

# Atmung, Stoffwechsel und Blutkreislauf

Rainer Müller

*Lehrstuhl für Didaktik der Physik, Universität München  
Schellingstr. 4, 80799 München*

## 1. Allgemeine Zusammenhänge

Ein Thema, das bei Schülerinnen und Schülern allgemein auf großes Interesse stößt, ist der menschliche Körper [1]. Einige Aufgaben aus diesem Themenkreis sollen im folgenden diskutiert werden. Sie betreffen die Themen Atmung, Stoffwechsel (Energieumsatz) und Blutkreislauf.

Jeder weiß, wie oft das Herz des Menschen normalerweise schlägt, wie lange ein Atemzug dauert und wie groß der Energieumsatz des Körpers („Kalorienverbrauch“) ist. Es handelt sich um scheinbare Selbstverständlichkeiten, die man fraglos akzeptiert. Aber warum schlägt das Herz gerade 60 Mal in der Minute? Gibt es einen Grund dafür? Gibt es eine Verbindung zu anderen physiologischen Größen? Und wenn ja, worin besteht sie?

Ein solcher Zusammenhang existiert tatsächlich: Er wird deutlich, wenn man sich den Sauerstoffkreislauf im menschlichen Körper näher ansieht. Atemluft wird eingeatmet. Dabei geht Sauerstoff ins Blut über. Dieser Sauerstoff muss an seinen Bestimmungsort transportiert werden. Dafür sorgt das Herz. Es schlägt und hält das Blut in Bewegung. Im Körper wird der Sauerstoff für die Aktivität des Stoffwechsels gebraucht. Bei jeder Oxidation von Zucker, Fett und Proteinen wird Sauerstoff benötigt. Die Bedingung für das Funktionieren des Stoffwechsels ist, dass der benötigte Sauerstoff in ausreichender Menge dort zur Verfügung steht, wo er benötigt wird. Dafür sorgen Herz und Atmung. Die Stoffwechselaktivität, d. h. der Energieumsatz des Körpers ist also der verknüpfende Faktor, der für das Ineinandergreifen von Blutkreislauf, Atmung und Stoffwechsel verantwortlich ist.

Diese Zusammenhänge sollen nun mit einfachen Abschätzungen quantitativ erschlossen werden. Wir gehen schrittweise vor und betrachten nacheinander (a) den Sauerstoffumsatz des Menschen, (b) seinen Energieumsatz und (c) den Sauerstofftransport im Blut.

### (a) Sauerstoffumsatz

Bei einem normalen Atemzug wird die Kapazität der Lunge nur zu einem sehr geringen Teil genutzt. Obwohl sie beim Erwachsenen ein Gesamtfassungsvermögen von 5 – 6 Litern besitzt, wird bei jedem Atemzug nur ein Luftvolumen von etwa 0,5 l ein- und ausgeatmet. Man kann das Atemzugvolumen näherungsweise bestimmen, indem man versucht, möglichst „normal“ in eine Gefriertüte auszuatmen und anschließend deren Volumen durch Wasserverdrängung bestimmt.

Man zählt leicht nach, dass man etwa 17 Mal pro Minute atmet. Das Atemvolumen pro Minute beträgt also  $17 \text{ min}^{-1} \cdot 0,5 \text{ l} = 8,5 \text{ l/min}$ . Das ist der erste Wert, den wir benötigen. Aus ihm lässt sich leicht ein interessantes Zwischenergebnis gewinnen, nämlich die Antwort auf die Frage, wie viel Luft der Mensch pro Tag ein- und ausatmet:  $24 \cdot 60 \cdot 8,5 \text{ l} = 12240 \text{ l}$ , also über 12000 Liter pro Tag.

