

Wärmeübertragung bei Tieren

Unterrichtsvorschläge für einen fachübergreifenden
Unterricht

Giuseppe Colicchia; Hartmut Wiesner

Motivation im Physikunterricht

Erfolgreiches Lernen setzt bei den Lernenden Lernbereitschaft voraus/s. z.B. /1/. Diese läßt sich vor allem dann erreichen, wenn der Lerninhalt auf Interesse stößt und die Lernaufgabe aus Sicht der Lernenden als bewältigbar eingeschätzt wird.

Euler /2/ hat schon vor vielen Jahren die Meinung vertreten, daß biophysikalische Inhalte bei den Schülerinnen und Schülern auf großes Interesse stoßen. Umfangreiche Interessensuntersuchungen (z.B. /3/ – /6/) haben diese Auffassung inzwischen bestätigt. Zugänge, die Physik mit medizinischen oder biologischen Fragen verknüpfen, sind für alle Schüler – besonders aber für Schülerinnen – von großem Interesse. Mittlerweile sind auch einige Unterrichtsmaterialien entwickelt (z.B. /6/ – /12/) und auch teilweise erprobt worden, die diese Ergebnisse berücksichtigen.

Im Folgenden haben wir einige Vorschläge zusammengestellt, die nach unserer Einschätzung und Erfahrung bei den Schülerinnen und Schülern Interesse wecken.

In der Natur haben sich im Laufe der Evolution die Lebewesen optimal an ihre Umgebung angepaßt und in jedem Ökosystem haben die Lebewesen versucht, die Gesetze der Physik zu ihrem Vorteil auszunützen.

In den kalten Regionen der Erde sind zum Beispiel große, runde Warmblüter gegenüber kleinen, flachen Warmblütern bevorzugt. Denn die Größe der Oberfläche, durch die die Wärme verlorengeht, ist im Verhältnis

zur Größe des Körpervolumens (bzw. Masse), in dem die Wärme produziert und gespeichert wird, kleiner (Bergmannsche Regel, s. /9/). So beobachtet man, daß Tiere derselben Gattung vom Äquator zu den Polargebieten hin größer werden. Zum Beispiel sind Pinguine, die an den Küsten der Antarktis leben, doppelt so groß wie Pinguine auf den Galápagosinseln am Äquator /13/.

Eine veränderte Körpergröße ist jedoch nicht die einzige Möglichkeit, um sich gegen Kälte zu schützen. In der Natur sind weitere Möglichkeiten realisiert, um große Wärmeverluste zu vermeiden. So besitzen Tiere, die in der Kälte leben, meistens eine gut

isolierende Schicht – ein dickes Fell oder eine dicke Fettschicht.

Als letzte Möglichkeit der Anpassung soll hier die *Allensche Regel* angeführt werden, nach der bei Tieren in kälteren Gegenden exponierte Körperteile wie Ohren oder Schwänze meist kleiner sind als bei Tieren in wärmeren Gegenden.

Zur Untersuchung der drei Arten der Wärmeübertragung im Bereich der lebenden Natur, gehen wir in extreme Lebensräume (Polargebiete) und untersuchen, welche Tricks die Natur anwendet, um das Leben an diese extreme Kälte anzupassen. Dabei müssen wir Erkenntnisse der Biophysik, der Tierphysiologie aber auch der Ver-



Bild 1 Kopf des Eisfuchses im Vergleich zum Kopf eines Rot- und eines Wüstenfuchses (aus /9/)

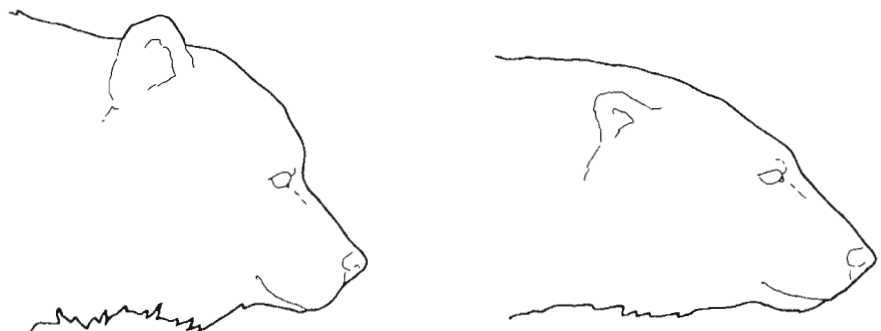


Bild 2 Die Ohren des Braunbären sind deutlich größer als die Ohren des Eisbären (aus /19/)

haltensforschung miteinbeziehen – aber gerade das macht den Physikunterricht spannender. Und es sind Experimente mit einfachen Mitteln möglich, die diese Tatsachen und die Physik, die dahinter steht, verdeutlichen.

Warme Körper

Die relativ hohe Körpertemperatur der Warmblüter von ca. 37 °C wird durch die Freisetzung von Wärme bei metabolischen Prozessen (Stoffwechselprozesse) aufrechterhalten. Damit die Körpertemperatur konstant bleibt, muß die Wärmemenge, die im Organismus produziert wird plus die Wärmemenge, die von der Umgebung in den Körper geht, gleich der Wärmemenge sein, die vom Tier an die Umgebung abgegeben wird.

Tiere in warmen Ländern müssen die Notwendigkeit Wärme zu verlieren haben, besonders nach längeren Bewegungsphasen. Es gibt viele Wege, wie der Organismus Wärme abgeben kann: zum Beispiel durch die Atmung, weil wasserdampfhaltige Luft die Lungen verläßt; oder durch Transpiration, indem der Blutstrom in die äußeren Körperteile erhöht wird; durch Verdunstung oder auch durch Ausscheidung.

