

Die Körpertemperatur des Menschen – Regelmechanismen und gesundheitliche Aspekte

Cordula Mauch, Hartmut Wiesner und Susanne Barthel

Veröffentlicht in: Naturwissenschaften im Unterricht – Physik, 2004, S.10

Einleitung:

Die Wärmelehre ist ein Gebiet in dem die Schülerinnen und Schüler mit erheblichen Lernschwierigkeiten zu kämpfen haben. Schon der Sprachgebrauch stellt hier eine Schwierigkeit dar, da in der Fachsprache die Wärme eine Prozessgröße ist, im Alltag aber einen Zustand eines Systems mit einer bestimmten Temperatur beschreibt. Im Münchner Unterrichtskonzept zur Wärmelehre von Bader (2001) wurde der Inhalt unter Berücksichtigung der Lernschwierigkeiten neu strukturiert. In der Evaluation haben sich erhebliche Vorteile gegenüber der üblichen Struktur gezeigt. Die positive Bilanz kann durch die Einbettung in einen interessanten Kontext, z.B. Mensch und Medizin verbessert werden. Von Vorteil ist weiterhin eine Methode, die über einen gewissen Zeitraum hinweg eigenständiges Arbeiten ermöglicht, zum Beispiel Arbeiten an Stationen.

Die Einführung der Wärmetransportphänomene am Beispiel des Menschen ist schwierig. Meist treten mehrere Transportmechanismen gleichzeitig auf und sie laufen teilweise im Körperinneren ab, wo sie im Unterricht nicht direkt beobachtbar sind. Deshalb wird im Folgenden ein Vertiefungs- und Anwendungszirkel zur Temperaturregulation im menschlichen Körper vorgestellt. Es wird davon ausgegangen, dass die physikalischen Grundlagen der Wärmetransportphänomene bekannt sind. Wenn die Verdunstung noch nicht besprochen wurde, muss hier noch eine kurze Erklärung (analog zu Stationen 5 und 6) ergänzt werden. Der Lernzirkel bietet die Möglichkeit sowohl nach einer rein fachlichen Einführung wie auch einer anwendungsorientierten Einführung das Wissen über die Wärmetransportphänomene zu festigen und zu erweitern.

Der Lernzirkel enthält einige Lesestationen für komplexe Sachverhalte, wie z.B. die menschliche Temperaturregulation oder für experimentell äußerst schwer zu untersuchende Situationen.

Zunächst wird eine Kurzbeschreibung aller Lernstationen gegeben und anschließend werden einige Stationen ausführlich beschrieben. Der Lernzirkel ist für Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufe I (8. oder 9. Klasse) einer Realschule oder eines Gymnasiums gedacht.

Überblick über den Lernzirkel:

Station 1a): Der Mensch ein gleichwarmes (homiothermes) Lebewesen (Lesestation)

Die Station 1a) ist eine Theoriestation, in der die Schülerinnen und Schüler die für den Menschen lebenswichtige Bedeutung der Konstanz der Körpertemperatur und insbesondere die dafür notwendige Gleichgewichtsbedingung (Wärmeproduktion + Wärmeaufnahme = Wärmeabgabe) kennen lernen (bzw. je nach bisherigem Unterrichtsverlauf diese wiederholen).

Station 1b): Der Mensch ein gleichwarmes Lebewesen (Experiment)

In dieser Station werden die Schülerinnen und Schüler aufgefordert, ihre Wärmeproduktion durch sportliche Aktivität zu steigern. Des Weiteren wird die Wärmeaufnahme durch die Aufnahme eines heißen Getränkes verstärkt.

Als Ergebnis werden die Schülerinnen und Schüler feststellen, dass die menschlichen Temperaturregulierungsmechanismen so gut sind, dass zum Beispiel trotz körperlicher Anstrengung (Liegestütze, Kniebeugen oder Treppensteigen) die gemessene Temperatur praktisch konstant bleibt.