Wie viel Sauerstoff nimmt der Körper nun auf? Der Sauerstoffgehalt der Luft liegt bei 21%. Aber nur ein Teil des eingeatmeten Sauerstoff gelangt in den Körper. Die ausgeatmete Luft enthält immer noch 16% Sauerstoff (bekannt aus dem Biologie-Unterricht oder [2]). Das heißt: von den 8,5 Litern pro Minute eingeatmeter Luft sind etwa 5% Sauerstoff, der vom

Körper aufgenommen wird. Das sind  $0,05 \cdot 8,5 \text{ l/min} = 0,425 \text{ l/min}$ . Dies ist das erste Ergebnis unserer Abschätzung:

*Der Mensch setzt etwa 0,4 Liter Sauerstoff pro Minute um.*

Dieses Ergebnis steht in Einklang mit dem Literatur [3], die den Sauerstoffumsatz in Ruhe mit 150 – 300 ml/min und bei leichter Arbeit mit 1000 – 1200 ml/min angibt.

### *(b) Energieumsatz des Menschen*

Was macht der Körper mit dem eingeatmeten Sauerstoff? Er wird zur „Verbrennung“ der Nahrungsmittel benötigt. Der Mensch isst, um den Körper mit Energie zu versorgen. Bei der „Verbrennung“ von Fetten, Proteinen und Kohlehydraten wird aber Sauerstoff benötigt. Z. B. lautet die chemische Reaktionsgleichung für die Oxidation von Glukose (Zucker):



Zur Oxidation von 1 mol Glukose werden also 6 mol Sauerstoff benötigt. Die dabei frei werdende chemische Energie (der physiologische Brennwert) beträgt 2826 kJ. Damit sind Sauerstoffumsatz und Energieumsatz des Menschen gekoppelt. Interessanterweise gilt das nicht nur für diese Reaktion: Das Verhältnis von physiologischem Brennwert und benötigter Sauerstoffmenge ist für Kohlehydrate, Fette und Eiweiße näherungsweise gleich [5].

Damit können wir also vom eben errechneten Sauerstoffumsatz des Menschen auf seinen Energieumsatz schließen. Vorher muss aber noch bestimmt werden, wie vielen Mol Sauerstoff die pro Minute eingeatmeten 0,4 Liter entsprechen.

Das kann auf mehreren Wegen geschehen. Entweder man weiß (oder leitet es aus dem Gesetz idealer Gase her), dass ein Mol eines idealen Gases bei Zimmertemperatur ein Volumen von 22,4 l besitzt. Oder man geht davon aus, dass Sauerstoff die Massenzahl 16 besitzt, 1 mol  $\text{O}_2$  also eine Masse von 32 g besitzt. Die Dichte von Sauerstoff beträgt 1,43 g/l, womit man wieder zum Molvolumen von  $32 \text{ g} / (1,43 \text{ g/l}) = 22,4 \text{ l}$  gelangt. Mit beiden Methoden ergibt sich: 0,425 l Sauerstoff entsprechen einer Stoffmenge von 0,019 mol.

Wie wir gesehen haben, kann der Körper bei der Glukoseoxidation aus 6 mol Sauerstoff eine Energie von 2826 kJ gewinnen. Mit dem eben ermittelten Sauerstoffumsatz schließen wir, dass der Energieumsatz des Körpers pro Minute  $0,019 \text{ mol/min} \cdot 2826 \text{ kJ/mol} / 6 = 8,9 \text{ kJ/min}$  beträgt. Das ist unser zweites Ergebnis:

*Der Energieumsatz des Körpers beträgt etwa 8,9 kJ/min.*

Um das mit etwas vertrauteren Werten vergleichen zu können, rechnen wir es auf einen ganzen Tag um. Es ergeben sich 12900 kJ pro Tag bzw. 3070 kcal pro Tag. Vor allem der letzte Wert ist aus dem Alltag bekannt. Er entspricht natürlich genau der verwertbaren Energiemenge, die wir mit der Nahrung pro Tag zu uns nehmen (dem „Kalorienverbrauch“). Jedem (und vor allem auch jeder) Diättreibenden ist dieser Wert geläufig. Die empfohlene „Kalorienzahl“ pro Tag liegt zwischen 2550 und 3200 für einen 25jährigen Mann [4]. Dass unser aus dem Sauerstoffumsatz berechneter Wert am oberen Ende des Spektrums liegt, hängt auch damit zusammen, dass während des Schlafs die Stoffwechselaktivität verringert ist.

