

## 8.1 Evolution und Verwandtschaft



### Lernsituation

Kann die Welt, so komplex wie sie heute ist, wirklich durch Zufall entstanden sein? Die Evolutionstheorie ist selbst in die Diskussion gekommen.

Kreationisten und Anhänger des Intelligent Design lehnen die Evolutionstheorie ab und glauben stattdessen an einen Schöpfungs-

mythos. Umso wichtiger ist es, sich mit den Belegen für die Evolution und deren Mechanismen auseinanderzusetzen — und auch die strenge Kontrollinstanz der Evolution kennenzulernen: die Selektion.

### Leitfragen

Was sind die Grundaussagen der Evolutionstheorie?

Wie entstehen neue Arten?

Welche Belege gibt es für die Evolutionstheorie?

Haben Menschen und Affen gemeinsame Vorfahren?

1 Evolutionstheorien

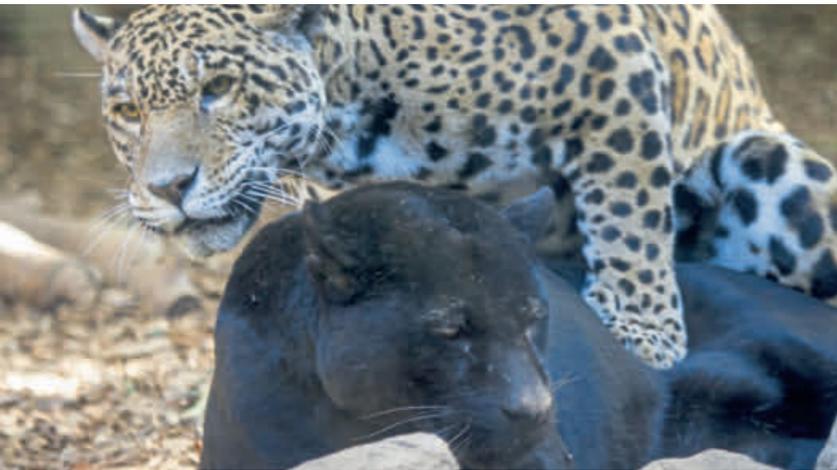
2 Artbildung

3 Untersuchungsmethoden

4 Evolution des Menschen



## Das Hardy-Weinberg-Modell



1 Farbvarianten beim Leoparden

Wie kann man von einer Population auf den Genpool schließen? Das Auszählen von Phänotypen führt nicht direkt zum Ziel, da sich homozygote und heterozygote Merkmals-träger häufig nicht unterscheiden.

### Die Zusammensetzung von Populationen

Der Mathematiker GODFREY H. HARDY (1877–1947) und der Genetiker WILHELM WEINBERG (1862–1937) lieferten Beiträge zur Lösung des Problems. Als Beispiel soll eine Population aus Leoparden und Panthern betrachtet werden. Panther sind keine eigene Art, sondern eine natürlich vorkommende Farbvariante des Leoparden (Abb. 1). Das Merkmal gelbe Grundfarbe ist dominant, schwarz ist entsprechend rezessiv. Die dunkle Färbung entsteht durch die vermehrte Produktion des Farbstoffs Melanin, die Erscheinung wird *Melanismus* genannt. Die heterozygoten Träger des dominanten Merkmals gelb geflecktes Fell sind nicht von den homozygoten zu unterscheiden.

Die Anwendung des nach den Entwicklern benannten *Hardy-Weinberg-Modells* setzt voraus, dass in der betrachteten Population keine Evolution stattfindet. Der Genpool verändert sich also nicht. Nur in einer solchen *idealen Population* gelten die statistischen Annahmen des mathematischen Modells.