Hingegen müssen Tiere, die in kälteren Gebieten leben, möglichst viel Wärme speichern können. Durch Verengen der Blutgefäße werden die äußeren Körperteile weniger erwärmt und die inneren, wichtigen Organe können daher leichter auf der erforderlichen Temperatur gehalten werden. Die kälteren Oberflächen geben weniger Wärme ab. So beträgt z.B. die Temperatur in der Fußsohle eines Hundes bei einer Außentemperatur von etwa -30°C ungefähr 0°C. Durch eine Art Wärmeaustauscher wird das von der Fußspitze zum Herzen hinfließende Blut vom warmen, zum Fuß hinfließenden Blut, etwas erwärmt. Durch diesen Wärmeaustausch wird möglichst viel innere Energie im Tierkörper zurückgehalten.

Außerdem besitzen die Tiere in kalter Umgebung i.d.R. eine dicke Fettschicht und zusätzlich oft auch ein dickes Fell, die die Wärme schwer passieren lassen. Diese Schichten können sogar so gut isolierend wirken, daß die produzierte Körperwärme an warmen Tagen und durch lebhaftes Bewegen

zu einer Überhitzung des Körpers führen kann.

Über einen längeren Zeitraum betrachtet, ist im Verlaufe der Evolution die Entwicklung der größeren, rundlichen Tiere in kälteren Klimazonen bevorzugt worden (*Bergmannsche* und *Allensche* Regeln).

Es ist in der Schule leicht zu verdeutlichen, daß ein großer Körper weniger Wärme als ein kleiner Körper, bezogen auf die Masseneinheit, verliert:

Nehmen wir an, daß es 8 warme Körper in Form von Würfeln gibt. Jeder Würfel verliert an jeder seiner Seitenflächen Wärme. Die Seitenflächen der einzelnen kleinen Würfel betragen in der Summe 48. Wenn wir jedoch aus diesen 8 Würfeln einen großen Würfel zusammenbauen, tritt der Wärmeverlust des großen Würfels nur an seinen Außenseiten auf. Diese Fläche entspricht nur 24 kleinen Seitenflächen. Der Wärmeverlust ist daher wesentlich geringer, weil die Hälfte der ursprünglichen Außenseiten nach innen gerichtet ist. (Hinzu kommt, das ein Wärmestrom von innen nach außen aufgrund des längeren Weges durch den großen Körper behindert wird.)

Nach diesem Prinzip gehen die Pinguine vor. Möglichst viele Pinguine schmiegen sich auf einer kleinen Fläche aneinander. Kein Tier ist besonders lang der Kälte ausgesetzt, weil es immer versucht, ins Innere der Gruppe zu drängen. Auch diejenigen, die am Rande stehen, haben einen Vorteil, weil nur eine Seite des Tieres nach außen zur Kälte gerichtet ist. Dieser Trick der „sozialen Thermoregulation“ hilft den Pinguinen, die besonders kalten Tage mit möglichst geringen Energieverlusten zu überstehen. Ein recht überzeugender Simulationsversuch ist dazu in /18/ vorgeschlagen (die Pinguine werden durch ein Bündel zusammengebundener, mit Wasser gefüllter Reagenzgläser simuliert).

Die drei Arten der Wärmeübertragung

Die drei Arten der Wärmeübertragung Wärmeleitung, -konvektion und -strahlung spielen auch bei Lebewesen eine wichtige Rolle. Während man die Übertragung von Wärme in einem festen Körper als Wärmeleitung bezeichnet, nennt man das Übertragen von Wärme durch Bewegung des wärmelei-

tenden Materials Wärmekonvektion. Der Wärmeaustausch erfolgt an den Berührungsflächen der verschiedenen warmen Materialien. Außerdem geben alle Körper, die wärmer sind als der absolute Nullpunkt, Energie über elektromagnetische Strahlung ab. Die unsichtbare, infrarote Strahlung ist als Wärme fühlbar und heißt auch Wärmestrahlung.

a) Wärmeverlust durch Konvektion

Wärmeverlust in Luft

Eine empirische Näherungsgleichung für den Wärmeverlust durch Konvektion ist $\Phi = \alpha_k \cdot A \cdot \Delta T$, bei der Φ der thermische Strom ist, der durch eine Oberfläche A transportiert wird, ΔT die Temperaturdifferenz zwischen der Oberflächentemperatur und der Temperatur eines Punktes, der weit weg von der Oberfläche liegt und α_k der Wärmeübergangskoeffizient. Letzterer ist schwierig zu ermitteln, denn er hängt sowohl von der Art des Fluidums, der Dynamik des Fluidums als auch von der Geometrie der Oberfläche ab.

Betrachten wir den Wärmeverlust der an Land lebenden Tiere an ihre Umgebung und an das Medium Luft, so wird dieser Wärmeverlust hauptsächlich durch Konvektion verursacht.

Die Luftschicht, die mit der Haut direkt in Berührung kommt, wird angewärmt. Die Erwärmung der hautnahen Luftschicht bewirkt eine Verkleinerung des Temperaturunterschieds zwischen Haut und Luft und der Wärmeverlust wird kleiner. Wegen der schlechten Wärmeleitung von Luft sinkt daher der Wärmefluß in unbewegter Luft sehr schnell ab. Besitzt ein Tier einen Pelz oder ein Federkleid, so wird diese körpernahe Luftschicht zwischen den Haaren bzw. Federn besser festgehalten und vergrößert somit die Wärmedämmung.

