

Energiehaushalt und Körperbau¹

UNTERRICHTSMODELL FÜR DIE SEKUNDARSTUFE 1 (9./10. SCHÜLERJAHRGANG).

H. Joachim Schlichting, Bernd Rodewald

Sachinformation

Auch Lebewesen unterliegen physikalischen Gesetzmäßigkeiten. In diese gehen physikalische Größen ein, die sehr oft vom Volumen oder von einer Fläche (Oberfläche, Querschnittsfläche) des Lebewesens abhängen. Das Volumen V wächst mit der dritten Potenz der Körpergröße bzw. -länge (also wie L^3), eine Fläche A jedoch nur mit dem Quadrat der Körpergröße (also wie L^2). V nimmt daher mit wachsender Körpergröße schneller zu als A (Abb. 1). Dieser einfache geometrische Sachverhalt hat

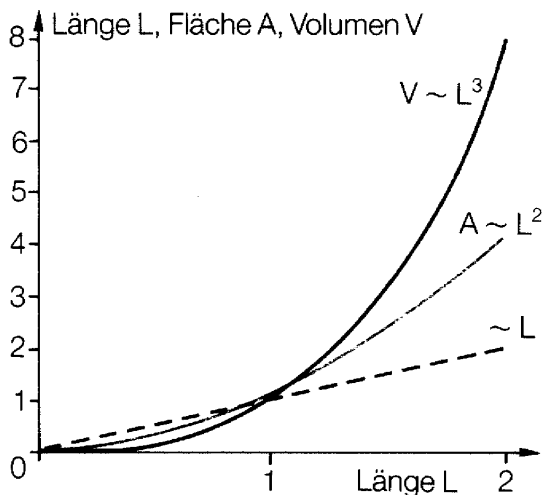


Abb. 2: Proportionales Wachstum von A und V in Abhängigkeit von L

zur Folge, daß alle physikalischen Größen, die durch das Volumen bestimmt sind, ebenfalls schneller mit L wachsen als die Größen, die durch eine Fläche bestimmt sind. Hieraus ergeben sich für Lebewesen weitreichende Konsequenzen, da ihre Existenz u.a. davon abhängt, bestimmte volumen- und flächenabhängige Faktoren in eine Art Gleichgewicht zu bringen. Das vorliegende Unterrichtsmodell gibt hierfür drei Beispiele:

1. Große Tiere sind zwangsläufig komplizierter gebaut als kleine Tiere.

Die einfachsten Tiere sind Einzeller. Die Zelle ist - physikalisch gesehen - ein Kraftwerk, das Energie für die Lebensaktivitäten freisetzt. Dazu müssen Sauerstoff und Nährstoffe durch die Zellwand hindurch in die Zelle 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. Während die pro Zeiteinheit zugeführte Stoffmenge nur mit der Oberfläche der Zelle wachsen kann, nimmt aber die benötigte Stoffmenge proportional mit dem Volumen der Zelle zu, so daß die Versorgung der Zelle ab einer bestimmten Zellgröße nicht mehr gewährleistet ist. In der Natur wurde dieses Wachstumsproblem durch Zellteilung und die Erhöhung der Anzahl der Zellen gelöst. Die Oberfläche zweier Zellen ist etwa 1,26mal so groß wie die Oberfläche einer Zelle gleichen Volumens. Sie können daher pro Zeiteinheit etwa ein Viertel mehr an Stoffen aufnehmen als eine gleichgroße Einzelzelle.

Größere Lebewesen entstehen also durch den Zusammenschluß mehrerer Zellen, während die Größe der Einzelzelle bei großen und kleinen Tieren kaum differiert (Abb. 2). Mit der Mehrzelligkeit wird jedoch der Stoffwechsel zum Problem, da ein direkter Stoffaustausch mit der Umgebung über die Oberfläche für viele Zellen nicht mehr möglich ist. Ihre Versorgung muß daher durch geeignete Hilfsysteme

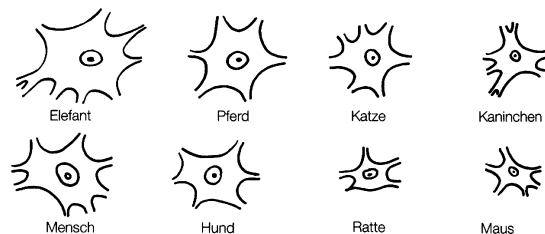


Abb. 1: Relatives Größenverhältnis motorischer Ganglieezellen von Säugetieren (nach Thompson 1983) me unterstützt werden:

¹ In: Unterricht Biologie 10/12 (1986), S. 20- 24.

