

# Der Wärme auf der Spur – Ein Beitrag zur Wärmelehre in der Sekundarstufe I<sup>1</sup>

*Verfasser: StD Dr. Helmut Dittmann, Hans-Sachs-Gymnasium Nürnberg, Löbleinstraße 10, 8500 Nürnberg 10; Prof. Dr. Werner B. Schneider, Physikalisches Institut der Universität Erlangen-Nürnberg – Didaktik der Physik, Staudtstraße 7, 8520 Erlangen*

*In diesem Beitrag wird aufgezeigt, daß in der Wärmelehre im Unterricht oft nicht die Wärme, sondern die innere Energie behandelt wird. Der Grund ist offensichtlich ein fehlendes Meßgerät für die Wärme. Es wird ein geeignetes Meßgerät vorgestellt, das übliche Konzept für die Wärmelehre im Anfangsunterricht wird hinterfragt, und es werden Änderungsvorschläge gemacht.*

## 1 Einleitung

In der Wärmelehre der Sekundarstufe I wird meist der Aspekt, daß mit Wärme jene Energieform gemeint ist, die bei Austauschvorgängen von einem Körper zum andern fließt, nur am Rande erwähnt; häufig geht er sogar ganz verloren. Dies mag daran liegen, daß die ausgetauschte Energie erst nach deren Zu- oder Abfluß durch die Messung von Temperaturdifferenzen, also nur indirekt über die Änderung der inneren Energie der beteiligten Körper ermittelt wird. Der Transportcharakter der Wärme geht bei diesem Meßverfahren allerdings leicht verloren. Im Schüler vollzieht sich mehr oder weniger unbewußt der Schluß: »Was hineingeht, muß auch drin sein!« Die Folge ist eine schlichte Gleichsetzung von ausgetauschter Energie (Wärme) und innerer Energie, was natürlich dem ersten Hauptsatz der Wärmelehre widerspricht. Auch die vielfältige Verwendung des Begriffs Wärme in der Umgangssprache und selbst in der Fachsprache, wie z. B. in der Bezeichnung »Wärmekapazität«, trägt dazu bei, daß dieses falsche Bild der Wärme entsteht, ein Bild, das nach unseren Erfahrungen hartnäckig sogar ein Physikstudium überdauern kann.

Auf die Notwendigkeit, den Transportcharakter der Wärme im Unterricht herauszustellen, hat bereits vor mehr als 20 Jahren O. RANG [1] in dem Artikel »Versuch einer didaktischen Analyse zur Unterrichtseinheit Wärmemenge« hingewiesen. Auch neuere Darstellungen zur Wärmelehre [3], [4] betonen den Transportcharakter der Wärme ausdrücklich.

Im Schulunterricht finden diese wertvollen Anregungen jedoch nur zögernd Aufnahme. Wir vermuten, daß dies auf das Fehlen eines direkten, quantitativen Nachweises des Wärmestromes zurückzuführen ist. Ein Mangel, an den man sich in der Schule offenbar gewöhnt hat. Seine Tragweite wird aber deutlich, wenn man sich vorstellt, die Elektrizitätslehre ohne ein Meßgerät für den elektrischen Strom unterrichten zu müssen. Ein einfaches Meßgerät für den Wärmestrom

scheint uns daher eine sehr wünschenswerte Ergänzung der experimentellen Hilfsmittel für den Physikunterricht zu sein.

Die Technik kennt Wärmestrommesser, bei denen der Wärmestrom gezwungen wird, eine dünne Platte zu durchfließen, die einen bekannten Wärmewiderstand besitzt. Die sich dann einstellende Temperaturdifferenz zwischen beiden Seiten der Platte ist proportional zu dem durchgehenden Wärmestrom, der mit Hilfe des bekannten Wärmewiderstandes berechnet werden kann. Ähnlich wie bei der elektrischen Strommessung muß der Widerstand, hier der Wärmewiderstand, möglichst klein sein, damit der zu messende Strom wenig beeinflusst wird. Dies führt zu sehr kleinen Temperaturdifferenzen, deren Messung in der Schule Schwierigkeiten bereitet. Für den Unterricht sind derartige Geräte daher nicht brauchbar.

Das gleiche Meßprinzip, jedoch mit einer einfach durchführbaren Messung der Temperaturdifferenzen, ist neuerdings durch die Verwendung moderner thermoelektrischer Bauelemente (Peltiermodule), die eigentlich zur gezielten Kühlung elektronischer Bauteile gedacht sind und auf dem Peltiereffekt beruhen, auch der Schule zugänglich [4], [5]. Im folgenden werden wir einen hiermit realisierbaren, für den Unterricht geeigneten Wärmestrommesser vorstellen und seine Verwendung in der Wärmelehre erläutern. Wir hoffen, daß der Einsatz des Wärmestrommessers im Schulalltag zu einer stärkeren Beachtung des Transportcharakters der Wärme führen wird.

## 2 Das Peltiermodul – ein vielseitiges Bauelement

### 2.1 Aufbau und Wirkungsweise

Für die Wärmelehre geeignete Peltiermodule sind seit einiger Zeit preisgünstig im Elektronikfachhandel erhältlich (Bezugsquellen: [6], [7]). Diese Module sind aufgrund der Bauart und der thermoelektrischen Eigenschaften so vielseitig, daß sie in der Wärmelehre nicht nur als Wärmestrommesser sondern auch als nützliche Experimentierhilfe eingesetzt werden können, und zwar nicht nur – ihrer eigentlichen Bestim-

<sup>1</sup> Auf der 82. MNU-Hauptversammlung 1991 in Göttingen auszugsweise vorgetragen.