Diese wärmeisolierende, körpernahe Luftschicht wird in bewegter Luft, insbesondere bei kaltem Wind, immer wieder weggeblasen. Der Wind bewirkt also, daß ständig kalte Luft an die Hautoberfläche gelangt. So bleibt die Temperaturdifferenz groß und entsprechend groß ist der Wärmeentzug.

Bei Temperaturen von -25 °C bis -35 °C und Wind mit einer Geschwindigkeit bis zu 130 km/h hat man Kaiserpinguine beim Brüten beobachtet. Die

Brutzeit dieser Pinguine fällt in die kalten Wintermonate, damit die Jungen in der warmen Jahreszeit heranwachsen können. Bei einer Lufttemperatur von $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ kann eisiger Wind (Blizzard) dem Körper so viel Wärme entziehen wie ruhende Luft um $-180\text{ }^{\circ}\text{C}/14/$. Solche extremen Bedingungen müssen Kaiserpinguine überstehen, denn zur Brutzeit können sie ihre Eier nicht verlassen und müssen sogar statt Wasser Schnee zu sich nehmen, um nicht zu verdursten. Statt Nahrungsaufnahme zehren sie von ihren Fettreserven. Als Schutz gegen große Wärmeverluste hat man in dieser Zeit bei ihnen weiterhin beobachtet, daß die Temperatur der Hautoberfläche bis auf $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ gesenkt wird und daß sie die Temperatur der auszuatmenden Luft regulieren können und gering halten, um nicht zu viel Wärme durch Atmung zu verlieren.

Auf Grund der niedrigen Temperatur der Hautoberfläche und der kleinen Wärmeleitfähigkeit von Schnee, schmilzt Schnee, der sich eventuell auf der Federschicht angelagert hat, nicht und bildet außerdem einen weiteren Schutz gegen Wind und Kälte.

Um eine bessere Vorstellung zu bekommen, in welcher Größenordnung sich der Wärmeverlust durch Konvektion abspielt, betrachten wir folgendes *Beispiel*:

Die Haut eines ruhenden Menschen hat eine Temperatur von 306 K und α_k eines unbedeckten Menschen beträgt $7\text{ W m}^{-2}\text{ K}^{-1}$ /15/. Bei einer Raumtemperatur von 292 K und einer Oberfläche des Körpers von $1,5\text{ m}^2$ beträgt der thermische Fluß, den der Körper durch Konvektion verliert

$$\Phi = \alpha_k \cdot A \cdot \Delta T \\ = (7\text{ W m}^{-2}\text{ K}^{-1})(1,5\text{ m}^2)(306\text{ K} - 292\text{ K}) \\ = 147\text{ W,}$$

der ca. 3034 kcal bzw. 12700 kJ am Tag entsprechen. Dieser Wärmeverlust durch Konvektion ist beträchtlich und entspräche in etwa der Energie, die ein bekleideter Mensch an einem Tag insgesamt benötigen würde.

Wärmeverlust in Wasser

Der Wärmeverlust, den Tiere im Wasser erleiden, wird ebenfalls hauptsächlich durch Wärme konvektion verursacht. Auch wenn die Temperatur im Polarmeer niemals unter ca. $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ fällt /16/, ist der Wärmeverlust groß, weil der Wärmeübergangsko-

effizient des Wassers im Vergleich zu Luft groß ist.

Um daher den Wärmeverlust gering zu halten, bleibt keine andere Möglichkeit als die Temperatur der Körperoberfläche an die Wassertemperatur anzugleichen. Tatsächlich ist z. B. eine Robbe imstande, die Temperatur der Hautoberfläche auf ca. $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ zu senken (vergl. Bild 3). Das bedeutet, daß sie eine sehr gute Isolierschicht zwischen der Hautoberfläche und dem Körperinneren, in dem immer eine Temperatur von $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ herrscht, besitzen müssen. Diese Isolierschicht ist eine dicke Fettschicht, die zusammen mit der Haut bis zu 50% des Körpergewichts ausmachen kann /17/.

Viele Schwimmvögel, die dieseschützende Fettschicht nicht besitzen, haben andere Mittel zur Wärmedämmung gefunden. Sie fetten ihre Deckfedern mit einem Sekret ständig so intensiv ein, daß auch unter Wasser ein Luftmantel im Gefieder besteht bleibt, der eine Art Isolierschicht um den warmen Körper bildet. Sowohl Fett als auch Luft haben eine kleine Wärmeleitfähigkeit und verhindern so einen großen Wärmestrom /17/.

Vor allem kleine Fische besitzen keine dieser wärmeisolierenden Schichten. Sie haben auch keine hohe Körpertemperatur, sondern eine Temperatur, die in etwa der Wassertemperatur entspricht. Außerdem würden Fische mit einer hohen Körpertemperatur auf Grund ihrer Kiemenatmung ohnehin viel Wärme verlieren, so daß die isolierenden Schichten eigentlich sinnlos wären.

b) Wärmeverlust durch Strahlung

Die von den Säugetieren emittierte Strahlung ist hauptsächlich ferne Infrarotstrahlung, die von der Temperatur, der Oberfläche und der Art der Haut abhängt.

