

# Wärmestromsensoren: Neue Messmöglichkeiten für den Physikunterricht

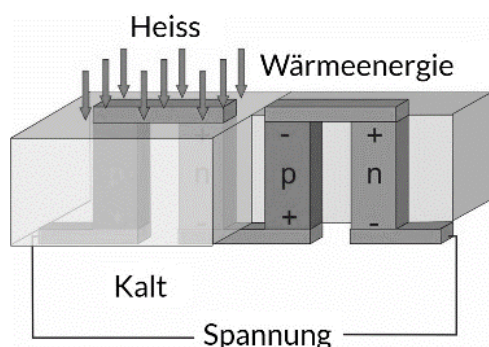
Hans Kammer, Bern, hanskammer@bluewin.ch

Manuel Kugler, ETH Zürich, kuglerm@micro.mavt.ethz.ch

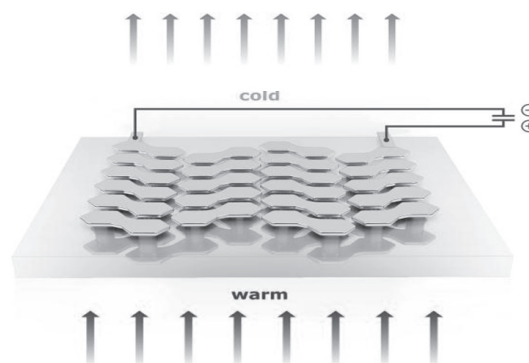
Irma Mgeladze, Gymnasium Köniz-Lerbermatt, irma.mgeladze@koeniz-lerbermatt.ch

## Wärmestromsensoren

Die greenTEG AG, eine Spin-Off-Firma der ETH Zürich, stellt auf der Grundlage des klassischen Seebeck-Effekts integrierte Wärmestromsensoren her. In einem solchen Sensor sind abwechslungsweise p- und n-dotierte Halbleitersäulen aus Bismuttellurid  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  in Serie geschaltet (Fig. 1). Mehrere solche p-n-Thermoelemente bilden einen Wärmeflussensor (Fig. 2). Die Thermospannung des einzelnen Thermoelements wird so vervielfacht; man erzielt Werte von einigen Millivolt pro Kelvin Temperaturdifferenz am Sensor. Deshalb ist es möglich, Temperaturdifferenzen im Millikelvinbereich und damit auch kleine Wärmeströme durch den Sensor zu messen.



Figur 1: Integrierte Halbleiterthermoelemente in greenTEGs Wärmestromsensoren.



Figur 2: Wärmestromsensor mit elektrisch in Serie geschalteten Thermoelementen.

Besteht zwischen dem oberen und dem unteren Ende der p-n-Thermoelemente eines solchen Sensors eine Temperaturdifferenz  $\Delta T$ , so entsteht längs der p-n-Thermoelemente ein Temperaturgradient  $\Delta T/\Delta x$  und es bildet sich ein Wärmestrom  $\Delta Q$ .

$$P = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{T_1 - T_2}{l} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

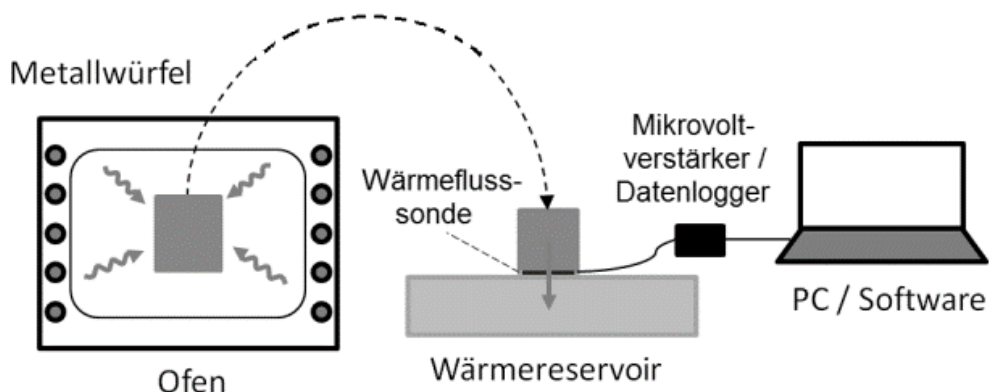
Dabei ist  $A$  die Sensorfläche und  $\lambda$  die Wärmeleitfähigkeit des Sensormaterials.

## Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität

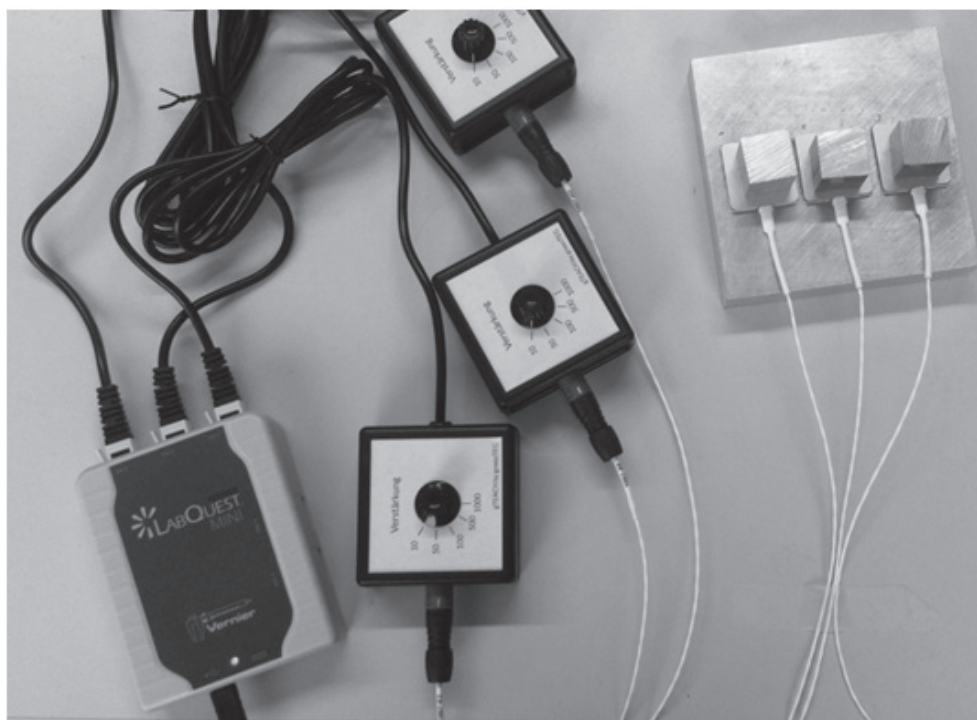
Für den Physikunterricht eröffnen diese Wärmestromsensoren neue Möglichkeiten für Messungen des Wärmetransports durch Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Konvektion. Wir beschreiben hier einen Messvorgang zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität von drei Metallwürfeln (Kupfer, Aluminium und rostfreier Stahl) mit der Wärmestrommethode (Figuren 3 bis 5).

Die Würfel werden in einem (Back-) Ofen auf eine genau bestimmte Temperatur, z.B.  $40^\circ\text{C}$ , erwärmt. Anschliessend werden sie aus dem Ofen genommen und auf einen Wärmestromsensor gesetzt. Der Sensor ist auf einer ca. 2 cm dicken Aluminiumplatte befestigt, die als Wärmereservoir mit nahezu konstanter

Temperatur (z.B. 22 °C) dient. Die Sonde ist über einen Vorverstärker an ein Datenerfassungssystem, LabPro, LabQuest (Vernier) oder Lab Cradle (TI) angeschlossen. Das Datenerfassungssystem wird mit einem Computer (PC, Chrome, iOS, Android) verbunden, auf dem eine Auswertungssoftware (LoggerPro, Labquest, TI-nspire) installiert ist.