Bei Insekten wird beispielsweise eine ausreichende Sauerstoffzufuhr dadurch garantiert, daß ihr Körper mit Tracheen ausgestattet ist. Durch die den Körper durchziehenden Röhren wird der Sauerstoff den einzelnen Zellverbänden zugeführt. 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 Säugetieres würde ein Insekt <ganz aus Tracheen> bestehen» (Gould 1984, S. 146).

Die Lunge der Säugetiere ist ein vielfach gekrümmter Beutel, der durch zahlreiche Einstülpungen der Oberfläche entsteht. Die Lunge des Menschen hat z. B. eine Oberfläche vom 100 m^2 (Haldane 1956, S. 954). Der für den Nährstoffaustausch gefaltete Darm besitzt beim Menschen sogar eine Oberfläche von 200 m^2 (Urich 1977, S. 45).

Höhere Tiere sind also nicht deshalb größer, weil sie komplizierter sind, sondern komplizierter, weil sie größer sind (Haldane 1956, S. 954). Der evolutionäre Vorteil dieser Entwicklung kann darin gesehen werden, daß größere Tiere unabhängiger von Umwelteinflüssen sind als kleinere.

2. Warmblütige Tiere regulieren ihre Körpertemperatur durch Mechanismen, die für ihre Körpergröße charakteristisch sind.

Ein wesentliches Merkmal höher entwickelter Tiere ist neben ihrer Größe die Warmblütigkeit. Warmblüter verfügen über eine weitgehend gleichbleibende Körpertemperatur von etwa $35 - 40^\circ\text{C}$. Damit sind sie in ihrer Lebensaktivität unabhängig von der jeweiligen Umgebungstemperatur. 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. Außer durch die Verrichtung von Arbeit geschieht dies vor allem durch die Abgabe von Wärme über die Haut an die Umgebung.

Da große Tiere eine im Verhältnis zum Körpervolumen kleine Körperoberfläche besitzen (vgl. Abb. 1), fällt es ihnen bei hoher Umgebungstemperatur schwer, die anfallende «Abwärme» abzugeben, ohne die eigene Körpertemperatur zu erhöhen. Sie verfügen daher über spezielle Kühlmechanismen, wie z. B. das Schwitzen des Menschen und das Hecheln des Hundes. Dagegen besitzen kleinere Warmblüter eine im Verhältnis zum Körpervolumen große Körperoberfläche und verlieren daher viel Wärme über die Haut. Sie müssen die Wärmeverluste durch geeignete Maßnahmen verringern. Daher ist ihr Körper durch eine dicke Fett- oder Fell-

schicht isoliert. Dieses reicht jedoch nicht aus. Darüberhinaus muß der Organismus kleinerer Warmblüter sehr viel Wärme produzieren, um der tödlichen Gefahr einer starken Erniedrigung der Körpertemperatur zu entgehen. Deshalb müssen sie erheblich viel mehr an Nahrungsstoffen zu sich nehmen, als zum Erhalt der Körperfunktion notwendig wäre. Dies zeigt sich in dem unproportional groß erscheinenden Atmungs- und Verdauungssystem kleiner Warmblüter.

So muß z.B. eine Maus etwa ein Viertel ihrer Körpermasse an Nahrungsmitteln zu sich nehmen. Ein Ochse benötigt im Vergleich dazu nur einige Prozent der Körpermasse. Müßte eine Maus mit einer derart geringen Nahrungsmenge auskommen, so benötigte sie eine Fellisolierung von etwa 20 cm Dicke. 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 aber nicht jedes größere Tier ein Warmblüter sein. Ein Frosch beispielsweise ist ein Kaltblüter, dessen Körpertemperatur von der Umgebungstemperatur abhängt. Deshalb kann er im Winter auch nicht aktiv sein; erst die wärmende Frühlingssonne weckt in ihm neues Leben.

