

Helmut Dittmann, Werner B. Schneider

Ein Meßgerät für den Wärmestrom¹

Im Physikunterricht wird der Transportcharakter der Wärme in der Regel vernachlässigt. Dies liegt u.a. daran, daß es keinen für den Unterricht geeigneten Wärmestrommesser gibt. Dieser Mangel kann mit Hilfe eines modernen thermoelektrischen Bauelements, einem Peltiermodul, behoben werden. Ein Peltiermodul kann sowohl als Wärmepumpe als auch als empfindliches Nachweisgerät für kleinste Temperaturdifferenzen (mK-Bereich) und als Meßgerät für den Wärmestrom verwendet werden. Es ist nur eine entsprechende Kalibrierung notwendig. Hierzu und zu einigen Anwendungen des Peltiermoduls im Unterricht werden Hinweise gegeben. Insbesondere wird nachgewiesen, daß der sogenannte Temperatursinn der Haut in Wirklichkeit ein Sensor für den Wärmestrom durch die Haut ist.

1. Einleitung

In der Elektrizitätslehre ist die Behandlung des elektrischen Stroms im Unterricht ohne Amperemeter, d.h. ohne Strommeßgerät kaum vorstellbar. In der Wärmelehre hingegen fehlt ein geeignetes Meßinstrument, das den Wärmestrom direkt mißt. Man kennt dort nur ein Meßinstrument, das Thermometer, das eher dem Voltmeter entspricht. Mit dem Thermometer kann nur die innere Energie eines Körpers oder deren Zu- oder Abnahme über die Temperatur oder über eine Temperaturdifferenz gemessen werden. Wärme kann erst, nachdem sie einem Körper zugeflossen und zur inneren Energie geworden ist, mit dem Thermometer nachgewiesen werden. Man mißt somit die Wärme zu einem Zeitpunkt, zu dem sie schon längst keine Wärme mehr ist. Das eigentliche Kennzeichen der Wärme, der Transportcharakter, geht dabei natürlich verloren, denn mit Wärme kennzeichnet man in der Physik diejenige Energie, die zwischen zwei sich berührenden Körpern unterschiedlicher Temperatur ausgetauscht wird. Charakteristisch ist bei diesem Austausch, daß keine andere Energieform mechanischer oder elektrischer Art oder irgendeine Feldenergie beteiligt ist (z.B. nach [1]).

Im Physikunterricht hat man sich offensichtlich an diesen Nachteil, die Vernachlässigung des Transportcharakters der Wärme, gewöhnt. So ist es nicht verwunderlich, daß bei vielen Schülern und auch Studenten häufig die Fehlvorstellung: Gleichsetzung von Wärme und innerer Energie zu beobachten ist. Eine Fehlvorstellung, die häufig auch ein Physikstudium überdauern kann. Viele Begriffsbildungen in der Wärmelehre wie Wärmemenge oder Wärmekapazität, die nur aus der historischen Entwicklung der Wärmelehre zu verstehen sind und gelegentlich auch heute im Unterricht noch gebraucht werden, verstärken diese Fehlvorstellung noch.

Abhilfe könnte hier ein Meßgerät schaffen, das den Wärmestrom direkt mißt.

In der Technik gibt es bereits Wärmestrommesser, die darauf beruhen, daß eine dünne „Meßplatte“ bekannter Wärmeleitfähigkeit direkt in den Wärmestrom geschaltet wird. Die sich dann zwischen Ober- und Unterseite der Platte einstellende Temperaturdifferenz wird mit einem empfindlichen Thermoelement gemessen. Sie ist zum Wärmestrom proportional, so daß aus der jeweils gemessenen Temperaturdifferenz und dem bekannten Wärme-

¹ Auszugsweise vorgetragen auf der Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft – Fachausschuß Didaktik der Physik [2], Gießen 1990

widerstand der Wärmestrom berechnet werden kann. Der Wärmewiderstand muß bei einem Wärmestrommesser, wie der Innenwiderstand eines Amperemeters, möglichst klein gegenüber den anderen, den Strom begrenzenden Widerständen sein. Diese Forderung führt jedoch zu sehr kleinen Thermoelementspannungen, die nur mit Hilfe aufwendiger elektronischer Hilfsmittel gemessen werden können. Diese Hilfsmittel stehen einer Schulsammlung nicht zur Verfügung, so daß dieser Wärmestrommesser im Unterricht nicht eingesetzt werden kann.