### Genetisch konstante Populationen

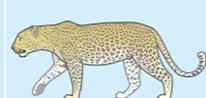
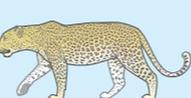
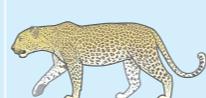
Unter einer idealen Population versteht man eine Population, in der sich über die Generationen die Allelhäufigkeiten nicht verändern. Sie hat folgende Eigenschaften:

- Es findet keine Selektion statt. Alle Phänotypen haben die gleiche reproduktive Fitness.
- Die Allelhäufigkeiten verändern sich nicht durch Zu- oder Abwanderung (*Migration*).
- Es finden keine Mutationen statt.
- Es gibt keine Gendrift. Das gilt annähernd für Populationen, die so groß sind, dass sich zufällige Schwankungen nicht auswirken.
- Die Verpaarung erfolgt zufällig (*Panmixie*). Es findet also keine sexuelle Selektion durch Bevorzugung oder Benachteiligung eines Phänotyps statt.

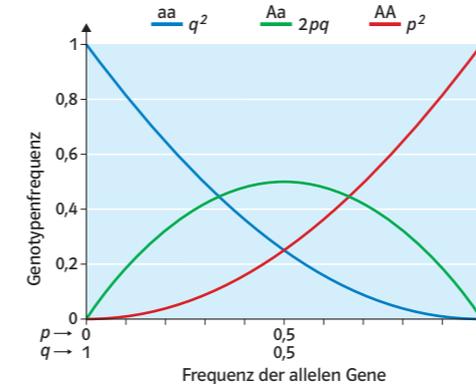
In der idealen Leopardenpopulation kommt das allele Gen A für gelb mit der Häufigkeit  $p$  und das Gen a für schwarz mit der Häufigkeit  $q$  vor (Abb. 2). Da es kein weiteres alleles Gen gibt, gilt:  $p + q = 1$

Wenn die Gameten die beiden allelen Gene entsprechend ihrer statistischen Wahrscheinlichkeit enthalten, ergibt sich nach dem Kreuzungsschema für die nächste Generation:

Häufigkeit von AA =  $p^2$   
 Häufigkeit von Aa =  $2pq$   
 Häufigkeit von aa =  $q^2$

	A p	a q
A p=0,6	 $p^2=0,36$	 $pq=0,24$
a q=0,4	 $pq=0,24$	 $q^2=0,16$

2 Häufigkeiten in der Population



3 Häufigkeiten nach dem Hardy-Weinberg-Modell

Da keine weiteren Genotypen möglich sind, ergibt die Summe der Genotypen:  $p^2 + 2pq + q^2 = 1$

Mit diesen beiden Beziehungen kann man durch Auszählen der Träger des rezessiven Merkmals auf die Häufigkeit der allelen Gene und der Genotypen schließen. Allel- und Genotypenhäufigkeit stehen nach dem Hardy-Weinberg-Modell in einem bestimmten Verhältnis (Abb. 3).

### Anwendungen

Eine ideale Population, in der keine Evolution stattfindet, gibt es real nicht. Dennoch erlaubt die Betrachtung interessante Schlüsse auf reale Populationen.

Wenn in einer Population die Bedingungen der genetisch konstanten Population weitgehend erfüllt sind und man die Träger des rezessiven Merkmals erkennt, kann man durch Auszählen der Phänotypen auf die Häufigkeit aller Genotypen und Allele auch in den Folgegenerationen schließen. Die Häufigkeit der Träger des rezessiven Merkmals beträgt  $q^2$ . So lässt sich z. B. auch die Häufigkeit eines Allels für eine genetisch bedingte Erkrankung in einer Bevölkerung abschätzen.

Weichen die Häufigkeiten von Phänotypen und Genotypen zwischen den Generationen von den nach dem Hardy-Weinberg-Modell

zu erwartenden Werten ab, kann man daraus schließen, dass nicht alle Bedingungen der idealen Population erfüllt sind. Dann kann gezielt nach Faktoren wie Selektion oder Allelfluss geforscht werden.

