

# Von großen und kleinen Tieren

Von Hans Joachim Schlichting und Bernd Rodewald

## 1 Lebensvorgänge und Körpergröße

Aus biologischer Sicht muß man eigentlich über die Artenvielfalt und den Gestaltenreichtum in der Tierwelt erstaunt sein. Denn die biologischen „Materialien“ und die mikrobiologischen „Baupläne“ sind für alle Tiere gleich.

Bei näherer Betrachtung zeigt sich jedoch, daß einige wesentliche Aspekte dieser Vielfalt durch die unterschiedlichen Körpergrößen der Tiere verständlich werden. Denn von der Größe hängt es ab,

- welche physikalischen Umweltbedingungen für das Tier von vorherrschender Bedeutung sind und
- inwieweit dadurch die Lebensvorgänge des tierischen Organismus festgelegt werden.

Grundlegend für die folgenden Überlegungen ist, daß manche der für das Tier wichtigen physikalischen Faktoren nur vom Volumen (z. B. Schwerkraft, Energie), andere jedoch nur von der Oberfläche oder Querschnittsfläche (z. B. Muskelkraft, Wärmestrom) des betreffenden Körpers abhängen. Da das Volumen  $V$  mit der dritten Potenz der Körpergröße bzw. -länge  $L$ , also wie  $L^3$ , eine Fläche  $A$  (Querschnitt, Oberfläche) aber nur mit dem Quadrat der Körpergröße, also wie  $L^2$  wächst (siehe Abb. 1), kann allgemein festgestellt werden: Das Volumen eines Tieres nimmt mit wachsender Körpergröße „schneller“ zu als eine Fläche. Dieser einfache Sachverhalt hat für Lebewesen weitreichende Konsequenzen:

- Die Lebensbedingungen großer Tiere werden weitgehend durch die masse- bzw. volumenabhängige Schwerkraft, die der kleinen Tiere von den oberflächenabhängigen Reibungskräften bestimmt.
- Die Proportionen großer und kleiner Tiere sind verschieden, da von einer Fläche abhängige Lebensvorgänge (wie Stoffwechsel, Atmung, Temperaturregelung) dem Gesamtvolumen dienen müssen, z.B. beim Aufbau und der Erneuerung von Körpersubstanz, sowie bei der Energieversorgung. Die Energetik eines Tieres ist ebenfalls davon betroffen:
- Der gesamte Organismus muß energetisch versorgt und entsorgt werden, wodurch dessen Volumen ins Spiel kommt. Zu- und Abfuhr von Energie erfolgt

aber durch Oberflächen (des Körpers, einzelner Organe, der Zellen).

- Von der Fortbewegung und manch anderer energetischer Aktivität ist die Gesamtmasse des Tieres (und damit sein Volumen) betroffen. Die dazu nötige Energie wird über die Muskeln bereitgestellt und hängt von deren Querschnittsflächen ab. Auch die bewegungshemmenden Widerstände (z. B. der Luftwiderstand) hängen meist von der Körperoberfläche ab. Im folgenden soll anhand einiger besonders auffälliger Beispiele gezeigt werden, inwiefern wesentliche Eigenschaften von Tieren wie Kompliziertheit des Körperbaus, Warmblütigkeit, Stärke, Schnelligkeit als physikalische Konsequenzen der Körpergröße angesehen werden können.

## 2 Je größer, desto komplizierter

Alle Lebewesen benötigen zur Verrichtung verschiedenster Aktivitäten Energie. Damit Energie frei werden kann, müssen die Nährstoffe mit Sauerstoff in Verbindung gebracht werden. Das geschieht in den körpereigenen Kraftwerken, den Zellen. Sauerstoff und Nährstoffe müssen dazu durch die Zellwände hindurch in die Zellen gelangen. Da die „Durchlaßgeschwindigkeit“ für eine gegebene Fläche einen Maximalwert nicht überschreiten kann, ist die pro Zeiteinheit durch die Zellwand hindurchtretende Menge an Stoffen begrenzt.

Dieser Sachverhalt läßt sich beispielsweise mit Hilfe eines Kaffeefilters experimentell erarbeiten. Aufschlußreich ist bereits die Erfahrung,

- daß pro Zeiteinheit nur eine bestimmte Wassermenge durch eine bestimmte Fläche des Filters hindurchtritt und
- daß sie sich nur durch eine Vergrößerung der Filterfläche steigern läßt.

