

„Ein Amperemeter für die Wärmelehre“⁶⁶: Peltier-Module als Messsonden für thermische Energieströme und Entropieströme?

1. Anwendungen der Peltier-Module

Peltier-Module ermöglichen die Messung von Temperaturdifferenzen ΔT , von thermischen Energieströmen $I_{th} = \Delta Q / \Delta t$ und von Entropieströmen $I_S = \Delta S / \Delta t$. Sie eignen sich als Entropiepumpen (Wärmepumpen): sie transportieren thermische Energie von Orten niedrigerer Temperatur zu Orten höherer Temperatur und finden „umgekehrt“ so auch Verwendung als Kühlaggregate (aktive Campingkühlertaschen). Ferner eignen sie sich als thermoelektrische Generatoren, um die mit der Entropie transportierten Energie auf die Elektrizität umzuladen.

Leitgedanken:

- Welche Voraussetzungen müssen erfüllt sein, damit ein „Temperaturdifferenzsonde“ als Strommesser für thermische Energieströme und Entropieströme genutzt werden kann?
- Wie eicht man solche Messfühler?

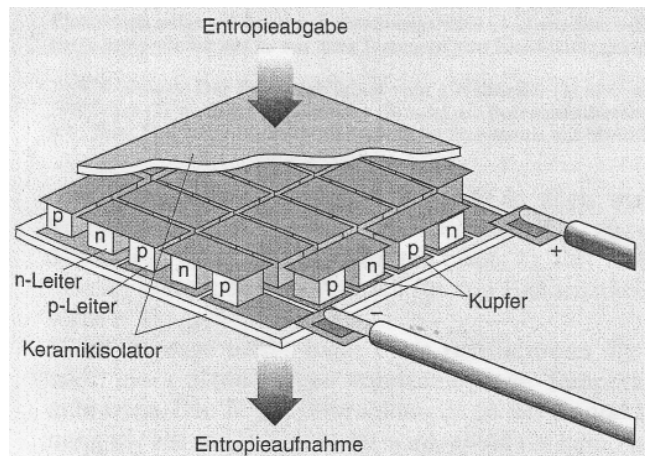


Abb. 1 Peltier-Modul: Die Peltier-Elemente (n-p-Paare) sind elektrisch in Reihe geschaltet. Für den Entropiestrom handelt es sich um eine Parallelschaltung der Elemente.

2. Funktionsweise des Peltier-Moduls

Gruppenarbeit in Form eines Kugellagers zur Funktionsweise des Peltier-Elements (= Thermo-Element = Seebeck-Element) aus dem das Modul zusammengesetzt ist.

Gruppe 1: Lit. [6] Schwarze, H.: Peltier-Module PdN-Ph. 2/49 S. 29 – 31 Abschnitt 2 „Drei Antriebsmechanismen“ (2000)

Gruppe 2: Hermann, F.: Elektrische Energiequellen, Vortrag auf der Comburg (2001) siehe am Ende dieses Skripts. Zitiert nach Plappert, D.: Energiewerke CD-Rom im Eigenverlag

3. Was lässt sich wie mit einem Peltier-Modul messen?

Die auftretende Thermosspannung U ist näherungsweise proportional zur Temperaturdifferenz ΔT an den beiden Kontaktflächen, dies wird später noch experimentell bestätigt:

$$U = \alpha \Delta T \quad \text{Gl. (1)}$$

(typische Werte für $\alpha = 0,4 \text{ mV/K}$ bei Wismut Tellurit Bi_2Te_3 , für *ein* n-p-Element)
 U gibt die Thermospannung im Leerlauf an, also ohne Lastwiderstand des Generators

Sind in einem Modul beispielsweise 60 Peltier-Elemente (jeweils aus einem n-p-Paar bestehend) elektrisch in Reihe geschaltet, so erhöht sich die Spannung natürlich auf das 60-fache also 24 mV/K (vgl. Abb.1 und Fußnote¹)

Die „Konstante“ α ist der (gemittelte) *Seebeck*-Koeffizient eines *Peltier*-Elements, welches deshalb in dieser Verwendung eigentlich *Seebeck*-Element heißen sollte.

¹ Daten des Peltier-Moduls TEC1-7105 (Conrad Electronic, Bestellnr. 1935 93-93)

$\alpha = 22,6 \text{ mV/K}$, Nennspannung als Entropiepumpe $U < 8,5 \text{ V}$, $I < 4,6 \text{ A}$, max. Wärmeleistung (oder Kühlleistung) $27,0 \text{ W}$, $\Delta T < 60 \text{ K}$, Maße $30 \times 30 \times 4,1 \text{ mm}$, $15,95 \text{ €}$

Preiswerte Peltier-Module (Thermoelemente) von Opittec:

a) Bestellnr. 207.136: $\alpha = 27 \text{ mV/K}$; 8 V , $3,5 \text{ A}$, 17 W , $\Delta T < 67 \text{ K}$, Betriebstemperatur $< 70^\circ\text{C}$, Maße $30 \times 30 \times 4,7 \text{ mm}$, thermischer Leitwert (Wärmeleitwert) 140 mW/K , $R_\Omega = 1,8 \text{ }\Omega$, $7,20 \text{ €}$

b) Bestellnr. 207.147: $\alpha = 49 \text{ mV/K}$; 15 V , $3,9 \text{ A}$, 33 W , $\Delta T < 67 \text{ K}$, Betriebstemperatur $< 150^\circ\text{C}$, Maße $40 \times 40 \times 4,7 \text{ mm}$, thermischer Leitwert 250 mW/K , $R_\Omega = 3,5 \text{ }\Omega$, $8,95 \text{ €}$

(*Peltiereffekt*: Bauelement als Entropiepumpe oder Kühlaggregat, *Seebeck-Effekt*: Bauelement als thermoelektrischer Generator).