Station 2: Temperaturregulation über die Blutgefäße (Theorie und Experiment)

Die Regulierung der Körpertemperatur hängt stark von dem Blutfluss ab, da dieser die im Körperinneren produzierte Wärme in den gesamten Körper transportiert. In Station 2 wird der Zusammenhang von Blutdurchfluss und dem damit verbundenen Wärmetransport zum Durchmesser der Blutgefäße erläutert und durch ein Simulationsexperiment verdeutlicht.

Anleitung für das Simulationsexperiment:

Material: Kupferrohre (Durchmesser etwa 1cm und 1,7cm), 2 Frischhaltedosen (Plastik), natürliches Pflanzenfett, 1 Eimer (10 – 12 Liter), 2 Regentonnenanschlussshähne, 2 Schläuche mit Klemmen, Karosseriedichtungsmasse

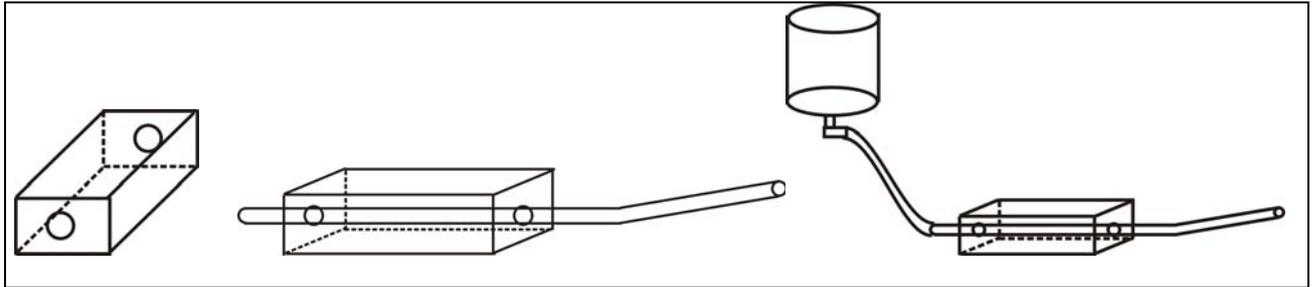


Abb. 1: Schema des Versuchsaufbaus

Die Blutgefäße werden durch Kupferrohre simuliert, deren Verengung bzw. Erweiterung wird durch unterschiedliche Rohrdurchmesser verwirklicht. Um die Unterschiede in der Wärmeabgabe zu veranschaulichen, werden die Rohre durch eine mit Fett gefüllte Dose geführt. Durch die Rohre wird zum Schluss heißes Wasser geleitet, wodurch der Blutfluss simuliert wird. Die unterschiedliche Schmelzgeschwindigkeit gibt Aufschluss über die Wärmeabgabe. In die Frischhaltedosen werden an den schmalen Seiten je ein Loch in gleicher Höhe mit einem entsprechenden Durchmesser gebohrt (Bild 1). Nach dem Durchstecken der Rohre werden die Übergänge mit Karosseriedichtungsmasse (extrem wärmebeständig) abgedichtet. Das Modell sollte einen Tag trocknen. Man füllt die Dosen mit Pflanzenfett, so können die unterschiedlichen Auswirkungen (verschieden starkes Schmelzen) mit bloßem Auge festgestellt werden. Der Warmwasserzufluss zu den Rohren kann durch einen Warmwasseranschluss geregelt werden oder es wird ein Eimer als Wasserreservoir verwendet. In den Eimer wird ein Loch für die Regentonnenanschlüsse gebohrt und die Anschlüsse befestigt (Bild 2a). Dies ermöglicht einen Warmwasserdurchfluss ohne bzw. nur mit einem Warmwasseranschluss im Physikraum. Zur Durchflussregelung dient zum Einen der Hahn, zum Anderen werden die Rohre nach den Dosen leicht angewinkelt, da sonst ein zu großer Durchfluss entstehen würde. Der Hahn reicht zur Regelung nicht aus. Dreht man ihn nur wenig auf, sind die Rohre nicht vollständig mit Wasser gefüllt, so dass eine Verfälschung der Ergebnisse auftreten würde.



