

Zum Dachsberg 1  
37130 Gleichen / Germany

Tel.: +49 (0) 5508 9238 92

Fax.: +49 (0) 5508 9238 93

Email.: [info@efindon.de](mailto:info@efindon.de)



## Anmerkungen zur Anwendung der Peltier - Elemente

von Wolfgang J. Kupsch, Peltron GmbH



Zum Dachsberg 1  
37130 Gleichen / Germany

Tel.: +49 (0) 5508 9238 92  
Fax.: +49 (0) 5508 9238 93  
Email.: [info@efindon.de](mailto:info@efindon.de)



## Inhalt

3	Verwendete Kurzzeichen
4	Einführung
5	Das Prinzip
6	Allgemeines zum Aufbau einer Anwendung
9	Ermittlung der Kälteleistung
10	Ermittlung der Wärmeleistung
11	Der Wirkungsgrad
11	Möglichkeiten zur Optimierung
13	Erklärungen zur Kälte- und Wärmeleistung
15	Der Temperaturkoeffizient des Ohmschen Widerstandes
15	Die Thermokraft $\alpha$ bei verschiedenen Temperaturen
16	Einsatz von Peltier-Elementen als Generator
18	Eigenschaften einiger Stoffe
19	Hilfreiche Zahlen und Formeln
20	Anhang

## Verwendete Kurzzeichen

$\alpha_{\text{Elem.}}$	Thermokraft eines Peltier - Elementes in Volt/Kelvin
$\lambda_{\text{Elem.}}$	Wärmeleitwert eines Peltier - Elementes in Watt/Kelvin
$\eta$	Wirkungsgrad in %.
$\vartheta$	Temperatur in °C.
$\Delta T$	T Temperaturdifferenz am Peltier - Element zwischen warmer und kalter Seite in Grad Kelvin.
I	Strom in Amp
K	Kelvin. Temperaturangabe vom absoluten Nullpunkt ausgehend.
$k_r$	Temperaturkoeffizient des Ohmschen Widerstandes.
N	Elektrische Leistung in Watt.
$T_k$	Temperatur eines Peltier - Elementes auf der Kaltseite. Wird in absoluter Temperatur (Kelvin) eingesetzt
$T_w$	Temperatur eines Peltier - Elementes auf der Warmseite. Wird in absoluter Temperatur (Kelvin) eingesetzt.
$Q_e$	Elektrische Leistung (Anschlusswert) in Watt
$Q_k$	Kälteleistung in Watt.
$Q_w$	Wärmeleistung in Watt.
$R_a$	Lastwiderstand in Ohm
$R_i$	Innenwiderstand eines Peltier - Elementes in Ohm.
$R_{20}$	Widerstand bei Normaltemperatur (20°C).
U	Spannung in Volt
Z	Güteziffer pro K.

## Einführung

Peltier - Elemente sind thermoelektrische Bauelemente, welche sowohl als Wärmepumpen als auch als Generatoren eingesetzt werden können.

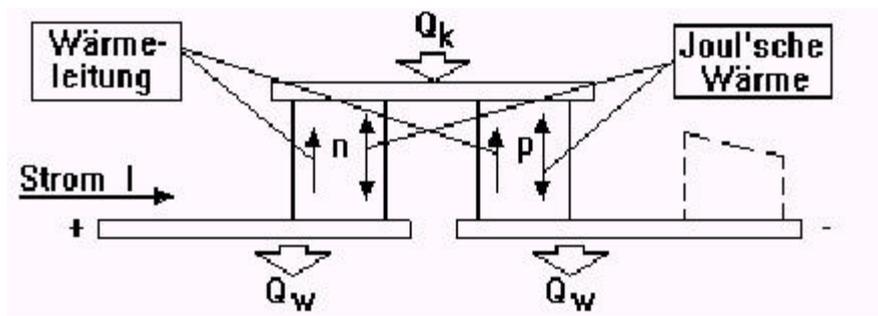
Seebeck beobachtete bereits 1822, dass ein geschlossener Kreis aus zwei unterschiedlichen metallischen Leitern ein magnetisches Feld erzeugt, wenn zwischen den beiden Kontaktstellen eine Temperaturdifferenz besteht. Das Magnetfeld war die Wirkung eines Stromflusses durch den Leiter. Zwischen den Kontaktstellen hatte sich eine temperaturbedingte elektrische Spannung aufgebaut. Dieses Prinzip wird heute noch zur Temperaturmessung mit Hilfe von Thermoelementen benutzt. Der Franzose Jean Charles Athanasa Peltier erforschte den Umkehrprozess. Der Stromfluss durch den Kreis bewirkte eine Temperaturdifferenz zwischen den Kontaktstellen. Dieser Effekt führte seinerzeit nur zu geringen Temperaturdifferenzen und konnte nicht wirtschaftlich genutzt werden.

Mit der Entwicklung in der Halbleitertechnik erlebte der Peltier - Effekt seinen Aufschwung. Es konnten Werkstoffe hergestellt werden, die einerseits hohe Thermospannungen und niedrigen elektrischen Widerstand, sowie andererseits schlechte Wärmeleitfähigkeit besitzen. Erfolgreich eingesetzt werden z. B. Legierungen aus Wismut, Tellur, Antimon, Selen und dotierenden Zusatzstoffen.