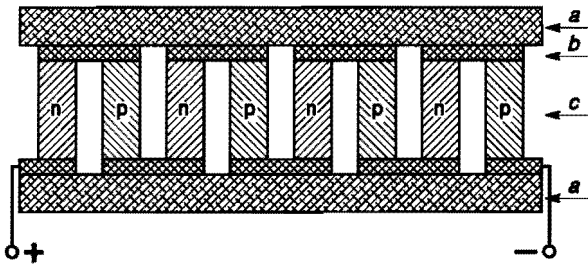


Abb. 1. Querschnitt durch ein Peltiermodul (schematisch, nicht maßstabgetreu). Gezeigt ist nur eine Lage der elektrisch hintereinander und thermisch parallel geschalteten Thermoelemente aus p- bzw. n-dotierten Wismut-Tellurid-Stäben (c) und den Kontaktbrücken aus Kupfer (b). Die Kupferstäbe sind mit der dünnen, elektrisch isolierenden aber thermisch gut leitenden Keramikplatte (a) verbunden. Bei der eingezeichneten Polung ist die untere Keramikplatte die heiße Seite. Peltiermodule sind in verschiedensten Abmessungen erhältlich. Als Wärmestrommesser und Strahlungsdetektoren eignen sich vor allem Modelle mit möglichst vielen hintereinandergeschalteten Thermoelementen und kleinen Abmessungen wie z. B. der Typ Cp 1.0-127-05L der Firma Melcor [3] mit den Abmessungen  $30 \times 30 \times 3,2$  mm und 127 Thermoelementpaaren. Die Keramikplatten sind jeweils 0,5 mm dick.

mung entsprechend – als kleine Wärmepumpen, sondern in erster Linie als thermoelektrische Wandler zum empfindlichen Nachweis und zur genauen Messung von kleinen und auch großen Temperaturdifferenzen (mK bis etwa 60 K). Die zugehörigen Spannungen liegen im Millivolt- bzw. Volt-Bereich und lassen sich mit einem üblichen Digitalvoltmeter besonders einfach ohne weiteren Verstärker direkt messen und anzeigen.

Das von uns ausgewählte Modell (Melcor, Cp 1.0-127-05L [6]) besitzt 127 Thermoelementpaare, die zwischen zwei dünnen, quadratischen Keramikplatten in einem Raster mit konstanten Abständen – wie in Abbildung 1 skizziert – angeordnet sind. Die Abmessungen betragen  $30 \times 30 \times 3,2$  mm. Die Keramikplatten (Dicke: 0,5 mm) dienen einmal zur elektrischen Isolierung der Thermokontakte, und zum anderen stellen sie aufgrund ihrer guten Wärmeleitungseigenschaften den Wärmekontakt zu den Thermoelementen her. Durch die Verwendung von Metall-Halbleiter-Kontakten aus geeignetem p- bzw. n-dotiertem Wismut-Tellurid und Kupfer erreicht man eine Seebeck-Konstante von 0,00020 V/K, die etwa 10mal größer ist als bei herkömmlichen Thermokontakten wie z. B. Kupfer-Konstantan.

Abbildung 1 zeigt, wie die p- bzw. n-dotierten Wismut-Tellurid-Stäbe angeordnet und über die an den Keramikplatten befestigten Kupferstäbe miteinander verbunden sind. Jedes Thermoelementpaar besteht somit aus der Folge: (n-Wismut-Tellurid)-Kupfer und Kupfer-(p-Wismut-Tellurid). Beide Kontakte befinden sich jeweils auf gleicher Temperatur. Hätte man z. B. eine Folge: Kupfer-Konstantan und Konstantan-

Kupfer, so würde dieses Paar, bedingt durch die umgekehrte Reihenfolge der Metalle und die gleiche Temperatur bei der Hintereinanderschaltung, keine Spannung liefern. Durch die p- und n-Dotierung des Wismut-Tellurids erhält man allerdings beim zweiten Glied der Folge eine zusätzliche Vorzeichenumkehr der Spannung, so daß beide Kontakte bei der Hintereinanderschaltung zur Gesamtspannung beitragen. Insgesamt sind daher im Fall des ausgewählten Peltiermoduls mit den 127 Thermoelementpaaren 254 Thermokontakte wirksam.

## 2.2 Verwendung als thermoelektrischer Wandler

Die vielen elektrisch hintereinandergeschalteten Thermoelementpaare weisen sofort auf eine wichtige Anwendung des Moduls hin: die Verwendung als thermoelektrischer Wandler.

Aus der Seebeck-Konstante und der Zahl der Thermoelementpaare läßt sich folgender Zusammenhang zwischen der am Peltiermodul auftretenden Thermospannung  $U_p$  und der Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zwischen den Keramikplatten vermuten:

$$U_p = 254 \cdot 0,00020 \text{ mV/K} \cdot \Delta T \\ = 0,051 \text{ V/K} \cdot \Delta T. \quad (\text{theoretisch}) \quad (1a)$$

Mit einem schulüblichen Digitalvoltmeter sollten somit wegen der relativ großen Temperaturempfindlichkeit von 0,051 V/K noch Temperaturunterschiede im mK-Bereich ( $1 \text{ mV} \approx 0,020 \text{ K}$ ) direkt zu messen sein.

