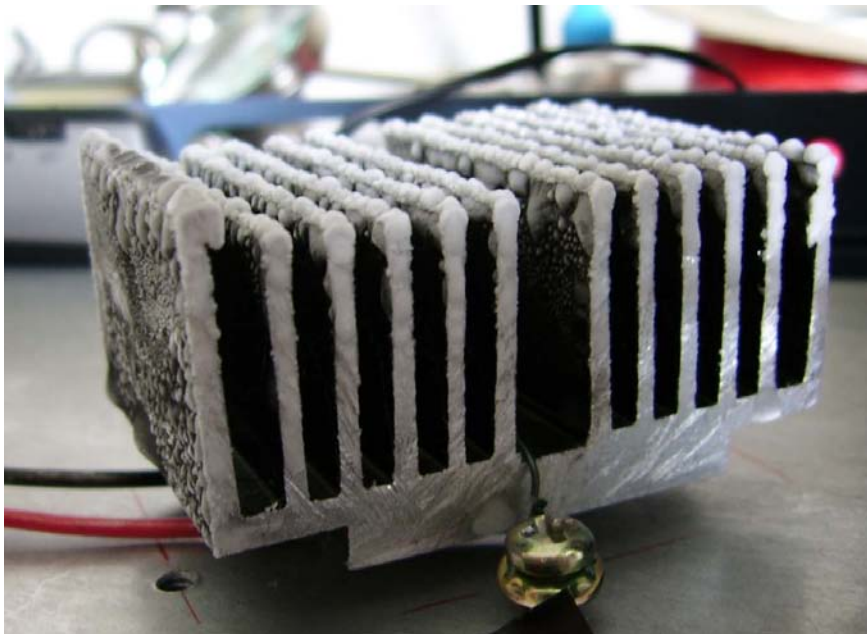


Physikalisches Grundpraktikum für Physiker/innen

Teil II

Peltier-Effekt



WWW-Adresse Grundpraktikum Physik: <http://grundpraktikum.physik.uni-saarland.de/>

Kontaktadressen der Praktikumsleiter:

PD Dr. Manfred Deicher
Zimmer: 1.11, Gebäude E 2.6
e-mail: manfred.deicher@tech-phys.uni-sb.de
Telefon: 0681/302-58198

PD Dr. Patrick Huber
Zimmer: 3.23, Gebäude E2.6
e-mail: p.huber@physik.uni-saarland.de
Telefon: 0681/302-3944

1. Stoffgebiet

- Temperaturmessung
- Hauptsätze der Thermodynamik
- Carnot-Maschine, Wärmepumpe
- Wärmeleitung
- Wärmekapazität
- Spannung, Strom, elektrisches Feld
- Joulesche Wärme
- Metalle
- Elektronengas
- Dotierte Halbleiter

2. Literatur

- D. Meschede
Gerthsen Physik
23., überarb. Aufl. 2006, Springer-Verlag
Kap. 6.6

3. Fragen

1. Was versteht man unter einer thermoelektrischen Spannungsreihe? Wozu werden Thermoelemente verwendet?
2. Die Verbindungsstellen eines Thermoelementes haben die Temperatur $T = 0\text{ °C}$ und $T' = 100\text{ °C}$. Die Thermospannung werde in μV gemessen. Für ein Kupfer-Blei-Element ergeben sich die Konstanten $a = 2,8\ \mu\text{V/K}$ und $b = 0,003\ \mu\text{V/K}^2$, für ein Konstantan-Blei-Element $a' = -38,1\ \mu\text{V/K}$ und $b' = 0,0225\ \mu\text{V/K}^2$. Berechnen Sie den Peltier-Koeffizient für ein Kupfer-Konstantan-Thermoelement. Bei welcher Temperaturdifferenz erlangt die Thermospannung dieser Kombination ihren maximalen Wert?
3. Wie ist ein Thermokreuz aufgebaut und welchen Einsatz findet es?
4. Durch welchen Versuch kann man den Peltier-Effekt nachweisen?
5. Erläutern Sie die Begriffe: Carnot-Prozess, Wirkungsgrad, Kälte- bzw. Wärmeleistung. Beschreiben Sie eine Methode zur Bestimmung der Kälteleistung.
6. Erklären Sie anhand Abb. 1 die Arbeitsweise einer Wärmepumpe. Mit einem Kühlaggregat, dessen maximale Leistungsaufnahme mit 100 W angegeben wird, soll ein Eisschrank bei Zimmertemperatur (20 °C) betrieben werden. Die Kälteleistung des Kühlaggregats beträgt 400 W . Wie groß ist die niedrigste Temperatur, die im Eisschrank erreicht werden kann?