Die Peltiertechnik konkurriert mit den herkömmlichen Kompressor- und Absorber-Kühlsystemen. Wenn man nur die Kosten in DM/Watt Kälteleistung dieser Kühlsysteme vergleicht, so kommt man zu dem Ergebnis, dass Peltier - Elemente deutlich teurer sind. Aber die Vorzüge der Peltiertechnik dürfen dabei nicht übersehen werden. Bei Anwendungen, die nur geringe Kälteleistungen erfordern, benötigen Peltier - Elemente wesentlich weniger Platz. Sehr praktisch ist auch die Eigenschaft, dass Peltier - Elemente durch regeln des Betriebsstromes sehr genau auf die erforderlichen Temperaturen eingestellt werden können. Durch einfaches Umpolen der Stromrichtung lassen sich Peltier - Elemente auch zum Heizen verwenden.

## Das Prinzip

Der Grundaufbau besteht aus zwei Halbleiterschekeln, von denen der eine n-, der andere p-leitend ist. Durch eine Kupferbrücke sind die beiden Schenkel an ihren Stirnseiten verbunden. Fließt durch dieses Peltier - Element ein Gleichstrom, so kühlt sich die eine Seite des Elementes ab und kann der Umgebung Wärme entziehen. Die von der kalten Seite aufgenommene Wärmeenergie wird an der warmen Seite wieder an die Umgebung abgegeben. Das Peltier - Element „pumpt“ also Wärmeenergie von der kalten zur warmen Seite. Die Leistung wird erhöht durch hintereinander schalten beliebig vieler Schenkelpaare. Die Anzahl der Schenkelpaare wird nur durch den mechanischen Aufbau begrenzt. Umpolung des Betriebsstromes ändert die Richtung des Wärmeflusses.



## Die Leistungsbilanz eines Kühlblockes

In der obigen Skizze sind 3 verschiedene Wärmeströme zu erkennen:

1. Da ist zunächst der eigentliche Peltier - Effekt, der einen Wärmestrom erzeugt, welcher von der kalten Seite zur warmen Seite gerichtet ist. Hier mit „ $Q_k$ “ gekennzeichnet.
  2. Der Innenwiderstand eines Strom durchflossenen Leiters erzeugt Verlustleistung, welche einen Wärmestrom nach beiden Seiten des Elementes erzeugt, also von dem Peltier - Effekt zur Hälfte überwunden werden muss. Hier als „Joul'sche Wärme“ gekennzeichnet.
  3. Die Wärmeleitung der Peltier - Schenkel ergeben schließlich eine Wärmebrücke, also einen Wärmestrom von der Warmseite zur Kaltseite. Hier als „Wärmeleitung I“ gekennzeichnet.
- Diese 3 Wärmeströme werden später in den Formeln für Kälte- und Wärmeleistung wieder auftauchen. Für den Anwender von Peltier - Elementen ist es deshalb wichtig zu wissen, dass:

**Jedes Watt Kälteleistung zusammen mit der dafür aufgewendeten elektrischen Leistung auf der warmen Seite des Elementes wieder abgeführt werden muss!**

Man erkennt daran, dass die warme Seite eines Peltier - Elementes mit einer relativ hohen Verlustleistung belastet wird. Wenn also, durch nicht ausreichende Dimensionierung des warmseitigen Wärmetauschers, die Warmseite unverhältnismäßig hohe Temperaturen annimmt, dann wird auch die kalte Seite des Peltier - Elementes nicht die in sie gesetzten Erwartungen erfüllen.

## Allgemeines zum Aufbau einer Anwendung

### 1. Dickentoleranzen der Elemente

Peltier - Elemente in der Standard - Ausführung sind untereinander in der Dicke nicht absolut gleich. Abweichungen vom Standardmaß bis zu 0,05 mm können bedingt durch den Fertigungsprozess vorkommen. Wenn nun, um hohe Kälteleistungen zu erreichen, mehr als 1 Peltier - Element in einem Aufbau nebeneinander eingesetzt werden sollen, bestimmt das Element mit der größten Dicke den Abstand zwischen den warmseitigen und kaltseitigen Wärmetauschern. Die thermische Ankoppelung der dünneren Elemente wird dann wesentlich schlechter. Abhilfe schafft das läppen der Elemente auf gleiche Höhe. Eine andere Möglichkeit ist, die Wärmetauscher auf einer Seite zu unterteilen, so dass jedes Element einen eigenen Wärmetauscher erhält, der sich an die Oberfläche seines Elementes gut anlegen kann.

### 2. Einfluss von Luftfeuchtigkeit

In vielen Fällen wird die Kaltseite von Peltier - Elementen bei Temperaturen betrieben, die unter dem Taupunkt der umgebenden Luft liegen. Dies hat gleich zwei beachtliche Nachteile. Zunächst wird, wenn die umgebende Luft die Temperatur des Taupunktes erreicht, die Kaltseite Feuchtigkeit ansetzen. Durch die dabei frei werdende Kondensationswärme wird dem Peltier - Element Leistung entzogen (bei tieferen Temperaturen - am Eispunkt - geschieht das Gleiche noch einmal durch die Kristallisationswärme). Andererseits wird durch Feuchtigkeit an Gleichstrom führenden Teilen ein elektrolytischer Prozess in Gang gesetzt, der nach kurzer Zeit das Innere der Elemente zerstört. Es sollte also unbedingt darauf geachtet werden, dass Peltier - Elemente vor Feuchtigkeit geschützt werden. Dies geschieht vorzugsweise nach der Montage durch vollständiges, luftdichtes Einbetten der Elemente in PU - Schaum. Der hohe thermische Widerstand von PU - Schaum schützt zusätzlich auch noch vor unerwünschten Leistungsverlusten. Der verwendete Schaum soll geschlossene Poren haben. Offenporiger Schaum, wie er in der Bauindustrie verwendet wird, ist ungeeignet, da dieser ja „atmen“ soll, was in unserem Fall verhindert werden muss. Auch abdichten mit O-Ringen oder geschlossenenporigem Siliconkautschuk ist möglich.