Zur experimentellen Überprüfung von Gleichung 1a kann folgende Anordnung benutzt werden: Das Peltiermodul klebt man zur Verbesserung des thermischen Kontaktes mit Wärmeleitpaste auf ein handelsübliches Transistorkühlblech (etwa  $100 \times 70 \times 20$  mm), und taucht die Kühlrippen in Eiswasser, so daß die untere Keramikseite des Peltiermoduls auf  $0^\circ\text{C}$  konstant gehalten wird. Zum Schutz des Peltiermoduls gegen eindringende Feuchtigkeit sollte der Spalt zwischen den Keramikplatten mit Silikonpaste versiegelt werden. Auf das Modul wird ein Aluminium-Würfel ( $30 \times 30 \times 30$  mm) mit planen Seitenflächen gesetzt, der maximal auf  $70^\circ\text{C}$  aufgeheizt ist. Die Temperatur der Wismut-Tellurid-Stäbe darf diese Grenze nicht übersteigen, da sich sonst ihre Dotierung ändern würde. Die Temperatur des Würfels wird über einen Temperaturfühler gemessen, der in eine Bohrung in der Mitte des Würfels mit Wärmeleitpaste eingefügt ist. Gemessen wird die Thermospannung in Abhängigkeit von der Temperatur des aufgelegten Würfels.

Die Überprüfung von Gleichung 1a mit Hilfe der beschriebenen Anordnung ergab im Temperaturbereich  $0-70^\circ\text{C}$  die konstante Temperaturempfindlichkeit von 0,048 V/K, d. h.

$$U_p = 0,048 \text{ V/K} \cdot \Delta T. \quad (\text{experimentell}) \quad (1b)$$

Die gemessene Empfindlichkeit ist etwas kleiner als die theoretisch erwartete. Dies liegt vermutlich an den beiden Keramikplatten. Die Temperaturdifferenz verteilt sich auf die Keramikplatten und die Thermoelementschicht. Aus der gemessenen und der theoretischen Temperaturempfindlichkeit läßt sich mit Gleichung 1 der Anteil der Keramikplatten am Temperaturgefälle zu ca. 6% der gesamten Temperaturdifferenz abschätzen.

Eine Bemerkung noch zu dem Würfel, der in dem oben beschriebenen Versuch zur Temperaturkalibrierung benutzt wurde: Derartige Würfel aus Aluminium, Kupfer oder Messing mit nachfolgender digitaler Temperaturanzeige erweisen sich bei Experimenten mit der Wärme bei vielen Gelegenheiten als außerordentlich praktisch. Sie können in vielfältiger Weise in Experimenten als Energiereservoir mit weithin sichtbarem »Pegelstand«, als welcher die Temperatur hier gelten kann, eingesetzt werden.

Man kann sich Würfel oder Quader mit einer zum jeweiligen Peltiermodul passenden Querschnittsfläche – hier  $30 \times 30$  mm – aus Stangenmaterial heraus sägen. Mit einer Metallfräse werden dann die Schnittflächen plan gefräst, so daß ein guter Wärmekontakt beim Aufsetzen auf das Modul gewährleistet ist. Steht keine Fräse zur Verfügung, so muß man das Sägen mit Hilfe einer Lehre vornehmen, um eine ebene Schnittfläche senkrecht zu den Seitenflächen zu erhalten. Anschließend müssen die Schnittflächen mit einer Feile und Schleifpapier nachbearbeitet werden. Im Fall des Würfels nimmt man als Kontaktflächen die meistens schon ausreichend »guten« Seitenflächen des Stangenmaterials.

Statt eines üblichen, im Gebrauch jedoch umständlichen Thermoelementes eignet sich ein zur Zeit in Baumärkten oder im Elektronikfachhandel preisgünstig erhältliches Digitalthermometer (Jumbo-Thermoclock [7]) mit einem zusätzlichen externen Sensor und einer für die Beobachtung aus größerer Distanz günstigen 18 mm hohen Digitalanzeige. Der externe Fühler wird aus seinem Gehäuse vorsichtig entfernt, in die Bohrung des Würfels mit Wärmeleitpaste umgeben eingesetzt und mit Zweikomponentenkleber oder Silikonpaste versiegelt.

Bisher wurde nur die von dem Peltiermodul abgegebene Thermospannung angesprochen. Ineress verdient auch der Innenwiderstand des Moduls, der mit etwa  $3 \Omega$  relativ niedrig liegt, so daß schon bei kleinen Spannungen und optimaler elektrischer Anpassung relativ große elektrische Ströme fließen können. Dies läßt sich eindrucksvoll mit einem niederohmigen Elektromagneten zeigen, der seinen Anker so fest hält, daß man ihn kaum noch wegziehen kann. Ein kleiner Gleichstrommotor wird schon durch eine Temperaturdifferenz von wenigen Kelvin zum Laufen gebracht; der Nutzeffekt der Wandlung ist allerdings in diesem

Fall vom Optimum weit entfernt, weil der Innenwiderstand dieser Motoren meist wesentlich höher liegt, was zu einer Fehlanpassung führt. Der optimale Wirkungsgrad, der bei idealer Anpassung zu erreichen wäre, liegt nach unserer Beobachtung bei etwa 5%.