Die von einer Zelle pro Zeiteinheit benötigte Nährstoffmenge ist offenbar umso größer, je größer die Zelle ist. Sie ist sogar proportional zum Volumen der Zelle. Um dies einzusehen, vergegenwärtige man sich nur, daß die Zelle selbst aus den zugeführten Stoffen aufgebaut werden muß. Wird die Zelle größer, so wächst demnach die benötigte Stoffmenge proportional mit dem Volumen der Zelle. Die pro Zeiteinheit zugeführte Stoffmenge

kann aber nur mit der Oberfläche der Zelle wachsen. Da die Oberfläche „langsamer“ als das Volumen wächst (statt mit „Länge hoch 3“ nur mit Länge hoch 2“), kommt die Versorgung ab einer bestimmten Zellgröße nicht mehr mit (siehe Abb. 1).

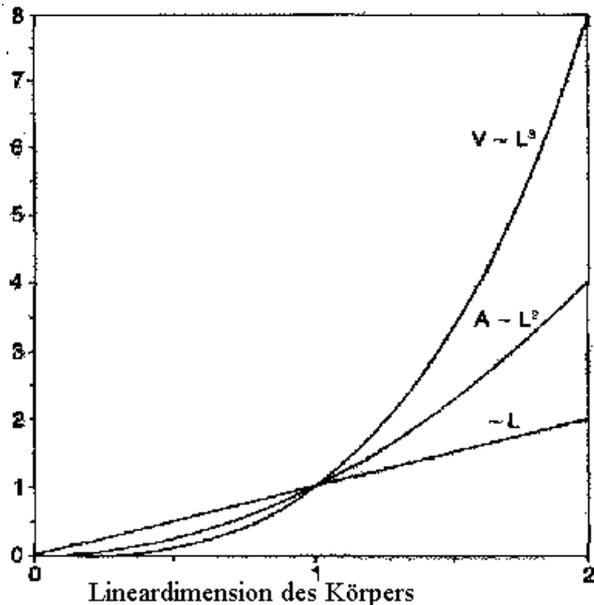


Abb. 1: Veranschaulichung des unterschiedlichen Wachstums der Fläche A, des Volumens V und einer zur Länge L proportionalen Größe eines Körpers. Dabei wurden will-

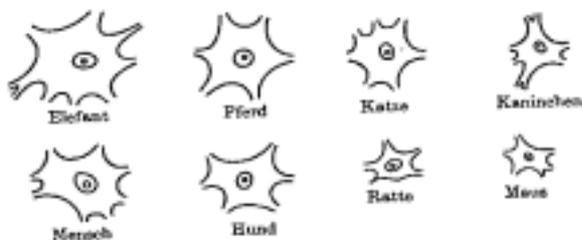


Abb. 2 Die Größe der Zellen (motorische Ganglienzellen von Tieren unterschiedlicher Masse variiert nur minimal (nach Thompson 1983))

Mit den Schülern können diese geometrischen Beziehungen durch Aufgaben veranschaulicht werden (siehe z. B. Aufgabe 1 und 2, Kasten 1).

Die Zelle ist daher zwangsläufig in ihrem Größenwachstum begrenzt. Deshalb findet man, daß Zellen von großen und kleinen Tieren sich nur wenig unterscheiden (siehe Abb. 2). In der Natur wurde das Problem des Größenwachstums daher statt durch weitere Vergrößerung der Zellen durch Zellteilung und Erhöhung der Anzahl der Zellen gelöst. Diese Lösung ist in der Tat genial: Denn die Oberfläche zweier Zellen ist etwa 1,26 mal so groß wie die Oberfläche einer Zelle gleichen Volumens. Sie vermögen daher pro Zeiteinheit ein Viertel mehr an

Stoffen aufzunehmen als die Einzelzelle gleicher Größe.

An dieser Stelle bietet es sich an, entsprechende Aufgaben, bei denen Oberflächen und Volumina von Kugeln berechnet und verglichen werden, durchführen zu lassen.

Größere Lebewesen als Einzeller entstehen also durch den Zusammenschluß mehrerer Zellen. Dadurch ist aber bereits das nächste Problem vorprogrammiert:

Wie müssen die Zellen zusammengefügt sein, damit noch genügend Oberfläche für die Stoffzufuhr freibleibt? Über das einfachste System verfügt wohl der Bandwurm. Bei einer Dicke von nur einem Bruchteil eines Zentimeters besitzt er beispielsweise eine Länge von 60 cm. Dies ist aber nur unter den äußerst speziellen Bedingungen einer den ganzen Wurm umgebenden nährstoffreichen Umgebung möglich. Nur so können Nahrung und Sauerstoff direkt in die Körperzellen gelangen. Weil derartige Bedingungen i. a. nicht vorliegen, muß die Stoffzufuhr mit wachsender Größe der Mehrzeller durch geeignete Hilfssysteme unterstützt werden.

