vermehrt sich, indem sie zunächst ihre DNA verdoppelt und sich anschließend teilt. Dabei gibt sie an jede der beiden Tochterzellen eine Kopie der genetischen Anweisungen weiter, die in der DNA verschlüsselt sind. Das ist der Grund, weshalb in der Regel die Tochterzellen der Mutterzelle gleichen. Die Vervielfältigung läuft jedoch nicht immer perfekt ab, d. h. die Anweisungen werden manchmal abgewandelt. Durch Veränderungen in der DNA (*Mutationen*) können Nachkommen mit veränderten Eigenschaften entstehen. Prinzipiell sind drei Auswirkungen möglich: (1) Die Veränderung hat negative Auswirkungen, d. h. die Organismen sind weniger gut in der Lage, zu überleben und sich zu vermehren. (2) Die Veränderungen wirken positiv, d. h. die Organismen sind besser in der Lage, zu überleben und sich zu vermehren oder (3) die Veränderungen verhalten sich neutral, d. h. 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. Geschlechtliche Fortpflanzung, bei der letztendlich zwei generative Zellen derselben Art miteinander verschmelzen und ihre DNA vereinigen, macht das Abstammungsmuster komplizierter. Die genetischen Karten werden hierbei gemischt und in neuen Kombinationen, die wieder auf ihren Überlebenswert getestet werden, an die nächste Generation weitergegeben.

Dieses einfache Prinzip von Mutation, Neumischung im Verlauf der sexuellen Fortpflanzung und Selektion, das auf Millionen von Generationen von Zellen bzw. Organismen einwirkte, ist die Grundlage der **Evolution**. In ihrem Verlauf kommt es allmählich zu einer immer besseren Anpassung der Organismen an ihre Umwelt. 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 bis 3,8 Milliarden Jahren und enthielt vermutlich den Prototyp der universellen Maschinerie des Lebens, das heute auf der Erde vorkommt. Die weitere Entwicklung, geprägt durch Mutation und Selektion, führte schließlich zu einer Fülle von Lebensformen, die alle Lebensräume eroberten und das Potenzial der Maschinerie in einer grenzenlosen Vielfalt ausschöpften.

### 1.1.4 Gene liefern die Anweisungen für die Gestalt, die Funktion und das komplexe Verhalten von Zellen

Das **Genom** einer Zelle – d. h. die gesamte Bibliothek genetischer Information, die in ihrer DNA gespeichert ist – bildet ein genetisches Programm, das die Zelle anleitet, wie sie zu funktionieren hat. Das gilt natürlich ebenso für die Hunderte verschiedener Zelltypen von Pflanzen und Tieren, die sehr unterschiedlich sein können, wie wir in Kapitel 21 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

#### 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 eines Schuhenentwurfs zur Herstellung von besseren Schuhen führt? Begründen Sie Ihre Antwort.