### 3. Der Anpressdruck beim Einspannen

Der Anpressdruck beim Einspannen der Elemente ist ein etwas schwierigeres Thema. Fest steht, dass nach oben eine natürliche Grenze dadurch gegeben ist, dass ein Element durch zu hohen Anpressdruck einfach zerstört wird. Empfohlen wird, nicht über 50 N/cm<sup>2</sup> aufzuwenden. Die untere Grenze des Anpressdruckes ist eher variabel und hängt sehr stark von der Oberflächenbeschaffenheit der berührenden Flächen ab. Das kann so weit gehen, dass bei Verwendung von einwandfrei geläppten Oberflächen, wenn die Teile bereits trocken durch „ansprengen“ aneinander vom Luftdruck gehalten werden, nur noch mit leichtem Federdruck zusammengehalten werden müssen. Empfehlenswert ist diese Methode jedoch nicht, da sich die Teile durch Erschütterung eventuell doch voneinander lösen, und Staub oder Schmutzteilchen zwischen die so sorgfältig hergestellten Flächen gelangen können, die den thermischen Übergang dann empfindlich stören. Von Fall zu Fall wird hier wohl ein Kompromiss gefunden werden müssen.

#### 4. Der Einfluss der Ausdehnungskoeffizienten

Die Ausdehnungskoeffizienten der zum Einsatz kommenden Werkstoffe beim Aufbau von Kühl- oder Heizeinrichtungen dürfen nicht unterschätzt werden. Wenn zum Beispiel zwei Peltier - Elemente nebeneinander zwischen zwei Aluminiumplatten gespannt werden und ein Temperaturunterschied zwischen Warm- und Kaltseite erzeugt wird, werden durch die Längenänderung der Aluminiumplatten Scherkräfte auf die Peltier - Elemente übertragen, die abhängig vom Anpressdruck (der ja die Reibungsverhältnisse zwischen Element und Auflagefläche beeinflusst), bei häufigen Temperaturwechseln zur Zerstörung der Peltier - Elemente führen können. Deshalb sollte aus dieser Sicht ein möglichst niedriger Anpressdruck (siehe auch vorhergehenden Absatz) angestrebt werden.

Selbst der relativ niedrige Ausdehnungskoeffizient von Keramik ist am nicht eingespannten keramisch abgedeckten Peltier - Element mit empfindlichen Messmitteln als „Bimetalleffekt“ nachweisbar. Deshalb bietet die PELTRON GmbH keramisch abgedeckte Peltier - Elemente mit einer kaltseitigen Keramikabdeckung an, die in 16 Felder unterteilt sind, was den „Bimetalleffekt“ weitgehend verhindert. Das Anwendungsgebiet für solche Elemente liegt bei Einrichtungen, die große Temperaturänderungen und häufige schnell aufeinanderfolgende Zyklen erfordern (z.B. Temperaturhub >40 K, Zykluszeit im Minutenbereich, >10.000 Zyklen). Nicht ohne Grund sind auch Peltier - Elemente gefragt, welche gänzlich auf eine Abdeckung durch Keramik verzichten. Diese von der PELTRON GmbH hergestellten Elemente - sogenannte „vergossene Elemente“ - sind beidseitig zwischen den Kupferbrücken mit einer Kunststoffmasse vergossen, die die Ausdehnung nicht behindert, und lassen die elektrischen Verbindungen zwischen den einzelnen Schenkeln als kleine Kupferflächen an der Oberfläche der Elemente frei zugänglich. Die einzige Bedingung bei der Anwendung dieser Elemente ist, dass die Kupferflächen (die ja den Betriebsstrom leiten), durch Verwendung eines etwa 0,02 mm dicken Glimmerblättchens, oder einer anderen möglichst gut wärmeleitenden Isolierfolie, von der Auflage elektrisch zu isolieren sind. Der Wärmewiderstand des Glimmerblättchens ist unerheblich, da ja die sonst verwendete Keramik auch einen Wärmewiderstand hat, und in der gleichen Größenordnung liegt.

## 5. Die Warmseitentemperatur unter Kontrolle halten

Peltier - Elemente sind, bedingt durch den Herstellungsprozess, nur bis zu bestimmten maximalen Temperaturen einsetzbar. Die Grenztemperaturen finden Sie in den entsprechenden Datenblättern. Manche Anwendungen, besonders wenn sie bei höheren Umgebungstemperaturen betrieben werden, liegen mit der Temperatur des warmseitigen Wärmetauschers gefährlich nahe an der Grenztemperatur. Wenn nun z. B. der Lüfter ausfällt, oder die Luftzufuhr blockiert wird, kann die Warmseite des Peltier - Elementes sich bis zur Zerstörung aufheizen. Deshalb sollte in solchen Anwendungen eine Temperatursicherung eingebaut werden, die den Betriebsstrom der Elemente bei Überhitzungsgefahr abschaltet oder ein Alarmsignal ausgibt.

## 6. Fixieren oder abdichten von Elementen mit Siliconkautschuk

Siliconkautschuk - Kleber können zur Fixierung, oder auch Abdichtung der Elemente gegen Feuchtigkeit verwendet werden. Es muss jedoch unbedingt darauf geachtet werden, dass kein Kautschuk verwendet wird, der beim Vernetzen einen Elektrolyten (Essigsäure !) ausscheidet, was zur Zerstörung der Elemente führen würde.