Opittec bezeichnet den Seebeck-Koeffizienten α recht unphysikalisch als „Thermokraft“ mit der üblichen Einheit mV/K. Rode [5] verwendet für α die anschauliche Bezeichnung „Temperaturempfindlichkeit“.

a) Ein Blick auf die systematischen Fehler bei der Verwendung des Moduls als Messsonde für thermische Energieströme und Entropieströme

Der genannte Zusammenhang (Gl. 1) legt nahe, dass das Peltier-Modul „im Prinzip“ immer eine Temperaturdifferenz misst. Wie wird nun aus einem ΔT -Messgerät ein Messgerät für thermische Energieströme bzw. Entropiestromst rken? Richten wir das Augenmerk zunächst auf eine Voltmeter, das ein nach dem ohmschen Gesetz umgezeichnetes Amperemeter darstellt, „im Prinzip“ also auch nur elektrische Stromstärken misst. Je nach Messumgebung steht der Strom- oder der Spannungs-Aspekt im Vordergrund. Der Strom durch den (deshalb hochohmigen) Spannungsmesser sollte zu vernachlässigen sein, die Potentialdifferenz am (deshalb niederohmigen) Strommesser ebenfalls.

Ganz entsprechen gilt: Soll das Peltier-Modul zur Messung von Energieströmen eingesetzt werden, sollte es ein guter thermischer Leiter sein, an dessen Enden (den beiden Kontaktflächen) nur eine kleine Temperaturdifferenz auftritt. Zum Einbau des Peltier-Moduls siehe (Abb. 2 u.3).

Materialien wie Styropor[®], Glas, gebrannter Ton (Kacheln), Holz oder Textilien eignen sich für Untersuchungen mit dem Peltier-Modul, selbst wenn sie nur eine Schichtdicke von wenigen Millimetern haben. Sie kommen als Versuchsmaterial in Frage. Dagegen sind Messungen an Metallen als Entropieleiter im Allgemeinen nicht aussagekräftig.

Ein Beispiel kann dies am besten verdeutlichen: Für das große Peltier-Modul von Opittec mit 16 cm² Kontaktfläche wird ein thermischer Leitwert von 0,25 W/K also ein thermischen Widerstand von 4,0 K/W angegeben (Fußnote 1). Eignet sich das Modul (als „Spannungsmesser“ im Sinne der genannten Analogie) zur Messung der Temperaturdifferenz oder als „thermischer Strommesser“ an einem Zweischeiben-Isolierglasfenster, bei dem auf einer Fläche von 1 m² eine thermischen Widerstand von 0,32 K/W laut Hersteller zu erwarten ist? Bezogen auf die Fläche des Peltier-Moduls von 16 cm² beträgt der thermische Widerstand des Fensters $0,32 \text{ K/W} \cdot 10\,000/16 = 200 \text{ K/W}$. Der Widerstand der Messsonde ist also klein gegenüber dem des Messobjekts (1:50), (die Temperaturdifferenz am Peltier-Modul, gegenüber der am Fenster, ebenfalls). Das Peltier-Modul ist hier zur Messung des thermischen Energiestroms geeignet.

Zur Messung der Temperaturdifferenz am Fenster ist das Modul in einem Fensterausschnitt weniger gut geeignet. Bei einem thermischen Widerstandsverhältnis von $R_{\text{Modul}} = 4 \text{ K/W}$ zu $R_{\text{Fenster}} = 200 \text{ K/W}$ ändert sich der Energiestrom erheblich, wenn statt Fensterglas das Peltier-Modul eingesetzt würde.

b) Die Messgrößen und ihre in der Schulphysik noch wenig vertrauten Gleichungen

b.) Grundlagen

Der thermische Energiestrom $I_{\text{th}} = \Delta Q/\Delta t$ (früher P, übertragene Wärmeleistung oder W rmestromst rke) mit Q als Formelbuchstabe für die thermische Energie (früher Wärme) ist zur Entropiestromstärke $I_s = \Delta S/\Delta t$ proportional mit der absoluten Temperatur T als Proportionalitätsfaktor

$$\text{Es gilt: } I_{\text{th}} = T \cdot I_s \quad \text{Gl. (2)} \quad (\text{oder vielleicht vertrauter als } \Delta Q = T \cdot \Delta S)$$

Misst man mittels eines Messwerterfassungssystems kontinuierlich die Temperaturänderungen pro Zeiteinheit in einem Aluminiumquader mit bekannter Masse m_{alu} , so ist der thermische Energiezu- oder Abstrom dieses Quaders gegeben als

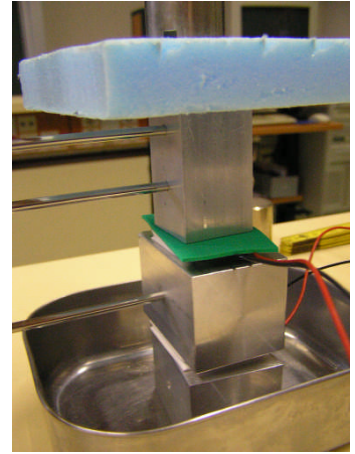
$$I_{\text{th}} = \Delta Q/\Delta t = c_{\text{alu}} m_{\text{alu}} \Delta \vartheta/\Delta t \quad \text{Gl. *}$$

mit c_{alu} : stoffspezifische thermische Kapazität (früher Wärmekapazität)

Im Folgenden wird erläutert, wie diese einfache Messung der Temperaturänderungsrate zur Bestimmung des thermischen Widerstands herangezogen werden kann, über den man dann wiederum zum Eichfaktor für das Peltier-Modul als Energiestrommesser kommt.

Abb.2 rechts

Zwischen den beiden unteren Aluminiumquadern 40x40x60mm liegt ein Peltier-Modul PM2 mit 40x40 mm. Es kann thermische Energie von unten nach oben, oder in der umgekehrten Richtung pumpen. Der obere dieser beiden großen Quadern mit einem Temperatursensor T1 dient also als Heizung oder Kühlung. Dann folgen nach oben: das Peltier-Modul PM1 (mit 30x30mm) zur Messung der Thermospannung, die Materialprobe (thermische Isolator), Aluklotz (30x30x50mm) zur Aufnahme (bzw. Abgabe) des thermischen Energiestroms mit zwei Temperatursensoren. Ganz oben liegt (gut thermisch isoliert) ein Wägestück (200g) auf, das für eine zusätzliche kleine, konstante Anpresskraft sorgt.