3. Bezogen auf ihre Körpergröße sind kleine Tiere kräftiger als große.

Kleine Tiere sind vergleichsweise viel stärker als große. So vermag eine Ameise eine Last vom Vielfachen ihres Körpergewichts, ein Mensch ohne Training aber höchstens den Betrag seines Körpergewichts zu heben.

Entscheidend für die Muskelstärke eines Tieres ist die Zahl der Muskelfasern und damit die Querschnittsfläche z. B. der Beine. Mit der Größe wächst jedoch die Masse eines Tieres wie das Körpervolumen, die Querschnittsfläche der Beine dagegen nur wie die Körperfläche. Die Muskelkraft der Beine wächst demnach ungleich langsamer als die Körpermasse und nimmt umgekehrt mit kleiner werdender Körpergröße vergleichsweise schnell zu. Kleine Tiere besitzen also bei geringem Körpervolumen relativ große Muskelquerschnitte und können daher große Kräfte entwickeln. Große Tiere dagegen besitzen diesen Kraftüberschuß nicht. Im Grenzfall reichen deren Kräfte gerade aus, um das eigene Gewicht zu tragen und langsame Bewegun-

gen zu vollziehen, was folglich auch ihren Lebensraum begrenzt.

Auch in bezug auf Schnelligkeit und Sprungvermögen hält man kleinere Tiere für überlegen. Diese Einschätzungen resultieren daraus, daß man unwillkürlich sowohl 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. In 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. Daraus folgt unter der Voraussetzung eines ähnlichen Aufbaus aller Tiere, daß die Sprunghöhen unabhängig von der Größe des Tieres sind und nicht allzu stark voneinander abweichen.

Entsprechendes folgt für die Laufgeschwindigkeiten, wenn man davon ausgeht, daß die beim Springen eingesetzte Beinenergie auch die Laufgeschwindigkeit festlegt. Die Daten den Tab. 1 und 2 bestätigen diese theoretische Überlegung insofern, als beim Springen trotz einer Variation der Masse um den Faktor 500 000 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.

Didaktische und methodische Überlegungen

Die folgenden Anregungen zur Behandlung der oben dargestellten Thematik im Unterricht der Sek. I sind relativ offen gehalten, denn:

- die Thematik gehört nicht zum Standardlehrplan der Schulen. Es ist daher nicht festgelegt, in welchem Umfang und in welcher Klassenstufe sie Berücksichtigung findet.
- die Thematik eignet sich wegen der relativ geringen Voraussetzungen aus dem jeweils anderen Fach sowohl als Gegenstand des Physik- als auch des Biologieunterrichts.

Tier	Masse	Sprunghöhe
	in [kg]	in [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. 1: Sprunghöhen einiger Tiere (nach Bennet-Clark 1977, S. 185)

Tier	Masse in [kg]	Max. Laufgeschwindigkeit	
		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

Tab. 2: Rekord-Laufgeschwindigkeiten einiger Säugetiere (nach Lin 1982, S. 74)

Bei der Diskussion des Energiehaushaltes der Tiere beschränkt man sich im Biologieunterricht üblicherweise auf die primären energetischen Phänomene, die unmittelbar Energietransport und -umwandlungen im Organismus betreffen. Im folgenden wird der Energiehaushalt statt dessen im Vergleich verschieden großer Tiere betrachtet und gesehen, daß er bei größeren Tieren mehr und mehr bestimmt ist durch das Problem, die

Oberfläche im Verhältnis zum Volumen zu vergrößern. Dieses Problem ist so weitgehend, daß man Gestalt und Lebensweise verschieden großer Tiere als unmittelbare Konsequenzen eines «geregelten Energiehaushalts» ansehen kann. Vor der Durchführung der hier beschriebenen Unterrichtseinheit sollten daher die Schüler die Grundlagen des Energiehaushaltes bei Mensch und Tier zumindest in groben Zügen kennen (vgl. z. B. Schwarzmaier in diesem Heft). Insbesondere sollen sie wissen

Muskelkraft

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

$$E_M = F_M \cdot s \quad (1)$$

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

$$E_M \sim A \cdot L \sim L^3 \sim m \quad (2)$$

Beim Sprung wird E_M in Höhenenergie

$$E_h = mgh \quad (3)$$

umgesetzt (m = Körpermasse, h = Sprunghöhe, g = Erdbeschleunigung), so daß $E_M = E_h$. Wegen (2) und (3) 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.