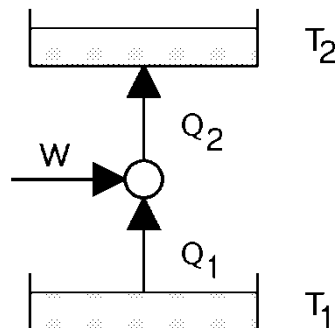


Abb. 1: Wirkungsweise einer Wärmepumpe.

7. Wie kann man den Thomson-Effekt experimentell belegen?
8. Was versteht man unter Leistungsanpassung? Leiten Sie Gleichung (8) her.
9. Welche Temperaturmessgeräte kennen Sie? Wie ändern sich der Widerstand und die Leitfähigkeit eines Metalls bzw. eines Halbleiters mit der Temperatur?

4. Grundlagen

4.1 Energieumwandlung

Gemäß dem Energieerhaltungssatz gilt „Energie geht nicht verloren, sie wird lediglich in eine andere Energieform überführt“. Man unterscheidet zwei Arten der Energietransformation: Bei der indirekten Energieumwandlung sind mehrere Transformationen erforderlich, damit die Ausgangsenergieform umgewandelt wird. Ein Beispiel hierfür ist der klassische Kraftwerksprozess: Hochtemperaturwärme \rightarrow Dampferzeugung \rightarrow Antrieb einer Turbine \rightarrow Antrieb eines Generators zur Stromerzeugung. Die wesentlich vorteilhaftere direkte Energieumwandlung verzichtet auf den Umweg über die mechanische Energieform. Beispielhaft für diese Gruppe sind thermoelektrische Effekte (Wärmeenergie \leftrightarrow elektrische Energie) und photovoltaische Effekte (Lichtenergie \leftrightarrow elektrische Energie).

4.1 Thermoelektrische Effekte

Seebeck-Effekt

1821 erbrachte Th. J. Seebeck den Nachweis, dass zwischen zwei verschiedenen, in Kontakt zueinander gebrachten Metallen sich in der Berührungsschicht eine Kontaktspannung aufbaut, und zwar wandern die Elektronen vom Metall mit der kleineren Austrittsarbeit zu dem mit der größeren Austrittsarbeit. Entsprechendes gilt auch für unterschiedlich dotierte Halbleiter, hierbei entsteht in der Kontaktschicht die sogenannte Diffusionsspannung. Stellt man nun ein Element mit der Kombination Material A / Material B / Material A (es handele sich um verschiedene Metalle bzw. Halbleiter, (Abb.2)) zusammen und hält beide Kontaktstellen auf gleicher Temperatur, so fließt kein Strom im geschlossenem Kreis, da die entsprechenden Kontaktspannungen bzw. Diffusionsspannungen gegeneinander geschaltet sind.

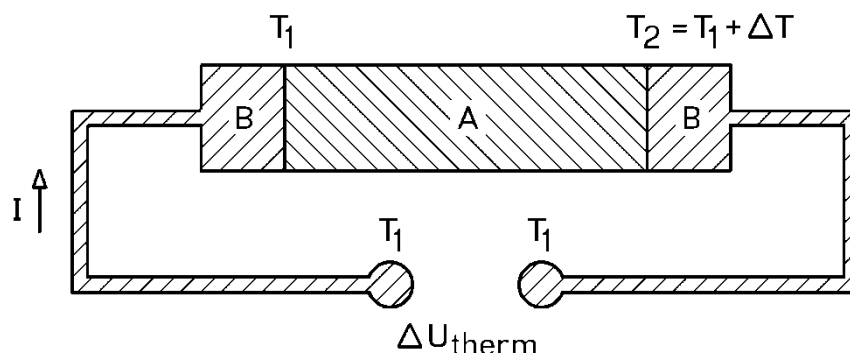


Abb. 2: Prinzipschaltbild eines Thermoelements.

