

**Frühjahrsschule Thermoelektrik  
der Deutschen Thermoelektrischen Gesellschaft  
vom 7. - 11. April 2008**

im Fraunhofer Institut für Physikalische Messtechnik IPM in Freiburg

Peltierelemente in der Anwendung  
Kühlen – Heizen – Regeln – Stromerzeugung

**Einführung**

- Was ist das Besondere an der Peltiertechnik
- Was muß dringend beachtet werden beim Einsatz
- Die Thermoelektrische Grundgleichung

**Kühlen und Heizen**

- Anwendungsbeispiele
- Exponate

**Stromerzeugung**

- Anwendungsbeispiele
- Exponate
  - Worauf ist zu achten
  - Möglichkeiten und Grenzen

**Temperaturregelung mit Peltierelementen**

- Anwendungsbeispiele
- Exponate
- Wie wird geregelt
- Wichtige Regelparameter
- Genauigkeit beim Regeln
- Stromumkehr

**Frühjahrsschule Thermoelektrik der Deutschen Thermoelektrischen  
Gesellschaft vom 7. - 11. April 2008 im IPM in Freiburg**

Peltierelemente in der Anwendung  
Kühlen – Heizen – Regeln – Stromerzeugung

**Einführung**

**1. Was ist das Besondere an der Peltiertechnik**

Das Peltierelement ist ein Bauteil, mit dem man auf vergleichsweise simple Art und Weise Heizen, Kühlen, Temperaturen regeln und Strom erzeugen kann.

Das Peltierelement ist kompakt, arbeitet ohne bewegliche Teile, kann in explosionsgefährdeten Räumen eingesetzt werden und läßt sich sehr präzise ansteuern. Bei Stromrichtungsumkehr wird die Seite des Peltierelementes, die zuvor kalt war warm und umgekehrt.

Die Effizienz von Peltierelementen bei der Kühlung ist geringer als von Kältekompressoren. Wenn es um größere Kühlleistungen geht, ist die etablierte Kältekompressortechnik der Peltiertechnik in technisch-wirtschaftlicher Hinsicht meistens überlegen. Die Grenze kann man grob bei etwa 100 Watt Kälteleistung ansetzen. Dabei werden Temperaturdifferenzen und besondere technische Rahmenbedingungen nicht berücksichtigt. Deshalb handelt es sich hierbei nur um eine Groborientierung

**Was muß dringend beachtet werden beim Einsatz**

Um ein Peltierelement betreiben zu können, ist eine angepaßte Gleichstromquelle erforderlich.

Daneben ist die Wärmeabfuhr eine zwingende Voraussetzung.

**Ein Peltierelement ohne Strom ist wie ein Auto ohne Benzin.**

**Ein Peltierelemente (beim Kühlen) ohne Wärmeabfuhr ist wie ein Auto ohne Reifen.**

**Frühjahrsschule Thermoelektrik der Deutschen Thermoelektrischen  
Gesellschaft vom 7. - 11. April 2008 im IPM in Freiburg**

Peltierelemente in der Anwendung  
Kühlen – Heizen – Regeln – Stromerzeugung

Die Fähigkeit von Peltier-Elementen, Wärme zu transportieren, hängt von  
folgenden Parametern ab:

**Moduleigenschaften**

Thermokraft **Se** (auch Seebeckkoeffizient genannt) in Volt/Kelvin  
Elektrischer Widerstand **R** in Ohm  
Wärmeleitwert **K** in Watt/Kelvin

**Prozesseigenschaften**

Temperatur **T** in Kelvin (**T**: die Temperatur im Peltierelement)  
Temperaturdifferenz **dT** in Kelvin (**dT**: die Temperaturdifferenz zwischen  
warmer und kalter Seite des Peltierelementes)  
Stromstärke **I** in Ampere (Stromstärke , mit der das Peltierelement  
betrieben  
wird)