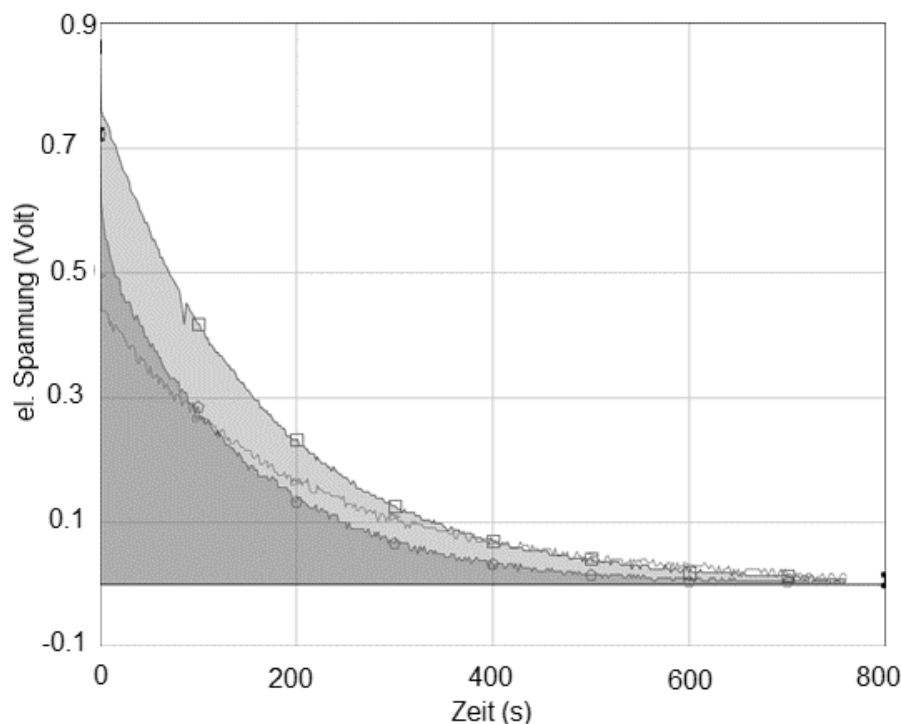


Figur 3: Schematischer experimenteller Aufbau und Ablauf der beschriebenen Wärmestrommessung zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität.



Figur 4: Experimenteller Aufbau zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität von drei Metallwürfeln, von links nach rechts: Aluminium, Kupfer und rostfreier Stahl. Hier wurden drei Wärmeflussensoren auf einer Aluminiumplatte befestigt und über je einen Vorverstärker an einen LabQuest Mini angeschlossen.

Nun wird der Wärmestrom  $P$  in Funktion der Zeit  $t$  gemessen. Die durch die Sonde abgeführte Wärme  $\Delta Q$  entspricht dem Integral über der Zeit  $t$ . Aus dieser Wärme, der Würfelmasse  $m$  und der Temperaturdifferenz  $\Delta T$  lässt sich nun die spezifische Wärmekapazität  $c_p = \Delta Q / (m \cdot \Delta T)$  berechnen. Bei dieser Messung wurden Strahlungs- und Konvektionsverluste durch die fünf nicht auf dem Sensor liegenden Würfel Flächen vernachlässigt. Die erzielte Genauigkeit liegt dennoch im Bereich von 5 %. Mit Styroporabdeckungen könnte dieser systematische Messfehler reduziert werden.



Figur 5: Messkurven des Wärmestroms  $P=P(t)$  von drei Wärmestromsensoren, jeweils mit einem unterschiedlichen Metallwürfel (Aluminium, Kupfer, rostfreier Stahl) beladen.

## Schlussbemerkungen

Wärmestromsensoren können für zahlreiche weitere Experimente eingesetzt werden. Beispielsweise können sie die Moll'sche Säule für Strahlungsexperimente und Messungen mit dem Leslie'schen Würfel [1] ersetzen. Sie können zur Messung der Strahlung der Sonne und von Lampen oder zur Messung des Wärmetransports durch Mauerwerk eingesetzt werden. Weitere Experimente sind auf der Firmenwebsite beschrieben [2]. Die Sensoren eignen sich neben Klassenzimmerexperimenten auch hervorragend für Maturaarbeiten, beispielsweise zur Bestimmung von  $U$ -Werten von Baumaterialien an Gebäudefassaden.

Im Rahmen eines von der Gebert RUF Stiftung finanzierten Projekts [3] wurden speziell für den Schuleinsatz robuste Wärmestromsensoren entwickelt. Ebenso ein Vorverstärker, der zu in Schulen vorhandenen Datenerfassungssystemen kompatibel ist. Die von greenTEG produzierten Wärmestromsensoren, passende Vorverstärker und Datenerfassungssysteme sind bei der Firma EducaTec AG in Döttingen erhältlich [4].

### Links:

- [1] [www.ld-didactic.de/literatur/hb/d/p5/p5523\\_d.pdf](http://www.ld-didactic.de/literatur/hb/d/p5/p5523_d.pdf)
- [2] [www.greenteg.com/heat-flux-sensor/gteach](http://www.greenteg.com/heat-flux-sensor/gteach)
- [3] [www.grstiftung.ch/de/portfolio/projekte/alle/y\\_2014/GRS-037-14.html](http://www.grstiftung.ch/de/portfolio/projekte/alle/y_2014/GRS-037-14.html)
- [4] [www.educatec.ch](http://www.educatec.ch)