Erwärmt man nun eine Kontaktstelle um die Temperatur ΔT , so fließt ein Strom und man misst die Thermospannung U_{therm} (Seebeck-Spannung). Im Falle $I = 0$ kann man die Leerlaufspannung bestimmen. Für hinreichend kleine Intervalle ist U_{therm} proportional ΔT :

$$U_{\text{therm}} = \eta_{AB} \Delta T \quad (1)$$

η_{AB} ist der Seebeck-Koeffizient oder die Thermokraft.

Zur Deutung dieses Effektes sei zunächst auf die Entstehung einer Thermospannung hingewiesen: Elektronen sind sowohl Träger elektrischer Energie, als auch kinetischer Energie. Betrachtet man nun einen n-dotierten Halbleiter, in dem überall die gleiche Temperatur herrscht, so existiert im Mittel im ganzen Halbleiter die gleiche Trägerdichte, obwohl sich die

Ladungsträger aufgrund ihrer thermischen Energie im Halbleiter bewegen, es baut sich also kein elektrisches Feld auf. Erhöht man nun schlagartig die Temperatur am Ende des Halbleiters um ΔT auf die Temperatur $T_2 = T_1 + \Delta T$, so wird die Bewegung der Ladungsträger vom wärmeren zum kälteren Ende im Mittel überwiegen (Abb. 3).

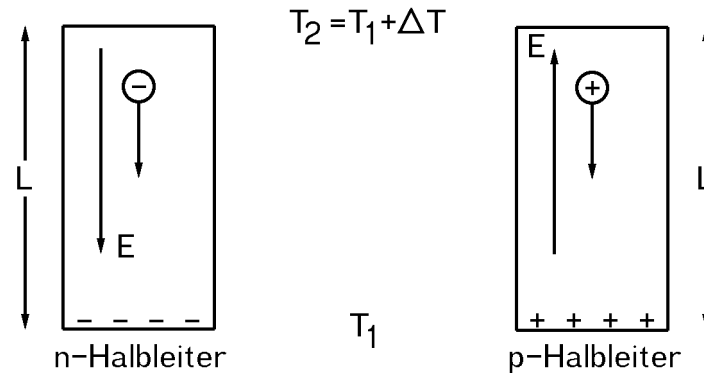


Abb. 3: Bevorzugte Ladungsträgerbewegung beim Vorhandensein eines Temperaturgradienten.

Die kältere Seite des n-Typ-Halbleiters wird sich also negativ aufladen, es baut sich ein elektrisches Feld auf, gerichtet vom wärmeren zum kälteren Gebiet. Diese Feldstärke hemmt die mittlere Ladungsträgerbewegung und steigt solange an, bis der Ladungsträgerstrom Null ist. Die Feldstärke E_x ist dann proportional der Temperaturdifferenz ΔT pro Längeneinheit L ; differentiell ausgedrückt bedeutet dies:

$$E_x = \eta \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

η heißt die differentielle Thermospannung (oder Thermokraft). Für einen n-dotierten Halbleiter ist $\eta < 0$, für einen p-dotierten Halbleiter gilt $\eta > 0$, das elektrische Feld ist dann umgekehrt gerichtet. Für unterschiedliche Materialien A und B gelten ähnliche Überlegungen. In diesem Fall benutzt man die Differenz der differentiellen Thermospannungen:

$$\eta_{AB} = \eta_A + \eta_B \quad (3)$$

In Abb. 4 ist der Aufbau eines Thermoelementes dargestellt. Die absoluten Temperaturen der Kontaktstellen seien T_1 und T_2 . Für kleine Temperaturintervalle kann man die Thermospannung in einer Reihe entwickeln

$$U_{therm} = a(T_1 - T_2) + b(T_1 - T_2)^2 + c(T_1 - T_2)^3 + \dots \quad (4)$$

wobei a , b und c charakteristische Materialkonstanten für die betreffende Materialkombination sind. Für nicht zu große Temperaturdifferenzen sind die Werte für c vernachlässigbar klein und man kann die Reihenentwicklung nach dem zweiten Term abbrechen und erhält