Bei vielen Tierarten kommen Albinos vor (Abb. 4). Ursache ist ein mutiertes Gen, das homozygot zum Ausfall der Farbstoffbildung führt. In manchen Fällen ist die Überlebenschance der Albinos extrem gering, da sie Beutegreifern vor der Geschlechtsreife zum Opfer fallen. Wenn dennoch mit konstanter Häufigkeit Albinos vorkommen, kann man auf die Mutationsrate schließen.



4 Eichhörnchen-Albino

### AUFGABEN >>

- 1 Erklären Sie, warum im Leopardenbeispiel in den folgenden Generationen keine Veränderung der Phänotypenhäufigkeiten zu erwarten ist.
- 2 Ermitteln Sie mithilfe von Abb. 3 die Häufigkeit aller Genotypen in einer Population mit dem maximalen Anteil heterozygoter Individuen.
- 3 Errechnen Sie mithilfe des Hardy-Weinberg-Modells, in welchem Ausmaß Jäger die Häufigkeit des Auftretens von Melanismus bei Rehen senken, wenn sie dunkle Rehe vor der Geschlechtsreife erlegen. Gehen Sie dabei von einer idealen Population aus, in der eines von hundert Tieren ein dunkles Fell hat.

# Material

## Genpool und Evolution

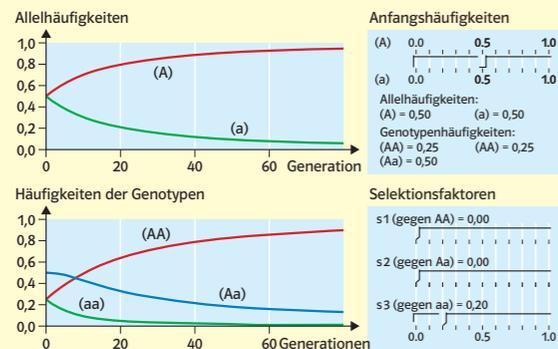
In der idealen Population werden alle Evolutionsfaktoren, wie z.B. die Selektion, ausgeschlossen. In realen Populationen

### Selektion in einer realen Population

Durch Einführung eines Selektionsfaktors  $s$  kann man mithilfe des Modells der genetisch konstanten Population die Entwicklung einer Population in den Folgegenerationen berechnen bzw. mit einem Computerprogramm simulieren. Er gibt an, um wie viel weniger ein Genotyp sich reproduziert als statistisch zu erwarten ist. Der Wert kann zwischen 0 und 1 liegen. Betrachtet man ein System mit den Allelen  $A$  und  $a$ , dann gilt für die Häufigkeiten ( $\cdot$ ):  
 $(A) = p$ ;  $(a) = q$  und  $p + q = 1$   
 $(AA) = p^2$ ;  $(Aa) = 2pq$ ;  $(aa) = q^2$  und  $p^2 + 2pq + q^2 = 1$

Nach Einführung des Selektionsfaktors  $s$  gegen den Phänotyp mit dem Genotyp  $aa$  ergibt sich:  
 $p^2 + 2pq + q^2 - sq^2 = 1 - sq^2$

Ist die reproduktive Fitness von  $aa$  z.B. um 20% geringer als die von  $AA$  und  $Aa$ , hat  $s$  den Wert 0,2 und  $sq^2$  gibt die Reduktion dieser Phänotypen an. In der Simulation wird die reduzierte Population dann proportional auf die Ausgangsgröße hochgerechnet.