Abb. 2: Experimentelle Anordnung zur Demonstration der Abhängigkeit der abgegebenen Wärme vom Durchmesser der Blutgefäße

Station 3: Temperaturregulation durch das Gegenstromprinzip: (Theorie und Experiment)

Eine weitere Art der Temperaturregulation das Gegenstromprinzip: Die parallele Anordnung von Arterien und Venen in den Extremitäten ermöglicht es, dass das von den Extremitäten kommende kühlere, venöse Blut vom wärmeren, arteriellen Blut vorgewärmt wird bevor es zurück ins Körperinnere fließt.

Die experimentelle Anordnung des Gegenstromprinzips ist auf der Abbildung 3 dargestellt.

Bauanleitung:

Material: 5 Kupferrohre (Durchmesser 15mm, Länge: 2x 22cm, 2x 80cm, 1x 45cm), 6 Eckstücke.

Die langen Rohre werden mit einer Schraubzwinge platt gedrückt, so dass sich die Kontaktfläche zwischen den Rohren vergrößert. Zusätzlich wird der Zwischenraum nach dem Schweißen oder Löten mit Wärmeleitpaste gefüllt. Die Rohre und Eckstücke werden entsprechend Bild 3 aneinandergesetzt und verschweißt. Für den Wasserdurchfluss wird die gleiche Konstruktion (Eimer mit Hahn) wie bei der vorherigen Station verwendet. Beim Experiment wird das untere waagerechte Rohr in eine Wanne mit einer Wasser-Eis-Mischung (0°C) gestellt.

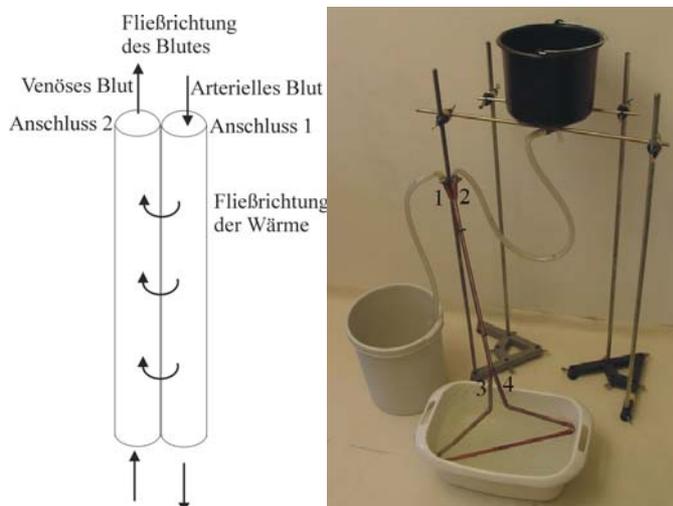


Abb. 3: Schematische Darstellung des Gegenstromprinzips und Modell der Blutgefäße

Bei Messungen haben sich als Beispiel folgende Werte ergeben:

Temperatur beim Einfluss	Messstelle 2	Messstelle 1	Messstelle 4	Messstelle 3
86°C (schneller Durchfluss)	78°C	62°C	75°C	58°C
48°C	48°C	38°C	45°C	35°C

Die Daten zeigen, dass die Temperatur des vom „Körper“ weg fließenden Stoffes abnimmt (Messwerte von Punkt 2 größer als in Punkt 4) und zum „Körper“ hin zunimmt (Messwerte von Punkt 1 größer als in Punkt 3). Es findet ein Wärmetransport von der nach unten zu der nach oben fließenden Flüssigkeit statt. Die Messwerte zeigen, dass abgegebene und aufgenommene Wärmemenge etwa gleich sind. Die geringe Temperaturänderung ist auf die Schwierigkeit zurückzuführen, mit einfachsten Mitteln gleichmäßig flache Seiten als möglichst große Kontaktfläche in die Kupferrohre zu drücken.

Station 4: Fieber – Fieberphasen (Lesestation)

In dieser Station werden die Regelung und insbesondere die 3 Phasen des Fiebers beschrieben. Die Schüler sollen Merkmale (Hautfarbe) und einen Begriff aus dem Alltag (Schüttelfrost) in den zeitlichen Verlauf einordnen und sich Gedanken über eine Unterstützung bzw. Reduzierung der Wärmeabgabe machen.