### 2.3 Verwendung als Wärmestrommesser

Das Peltiermodul ist einmal durch die Verwendung der Keramikplatten und zum anderen durch die vielen thermisch parallel geschalteten Wismut-Tellurid-Stäbe ein sehr guter Wärmeleiter. Ein Wärmestrom, der durch das Peltiermodul fließt, bewirkt eine Temperaturdifferenz zwischen den beiden Keramikplatten, die sich sehr empfindlich über die Thermospannung des Moduls nachweisen läßt. Vorversuche zeigen, daß schon die warme Hand aus 1 m Entfernung den Wärmestrom durch das Modul merklich ändert. Der von einer Strahlungsquelle ausgehende Wärmestrom läßt sich qualitativ mit dem Modul nachweisen, wenn man dieses auf ein Transistorkühlblech (oder einen der oben beschriebenen Metallwürfel) mit Wärmeleitpaste aufklebt und abwartet, bis sich Temperatur- und Strahlungsgleichgewicht mit der Umgebung eingestellt hat. Schnell lassen sich damit in einem Klassenzimmer Wärmequellen aufspüren, z. B. die Heizkörper, aber auch einzelne Schüler oder eine an einen beheizten Raum anschließende Wand. Man hat nur die freie Keramikseite des aufgeklebten Moduls in die zu untersuchende Richtung zu wenden.

Das Aufspüren von Wärmequellen gibt einen interessanten Einblick in das Wärmegeschehen, das sich ständig in unserer Umwelt abspielt und von dem wir ohne empfindlichen Wärmestrommesser nichts merken.

Will man das Peltiermodul nicht nur zum qualitativen Nachweis von Wärmeströmen, sondern quantitativ als Wärmestrommesser verwenden, so ist eine Kalibrierung erforderlich. Dafür eignen sich zwei Verfahren. Das erste, genauere wurde bereits in [4] dargestellt. Hier sei nur kurz ein etwas einfacheres Verfahren mitgeteilt, das von den oben beschriebenen, mit Temperaturfühlern ausgestatteten Würfeln Gebrauch macht. Man verwendet die gleiche Anordnung wie in Abschnitt 2.1. Zusätzlich zur Thermospannung mißt man noch beim Abkühlen die Temperatur des Würfels in Abhängigkeit von der Zeit.

Für ein gegebenes Zeitintervall läßt sich dann aus der bekannten Wärmekapazität des Würfels und dem Temperaturabfall der mittlere, pro Zeiteinheit bevorzugt durch das Peltiermodul in das Eiswasser gehende Wärmestrom  $\Phi$  bestimmen. Wendet man dieses Verfahren für mehrere aufeinanderfolgende Zeitintervalle an, so erhält man einen monotonen Zusammenhang zwischen  $U_p$  und  $\Phi$ , der von der erwarteten Proportionalität etwas abweicht, was sich leicht erklärt: Oberhalb der Raumtemperatur fließt Wärme nicht nur

durch das Peltiermodul, sondern auch durch die anderen Seiten des Aluminiumwürfels in die Umgebung. Der durch Rechnung ermittelte, den Würfel verlassende Wärmestrom ist also größer als der durch das Peltiermodul. Umgekehrt verhält es sich unterhalb der Raumtemperatur. Hier fließt Wärme aus der Umgebung in den Würfel hinein und verläßt diesen durch das Peltiermodul ins Eiswasser hinein. Einigermaßen richtig liegen nur die bei Raumtemperatur gemessenen Wärmeströme. Die Eichgerade wird daher durch jenes Meßwertpaar festgelegt, das sich bei Raumtemperatur ergibt.

Wir bestätigten mit diesem Verfahren den in [4] mitgeteilten Zusammenhang

$$U_p = 0,086 \text{ V/W} \cdot \Phi$$

$$\text{bzw.} \quad \Phi = 11,6 \text{ W/V} \cdot U_p. \quad (2)$$

Der Wärmewiderstand des Peltiermoduls ergibt sich hieraus mit Gleichung 1 zu:

$$R_p = 1,78 \text{ K/W}. \quad (3)$$

Der Wärmewiderstand des Wärmestrommessers muß, ähnlich wie der ohmsche Widerstand bei einem Amperemeter, möglichst klein gegenüber den anderen Widerständen sein, die den Strom begrenzen. Diese Forderung ist bei den folgenden Experimenten erfüllt. Die Genauigkeit der experimentell bestimmten Werte für den Wärmewiderstand und die Stromempfindlichkeit des Peltiermoduls schätzen wir auf etwa 10%. Exemplarstreuungen liegen innerhalb dieses Fehlerbereichs.

Für den Unterricht hat es sich bewährt, die Spannung  $U_p$  durch Zwischenschaltung eines Potentiometers oder eines geeignet beschalteten Operationsverstärkers so zu transformieren, daß sich  $U_p$  einfach in  $\Phi$  umrechnen läßt, z. B.  $U_p = 0,1 \text{ V}$  entspricht  $\Phi = 1 \text{ W}$ .

Die beschriebene Kalibrierungsmethode ist zunächst nicht für den Unterricht der Sekundarstufe I geeignet, da die hierzu nötigen Begriffe erst mit dem Wärmestrommesser erarbeitet werden sollen. Als vertrauensbildende Maßnahme kann sie jedoch in Form eines Bestätigungsexperiments eingesetzt werden. Hierbei geht man von einem kalibrierten Wärmestrommesser aus, berechnet die pro Zeiteinheit aus dem Würfel zum Eiswasser hinströmende Energie und vergleicht den Wert mit der Anzeige des Wärmestrommessers.