Aluminiumquader

$$I_{th} = \Delta Q / \Delta t = c m \Delta \vartheta / \Delta t$$

Peltier-Modul

$$U = \alpha \Delta T$$

Über die Messfläche A

$$I_{th} = \Delta Q / \Delta t = \lambda A (\Delta T / \Delta \ell)$$

$$\text{mit } R_{th} = \Delta \ell / (\lambda A)$$

$$I_{th} = \Delta T / R_{th}$$

$$I_{el} \equiv \Delta \varphi / R_{\Omega} \text{ analog in der E-Lehre}$$

$$\Delta T = T_1 - [T_2 + (T_2 - T_3)]$$

$$I_{th}^{Probe} = I_{th}^{PM} = I_{th}$$

ohne Probe

$$\text{mit } \Delta T = U / \alpha \quad I_{th}^{PM} = (1 / \alpha \cdot R_{th}^{PM}) \cdot U$$

$$I_{th}^{PM} = \text{Eichfaktor} \cdot U$$

$$\text{mit Probe} \quad \Delta T^{PM} \ll \Delta T^{Probe} = \Delta T$$

$$R_{th}^{Probe} = \Delta T / I_{th} - R_{th}^{PM}$$

$$R_{th}^{Probe} = (\alpha \cdot R_{th}^{PM}) \Delta T / U - R_{th}^{PM}$$

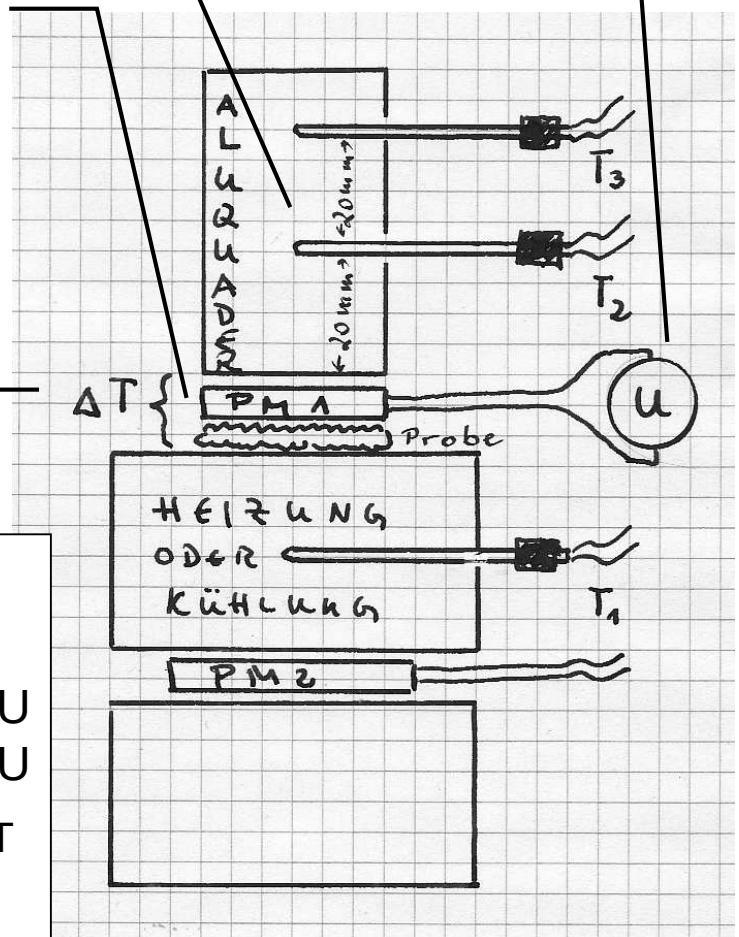


Abb. 3

Die in der Zeit Δt durch die Fläche A hindurchtretende thermische Energie ΔQ ist der Fläche A und der auf der Länge $\Delta \ell$ herrschenden Temperaturdifferenz ΔT proportional. Es gilt:

$$I_{th} = \Delta Q / \Delta t = \lambda A (\Delta T / \Delta \ell) \quad \text{Gl. (3)}$$

λ heißt **thermische Leitfähigkeit** (Wärmeleitfähigkeit) eines Stoffes. Sie ist bei nicht zu großen Temperaturunterschieden von der Temperatur unabhängig.

Gl. (3) schreibt man oft in Anlehnung an das Ohmsche Gesetz der Elektrizitätslehre als

$$I_{th} = \Delta T / R_{th} \quad \text{mit } R_{th} = \Delta \ell / (\lambda A)$$

$$R_{th} = \Delta T / I_{th} \quad \text{Gl. (4)} \quad (\text{Einheit K/W})$$

R_{th} heißt thermischer Widerstand. Bei der Bilanzierung muss die Flächenabhängigkeit berücksichtigt werden, was an den Einheiten nicht direkt zu erkennen ist (siehe dazu auch das vorausgehende Rechenbeispiel).

Der Entropiewiderstand wird analog definiert:

$$R_s = \Delta T / I_s \quad \text{Gl. (5), (Einheit K/Ct/s)}$$

setzt man nach Gl. (2) $I_s = I_{th}/T$ ein, erhält man

$$R_s = \Delta T / I_s = \Delta T / (I_{th}/T) = R_{th} T \quad \text{Gl. (6)} \quad (\text{Vertiefung siehe Lit. [5] S. 31 f.})$$

Bei hintereinander geschalteten thermischen Isolatoren dürfen die thermischen Widerstandswerte einfach addiert werden.

b₂) Messung des thermischen Energiestroms I_{th} bei Kenntnis des thermischen Widerstand R_{th}

Mit Kenntnis des thermischen Widerstands des Moduls ist die Energiestromstärkemessung auf eine Spannungsmessung zurückgeführt.

Nach Gl. (4) ist die Temperaturdifferenz am Modul bestimmt durch: $\Delta T = R_{th}^{PM} \cdot I_{th}$ und die zu messende Thermospannung nach Gl. (1): (angegebene Zahlenwerte wieder für das große Peltier-Modul von Opitex)

$$\text{Gl. (6)} \quad U = \alpha \Delta T = \alpha \cdot R_{th}^{PM} \cdot I_{th} = 49 \text{ mV/K} \cdot 4,0 \text{ K/W} \cdot I_{th} = 196,0 \text{ mV/W} \cdot I_{th}$$

$$I_{th} = (1 / \alpha R_{th}^{PM}) \cdot U = 5,10 \text{ W/V} \cdot U \quad \text{Gl. (7)}$$

Mit dem entsprechenden Eichfaktor (hier 5,10 W/V) kann also über eine einfache Spannungsmessung der thermische Energiestrom direkt angegeben werden.

b₃) Messung des Entropiestroms I_s (Wem das Folgende zu gewagt ist, begnüge sich mit dem Einsatz des Peltier-Moduls als Messsonde für thermische Energieströme (früher Wärmeströme)!