Die Strahlungsleistung ist nach dem Gesetz von *Stefan-Boltzmann*

$$\Phi = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4;$$

σ ist die *Stefan-Boltzmann*-Konstante und beträgt $5,67 \cdot 10^{-8}\text{ W m}^{-2}\text{ K}^{-4}$, ε ist die Absorptionsfähigkeit (Emissionszahl); für Federn, Haare und für tierische und menschliche Haut kann man in diesem Temperaturbereich $\varepsilon = 1$ annehmen /17/.

Die freiwerdende Strahlung spielt eine wichtige Rolle in der Wärmebi-

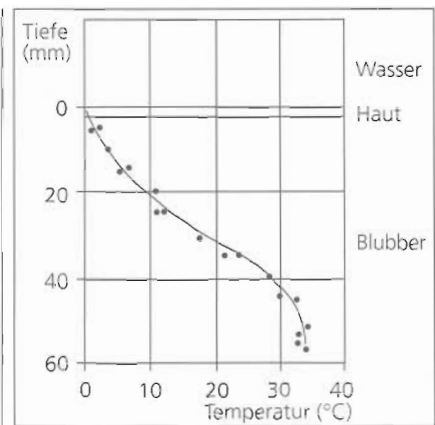


Bild 3 Temperaturverlauf in der Blubberhaut eines Seehundes (aus 19/)

lanz von Lebewesen, die keine isolierenden Schichten besitzen.

Stellen wir uns einen unbedeckten Menschen vor, der sich in einem kalten Land befindet. Nehmen wir eine Hautoberfläche von $1,5\text{ m}^2$, eine Oberflächentemperatur von 300 K (T_0) und eine Umgebungstemperatur von 263 K (T_U) an. Für die freiwerdende Strahlung gilt:

$$\Phi_e = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T_0^4 \\ \Phi_e = 1,5,67 \cdot 10^{-8}\text{ W m}^{-2}\text{ K}^{-4}(1,5\text{ m}^2) \cdot (300\text{ K})^4 \\ = 689\text{ W}$$

Die absorbierte Strahlung ist:

$$\Phi_a = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T_U^4 \\ \Phi_a = 1,5,67 \cdot 10^{-8}\text{ W m}^{-2}\text{ K}^{-4}(1,5\text{ m}^2) \cdot (263\text{ K})^4 \\ = 407\text{ W}$$

Die Differenz von 282 W entspricht ca. 5819 kcal bzw. 24358 kJ am Tag. Dieser Mensch würde nur durch die Strahlung ca. das Doppelte des täglichen energetischen Bedarfs eines bekleideten Menschen verlieren!

(In Wirklichkeit würde dieser Mensch erstens nur kurze Zeit überleben und zweitens würde auch der menschliche Körper als Schutzmechanismus die Blutgefäße in den Extremitäten verengen und somit die Temperatur in den äußeren Körperteilen senken.)

Bei Tieren, hingegen, die eine isolierende Schicht besitzen, ist die Wärmeabstrahlung in der Regel wegen der niedrigen Temperatur der Körperoberfläche weit geringer.

Für ein Tier mit der gleichen Oberfläche ($1,5\text{ m}^2$) und Umgebungstemperatur (263 K) wie oben, aber mit einer Oberflächentemperatur $T_0 = 273\text{ K}$, beträgt der Energieverlust durch Strahlung

$$\Phi_e - \Phi_a = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A (T_0^4 - T_U^4) \\ \Phi_e - \Phi_a = 1,5,67 \cdot 10^{-8}\text{ W m}^{-2}\text{ K}^{-4} \cdot 1,5\text{ m}^2 (273^4 - 263^4)\text{ K}^4 = 65,4\text{ W.}$$

Dies entspricht einem Wärmeverlust von 1350 kcal bzw. 5651 kJ am Tag.

c) Wärmeverlust durch Wärmeleitung

Der Wärmeverlust vom Körperinneren an die Körperoberfläche bei Tieren mit einer dicken Fettschicht wird durch Wärmeleitung verursacht und ist sehr klein, denn die Fettschicht besitzt keine Blutgefäße, die die Wärme durch Konvektion übertragen könnten und außerdem ist die Wärmeleitfähigkeit von Fett sehr klein ($\lambda = 0,2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Diese Schicht behindert daher einen größeren Abfluß der von den Muskeln und inneren Organen gebildeten Wärme nach außen.

Der Wärmestrom, der von einem warmen Körper auf einen kälteren übergeht, ist proportional der Berührungsfläche A , der Temperaturdifferenz ΔT und der Wärmeleitfähigkeit λ des dazwischen befindlichen Mediums, sowie umgekehrt proportional der Schichtdicke x dieses Mediums, so daß gilt $\Phi = \lambda \cdot A \cdot \Delta T/x$ (in Watt).

Bei einem Tier mit einer Oberfläche von $1,5 \text{ m}^2$; einer Fettschicht mit einer Dicke von $0,1 \text{ m}$, mit einer Temperatur im Körperinneren von 37°C und einer Oberflächentemperatur von 3°C , würde durch die Fettschicht ein Wärmestrom pro Zeit durch Wärmeleitung von

$$\Phi = 0,2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1} \cdot 1,5 \text{ m}^2 \cdot 34 \text{ K} / 0,1 \text{ m} = 102 \text{ W}$$

fließen (das entspricht einer Energiemenge von ca. 2105 kcal bzw. 8812 kJ am Tag).

(Bei diesem Beispiel wurde erstens vernachlässigt, daß die Oberfläche zwischen Körperinnerem und Fettschicht kleiner ist als die Körperoberfläche. Zweitens wurde nicht berücksichtigt, daß auch Fettgewebe eine geringe Wärmemenge produziert).

