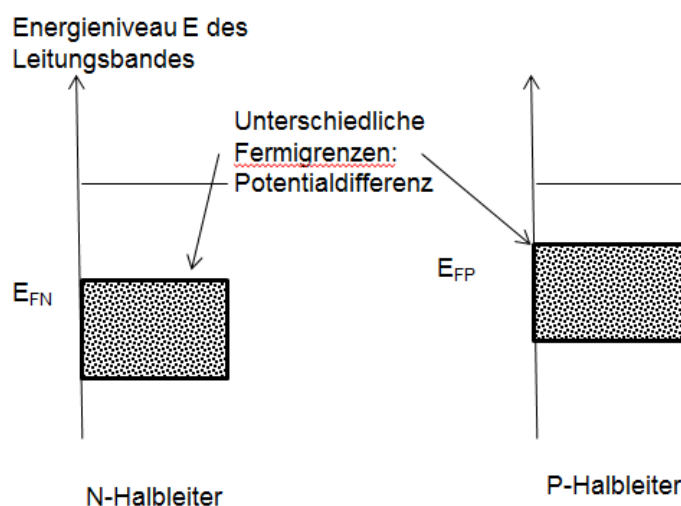


Grundlagen Peltierelement

Ein **Peltier-Element** ist ein thermoelektrischer Energiewandler, welches einen Wärmestrom in Elektrizität (Seebeck-Effekt) oder einen Stromfluss in Wärme (Peltiereffekt) umwandelt.

Thomas Johann Seebeck entdeckte zufällig, dass in einem Stromkreis aus zwei unterschiedlichen Metallstangen eine elektrische Spannung entsteht, wenn zwischen den Enden einer Stange jeweils ein Temperaturunterschied herrscht. Nach dem Verbinden der Enden floss ein elektrischer Strom, dessen Magnetfeld er mit einer Kompassnadel nachwies. Seebeck nutzte diesen Effekt 1821 in einem ersten Thermoelement aus. (Quelle 1)

Entscheidend für diesen Effekt sind die Vorgänge im Leitungsband von Metallen. Dies sind die im Metallgefüge frei beweglichen Elektronen. Je nach Metall befinden sie sich in unterschiedlichen Energieniveaus, deren Höhe durch die Fermi-Grenze bestimmt ist. Kommen diese Metalle in Kontakt, kommt es zu einem Potentialausgleich. Die Elektronen treten in einen energetisch günstigeren Zustand über und erzeugen so ein elektrisches Feld. Durch Wärmezufuhr wird die Potentialdifferenz aufrechterhalten. Die Potentialdifferenz wird durch die Seebeck-Kraft ausgedrückt.



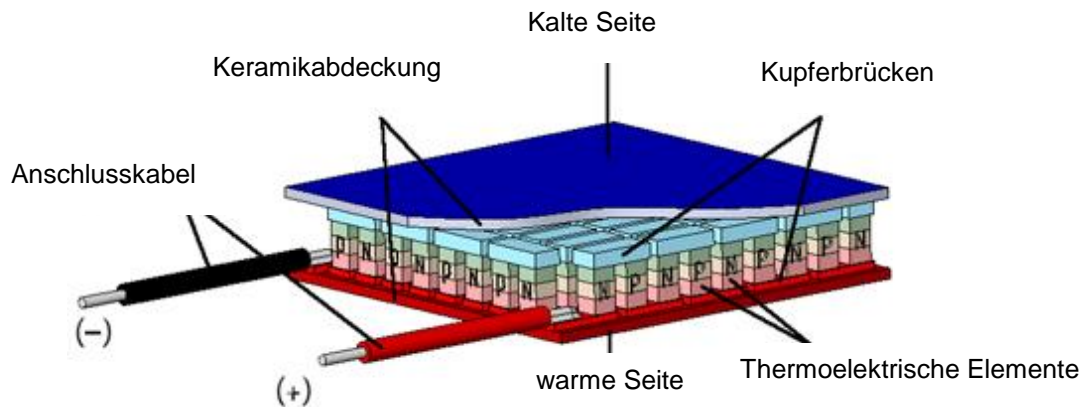
Fließt umgekehrt ein Strom durch zwei hintereinanderliegende unterschiedliche Halbleiterelemente, werden die Elektronen auf ein energetisch höheres Niveau angehoben und nehmen dabei Wärme auf. Auf der anderen Seite der Kontaktstelle gelangen die Elektronen von einem höheren auf ein niedrigeres Energieniveau und geben dabei Wärme ab.