Bei Insekten wird beispielsweise eine ausreichende Sauerstoffzufuhr dadurch garantiert, daß ihr Körper mit Tracheen ausgestattet ist. Das sind den Körper durchziehende Röhren, durch die der Sauerstoff einzelnen Zellverbänden zugeführt wird.

Da aber die durch die Tracheen künstlich vergrößerte Oberfläche nur quadratisch mit der Größe des Tieres, das zu versorgende Volumen gleichzeitig aber kubisch mit der Größe wächst, wird auch hier bald eine Grenze erreicht: „Schon in der Größe eines kleinen Säugetiers würde ein Insekt, ganz aus Tracheen bestehen“ (Gould 1984, S. 146).

Bei noch größeren Tieren als Insekten müssen die Tricks, die Oberflächen-Volumen-Relation zu überlisten, folglich noch raffinierter sein. Daher besitzen Säugetiere innere Organe, die diesem Ziel dienen. Die Lunge ist im wesentlichen ein vielfach gekrümmter Beutel aus Oberfläche, mit dem Zweck, der eingeatmeten Luft genügend Sauerstoff zu entziehen, diesen auf den vom Herzen betriebenen Blutkreislauf zu übertragen und zu allen Körperteilen zu transportieren. So hat beispielsweise die Lunge des Menschen eine Oberfläche von 100m<sup>2</sup> (Haldane 1956, S. 954). Ergänzend dazu besitzen Säugetiere ein komplexes Verdauungssystem, das dafür sorgt, die Nahrungsmittel so aufzubereiten und zu verteilen, daß ebenfalls alle Körperteile ausreichend versorgt werden können. Der für den Nährstoffaustausch wichtige Darm ist so gefaltet, daß er es beispielsweise beim Menschen auf eine Oberfläche von 220m<sup>2</sup> bringt (Urich 1977, S. 45). Folglich sind die höheren Tiere nicht deshalb grö-

ber als die niederen, weil sie komplizierter sind. Sie sind komplizierter, weil sie größer sind (Haldane 1956, S. 954). Das wirft natürlich die Frage auf, warum die Evolution diesen enormen Aufwand nicht gescheut hat, große Tiere und den Menschen hervorzubringen. Eine Antwort darauf dürften in



Abb. 3: Die Kanten dieser Würfel sind 1, 2, 3, und 4 Längeneinheiten, die Stirnflächen 1, 4, 9 und 16 Flächeneinheiten und die Volumina 1, 8, 27 und 64 Raumeinheiten groß

dem evolutionären Vorteil zu sehen sein, daß größere Tiere weniger spezialisiert und von Umwelteinflüssen unabhängiger sind als kleinere. Dies gilt insbesondere für den Menschen. Seine Größe ist offenbar Voraussetzung für die Ausbildung eines genügend großen Gehirns und muß außerdem wohl als entscheidender Faktor dafür angesehen werden, daß es ihm gelang, Werkzeuge zu entwickeln und Feuer zu benutzen (Begründung siehe z.B. bei Went 1968, S. 404 f.).

#### Kasten 1: Je größer desto komplizierter

##### Aufgaben

1. a) Miß die Fläche des Papiers aus, mit dem ein viertel Kilogramm Butter eingewickelt ist.
- b) Welche Fläche muß das Papier mindestens haben, um damit 1/2 kg Butter einzuwickeln zu können? (Stell Dir dazu vor, daß zwei viertel kg übereinandergelegt werden). Erkläre das Meßergebnis!
2. a) Berechne die Oberfläche  $A$  und das Volumen  $V$  eines Würfels (einer Kugel) der Kantenlänge  $L$  (des Radius  $R$ ) von 0,5mm, 2mm, 5mm, 1cm, 2cm, 5cm, 10cm.
- b) Trage  $A$  und  $V$  als Funktion von  $L$  bzw.  $R$  in ein passendes Koordinatensystem ein, indem Du  $L$  bzw.  $R$  als Abszisse und  $A, V$  als Ordinate wählst.