Aus den Sprunghöhen der in Tab. 1 aufgeführten Tiere kann errechnet werden, wie stark deren Beinmuskulatur jeweils im Vergleich zum Menschen entwickelt ist.

$$E_M = mgh \text{ folgt } \frac{E_M(\text{Tier})}{E_M(\text{Mensch})} =$$

[Hinweis:

$$m \cdot h \frac{(\text{Tier})}{m} \cdot h(\text{Mensch})]$$

Auch die Laufgeschwindigkeit ist unabhängig von der Körpermasse (bzw. -größe) der Tiere: Es gilt die Gleichung

$$E_L(\text{Laufenergie}) = \frac{m}{2} v^2 \quad (v = \text{Laufgeschwindigkeit})$$

Aus den Abweichungen der Laufgeschwindigkeit der Tiere (Tab. 2) läßt sich ermitteln, wie stark die Beinmuskulatur der Tiere im Vergleich zu derjenigen des Menschen entwickelt ist.

- daß Mensch und Tier chemische Energien aus den Nahrungsmitteln entnehmen und Energie - vor allem als Wärme - wieder an die Außenwelt abgeben,

- daß die Wärmeabgabe in erster Linie über die Haut der Tiere erfolgt und die von einem Tier an der Umgebung verrichtete Arbeit (Abgabe von Muskelenergie durch Fortbewegung und andere Aktivitäten) vom Querschnitt des Muskels abhängt.

Diese Voraussetzungen können aber notfalls auch in einem Schnellkurs vor der Durchführung der vorliegenden Unterrichtseinheit erarbeitet und in der Unterrichtseinheit selbst durch eine entsprechende Schwerpunktsetzung vertieft werden (vgl. z. B. Schlichting 1983, S. 128 ff).

Unterrichtsverlauf

Groß und klein im Vergleich

1. Unterrichtsabschnitt

Der Lehrer zeigt den Schülern anhand einer Illustration (z. B. Overheadprojektion aus «Gullivers Reisen»), daß Riesen und Zwerge äußerlich gleich aussehen, d. h. gleiche Körperproportionen aufweisen, und sich nur um etwa einen Faktor 10 in der Größe unterscheiden. Mit Hilfe weiterer Folien von real existierenden Lebewesen (Aufsicht- u. Schnittbilder) sowie durch Zusammentragen eigener Beobachtungen und Kenntnisse wird jedoch klar, daß zwischen Aussehen, Körperbau und Verhalten von Tieren um so größere Unterschiede auftreten, je stärker sie sich in ihrer Größe unterscheiden (s. Folie 1):

- Größere Tiere sind plumper gebaut (vgl. z. B. das Skelett eines Lemmings mit dem eines Nilpferdes).
- Größere Tiere sind komplizierter gebaut (vgl. die Längsschnitte durch einen Wurm, ein Insekt und ein Säugetier).
- Kleine Säugetiere haben im Vergleich zu großen einen großen Magen-Darm-Trakt (sie fressen sicher viel!) und ein verhältnismäßig dickes Fell (sie frieren wohl leicht!).
- Kleine Tiere erscheinen flink und schnell.
- Kleine Tiere wie z. B. Heuschrecken können um ein Vielfaches ihrer Körpergröße springen, ein großes Tier oder ein Mensch jedoch nicht.

Diese Unterschiede werden auf der Tafel zusammengetragen und zu Unterrichtsthemen für die folgenden Stunden gebündelt.