$$U_{therm} = a\Delta T + b(\Delta T)^2 \quad (5)$$

Für die Thermokraft η folgt dann wegen $dU_{therm}/dT = \eta$

$$\eta = a + 2b\Delta T \quad (6)$$

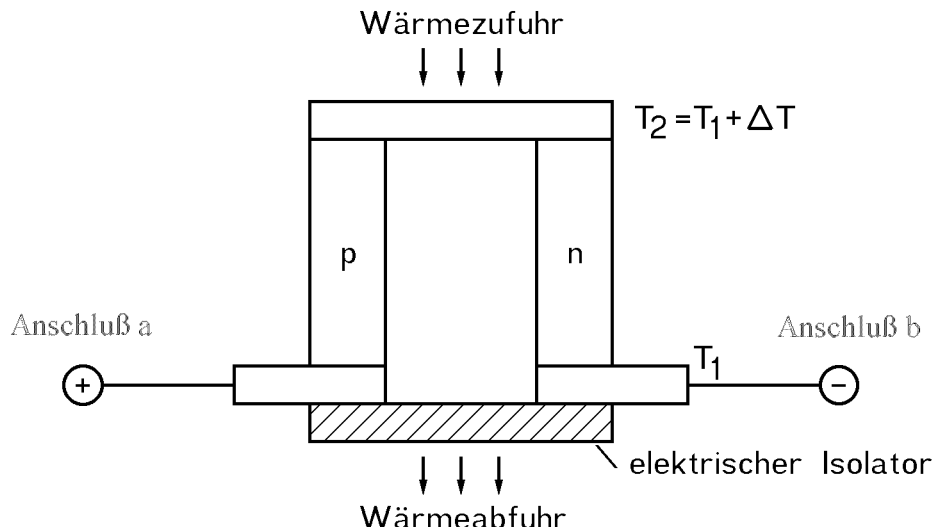


Abb. 4: Aufbau eines Thermoelementes bzw. eines Thermogenerators.

Im Thermoelement wird also elektrische Energie aus Wärme erzeugt; zur besseren Nutzung dieses Effektes verwendet man einen Thermogenerator, Abb. 4 zeigt im Prinzip den Aufbau eines solchen, nur muss man zwischen die Anschlüsse a und b einen Lastwiderstand R_L als Verbraucher schalten. Es entsteht unter Verwendung eines p- und eines n-Typ-Halbleiterschenkels bei thermischer Parallelschaltung eine elektrische Serienschaltung. Für die von einem Thermogenerator an eine Last abgegebene Leistung gilt

$$P = \left(\frac{U_{\text{therm}}}{R_i + R_L} \right)^2 R_L \quad (7)$$

wobei R_i der Innenwiderstand der beiden Halbleiterschenkel ist. Bei optimaler Anpassung des Lastwiderstandes an den Generator erhält man die maximale Leistung

$$P = \frac{U_{\text{therm}}^2}{4R_i} \quad (8)$$

Peltier-Effekt

Hierbei handelt es sich im Prinzip um die Umkehr des Seebeck-Effektes. Der Effekt ist gekennzeichnet durch das Auftreten eines Wärmeflusses als Folge eines elektrischen Stromes (J. Peltier, 1834).

Betrachtet man wiederum den Fall, dass die Enden eines Metallstabes B mit zwei Stäben aus einem anderen Metall A verbunden sind (Abb. 2), wobei diese Kombination nun von einer Stromquelle versorgt werde. An der einen Verbindungsstelle stellt man eine Temperaturniedrigung, an der anderen eine Temperaturerhöhung fest. Diese Erwärmung ist bei weitem höher als die Joulesche Wärme. Zur Erklärung dieser Erscheinung muss man die Wechselwirkung der Ladungsträger mit dem Kristallgitter (Stöße) berücksichtigen, d.h. von den Ladungsträgern wird Energie entweder an das Gitter abgegeben oder von ihm aufgenommen.

Gemäß Abb. 5 stellt man folgende Überlegungen bezüglich einer Metall-Halbleiter-Kombination an: Fließt ein Strom vom n-Typ-Halbleiter zum Metall, so wird dem Metall-Halbleiter-Übergang Wärme entzogen, d.h. diese Übergangsstelle wird gekühlt.