Technische Umsetzung

Um den Peltiereffekt in einem technischen Produkt auszunutzen, werden mehrere Elemente in Reihe geschaltet. Dabei wechselt sich immer ein N-Halbleiter (Elektronenleiter) mit einem P-Halbleiter (Leitung durch Elektronenlöcher). Mit der Anzahl dieser sogenannten Thermocouples (oder Thermopaare) wird die Versorgungsspannung des Peltierelementes definiert. Die maximale Spannung pro Thermopaar beträgt ca. 0,12 V. Ein Peltierelement mit 127 Thermopaaren hat demnach eine Versorgungsspannung von ca. 15 Volt.

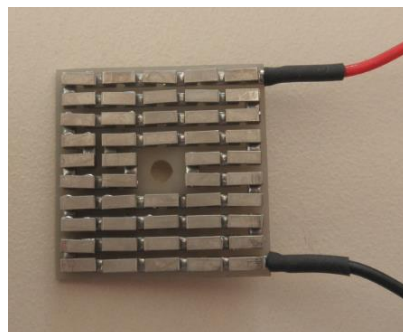
Als derzeit marktgängiges thermoelektrisches Material wird nahezu ausschließlich Wismuttellurid eingesetzt. Es wird durch entsprechende Dotierungen zu einem N- oder einem P-Halbleiter. Eine Dotierung mit Bor macht aus Wismuttellurid einen P-Halbleiter, Antimondotierung führt zu einem N-Halbleiter.

Die einzelnen Thermopaare werden durch ausgeklügelte Löttechniken miteinander verbunden und mit elektrisch isolierender Keramik, die gut die Wärme leitet, abgedeckt. Die Keramik ist zur Innenseite üblicherweise mit DCB-Brücken aus Kupfer versehen. Als Keramik findet meistens Al_2O_3 (Aluminiumoxid) oder AlN (Aluminiumnitrid) Verwendung.



Das Bild oben zeigt ein Peltierelement, bei dem nur eine Seite mit Keramik abgedeckt ist.

Das Bild unten zeigt ein das gleiche Peltierelement von oben betrachtet. Man kann hier die verzinnnten Kupferbrücken, die die einzelnen Thermopaare verbinden, gut erkennen.



Trotz intensiver Forschung hat es bislang kein anderes Material als Wismuthellurid zum kommerziellen Durchbruch geschafft.

Das Problem bei der Materialentwicklung besteht in den widersprüchlichen Eigenschaften, die das Material aufweisen muss.

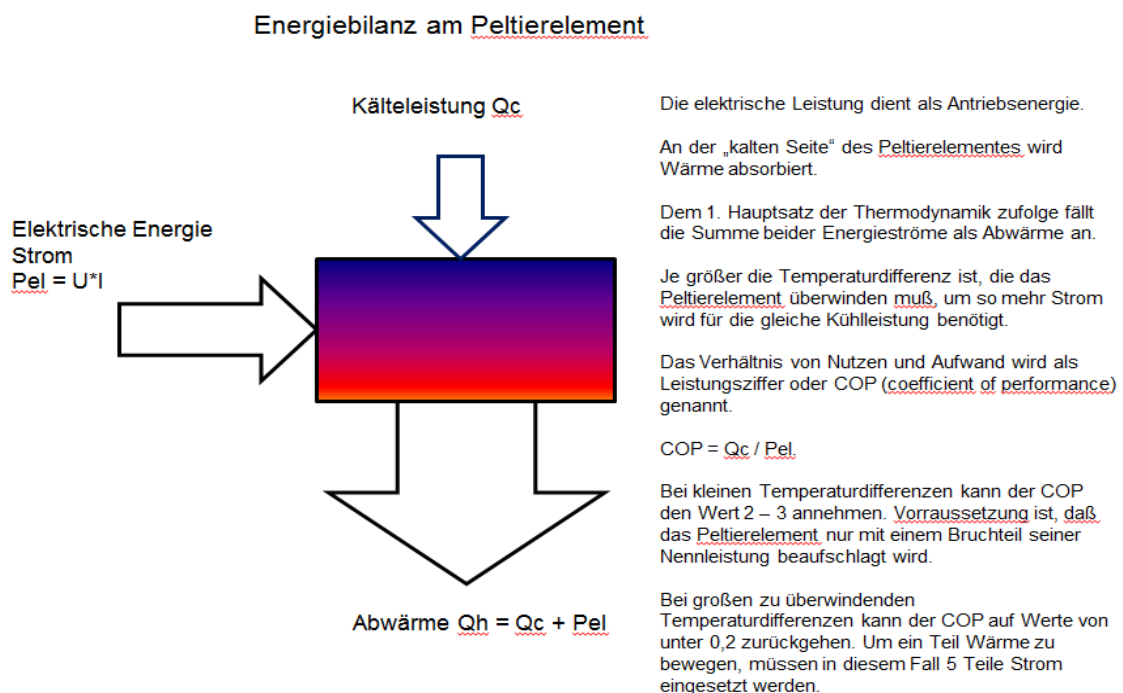
Neben dem geschilderten Peltiereffekt spielen die Wärmeleitung und die Ohm'schen Verluste die entscheidende Rolle bei der Energiebilanz.