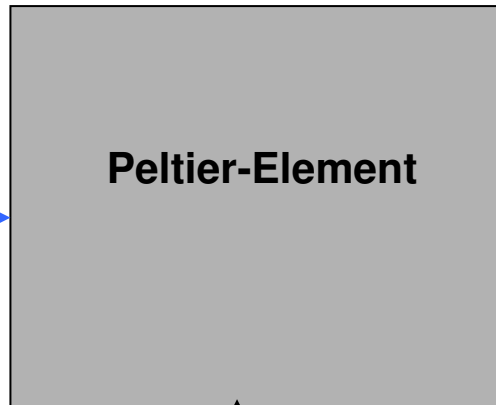
Mit diesen Größen läßt sich das Leistungsverhalten der Peltier-Elemente nach  
folgender Formel beschreiben:

$$Q_k = (S_e \cdot I \cdot T) - (R \cdot I^2) / 2 - (K \cdot dT)$$

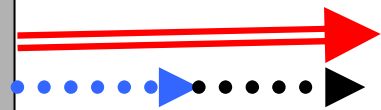
wobei  $Q_k$  die transportierte Wärmeleistung in Watt bedeutet (cooling capacity)

**Für eine exakte Berechnung ist die Temperaturabhängigkeit der  
Moduleigenschaften zu berücksichtigen.**

$Q_k$  = transportierte  
Wärmeleistung  
(Kälteleistung des  
Peltierelementes)



$Q_{ab}$  = abzuführende  
Wärmeleistung  
(Heizleistung des  
Peltierelementes)



$P_{el}$  = el. Leistung ( $U \cdot I$ )  
(Gleichstrom)



### Thermoelektrische Grundgleichung

$$Q_k = (S_e \cdot I \cdot T) - (R \cdot I^2) / 2 - (K \cdot dT)$$

Aus der Betrachtung der Formel lassen sich folgende Sätze formulieren:

Der erste Klammerausdruck der Formel liefert einen positiven Beitrag, der zweite und der dritte jeweils einen negativen Beitrag zur transportierten Wärme.

Der negative Beitrag des zweiten Klammerausdrucks ist proportional zum Quadrat der Stromstärke.

Der negative Beitrag des dritten Klammerausdrucks ist proportional zur Temperaturdifferenz und entfällt bei  $dT = 0$ .

**Frühjahrsschule Thermoelektrik der Deutschen Thermoelektrischen  
Gesellschaft vom 7. - 11. April 2008 im IPM in Freiburg**

Peltierelemente in der Anwendung  
Kühlen – Heizen – Regeln – Stromerzeugung

**Kühlen und Heizen**

**Anwendungsbeispiele**

- Biotechnologie:, DNA – Forschung, Thermocycler
- Medizin: kryothermische Behandlungen
- Optoelektronik: Laserdioden, Pumpquellen für Laserdioden, CCD-Chips
- Elektrotechnik. Kühlen, Temperieren von Schaltschränken
- Elektronik: Kühlung von Sensoren,
- Heizung für sehr schnellen Temperaturwechsel
- Forschung und Entwicklung: Test von CPU

