

ARBEITSKREIS BAYERISCHER PHYSIKDIDAKTIKER

# BEITRAG AUS DER REIHE:

Werner B. Schneider (Hrsg.)

## Wege in der Physikdidaktik

Band 4

ISBN 3 - 7896 - 0588 - 9

Verlag Palm & Enke, Erlangen und Jena 1998

### Anmerkung:

Die Bände 1 bis 5 sind (Ausnahme Band 5) im Buchhandel vergriffen.  
Die einzelnen Beiträge stehen jedoch auf der Homepage

<http://www.solstice.de>

zum freien Herunterladen zur Verfügung.

Das Copyright liegt bei den Autoren und Herausgebern.

Zum privaten Gebrauch dürfen die Beiträge unter Angabe der Quelle  
genutzt werden. Auf der Homepage

[www.solstice.de](http://www.solstice.de)

werden noch weitere Materialien zur Verfügung gestellt.

H. Dittmann - W. B. Schneider

# Ein Experimentiersatz zur Wärmelehre mit vielen Möglichkeiten

## 1 Vorbemerkung

Die Auseinandersetzung mit Vorgängen des Wärmetransports und möglicher Energieumwandlungen gewinnen im Physikunterricht an zusätzlicher Bedeutung, wenn man sich der Herausforderung stellt, auch Umweltprobleme mit physikalischen Methoden zu bewerten. Bei diesem Bemühen sind überzeugende Experimente, die nicht unbedingt immer quantitativer Natur sein müssen, unerlässlich.

Das Rüstzeug der Schulphysik für derartige Experimente entspricht allerdings seit vielen Jahrzehnten einem unveränderten Standard: Neben Thermometern verschiedener Bauart und Kalorimetern findet sich in den Sammlungen meist noch eine Experimentieranordnung zur Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents (nach Schürholz), manchmal ist auch eine Thermosäule oder sogar eine Wärmepumpe vorhanden. Es fehlt aber ein Gerät zum direkten Nachweis und zur Messung von Wärmeströmen, so daß das vielfältige Wärmegeschehen in Natur und Technik meist nur indirekt über Temperaturmessungen erschlossen werden kann.

Im folgenden wird ein Experimentiersatz beschrieben, der sich durch große Einfachheit und überzeugende Daten auszeichnet und der selbst zusammengestellt werden kann. Er gestattet die Durchführung fast aller wesentlichen Standardversuche der Wärmelehre und ermöglicht darüber hinaus interessante Einblicke in Vorgänge des Wärmetransportes und der Energieumwandlungen.

## 2 Technische Hinweise zum Experimentiersatz

Der Experimentiersatz besteht aus wenigen, aufeinander abgestimmten Teilen, die sich leicht und mit geringen Kosten (weniger als 150 DM) beschaffen lassen. Er setzt sich aus folgenden Bestandteilen zusammen (s. Abb. 1):

- Zwei Metallwürfel aus Aluminium bzw. Kupfer, in die Temperaturfühler eingebaut sind, so daß man über angeschlossene Digitalthermometer die Temperatur der Würfel messen kann;
- Ein Peltiermodul, wie es zur gezielten Kühlung elektronischer Bauteile verwendet wird. Das hier verwendete Modul enthält 127 in Serie geschaltete Thermoelemente, die zwischen zwei dünnen Keramikplatten angeordnet sind. Es hat die Form eines flachen quadratischen Plättchens (30mm Kantenlänge, 3,5 mm Dicke). Es dient einerseits als Wärmepumpe, andererseits wird es zur Wärmestrommessung eingesetzt. Über den Aufbau des Peltiermoduls und seine universelle Verwendbarkeit im Physikunterricht haben wir schon an anderer Stelle berichtet; wegen Einzelheiten verweisen wir auf [1] - [3] und die Abb. 2 und 3, in denen das Peltiermodul in verschiedenen Detailansichten gezeigt wird und weitere technische Details angegeben sind;

- Digitalthermometer mit zwei Meßfühlern und zwei großen Anzeigen;
- Transistor-Kühlblech (ca. 100x100mm<sup>2</sup>);
- Solarmotor oder Tachogenerator (kleines Trägheitsmoment und Anlaufdrehmoment, Spannung ca. 0,5V -5V);
- Wärmeleitpaste;
- Verpackungsmaterial aus Styropor und Kunststoffschäum, Pappröhren und Alufolie wie man es in der Sammlung oder im Haushalt findet.

Die Metallklötze werden aus Stangenmaterial (30 x 30 mm<sup>2</sup> Querschnitt), das im Metallhalbzeughandel erhältlich ist, herausgesägt. Die Seitenteile des Stangenmaterials sind meistens bereits so plan, daß man diese als Kontaktflächen verwenden kann. Die Planheit ist wichtig, damit ein guter Wärmekontakt beim Aneinanderlegen zweier Würfel oder beim Auflegen des Peltiermoduls gewährleistet ist. Digitalthermometer mit besonders großer Ziffernanzeige sind im Elektronik-Versandhandel erhältlich (s. [4]).