Wird das Peltierelement mit Spannung beaufschlagt, entsteht ein Stromfluss, bei dem ein Teil proportional zum Widerstand in Wärme umgewandelt wird. Dies ist reine Verlustwärme, die in die Umgebung abgeführt werden muss. Um diese Verluste zu minimieren, soll das Material eine gute elektrische Leitfähigkeit haben.

Andererseits baut sich über die Stärke des Peltierelementes (2 – 6 mm) eine Temperaturdifferenz von bis zu 70°C auf. Die Wärme fließt dem treibenden Gefälle folgend proportional zum Wärmeleitwert des Bauteiles wieder von der warmen Seite zur kalten zurück. Somit ist ein Material mit einem schlechten Wärmeleitwert gefragt. Alle bekannten Metalle oder Halbleiter, die gut den Strom leiten, leiten aber auch gut die Wärme.

Dies stellt die Herausforderung an die Materialforschung und Entwicklung dar.

Energiebilanz am Peltierelement



Die Kälterzeugung mittels Peltierelement wird durch die drei physikalischen Größen

Seebeck Kraft, Joule'sche Wärme und Wärmeleitung

Die Vorgänge in einem Peltierelement werden in wesentlichem durch drei physikalische Vorgänge bestimmt.

1. Die Seebeck Kraft Q_s ist näherungsweise proportional zur absoluten Temperatur und zur Stromstärke. $Q_s = \alpha \cdot I \cdot T$ (1)

mit α = Seebeck-Koeffizient des eingesetzten Materials, I = Stromstärke und T = Temperatur, bei der das Peltierelement betrieben wird in Kelvin.

2. Die Joule'sche Wärme entsteht durch die Verluste des Stromflusses, wobei die eine Hälfte an der warmen und die andere an der kalten Seite entsteht. $Q_j = \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R$ (2)

mit I = Stromstärke und R elektrischer Widerstand der Materials.

3. Die Wärmeleitung infolge der Temperaturdifferenz führt innerhalb des Peltierelementes einen Rückfluss der Wärme Q_λ von der warmen zur kalten Seite. $Q_\lambda = \lambda \cdot \Delta T \cdot 2N \cdot A / h$ (3)

mit λ = Wärmeleitwert des Materials, ΔT = Temperaturdifferenz über dem Peltierelement, N = Anzahl der Thermopaare, A = Querschnittsfläche der Thermopaare, h = Höhe derselben.

Grundlegende Schlussfolgerungen für den erfolgreichen Einsatz der Peltier-Technik

Aus den oben aufgeführten Zusammenhängen lassen sich Schlussfolgerungen ableiten, die für den Betrieb eines Peltierelementes erfolgsentscheidend sein können:

Die **wichtigste** ist, dass die Annahme viel hilft viel unter Umständen völlig falsch sein kann. Will man eine hohe Kühlleistung erzielen, zeigt die Formel (1), dass ein möglichst hoher Strom gewählt werden sollte. Andererseits zeigt die Formel (2), dass die Verlustleistung proportional zum Quadrat der Stromstärke zunimmt.