1 Ergebnisse einer Simulation

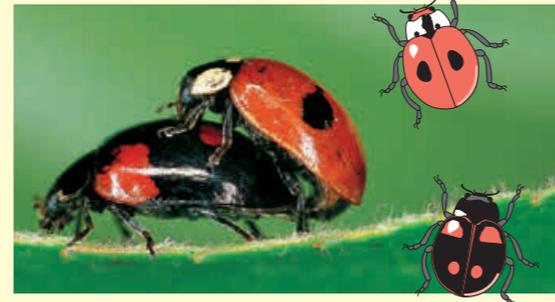
### AUFGABEN >>

- 1 Beschreiben Sie die Ergebnisse der Simulation (Abb. 1).
- ⊖ 2 Erklären Sie die Tatsache, dass nach 100 Generationen das Allel  $a$  immer noch in der Population vorhanden ist.
- 3 Stellen Sie eine Hypothese zur weiteren Entwicklung der Population für den Fall auf, dass sich die Lebensbedingungen so verändern, dass der Phänotyp mit dem Genotyp  $aa$  einen Selektionsvorteil hat.

weisen die Phänotypen jedoch meist eine unterschiedliche reproduktive Fitness auf. Es findet also Selektion statt.

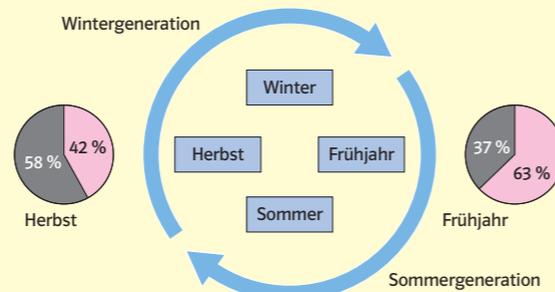
### Balancierter Polymorphismus

Beim einheimischen Zweipunktmarientkäfer kommen Farbvarianten mit schwarzer und roter Grundfarbe vor (Abb. 2).



2 Zweipunktmarientkäfer

Die Färbung ist genetisch bedingt. Bei der Partnerwahl ist keine Bevorzugung bekannt. Im Jahr treten meist zwei Generationen mit unterschiedlicher Häufigkeit der Phänotypen auf (Abb. 3). Dieses Phänomen wird als *balancierter Polymorphismus* bezeichnet.



3 Generationen beim Marienkäfer und Häufigkeit der Formen

### AUFGABEN >>

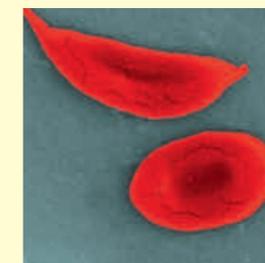
- ⊖ 4 Erklären Sie die Ergebnisse der Auszählungen in Frühjahr und Herbst (Abb. 3) mit populationsgenetischen Ursachen.
- 5 Messungen der Körpertemperatur von Tieren der beiden Formen ergaben bei gleicher Umgebungstemperatur einen höheren Wert für die schwarzen Tiere. Leiten Sie daraus eine mögliche Erklärung für die Häufigkeit der Phänotypen in den Jahreszeiten ab.

### Der Heterozygotenvorteil

Die Analyse eines Genpools kann zu Ergebnissen führen, die auf den ersten Blick überraschend sind.

#### Sichelzellanämie

Bei manchen Menschen tritt bei körperlicher Anstrengung oder unter Sauerstoffmangel eine Veränderung von Roten Blutzellen (*Erythrocyten*) ein. Statt normal rund sind die Erythrocyten dann sichelartig geformt (Abb. 4). Daher wird die Erkrankung *Sichelzellanämie* genannt.