## 7. Wärmeleitmittel

Weit verbreitet sind Wärmeleitpasten, die als Kontaktmittel für Leistungs- - Halbleiter entwickelt worden sind. Diese Wärmeleitpasten, besonders wenn sie unter Verwendung von Siliconöl hergestellt sind, sind in zweierlei Hinsicht nur mit großer Sorgfalt zu verwenden. Überschüssige Wärmeleitmittel müssen durch „Aufreiben“ der Elemente auf ihre Unterlage weitgehend wieder herausgequetscht werden, was bei großflächigen Elementen nicht ganz einfach ist. Auf den Einspanndruck, der ja nicht zu hoch sein darf, sollte man sich nicht verlassen. Außerdem „kriecht“ Siliconöl leicht weg, und führt zur Austrocknung der Kontaktstelle. Empfehlenswerter ist hier das von PELTRON GmbH vertriebene 'Sil-Gel'. Hier handelt es sich um ein 2-Komponenten Wärmeleitmittel, welches verhältnismäßig flüssig ist, und kurz vor der Verarbeitung mit einem Härter angerührt werden muss. Das „Aufreiben“ ist damit wesentlich einfacher, und der Härter lässt das Wärmeleitmittel nach ca. 2 Std. geleeartig aushärten, was die Austrocknung weitgehend verhindert.

## Ermittlung der Kälteleistung

Aus den Angaben in den Datenblättern erkennt man, dass die maximale Kälteleistung nur zu erreichen ist, wenn man  $\Delta T = 0$  werden lässt. Umgekehrt ist  $\Delta T_{\max}$  nur dann zu erreichen, wenn die Kälteleistung = 0 ist. Beide Fälle sind üblicherweise nicht das Ziel des Anwenders beim Einsatz von Peltier - Elementen. Es muss also ein Kompromiss zwischen noch erreichbarem  $\Delta T$  bei der mindestens benötigten Kälteleistung gefunden werden. Zur Errechnung der Kälteleistung muss man zunächst abschätzen (besser errechnen), welche Temperatur die Oberfläche des Peltier - Elementes annehmen soll. Diese wird in der Regel um einige Grad unter der Temperatur liegen, die das zu kühlende Objekt annehmen soll. Die thermische Ankoppelung des Objektes an die Element - Oberfläche kann nicht ohne Wärmewiderstand erfolgen und wird durchschnittlich 2 - 4 K  $\Delta T$  - Verlust kosten. Der nächste Schritt ist die Ermittlung der Warmseitentemperatur. Nachdem bekannt ist, dass das kleinstmögliche  $\Delta T$  eine größtmögliche Kälteleistung ergibt, muss also die Warmseite des Peltier - Elementes so nahe wie möglich an der Umgebungstemperatur (bei Flüssigkeits-Wärmetauscher an der Flüssigkeitstemperatur) liegen. Die üblicherweise verwendeten Luftwärmetauscher, zweckmäßig dimensioniert, nehmen bei Zwangsbelüftung Temperaturen an, die zwischen 6 und 10 K über Umgebungstemperatur liegen. Schließlich tritt nun auch hier auf der Warmseite, an der Stoßstelle zwischen Peltier - Element und Wärmetauscher, ein Wärmewiderstand auf, der durch den erhöhten Wärmestrom noch einmal einen  $\Delta T$  - Verlust von 4 - 6 K kostet.

Nach all diesen Betrachtungen muss man also bei einer angenommenen Objekt - Temperatur auf der Kaltseite von 0°C und einer Umgebungstemperatur von 22°C davon ausgehen, dass das einzusetzende Peltier - Element kaltseitig eine Temperatur von -3°C annimmt. Die Warmseite des Elementes wird um 5 K (Verlust an der Stoßstelle) über der Temperatur des warmseitigen Wärmetauschers (8 K über Umgebung) also insgesamt 13 K über der Temperatur der Umgebung liegen. Die Umgebungstemperatur war angenommen mit 22°C. Dies ergibt ein  $\Delta T$  von 38 Kelvin.

Mit der Kälteleistungsformel

$$Q_k = T_k \cdot \alpha_{\text{Elem.}} \cdot I - \frac{I^2 \cdot R_i}{2} - \lambda_{\text{Elem.}} \cdot \Delta T \quad [W]$$

wird nun die erreichbare Kälteleistung ermittelt. Zu beachten ist, dass die Temperatur der Kaltseite in absoluter Temperatur (also °C + 273) eingesetzt werden muss. Die Werte für die Thermokraft  $\alpha$ , den Betriebsstrom  $I$ , den Innenwiderstand  $R_i$  und die Wärmeleitung  $\lambda$  werden dem Datenblatt des zum Einsatz vorgesehenen Peltier - Elementes entnommen. Das  $\Delta T$  wird entsprechend den vorangegangenen Betrachtungen eingesetzt.

Zum Dachsberg 1  
37130 Gleichen / Germany

Tel.: +49 (0) 5508 9238 92

Fax.: +49 (0) 5508 9238 93

Email.: [info@efindon.de](mailto:info@efindon.de)



## Ermittlung der Wärmeleistung

Zur Dimensionierung des warmseitigen Wärmetauschers ist es wichtig zu wissen, welche Wärmemenge auf der warmen Seite des Peltier - Elementes ankommt.

Dies errechnet man nach folgender Formel:

$$Q_w = T_w \cdot \alpha_{\text{Elem.}} \cdot I + \frac{I^2 \cdot R_i}{2} - \lambda_{\text{Elem.}} \cdot \Delta T \quad [\text{W}]$$

Zu beachten ist auch hier wieder, dass die Warmseitentemperatur in absoluter Temperatur eingesetzt werden muss. Die elementspezifischen Werte werden aus dem entsprechenden Datenblatt entnommen, und  $\Delta T$  wird in gleicher Größe wie in der Kälteleistungsformel eingesetzt.