Besonders bewährt hat sich eine Ausführung (Typ „Big Digit“), bei der zwei Anzeigen mit 30 mm hohen Ziffern übereinander angeordnet sind. Die eine Anzeige ist für einen internen Sensor, die andere für einen externen, der in einem kleinen, zum Ankleben an Fensterscheiben vorgesehenen Kunststoffnapf eingegossen ist, aus dem er sich leicht entnehmen läßt. Auch der interne Sensor kann mit geringer Mühe aus dem Thermometergehäuse ausgebaut und nach außen verlegt werden. Beide Sensoren sind gleichartige NTC Widerstände. Zum Einbau der Sensoren bohrt man in der Mitte einer Würfelseite ein bis zur Würfelmittle reichendes Loch von 2 mm Durchmesser, füllt etwas Wärmeleitpaste ein und versenkt darin den Temperatursensor. Die Zuleitungen werden mit Schrumpfschlauch verstärkt. Vom Rand und vom oberen Teil der Bohrung beseitigt man alle Spuren von Wärmeleitpaste und befestigt die Zuleitung des Sensors mit Zweikomponentenkleber, so daß der Würfel nach dem Festwerden des Klebers an der Zuleitung bequem gehalten werden kann. Es läßt sich damit insgesamt ein Würfelpaar an ein Digitalthermometer anschließen, so daß beide Temperaturen gleichzeitig abgelesen werden können. Man kann auch Digitalthermometer verwenden, die nur eine Temperatur anzeigen. In diesem Fall benötigt man für jeden Würfel ein Gerät. Hinweise auf ein Digitalthermometer mit einer projizierbaren Anzeige findet man bei Hacker [5].

Der praktische Umgang mit dem Peltiermodul erfordert noch eine Zugentlastung der Anschlußkabel und eine Abdichtung gegen Feuchtigkeit. Nach einigen Vorversuchen hat sich die in Abb. 2 vorgestellte Halterung gut bewährt.

Hinweis: Mittlerweile ist ein Schülerübungssatz zur Wärmelehre von der Firma Mekruphy [4] entwickelt worden, der Teile des Gerätesatzes enthält und mit dem unter anderen auch die im Folgenden beschriebenen Experimente durchgeführt werden können.

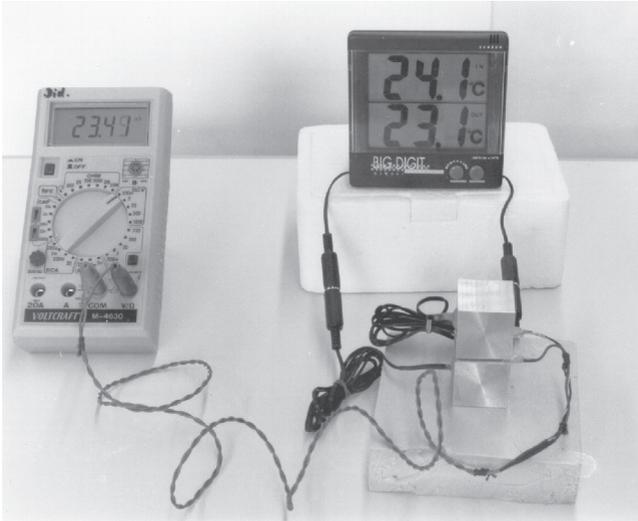


Abb. 1: Wesentliche Elemente des Experimentiersatzes: Würfelpaar (Kantenlänge: 30mm) mit eingebautem Thermofühler, passend zu einem großziffrigen Digitalthermometer; ein zwischen die Würfel geschaltetes Peltiermodul, das an ein 41/2-stelliges Digitalvoltmeter angeschlossen ist. Zum Erreichen eines kleinen Wärmeübergangswiderstandes ist das Peltiermodul mit Wärmeleitpaste an die jeweiligen Würfelflächen geklebt.

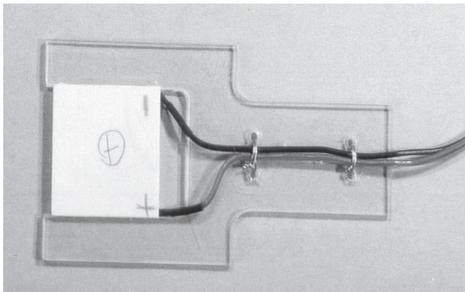


Abb. 2: Detailaufnahme des Peltiermoduls in einem Halter aus Acrylglas, der vor allem der Zugentlastung der Zuführungsdrähte dient (in Abb. 1 noch nicht verwendet). Der Halter ist aus einer dünnen Acrylglasplatte (100x50x2mm<sup>3</sup>) in der angegebenen Form herausgesägt. Der Ausschnitt für die Aufnahme des Peltiermoduls ist so knapp (28 mm x 40 mm), daß es gerade zwischen die Keramikplatten des Moduls geschoben wird und durch die Klemmwirkung zusammen mit der Befestigung der Zuführungsdrähte gehalten wird. Man kann das Modul mit säurefreier Siliconpaste auch einkleben und damit gleichzeitig eine Abdichtung des Moduls erreichen.