Wärmeverlust durch Wärmeleitung würde vor allem dort auftreten, wo Körperteile ohne wärmeisolierende Schicht in direktem Kontakt mit dem kalten Boden kommen, z. B. Fußsohlen mit Schnee. Dieser Wärmeverlust ist tatsächlich jedoch nicht groß, weil die Temperatur in den Extremitäten gering ist und weil Schnee, besonders Pulverschnee, eine kleine Wärmeleitfähigkeit hat.

Die Isolierschichten der Tiere

Die Isolierschichten der Tiere dienen in erster Linie dazu, Wärmeverlust durch Wärmekonvektion zu verhindern. Große Tiere können eine wesentlich dik-

kere Fettschicht besitzen als kleine Tiere. Die meisten in den Polarregionen lebenden Tiere besitzen sogar zwei Arten von Isolierschichten: eine dicke Fettschicht und einen Pelz oder ein Federkleid.

Pinguine z. B. besitzen sowohl eine Fettschicht als auch ein Federkleid, das fast den ganzen Körper bedeckt. Diese Federn sind ca. $2\text{-}3 \text{ cm}$ lang, auf jeden cm^2 kommen ca. 13 Federn, die in Reihen stehen und wie Ziegel eines Daches übereinander greifen /14/. An den Federschäften dicht über der Haut ist außerdem noch eine Flaumschicht ausgebildet.

Sowohl der Pelz als auch das Federkleid dienen dazu, eine ruhende Luftschicht über der Haut zu erzeugen. Im Wasser sind jedoch Pelz und Federkleid nicht mehr luftgefüllt und entsprechend schlechter ist die Wärmedämmung. Nur in der Flaumschicht bleibt ein Luftpolster auch unter Wasser erhalten.

Ein Großteil der im Körper produzierten Wärme muß zuerst die Fettschicht passieren, dann geht die Wärme an die Umgebung durch Strahlung und Konvektion verloren.

Im folgenden *Beispiel* wird angenommen, daß das Tier weder einen Pelz noch ein Federkleid besitzt:

$$\Phi = \lambda A (T_i - T_o) / x$$

ist der Wärmestrom, der durch die Fettschicht geht.

$$\Phi = \varepsilon \sigma A (T_o^4 - T_u^4) + \alpha_k A (T_o - T_u)$$

ist der Wärmestrom, der an die Umgebung durch Wärmestrahlung und Konvektion abgegeben wird.

T_i = Temperatur im Körperinneren;
 T_o = Temperatur der Körperoberfläche;
 T_u = Umgebungstemperatur.

Wenn man diese beiden Wärmeströme gleichsetzt:

$$\lambda A (T_i - T_o) / x = \varepsilon \sigma A (T_o^4 - T_u^4) + \alpha_k A (T_o - T_u)$$

ergibt sich für die Dicke der Fettschicht:

$$x = \lambda (T_i - T_o) / [\varepsilon \sigma (T_o^4 - T_u^4) + \alpha_k (T_o - T_u)]$$

Wie man sieht, ist bei vorgegebenen Temperaturen (T_i , T_o , T_u) die Dicke der Fettschicht x eines Tieres bestimmt. Dieser Wert für x kann aber in einem Bereich variieren, weil die Wärmeleitfähigkeit von lebendem Gewebe ei-

nen variablen Wert besitzt und außerdem Fettzellen unterschiedliche Wärmemengen produzieren, die bei genauer Rechnung auch berücksichtigt werden müßten. Man kann nur sagen, daß die Dicke der Fettschicht eines Tieres nicht beliebig groß oder klein sein kann. Eine zu dicke Fettschicht würde zwar die hohe Temperatur (ca. 37°C) im Körperinneren halten, aber die Temperatur an der Körperoberfläche könnte zu gering werden und unter den Gefrierpunkt der Zellen fallen. Eine zu dünne Fettschicht würde einen zu großen Wärmeverlust bedeuten.

Vorschläge für Experimente

Die Wärmemenge kann bekanntlich nicht direkt gemessen oder beobachtet werden, deshalb messen wir die Temperatur, die (bei gegebener Masse und Substanz) unmittelbar auf die Wärme schließen läßt.

In der Mittelstufe könnte man zum Beispiel verschieden große Plastikbehälter mit Wasser füllen und jeweils ein Thermometer anbringen. Als Plastikbehälter könnte man auch in etwa maßstabsgetreue Modelle in der Form von Pinguinen verwenden, die sicherlich größeres Interesse der Schülerinnen und Schüler auf sich ziehen. Diese Form hat außerdem den Vorteil, daß sie besser der Realität entspricht, weil in etwa dieselben realen Mengen und physikalischen Größen verwendet werden.

Folgende *Experimente* sind interessant:

1. Man kann das Wasser in zwei verschieden großen Modellen auf dieselbe Temperatur erhitzen und beobachtet dann, wenn man beide Modelle in kaltes Wasser taucht, ob die Temperatur des kleinen Modells schneller abnimmt als die des größeren.
2. Man führt dieses Experiment mit zwei gleich großen Modellen durch, wobei man ein Modell mit einem Isoliermantel umhüllt. Dabei beobachtet man, ob der Wärmeverlust des isolierten Modells geringer ist.
3. Man nimmt zwei Behälter desselben Volumens jedoch verschiedener Form, einen flachen und einen runden, und beobachtet, ob der Wärmeverlust beim flachen Behälter schneller erfolgt als beim runden.