## 2.4 Verwendung als Wärmepumpe

Sehr aufschlußreich und auch in quantitativer Hinsicht überzeugend ist der Einsatz des Peltiermoduls als Wärmepumpe. Für Schüler ist zunächst überraschend, daß durch einen elektrischen Strom ein Körper gekühlt werden kann. Sie sind davon fasziniert, wie ein Tropfen Wasser, der auf die freie Seite des Moduls

gebracht wird, plötzlich zu Eis erstarrt, oder wie ein Grashalm, der im Tropfen steht und zunächst senkrecht gehalten werden muß, nach dem Gefrieren des Wassers ohne weitere Unterstützung auf dem Modul stehen bleibt.

Für diese qualitativen Versuche eignet sich die Anordnung mit dem Transistorkühlblech aus Abschnitt 2.1. Man muß nur einen elektrischen Strom durch das Peltiermodul ( $I_{\text{max}} = 3,5 \text{ A}$ ;  $U_{\text{max}} = 15 \text{ V}$ ) schicken. Die Polung wird so gewählt, daß die freie Seite gekühlt wird. Will man größere Flüssigkeitsmengen ( $\text{cm}^3$ -Bereich) gefrieren, so empfiehlt sich die Verwendung eines dünnwandigen Metallgefäßes mit ebenem Boden, der auf das Modul mit Wärmeleitpaste geklebt wird. Hier haben sich Metall Dosen für Kleinbildfilme gut bewährt. Jetzt muß allerdings durch Eiswasser oder mit fließendem Wasser die warme Seite gekühlt werden, damit die  $70^\circ\text{C}$ -Grenze nicht überschritten wird.

Zur quantitativen Untersuchung der Eigenschaften dieser Wärmepumpe klebt man das Peltiermodul mit Wärmeleitpaste zwischen zwei der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Würfel, die hier als Energiespeicher dienen und sich anfangs auf gleicher (Zimmer-)Temperatur befinden. Beim Pumpen steigt die Temperatur des einen Speichers während die des anderen fällt.

Zur Messung der von einem Würfel zum anderen »gepumpten« Energie legt man an das Modul z. B. für die Zeit von 30 s eine Spannung von 8 V. Die zugehörige Stromstärke beträgt 1,9 A. Nach dieser Zeit hat die Temperatur des einen Würfels um 9,0 K zu- und die des anderen um »nur« 4,5 K abgenommen. Die dem abgekühlten Würfel entnommene Energie läßt sich aus dem Temperaturabfall und der Wärmekapazität ( $230 \text{ g} \cdot 0,40 \text{ J/gK} = 92 \text{ J/K}$ ) des Würfels berechnen:  $4,5 \text{ K} \cdot 92 \text{ J/K} = 414 \text{ J}$ . Analog erhält man für die dem erwärmten Würfel zugeführte Energie  $9,0 \text{ K} \cdot 92 \text{ J/K} = 828 \text{ J}$ . Man erkennt an der Energiebilanz, daß – wie für Wärmepumpen typisch – mehr Energie in das eine Reservoir gepumpt wurde als dem anderen entnommen wurde. Die Differenz beträgt  $828 \text{ J} - 414 \text{ J} = 414 \text{ J}$ . Sie erklärt sich, wenn man die dem Modul zugeführte elektrische Energie  $U \cdot I \cdot t = 8,0 \text{ V} \cdot 1,9 \text{ A} \cdot 30 \text{ s} = 456 \text{ J}$  berücksichtigt. Diese zum Pumpen aufgewendete elektrische Energie übersteigt die Differenz um 42 J, was durch die Verluste an die Umgebung erklärt werden kann. Diese Verluste lassen sich niedrig halten, wenn keine allzu großen Temperaturunterschiede gegenüber der Zimmertemperatur durch das Pumpen erzeugt werden. Aus diesem Grund wurde in dem geschilderten Versuch die relativ kurze Einschaltdauer gewählt. Bei dieser Betriebsweise der Wärmepumpe folgt aus den experimentell bestimmten Daten für die Leistungsziffer der Wärmepumpe der Wert 1,8.

Aus Abschnitt 2 wird deutlich, nach welchen Kriterien das Peltiermodul ausgewählt werden muß. Es ist

einmal die Zahl der Thermoelementpaare, die eine große Temperaturempfindlichkeit gewährleistet. Zum anderen sind es die geometrischen Abmessungen. Sie sollten so sein, daß sie zu handlichen Würfelmaßen passen. Zusätzlich soll der Wärmewiderstand möglichst klein sein. Diese Beschränkungen lassen keine Daten zu, bei denen mit dem als Wärmepumpe betriebenen Peltiermodul große Kühlleistungen zu erwarten sind. Will man solche erreichen, so muß man auf die üblichen im Lehrmittelhandel (z. B. [8]) vertriebenen Wärmepumpen, die auch auf dem Peltiereffekt beruhen, zurückgreifen. Die typische Wirkungsweise einer Wärmepumpe läßt sich jedoch bereits mit dem von uns ausgewählten Peltiermodul zeigen.

### 3 Ein Vorschlag zur Vermittlung einer adäquaten Vorstellung von der Wärme

Wie schon in der Einleitung dargestellt, scheint uns die in der Sekundarstufe I übliche Wärmelehre in den Schülern meist ein Bild von der Wärme entstehen zu lassen, das weder dem ersten noch dem zweiten Hauptsatz entspricht. Wir gehen daher zunächst kurz auf die Anliegen des ersten und des zweiten Hauptsatzes ein.

#### 3.1 Zum Anliegen des ersten Hauptsatzes

Abbildung 2 illustriert den ersten Hauptsatz. Die inneren Energien zweier Körper stehen über das Fließen von Wärme und über Verrichtung von Arbeit in Verbindung. Arbeit und Wärme stellen somit das Maß dar, mit dem die jeweils transportierte Energieform gekennzeichnet wird.