Nach Formel (3) erfolgt der unerwünschte Rückfluss der Wärme umso besser, je größer die Temperaturdifferenz am Peltierelement ist.

Wenn ein Peltierelement mit einer hohen Stromstärke beaufschlagt wird, führt das nur dann zu einer höheren Kühlleistung, wenn die Wärme von der warmen Seite des Peltierelementes effektiv, das heißt mit einer geringen Temperaturdifferenz, abgeführt werden kann. Ist das nicht der Fall, heizt sich die warme Seite überproportional auf und das Peltierelement muss eine höhere Temperaturdifferenz überwinden, was zu einer Verringerung der Effizienz führt.

In vielen Fällen ist es erforderlich, das Peltierelement nach dem Prinzip der maximalen Effizienz zu betreiben. Dies bedeutet, die Spannung zu reduzieren um den Stromfluss zu begrenzen.

Zusammenfassend lässt sich sagen: **weniger kann mehr sein.**

Mit guter Näherung kann man die **Stromstärke**, die zum Betrieb mit **maximaler Effizienz** führt, wie folgt berechnen:

Die maximale Temperaturdifferenz, die ein Peltierelement aufbauen kann beträgt ca. 70°C. Unterstellt, die Aufgabe besteht darin, eine Temperaturdifferenz über dem Peltierelement von 21°C zu erzeugen, sind das 30% von der maximalen. Entsprechend sollte das Peltierelement auch nur mit 30% des Maximalstromes beaufschlagt werden.

Wird das Verhältnis zwischen Stromstärke und maximaler Stromstärke so gewählt wie das zwischen Temperaturdifferenz und maximaler Temperaturdifferenz, wird der Betriebspunkt nahe der größtmöglichen Effizienz erreicht.

Dieser Zusammenhang wird in dem unten stehenden Diagramm dargestellt, wobei der Faktor ϵ über der Temperaturdifferenz aufgetragen ist mit $\epsilon = Q_c / P_{el} = COP$.

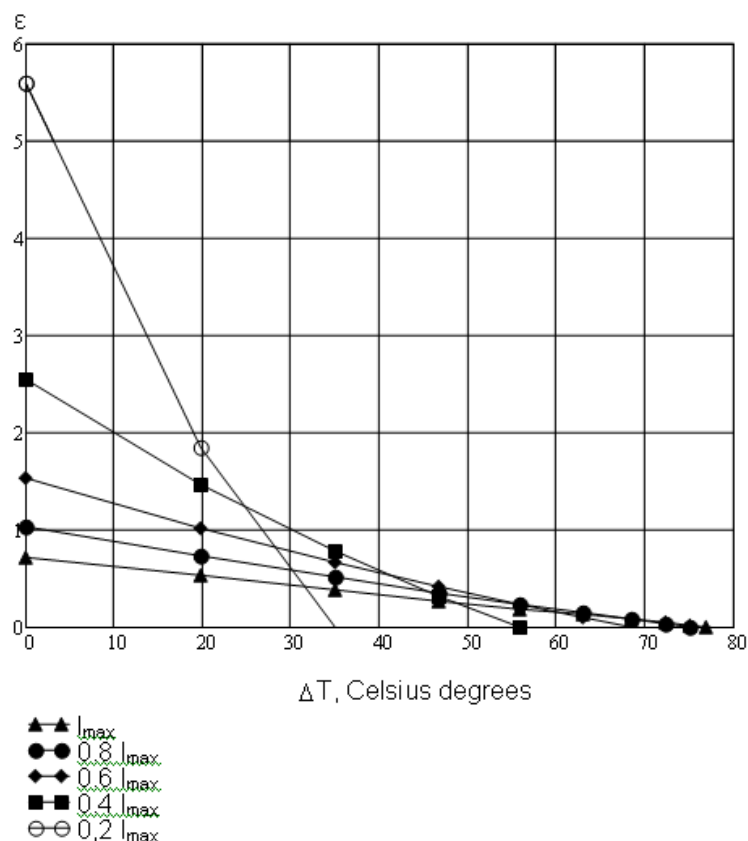


Bild. 1: Temperaturabhängigkeit des COP

Quelle 2)

Beträgt die Temperaturdifferenz, die das Peltierelement aufbauen muss, z. B. 20 K, erreicht man mit dem 0,2-fachen des Maximalstromes einen ϵ - Wert von nahe 2. Das heißt, mit einem Teil Strom kann man fast 2 Teile Wärme bewegen.