Vom Hersteller des Wärmetauschers kann man den Wärmewiderstand des Wärmetauschers erfahren. Dieser Wert wird in Kelvin/Watt angegeben. Multipliziert man nun diesen Wert mit dem Ergebnis der Wärmeleistungsberechnung, dann erhält man diejenige Anzahl Grad Kelvin, um welche sich die Temperatur des Wärmetauschers gegenüber der Umgebungstemperatur erhöht. Falls das Ergebnis im Bereich der oben erwähnten 6 - 10 K liegt, kann man davon ausgehen, dass ohne übertriebenen Aufwand realisierbare Werte erreicht wurden.

In vielen Fällen wird man überrascht sein, wie groß ein gut dimensionierter Wärmetauscher sein muss. Falls solange von einem Wärmetauscher für freie Konvektion ausgegangen wurde, könnte ein Ventilator zur Zwangsbelüftung Abhilfe schaffen. Ventilatoren, welche einen Luftstrom entlang der Oberfläche des Wärmetauschers mit einer Geschwindigkeit von etwa 3 bis 5 m/s gewährleisten, reduzieren den Wärmewiderstand des Wärmetauschers auf etwa 30 bis 40% des Wertes für freie Konvektion.

## Die Leistungsaufnahme (Anschlusswert)

Peltier - Elemente sind auch als Generatoren einsetzbar. Unter dem Einfluss einer Temperaturdifferenz zwischen Warm- und Kaltseite liefert das Element eine Spannung, die sich aus dem  $\Delta T$  des Elementes und der Thermokraft  $\alpha$  (s. Datenblatt) ergibt. Diese Spannung ist der

$$Q_e = \alpha_{\text{Elem.}} \cdot \Delta T \cdot I + I^2 \cdot R_i \quad [W]$$

Betriebsspannung entgegen gerichtet. Daraus folgt folgende Formel für die Leistungsaufnahme:

## Der Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad von Peltier - Elementen wird auf einfache Weise aus folgender Formel errechnet:

$$\eta = \frac{Q_k}{Q_e} \cdot 100 \quad [\%]$$

Der bestmögliche Wirkungsgrad - für eine vorgegebene Kälteleistung bei vorgegebenem  $\Delta T$  - wird erreicht beim optimalen Strom nach folgender Formel:

$$I_{\text{opt}} = \frac{a_{\text{Elem.}} \cdot \Delta T}{R_i \cdot (\sqrt{1 + Z T_m} - 1)} \quad [A]$$

Die Werte für die Gütezahl  $Z$ , und die mittlere Temperatur  $T_m$  werden entsprechend den nachfolgenden Formeln eingesetzt.

$$Z = \frac{\alpha_{\text{Elem.}}^2}{R_i \cdot \lambda_{\text{Elem.}}} \quad \bar{T} = \frac{T_w + T_k}{2} \quad [K]$$

Der optimale Betriebsstrom liegt bei vielen Anwendungen in der Gegend um 70% des Nennstromes. Dies bedeutet aber auch reduzierte Kälteleistung. Es wird also eine Neuberechnung der Kälteleistung, der Wärmeleistung und der Leistungsaufnahme erforderlich.

## Möglichkeiten zur Optimierung

### 1. Die Ankoppelung des Elementes auf Warm- und Kaltseite

Die Temperatur der Warmseite des Elementes (nicht diejenige des Wärmetauschers) liegt oft höher als notwendig. Wärmeleitmittel sind ein bekanntes und beliebtes Mittel, um Wärmeübergänge zu verbessern. Das ist richtig; jedoch nichts kann den direkten Kontakt zwischen Element und Wärmetauscher ersetzen. Deshalb sollen Wärmeleitmittel nur dünn aufgetragen werden, damit die Übergangflächen sich noch berühren können und nur durch Unebenheiten entstandene Hohlräume mit Wärmeleitmittel ausgefüllt werden. Bei der Montage muß auf unbedingte Sauberkeit der Berührungsflächen geachtet werden. Die Oberflächen spielen ebenfalls eine wichtige Rolle. Die Ebenheit der sich berührenden Flächen sollte für Standardanwendungen innerhalb von 0,01 mm liegen. Geläppte Oberflächen an den Berührungsstellen sind ideal.

### 2. Das Einspannen der Elemente (Vermeidung von Wärmebrücken)

Es versteht sich von selbst, dass z. B. Schrauben zwischen Warm- und Kaltseite eine unerwünschte Wärmebrücke darstellen. Deshalb sind Stahlschrauben besser als Messingschrauben, und sowohl unter den Schraubenkopf als auch unter die Mutter gelegte Isolierscheiben aus Fiber oder Kunststoff vergrößern ebenfalls den Wärmewiderstand. Bei Einsatz von Kunststoffscheiben muss darauf geachtet werden, dass der Kunststoff unter dem Einfluss des Einspanndruckes nicht „wegfließt“, und dadurch der Einspanndruck nachlässt. Gewellte Federscheiben, unter den Schraubenkopf gelegt, erhöhen die Sicherheit. Es ist selbstverständlich, dass Schrauben die zu beiden Seiten des Elementes angeordnet sind, auch gleichmäßig angezogen werden müssen.