Der thermische Widerstand R_{th} und der Entropiewiderstand R_s ändern sich geringfügig mit der Temperatur. Stehen diesbezüglich Herstellerangaben für $R_s = f(T)$ zur Verfügung, geht Schwarze [6] zur Messung der Entropiestromstärke vom analogen Ansatz wie bei der Energiestromstärke aus und rechnet mit einem mittleren R_s -Wert im benutzten Temperaturbereich, nach Gl. (1) und (5) gilt:

$$U = \alpha \Delta T = \alpha R_s I_s \rightarrow I_s = U / \alpha R_s$$

Schwarze [6] gibt dazu an: "Im Temperaturbereich von 15 °C bis 35 °C bewirkt die Rechnung mit einem festen (mittleren) Entropiewiderstand R_s einen Fehler von ca. 2 %.

Fehlen die genauen Herstellerangaben zur Temperaturabhängigkeit von R_s , kann ausgehend von Gl. (2) und (7) in erster Näherung bei einer mittleren Temperatur von z.B. 293 K die Bestimmung der Entropiestromstärke auch so erfolgen:

$$I_s = I_{th}/T = U / \alpha R_{th} T = (1/\alpha R_{th} T) \cdot U$$

$$= 1/(49 \text{ mV/K} \cdot 4,0 \text{ K/W} \cdot 293 \text{ K}) \cdot U = 0,0174 \text{ W/(K V)} \cdot U = 0,0174 \text{ mCt/s} \cdot U/\text{mV}$$

(Zahlenwerte wieder bezüglich des 40x40 mm² Moduls von Opitex.)

Damit hat man auch den für die Entropiestromstärke des Moduls gesuchten Eichfaktor. Misst man beispielsweise 200 mV, so ist dies ein Hinweis auf einen Entropiestrom von $200 \cdot 0,0174 \text{ mCt/s} = 3,48 \text{ mCt/s}$

4. Experimentiervorschlag:

Material: Zwei Peltier-Module (siehe Fußnote 1), Messwerterfassungssystem z.B. LabPro[®] mit Verniersensor Instrumentenamplifier (Messbereich $\pm 1000 \text{ mV}$) und mit 2-3 Temperatursensoren, Wärmeleitpaste oder Wärmeleitfolie, thermische Isolationsmaterialien als Proben, Aluminiumquader mit Bohrungen für die Temperatursensoren; zur Größe der Quader: eine Seitenfläche des Quaders identisch mit der Kontaktfläche des Peltier-Moduls vgl. Legende Abb. 2 und Abb. 3

Ziele: Eichung des Peltier-Moduls (PM1) und thermische Widerstandsmessungen nach Dittmann und Schneider [1]

- Experimentelle Bestimmung des Seebeck-Koeffizienten α
- Messung des thermischen Widerstands R_{th}^{PM} des Peltier-Moduls
- Bestimmung des thermischen Widerstand bei Textilien oder Isoliermaterial

Hinweis: Es darf keine Feuchtigkeit in das Modul eindringen (die Opittec-Module sind mit Silikon versiegelt, die Module von Conrad leider nicht). Zu hohe Temperaturen ändern die Dotierung, deshalb max. Temperatur lt. Hersteller beachten (Betriebstemperatur $<70^{\circ}\text{C}$ oder $<150^{\circ}\text{C}$). Kommt Wärmeleitpaste zum Einsatz, soll diese hauchdünn auf das PM von innen nach außen aufgetragen werden, um ein Eindringen zwischen die einzelnen p-n-Bausteine zu verhindern. Wird die Paste als thermische Brücke zwischen den beiden Seiten des Moduls, ist es natürlich unbrauchbar.

Aufbau nach Abb. 2 und 3

Aufgaben:

a) Experimentelle Bestimmung des Seebeck-Koeffizienten α

[A4.1] Zu messen ist die Thermospannung U in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz ΔT , die den thermischen Energiestrom durch das Peltier-Modul antreibt. Überprüfen Sie Gl. (1) experimentell auf die erwartete Linearität und bestimmen Sie somit den Seebeck-Koeffizienten α . Vergleich mit dem theoretischen Wert ($0,4 \text{ mV/K} \times \text{Zahl der in Reihe verwendeten n-p-Paare}$) bzw. Vergleich mit den Herstellerangaben!)

Die gemessene Empfindlichkeit α ist wegen der - wenn auch dünnen - Keramikplatten (vgl. Abb.1) etwas kleiner als die theoretisch Erwartete. Gibt es weitere Gründe?

Auswertung mit LoggerPro: Daten $\rightarrow$ Neue berechnete Tabelle $\rightarrow$ Pull-Down-Meue Variablen $\rightarrow$ Formel eingeben. Erstellen Sie weitere Tabellen für ΔT , $\alpha = U/\Delta T$, ...

[A4.2] Lässt sich mit Wärmeleitpaste oder mit Wärmeleitfolien das Messergebnis verbessern? Führen Sie dazu Vergleichsmessungen durch.

[A4.3] Bestimmen Sie den thermischen Widerstand des verwendeten Moduls nach dem unten vorgeschlagenen Verfahren.

Freiwillige Zusatzaufgabe: Ist der thermische Widerstand abhängig von der Richtung des thermischen Stroms?

b) Hinweise zur Messung des thermischen Widerstands $R_{\text{th}}^{\text{PM}}$

Betrachten wir in Abb. 3 den oberen (senkrecht stehenden) Aluminiumquader mit den zwei Temperatursonden. Er dient uns als thermischer Zwischenspeicher für die zu messenden Energieströme. Ist der Quader kälter als die Heizung strömt thermische Energie *bevorzugt* über das Peltier-Modul PM1 aber auch aus der Umgebung ihm zu. Ist er wärmer, kehren sich die Stromrichtungen um, und er gibt außer über das Peltier-Modul auch einen kleinen Teil seiner Energie direkt an die Umgebung ab. Um diesen systematischen Fehler möglichst gering zu halten, starten wir alle Eichmessung zu $R_{\text{th}}^{\text{PM}}$ bei Raumtemperatur des Zwischenspeichers, weil dann zumindest unmittelbar nach Versuchsbeginn die Zu- und Abströme an die (bzw. von der) Umgebung wirklich zu vernachlässigen sind. Den besten Wert für die Eichmessung liefert also der möglichst nahe bei der Raumtemperatur gemessene thermische Energiestrom.