Die an der Kontaktstelle pro Zeiteinheit Δt aufgenommene Wärmemenge ΔQ ist dem Strom I proportional

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \Pi_{AB} I = P_P \quad (9)$$

wobei Π_{AB} der Peltier-Koeffizient, P_P die Leistung des Peltier-Elementes sind. Der Peltier-Koeffizient steht mit dem Seebeck-Koeffizienten in Beziehung,

$$\Pi_{AB} = T \eta_{AB} \quad (10)$$

wobei T die absolute Temperatur einer (einzigen) Kontaktstelle ist.

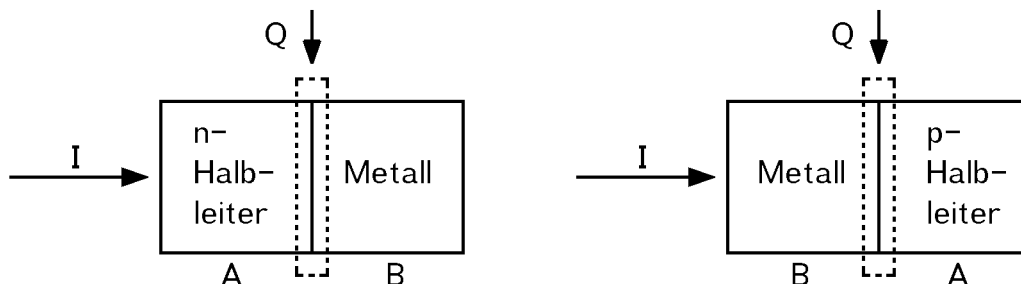


Abb. 5: Prinzip eines Metall-Halbleiter-Übergangs.

Bei Umkehr des Stromes ändert sich auch die Richtung des Wärmeflusses, da es sich um einen reversiblen Prozess handelt. Eine Erklärung liefert die Tatsache, dass sich die Entropie des Elektronengases bei einem Übertritt zwischen den beiden Stoffen A und B ändert. Gehen z.B. Elektronen vom Metall zum Halbleiter über, so entspricht dies einer Änderung des Ordnungszustandes im Sinne einer Expansion eines Gases. In diesem Fall hat der Peltier-Koeffizient umgekehrtes Vorzeichen.

Beziehung (9) gilt, sofern sich das gesamte System auf der gleichen Temperatur befindet. Infolge des Wärmeentzugs entsteht an der Verbindungsstelle eine niedrigere Temperatur, so kommt der Wärmefluss $K\Delta T$ als Folge der Wärmeleitfähigkeit des Materials hinzu. Außerdem entsteht in den Halbleiterschchenkeln Joulesche Wärme $I^2 R$, von der ungefähr die Hälfte dem gekühlten Ende zugeführt wird. Für die entzogene Wärmemenge gilt also

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \Pi_{AB} I - \frac{I^2 R}{2} - K \Delta T \quad (11)$$

Schließt man an die Anschlüsse a und b in Abb. 4 statt eines Lastwiderstandes R_L eine Stromquelle an, so erhält man den (schematischen) Aufbau einer Wärmepumpe. Ein gut geeignetes Halbleitermaterial für Thermogeneratoren bzw. Wärmepumpen ist Bi_2Te_3 , welches bei tiefen Temperaturen starke thermoelektrische Effekte zeigt. Mit Peltier-Kühlern lassen sich Temperaturdifferenzen von 60 K erzielen, die Kälteleistungen liegen zwischen 1 W bis 100 W. Die Betriebsspannung beträgt einige Volt, der Betriebsstrom 1 A bis 100 A. In der Praxis werden oft mehrere Peltier-Elemente thermisch parallel und elektrisch in Serie geschaltet.

Thomson-Effekt

W. Thomson stellte 1854 fest, dass in den homogenen Leitern eines Peltier-Elementes von der wärmeren zur kälteren Verbindungsstelle ein Temperaturgradient herrscht, d.h. es tritt nicht nur an den Verbindungsstellen eine elektromotorische Kraft (Thermokraft) auf, sondern es ist an allen Stellen des thermisch inhomogenen Leiters eine kontinuierlich verteilte

elektromotorische Kraft vorhanden; dies bewirkt bei Stromdurchgang einen an allen Stellen auftretenden Peltier-Effekt, der zu dem in den Verbindungsstellen vorhandenen hinzutritt. Fließt also ein elektrischer Strom im homogenen Leiter entlang eines Temperaturgradienten dT/dx , so wird je nach Material entweder Wärme aufgenommen oder abgegeben. Es gilt dann

$$P_T = \tau I \frac{dT}{dx} \quad (12)$$

wobei τ der Thomson-Koeffizient, P_T die Thomson-Wärme sind.