Bei Untersuchungen zur pflegerischen Unterstützung bei fieberhaften Erkrankungen könnte man zum Beispiel Wadenwickel und die Verwendung einer Wärmflasche betrachten. Diese Versuche sind in der Schule nicht oder sehr schwer praktikabel. Aufgabenstellungen und weitere Anregungen sind unter „weiteren Beispielen“ am Ende zu finden.

Station 5: Temperaturregelung durch Verdunsten von Schweiß

An dieser Station soll den Schülerinnen und Schülern verdeutlicht werden, dass die Verdunstung eine sehr effektive Methode zur Abführung von Wärme ist, insbesondere dann, wenn bei höherer Außentemperatur (über 37°C), intensivem Sonnenschein und Windstille die Wärmeabgabe durch Strahlung oder Wärmeleitung und Konvektion praktisch nicht möglich ist. Dazu erhalten sie physiologische Daten (bei starkem Schwitzen können etwa 500 ml Schweiß pro m² Haut in einer Stunde abgegeben werden). Da Schweiß weitgehend aus Wasser besteht, kann durch Messung der Verdampfungswärme die benötigte Energiemenge pro m² und Sekunde ermittelt werden. Nützlich ist dafür die Kenntnis der elektrischen Leistung, da diese sehr einfach bei einem Tauchsieder bestimmt werden kann (z.B. wenn ein Stecker mit Wattmesser verwendet wird). Es ergibt sich ein erstaunlich hoher Wert: etwa 300 W/m². (Zum Vergleich: Über die Wärmestrahlung werden pro Grad Temperaturunterschied etwa 5 W/m² vom Körper abgestrahlt, wenn die Zimmerwände kälter als die Oberfläche des Körpers sind.)

Station 6: Nasse Badekleidung – Erkältungsgefahr (Experiment und Theorie)

In dieser Station wird hauptsächlich auf die Verdunstung eingegangen, die aufgrund des hohen Energiebedarfs zu einer Auskühlung des Körpers führen und bereits durch nasse Badekleidung erreicht werden kann. Diese Station bildet eine Erweiterung der 5. Station, wobei jetzt eine mögliche gesundheitliche Gefährdung deutlich wird. Diese Erkältungsgefahr sollen die Schüler durch eine Simulation „Puppe im Bad“ entdecken und durch Reflexion ihres Wissens evt. unter zu Hilfenahme eines Textes erklären. Durch einen weiteren Versuch wird an einem Alltagsbeispiel „Feststellung der Windrichtung“ das Wissen über Verdunstung und Konvektion vertieft und erweitert.

Versuchsaufbau:

Dieser Versuch sollte bereits einen Tag vorher aufgebaut werden. Man benötigt eine Hartgummipuppe, 3-4 Thermometer mit denen man auch kleine Änderungen feststellen kann, (der Effekt wird bei ca. 1-2°C liegen), ein Wassergefäß und Stativmaterial. Die Puppe wird in Wasser mit Zimmertemperatur gesetzt, so dass sich die Badehose teilweise im Wasser befindet. Anschließend werden die Thermometer so befestigt, dass die Temperatur des Wassers, der „Haut“, welche mit nasser Kleidung in Berührung kommt, wenn möglich der „trockenen Haut“ und der Luft gemessen werden kann.



Abb. 4: Modellversuch zur Erkältungsgefahr beim Baden

Im Folgenden werden die Stationen 2), 3) und 4) ausführlicher beschrieben, die übrigen Stationen sind detaillierter im Internet dargestellt (s. u.).

Station 2: Temperaturregulation über die Blutgefäße

Im Folgenden findest du einen Text der sich mit der Temperaturregulation im Körper durch Veränderung der Blutgefäße befasst. Arbeite den Text aufmerksam durch und beantworte die folgenden Fragen. Führe danach den Versuch durch.

- a) Welches Wärmetransportphänomen tritt hauptsächlich beim Wärmetransport im menschlichen Körper auf?
Begründe deine Antwort, indem du beschreibst wo und wie dieses Phänomen vorkommt.
- b) Es liege eine Störung des Gleichgewichtes vor, so dass zu viel Wärme produziert wird: Wie verändern sich die Blutgefäße, um der Störung entgegen zu wirken. Beschreibe dazu welche Auswirkung diese Veränderung mit sich bringt.
- c) Was passiert, wenn durch eine kalte Umgebung die Wärmeabgabe zu groß ist? Erkläre die Veränderung!
- d) Welche Temperaturänderungen sind mit den Auswirkungen aus b) und c) verbunden?