Zu beachten ist, daß Wasser eine große Wärmekapazität besitzt. Daher

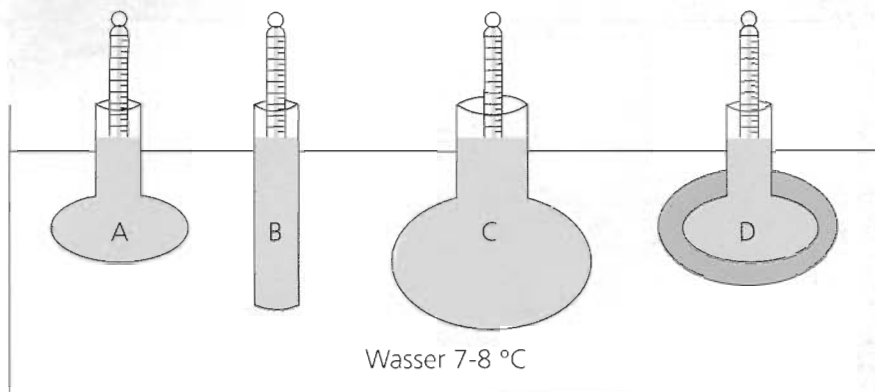


Bild 4 Die vier Vergleichsgefäße zur Demonstration des Wärmeverlustes

erfolgen die Temperaturänderungen recht langsam. Deshalb wird empfohlen, Behälter sehr unterschiedlicher Größe für die Versuche heranzuziehen und eine große Temperaturdifferenz zwischen Körperoberfläche und Umgebung zu wählen.

In den folgenden Versuchen haben wir Temperaturen gewählt, die nicht zu weit von der Körpertemperatur der Warmblüter entfernt liegen. Die anderen Temperaturen wurden in einem Bereich gewählt, in dem man auch in der Schule leicht arbeiten kann.

Damit die Versuche in jeder Schule gemacht werden können, wurden sie mit einfach zugänglichen Mitteln durchgeführt. Aus diesem Grund sind die Ergebnisse nicht sehr genau, trotzdem noch gut für die Demonstration der gewünschten Effekte geeignet.

Versuch 1: Hautoberfläche und Wärmeverlust

Man nimmt verschiedene Glaskolben gleicher Wandstärke, die mit warmem Wasser (etwa 50°C) gefüllt werden: Gefäß (A): Rundkolben 1/4 Liter; (B): Meßzylinder 0,25 Liter, Durchmesser ca. 4,5 cm; (C): Rundkolben 1 Liter; (D): 1/4 Liter (Gefäß vergleichbar mit (A), mit Isolierung).

Man taucht die Körper wie in Bild 4 vorgeschlagen in Wasser, dessen Temperatur bei 7-8 °C gehalten wird. Bild 5 zeigt die Temperaturänderung (in °C) der Körper in Abhängigkeit von der Zeit (min).

Es ist leicht zu erkennen, daß die Temperatur in dem kleinen Glaskolben A und in dem Zylinder B schneller sinkt. Die Temperatur in der großen Flasche C sinkt langsamer und in dem isolierten Glaskolben D sinkt sie noch langsamer.

Die durchschnittlichen Wärmeverluste pro Zeit (Leistungen) lassen sich mit $P = C_w \cdot m \cdot \Delta T / t$ berechnen, wobei $C_w = 4187 \text{ J/(kg K)}$ die Wärmekapazität des Wassers ist, m die Masse des Wassers in den Gefäßen, ΔT die Temperaturdifferenz und t die Zeit.

Es ergeben sich daher für die verschiedenen Körper A bis D folgende durchschnittliche Leistungen:

$$P_A = (4187 \text{ J/Kg K}) \cdot 1/4 \text{ Kg} \cdot 39 \text{ K} \cdot 1 / (20 \cdot 60 \text{ s}) = 34 \text{ W}$$

$$P_B = (4187 \text{ J/Kg K}) \cdot 1/4 \text{ Kg} \cdot 40 \text{ K} \cdot 1 / (20 \cdot 60 \text{ s}) = 35 \text{ W}$$

$$P_C = (4187 \text{ J/Kg K}) \cdot 1 \text{ Kg} \cdot 33 \text{ K} \cdot 1 / (20 \cdot 60 \text{ s}) = 115 \text{ W}$$

$$P_D = (4187 \text{ J/Kg K}) \cdot 1/4 \text{ Kg} \cdot 26 \text{ K} \cdot 1 / (20 \cdot 60 \text{ s}) = 23 \text{ W}$$

Eine Variante des Experiments:

In Schulen, in denen es eine gut ausgestattete Sammlung gibt, kann man mit Hilfe von Heizregelungen die Behälter auf einer bestimmten Temperatur konstant halten. Man wird dann erkennen können, daß die Heizleistung pro Volumeneinheit für den isolierten Körper D am geringsten ist und für den größeren Körper C geringer ist als für A und B.

Dieser Versuch nimmt jedoch viel Zeit in Anspruch, weil einerseits die Temperaturänderungen bei diesen Wassermengen langsam sind und andererseits die Versuchsanordnung an sich sehr aufwendig ist.

Versuch 2: Die „effektive“ Temperatur bei unterschiedlichen Umgebungen

Man stellt einen Behälter (Becherglas, 100 ml) gefüllt mit Wasser der Temperatur 50°C in einen Raum, der eine Temperatur von z. B. 12 °C hat.