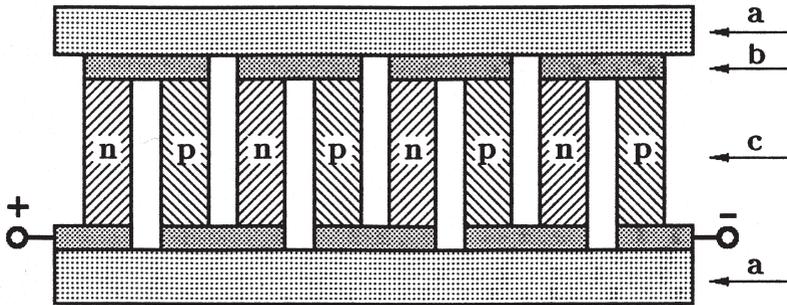
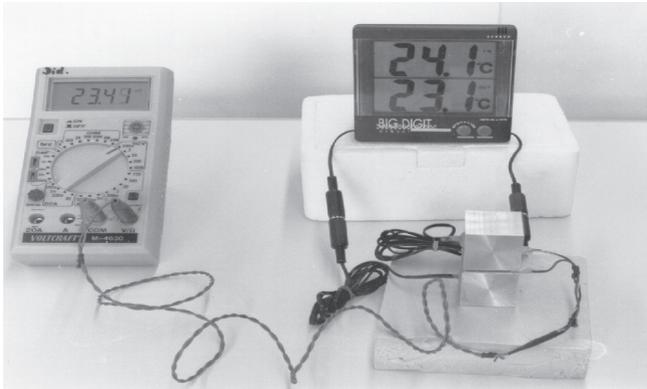


Abb. 3: Schematischer Aufbau eines modernen Peltiermoduls - oben Innenansicht, unten Schnitt mit eingezeichneten Keramikdeckplatten. Das Peltiermodul besteht aus 127 Thermoelementpaaren (p- bzw. n-dotiertes Wismut-Tellurid (c) mit Kontaktbrücken aus Kupfer (b)), die elektrisch hintereinander und thermisch parallel geschaltet sind. Die Elemente sind zwischen zwei dünnen Keramikdeckplatten (a) aufgebaut, die elektrisch isolieren aber thermisch gut leiten. Bei der eingezeichneten Polung ist beim Betrieb als Wärmepumpe die untere Keramikplatte die heiße Seite. Als Wärmestrommesser und Strahlungsdetektoren eignen sich vor allem Modelle mit möglichst vielen hintereinander geschalteten Thermoelementen und kleinen Abmessungen (30mm x 30mm x 3,5mm). Typangaben und Bezugsquellen unter [4].

Technische Daten: Temperaturempfindlichkeit: 0,048V/K; Wärmestromempfindlichkeit: 8,0W/V, Wärmewiderstand: 1,78 K/W; maximaler Temperaturbereich: -150°C bis +80°C; maximaler Temperaturunterschied zwischen heißer und kalter Seite: 67°C; maximale Stromstärke: 3A.

### 3 Bewährte Experimente zur Wärmelehre mit dem neuen Experimentiersatz

#### 3.1 Die Würfel als Energiespeicher

Die beschriebenen Würfel mit eingebautem Temperatursensor dienen in den folgenden Versuchen als Speicher für innere Energie  $U$ , deren Änderung  $\Delta U$  über die Temperaturänderung ( $\Delta U = C\Delta T$ ) gemessen wird. Die Wärmekapazität  $C$  beträgt für den Kupferwürfel mit 30 mm Kantenlänge 100 J/K, für den ebenso großen Aluminiumwürfel 70 J/K.

In einer ersten Anwendung wird die Umwandlung von Reibungsarbeit in innere Energie untersucht. Dazu wird der Würfel z.B. auf einen Teppichbodenrest gelegt und ohne direkte Berührung mit den Fingern um eine bestimmte, durch zwei Anschläge begrenzte Strecke (z. B. 50cm) hin und her geschoben. Eine einfache Möglichkeit, den direkten Kontakt mit den Fingern zu vermeiden, besteht darin, den Würfel in einem Ring aus Pappe (Abschnitt einer Papprolle) zu führen. Die bei der Verschiebung verrichtete Reibungsarbeit führt dem Würfel ständig Energie zu: die Temperatur beginnt zu steigen. Man zählt nun die Anzahl der Verschiebungen, die man für eine Temperaturerhöhung von 0,1K (genau bestimmbar durch das Umspringen der Digitalanzeige) benötigt. Indem man fortlaufend weiter reibt, bis die Temperatur schließlich um ca. 1,5K gestiegen ist, erkennt man, daß die Anzahl der Verschiebungen für eine Temperaturerhöhung um 0,1K stets die gleiche bleibt, unabhängig davon, ob man schnell oder langsam schiebt. Zur Auswertung muß man noch die Reibungskraft messen, so daß die Reibungsarbeit  $\Delta W$  aus der Anzahl der Verschiebungen berechnet werden kann. Es ergibt sich eine direkte Proportionalität zwischen  $\Delta W$  und der Temperaturerhöhung  $\Delta T$ . Falls die ganze Reibungsarbeit in innere Energie des Würfels überführt wird, was bei geringen Temperaturunterschieden von ca. 1,5K näherungsweise der Fall ist, gilt  $\Delta U \propto \Delta W$  und der gemessene Proportionalitätsfaktor ist  $C$ . Eigentlich sollte man erwarten, daß auch die Teppichunterlage einen Teil der Energie aufnimmt; dieser Teil ist aber wegen der vergleichsweise geringen Wärmeleitfähigkeit des Materials vernachlässigbar. Der beschriebene Versuch kann die ursprünglich zur Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents (nach Schürholz) verwendete Anordnung - auch von der Genauigkeit her - voll ersetzen. Darüber hinaus ist der physikalische Sachverhalt der Umwandlung von mechanischer in thermischer Energie leichter zu übersehen: Reibungskraft und Weg sind hier der Messung und dem Verständnis leichter zugänglich.