Für ein gegebenes Zeitintervall lässt sich aus der bekannten Wärmekapazität des Quaders (Aluminium $0,89 \text{ J/gK}$) und seiner Temperaturänderung in diesem Zeitintervall der mittlere (bevorzugt durch das Peltier-Modul) gehenden thermische Energiestrom I_{th} *allein* über Temperaturmessungen ermitteln. Dieser Wert von I_{th} (4. Spalte der nachfolgenden Tabelle) dient uns dann zur Bestimmung des thermischen Widerstand vom Peltier-Modul. Wendet man dieses Verfahren für mehrere aufeinanderfolgende Zeitintervalle an, so zeigt sich der Einfluss der Leckströme recht schnell. Ein Beispiel macht dies wieder deutlich.

Nach Gl. (*) u. (4) erhält man den thermischen Widerstand des Moduls $R_{\text{th}} = \Delta T / c_{\text{al}} m_{\text{al}} \Delta \vartheta / t$

Aluminiumquader mit m= 121,2 g							
1 Messzeit der Versuchsserie jeweils Beginn der Eichmessung	2 Mittlere Thermospan- nung im Zeitinter- vall $\pm 20 \text{ s} = 40 \text{ s}$	3 Temperatur- änderung je Sekunde im Zeitinter- vall $\pm 20 \text{ s} = 40 \text{ s}$	4 Energie- strom aus der Tem- pe- raturmessung siehe Fußnote	5 Mittlere Temperatur- differenz am PM im Zeitintervall	6 Seebeck- Koeffizient α	7 R_{th}^{PM} $= \Delta T / I_{th}$	8 Energie- strom mittels Eich- faktor des PM
t/s	U in mV	$\Delta \vartheta / t$ in K/s im Alu	I_{th} in W im Alu	ΔT in K	U/ ΔT in mV/K	R_{th}^{PM} in K/W gemessen	I_{th} in W
Th Energie strömt dem Alu zu – PM2 als Heizung							
650±20	317,3	0,020	2,16	15,4		7,14	
700±20	291,9	0,017	1,83	14,1		7,73	
750±20	270,3	0,015	1,62	13,1		8,11	
Th Energie strömt aus dem Alu ab - PM als Kühlung							
640±20	349,5	0,020	2,16	17,0		7,86	
690±20	328,1	0,018	1,89	16,0		8,44	

Spalte 4: $I_{th} = \Delta Q / \Delta t = c_{alu} m_{alu} \Delta \vartheta / \Delta t = 0,89 \text{ J/gK} \cdot 121,2 \text{ g} \cdot \text{Spalte 3}$
 Spalte 7: $I_{th} = U / \alpha R_{th}^{PM}$ mit $\alpha = 21 \text{ mV/K}$ (gemessen) $R_{th}^{PM} = 7,14 \text{ K/W}$ (Herstellerangabe)

Arbeitet man bei den Eichmessungen mit Kühlung statt mit Heizung, so tritt Kondenswasser auch im Bereich des Peltier-Moduls auf, was zu deutlich erkennbaren Sprüngen in der Thermospannung führt und die Auswertung erschwert. So erklären sich wohl die großen Messfehler beim zweiten hier dargestellten Versuchs.

Zur Differenz zwischen Spalte 4 und Spalte 8: Je stärker der Antrieb für die Leckströme wird, also je weiter sich die Temperatur des Aluquaders von der Umgebungstemperatur entfernt, um so mehr weichen Spalte 4 und 7 in der gleichen Zeile voneinander ab. Erwartungsgemäß liefert die Methode zur Bestimmung des thermischen Energiestroms nach Spalte 4 (also über die spezifische Wärmekapazität und Temperaturmessungen) etwas kleinere Werte als die Messung mit dem (nach Herstellerangaben geeichten) Pelter-Modul, was der erste und zweite Versuch der vorausgehenden Tabelle auch zeigen. Dies gilt gleichermaßen für das Heizen wie für das Kühlen des Aluminiumblocks.

Wohlgemerkt, dieser Vergleich bezog sich auf die Werte in der gleichen Zeile der Spalten 4 und 7. Vergleicht man die Werte in einer Spalte (4 oder 7), also im Zeitverlauf nacheinander, so erkennt man wie der Alublock als Quelle oder Senke für den thermischen Energiestrom sich leert bzw. füllt, der Ab- oder Zustrom wird rasch deutlich kleiner. Schülern muss man diese beiden Sachverhalte klar getrennt voneinander verdeutlichen.

Diese Leckstromproblematik wirkt sich bei den eigentlichen Messungen der Textilproben praktisch nicht mehr aus, was auch die thermischen Widerstandsmessungen belegen (nachfolgende Abb. 4 und 5) Die R_{th} -Werte zeigen bald einen festen Wert und erhöhen sich nicht ständig wie bei den Eichmessungen. Um Schülern diesen Unterschied klarzumachen, sollte man deutlich auf die verschiedene Bedeutung der beiden Temperaturdifferenzen hinweisen. Das wärmestrombedingte $\Delta \vartheta$ in Spalte 3 als Grundlage der Energiestrommessung im Alublock bei der Eichung (in das die Leckströme eingehen) und das wärmestromverursachende ΔT (aus Gl. (6) als Antrieb für den thermischen Energiestrom durch das Peltier-Modul.

Dennoch empfiehlt sich bei den eigentlichen Messungen, auch jeweils mit einem thermisch mit der Umgebung ausgeglichenen Alublock zu beginnen. Der Vergleich der Einzelmessungen ist so augenfälliger und die systematischen Fehler kleiner.

[A4.4] Klären Sie im Experiment, ob die Position der Probe in der Messanordnung (Probe vor oder hinter dem Peltier-Modul) Einfluss auf das Ergebnis hat. Benennen Sie ihre Erwartung und diskutieren Sie das Ergebnis.