Im folgenden möchten wir eine Versuchsreihe vorstellen, durch die der Transportcharakter der Wärme von vornherein mehr in den Vordergrund gerückt wird. Das Kernstück der dazu gewählten Versuchsanordnung ist der bereits beschriebene Wärmestrommesser, ergänzt durch zwei Würfel, die wie in Abschnitt 2.2 mit Temperaturfühlern ausgestattet sind. Diese Würfel dienen als Speicher für die innere Energie. Schaltet man den Wärmestrommesser zwischen die Würfel, so wird er im Falle eines Temperaturunterschiedes von einem Wärmestrom durchflossen, den er mißt. Deutlich fühlt man sich bei der Anordnung an die bildliche Darstellung des ersten Hauptsatzes in Abbildung 2 erinnert.

Der folgende Versuch soll eine Vorstellung von dem eigentlichen Charakter der Wärme vermitteln. Er beginnt damit, daß der eine der beiden Würfel mit einer definierten Kraft (Gewichtskraft eines aufgelegten Körpers) auf eine geeignete Unterlage (z. B. Hartpappe) gepreßt und auf dieser hin- und hergerieben wird, wobei eine aus Reibungskraft und Reibungsweg leicht abschätzbare mechanische Arbeit verrichtet



Abb. 2. Zum ersten Hauptsatz der Wärmelehre. Der Energiefluß kann je nach Versuchsbedingung von Körper 1 nach Körper 2 oder umgekehrt erfolgen.

wird. Als Folge tritt eine Temperaturerhöhung des Würfels auf. Damit die Berührung mit der Hand die Temperatur des Würfels nicht verfälscht, ist er – bis auf die Reibungsfläche – zur Isolation mit Styropor umhüllt. Es zeigt sich, daß die Temperaturerhöhung zur verrichteten Reibungsarbeit proportional ist. Der Versuch, der also eine stark vereinfachte Version des bekannten Kurbelversuches von SCHÜRHOLZ darstellt, wirft die Frage nach dem Verbleib der Energie auf, die zum Reiben aufgewendet werden mußte. Die Temperaturerhöhung legt den Verdacht nahe, daß sie jetzt im Inneren des geriebenen Würfels steckt, nämlich als »innere Energie«.

Zur Bestätigung der Vermutung wird die Temperaturerhöhung durch längeres Reiben oder schneller durch einen kurzen Kontakt mit einem heißen Gegenstand (Bügeleisen oder Kochplatte) noch vergrößert. Nun werden beide Würfel aneinander gelegt, was bei einem Würfel ein Sinken der Temperatur und beim anderen ein Steigen bewirkt. Offenbar fließt etwas hinüber. Daß das Hinüberfließende wirklich Energie ist, zeigt sich, wenn man den Wärmestrommesser zwischen die Würfel schaltet und anstelle des Voltmeters einen Elektromotor anschließt, wie in Abschnitt 2.2 beschrieben. Sobald der Wärmestrom einsetzt, beginnt der Anker sich zu drehen. Der Wärmestrommesser ist somit nicht nur in der Lage, die durchfließende Energie nachzuweisen, sondern sie auch zum Teil in elektrische Energie umzuwandeln.

Nachdem im Unterricht der sich hier abspielende Vorgang, nämlich das Fließen von Energie vom heißen zum kalten Körper durch diese Versuche vertieft worden ist, lassen sich auch passende Begriffe einführen: Der zugehörige Energiestrom wird Wärmestrom und die dabei insgesamt transportierte, dem kalten Körper zugeführte Energie wird Wärme oder auch Wärmemenge [2] genannt, wobei der Begriff Wärmemenge heute im Unterricht kaum mehr üblich ist.

Um Verwechslungen mit der inneren Energie oder mit Zustandsänderungen zu vermeiden, betonen wir ausdrücklich, daß die Begriffe Wärme oder Wärmemenge im Unterricht nur mit dem Attribut »zu(ab-)geführte« oder »transportierte« benutzt werden sollten. Ein Gebrauch des Begriffs Wärme oder Wärmemenge in anderen Zusammenhängen, wie z. B. »Wärme ist kinetische Energie der Teilchen« . . . usw., sollte im Interesse der begrifflichen Klarheit vermieden werden.

### 3.2 Zum Anliegen des zweiten Hauptsatzes

Vom Wärmestrom wird allerdings im Wärmestrommesser nur ein sehr geringer Teil der Energie für den Elektromotor abgezweigt und in mechanische Arbeit umgesetzt. Besonders deutlich wird dies, wenn man den Würfel nicht mit dem Bügeleisen, sondern wirklich durch Reiben erhitzt, bis die Temperaturdifferenz ausreicht, den Elektromotor zu treiben. Im Vergleich dazu erscheint die Ausbeute, die der Elektromotor liefert, geradezu kläglich. Auch eine einfache Überlegung zeigt die nur teilweise Umwandlung der Energie durch den thermoelektrischen Wandler: Würde nämlich die gesamte Energie, die den heißen Würfel verläßt, in elektrische Energie umgesetzt, so dürfte dem kalten Würfel keine Energie mehr zufließen; seine Temperatur dürfte also nicht steigen. Nimmt man den kalten Körper aber weg, in der Hoffnung, daß im Wärmestrommesser mehr in elektrische Energie umgewandelt wird, weil er jetzt die gesamte Energie zur Verfügung gestellt bekommt, so wird man enttäuscht. Der Motor kommt sofort zum Stillstand, weil eben kein Wärmestrom mehr fließt. Offenbar kann der thermoelektrische Wandler nur dann funktionieren, wenn ein Wärmestrom fließt. Befindet sich die eine Seite des Wandlers im Kontakt mit einem Reservoir, das sich »nur« auf Zimmertemperatur befindet, und liegt auf der anderen Seite ein Stück Eis, so fließt auch ein Wärmestrom durch den Wandler, was über die Drehung des Motorankers nachgewiesen wird. Die Beobachtung, daß offensichtlich der Motor mit »Eis« betrieben werden kann und daß er mit einem Eiswürfel viel länger läuft als mit einem warmen Kupferwürfel, ist für Schüler sehr überraschend. Sie erkennen schließlich anhand dieses Versuchs, daß eine Energieumwandlung nur dann möglich ist, wenn Energie fließen kann.