Die gesamte Leistungsbilanz eines Peltier-Elementes für den Fall $P_T > 0$ ergibt sich aus Abb. 6.

Die zugeführte elektrische Leistung setzt sich aus Peltier-Wärme, Joulescher Wärme und Thomson-Wärme zusammen:

$$P_{el} = U_p I_p = \eta I \Delta T + I^2 R + \tau I \frac{\Delta T}{d} \quad (13)$$

Es folgt also für die Wärmepumpleistung auf der Warmseite

$$+P_w = \eta I T_w \pm \tau I \frac{\Delta T}{2d} + \frac{1}{2} I^2 R + \lambda A \frac{\Delta T}{d} \quad (14)$$

bzw. der Kaltseite

$$-P_w = \eta I T_k \mp \tau I \frac{\Delta T}{2d} - \frac{1}{2} I^2 R - \lambda A \frac{\Delta T}{d} \quad (15)$$

mit $K\Delta T = \lambda \Delta T A / d$, wobei λ die Wärmeleitfähigkeit, A die Fläche und d die Dicke des Peltier-Elementes sind.

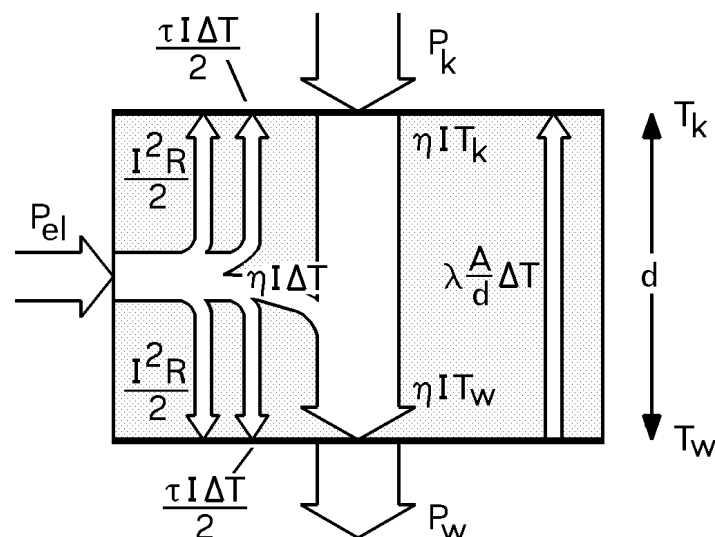


Abb. 6: Leistungsbilanz eines Peltierelements.

5. Versuchsdurchführung

Versuchsaufbau

Das zu charakterisierende Peltier-Modul (Typ QC-127-1.4-8.5MD, s. Anhang) hat die Fläche $A = (40 \times 40) \text{ mm}^2$, die Dicke $d = 3,4 \text{ mm}$ und die Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 1,445 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$. Es besteht aus 127 elektrisch in Serie geschalteten Einzelelementen. Zu Messzwecken ist das Peltier-Modul, elektrisch isoliert, zwischen zwei Kupferplatten, die gekühlt bzw. mit Hilfe eines Durchflusswärmetauschers und einem Thermostaten geheizt werden können, angebracht (Abb. 7). Die Temperaturmessung erfolgt mit zwei Pt 100-Widerstandsthermometern innerhalb der Bohrungen in den Kupferplatten. Im Anhang finden Sie die Widerstandstabelle für den Pt 100-Widerstand.