- Wärmebad – Probe – Peltier-Modul – Aluklotz (Messreihe „PM-isoliert“)
- Wärmebad – Peltier-Modul – Probe – Aluklotz (Messreihe „PM-unisoliert“)

Messen Sie verschiedene thermische Isolatoren (Textilproben) und bestimmen Sie jeweils deren thermischen Widerstand nach 4.4.a) und 4.4.b). Begründen Sie die dazu verwendete Formel

$$R_{th}^{Probe} = [(\alpha R_{th}^{PM}) \cdot \Delta T/U] - R_{th}^{PM}$$

U:= Thermospannung
am Peltiermodul PM1

ΔT := Temperaturdifferenz zwischen Wärmebad und Aluminiumquader

α := Seebeckkoeffizient des PM1 (nach Herstellerangabe oder Eichmessung)

R_{th}^{PM} := Thermischer Widerstand des Peltiermoduls PM1 (nach Herstellerangabe oder Eichmessung)

Literatur:

- [1] Dittmann H., W.B. Schneider: Der Wärme auf der Spur – Ein Beitrag zur Wärmelehre in der SI, MNU 45/7 (1992), S. 397-403
- [2] Hermann, F.: Elektrische Energiequellen, Vortrag auf der Comburg (2001) siehe am Ende dieses Skripts.
- [3] Plappert, D.: CD-ROM: Energiewerke, Dieter Plappert, Littenweilerstr. 25a, 79177 Freiburg
- [4] Rincke, K.: Messung der Entropiestromstärke, PdN 2/49 (2000), S. 23-28
- [5] Rode, M.: Thermodynamik der Kreisprozesse PdN-Ph. 5/48 Jg 1999
- [6] Schwarze, H.: Peltier-Module; Funktionsweisen, Eigenschaften, Anwendungen, PdN-Ph. 2/49 S. 29-32