Temperaturregulation über die Blutgefäße

Die Wärmeproduktion findet beim Menschen hauptsächlich in den inneren Organen (insbesondere der Leber) statt. Zur Erwärmung des menschlichen Körpers muss die Wärme in den ganzen Körper transportiert werden. Dieser Transport erfolgt hauptsächlich über das Blut. Das Blut nimmt die insbesondere in der Leber produzierte Wärme auf, da eine Temperaturdifferenz zwischen der Leber als innerem Organ (höhere Temperatur) und dem Blut (geringere Temperatur) vorliegt. Das so erwärmte Blut fließt durch den Körper und kommt mit Gewebe in Kontakt, welches eine niedrigere Temperatur hat. Es findet wieder ein Temperaturangleich zwischen Blut und Gewebe statt, wobei dieses Mal das Blut abgekühlt und das Gewebe erwärmt wird.

Der Mensch hält seine Temperatur annähernd auf 37°C konstant. Dies ist nur möglich, wenn folgendes Gleichgewicht besteht

$$\text{Wärmeaufnahme} + \text{Wärmeproduktion} \approx \text{Wärmeabgabe.}$$

Bei einer „Störung“ dieses Gleichgewichtes, zum Beispiel durch eine zu große Wärmeproduktion aufgrund von körperlicher Aktivität beim Sport, ist zur Wiederherstellung eine erhöhte Wärmeabgabe notwendig.

Die Wärmeabgabe an die Umgebung geschieht an der Körperoberfläche über die drei Wärmetransportphänomene (Wärmeleitung, Wärmekonvektion, Wärmestrahlung) oder/und der Verdunstung. Aus diesem Grund ist es notwendig, dass die produzierte Wärme an die Körperoberfläche transportiert wird.

Wie viel Wärme vom Körperinneren an die Körperoberfläche transportiert wird, ist vom Blutdurchfluss abhängig. Dieser kann durch Veränderungen (Erweiterung / Verengung) der Blutgefäße gesteuert werden. Werden die Blutgefäße erweitert, ist die Hautdurchblutung der Körperoberfläche größer. Dadurch kann mehr Wärme an die Körperoberfläche abgegeben werden. Dies führt zu einer höheren Temperatur der Haut und dieses zu einer verstärkten Wärmeabgabe an die umgebende Luft.

Der Versuchsaufbau für das Schülerexperiment ist weiter oben beschrieben, die Versuchsanweisungen sind im Internet abrufbar (s. u.).

Station 3: Temperaturregulation durch das Gegenstromprinzip

Das Gegenstromprinzip beruht auf der parallelen Anordnung der großen Blutgefäße (Arterien – kommen vom Herzen, Venen – führen zum Herzen) die das Blut zu den Extremitäten hin- bzw. von ihnen wegführen. Die beiden Blutgefäße berühren sich, wodurch ein Wärmetransport zwischen ihnen leicht möglich ist. Das Blut, welches vom Körperinneren kommt und zu den Extremitäten hinbefördert wird, hat eine höhere Temperatur als das Blut, welches von den Extremitäten kommt und zum Körperinneren hin transportiert wird. Aufgrund der Anordnung fließt das Blut mit einer höheren Temperatur (arterielles Blut) parallel aber in entgegengesetzter Richtung zu dem Blut mit niedrigerer Temperatur (venösem Blut). Der Temperaturunterschied hat einen Wärmestrom vom arteriellen zum venösen Blut zur Folge.