Je größer, desto komplizierter

2. Unterrichtsabschnitt

Der Lehrer legt noch einmal die Folie auf, aus der die zunehmende Kompliziertheit größerer Tiere

hervorgeht (vgl. Folie 1). Die Schüler erkennen daran - hier lassen sich auch Bildtafeln und Modelle einsetzen -, daß die zunehmende Kompliziertheit Organe betrifft, durch die die Aufnahme und Abgabe von Sauerstoff bzw. Kohlendioxid und Nahrungsmitteln sowie Exkrementen erfolgt und damit vor allem der Versorgung des Organismus mit Energie dient.

- Einzeller und einfache Vielzeller benötigen noch keine speziellen Vorrichtungen zum Stoffaustausch.
- Insekten besitzen bereits Tracheen zur Sauerstoffversorgung und ein einfaches Verdauungssystem zur Nahrungsmittelverarbeitung.
- Bei Säugetieren kommt zu einem komplizierten Verdauungssystem ein Herz-Lungensystem hinzu.

Lehrer und Schüler diskutieren zunächst den Stoffaustausch an einem Einzeller. Die Stoffe diffundieren durch die Oberfläche der Zelle (ähnlich wie Wasser durch Filterpapier). Die Problematik, daß die benötigte Stoffmenge offenbar proportional zum Volumen der Zelle wächst, während der Zustrom nur proportional zur Oberfläche wachsen kann, machen sich die Schüler anhand des beschriebenen Versuchs klar (Arbeitsblatt 1). Die Aufgaben können ggf. als Hausarbeit aufgegeben werden.

Anhand einer Folie (Abb. 2) demonstriert der Lehrer, daß alle Tiere, ob groß oder klein, fast gleichgroße Zellen haben und das Problem der Oberflächenvergrößerung durch Zellteilung gelöst wird. Die Ausbildung der Organe (Magen-, Darm-, Herz-Lungen-Systeme) kann dann als logische Fortsetzung des «Bemühens» diskutiert werden, zusätzlich Oberfläche zur Versorgung des schnell wachsenden Volumens zu schaffen.

Der «Preis» der Warmblütigkeit

3. Unterrichtsabschnitt

Der Lehrer bringt eine weiße Maus und einen Frosch in den Unterricht mit und läßt die Schüler, die sich trauen, die Tiere anzufassen, ihre Empfindungen berichten. Die anderen Schüler beschreiben die äußerlichen Unterschiede. Zusammen mit den Kenntnissen der unterschiedlichen Lebensweisen ergibt sich z. B. folgende Gegenüberstellung an Tier der Tafel:

Frosch	Maus
- kalt, glatt, glitschig (Kaltblüter);	- warm, weich, mollig (Warmblüter);
- wird selten beim Fangen einer Fliege gesehen;	- wird häufig auf Nahrungssuche angetroffen

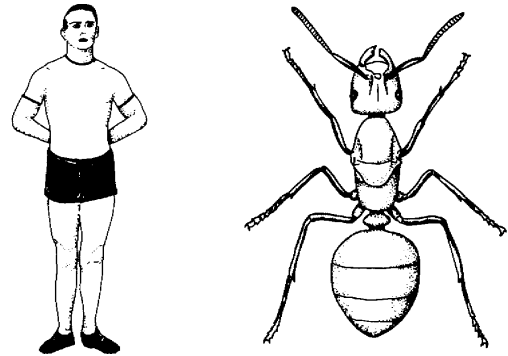


Abb. 3: Muskelkraft bei Mensch und Ameise. Vergrößert man eine Ameise auf die Größe eines Menschen, dann werden die relativ unterentwickelten Beinmuskeln der Ameise sichtbar.

Aus den gesammelten Beobachtungen läßt sich ableiten: Die Maus hält eine relativ hohe Körpertemperatur aufrecht. Sie strahlt viel Energie an die Umgebung ab. Aus diesem Grund muß sie viel fressen (Energie freisetzen) und gleichzeitig durch gute Isolierung (Fell) Wärmeverluste einschränken. Demgegenüber steht der Frosch in Wärmeaustausch mit der Umgebung. Er braucht keine Isolation und daher weniger Nahrung als die etwa gleichgroße Maus.