### 3 Folgen der Warmblütigkeit

Ein wesentliches Merkmal höher entwickelter Tiere ist neben der Größe ihre Warmblütigkeit. Warmblütler verfügen über eine weitgehend gleichbleibende Körpertemperatur von etwa 35—40 °C. Da die den Körperfunktionen zugrundeliegenden biochemischen Vorgänge stark temperaturabhängig sind, verleiht eine gleichbleibende Körpertemperatur den Warmblütlern eine von der jeweiligen Umgebungstemperatur unabhängige Handlungsfähigkeit. Warmblütler sind daher stets einsatzbereit, aktiv und flink.

Die Warmblütigkeit hat jedoch ihren Preis: Damit die Körpertemperatur gleich bleiben kann, muß aufgrund des Energieerhaltungssatzes alle dem Körper mit den Nahrungsmitteln zugeführte Energie im zeitlichen Mittel wieder abgeführt werden. Abgesehen von der Verrichtung von Arbeit an der Umgebung geschieht dies vor allem durch die Abgabe von Wärme über die Haut. Man kann daher erwarten, daß diese abgegebene Wärme proportional zur Körperoberfläche ist. Daraus folgen unterschiedliche Probleme für große und kleine Tiere.

Da große Tiere eine im Verhältnis zum Körpervolumen kleine Körperoberfläche besitzen (vgl. Abb. 1), stellt diese einen Energieengpaß dar. Bei hoher Umgebungstemperatur haben große Tiere Mühe, die aufgrund körperlicher Aktivitäten anfallende „Abwärme“ loszuwerden, ohne die Körpertemperatur zu erhöhen. Sie verfügen daher über spezielle Kühlmechanismen, die im Bedarfsfalle in Aktion treten. Dazu zählt beispielsweise die Verdunstungskühlung des Schwitzens beim Menschen und des Hechelns beim Hund.

Ganz anders bei kleinen Warmblütlern. Sie besitzen eine im Verhältnis zum Körpervolumen große Körperoberfläche und verlieren dementsprechend viel Wärme über die Haut. Durch ein relativ dickes Fell wird ihr Körper gegen allzu große Wärmeverluste isoliert. Aber das reicht normalerweise bei weitem nicht aus. Zusätzlich muß der Organismus kleiner Warmblüter sehr viel Wärme erzeugen, um der tödlichen Gefahr einer Erniedrigung der Körpertemperatur zu entgehen. Aufgrund der Energieerhaltung müssen sie daher erheblich mehr Nahrungsmittel zu sich nehmen, als zur bloßen Aufrechterhaltung der Körperfunktionen notwendig wäre. Rein äußerlich macht sich das in dem überdimensional groß erscheinenden Atmungs- und Verdauungssystem kleiner Warmblüter bemerkbar.

Beispielsweise ist eine kleine Maus trotz ihrer guten Isolierung durch ein verhältnismäßig dickes Fell ständig auf Nahrungssuche. Sie muß etwa ein Viertel ihrer Körpermasse an Nahrungsmitteln zu sich nehmen. Ein Ochse benötigt im Vergleich dazu nur einige Prozent der Körpermasse (siehe hierzu die quantitativen Abschätzungen unten sowie die Aufg. im Kasten 2). Müßte eine Maus mit einer derart geringen Nahrungsmenge auskommen, so benötigte sie eine Fellisolierung von etwa 20 cm Dicke, worin sie vollständig verloren ginge. Nähme umgekehrt ein Ochse die spezifische Nahrungsmenge einer Maus zu sich, so müßte er seine Körpertemperatur über die Siedetemperatur hinaus steigern, um die überschüssige Wärme loszuwerden.

Bei noch kleineren Tieren als Mäusen wachsen die Energieschwierigkeiten weiter an, so daß bei Tieren von wenigen Gramm Körpermasse (Spitzmaus, Kolibri) die Grenze für das Prinzip „Warmblüter“ erreicht ist. Kleinere Tiere sind nur noch als „Kaltblüter“ lebensfähig.

Umgekehrt muß natürlich nicht jedes größere Tier ein Warmblüter sein. Ein Frosch beispielsweise ist ein Kaltblüter. Seine Körpertemperatur hängt stark von der Umgebungstemperatur ab. Er benötigt weder ein isolierendes Fell noch muß er so viel fressen, wie es ein Warmblüter seiner Größe müßte. Dafür laufen seine Körperfunktionen im Winter quasi auf Sparflamme ab: er ist dann völlig inaktiv und erwacht erst mit der wärmenden Frühlingssonne allmählich zu „neuem“ Leben.