Man mißt den zeitlichen Verlauf der Temperatur T_1 in dem Behälter. Dann wiederholt man das Experiment, wo-

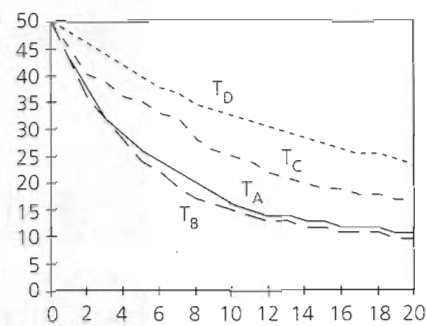


Bild 5 Temperaturverläufe für verschiedene Gefäße A - D; (in °C und min)

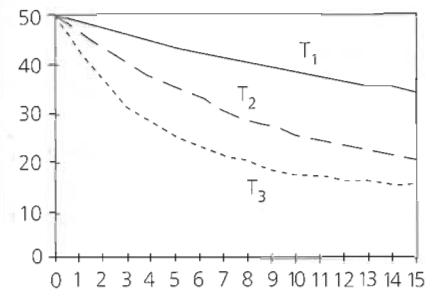


Bild 6 Temperaturabnahme bei ruhender Luft (T_1) bei bewegter Luft (T_2) und bei Wasser (T_3) (in °C und min)

bei man mit einem Gebläse Luft auf den Behälter bläst und so einen Wind simuliert (T_2). Danach gibt man den Wasserbehälter, dessen Wassertemperatur bei 50°C liegt, in ein Wasserbad der Temperatur 12 °C, und mißt wieder die Temperaturabnahme in der Zeit (T_3). In Bild 6 sind die Ergebnisse einer Beispielmessung dargestellt.

Wie man sieht, sinkt die Temperatur bei simuliertem Wind im Vergleich zu ruhender Luft als Umgebung schneller und in dem Versuch mit dem Wasserbad noch schneller.

Der Versuch könnte auch anders durchgeführt werden: Man hält die Temperatur im Behälter bei einer bestimmten Temperatur mit einer elektrischen Heizung konstant und mißt die dazu benötigte Leistung P_1 . Man wiederholt das Experiment mit Wind und stellt fest, daß die benötigte Leistung P_2 (um diese Temperatur konstant zu halten) höher ist. Im Wasserbad wäre die Leistung P_3 noch höher.

Durch diesen Versuch angeregt, könnten sich die Schülerinnen und Schüler folgende Frage stellen:

Ein Thermometer hängt in ruhender Luft, die nach Thermometerangabe eine Temperatur von 12 °C hat. Zeigt das Thermometer eine niedrigere Temperatur an, wenn sich diese Luft bewegt? Natürlich ist die Antwort nein. Es wird mit dem Wind nicht die Tem-

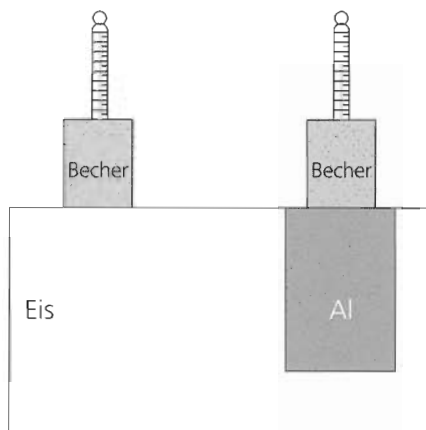


Bild 7 Simulationsversuch für eine Tierpfote auf Eis

peratur niedriger als 12 °C, sondern der Verlust der Wärme erfolgt schneller, weil die Wärme von dem Wind wegtransportiert wird.

Versuch 3: Tierpfote auf dem Eis

Man nimmt einen Behälter mit glattem Boden, isoliert die Seitenwände und füllt den Behälter mit Äthanol (Wasser würde bei den verwendeten Temperaturen gefrieren). Dann stellt man den Behälter auf eine Eisunterlage. Man mißt die Temperaturänderung der Flüssigkeit in der Zeit. Anschließend wiederholt man den Versuch, aber verwendet statt der Eisunterlage (oder Schnee) eine Metallplatte, die eine gute Wärmeleitfähigkeit hat (s. Bild 7). Dabei ist es notwendig zwischen dem Behälterboden und der Metallplatte eine Wärmeleitpaste aufzutragen, um einen vollständigen Kontakt herzustellen.

Bild 8 zeigt die Ergebnisse. In unserem Versuch waren: Aluminiumbecher 1/10 Liter; Anfangstemperatur des Äthanol 20 °C, Aluminiumplatte und Eisplatte -9 °C am Anfang, -6 °C am Ende der Versuche.

Wie man sieht, sinkt die Temperatur T_1 in dem Behälter auf dem Eis langsamer als auf dem Aluminium (T_2). Das bedeutet, daß der Wärmeverlust kleiner ist, was auf den kleineren Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten des Eises ($2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) im Vergleich zu Aluminium ($200 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) zurückzuführen ist. Auf Schnee ist der Wärmeverlust noch geringer (aus diesem Grund graben sich einige Tiere, wie z. B. der Eisbär, im Schnee ein).