Diese Überlegungen lassen sich durch einen Blick auf Tab. 3 bestätigen: Der Energiebedarf des Frosches beträgt nur einen Bruchteil desjenigen der etwa gleichgroßen Maus. An dieser Stelle kann über Vor- und Nachteile der Warm-/Kaltblütigkeit gesprochen werden.

Die Gefräßigkeit der Maus erweist sich jedoch nicht generell als typisch für Warmblüter. Die Schüler werden daher aufgefordert, sich über das Freßverhalten ihnen bekannter Warmblüter (z. B. Kaninchen, Kühe, Pferde, Menschen) zu äußern. Sie werden erkennen, daß kleine Tiere (im Vergleich zur Körpermasse) viel, große jedoch wenig fressen. Der Lehrer erklärt, daß hierfür das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen verantwortlich ist. Anhand einfacher Proportionalitäten (s. Kasten) kann dieser Sachverhalt gegebenenfalls sogar quantitativ abgeschätzt und in einer gemeinsamen Modellrechnung bestätigt werden.

Klein, aber stark und schnell

4. Unterrichtsabschnitt

Der Lehrer bringt eine Heuschrecke (Grashüpfer) mit in die Klasse und veranstaltet einen Wettbewerb im «Hochsprung aus dem Stand» zwischen Schülern und Heuschrecke. Es stellt sich heraus, daß beide Parteien etwa gleich hoch springen. Die Schüler neigen in der Regel dazu, die Leistung der winzigen

Heuschrecke als viel höher einzuschätzen, indem sie die Sprunghöhe im Verhältnis zur Körpergröße sehen. Warum springt die Heuschrecke ein Vielfaches ihrer Körpergröße hoch, während der Mensch knapp 1/4 schafft? Der Lehrer gibt den Hinweis, daß für die Sprunghöhe die Zahl der Beinmuskelfasern entscheidend ist, die wiederum proportional zur Beinquerschnittsfläche ist.

Das Stichwort Fläche ist gefallen. Die Abbildung der mit einer Kiefernadel beladenen Ameise und des Lasten tragenden Menschen (Folie 1) erinnert daran, daß die Körperfläche im Vergleich zum Volumen beim Insekt wesentlich größer ist als beim Menschen. Anhand von Abb. 1 machen die Schüler sich klar, daß das beim Sprung hochzuhebende Volumen schneller mit der Größe zunimmt als die Fläche. Deshalb haben kleine Tiere eine verhältnismä-

Tier	Masse in m[kg]	Stoffwechselintensität in [w]
Maus	0,021	0,17
Frosch (bei 25°C)	0,035	0,018
Ratte	0,282	1,36
Meerschweinchen	0,410	1,70
Katze	3,00	7,38
Kaninchen	4,33	9,22
Hund	6,60	13,93
Schimpanse	38,00	52,82
Schaf	46,40	60,78
Mensch	70,00	80,00
Kuh	600,00	384,00

Tab. 3: Stoffwechselintensitäten einiger Tiere (nach Kleiber 1967, S. 175)

ßig große Muskelkraft und springen verhältnismäßig hoch. Anhand von Tab. 1 können die Schüler nachvollziehen, daß die Sprunghöhen verschiedener Tiere nur sehr wenig mit der Masse der Tiere variieren. Als Erklärung kann der Lehrer die Modellrechnung vorstellen, daß alle Tiere sogar gleich hoch springen können sollten (s. Kasten 3 zur Vertiefung). Anschließend wird anhand von Tab. 2 erarbeitet, daß ganz entsprechende Aussagen für die Laufgeschwindigkeit von Tieren gewonnen werden können. Es wird den Schülern nicht schwerfallen,

Schlichting, H. J.: Energie und Energieentwertung in Naturwissenschaft und Umwelt. Quelle & Meyer, Heidelberg, 1983.

diese Entsprechung mit der für Springen und Laufen gleichen Energiequelle, den Beinmuskeln, zu begründen.