4 Rote Blutzellen - Normal- und Sichelform

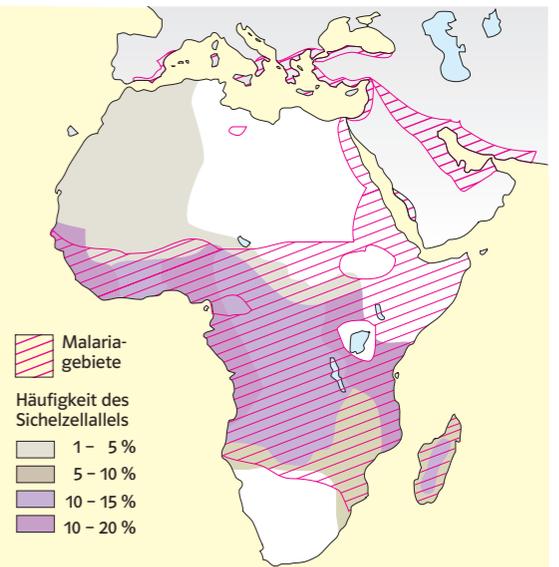
Bei Personen mit Sichelzellanämie findet man statt des Hämoglobins  $A$  eine veränderte Form des roten Blutfarbstoffs Hämoglobin, das Hämoglobin  $S$ . Ursache ist ein mutiertes Gen. Sichelzellanämie tritt bei homozygoten Trägern des allelen Gens ( $aa$ ) auf.

Da Sichelzellen weniger flexibel sind, können sie bei vermehrtem Auftreten kleine Blutgefäße verstopfen und so zu Durchblutungsstörungen führen. Die Folge sind Organschäden. Da der Körper als Gegenmaßnahme vermehrt Erythrocyten abbaut, sinkt die körperliche Leistungsfähigkeit der Betroffenen. Ohne medizinische Hilfe erreichen sie nicht das Erwachsenenalter.

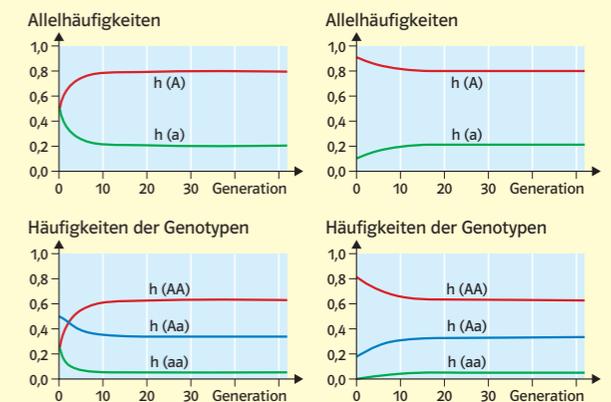
#### Sichelzellanämie in Malaria-gebieten

In einigen Gebieten Afrikas kommt das Sichelzellularallel überdurchschnittlich häufig vor (Abb. 5). Die Verbreitung des Sichelzellularallels stimmt auffällig mit dem Auftreten von *Malaria* überein. Diese Krankheit wird durch den Erreger *Plasmodium* hervorgerufen, der sich in Erythrocyten vermehrt. Er wird durch Mücken von Mensch zu Mensch übertragen. Malaria gehört zu den häufigsten Erkrankungen in tropischen und subtropischen Regionen und führt unbehandelt häufig zum Tod.

Untersuchungen ergaben, dass Träger des Sichelzellularallels wesentlich seltener infiziert werden. Personen mit heterozygotem Genotyp leiden nicht unter Sichelzellanämie und sind weniger durch Malaria gefährdet. Sie genießen einen *Heterozygotenvorteil*. In einem bestimmten Malaria-gebiet hat man den Selektionsfaktor abgeschätzt: 0,2 gegen Personen ohne Sichelzellularallel und 0,8 gegen homozygote Träger des Sichelzellularallels. Zwei Simulationen zur Selektion führten zu den in Abb. 6 dargestellten Ergebnissen.