Die Würfel bieten sich auch für eine Art Mischungsversuche an: Man legt zwei Würfel (z. B. einen aus Aluminium und einen aus Kupfer) mit verschiedenen Anfangstemperaturen so aneinander, daß Wärme überfließen kann und wartet den Temperaturengleich ab. Man reduziert den durch Strahlungsverluste bedingten Fehler in der Energiebilanz, indem man - wie bei Kalorimeterversuchen üblich - zu Beginn der Messung die Anfangstemperatur des einen Würfels geringfügig über und die des anderen entsprechend unter Raumtemperatur wählt.

Mit dem Würfel läßt sich auch die bei einem Händedruck übertragene thermische Energie abschätzen. Umfaßt man z.B. einen Kupferwürfel für etwa eine Sekunde mit der warmen Hand, so steigt die Temperatur um ca.  $0,3\text{K}$  was einer übergeflossenen Energie von ca.  $30\text{J}$  entspricht.

### 3.2 Das Peltiermodul als Energiewandler

Beim Verrichten von Reibungsarbeit an den Würfeln muß Energie aufgewendet werden, die dabei umgewandelt wird. Im Gegensatz zu anderen Unterrichtsbeispielen für mechanische Energieumwandlungen, bei denen stets Energieformen entstehen, die sich in leicht einsichtiger Weise wieder zur Verrichtung von Arbeit nutzen lassen, ergibt sich hier nur eine zur aufgewendeten Energie proportionale Temperaturerhöhung. Man deutet sie im Unterricht als eine Zunahme der sogenannten "inneren" Energie der Würfel. Einen Nachweis, daß diese neue Energieform ihren Namen Energie wirklich zu recht trägt, bleibt man im Unterricht schuldig, solange man nicht zeigen kann, daß man durch Umwandlung dieser Energie wirklich wieder Arbeit verrichten kann. Ein solcher Nachweis kann mit Hilfe des Peltiermoduls leicht geführt werden:

Man erwärmt den einen der beiden Kupferwürfel auf maximal  $60^\circ\text{C}$ , während der andere auf Raumtemperatur bleibt. Bringt man danach beide Würfel unter Zwischenschaltung des Peltiermoduls in Kontakt, so liefert das Peltiermodul eine Thermospannung, welche ausreicht, einen kleinen Elektromotor anzutreiben. Während der Motor läuft beobachtet man, daß die Temperatur des einen Würfels sinkt und die des anderen steigt. Offensichtlich bringt das Temperaturgefälle die innere Energie dazu, einen Wärmestrom durch das Peltiermodul vom heißen zum kalten Würfel "fließen" zu lassen, wobei ein Teil dieser Energie (über den Thermoeffekt) in elektrische umgewandelt wird. Die entstehende Thermospannung beträgt je Grad Temperaturdifferenz ca.  $0,05\text{V}$ , so daß ein Solarmotor noch bis zu einem Temperaturgefälle von  $10\text{K}$  läuft.

Wichtige Aspekte der inneren Energie - die dem herkömmlichen Sek. I - Unterricht sonst mangels geeigneter Demonstrationsmöglichkeiten entgehen - können mit dieser Anordnung behandelt werden: Für die Umwandlung der inneren Energie muß ein Temperaturgefälle erzeugt werden; insofern ist der kalte Würfel genau so wichtig wie der heiße. Auch der kalte Würfel enthält noch sehr viel innere Energie, die sich allerdings erst dann nutzen läßt, wenn man etwas Kälteres findet, z.B. einen Eisblock, um sie herausfließen zu lassen. Daß damit ein Verlust an innerer Energie verbunden ist, die ungenutzt zum kälteren Temperaturniveau fließt, ist leider grundsätzlich unvermeidbar. Innere Energie ist also eine Energieform, die sich nur mit Einschränkungen nutzen läßt, und zwar umso schlechter, je niedriger die Temperatur ist, unter der sie gespeichert vorliegt.

Der Wirkungsgrad bei der Umwandlung von thermischer in elektrische Energie durch das Peltiermodul ist größer, als der Versuch mit einem Solarmotor zunächst erscheinen läßt. Der Innenwiderstand eines solchen Motors liegt bei  $100\ \Omega$ , der

des Peltiermoduls bei ca.  $3 \Omega$ . Es liegt also eine grobe Fehlanpassung zwischen „Generator“ und Motor vor. Schließt man hingegen z.B. zwei parallel geschaltete Spulen (300 Windungen, U-Kern mit Joch, Innenwiderstand ca.  $3 \Omega$ ) an das Modul, dann ist - wegen der besseren Anpassung - die auf das Joch ausgeübte Kraft so groß, daß dieses nicht mit der Hand weggerissen werden kann.