Wird das Peltierelement hingegen mit der maximalen Stromstärke gespeist, dreht sich das Verhältnis nahezu um. Dann werden fast 2 Teile Strom benötigt um ein 1 Teil Wärme zu bewegen. Dann muss eine nahezu doppelt so große Wärmemenge in die Umgebung transportiert werden. Es wird also entsprechend auch ein etwa doppelt so großer Kühlkörper benötigt. Steht der Platz dafür nicht zur Verfügung, wird es zu einer starken Aufheizung des Kühlkörpers kommen mit der Folge, dass das Peltierelement eine entsprechend größere Temperaturdifferenz aufbauen muss und in einen Betriebspunkt mit noch niedrigerer Effizienz rutscht. Damit kann es zum thermischen Abkippen des Systems kommen.

Aus dieser Betrachtung ergibt sich eine weitere wichtige Konsequenz für den praktischen Einsatz eines Peltierelementes. Die effiziente Wärmeableitung von der warmen Seite des Peltierelementes ist Voraussetzung dafür, dass überhaupt eine Kühlleistung generiert werden kann. **Das beste Peltierelement mit einem unzureichend dimensionierten Kühlkörper liefert ein deutlich schlechteres Ergebnis als ein schlechtes Peltierelement mit einem sehr guten Kühlkörper.**

Als Faustregel kann man sagen, dass das Produkt aus maximaler Spannung, maximalem Strom und Wärmewiderstand des Kühlkörpers einen Wert von ca. 25 K nicht überschreiten sollte.

Beispiel: Zum Einsatz kommt das Peltierelement PE-127-40-8.5S mit 15 Volt und 8,5 A als Nennwerte: Das Produkt aus beiden Werten ist $15 \cdot 8,5 \text{ VA} = 127,5 \text{ Watt}$.

$25 \text{ K} / 127,5 \text{ Watt} = 0,196 \text{ K/W}$. Dies wäre der Wärmewiderstand R_{th} des Kühlkörpers, der für dieses Peltierelement angemessen wäre.

Falls allerdings das Peltierelement aus den oben erläuterten Effizienzgründen nur mit einem geringerem Strom beaufschlagt wird, kann je nach Ziel und Umgebungsbedingungen ein anderer Kühlkörper in Betracht kommen.

Vor- und Nachteile der Peltier-Technik

Die größten Vorteile eines Peltier-Elements sind die geringe Größe, die Vermeidung jeglicher bewegter Bauteile, Gase und Flüssigkeiten. Eine Kältemaschine benötigt dagegen immer ein Kältemittel und in den meisten Fällen einen Kompressor.

Durch Umkehr der Stromrichtung ist mit Peltier-Elementen sowohl Kühlen als auch Heizen möglich. Damit kann eine Thermostatierung von Bauteilen erreicht werden, wenn die Umgebungstemperatur oberhalb oder auch unterhalb der Solltemperatur liegt.

Ein Kühlgerät mit Peltier-Technik kann vergleichsweise schnell und ohne großen Aufwand aufgebaut werden.

Die Peltier-Technik findet auch dort Anwendung, wo aus Gründen des Explosionsschutzes konventionelle Kühlsysteme nicht eingesetzt werden können.

Mit einer Peltierkühlung können Temperaturen sehr genau angesteuert werden und auch bei Vorliegen von Störgrößen im Bereich von Bruchteilen von Grad K fixiert werden.

Ein Nachteil der Peltier-Elemente ist der niedrige Wirkungsgrad, der zu hoher elektrischer Leistungsaufnahme bei vergleichsweise geringer Kühlleistung bzw. Temperaturdifferenz führt. Ferner sind Elemente über einer Größe von 60 mm × 60 mm kaum erhältlich. Trotzdem sind Peltier-Elemente für viele Anwendungen brauchbar, da ohne weiteres Temperaturen unter 0 °C erreicht werden können.

Ein weiterer Nachteil ist die Verfügbarkeit des Materials für Peltierelemente. Das derzeit verwendete Material BiTe (Wismuthtellurid) ist ein knappes und nur aus wenigen Quellen verfügbares Material.

Quelle 1): Wikipedia Quelle 2). Firma Nord, Moskau