#### Quantitative Abschätzungen

Die Stoffwechselintensität, d.h. die von einem Tier pro Zeiteinheit mit den Nahrungsmitteln aufgenommene Energie  $P$ , ist proportional zur Körperoberfläche  $A$ :

$$P_T \sim A.$$

Da  $A$  i. a. schwer auszumessen ist, drückt man sie als Funktion der Körpermasse  $m$  aus. Wegen  $A \sim L^2$ ,  $m \sim V \sim L^3$ , mit  $V$  als Körper volumen und  $L$  als Körperlänge bzw. -größe gilt:

$$P_T \sim A \sim m^{2/3} \quad (1)$$

Für den Vergleich von Tieren stark unterschiedlicher Masse hat sich dieser Zusammenhang als zu ungenau erwiesen.

Genauer gilt

$$P_T \sim m^{3/4} \quad (1')$$

(siehe z.B. Kleiber 1967, S. 160 f.).

Diese Beziehung gilt nun aber von der 2g leichten Spitzmaus bis zum 100t schweren Blauwal ziemlich genau.

Kennt man die Daten für ein Tier, so läßt sich im Prinzip die Stoffwechselintensität für jedes andere Tier abschätzen. Zum Beispiel: Ein  $m_{Me} = 70\text{kg}$  schwerer Mensch benötigt in Ruhe (Grundumsatzrate)  $P_{Me} = 80\text{ W}$ . Welchen Verbrauch  $P_{Ma}$  erwartet man von Gl. (1') für eine  $m_{Ma} = 0,21\text{ kg}$  schwere Maus?

$$P_{Ma} = P_{Me} \cdot \frac{m_{Ma}^{3/4}}{m_{Me}^{3/4}} = 0,18\text{ W} \quad (2)$$

Dieses Ergebnis weicht nur wenige Prozent vom tatsächlich gemessenen Wert ab. Für weitere Rechnungen haben wir in Tab. 1 einige Daten zusammengestellt.

#### 4 Klein, aber stark und schnell

Viele Erfahrungen sprechen dafür, daß kleine Tiere vergleichsweise viel stärker sind als große. So vermag bekanntlich eine Ameise eine Last vom Vielfachen ihres Körpergewichts, ein Mensch jedoch al-

Tiere	m[kg]	P[W]	P' [W/kg]	P <sub>T</sub> [W]	Abweichung in %	m <sub>N</sub> [ kg]	m <sub>N</sub> /m in %
Maus	0,021	0,17					
Ratte	0,282	1,36					
Meerschweinchen	0,410	1,70					
Katze	3,00	7,38					
Kaninchen	4,33	8,22					
Hund	6,6	13,93					
Schimpanse	38,0	52,82					
Schaf	46,4	60,78					
Mensch	70,0	80,00					
Kuh	600	384,0					

lenfalls eine Last von der Größe seines Körpergewichts zu heben und zu tragen. Dieser Sachverhalt ist wiederum eine simple Konsequenz der Flächen-Volumen-Relation. Entscheidend für die Muskelstärke und damit für die von einem Tier maximal aufzubringende Kraft sind die Zahl der Muskelfasern und damit die Querschnittsfläche (z. B.) der Beine des Tieres. Mit der Größe der Tiere wächst die Masse des Tieres wie das Körpervolumen, die Querschnittsfläche der Beine aber nur wie die Körperfläche. Die Muskelkraft der Beine wächst demnach ungleich langsamer als die Körpermasse. Das hat folgende Konsequenz: Kleine Tiere besitzen eine im Verhältnis zum Körpervolumen große Körperfläche und damit verhältnismäßig große Muskelquerschnitte. Sie können daher große Kräfte entwickeln, die i. a. über ein „Tragen“ der verhältnismäßig kleinen Körpermasse weit hinaus zu gehen pflegen. Bei ganz kleinen Tieren — z. B. Insekten — stellt man sogar fest, daß die Natur die potentiellen Kraftreserven gar nicht ausnutzt. Sie läßt die Beinquerschnitte dünner ausfallen als man es aufgrund einer an größeren Tieren orientierten Wohlproportioniertheit erwarten würde (siehe Abb. 4). Die Kräfte dieser auf langen „Spinnenbeinen“ manövrierenden Winzlinge erfüllen uns so manches Mal mit großem Erstaunen. Dies Erstaunen ist allerdings nur Ausdruck der Tatsache, daß wir die im Bereich menschlicher Dimensionen gemachten Erfahrungen auf

Tab. 1 Stoffwechselintensitäten einiger Tiere.' Die leeren Spalten können gemäß Aufg. 3 bis 5 ausgefüllt werden (Die gemessenen Werte wurden Kleiber 1967, S. 175 entnommen.)