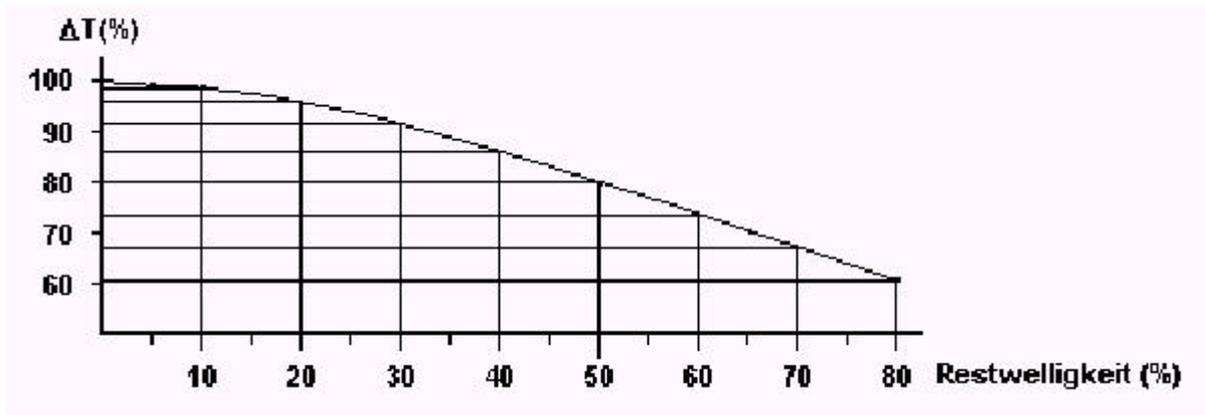
Auch die Anschlusskabel sind Wärmeleiter. Peltier - Elemente sind so aufgebaut, dass die Anschlusskabel auf der Warmseite angelötet werden. Obwohl man die Elemente nach Stromrichtungsumkehr auch umgekehrt verwenden kann, ist dies nicht zu empfehlen. Die Anschlusskabel würden auf der Kaltseite erscheinen, und über die Kabel würde - sowohl durch die vom Betriebsstrom erzeugte Eigenerwärmung der Kabel als auch durch die von außen zugeführte Wärme - die Kaltseite beeinflusst werden.

### 3. Einstellen des Betriebsstromes

Es ist durchaus möglich, dass durch Änderung des Betriebsstromes die Leistung des fertigen Aufbaues unter Betriebsbedingungen verbessert werden kann. Dies ist dadurch begründet, dass der Betriebsstrom mit  $I^2$  in die Joule'sche Leistung eingeht, aber nur einfach die Kälteleistung beeinflusst. Eine einfache Methode ist es, die Temperatur des zu kühlenden Objektes zu messen und den Betriebsstrom durch Änderung der Betriebsspannung solange zu variieren, bis das Optimum erreicht ist.

## Der Einfluss der Restwelligkeit auf das $\Delta T$

Die Welligkeit der Betriebsspannung ist nicht ohne Einfluss auf die Leistung von Peltier - Elementen. Aus nachstehendem Diagramm lässt sich der Einfluss der Restwelligkeit auf das  $\Delta T$



ablesen.

## Erklärungen zur Kälte- und Wärmeleistung

Von der Formel zur Berechnung der Kälteleistung ausgehend, kann man erkennen, dass die Kälteleistung aus drei verschiedenen Teilleistungen besteht.

$$Q_k = T_k \cdot \alpha_{\text{Elem.}} \cdot I - \frac{I^2 \cdot R_i}{2} - \lambda_{\text{Elem.}} \cdot \Delta T \quad [\text{W}]$$

Da ist zunächst der eigentliche Peltier-Effekt, dessen Leistung durch

$$T_k \cdot \alpha_{\text{Elem.}} \cdot I$$

beschrieben wird.  $T_k$  ist die Kaltseitentemperatur (in absoluter Temperatur),  $\alpha$  ist die Thermokraft des Peltier - Elementes,  $I$  ist der Betriebsstrom. Davon wird die Hälfte der Joule'schen Wärme, die zur kalten Seite fließt, abgezogen. Die halbe Joule'sche Wärme ergibt sich aus:

$$\frac{I^2 \cdot R_i}{2}$$

Der Betriebsstrom  $I$  geht hier im Quadrat ein.  $R_i$  steht für den Innenwiderstand in Ohm. Das Produkt muss durch 2 dividiert werden, da nur die Hälfte zur kalten Seite fließt.