Es ist interessant, dass in der Medizin der Energieumsatz des Menschen tatsächlich über den Sauerstoffbedarf bestimmt wird. Bei der „indirekten Kalorimetrie“ atmet eine Testperson in einem sogenannten Spirometer einen Vorrat reinen Sauerstoffs langsam leer. Das ausgeatmete Gas wird in den Vorrat zurück geleitet, wobei das Kohlendioxid durch Adsorption an Natronkalk entfernt wird. Die Differenz zwischen der ursprünglich vorhandenen Sauerstoffmenge und der im Reservoir noch vorhandenen Sauerstoffmenge ist der verbrauchte Sauerstoff. Aus dem so ermittelten Sauerstoffverbrauch schließt man wie in der obigen Argumentation auf

den Energieumsatz. Zusätzlich ermittelt man noch den „respiratorischen Koeffizienten“ (RQ), das Verhältnis von ausgeatmetem CO<sub>2</sub> zu eingeatmetem Sauerstoff. Aus ihm kann man Rückschlüsse auf die Art der ablaufenden Stoffwechselreaktionen (Kohlehydrat-, Fett- oder Protein-oxidation) ziehen und so die unterschiedlichen Reaktionsenergien genauer berücksichtigen als wir das oben getan haben.

Den oben angegebenen Zahlenwert für den physiologischen Brennwert von Glukose kann man sich in einfacher Weise aus Alltagserfahrungen erschließen. Glukose hat die Summenformel C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>. Ein Mol Glukose wiegt also 180 g. Aus einer Kalorientabelle entnimmt man, dass Zucker einen physiologischen Brennwert von 1650 kJ pro 100 g hat. Mit einem Mol Zucker führt man dem Körper also eine Energie von 1650 kJ · 180/100 = 2970 kJ zu, in ungefäh-  
rer Übereinstimmung mit dem angegebenen Wert.

### (c) Sauerstofftransport im Blut

Bevor der eingeatmete Sauerstoff im Körper für Stoffwechselreaktionen zur Verfügung steht, muss er erst zu den Organen und Muskeln transportiert werden. Das ist Aufgabe des Blutkreislaufs. Sauerstoff diffundiert in der Lunge ins Blut und wird dort von den roten Blutkörperchen aufgenommen. Das Herz sorgt dafür, dass das Blut in Bewegung bleibt und der Sauerstoff dadurch abtransportiert wird.

Wie viel Blut transportiert das Herz eigentlich pro Minute? Das Herz des Menschen ist ein etwa faustgroßer Muskel, der aus zwei Kammern besteht. Man kann also auf ein Volumen von etwa 0,1 l pro Herzkammer schließen. Der tatsächliche Wert liegt bei 0,07 l. Im Ruhezustand schlägt das Herz etwa 60 Mal pro Minute. Jedesmal werden 0,07 l Blut weiter transportiert, pro Minute also 60 · 0,07 l = 4,2 l. Das ist ein weiteres Ergebnis [2]:

*Pro Minute transportiert das menschliche Herz etwa 4,2 l Blut.*

Der gesamte Blutvorrat des Menschen von etwa 5 - 6 Litern wird also in jeder Minute fast ganz „umgewälzt“. Pro Tag transportiert das Herz über 6000 l Blut.

Es ist interessant, dass das Herz dazu keineswegs eine hohe Leistung aufbringen muss. Es vollbringt Arbeit gegen den arteriellen (systolischen) Blutdruck von etwa 120 mmHg = 16 kPa (geläufig vom Blutdruckmessen). Bei jedem Herzschlag wird die folgende Arbeit geleistet:

$$W = p \cdot \Delta V = 16 \text{ kPa} \cdot 0,07 \text{ l} = 1,1 \text{ J.}$$

Pro Sekunde findet ein Herzschlag statt, also beträgt die Leistung  $P = W/t = 1,1 \text{ W}$ . Dies ist ein recht geringer Wert: 1/60 der Leistung, die man benötigt, um eine normale Glühlampe zu betreiben.