5 Verbreitung von Malaria und des Sichelzellularallels

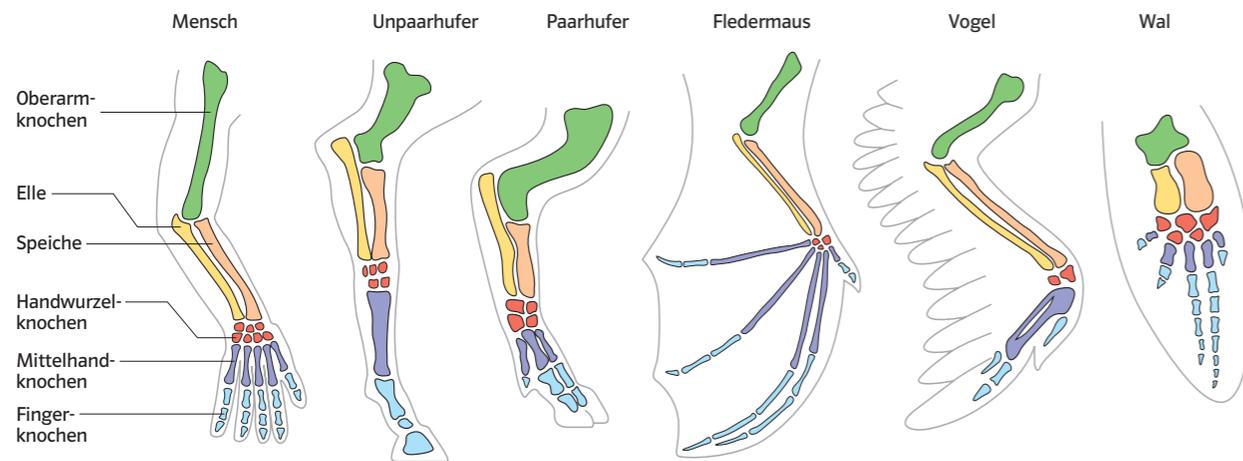


6 Simulationsergebnisse

### AUFGABEN >>

- ⊖ 6 Erläutern Sie, welche Häufigkeit für das Sichelzellularallel in einer Bevölkerung ohne medizinische Betreuung außerhalb von Malaria-gebieten vorgelegen hat.
- 7 Vergleichen Sie die Ergebnisse der beiden Simulationen (Abb. 6) und ziehen Sie Schlussfolgerungen daraus.
- ⊖ 8 Unter medizinischer Betreuung erreichen etwa 85% der homozygoten Träger des Sichelzellularallels das Erwachsenenalter. Erläutern Sie die Auswirkungen auf den Genpool.

## Verwandschaft erkennen

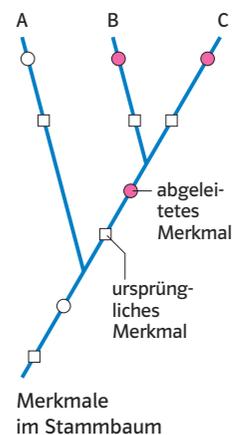


1 Vorderextremitäten von Wirbeltieren

Wir neigen dazu, ähnliche Arten als nah verwandt anzusehen, denn Ähnlichkeit beruht oft auf einem gemeinsamen Vorfahren. Aber Ähnlichkeiten können auch andere Gründe haben. Sie können auf gleiche Anpassungen oder Zufall zurückgehen. Die stammesgeschichtliche Verwandtschaft, manchmal versehen mit einer Zeitachse, kann man in einem Stammbaum darstellen. Ein Stammbaum beruht auf ausgewählten Merkmalen heute lebender oder ausgestorbener Organismen (s. Randspalte). Welche Merkmale lassen aber sicher auf Verwandtschaft schließen?

### Abgeleitete Merkmale

Innerhalb der Wirbeltiere gibt es eine Gruppe vierbeiniger Wirbeltiere (*Tetrapoden*), deren Extremitäten verblüffende Ähnlichkeiten in der Anordnung der Knochen aufweisen (Abb. 1). Auf einen Oberarmknochen folgen zwei Unterarmknochen und mehrere Handwurzelknochen. Es handelt sich hierbei um ein genetisch bedingtes Merkmal, das der gemeinsame Vorfahr dieser Wirbeltiere erstmals aufwies. Ein neu auftretendes Merkmal heißt *abgeleitetes Merkmal* und ist ein Hinweis auf Verwandtschaft (s. Randspalte). Alle Wirbeltiere mit solchen Extremitäten werden daher als Tetrapoden zusammengefasst.