Analoge Verhältnisse hat man bei einem Wasserkraftwerk. Verstopft man den Abfluß des Wassers, so kann keine Energieumwandlung mehr geschehen.

Die Erkenntnis, daß jeder Wandler, der Wärme in mechanische Arbeit umwandelt, notwendigerweise eine Kühlung, besser ein Reservoir braucht, in das die zum Wandler fließende Wärme abfließen kann, scheint uns eine sehr wünschenswerte Ergänzung zu sein. Denn die übliche Behandlung der Wärmelehre ist stark auf die Erhaltung der Energie fixiert. Die mit dem Transport der Wärme vom heißen zum kalten Körper einhergehende Entwertung der Energie bleibt in der Sekundarstufe I im allgemeinen ausgeklammert, so daß das übliche Konzept der Wärmelehre auch dem Anliegen des zweiten Hauptsatzes nicht gerecht wird. Hier scheint uns der gezeigte Versuch zumindest ein brauchbarer Ansatz zu sein, zur Klärung der Frage nach dem Wert der inneren Energie beizutragen: Energie ist nur dann etwas wert, wenn sie fließen kann. Was nützt ein Hochgebirgssee, wenn er keinen Abfluß hat.

### 4 Wärme nicht nur in der Wärmelehre

Die Wärmelehre – so wie wir sie aus dem Schulalltag heute kennen – bleibt, insbesondere mit den Mischungsversuchen, häufig in ihren eigenen, den Schülern wenig ansprechenden Problemen verhaftet. Daß Wärmeströme auch außerhalb der Physik in der Technik, der Biologie, der Chemie oder im Alltag vorkommen, findet im Unterricht der Sekundarstufe I wohl zu wenig Beachtung. Ein plausibler Grund dafür ist sicher darin zu sehen, daß die zu betrachtenden Phänomene dem experimentellen Instrumentarium der Schule kaum zugänglich erscheinen. Der Wärmestrommesser ist jedoch geeignet, auch hier Abhilfe zu schaffen:

Neben der Messung des Wärmestromes, den uns die Sonne schickt, fand bei Schülern z. B. die Frage »Wieviel Wärme gibt ein Mensch an die Umwelt ab?« besonderes Interesse. Mit dem Wärmestrommesser kann man diese Frage ohne Schwierigkeiten beantworten: Wir bringen zunächst einen der oben erwähnten Würfel auf die Temperatur der Körperoberfläche (etwa 37 °C) und legen den Wärmestrommesser darüber. Wir müssen abwarten, bis sich ein Strahlungsgleichgewicht eingestellt hat und lesen etwa 20 mV ab. Dies entspricht einem Wärmestrom von 0,23 J/s, der durch diese 9 cm<sup>2</sup> große Fläche des Wärmestrommessers geht. Bedenkt man, daß unsere Körperoberfläche etwa 2000mal so groß ist, so würde uns ständig ein Wärmestrom von 460 J/s verlassen. Da unser Körper im Ruhezustand knapp 200 J/s produziert, würden wir frieren, wenn wir nicht durch Kleidung den Wärmestrom verkleinerten. Eine Verkleinerung des Wärmestroms durch Isolation (Kleidung) und seine Zunahme bei einem Luftzug oder bei einer feuchten Oberfläche läßt sich mit der gewählten Anordnung gut demonstrieren.

Schließlich läßt sich mit Hilfe des Wärmestrommessers der häufig mißverständliche »Temperatursinn« der Haut besser verstehen. Vielen ist sicher schon aufgefallen, daß sich ein Styroporblock wärmer anfaßt als ein Eisenstück, obwohl beide auf gleicher Temperatur sind. Zur Erklärung dieser offensichtlichen Fehlleistung des Temperatursinns der Haut wird in dieser und in ähnlichen Situationen dann leichtfertig gesagt, daß uns der Temperatursinn hier eben täuscht. Der Wärmestrommesser kann jedoch zur »Ehrenrettung« des offensichtlich versagenden Sinnes beitragen. Im folgenden Versuch verstehen wir jetzt den Wärmestrommesser als ein Stück unserer Haut, das unseren warmen Körper schützt. Beim Auflegen des Metallstücks erfolgt eine große Anzeige, beim Auflegen des Styroporblocks geht sie zurück. Unsere Empfindung ist also in Wirklichkeit keine Meldung über die Temperatur der Gegenstände, sondern vielmehr gibt sie uns einen Hinweis auf den hier stattfindenden Wärmestrom von unserem Körper zum Gegenstand oder umgekehrt. Diese Meldung ist für den Organismus offen-

sichtlich wichtiger als eine absolute Temperaturangabe. Wir sollten also nicht von einem Temperatursinn, sondern besser von einem Wärmestromsinn der Haut sprechen.