2. Peltiermodule als vielseitige Experimentierhilfen in der Wärmelehre

2.1 Aufbau und Wirkungsweise

Das in der Technik angewandte Prinzip zur Messung von Wärmeströmen ist jedoch neuerdings durch die Verwendung moderner Peltiermodule, die in der Technik zur gezielten Kühlung elektronischer Bauelemente eingesetzt werden, auch dem Unterricht zugänglich geworden. Diese Module gestatten es, mit einfachsten Mitteln für den Unterricht geeignete Wärmestrommesser selbst herzustellen [2]. Zusätzlich sind die Peltiermodule aufgrund der geometrischen Abmessungen, 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 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 ca 60 K). Die zugehörigen Spannungen liegen im mV- bzw. V-Bereich und lassen sich mit einem üblichen Digitalvoltmeter besonders einfach ohne weiteren Verstärker direkt messen und anzeigen. Durch Ihren Einsatz in modernen elektronischen Geräten haben die Peltiermodule mittlerweile eine weite Verbreitung gefunden und können in einschlägigen Elektronikgeschäften preisgünstig erworben werden (Lieferanschriften in [3], [4]).

Das von uns zum Aufbau eines Wärmestrommessers ausgewählte Modell (Melcor, Cp 1-127-05 L [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 x 30 x 3,2 mm. Die Keramikplatten (Dicke: 0,5mm) dienen einmal zur elektrischen Isolierung der Thermokontakte und zum anderen stellen sie aufgrund ihrer guten Wärmeleitungsseigenschaften den Wärmekontakt zu den Thermoelementen her. Durch die Verwendung von Metall-Halbleiter-Kontakten aus geeignet p- bzw. n-dotiertem Wismut-Tellurid und Kupfer erreicht man eine Seebeckkonstante von 0,00020 V/K, die ca. 10-mal 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 der gleichen 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

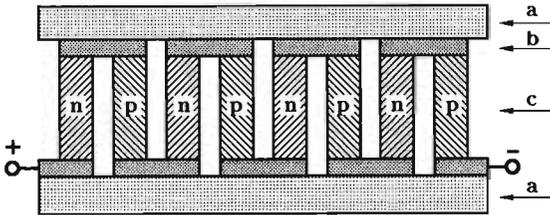


Abb. 1: Querschnitt durch ein Peltiermodul (schematisch, nicht maßstabsgetreu). Gezeigt ist nur eine Lage der elektrisch hintereinander und thermisch parallel geschalteten Thermoelemente aus p- bzw. n-dotierten Wismut-Tellurid-Stäben (c) und den Kontaktbrücken aus Kupfer (b). Die Kupferstäbe (b) sind 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 Module 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 x 30 x 3,2 mm und 127 Thermoelementpaaren. Die Keramikplatten sind jeweils 0,5 mm dick.

zur Gesamtspannung beitragen. Insgesamt sind daher im Fall des ausgewählten Peltiermoduls mit den 127 Thermoelementpaaren 254 Thermokontakte für die Gesamtthermo- spannung verantwortlich.

Die vielen elektrisch hintereinandergeschalteten Thermoelementpaare weisen sofort auf eine wichtige Anwendung des Moduls hin: die Verwendung als empfindlicher, thermoelektrischer Wandler. Aus der Seebeckkonstante und der Zahl der Thermoelementpaare läßt sich folgender Zusammenhang zwischen der am Peltiermodul auftretenden Thermo- spannung U_p und der Temperaturdifferenz ΔT zwischen den Keramikplatten vermuten:

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

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

Die experimentelle Überprüfung mit Hilfe von kalibrierten Thermoelementen ergab im hier nur interessierenden Temperaturbereich 0 – 70°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 aus dem Datenblatt folgenden Temperaturempfindlichkeit läßt sich mit Gl. 1 der Anteil der Keramik- platten am Temperaturgefälle zu ca. 6% der gesamten Temperaturdifferenz abschätzen.

2.2 Peltiermodul als Wärmestrommesser

Das Peltiermodul ist einmal durch die Verwendung der thermisch gut leitenden Keramikplatten und zum anderen durch die vielen thermisch parallel geschalteten Wismut-Tellurid-Stäbe ein 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 zeigten, daß die warme Hand bereits aus 1m den Wärmestrom durch das Peltiermodul merklich ändert.

Für quantitative Messungen muß das als Wärmestrommesser verwendete Peltiermodul noch kalibriert werden. Hierzu wird es gemäß Abbildung 2 zwischen zwei gleiche Quader (Aluminium: 30 x 30 x 90 mm) unter Verwendung von Wärmeleitpaste geklebt (Quader 2 und 3 in Abbildung 2). Die Quader besitzen jeweils dicht unter der oberen und unteren Begrenzungsfläche je eine Bohrung zur Aufnahme eines Thermoelements. Die Thermo-elemente werden zur Verbesserung des Wärmekontaktes mit Wärmeleitpaste in die Bohrung eingefügt. Es wird die jeweils im Bereich der Bohrung herrschende Temperatur und die Temperaturdifferenz zwischen den Endflächen der Quader (Spannung U_{12} und U_{34} in Abbildung 2) gemessen.