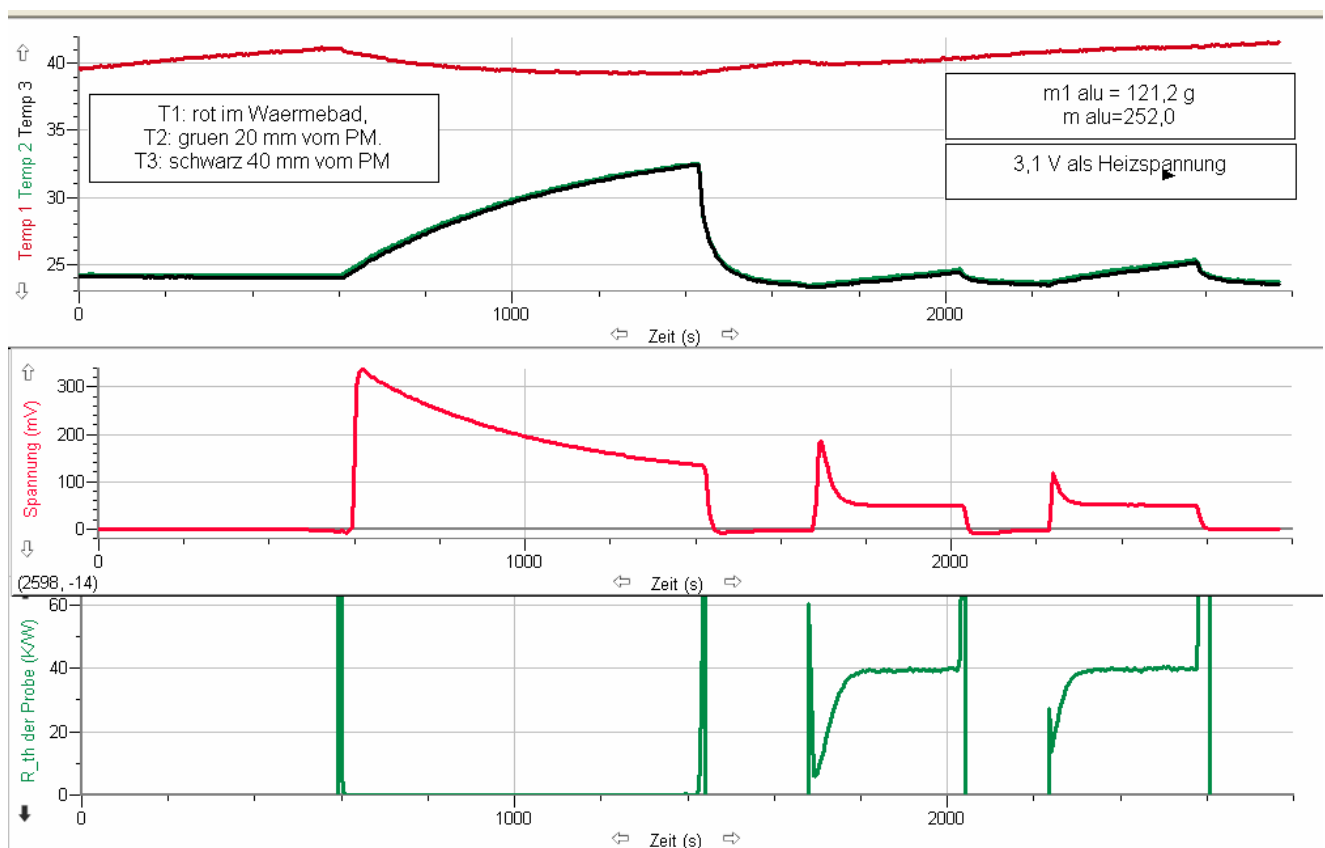


Abb. 4

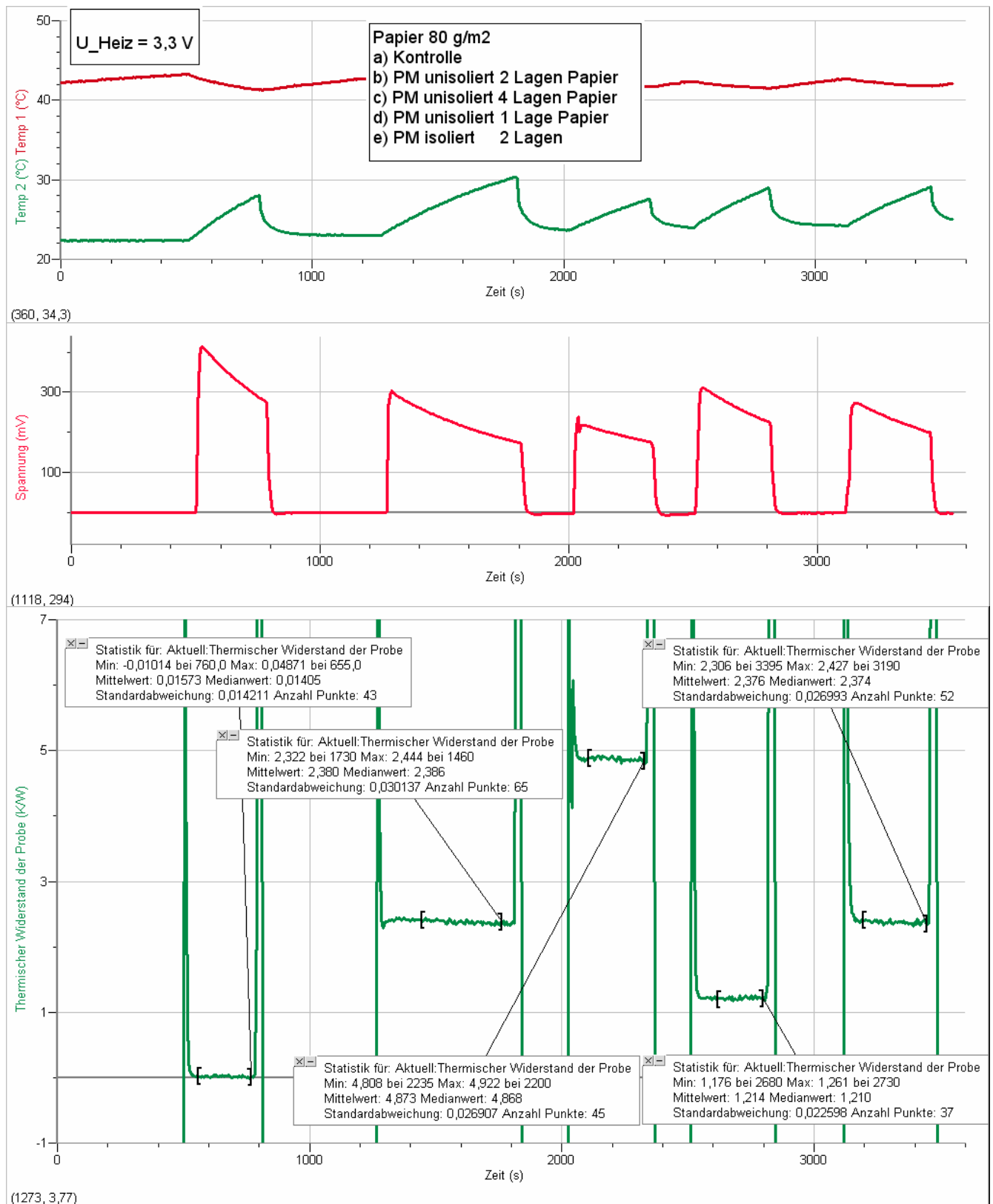
Messung des thermischen Widerstands R_{th} von Moosgummi (2mm)

Reihenfolge der Elemente

- a) PM1 Kontrollmessung | W | PM | Alu bei TU |
- b) „PM1 unisoliert“ | W | PM | Moosgummi | Alu bei TU |
- c) „PM1 isoliert“ | W | Moosgummi | PM | Alu bei TU |

W = warm, hier mit einem PM2 geheizt TU = Umgebungstemperatur

Abb. 5 Der thermische Widerstand R_{th} von Schreibmaschinenpapier 1 – 4 lagig



Zur Funktionsweise des Thermoelements

Die Funktionsweise eines Thermoelements kann erläutert werden, ohne auf „Teilchenvorstellungen“ zurückzugreifen. Die physikalische Grundlage unserer Beschreibung hier ist die onsagersche Transporttheorie, in der die **Kopplung** einzelner Ströme extensiver Größen betrachtet wird [2].

Im Folgenden ist ein Ausschnitt eines Vortrags von F. Herrmann dargestellt [3]:

„Ein elektrischer Leiter wird an einem Ende erhitzt und am anderen gekühlt, Abb. 6.13. Als Folge davon fließt ein Entropiestrom von heiß nach kalt. Dieser Entropiestrom ist nun, wenn auch schwach, an die Elektronen gekoppelt. Er versucht die Elektronen, samt ihrer elektrischen Ladung, Masse und Stoffmenge mitzunehmen. Man kann sich den Vorgang so vorstellen: Man möchte einen etwas rauen Fußboden kehren. Der Besen nimmt den Schmutz mit, aber nicht vollständig. „Besenstrom“ und „Schmutzstrom“ sind aneinander gekoppelt, aber die Kopplung ist lose. Damit man den ganzen Schmutz wegbekommt, muss man den Besen mehrere Male über den Boden bewegen. Die Entsprechung ist nun: Besen = Entropie und Schmutz = elektrische Ladung.

Was passiert nun im Fall unseres elektrischen Leiters? Die Entropie nimmt die elektrische Ladung zunächst etwas mit. Dadurch baut sich aber zwischen den Enden des Leiters eine elektrische Potenzialdifferenz auf, die einen Gegenantrieb für die Elektronen darstellt. Wenn thermischer und elektrischer Antrieb gleich geworden sind, was nach sehr kurzer Zeit passiert, so hören die Elektronen auf, sich zu bewegen.

Die Entropie dagegen fließt weiter, sie ist ja nicht fest an die Elektronen gekoppelt.

Wir versuchen, mit Hilfe dieser Erscheinung eine elektrische Energiequelle zu bauen. Man brauchte doch nur, so könnte man denken, an die beiden Enden des Leiters zwei Drähte anzuschließen, die zum Beispiel zu einer Lampe gehen, und diese Lampe müsste leuchten Abb. 6.13.a. Wirklich?

Wir nehmen zunächst das Lämpchen aus dem Stromkreis heraus Abb. 6.13.b. Dann haben wir ja, nach unserer Erwartung, einen kurzgeschlossenen Stromkreis, in dem ein elektrischer Strom fließen sollte. Das ist nun aber ganz und gar nicht der Fall. Es passiert etwas, das wir ganz am Anfang schon angesprochen hatten: Wenn man hier in Gedanken einmal im Kreis herum geht, so geht es für die Ladung genauso viel hoch wie runter, aber auch für die Entropie.