Durch diese Anordnung wird das kältere, venöse Blut, welches in das Körperinnere zurück fließt, bereits aufgewärmt bevor es das Körperinnere erreicht. Dadurch wird die Auskühlung des Körperinneren bzw. die Notwendigkeit eines erhöhten Stoffwechsels in zweierlei Hinsicht verhindert. Zum Einen besteht zwischen venösem Blut und Körperinnentemperatur ein geringerer Temperaturunterschied, so dass ein kleinerer Wärmestrom notwendig ist um die lebenswichtige annähernd konstante Körpertemperatur beizubehalten. Zum Anderen ist das arterielle Blut, welches an die Hautoberfläche transportiert wird, bereits abgekühlt. Da die Umgebungstemperatur im Allgemeinen niedriger als die Körpertemperatur ist, wird auch hier die Wärmeabgabe durch eine parallele gegensinnige Anordnung der Blutgefäße reduziert.

Hinweise zur Versuchsdurchführung sind im Internet abrufbar (s.u.), die Anordnung wurde im Überblick bereits beschrieben.

Station 4: Fieber – Fieberphasen

Löse die folgenden Aufgaben, nachdem du den Text gelesen und das Wichtigste unterstrichen hast:

- a) Zeichne ein Diagramm in dem Ist- und Sollwert gegen die Zeit aufgetragen sind.
- b) In welcher Fieberphase ist die Haut gerötet und in welcher wirkt die Haut blass? Begründe deine Antwort.
- c) Der Begriff Schüttelfrost ist euch sicherlich bekannt, wenn nicht diskutiert in der Gruppe, was mit diesem Begriff gemeint ist. Zu welchem Zeitpunkt des Fiebers kann Schüttelfrost auftreten? (Erklärung!)
- d) Die Neueinstellung der Körpertemperatur stellt für den Körper (insbesondere den Kreislauf) eine Belastung dar. Welche Möglichkeiten fallen dir ein, wie man die körpereigenen Regulationsmechanismen unterstützen kann?
Tipp: Denke mal zurück als du das letzte Mal Fieber hattest. Welche Maßnahmen hat der Arzt empfohlen bzw. was haben deine Eltern oder jemand anderes während deiner Krankheit gemacht, damit es dir besser ging?

Fieber – Fieberphasen

Der Mensch hält seine Körpertemperatur auf annähernd 37°C konstant. Damit dies möglich ist, wird die aktuelle Temperatur (Istwert) ständig mit der angestrebten Temperatur (Sollwert: etwa 37°C) verglichen. Weicht der Istwert von dem Sollwert ab, setzt der Körper Mechanismen ein (z. B. Erweiterung der Gefäße zur Vergrößerung der Wärmeabgabe) um dieser Abweichung entgegen zu wirken.

Tritt eine Erhöhung der Körpertemperatur auf, so liegt der Grund in der Regel in einem Fehler oder einer Überforderung der Regulationsmechanismen. Das Fieber ist die einzige Form bei der eine erhöhte Körpertemperatur aufgrund einer Verstellung des Sollwertes stattfindet.

Fieber ist keine eigenständige Krankheit, sondern ein Symptom von anderen Krankheiten. Der Verlauf des Fiebers lässt sich in 3 Phasen gliedern:

1. Phase: Fieberanstieg

Der Sollwert ist erhöht und weist dadurch eine große Differenz zu dem noch nicht veränderten Istwert auf. Der menschliche Körper versucht diesen Unterschied, wie auch bei der normalen Regelung der Körpertemperatur, durch Veränderung des Istwertes auszugleichen. Dazu wird die Wärmeabgabe verringert (z. B. durch Engstellung der Blutgefäße) und die Wärmeproduktion gesteigert.

2. Phase: Fieberhöhe

Temperaturregulation wie normal nur auf einen höheren annähernd konstanten Wert.

3. Phase: Fieberabfall

Der Sollwert ist erniedrigt bzw. auf dem normalen Wert und weist dadurch eine große Differenz zu dem noch nicht veränderten Istwert auf. Der Mensch setzt seine Regulationsmechanismen ein um den Istwert anzugleichen. Dies wird durch eine vergrößerte Wärmeabgabe (z. B. durch Erweiterung der Blutgefäße) und vermehrtes Schwitzen bewerkstelligt.