### Kasten 2: Folgen der Warmblütigkeit

#### Aufgaben:

1. In Tab. 1 sind die gemessenen Stoffwechselintensitäten  $P$  für einige unterschiedlich große Tiere angegeben. Um den relativen Unterschied im Energieverbrauch zu erkennen, muß man  $P$  auf die jeweilige Körpermasse  $m$  der Tiere beziehen, was durch Angabe der sog. spezifischen Stoffwechselintensität  $P' = P/m$  geschieht. Berechne  $P'$  und trage die ermittelten Werte in Spalte 4 von Tab. 1 ein! Deute das Ergebnis!

2. Berechne die Stoffwechselintensitäten  $P_T$  gemäß Gl. (2) für die in Tab. 1 angegebenen Tiere aus deren Masse. Trage die Werte in Spalte 5 von Tab. 1 ein und vergleiche sie mit den gemessenen Werten  $P$  (Spalte 3), indem Du die Abweichungen in Prozent angibst (Spalte 6)! Was sagt das Ergebnis über die Güte von Formel (1') aus?

3. Geht man davon aus, daß 4500 kJ pro Nahrungsmittel vom Tier verwertet werden können, so läßt sich berechnen, wieviel Masse  $m_N$  jedes Tier pro Tag an Nahrungsmitteln zu sich nehmen muß, um seinen Grundumsatz zu decken. Berechne  $m_N$  für die in Tab. 1 angegebenen Tiere und gib an, wieviel Prozent der jeweiligen Körpermasse das sind! Trage die Ergebnisse in Spalte 7 und 8 von Tab. 1 ein!

andere Bereiche übertragen. Was kleine Tiere im Überfluß haben, nämlich „Fläche“, daran mangelt es den großen. In der Tat, je größer ein Tier ist, desto schmerzlicher macht sich das Muskelkraftdefizit aufgrund zu kleiner Querschnitte bemerkbar. Zwar wird versucht, durch ein schnelleres Wachstum der Beinquerschnitte dem entgegenzuwirken. Aber dickere Beine tragen zusätzlich zur Körpermasse bei und erfordern eine zusätzliche Tragkraft, so daß große Tiere bereits viel Energie aufwenden müssen, ihren eigenen Körper zu tragen. Ihr Bewegungsspielraum wird daher schließlich so begrenzt, daß die Natur es unterlassen hat, noch größere als die bekannten hervorzubringen. Hier spielen allerdings noch rein statische Stabilitätsgesichtspunkte eine begrenzende Rolle (siehe z. B. Thompson 1983). Dieser physikalisch bedingten oberen Grenze entspricht keine untere: Bis zur Größe einer Zelle, der kleinsten Lebenseinheit, spielt sich Leben in den vielfältigsten Variationen ab. Eine weitere eindrucksvolle Fähigkeit kleiner Tiere glaubt man in der Schnelligkeit und dem Sprungvermögen zu sehen. Diese Einschätzungen resultieren daraus, daß man unwillkürlich die Sprunghöhe als auch die

Schnelligkeit auf die Körpergröße der Tiere bezieht und mit den entsprechenden eigenen Möglichkeiten vergleicht.

Um die für einen Sprung nötige Hubenergie aufzubringen, muß die Beinmuskulatur der Tiere längs einer bestimmten Beschleunigungsstrecke eine Kraft ausüben. Die Länge der Beschleunigungsstrecke ist offenbar proportional zur Körpergröße des Tieres und die Sprungkraft wird begrenzt durch den Querschnitt der Muskeln und damit durch den Querschnitt der Beine. Mit der Größe des Tieres wächst auch die beim Sprung „hochzuhebende“ Masse. Sie wächst wie das Volumen des Tieres. Im gleichem Maße wächst auch die Sprungenergie des Tieres. Denn die Sprungenergie ist gleich dem Produkt aus Beschleunigungsstrecke und Muskelenergie. Erstere wächst in gleichem Maße wie die Größe des Tieres und letztere wie der zur Fläche des Tieres proportionale Beinquerschnitt, so daß das Produkt aus beiden ebenfalls wie das Volumen des Tieres zunimmt. (Details hierzu: in den quantitativen Abschätzungen unten). Daraus folgt unter Voraussetzung eines ähnlichen Aufbaus aller Tiere, daß die Sprunghöhe unabhängig von der Größe des Tieres ist. *Alle Tiere sollten daher nicht allzu stark voneinander abweichende Sprunghöhen erreichen*