Der Thermoefekt ist bekanntlich umkehrbar: Schickt man durch das zwischen zwei Würfeln liegende Modul einen Strom (ca. 1,5A), so wird auf Grund des Peltiereffektes innere Energie aus dem einen Würfel heraus- und in den anderen „hineingepumpt“, was man am Sinken und Steigen der entsprechenden Temperaturen erkennt. Man hat also hier eine einfache Wärmepumpe, mit der man überdies zeigen kann, worin der Spareffekt solcher Pumpen besteht. Dazu muß man nur die während einer kurzen Pumpzeit (ca. 30 Sekunden) der Stromquelle entnommene Energie  $U \cdot I \cdot t$  mit der dem erwärmten Würfel zugeführten inneren Energie  $C \cdot \Delta T$  vergleichen. Man findet, daß letztere - beim Heizen also die „Nutzenergie“ - fast doppelt so groß ist wie die aufgewendete und letzten Endes zu bezahlende elektrische Energie. Dieses „Wunder“ erklärt der Versuch: Die hinzugewonnene innere Energie entstammt dem abgekühlten Würfel; man braucht sie nicht zu bezahlen, da ja ein genügend großer Speicher in der Außenwelt zur Verfügung steht.

Da die elektrisch gepumpte Energie nach Abschalten der äußeren Energiequelle von selbst wieder zurückfließt und über das Modul elektrische Spannung erzeugt, ist die aus zwei Speicherwürfeln und dem Peltiermodul bestehende Anordnung zugleich Modell eines Akkumulators, der die Energie nicht chemisch, sondern als innere Energie speichert und diese umso länger hält, je besser der Würfel thermisch isoliert ist.

Das Peltiermodul arbeitet als Wärmepumpe so effektiv, daß ein Wassertropfen auf der gekühlten Seite des Moduls in wenigen Sekunden zu Eis erstarrt, wenn der Strom auf maximal 3A erhöht wird. Für gute Wärmeabfuhr muß in diesem Fall durch ein großes Transistor-Kühlblech gesorgt werden (die maximale Temperaturdifferenz von 67K zwischen heißer und kalter Seite darf nicht überschritten werden). Weithin sichtbar läßt sich die Eisbildung demonstrieren, wenn man vor dem Erstarren einen Strohhalm in den Tropfen hält, der nach der Eisbildung aufrecht stehen bleibt.

### 3.3 Das Peltiermodul als Wärmestrommesser

Wird das Peltiermodul der Fläche  $A$  und Dicke  $\Delta x$  von einem konstanten Wärmestrom  $P$  durchflossen, so stellt sich zwischen den beiden Keramikflächen eine Temperaturdifferenz  $\Delta T$  ein, die zu  $P$  proportional ist (siehe Wärmeleitungsgleichung  $P = \lambda \cdot A \cdot \Delta T / \Delta x$ ). Die sich am Modul einstellende Thermospannung  $U_{th}$  ist ihrerseits proportional zu  $\Delta T$ , so daß insgesamt die Spannung  $U_{th}$  proportional zum Wärmestrom  $P$  durch das Modul ist ( $P = k U_{th}$ ). Man kann daher bei Kenntnis von  $k$  das Peltiermodul zur Messung des durchgehenden Wärmestroms

verwenden. Diese hiermit möglich gewordene direkte Wärmestrommessung ist mit der Einführung des Amperemeters in der Elektrizitätslehre im letzten Jahrhundert zu vergleichen. In [1] - [3] sind Verfahren zur Kalibrierung (Bestimmung von  $k$ ) des Peltiermoduls beschrieben, die sich allerdings für die Sek. I als zu kompliziert erwiesen. Inzwischen haben wir einen einfacheren Weg gefunden, den wir in der Sek. I erprobt haben: Das Peltiermodul wird mit Wärmeleitpaste zwischen zwei Kupferwürfel geklebt, deren Anfangstemperaturen auf der einen Seite ca. 3K über, auf der anderen etwa 3K unter Raumtemperatur liegen (Minimierung der Strahlungsverluste). Es beginnt ein Wärmestrom zu fließen, der im Lauf der Zeit immer schwächer wird, weil sich die Temperaturen einander annähern. Entsprechend nimmt die vom Peltiermodul gelieferte Thermospannung ab. Der Grundgedanke der Kalibrierung ist nun folgender: Man bestimmt den Mittelwert  $P_m$  des während eines Zeitintervalls  $\Delta t$  geflossenen Wärmestromes aus dem Temperaturabfall  $\Delta T$  des einen Würfels (gleich dem Temperaturanstieg am andern) und seiner Wärmekapazität. Die mittlere Thermospannung  $U_{th,m}$  während des gleichen Intervalls  $\Delta t$  wird als arithmetisches Mittel von Anfangs- und Endspannung angenommen;  $k$  berechnet sich dann nach  $k = P_m / U_{th,m}$ .