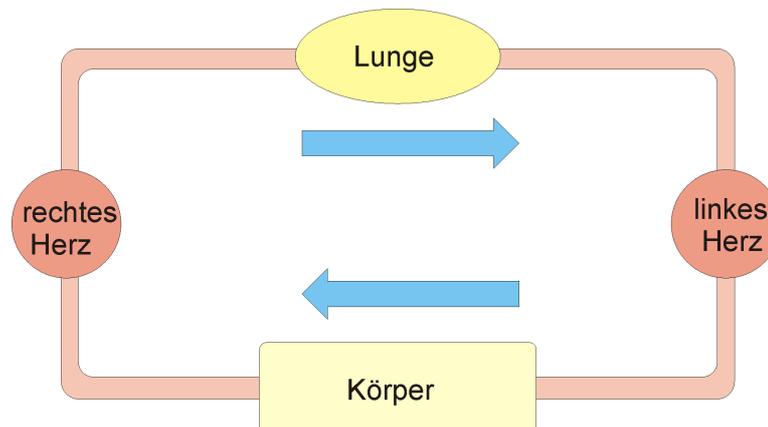


Abb. 1: Schema des Blutkreislaufs

Die Menge an Blut, die das Herz pro Minute transportiert, ist nicht einfach eine vom Zufall bestimmte Größe. Sie ist aufs Engste mit den anderen Stoffwechselgrößen des menschlichen Körpers verknüpft. Denn natürlich kann jeder Milliliter Blut, der die Lunge passiert, nur eine ganz bestimmte Menge an Sauerstoff aufnehmen. Dieser Sauerstoff wird abtransportiert; der vom Blut nicht aufgenommene Sauerstoff wird wieder ausgeatmet. Das bedeutet: Die oben ermittelte „Verbrauchsmenge“ von 0,425 l Sauerstoff pro Minute ist genau diejenige Sauerstoffmenge, die in der Lunge vom Blut aufgenommen und abtransportiert wird.

Mit dieser Überlegung können wir eine weitere interessante Frage beantworten: Wie viel Sauerstoff kann sich in 1 ml Blut lösen? Zuerst müssen wir ermitteln, wie viel Blut pro Minute durch die Lunge fließt. Sinnvoll wäre es, wenn das gesamte Blut, das seinen Sauerstoffvorrat im Körper aufgebraucht hat, anschließend durch die Lunge fließt und dort wieder „aufgefüllt“ wird. Genau dies passiert im Körper. Körper- und Lungenkreislauf sind hintereinander geschaltet und werden von linken und rechtem Herzen angetrieben (Abb. 1). Durch die Lunge fließen wie durch den Körper demnach 4,2 l Blut pro Minute. In diesen müssen sich 0,425 l Sauerstoff lösen. Wir erhalten also das folgende Ergebnis:

*In der Lunge nimmt das Blut 10 ml O<sub>2</sub> pro 100 ml Blut auf.*

Auch diesen Wert können wir wieder mit der Literatur vergleichen. Nach [3] können 100 ml Blut 21 ml O<sub>2</sub> lösen. Berücksichtigt man, dass das venöse Blut, das in die Lunge zurückfließt, noch gelösten Sauerstoff enthält (Partialdruck 5,3 kPa gegenüber 12,6 kPa beim arteriellen Blut), ergibt sich eine gute Übereinstimmung.