Weitere Möglichkeiten für den Unterricht:

Im Folgenden werden einige Alltagssituationen aufgezählt, die man weiterführend oder alternativ als Beispiele für die Behandlung der Wärmetransportphänomene im Zusammenhang mit der Körpertemperatur heran ziehen kann. Diese beziehen sich nicht nur auf den medizinischen Bereich, eine Vielfalt von unterschiedlichen realen Situationen hilft dabei die Bedeutung des Inhaltes widerzuspiegeln.

- *Unterkühlung beim Einbrechen ins Eis*

- *Taucheranzüge:*

Die technische Entwicklung von Taucheranzügen, welche wasserdicht sind und aus luftgefülltem Schaumstoff (Isolierung) bestehen, ermöglicht die thermodynamischen Bedingungen, welche der Mensch für einen längeren Aufenthalt im Wasser benötigt.

- *Erweiterungsmöglichkeit der Temperaturregulation über die Blutgefäße: Gefäßveränderungen durch Alkohol*

Schon durch den regelmäßigen Genuss von einem Glas Alkohol am Tag verändern sich die Gefäße. Übermäßiger Alkoholkonsum wirkt sich bezüglich der Temperaturregulation über die Blutgefäße negativ und unter Umständen gefährlich aus. Durch Alkohol weiten sich die Blutgefäße, so dass die Haut gerötet und warm ist. Durch die damit verbundene vermehrte Wärmeabgabe besteht bei Alkoholikern, die ungeschützt der Witterung ausgesetzt sind, die Gefahr sich Erfrierungen zu zuziehen oder sogar zu erfrieren.

- *Erweiterung zur Behandlung von Fieber:*

Je nach Intention kann die erweiterte Behandlung des Themas „Fieber“ einen wiederholenden oder vertiefenden Charakter haben. Eine Wiederholung sowohl in physikalischer wie auch in medizinischer Sicht bildet die Behandlung von Waschungen

als Unterstützung der Fiebersenkung. Eine Vertiefung des Verständnisses über den menschlichen Körper kann durch die Thematisierung der Temperaturangaben bei Wadenwickeln erreicht werden. Der wiederholende Charakter wird durch die Waschung erreicht, da hier analog zum beschriebenen Wadenwickel die Wärmeleitung und die Verdunstung gesteigert wird. Eine Vertiefung erreicht man durch die Behandlung von Kneipp-Wickeln. Kneipp-Wickel sind kälter, so dass die Wärmeabgabe sehr groß ist und zur Aufrechterhaltung einer konstanten Körpertemperatur Gegenmaßnahmen (Erwärmung der Waden) eingeleitet werden müssen. Aus diesem Grund bewirkt ein Wadenwickel nach Kneipp eine Erwärmung des Körpers, insbesondere der Wade.

Aus Platzgründen konnten hier nicht alle Stationen ausführlich dargestellt werden. Aus diesem Grunde sind auf der Homepage der Didaktik der Physik der LMU München (<http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik>, → „Fundgrube“ → „Sammlung von Unterrichtsmaterialien“: „Lernzirkel: Die Körpertemperatur des Menschen – Regelmechanismen und gesundheitliche Aspekte“) alle Stationen ausführlicher als hier beschrieben. Weiterhin sind dort zusätzliche Informationen zu Erweiterungsmöglichkeiten, Heimexperimenten zum Fieber und Anregungen für eine anwendungsorientierte Erarbeitung zusammengestellt.

Literatur:

- [1] Bader, Martin; Vergleichende Untersuchung eines neuen Lehrganges “Einführung in die mechanische Energie und Wärmelehre“. Dissertation Universität München, 2001
- [2] Bader, M., Wiesner, H.: Das ”Münchner Unterrichtskonzept“ zur Einführung in die mechanische Energie und Wärmelehre. In: Physik in der Schule 37 (1999), S. 363-367”

Hintergrundwissen im medizinischen Bereich:

- [3] Schmidt; Thews (Hrsg.); Physiologie des Menschen. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona, 24. Auflage, 1990
- [4] Juchli, Liliane; Pflege. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York, 8. Auflage, 1997
- [5] Klinker, Silbernagl; Lehrbuch der Physiologie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York, 2003
- [6] von Campenhausen, Christoph; Die Sinne des Menschen – Einführung in die Psychophysik der Wahrnehmung. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York, 1993