Bei der Durchführung geht man folgendermaßen vor: man mißt die Zeit  $\Delta t$ , die bis zu einem Temperaturabfall  $\Delta T$  von 0,5K verstreicht. Hierzu wird mit dem ersten Umspringen der Digitalanzeige die Zeitmessung gestartet und  $U_{th,Anfang}$  notiert. Sobald die Temperatur um 0,5K angestiegen ist wird beim nächsten Umspringen die Zeitmessung gestoppt und  $U_{th,Ende}$  notiert. Die Messungen ergaben den Wert  $k = 8,0 \text{ W/V}$ . Die Exemplarstreuungen für diesen Wert liegen im Bereich des Meßfehlers. Da man mit einem  $4\frac{1}{2}$ -stelligen Digitalvoltmeter noch Spannungen im  $10^{-5}\text{V}$ -Bereich messen kann, sind damit noch Wärmeströme in der Größenordnung von  $10^{-4}\text{W}$  meßbar. Einen eindrucksvollen Beweis für die Empfindlichkeit des Peltiermoduls als Wärmestrommesser liefert folgender Versuch: Tippt man mit einer Fingerspitze nur etwa 1 Sekunde lang gegen einen der beiden Würfel, zwischen denen das Peltiermodul liegt, so wird die Anzeige des angeschlossenen Digitalvoltmeters fast ohne Verzug davon beeinflusst. Hiermit läßt sich sofort auf die Richtung des Wärmestromes schließen.

### 3.4 Wärmeströme in unserer Umwelt

Ein kalibrierter Wärmestrommesser ermöglicht u.a. die Beantwortung folgender Fragen: Wieviel Wärme verläßt an einem kühlen Wintertag den Physiksaal durch die Fenster, oder wieviel unerwünschte Wärme kommt an einem heißen Sommertag herein? Um diesen Fragen nachzugehen, klebt man das Peltiermodul mit Wärmeleitpaste an die Fensterscheibe, wobei man sich eine Stelle aussucht, die nicht von der Sonne beschienen wird. Mit dem Wärmestrommesser wird nur der Wärmestrom durch ein  $9\text{cm}^2$  großes Flächenstück des Fensters bestimmt, den Wert für die Gesamtfläche des Fensters erhält man durch eine entsprechende Hochrechnung. Die Außenwände lassen sich entsprechen untersuchen, man muß nur

das Peltiermodul geeignet anbringen. Hier hat sich bewährt, mit Klebestreifen ein Stück Alufolie auf der Wand zu befestigen (Andrücken gleicht die Rauigkeit der Wand aus) und darauf mit Wärmeleitpaste das Modul.

Ein interessantes Meßobjekt ist auch die menschliche Körperoberfläche. Es geht hier um die Fragen: Welcher Wärmestrom verläßt die Körperoberfläche eines Menschen? Wie wirkt sich Zugluft aus? Welchen Einfluß hat Feuchtigkeit auf der Körperoberfläche? Wie wirkt die Kleidung? Warum fühlen sich Metalle kalt, andere Stoffe (z. B. Styropor) dagegen warm an, auch wenn sie sich seit längerem im gleichen Raum befinden und daher gleiche Temperatur haben müssen? Auch diese Fragen kann man mit Hilfe des Peltiermoduls beantworten.

Eigentlich müßte man hierzu das Peltiermodul auf die Körperoberfläche kleben. Praktischer ist es, einen der Kupferwürfel als „Modellkörper“ zu benutzen. Man geht dabei z.B. von einer mittleren Temperatur der Körperoberfläche von  $35^{\circ}\text{C}$  aus, auf die man den Würfel aufheizt. Bei einer Raumtemperatur von  $20^{\circ}\text{C}$  ergibt sich dann ein Wärmestrom von ca.  $160\text{ mW}$  durch die  $9\text{ cm}^2$  große Fläche des Moduls. Nimmt man die Körperoberfläche zu  $1,8\text{ m}^2$  (konstante Temperaturverteilung) an, so ist der sie durchsetzende Wärmestrom 2000 mal so groß, also ca.  $320\text{ W}$ . Der Grundumsatz eines in Ruhe befindlichen Menschen wird in der einschlägigen Literatur mit  $200\text{ W}$  angegeben - er würde also nicht ausreichen, den errechneten Wärmebedarf zu decken. Dies ist in Einklang mit der Tatsache, daß man im unbedeckten Zustand bei  $20^{\circ}\text{C}$  Raumtemperatur friert, wenn man sich nicht bewegt. Aktivität erhöht die Wärmeproduktion. Das Problem der „Wärmeentsorgung“ löst der Körper durch Erhöhung der Oberflächentemperatur (eine Erhöhung um  $1\text{ K}$  steigert den Wärmeabfluß bereits um ca.  $25\%$ , wie man durch eine Messung am Modell feststellen kann) und durch Schwitzen, wobei dem Körper Verdunstungswärme entzogen wird.

Der Einfluß von Zugluft kann demonstriert werden, indem man dem Peltiermodul, das unsere Haut im Modell ersetzt, mit der Hand etwas Luft zufächelt. Der Wärmestrom steigt dabei auf ca. das Doppelte. Diese Steigerung unterbleibt, wenn man die Modellhaut (Peltiermodul) z.B. mit einem dünnen Tuch abdeckt. Befeuchtet man das aufgelegte Tuch, so nimmt der Wärmestrom ganz drastisch zu, da der „Körperoberfläche“ Verdunstungswärme entzogen wird. Der Versuch erklärt uns das unangenehme Gefühl des Frierens in feuchter Kleidung. Setzt man auf die „Modellhaut“ einen zweiten, auf Raumtemperatur befindlichen Kupferwürfel, so steigt der Wärmeabfluß um mehr als den Faktor 10. Der Kupferwürfel scheint wie ein „Wärmeschwamm“ zu wirken, der die Wärme in sich aufsaugt. Drückt man gegen die Modellhaut dagegen ein Stück ebenfalls auf Raumtemperatur befindliches Styropor, so wird der Wärmeabfluß bis auf einen geringen Rest unterbunden. Dieser Versuch erklärt, warum uns unser sogenannter „Temperatursinn“ beim Anfassen von Metall und Styropor zu täuschen scheint: In Wirklichkeit ist dieser Sinn ein „Sinn für einen Wärmestrom“, der uns ein Gefühl für den Wärmezu- und -abfluß

vermittelt. Eine Information über den unseren Körper verlassenden Wärmestrom ist für unsere Gesundheit wichtig.