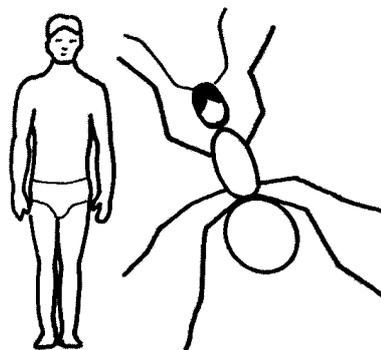


Abb. 4 Vergrößert man eine Ameise auf die Größe eines Menschen, dann werden die relativ unterentwickelten Beinmuskeln der Ameise erkennbar.

(siehe Tab. 2).

Geht man davon aus, daß — wie beim Springen — auch die Laufgeschwindigkeit begrenzt wird durch die aktualisierte Beinenergie, dann gilt ein entsprechendes Ergebnis für das Laufen. *Alle Tiere sollten etwa dieselben Laufgeschwindigkeiten erreichen* (siehe Tab.3).

Wie man den Tabellen 2 und 3 entnimmt, werden diese Ergebnisse insofern bestätigt, als beim Springen trotz einer Variation der Masse um den Faktor 500000 nur eine Sprunghöhenvariation von 5,5 auftritt und beim Laufen trotz einer Variation der Masse um den Faktor 1400 alle Laufgeschwindigkeiten von derselben Größenordnung sind.

Absolut gesehen sind demnach kleine Tiere weder sprunggewaltiger noch schneller als große. Sie sind es aber bezogen auf die jeweils eigene Welt, in der die eigene Körpergröße so etwas wie einen angemessenen Maßstab darstellt.

**Kasten 3: Klein, aber stark und schnell**

*Aufgaben*

- Schätze aus den Sprunghöhen der in Tab. 2 aufgeführten Tiere ab, wie stark deren Beinmuskulatur jeweils im Vergleich zum Menschen entwickelt ist! Hinweis: wegen  $E_M = mgh$  folgt  $E_M(\text{Tier}) / E_M(\text{Mensch}) = m \cdot h(\text{Tier}) / m \cdot h(\text{Mensch})$
- Ermittle aus den Abweichungen der Laufgeschwindigkeit der Tiere (Tab. 3) ähnlich wie in Aufgabe 1, wie stark die Beinmuskulatur der Tiere im Vergleich zu derjenigen des Menschen entwickelt ist.

*Quantitative Abschätzungen*

Die beim Sprung aufzubringende Muskelenergie  $E_M$  ist gleich dem Produkt der Muskelkraft  $F_M$  und der Beschleunigungsstrecke  $s$ , längs der  $F_M$  beim Sprung wirkt

$$E_M = F_M \cdot s. \quad (3)$$

Da  $s$  proportional zur Körpergröße  $L$  ist und  $F_M$  proportional zur Körperfläche  $A \sim L^2$  gilt

**Tab. 2** Sprunghöhen einiger Tiere (nach Bennet-Clark 1977, S. 185)

Tier	Masse [kg]	Sprunghöhe [m]
Leopard	48	2,5
Antilope	45	2,5
Mensch	70	1,2
Kleiner Galago	0,1	2,25
Heuschrecke	$1 \cdot 10^{-4}$	0,45
Rattenfloh	$1,2 \cdot 10^{-8}$	0,1

**Tab. 3** Rekord-Laufgeschwindigkeiten einiger Säugetiere (nach Lin 1982, S 74)

Tier	Masse in kg	Max. Laufgeschw.	
		in [m/s]	[km/h]
Kaninchen	2,5	16	58
Hund	15	16	58
Gepard	21	31	112
Mensch	70	10	36
Löwe	125	22	80
Zebra	280	18	65
Giraffe	1200	14	50
Elefant	3500	11	40

$$E_M \sim A \cdot L \sim L^3 \sim m. \quad (4)$$

Beim Sprung wird  $E_M$  in Höhenenergie

$$E_h = mgh \quad (5)$$

umgesetzt ( $m =$  Körpermasse,  $h =$  Sprunghöhe,  $g =$  Erdbeschleunigung), so daß  $E_M = E_h$ . Wegen Gln. (4) und (5) tritt auf beiden Seiten der Gleichung  $m$  auf, so daß  $h$  unabhängig von der Körpermasse (bzw. -größe) ist.