## 5 Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, daß mit einem modernen Peltiermodul ein Wärmestrommesser realisiert werden kann, der sich für den Physikunterricht der Sekundarstufe I eignet und mit dem der Transportcharakter der Wärme im Unterricht einsichtig gemacht werden kann. Zusätzlich wurde gezeigt, daß das gewählte Peltiermodul in vielen Experimenten zur Wärmelehre in unterschiedlicher Funktion eine vorteilhafte Ergänzung darstellt. Den Bezug der Wärmelehre zur Technik, zu Nachbardisziplinen und zum Alltag kann man an vielen Beispielen auch mit Hilfe des Moduls einfach herstellen. Das im Text verfolgte Konzept, den Transportcharakter der Wärme in den Vordergrund des Unterrichts zu stellen, wurde mittlerweile in mehreren Durchgängen in Gymnasialklassen der Sekundarstufe I ausprobiert. Dabei zeigte sich, daß mit dem von uns gestellten Wärmestrommesser das angestrebte Ziel eher möglich ist, als mit der herkömmlichen Methode, die nur das Thermometer kennt und die Wärme mißt, wenn sie schon längst keine Wärme mehr ist.

## Literatur und Bezugsquellen

- [1] O. RANG: Versuch einer didaktischen Analyse zur Unterrichtseinheit Wärmemenge. – Der Physikunterricht 4 (1970) 27–57.
- [2] G. FALK – W. RUPPEL: Energie und Entropie. – Heidelberg: Springer 1976, G. FALK: Physik – Zahl und Realität. – Basel: Birkhäuser 1990.
- [3] F. HERRMANN: Energie und Energieformen. – In: G. FALK – F. HERRMANN (Hg.): Konzepte eines zeitgemäßen Physikunterrichts Heft 1. – Hannover: Schroedel 1977.
- [4] H. DITTMANN – W. B. SCHNEIDER: Ein »Amperemeter« für den Wärmestrom. – In: W. KUHN (Hg.): Tagungsband des DPG-Fachausschusses Didaktik der Physik, Gießen 1990.
- [5] H. DITTMANN – W. B. SCHNEIDER: Der Wärme auf der Spur. – In: W. KUHN (Hg.): Tagungsband des DPG-Fachausschusses Didaktik der Physik, Erlangen 1991.
- [6] Bezugsquelle Peltiermodul: Firma AMS Electronic GmbH (Melcor Peltierelement Typ Cp 1.0-127-05L und andere Typen), Albrechtstraße 14, 8000 München 19.
- [7] Bezugsquellen für Peltiermodule und elektr. Thermometer (Jumbo-Thermoclock): Firma Conrad Electronic, Postfach, 8452 Hirschau; Firma ELV, Postfach 10 00, 2950 Leer; Firma Völkner, Electronic, Marienberger Straße 10, 3300 Braunschweig.
- [8] Bezugsquelle Wärmepumpe: Firma Phywe, Postfach 30 62, 3400 Göttingen. Katalog-Nr. 04366.00 (Thermogenerator). □

---

## Die Astronomische Uhr im Dom zu Münster

*Verfasser: Dr. Thomas Wenning, Albachtener Straße 75, 4400 Münster*

*Es wird ein am St.-Pius-Gymnasium in Coesfeld durchgeführtes Projekt vorgestellt.*

Im Mittelpunkt dieses knapp einwöchigen Projektes stand das Verständnis und der Nachbau eines Modells der Astronomischen Uhr im Dom des benachbarten Münster. Ausgeschrieben war das Projekt zunächst für »Schülerinnen und Schüler der Oberstufe, die auch vor einer gelegentlichen mathematischen Formel nicht zurückschrecken«. Überraschenderweise meldeten sich viele Schüler der Jahrgangsstufe 9, so daß ich den Adressatenkreis entsprechend änderte – mit sehr gutem Erfolg, wie sich später herausstellte. Dieser Erfolg, der sich während der Ausstellung der Projekte für die Öffentlichkeit in den erstaunlich kompetenten Vorträgen der Schüler zeigte, ermutigt den Autor, dieses Projekt vorzustellen und die Leser zu ermuntern, etwas ähnliches einmal zu versuchen. Die Grundlage des didaktischen Konzepts waren die in ziemlich mühseliger Kleinarbeit gefertigten Zeichnungen einzelner Einheiten der Uhr, die – als Folien teil-

weise übereinander eingesetzt – entscheidend zum Verständnis der Uhr beitragen.

### 1 Die Aufgaben einer Astronomischen Uhr

Eine Astronomische Uhr soll die Bewegung der Sonne, des Mondes mit seinen Phasen, der Planeten und einiger ausgewählter Fixsterne und Sternbilder zweidimensional darstellen. Also muß die Uhr folgende Frage beantworten: Wann ist wo einer dieser Himmelskörper am Himmel zu finden? Damit ist nur noch zu präzisieren, was das »Wo« für einen bestimmten Beobachtungsort, z. B. für Münster, bedeutet, wie also der Ort eines Himmelskörpers auf der Fixsternkugel festgelegt wird, und wie die Uhr diesen zeitlich veränderlichen Ort in die (Uhr-)Ebene projiziert. Damit ist das Wesen der Uhr als »astrolabium mobile«