Es fehlt allerdings nur wenig, um das Gerät zum Funktionieren zu bringen. Wir brauchen nur die Verbindungen A und B aus verschiedenen Metallen zu machen, z. B. A aus Eisen und B aus Kupfer. Die Antriebe in A und in B sind jetzt nicht mehr gleich stark, denn die Kopplung der Entropie an die elektrische Ladung ist in den beiden Materialien unterschiedlich. In unserem Fall ist sie im Eisen fast zehnmal so stark wie im Kupfer. An den Elektronen im Eisenteil des Weges zieht die Entropie stärker als im Kupferteil. Der Antrieb im Eisendraht „gewinnt“ gegenüber dem im Kupferdraht. Die Elektronen setzen sich im Uhrzeigersinn in Bewegung Abb. 6.13.c.

Zusammenfassung:

Die Funktionsweise des Thermoelements beruht auf einem Unterschied der Kopplung der Entropie an die elektrische Ladung.

Ich erkläre die Sache noch einmal mit einem Vergleich. Über eine Rolle hängt ein geschlossenes Seil. Ich versuche, das Seil in Bewegung zu setzen, indem ich meine Hände von oben nach unten über das Seil wegleiten lasse. Dabei packe ich zunächst auf beiden Seiten gleich stark zu. Da ich gleichzeitig links und rechts ziehe, und zwar gleich stark, bewegt sich das Seil nicht. Ich mache nun die Kopplung zwischen Hand und Seil rechts und links unterschiedlich, indem ich links etwas stärker zupacke. Der Mitnahmeeffekt der linken Hand ist nun stärker, und das Seil beginnt, sich gegen den Uhrzeigersinn zu bewegen.

Die Entsprechung ist: Hände = Entropie und Seil = elektrische Ladung“

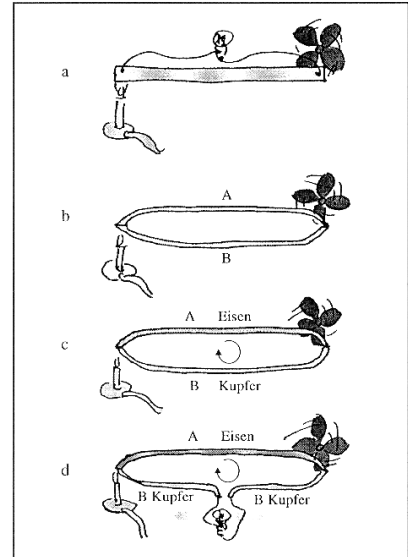
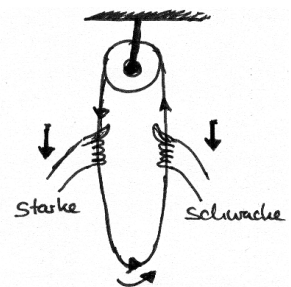


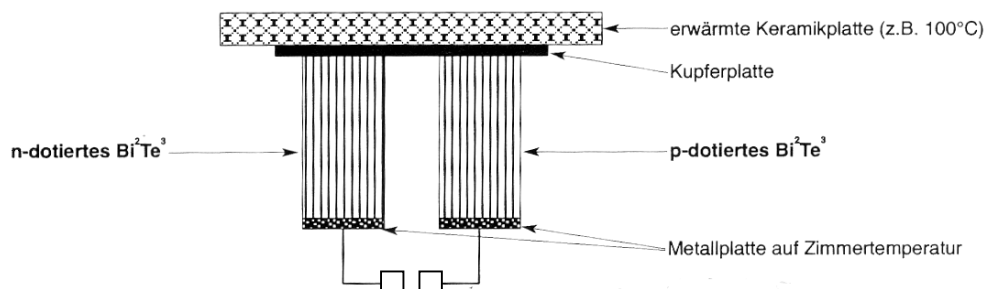
Abb. 6.13. (a) Der Stromkreis ist geschlossen. Leuchtet das Lämpchen? (b) Stromkreis ohne Lämpchen. Sowohl im unteren, als auch im oberen Arm des Stromkreises werden die Elektronen nach rechts getrieben. Es gibt keinen Antrieb, der die Elektronen im Kreis herum drückt. (c) Die Kopplung zwischen Entropie und elektrischer Ladung ist im Eisen stärker als im Kupfer. Die Elektronen werden im Uhrzeigersinn mitgenommen. (d) Das Lämpchen leuchtet.



Die Hände bewegen sich nach unten, links mit starker, rechts mit schwacher Kopplung. Das Seil bewegt sich dann gegen den Uhrzeigersinn.

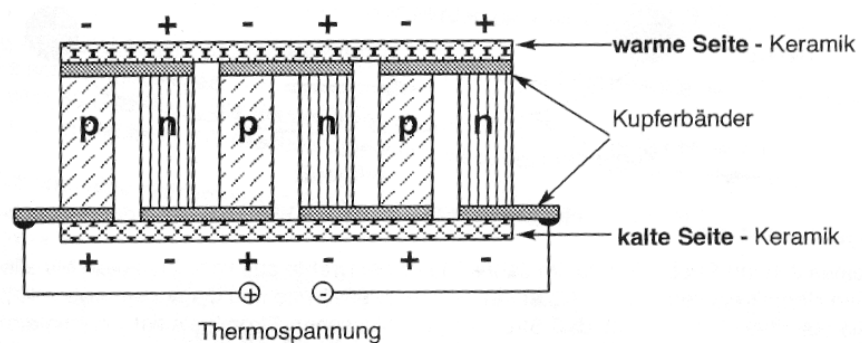
Zum Aufbau des verwendeten Peltierelements

Anstatt der zwei verschiedenen Metalle, die zusammengelötet werden, werden in der Praxis Halbleiter verwendet, z.B. p- und n-dotiertes Wismut Tellurit, das einen um Größenordnungen höheren Wirkungsgrad als normale Metalle hat.



Statt dass die zwei Halbleiter (wie beim klassischen Thermoelement) miteinander verlötet sind, wird die Thermospannung von zwei Leitern (dem n- und dem p-Leiter) abgenommen. Die beiden unteren Enden der Halbleiter befinden sich auf der tieferen Temperatur.

Bei den im Handel erhältlichen Thermoelementen sind die einzelnen Grundelemente je nach Bedarf parallel und in Serie geschaltet:



Literatur

- | | | |
|-----|-------------------|---|
| [1] | Falk, Ruppel: | Energie und Entropie, Springer Verlag |
| [2] | Honerkamp, Römer: | Klassische theoretische Physik, Springer Verlag |
| [3] | F. Herrmann: | Elektrische Energiequellen, Comburg 2001 |