Die Wärmerückleitung über das Element ist das Produkt aus

$$\lambda_{\text{Elem.}} \cdot \Delta T$$

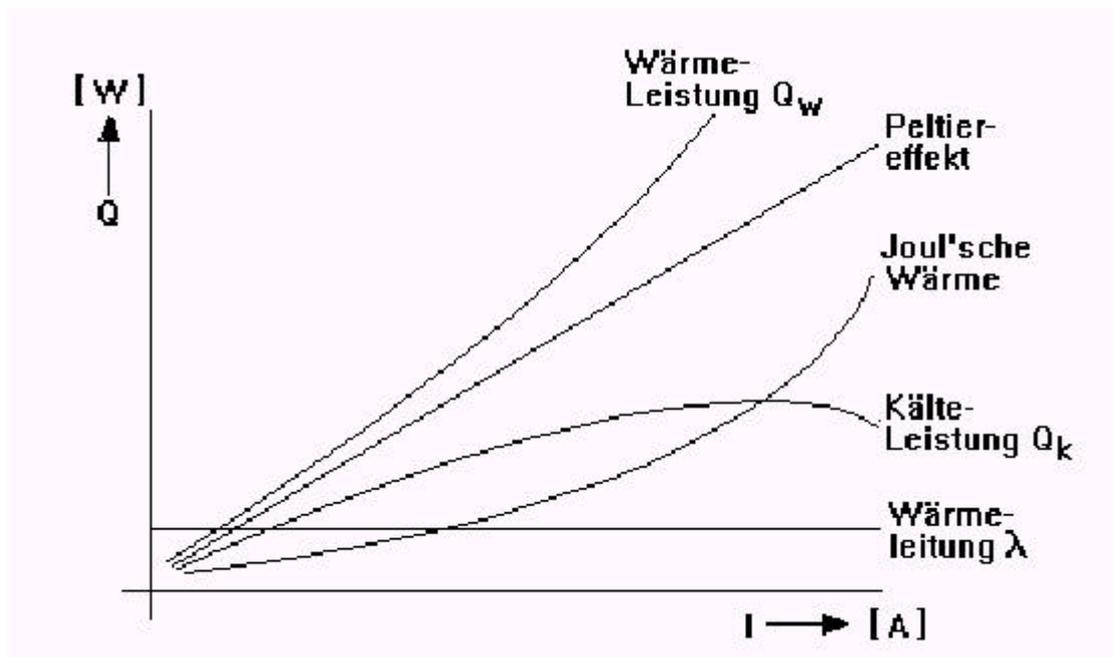
und wird ebenfalls von der eigentlichen Peltier - Leistung abgezogen.  $\lambda$  ist die Wärmeleitung des Elementes pro Kelvin,  $\Delta T$  ist der Temperaturunterschied zwischen Warm- und Kaltseite.

Für die Wärmeleistungs- Formel

$$Q_w = T_w \cdot \alpha_{\text{Elem.}} \cdot I + \frac{I^2 \cdot R_i}{2} - \lambda_{\text{Elem.}} \cdot \Delta T \quad [\text{W}]$$

gilt analog das Gleiche wie für die Kälteleistung, mit dem Unterschied, dass jetzt von der Warmseitentemperatur (absolut) ausgegangen werden muss, und die halbe Joul'sche Wärme nicht subtrahiert, sondern addiert werden muss.

Graphisch sieht dann das Ganze wie folgt aus:



## Der Temperaturkoeffizient des Ohmschen Widerstandes

Die Angaben in den Datenblättern für den Widerstand der Peltier - Elemente beziehen sich auf Messungen bei Raumtemperatur (20°C). Peltier - Elemente von PELTRON GmbH haben einen positiven Temperaturkoeffizienten  $k_r$ , der für Überschlagsrechnungen mit 0,5 %/K angenommen werden kann. Nachstehende Formel kann für notwendige Umrechnungen benutzt werden. Die Solltemperatur  $\vartheta$ , der arithmetische Mittelwert zwischen Warm- und Kaltseitentemperatur, wird in °C eingesetzt.  $R_{20}$  ist die Datenblattangabe für den Widerstand bei 20°C

$$R = R_{20} \cdot [1 + k_r \cdot (\vartheta - 20)] \quad [\Omega]$$

Umgebungstemperatur.

An dieser Stelle muss darauf hingewiesen werden, dass Messungen des Innenwiderstandes an Peltier - Elementen nur mit geeigneten Messinstrumenten vorgenommen werden können. Mit Gleichspannung betriebene Ohm - Meter sind völlig ungeeignet. Im einschlägigen Fachhandel sind Messgeräte erhältlich, welche eine Wechselspannung zur Messung benutzen. Es ist aber auch ein einfacher Aufbau denkbar, der einen festen 50 Hz Wechselstrom im mA-Bereich (um unerwünschte Erwärmung des Elementes zu vermeiden) fließen lässt, und dann der Spannungsabfall am Element gemessen wird.

## Die Thermokraft á bei verschiedenen Temperaturen

Auch die Thermokraft á hängt von der Temperatur ab, bei der das Peltier - Element arbeitet. Hierfür lässt sich leider kein Koeffizient angeben, da das Material - in gewissen Grenzen - für verschiedene Arbeitstemperaturen optimiert werden kann. Im Anhang befinden sich Graphiken, aus denen die Thermokraft á für Arbeitstemperaturen zwischen 0 ... 100°C abgelesen werden kann. Die Angaben beziehen sich jeweils auf ein Schenkelpaar. Die tatsächliche Thermokraft ergibt sich aus dem Ablesewert, multipliziert mit der Anzahl Schenkelpaare des verwendeten Peltier-Elementes. Als Arbeitstemperatur wird der arithmetische Mittelwert zwischen Warm- und Kaltseitentemperatur in °C eingesetzt.

## Einsatz von Peltier-Elementen als Generator

### Die Leerlaufspannung

Peltier - Elemente können auch als Generator eingesetzt werden. Wenn eine Temperaturdifferenz zwischen der warmen und der kalten Seite eines Peltier - Elementes aufgebaut wird, weisen die Anschlusspunkte eine zugeordnete elektrische Spannung auf. Die Höhe der Gleichspannung richtet sich nach der Größe des Temperaturunterschiedes und ist das

$$U_{\text{Leerlauf}} = \alpha_{\text{Elem.}} \cdot \Delta T \quad [\text{V}]$$

Produkt aus der Thermokraft  $\alpha$  und dem  $\Delta T$ .

Temperaturen werden üblicherweise an den Oberflächen der Peltier - Elemente gemessen. Entscheidend für die Generatorspannung ist aber nur der Temperaturunterschied, welcher direkt an den Schenkelpaaren anliegt. Um genau zu sein, muss also der  $\Delta T$  - Verlust in den Keramikplatten und den Kupferbrücken vom angelegten  $\Delta T$  abgezogen werden. Für Überschlagsrechnungen kann dieser Wert mit 1...3% des ges.  $\Delta T$  angesetzt werden.