Tatsächlich beobachtet man bei den Tieren unterschiedliche Sprunghöhen, woraus umgekehrt geschlossen werden kann, daß die Beinmuskulatur unterschiedlich stark entwickelt ist. Damit ist gemeint, daß die angenommene Proportionalität  $A \sim L^2$  nicht durchgängig verwirklicht ist.

Geht man davon aus, daß die beim Sprung aktualisierte Beinenergie  $E_M$  periodisch mit der Schrittfrequenz für das Laufen zur Verfügung gestellt werden kann, so kommt man zu folgender Abschätzung für die Laufgeschwindigkeit  $v$ :

$$E_L = E_M$$

Mit  $E_L = \frac{m}{2} v^2$  und  $E_M \sim m$  nach (4) folgt daraus,  $v = \text{const.}$

**5 Ausblick**

Wir haben an einigen Beispielen gezeigt, daß die Lebensweise von Tieren, sofern sie den Energiehaushalt des Tieres betrifft, unmittelbare Auswirkungen auf die Gestalt, insbesondere die Größe des Tieres haben.

Ein solcher Zusammenhang kann aus rein physikalischen Erwägungen heraus gestellt werden und bedarf keiner speziellen biologischen Kenntnisse. Außerdem können durch eine weitgehend qualitative Argumentation die Anforderung an die Schüler in Grenzen gehalten werden, ohne daß wesentliche inhaltliche Einbußen in Kauf genommen werden müssen. Mit ähnlich geringem Aufwand können über die betrachteten Problemstellungen hinaus weitere Beispiele erarbeitet werden.

Beispielsweise könnte man untersuchen, warum kleine Tiere wie z. B. Mäuse praktisch aus beliebigen Höhen fallen können, ohne sich zu verletzen, während sich große Tiere bereits bei Stürzen aus geringen Höhen erhebliche Verletzungen zuziehen können. Oder man geht z. B. von dem Befund aus, daß jedes Tierherz etwa dieselbe Gesamtzahl von Schlägen aushält, und stellt die Frage, warum große Tiere in der Regel länger leben als kleine. Darüber hinaus wäre es interessant zu untersuchen, warum die Fähigkeit, aus eigener Kraft zu fliegen, nur auf relativ kleine Tiere beschränkt ist (siehe dazu *Schlichting* et al. 1986). Schließlich könnte man die Schüler im Anschluß an diese Erkenntnisse spekulieren lassen, warum die Natur offenbar keinen Aufwand scheute, große, höher entwickelte Tiere

hervorzubringen. Es scheint, als diene der große Körper als Voraussetzung für Intelligenz. Denn wie man heute aus der Computertechnik weiß, benötigt ein effizienter Computer eine astronomisch hohe Zahl von Schaltkreisen, und das läßt sich — wenn man den Vergleich zwischen Gehirn und Computer einmal akzeptiert — nicht im Kopf einer kleinen Ameise realisieren.

## Literatur

- [1] *H. C. Bennet-Clark*: Scale Effects in Jumping Animals. In: Pedley (Ed.): Scale Effects in Animals Locomotion. London:Academic Press 1977
- [2] *S.J. Gould*: Darwin nach Darwin. Berlin: Ullstein 1984
- [3] *J.B. S. Haldane*: Onbeing the right size. In: J. R. Newman (Ed.): The world of Mathematics, Vol. 2, New York: Simon & Schuster 1956
- [4] *M. Kleiber*: Der Energiehaushalt von Mensch und Haustier. Hamburg: Parey 1967
- [5] *H. Lin*: Fundamentals of biological scaling. Am. J. Phys. 50/1, 72 (1982)
- [6] *T. A. McMahon, J.T. Bonner*: Form und Leben. Heidelberg: Spektrum 1985
- [7] *H. J. Schlichting, B. Rodewald*: Ikarus‘ Traum und die aerodynamische Wirklichkeit. PdN-Ph 35/5, 7 (1986)
- [8] *H. J. Schlichting*: Energie und Energieentwertung in Naturwissenschaft und Umwelt. Heidelberg: Quelle & Meyer 1983
- [9] *D’Arcy Thompson*: Über Wachstum und Form: Frankfurt: Suhrkamp 1983
- [10] *K. Urich*: Vergleichende Physiologie der Tiere. Stoff- und Energiewechsel. Berlin, New York: De Gruyter 1977
- [11] *F. W. Went*: The Size of Man: American Scientist 56/4, 40 (1968)