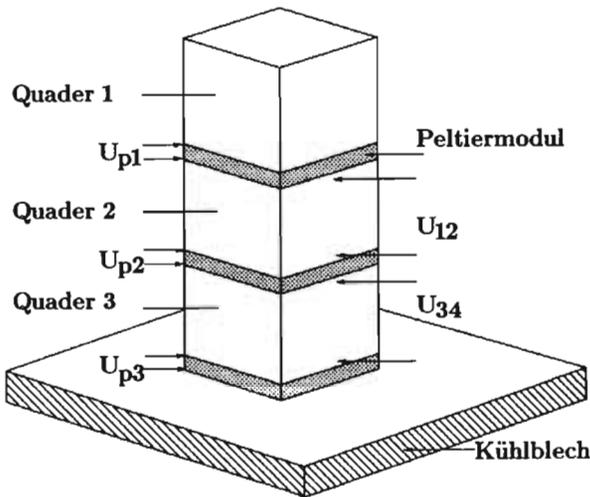


Abb. 2: Schematische Zeichnung der zur Kalibrierung der Peltiermodule als Wärmestrommesser gewählten Säulenordnung. Als Wärmestrommesser dient das Modul 2 zwischen Quader 2 und 3. Die Module 1 und 3 sind als Wärmepumpe geschaltet und erzeugen einen konstanten Wärmestrom von Quader 2 nach Quader 3 in der Säulenordnung. Bis auf Quader 1, der den Kontakt zur Umgebung darstellt, ist die Säulenordnung bei den Kalibrierungsmessungen zur thermischen Isolierung mit einem Styropormantel umgeben, der nicht eingezeichnet ist. Die Anordnung steht auf einem Transistorkühlblech, das zur besseren Abführung der Wärme noch in Eiswasser getaucht ist.

Zur Kalibrierung wird die Spannung U_{p2} am Peltiermodul 2 in Abhängigkeit vom Wärmestrom in der Säulenordnung gemessen.

Daten: Quader: Aluminium, Abmessungen: 30 x 30 x 90 mm mit zwei Bohrungen ($\varnothing = 1$ mm) im Abstand von 2 mm von den Deckflächen zur Aufnahme der Thermoelementdrähte; Wärmewiderstand: 0,58 K/W.

Peltiermodul: Grenzwerte: $I = 3,5$ A, $U = 15,0$ V, $\Delta T = 65^\circ\text{C}$ im Temperaturbereich: -150°C bis 70°C .

Durch die Säulenordnung erzeugten wir einen von oben nach unten fließenden Wärmestrom, indem wir an der oberen Seite heizten und an der unteren kühlten. Beides läßt sich besonders einfach mit zwei weiteren, gleichen Peltiermodulen, die hier als Wärmepumpe betrieben werden, durchführen. In Abbildung 2 ist der zur Kalibrierung verwendete Aufbau schematisch dargestellt. Während der Messungen wird die Anordnung, bis auf Quader 1, nach außen mit Hilfe eines Styropormantels gegen seitlich ab- und zufließende Wärmeströme isoliert.

Aus dem bekannten Wärmewiderstand der Quader ($R_q = 0,58 \text{ K/W}$) und der jeweils gemessenen Temperaturdifferenz U_{12} bzw. U_{34} läßt sich der in der Säulenordnung insgesamt und somit auch der durch das Peltiermodul fließende Wärmestrom berechnen und seine Konstanz überprüfen. Der Wärmestrom erzeugt im Peltiermodul eine Temperaturdifferenz, die über die Thermospannung U_{p2} des Moduls gemessen wird. Im Temperaturintervall 0°C bis ca. 40°C erhielten wir einen linearen Zusammenhang zwischen U_{p2} und dem Wärmestrom Φ in der Säule:

$$U_{p2} = 0,086 \text{ V/W} \cdot \Phi \quad (2a)$$

$$\Phi = 11,63 \text{ W/V} \cdot U_p \quad (2b)$$

Mit dem Wärmewiderstand des Peltiermoduls:

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

der damit ca. dreimal größer ist als der Wärmewiderstand des Quaders aus Aluminium mit den Abmessungen $30 \times 30 \times 90 \text{ mm}$.