Die Stoffwechselintensität

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

Da 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 Körpervolumen und L als Körperlänge bzw. -größe gilt:

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

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

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

Kennt man die Daten für ein Tier, so läßt sich im Prinzip die Stoffwechselintensität für jedes andere Tier abschätzen. Zum Beispiel: Ein $m_{Me} = 70$ kg schwerer Mensch benötigt in Ruhe (Grundumsatzrate) $P_{me} \approx 80$ W. Welchen Verbrauch P_{Ma} erwartet man aufgrund von Gleichung (1') für eine $m_{Ma} = 0,021$ kg schwere Maus?

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

Dieses Ergebnis weicht nur wenige Prozent vom tatsächlichen Wert ab. Weitere Rechnungen lassen sich anhand der Daten von Tab. 3 anstellen.

Literatur

Bennet-Clark, H. C.: Scale Effects in Jumping Animals. In: Pedley (Ed.): Scale Effects in Animal Locomotion. Academic Press, London, 1977.

Gould, S. J.: Darwin nach Darwin. Ullstein, Berlin, 1984.

Haldane, J. B. S.: On being the right size. In: J. R. Newman (Ed.): The world of Mathematics, Vol. 2, Simon & Schuster, New York, 1956.

Kleiber, M.: Der Energiehaushalt von Mensch und Haustier. Parey, Hamburg, 1967.

Lin, H.: Fundamentals of biological scaling. In: Am. J. Phys. 501, 1982, S. 72.

D'Arcy Thompson: Über Wachstum und Form, Suhrkamp, Frankfurt, 1983.

Urich, K.: Vergleichende Physiologie der Tiere. Stoff- und Energiewechsel. De Gruyter, Berlin/ New York, 1977.

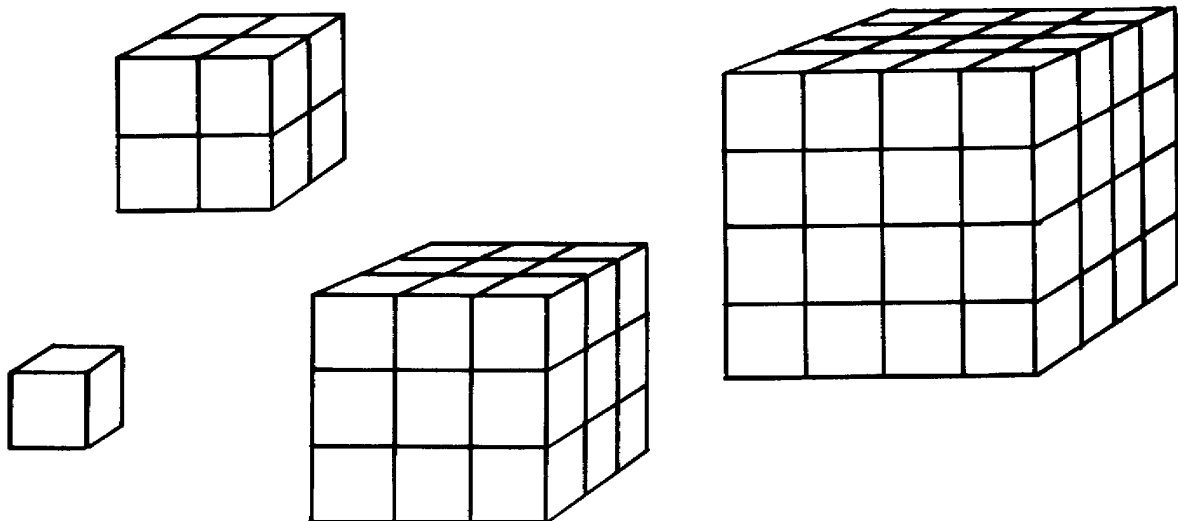
Went, F. W.: The Size of Man. In: American Scientist 56/4, 1968, S. 40.