### Der Strom in einer Anwendung

Eine Anwendung arbeitet mit dem besten, möglichen Wirkungsgrad, wenn der Lastwiderstand gleich dem Innenwiderstand der Stromquelle ist. Allgemein berechnet sich der Strom nach der Formel:

$$I = \frac{U_{\text{Leerlauf}}}{R_i + R_a} \quad [\text{A}]$$

### Die elektrische Leistung

Aus dem zur Verfügung stehenden Strom und dem Lastwiderstand ergibt sich dann die nutzbare elektrische Leistung nach der Formel:

$$N = I^2 \cdot R_a \quad [\text{W}]$$

### Die Spannung an der Last

Die Spannung an der Last berechnet sich aus:

$$U_{\text{Ausg}} = R_a \cdot I \quad [\text{V}]$$

## Die aufgewendete Leistung in Form von Wärme

Die aufzuwendende Wärmeleistung kann aus dem Produkt des Wärmeleitwertes des Peltier -

$$Q_w = \lambda_{\text{Elem.}} \cdot \Delta T \quad [W]$$

Elementes und dem aufgebauten  $\Delta T$  ermittelt werden.

## Der Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad ergibt sich aus dem Quotienten von abgegebener Leistung zu aufgewendeter Leistung.

$$\eta = \frac{N}{Q_w} \cdot 100 \quad [\%]$$

## Anmerkungen zum Aufbau einer Anwendung

Grundsätzlich gelten für den mechanischen Aufbau bei Generatoranwendungen die gleichen Hinweise wie für den Aufbau von Kühl- und Heizeinrichtungen.

### Der Wärmestrom über das Element

Man muss sich klar darüber sein, dass der Wärmewiderstand eines Peltier - Elementes das gewünschte  $\Delta T$  bestimmt. Der Wärmewiderstand ist der reziproke Wert des Wärmeleitwertes und wird in Kelvin/Watt angegeben. Wenn also beispielsweise ein Peltier - Element einen Wärmeleitwert von 0,34 Watt/Kelvin hat, dann beträgt der Wärmewiderstand  $1:0,34 = 2,94$  Kelvin/Watt. Um ein  $\Delta T$  von 50 K aufzubauen, muss also ein Wärmestrom von  $50:2,94 = 17$  Watt über das Peltier-Element fließen. D.h., dass die Wärmequelle in der Lage sein muss, ausreichend Leistung zu liefern, die dann auch auf der kalten Seite wieder abgeführt werden muss.

### Verluste von $\Delta T$

Wenn zwei Flächen sich berühren, treten thermische Übergangswiderstände auf. Besonders zwischen Wärmetauscher und Peltier - Element sollte deshalb auf beste thermische Ankoppelung geachtet werden. Verluste von 4...8 K werden pro Stoßstelle nicht zu vermeiden sein. Bei der Entwicklung einer Anwendung müssen solche Verluste, die ja das am Ende zur Verfügung stehende „netto“ -  $\Delta T$  beeinflussen, gleich mit berücksichtigt werden.

### Die elektrische Anpassung

Der beste Wirkungsgrad wird erreicht, wenn der Widerstand des Lastkreises gleich dem Widerstand der Stromquelle ist. Es ist auch hier wichtig zu beachten, dass der Widerstand des Peltier - Elementes einen Temperaturkoeffizienten hat, welcher entsprechend der mittleren Temperatur des Elementes berücksichtigt werden muss.

## Eigenschaften einiger Stoffe

$\gamma$       Spezifisches Gewicht                       $C_w$       Spezifische Wärmekapazität  
 $a$       Längen-Ausdehnungskoeff.                       $\lambda$       Wärmeleitfähigkeit

Stoff	$\gamma$ g/cm <sup>3</sup>	$C_w$ J/(kg * K)	$a$ /K	$\lambda$ W/(K * m)
Aluminium	2,7	910	0,0000239	210
Eis	0,9	2090		1,7
Fensterglas	2,8	800		0,815
Glimmer	2,9	837		0,523
Keramik Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,78	800	0,0000068	24
Kupfer	8,96	386	0,0000169	380
Luft 20°C	1,205 kg/m <sup>3</sup>	1010		0,0257
Luft 40°C	1,091 kg/m <sup>3</sup>	1010		0,0271
Luft 60°C	1,06 kg/m <sup>3</sup>	1010		0,0285
Messing	8,6	380	0,0000187	117
Silber	10,5	237	0,0000193	408
Stahl	7,85	460	0,000012	50
Wasser 20°C	0,998	4180		0,595
Wasser 40°C	0,992	4180		0,625
Wasser 60°C	0,983	4180		0,645
Wismut-Tellurid	6,63			1,3
PU-Schaum				0,03

Schmelzwärme von Eis                      335 kJ / kg

Verdampfungswärme von Wasser                      2250 kJ / kg

## Hilfreiche Zahlen und Formeln

Wärmeübergangszahl einer lackierten Metalloberfläche bei 40 ... 50°C einschließlich Strahlung beträgt:

bei völlig ungestörter Konvektion

$$11 \dots 12 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

bei normalen Umgebungsverhältnissen

$$15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Wärmeübergangszahl für Wasser:

$$349 + 2093 \cdot \sqrt{v} \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right]$$

Wärmeübergangszahl für Luft (nach Russelt):

$$6 + 4 \cdot v \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right]$$

Die Wasser- bzw. Luftgeschwindigkeit  $v$  wird in m/s eingesetzt (V-Luft  $\approx$  5 m/s).

$$1 \text{ kJ} = 0,2388 \text{ kcal} = 0,278 \text{ Wh}$$

$$1 \text{ kcal} = 1,163 \text{ Wh}$$