Auch zu starke Wärmezufuhr kann natürlich zur Gefahr für unseren Körper werden. Davor warnt uns auch dieser Sinn. Die Metallwürfel geben uns Gelegenheit, für unsere Fingerspitzen jene Temperatur des Würfels zu ermitteln, bei der der Wärmestrom z.B. in unsere Fingerspitzen unerträglich wird. Um möglichst reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, bekommt die Testperson den Auftrag, den Kupferwürfel an gegenüberliegenden Seiten mit Daumen und Mittelfinger festzuhalten, während man mit einem heißen LötKolben von oben her auf den Würfel drückt und diesen damit langsam erwärmt. Durch den Druck von oben wird die Testperson gezwungen, die Finger fest auf die Würfelseiten zu pressen, was für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse wichtig ist. Es ist erstaunlich, wie genau die unter diesen Bedingungen erhaltenen Ergebnisse übereinstimmen: Bei 47°C wird es sehr unangenehm und bei ca. 51°C spätestens lassen alle Testpersonen los!

### 3.5 Wärmestrahlung

Versuche zur Wärmestrahlung gehören zu den spannendsten und lehrreichsten, welche die Wärmelehre zu bieten hat. Oft unterbleiben sie, weil keine Thermosäule vorhanden ist. Mit einem Peltiermodul, einem Transistorkühlblech, einer Papp- röhre und etwas Alufolie läßt sich schnell ein der Thermosäule gleichwertiges Strahlungsmeßgerät improvisieren: Das Peltiermodul wird mit Wärmeleitpaste in der Mitte eines ca. 10 x 10 cm<sup>2</sup> großen Transistorkühlbleches befestigt. Dieses wird in einer Styroporverpackung so untergebracht, daß nur ein 9cm<sup>2</sup> großes Fenster für das Peltiermodul offen bleibt. Vor dieses Fenster befestigt man z.B. mit Heißkleber ein ca. 10cm langes, als Kollimator und Konvektionsschutz dienendes Papprohr (Durchmesser ca. 60mm), das innen mit Alufolie auskleidet ist. Anstelle des Kühlbleches läßt sich selbstverständlich auch einer der Metallwürfel verwenden, was den Vorteil hat, daß man dann auch über die Referenztemperatur dieses Strahlungsmeßgeräts im Gegensatz zum Fall der Thermosäule nach Moll stets informiert ist, denn diese Temperatur spielt bei allen Versuchen zur Wärmestrahlung eine entscheidende Rolle. Das Strahlungsmeßgerät empfängt nicht nur Strahlung, sondern es sendet auch entsprechend der jeweiligen Referenztemperatur Strahlung aus.

Richtet man das Kollimatorrohr gegen verschiedene "Ziele" im Raum, so kann man untersuchen ob das Gerät mehr Strahlung aussendet als es empfängt oder umgekehrt. Hat das Gerät vor den Versuchen längere Zeit in dem Raum gelegen, in dem die Untersuchungen durchgeführt werden, so sollte der Nettowärmestrom eigentlich Null sein, was jedoch nicht erfüllt ist, da in einem normalen Raum nicht alle Gegenstände die gleiche Temperatur besitzen.

Es läßt sich auch zeigen, daß bei gleicher Temperatur die Oberflächen eines Körpers unterschiedliche Emissionseigenschaften haben. Dazu wird einer der Kupferwürfel so präpariert, daß vier verschiedene Oberflächen zur Verfügung stehen:

Eine Seite wird mit einem Lappen frisch poliert. Die zweite Fläche wird gleichmäßig dünn mit weißer Wärmeleitpaste bestrichen. Auf die dritte Fläche wird mit Wärmeleitpaste Alufolie geklebt. Die vierte Fläche schließlich wird ebenso mit Alufolie beklebt und anschließend mit einer Kerze berußt. Zur weiteren Untersuchung wird der Würfel auf ca. 50°C erwärmt, und es wird mit dem Strahlungsmeßgerät die jeweils von den Seiten emittierte Strahlung gemessen. Das Ergebnis ist, daß die blank polierte Kupferoberfläche wenig, die mit blanker Alufolie beklebte noch weniger, die weiße Oberfläche am meisten und die berußte nur etwas weniger strahlt. Die Tatsache, daß die berußte Alu-Folie wieder viel stärker strahlt als die blanke, entkräftet das Argument, daß die Alu-Folie die Wärme nicht "durchlassen" würde. Sie läßt sie sehr wohl durch, wie die berußte Oberfläche zeigt.