Arbeitsblatt 1:

Folie

Versuche und Aufgaben zur Oberflächenvergrößerung

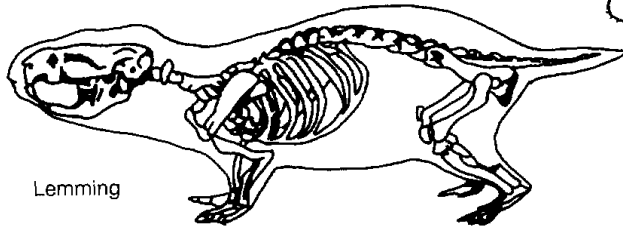
1. Stelle Dir aus Filterpapier Filter verschieden großer Flächen her, z. B. Filter der Flächen A, 2A, 3A usw! Miß die Wassermengen, die in einer bestimmten Zeiteinheit durch die verschieden großen Filter hindurchgehen. Nutze beim Nachfüllen von Wasser jeweils möglichst die ganze Filterfläche.
Wie läßt sich das erklären?
2. a) Miß die Fläche des Papiers aus, mit dem ein halbes Pfund Butter eingewickelt ist.
b) Welche Fläche muß das Papier mindestens haben, um damit ein Pfund Butter einwickeln zu können? (Stell Dir dazu vor, daß zwei halbe Pfund übereinandergelegt werden). Erkläre das Meßergebnis!



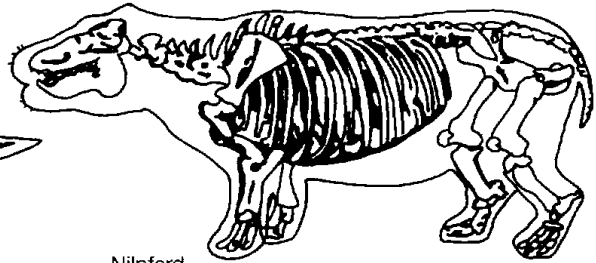
3. Berechne die Oberfläche A und das Volumen V eines Würfels (einer Kugel) der Kantenlänge L (des Radius R) von 0,5 mm, 2 mm, 5 mm, 1 cm, 2 cm, 5 cm, 10 cm.

Tab. 4

Klein und groß



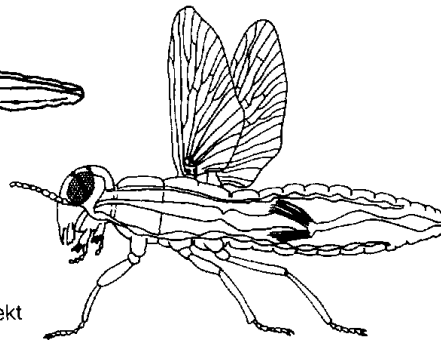
Lemming



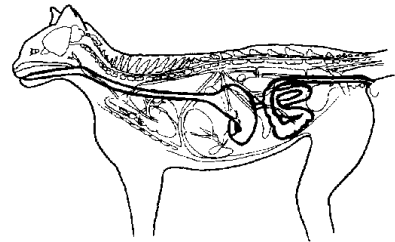
Nilpferd



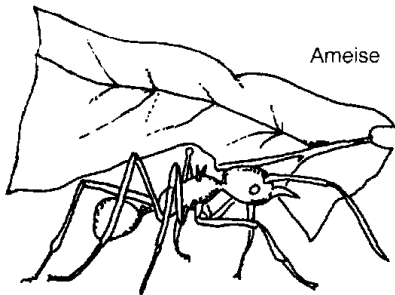
Regenwurm



Insekt



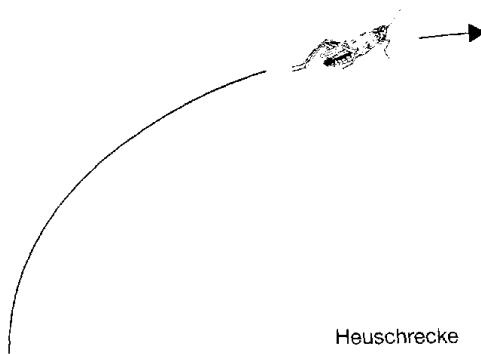
Katze



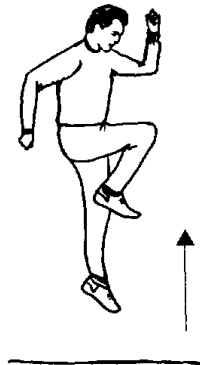
Ameise



Mensch



Heuschrecke



Mensch