Mit Gl. 2 folgt, daß mit üblichen Digitalvoltmetern Wärmeströme bis in den mW-Bereich gemessen und direkt angezeigt werden können. Der von der warmen Hand in 1 m Entfernung ausgehende Wärmestrom läßt sich jetzt zu ca. 1 mW bestimmen. Dies gibt eine Vorstellung von der Empfindlichkeit des vorgestellten Wärmestrommessers. Seine Genauigkeit schätzen wir nach unseren Messungen auf ca. 5 bis 10%, die für schulische Anwendung ausreichend ist. Das Peltiermodul erfüllt somit für die meisten im Unterricht anfallenden Meßaufgaben die an einen Wärmestrommesser gestellten Anforderungen.

Als ein Anwendungsbeispiel für den Wärmestrommesser sei hier kurz gezeigt, wie man mit ihm die Wirkung des häufig mißverstandenen „Temperatursinns“ der Haut besser verstehen kann. 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 leichtfertig gesagt, daß uns der Temperatursinn täuscht. Der Wärmestrommesser kann zur Aufklärung dieser „Sinnestäuschung“ beitragen. Hierzu fassen wir den Wärmestrommesser als ein Stück unserer Haut auf. Legt man das Metallstück auf den Wärmestrommesser, so 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 sie gibt uns vielmehr einen Hinweis auf den von unserem Körper zum Gegenstand oder umgekehrt fließenden Wärmestrom. Diese Meldung ist für den Organismus offensichtlich wichtiger als eine absolute Temperaturengabe. Wir sollten also nicht von einem Temperatursinn sondern besser von einem Wärmestromsinn der Haut sprechen.

3. Zusammenfassung

Insgesamt ist das Peltiermodul aufgrund seiner großen Nachweisempfindlichkeit für Temperaturunterschiede, seiner extrem flachen Bauweise und seines relativ kleinen Wärmewiderstandes gut geeignet, in Demonstrationsexperimenten auch kleine Wärmeströme im mW-Bereich nachzuweisen und mit ausreichender Genauigkeit zu messen.

Neben der Verwendung als Wärmestrommesser bieten sich eine Reihe anderer Anwendungen für das Peltiermodul im Unterricht an, wie z.B. die Verwendung als Wärmepumpe, Strahlungsmeßgerät, Thermometer, Kühlaggregat oder thermoelektrischer Generator. Über diese Anwendungen und über den Einsatz des Wärmestrommessers in der Wärmelehre der Sekundarstufe I, bei dem zusätzlich der Transportcharakter der Wärme in den Vordergrund gestellt ist, wird in [5] ausführlich berichtet.

(Anschrift der Verfasser: StD Dr. Helmut Dittmann, Hans-Sachs-Gymnasium Nürnberg, Löbleinstr. 10, 8500 Nürnberg 10), Prof. Dr. Werner B. Schneider, Physikalisches Institut Erlangen – Didaktik der Physik, Staudtstr. 7, 8520 Erlangen)

Eingangsdatum: 21. 2. 1992

4. Literatur

- [1] G. Falk und W. Ruppel, „Energie und Entropie“, Heidelberg 1976, G. Falk, „Physik – Zahl und Realität“, Basel 1990
- [2] H. Dittmann, W. B. Schneider, „Ein 'Amperemeter' für den Wärmestrom“, Tagungsband des DPG Fachausschusses Didaktik der Physik Gießen 1990, (W. Kuhn, Herausgeber)
- [3] Bezugsquelle Peltiermodul: Firma AMS Electronic GmbH (Melcor Peltierelement Typ Cp 1–127-05L und andere Typen), Albrechtstr. 14, 8000 München 19
- [4] Bezugsquellen Peltiermodule, elektronische Thermometer u. Wärmeleitpaste: Firma Conrad Electronic, Postfach, 8452 Hirschau, Firma ELV, Postfach 1000, 2950 Leer, Firma Völkner, Electronic, Marienberger Str. 10 3300 Braunschweig
- [5] H. Dittmann, W.B. Schneider, „Der Wärme auf der Spur – Ein Beitrag zur Wärmelehre in der Sekundarstufe I“, erscheint 1992 in: Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht (MNU)

Einheiten und Begriffe für physikalische Größen (nach DIN-Norm)

- *Größenwert = Zahlenwert · Einheit*
- *Formelzeichen einer Größe ist kursiv zu setzen*
- *Einheitenzeichen werden senkrecht wiedergegeben*
- *Zahlenwert zum Beispiel $\frac{l}{m}$ (die Größe l für Länge, und die Einheit m)*
- *Phys. Gleichungen geben Beziehungen zwischen phys. Größen oder zwischen Einheiten oder zwischen Zahlenwerten in einer vereinbarten Schreibweise wieder. Man unterscheidet deshalb Größen ~, Einheiten ~ und Zahlenwertgleichungen.*

(Nach: DIN-Taschenbuch 22, DIN 1313 – Phys. Größen und Gleichungen, Beuth-Verlag 1990)