Außerdem stellt man fest, daß bei diesen Versuchsbedingungen das Eis unter dem Behälter nicht schmilzt. Der

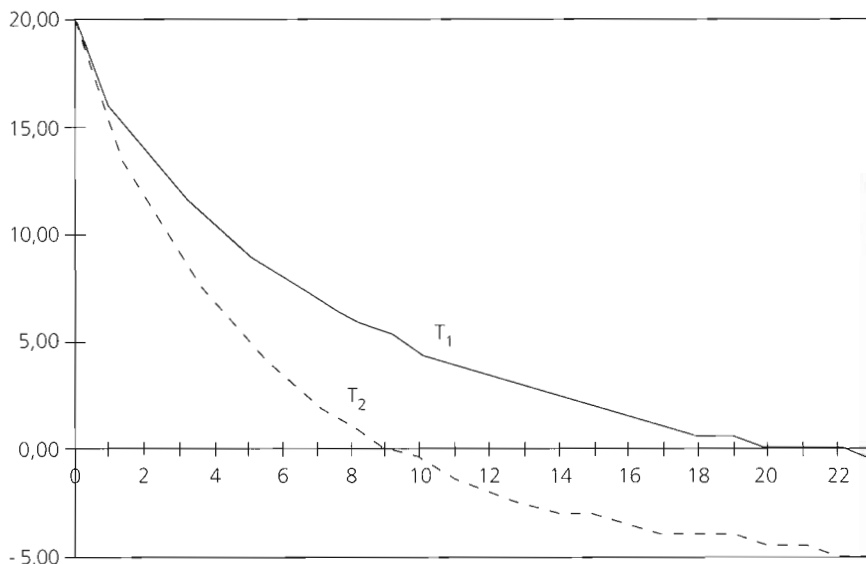


Bild 8 Temperaturänderung bei einer Beispielmessung (°C, min)

Becher auf dem Eis hat sich am Versuchsende auf eine Temperatur von 0°C abgekühlt, genauso wie eine Tierpfote auf Eis ebenfalls eine niedrige Temperatur annimmt.

Schlußbemerkungen

Die beschriebenen Beispiele sollen als Anregungen dienen, mit denen der Physikunterricht für die Schülerinnen und Schüler interessanter gemacht werden kann. Weiterhin kann ihnen mit diesen und ähnlichen Inhalten eindrucksvoll gezeigt werden, daß physikalische Gesetze auch für die belebte Natur wichtig sind und ihre Anwendung zu interessanten Einsichten führt.

Literatur

/1/Krapp, A.: Psychologische Bedingungen naturwissenschaftlichen Lernens: Untersuchungsansätze und Befunde zu Motivation und Interesse. – In: R.Duit, Ch.v. Rhöneck: Lernen in den Naturwissenschaften. – Kiel, 1996
 /2/Euler, M.: Physikunterricht - Anspruch und Realität. – Frankfurt am Main/Bern, 1982
 /3/Todt, E.: Schülerempfehlungen für einen interessanten Physikunterricht. – In: Naturwissenschaften im Unterricht-Physik (1993)3. – S.37–38; 4. – S.37–40
 /4/ Hoffmann, L.: Mädchen und Physik - ein drängendes Thema. – In: Naturwissenschaften im Unterricht. – (1990)1. – S. 4–11
 /5/Häubler, P.; Hoffmann, L.: Wie Physikunterricht auch für Mädchen interessant werden kann. – In: Naturwissenschaften im Unterricht. – (1990)1. – S. 12–18
 /6/Häubler, P.; u.a.: Qualitative Unterschiede im Interesse an Physik und Konsequenzen für den Physikunterricht. – In: Zeitschrift für Didaktik der Natuwissenschaft. – (1996)3. – S. 57–69

/7/Häubler, P.; Hoffmann, L.: Physikunterricht – an den Interessen von Mädchen und Jungen orientiert. – In: Unterrichtswissenschaft. – (1995)2. – S. 107–126
 /8/Faißt, W.; u.a.: Physik-Anfangsunterricht für Mädchen und Jungen. – Kiel, 1994
 /9/Schulreferat der Landeshauptstadt München und Münchner Tierpark Hellbrunn: Tiere im Winter. Informationen und Arbeitsblätter für Lehrer und Schüler. o.J.
 /10/Meyer, L.: Physik und Medizin. Arbeitsmaterialien für den Physikunterricht der Gymnasialen Oberstufe. – PLIB-Werkstattheft 10, 1993
 /11/Müller, W.: Erprobungsmaterialien zum Wahlkurs „Physik und Medizin“. – unveröffentlichtes Material der Universität Potsdam. – Physikdidaktik 1997/98
 /12/Berger, R.: (Arbeitstitel) Fächerübergreifender Unterricht in der Oberstufe: Bildgebende Verfahren in der Medizintechnik. – In Vorbereitung.
 /13/Tributsch, H.: Wie das Leben leben lernte. – München, 1980
 /14/Bertsch, A.: In Trockenheit und Kälte. – Ravensburg, 1977
 /15/Kane, J.; Sternheim, M.: Fisica Biomedica. – Roma, 1980
 /16/Hempel, G.: Leben in Meereis. – In: Naturw. Rdsch. – (1997)2. – S. 43–49
 /17/Penzlin, H.: Lehrbuch der Tierphysiologie. – Jena, 1996
 /18/Schmitz, M.; Hufmann, M.: Wetter und Jahresrhythmik am Beispiel Winter. – In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik. – (1997)7. – S.10–13
 /19/Larsen, T.: Die Welt der Eisbären. – Landbuch-Verlag. – Hannover, 1980

Giuseppe Colicchia
 Liceo Linguistico „Oriani“ Roma
 z.Zt. Lehrstuhl für Didaktik der Physik
 der Ludwig-Maximilians-Universität München

Prof. Dr. Dr. Hartmut Wiesner
 Lehrstuhl für Didaktik der Physik
 Ludwig-Maximilians-Universität München
 Schellingstr. 4, 80799 München