Will man generell das Abschirmvermögen eines Körpers untersuchen, so muß man ihn zwischen Strahlungswürfel und -meßgerät halten und den Wärmestrom messen. So kann z.B. das Isoliervermögen von Haushaltsalufolie untersucht und die Frage beantwortet werden, welche Seite - die matte oder die glänzende - nach außen zeigen muß, um eine Speise thermisch zu isolieren und damit warm zu halten. Interessant ist auch das Ergebnis, daß Glasplatten fast keine Wärmestrahlung durchlassen.

Mit dem Strahlungsmeßgerät kann man auch die Strahlung der Sonne mittels der auf die Erde pro Zeit und Fläche einfallenden Energie untersuchen. An einem klaren, milden Wintertag bei einem Sonnenstand von ca 20° über dem Horizont haben wir folgende Energiestromdichten gemessen: Gegen den Himmel gerichtet: -180 W/m<sup>2</sup>, direkt gegen die Sonne gerichtet: +90 W/m<sup>2</sup>, was netto 270 W/m<sup>2</sup> ergibt. Unter optimalen Bedingungen kann man 1,34kW/m<sup>2</sup> (Solarkonstante) erwarten.

Auch das Stefan-Boltzmannsche Gesetz wird mit dem Strahlungsmeßgerät zugänglich. Als Strahlungsquelle dient der mit Wärmeleitpaste bestrichene Boden einer mit warmem Wasser gefüllten Konservendose, die auf das vertikal stehendes Kollimatorrohr gestellt wird. Als Referenzkörper dient einer der Würfel, so daß dessen Temperatur direkt gemessen werden kann. Die vertikale Anordnung verhindert die Entstehung von störenden Konvektionsströmungen. Aus dem Wärmestrom wird die Energiestromdichte P/A berechnet und gegen T<sup>4</sup> aufgetragen. Es ergibt sich die nach dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz  $P/A = \sigma \epsilon T^4$  erwartete Gerade, die allerdings nicht durch den Nullpunkt verläuft, da der Referenzkörper ebenfalls - jedoch in entgegengesetzte Richtung - strahlt. Berücksichtigt man dies und nimmt für Sender und Empfänger das gleiche Emissions- bzw. Absorptionsvermögen an, so gilt:  $P/A = \sigma \epsilon (T^4 - T_{\text{Ref}}^4)$ . Die Auswertung unserer Meßergebnisse lieferte  $\sigma \epsilon = 3,7 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ . Die Abweichung von dem in der Literatur angegebenen Wert  $\sigma \epsilon = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$  ist auf das von 1 abweichende Emissionsvermögen  $\epsilon$  des Wärmestrahlers zurückzuführen.

#### 4 Zusammenfassung

Der vorgestellte Experimentiersatz wurde in mehreren Gymnasialklassen der Sekundarstufe I erprobt. Die durch das Modul gegebene Möglichkeit, die Wärme direkt auf ihren vielen Wegen in der Umwelt zu erfassen, weckte Interessen und ließ die Wärmelehre zu einem lebensnahen Thema werden. Weiterhin ist für den Unterricht von Vorteil, daß mit dem Wärmestrommesser die Wärme als die zwischen zwei Systemen ausgetauschte thermische Energie eindeutig erfaßt werden kann. Bisher konnte man die Wärme nur über die Änderung der inneren Energie nachweisen, was zu Lernschwierigkeiten, zu unpräzisem Umgang mit den Begriffen und zu Fehlvorstellungen führte. Diese Schwierigkeiten müssen bei einer Einführung des Wärmestrommessers in den Physikunterricht nicht mehr auftreten.

#### 5 Literatur und Bezugsquellen

- [1] H. Dittmann und W. B. Schneider: Ein "Amperemeter" für den Wärmestrom. In: W. Kuhn (Hg.): Tagungsband des DPG-Fachausschusses Didaktik der Physik, Gießen 1990
- [2] H. Dittmann und W. B. Schneider: Der Wärme auf der Spur. - In: W. Kuhn (Hg.): Tagungsband des DPG-Fachausschusses Didaktik der Physik, Erlangen 1991
- [3] H. Dittmann und W. B. Schneider: Der Wärme auf der Spur - Ein Beitrag zur Wärmelehre in der Sekundarstufe I. - In: MNU 45/7, S. 397 - 403
- [4] Bezugsquellen  
 Peltiermodul:  
 AMS Electronic GmbH (Melcor Peltierelement Typ Cp 1-127-05L und andere Typen) Albrechtstraße 14, 80636 München  
 Peltron GmbH (TypPKE 72A0021) Flurstr. 74, 90765 Fürth (Preis bei Einzelbezug ca. 50 DM)  
 Schülerübungssatz:  
 Mekruphy GmbH, Schlehenhag 19, 85276 Pfaffenhofen a.d. Ilm  
 Digitalthermometer (Big Digit):  
 ELV Elektronik (Best. Nr. 40-118-72), 26787 Leer  
 Conrad (Best. Nr. 109320-99), Klaus-Conrad-Str. 1, 92240 Hirschau
- [5] G. Hacker: „Ein elektrisches Thermometer mit projizierbarem LCD-Display“. In: Wege in der Physikdidaktik Band 4, vorliegender Band S. 160