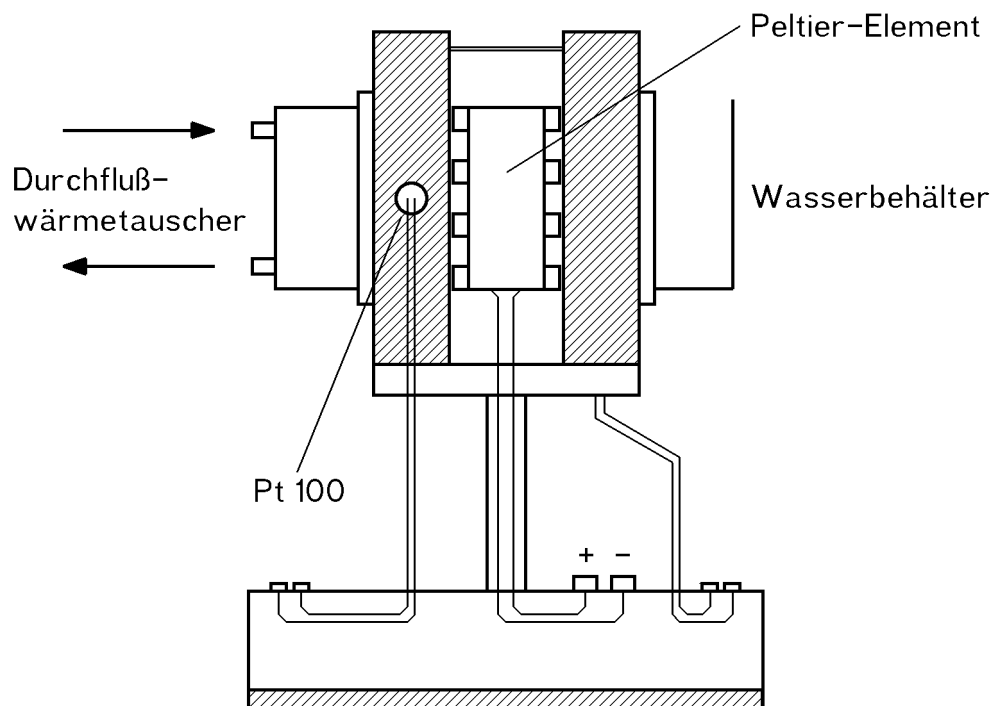


Abb. 7: Versuchsaufbau.

Aufgabe 1: Peltiereffekt

Erzeugen Sie mit Hilfe des Durchflusswärmetauschers auf einer Seite des Peltierelements eine annähernd konstante Temperatur (drehen Sie dazu das Kühlwasser auf, schalten Sie die Thermostatheizung aus und warten Sie, bis sich die Temperatur nicht mehr ändert). Wenn man den Wasserbehälter auf der anderen Seite des Peltierelements in diesem Versuchsteil nicht mit Wasser füllt, lässt sich während der Abkühlung sehr schön eine Eisbildung beobachten. Betreiben Sie dazu das Peltierelement mit einem konstantem Strom I_P von etwa 8 A und messen Sie die Temperaturen auf beiden Seiten des Peltierelements.

Tragen Sie die Temperaturdifferenz als Funktion der Zeit auf. Wie bestimmt man aus der Funktion $\Delta T(t)$ die Kälteleistung des Peltierelements?

Aufgabe 2: Bestimmung des Seebeck-Koeffizienten

Füllen Sie in den Behälter, der an der Kupferplatte befestigt ist, Eiswasser ein. Die Temperatur auf dieser Seite sollte während der gesamten Messung annähernd auf 0 °C gehalten werden. Regeln Sie die Temperatur auf der Seite, die mit dem Durchflusswärmetauscher versehen ist, mit dem Thermostaten auf verschiedene Temperaturen.

Bestimmen Sie nun die Leerlaufspannung U_{therm} in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz (messen Sie für mindestens 10 verschiedene Temperaturdifferenzen) und tragen Sie die Ergebnisse in ein Koordinatensystem ein (auf Millimeterpapier oder mit Origin). Ermitteln Sie daraus den Seebeck-Koeffizienten. Benutzen Sie die Vereinfachung der Gleichung (5).

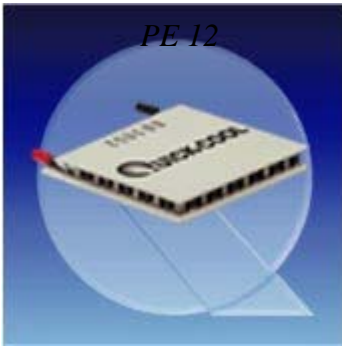
Aufgabe 3: Leistungsanpassung

Messen Sie bei einer konstanten Temperaturdifferenz von etwa 40 K die Spannung und den Strom für verschiedene Lastwiderstände R_L . Tragen Sie P in Abhängigkeit von R_L auf und ermitteln Sie daraus den Innenwiderstand R_i .