### Ursprüngliche Merkmale

Innerhalb der Tetrapoden ist die oben beschriebene Extremität jedoch nicht neu, sondern ein *ursprüngliches Merkmal*. Es taugt nicht zur Untersuchung der Verwandtschaft innerhalb der Gruppe. Stattdessen müssen neue, abgeleitete Merkmale gesucht werden. Beispielsweise sind weniger Zehen das Ergebnis einer Rückbildung und damit ein abgeleitetes Merkmal innerhalb der Tetrapoden. Huftiere mit einem Zeh pro Fuß bilden zum Beispiel die Gruppe der Unpaarhufer.

### Homologe Organe

Die Abfolge der Knochen in der Tetrapodenextremität ist auffallend ähnlich. Es gibt jedoch keine Notwendigkeit, ausgerechnet fünf Zehen auszubilden. Vier oder sechs Zehen wären ebenso denkbar. Es ist daher sehr unwahrscheinlich, dass diese Anordnung der Knochen mehrfach zufällig in dieser Form entstanden ist. Vielmehr ist anzunehmen, dass der gemeinsame Vorfahr bereits solche Extremitäten mit fünf Zehen hatte. Organe, die auf einen gemeinsamen Vorfahren zurückzuführen sind, nennt man *homologe Organe*. Das Beispiel der Extremitäten von Tetrapoden zeigt, dass homologe Organe bei verwandten Lebewesen in Abhängigkeit von den Umweltbedingungen im Verlauf der

Evolution abgewandelt werden können. Die Zunahme der Unterschiede bezeichnet man als *Divergenz*.

### Analoge Organe

Die Maulwurfsgrille lebt wie der Maulwurf im Boden und gräbt dort Gänge. Ihre Vorderbeine erinnern stark an die *Grabbeine* des Maulwurfs (Abb. 3). Trotz dieser Ähnlichkeit sind Maulwurfsgrille und Maulwurf nicht nah miteinander verwandt. Die beiden Grabbeine sind ganz unterschiedlich gebaut, da der Maulwurf ein *Innenskelett* und die Maulwurfsgrille ein *Außenskelett* hat. Die Grabbeine gehen nicht auf einen gemeinsamen Vorfahren zurück: Sie sind unabhängig voneinander entstanden. Die Ähnlichkeit der Grabbeine erklärt sich durch deren Funktion.

Zum Graben ist eine schaufelartige Fläche mit kräftigen Zacken sehr vorteilhaft. Nicht zufällig sehen Baggerschaufeln ähnlich aus. Die Ähnlichkeit der Grabbeine beruht nicht auf Verwandtschaft, sondern auf der gleichen Funktion. Ähnliche Organe, die nicht auf einen gemeinsamen Vorfahren zurückgehen, nennt man *analoge Organe*.



3 Maulwurf und Maulwurfsgrille

Aufgrund der ähnlichen Lebensweise im Boden haben sich bei Maulwurf und Grille die Vorderbeine über viele Generationen in ähnlicher Weise verändert. Man spricht auch von einer *konvergenten Entwicklung*. Analoge Organe sind immer das Ergebnis einer konvergenten Entwicklung.

[▶ Variabilität und Anpasstheit]



2 Flügel von Fledermaus und Vogel

## AUFGABEN >>

- 1 Sowohl Maulwurf als auch Maulwurfsgrille haben einen zylinderförmigen Körper. Erklären Sie diese Ähnlichkeit.
- 2 Nennen Sie ein ursprüngliches und ein abgeleitetes Merkmal der Säugetiere.
- 3 Die Flügel von Fledermaus und Vogel bestehen jeweils aus Knochen und einer Flügelfläche (Abb. 2). Erläutern Sie, welche der beiden Strukturen homolog und welche analog sind.