Was bedeutet dieser Wert? Sind 10 ml O<sub>2</sub> pro 100 ml Blut viel oder wenig Sauerstoff? Ein Vergleich liefert die Löslichkeit von Sauerstoff in gewöhnlichem Wasser. Es kann bei 37 °C maximal 0,5 ml O<sub>2</sub> pro 100 ml H<sub>2</sub>O lösen [6]. Wären wir also beim Sauerstofftransport im Körper auf die Löslichkeit in Wasser angewiesen, müssten pro Minute 85 Liter durch die A-  
dern gepumpt werden. Das Herz müsste 1200 Mal pro Minute schlagen oder ein entsprechend größeres Volumen besitzen – eine physiologische Unmöglichkeit. Verantwortlich für die hohe Löslichkeit von Sauerstoff in Blut sind natürlich die roten Blutkörperchen. Die vorangegangene Überlegung zeigt, von wie großer Wichtigkeit ein effektiver Transportmechanismus für Sauerstoff für das Funktionieren des menschlichen Körpers ist.

Fasst man unsere bisherigen Ergebnisse zusammen, so hat sich gezeigt, auf wie enge Weise Blutkreislauf, Atmung und Stoffwechsel des Menschen gekoppelt sind. Physiologische Größen im Körper haben nicht einfache, zufällige, kontingente Werte. Damit der menschliche Organismus funktioniert, müssen alle Elemente in der richtigen Weise ineinander greifen. Für unser Beispiel bedeutet das: Der Energieumsatz des Menschen bestimmt letztlich, wie oft sein Herz schlägt und wie oft er ein- und ausatmet.

## **2. Atmung und Blutkreislauf beim Sport**

Jeder weiß, dass bei sportlicher Betätigung das Herz schneller schlägt und man stärker atmen muss. Nach unseren bisherigen Erkenntnissen liegt die Vermutung nahe, dass auch beim Sport die Atem- und Herzfrequenz sich genau dem momentanen Energieumsatz des Körpers anpassen. Wir gehen deshalb im folgenden der Frage nach: Wie oft atmet man beim Joggen, wie viel Luft atmet man dabei ein und wie schnell schlägt das Herz?

Die Vorgehensweise ist dabei ganz analog zum oben betrachteten „Normalfall“ der Ruhe. Wir müssen natürlich davon ausgehen, dass keine Sauerstoffreserven verbraucht werden, d. h. dass der Körper sich nicht im anaeroben Bereich befindet. Es muss sich ein Gleichgewichtszustand eingestellt haben, in dem gerade so viel Sauerstoff verbraucht wird, wie durch die Atmung nachgeliefert wird. Mit dieser Annahme ist alles was wir wissen müssen der „Kalorien-

verbrauch“ beim Joggen, den man in einer Tabelle nachschlagen kann. Man findet (für eine Laufgeschwindigkeit von 8 km/h):

$$P = 540 \text{ kcal/h} = 2260 \text{ kJ/h} = 38 \text{ kJ/min.}$$

Wie groß ist nun der Sauerstoffumsatz? Im vorangegangenen Abschnitt haben wir den folgenden Zusammenhang zwischen Energie- und Sauerstoffumsatz hergeleitet:

$$W = 2826 \text{ kJ/mol} \cdot n / 6.$$

Dabei ist  $n$  die Menge des umgesetzten Sauerstoffs in Mol. Lösen wir die Gleichung nach  $n$  auf und setzen für  $W$  die beim Joggen in einer Minute umgesetzte Energie von 38 kJ ein, erhalten wir:  $n = 0,08$  mol. Das entspricht umgerechnet 1,8 l. Sauerstoff oder 36 l Atemluft.

Also:

*Beim Joggen atmet der Mensch 36 l Luft pro Minute ein und aus.*

In der Literatur [3] findet man für das Atemminutenvolumen die folgenden Werte: Radfahren 40 l, Schwimmen 43 l, die mit diesem Wert gut verträglich sind. Im Selbstversuch stellt man fest, dass man beim Joggen etwa 25 Mal pro Minute atmet. Um damit auf das benötigte Volumen zu kommen, muss man bei jedem Atemzug 1,5 l Luft ein- und ausatmen. Dies entzieht sich zwar einer einfachen experimentellen Überprüfung, ist aber recht plausibel.