6. Anhang

Widerstandstabelle (in Ohm) für Pt-100 Sensoren gem. DIN EN 60751

T (°C)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-100	60,26	60,66	61,07	61,47	61,88	62,28	62,68	63,09	63,49	63,90
-90	64,30	64,70	65,11	65,51	65,91	66,31	66,72	67,12	67,52	67,92
-80	68,33	68,73	69,13	69,53	69,93	70,33	70,73	71,13	71,53	71,93
-70	72,33	72,73	73,13	73,53	73,93	74,33	74,73	75,13	75,53	75,93
-60	76,33	76,73	77,12	77,52	77,92	78,32	78,72	79,11	79,51	79,91
-50	80,31	80,70	81,10	81,50	81,89	82,29	82,69	83,08	83,48	83,87
-40	84,27	84,67	85,06	85,46	85,85	86,25	86,64	87,04	87,43	87,83
-30	88,22	88,62	89,01	89,40	89,80	90,19	90,59	90,98	91,37	91,77
-20	92,16	92,55	92,95	93,34	93,73	94,12	94,52	94,91	95,30	95,69
-10	96,09	96,48	96,87	97,26	97,65	98,04	98,44	98,83	99,22	99,61
0	100,00	100,39	100,78	101,17	101,56	101,95	102,34	102,73	103,12	103,51
10	103,90	104,29	104,68	105,07	105,46	105,85	106,24	106,63	107,02	107,40
20	107,79	108,18	108,57	108,96	109,35	109,73	110,12	110,51	110,90	111,29
30	111,67	112,06	112,45	112,83	113,22	113,61	114,00	114,38	114,77	115,15
40	115,54	115,93	116,31	116,70	117,08	117,47	117,86	118,24	118,63	119,01
50	119,40	119,78	120,17	120,55	120,94	121,32	121,71	122,09	122,47	122,86
60	123,24	123,63	124,01	124,39	124,78	125,16	125,54	125,93	126,31	126,69
70	127,08	127,46	127,84	128,22	128,61	128,99	129,37	129,75	130,13	130,52
80	130,90	131,28	131,66	132,04	132,42	132,80	133,18	133,57	133,95	134,33
90	134,71	135,09	135,47	135,85	136,23	136,61	136,99	137,37	137,75	138,13
100	138,51	138,88	139,26	139,64	140,02	140,40	140,78	141,16	141,54	141,91
110	142,29	142,67	143,05	143,43	143,80	144,18	144,56	144,94	145,31	145,69
120	146,07	146,44	146,82	147,20	147,57	147,95	148,33	148,70	149,08	149,46
130	149,83	150,21	150,58	150,96	151,33	151,71	152,08	152,46	152,83	153,21
140	153,58	153,96	154,33	154,71	155,08	155,46	155,83	156,20	156,58	156,95
150	157,33	157,70	158,07	158,45	158,82	159,19	159,56	159,94	160,31	160,68



Peltier - Elemente

Typenliste

Type	Abmessungen				I _{max} , A	U _{max} , V	Q _{max} , W	DT _{max} , K
	A	B	C	H				
QC-17-1.4-8.5M	15	15		3,4	8,5	2,1	9,5	71
QC-31-1.4-8.5M	20	20		3,4	8,5	3,8	17,3	71
QC-127-1.4-3.9M	30	30		3,6	3,9	15,5	34,5	71
QC-71-1.4-8.5M	30	30		3,4	8,5	8,6	40,0	71
QC-127-1.4-8.5M	40	40		3,4	8,5	15,5	72,0	71
QC-127-2.0-15.0M	50	50	54	3,6	15,0	15,5	110,0	71

Andere Größen und Ausführungen auf Anfrage!

Eigenschaften:

Peltier-Elemente für erhöhte Anforderungen

Thermische Zyklusfestigkeit für lange Lebensdauer
 Antidiffusionssperren für lange Lebensdauer
 Betriebstemperatur bis 150 °C
 Ebenheit und Parallelität kleiner als +/- 0,02mm
 Bleifrei und konform gemäß RoHS
 Qualität nach ISO 9001

**Abmessungen und
Maßhaltigkeit:
Einstufige
Peltier-Elemente**