Damit können wir zur zweiten Frage kommen: Wie oft muss das Herz beim Joggen schlagen? Wir gehen wieder davon aus, dass der gesamte vom Körper aufgenommene Sauerstoff vom Blut auch wegtransportiert werden muss. Das Herzschlagvolumen erhöht sich auch bei körperlicher Anstrengung nur geringfügig, so dass wir weiter von 0,07 l transportiertem Blut pro Herzschlag ausgehen können. Wir nehmen auch zunächst an, dass wie im Fall der Ruhe 10 ml Sauerstoff pro 100 ml Blut aufgenommen werden können

Um 1,8 l Sauerstoff aufnehmen zu können, müssen dann 18 l Blut die Lunge passieren. Dazu müsste das Herz  $18 / 0,07 = 257$  Mal pro Minute schlagen. Das liegt zwar in der richtigen Größenordnung, aber wie man weiß, tritt eine derartig hohe Herzfrequenz selbst bei der höchsten Belastung nicht auf.

Worin hat die Diskrepanz ihre Ursache? Der Grund ist, dass der Körper dem Blut bei sportlicher Aktivität mehr Sauerstoff entzieht. Die Sauerstoffentnahme aus dem Blut ist bei körperlicher Anstrengung um einen Faktor 1,8 größer als in Ruhe [2]. Das bedeutet, 100 ml Blut können dem Körper nun 18 ml Sauerstoff zuführen. Damit kommen wir auf 10 l Blut, die die Lunge pro Minute passieren müssen. Das Herz muss dazu 140 Mal schlagen. Dies stimmt mit der Erfahrung überein, die jeder an sich selbst gemacht hat. Unser Ergebnis lautet also:

*Beim Joggen muss das Herz 140 Mal in der Minute schlagen.*

### 3. Stoffwechsel und Atmung bei Tieren

Die oben abgeleiteten Zusammenhänge müssen nicht nur für den Menschen gelten, sondern, mit den entsprechenden physiologischen Werten, auch für Tiere, die einen ähnlichen Stoffwechsel aufweisen wie der Mensch. Es ist lohnend, die beschriebenen Zusammenhänge noch einmal in diesem Zusammenhang nachzuvollziehen. Leider sind die entsprechenden Daten für Tiere nicht so einfach zugänglich wie für den Fall des Menschen.

Betrachten wir zunächst den Sauerstoffumsatz. Atemfrequenz und Atemvolumen für verschiedene Tierarten sind in Tabelle 1 zusammengestellt (aus [4]). Da wir keine genaueren Informationen besitzen, nehmen wir an, dass der Anteil des der Atemluft entzogenen Sauerstoffs genau so groß wie beim Menschen. Das bedeutet: Wir nehmen an, dass in der Sauer-

stoffanteil in der Ausatemluft der verschiedenen Tiere ebenfalls 16% beträgt. Mit einem Sauerstoffanteil von 21% in der Einatemluft können wir den Sauerstoffumsatz dann wie oben nach der folgenden Formel berechnen:

$$\text{Sauerstoffumsatz} = \text{Atemvolumen} \cdot \text{Zahl der Atemzüge/Minute} \cdot 5\%$$

Die Ergebnisse dieser Berechnung sind in der vierten Spalte von Tabelle 1 notiert. In der letzten Spalte sind zum Vergleich die experimentell ermittelten Werte zusammengestellt (aus [4]).

	Atemfrequenz	Atemvolumen	berechneter Sauerstoffverbrauch	tatsächlicher Sauerstoffverbrauch
Huhn	27 /min	0,03 l	0,04 l/min	0,022 l/min
Hund	18 /min	0,32 l	0,29 l/min	0,075 l/min
Pferd	10 /min	7,5 l	3,75 l/min	1,4 l/min

**Tabelle 1: Berechnung des Sauerstoffumsatzes bei Tieren**

Man bemerkt eine deutliche Diskrepanz zwischen berechneten und tatsächlichen Werten. Der tatsächliche Sauerstoffumsatz von Tieren ist viel geringer (um einen Faktor 2 – 4) als errechnet. Das kann nur bedeuten, dass die untersuchten Tierarten der Luft weitaus weniger Sauerstoff entnehmen als der Mensch. Mit anderen Worten: Der Sauerstoffanteil in der Ausatemluft bei muss bei diesen Tieren höher als 16% liegen. Unsere Ausgangsannahme war also falsch. Im Umkehrschluss ist es aus den vorhandenen Daten möglich, den Sauerstoffgehalt der ausgeatmeten Luft für Tiere zu berechnen. Leider war es nicht möglich, entsprechende experimentelle Vergleichsdaten zu beschaffen.

Auch der Zusammenhang zwischen Sauerstoffverbrauch muss für Tiere ebenso wie für den Menschen gelten, wenn vergleichbare Stoffwechselreaktionen ablaufen. Wir gehen wieder von der Oxidation von Zucker aus. Beim Menschen haben wir die nun schon mehrfach benutzte Formel

$$W_{\text{Tag}} = 24 \cdot 60 \cdot 2826 \text{ kJ/mol} \cdot n / 6$$

hergeleitet. Der Faktor  $24 \cdot 60$  kommt daher, dass wir den Energieumsatz *pro Tag* berechnen,  $n$  aber die Stoffmenge des *pro Minute* umgesetzten Sauerstoffs ist (in Mol). In Tabelle 2 steht in der ersten Spalte der aus Tabelle 1 übernommene Sauerstoffumsatz der einzelnen Tierarten, der in der zweiten Spalte in Mol umgerechnet wird. In der dritten und vierten Spalte wird der nach der angegebenen Formel errechnete Energieumsatz pro Tag mit dem Literaturwert verglichen (aus [4,7]).

	Sauerstoffumsatz	in mol/min	berechneter Energieumsatz / Tag	tatsächlicher Energieumsatz / Tag
Huhn	0,022 l/min	$9,8 \cdot 10^{-4}$	666 kJ	400 kJ
Hund	0,064 l/min	$2,8 \cdot 10^{-3}$	1952 kJ	1885 kJ
Pferd	1,2 l/min	$52,9 \cdot 10^{-3}$	35880 kJ	34640 kJ

**Tabelle 2: Zusammenhang zwischen Sauerstoff- und Energieumsatz**

Vergleicht man die beiden Spalten, erkennt man die sehr gute Übereinstimmung. In diesem Fall war die Abschätzung sehr präzise, die zugrundeliegende Annahme, dass die Stoffwechselreaktionen denen des Menschen ähneln, war gerechtfertigt. Das ist z. B. für einen Grasfresser wie das Pferd nicht selbstverständlich, denn der Verdauungsmechanismus von Pferden ist von dem des Menschen recht verschieden. Sie verdauen Cellulose in ihrem Blinddarm mit

Hilfe von symbiontischen Bakterien. Letztlich ist dies für den Pferdestoffwechsel jedoch nicht entscheidend: Am Ende der Cellulosespaltung steht wieder Glukose, so dass die grundlegende Reaktion die gleiche ist wie die am Menschen untersuchte.

- [1] P. Häußler et al., *Perspektiven für die Unterrichtspraxis*, IPN, Kiel (1998).
- [2] R. F. Schmidt, G. Thews, *Physiologie des Menschen*, Springer, Berlin, 1995.
- [3] K. Kunsch, S. Kunsch, *Der Mensch in Zahlen*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, <sup>2</sup>2000.
- [4] R. Flindt, *Biologie in Zahlen*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, <sup>5</sup>2000.
- [5] S. Silbernagl, A. Despopoulos, *Taschenatlas der Physiologie*, Thieme, Stuttgart, <sup>2</sup>1983.
- [6] D. Kalusche, *Ökologie in Zahlen*, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 1996.
- [7] R. Eckert, D. Randall, *Animal Physiology*, Freeman, San Francisco (1983).