**Exponate**

Entwicklerkit

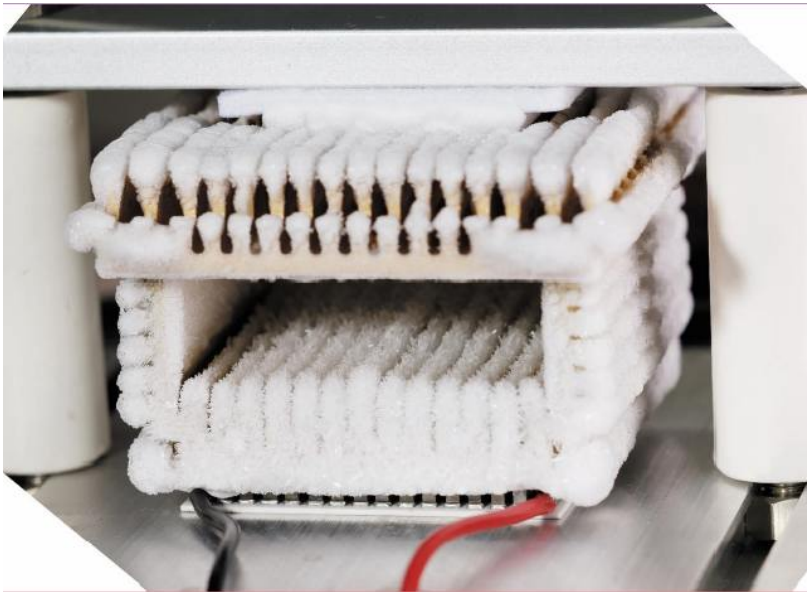


**Frühjahrsschule Thermoelektrik der Deutschen Thermoelektrischen  
Gesellschaft vom 7. - 11. April 2008 im IPM in Freiburg**

Peltierelemente in der Anwendung  
Kühlen – Heizen – Regeln – Stromerzeugung

**Exponate**  
Entwicklerkit

Vereisung am Prüfling:



Das Peltierelement ist klein im Vergleich zum Kühlkörper

**Frühjahrsschule Thermoelektrik der Deutschen Thermoelektrischen  
Gesellschaft vom 7. - 11. April 2008 im IPM in Freiburg**

**Peltierelemente in der Anwendung  
Kühlen – Heizen – Regeln – Stromerzeugung**

**Exponate**

Testaufbau mit Isolierbox

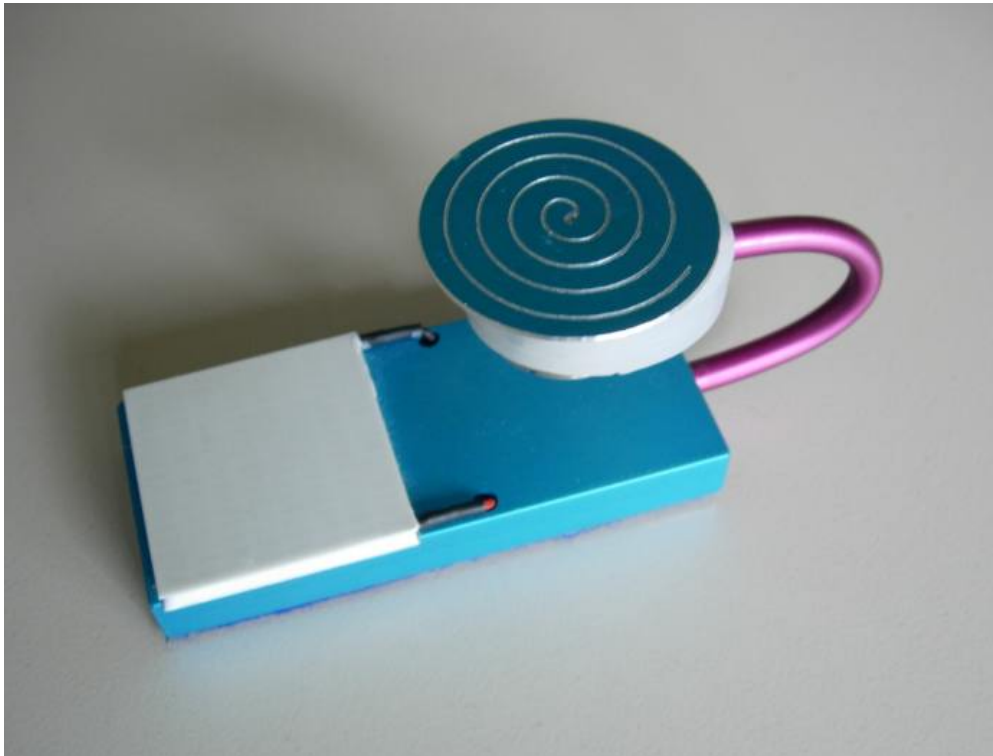


**Frühjahrsschule Thermoelektrik der Deutschen Thermoelektrischen  
Gesellschaft vom 7. - 11. April 2008 im IPM in Freiburg**

Peltierelemente in der Anwendung  
Kühlen – Heizen – Regeln – Stromerzeugung

**Exponate**

Thermoelektrischer Generator  
Die Wärme der Hand bewegt die Scheibe



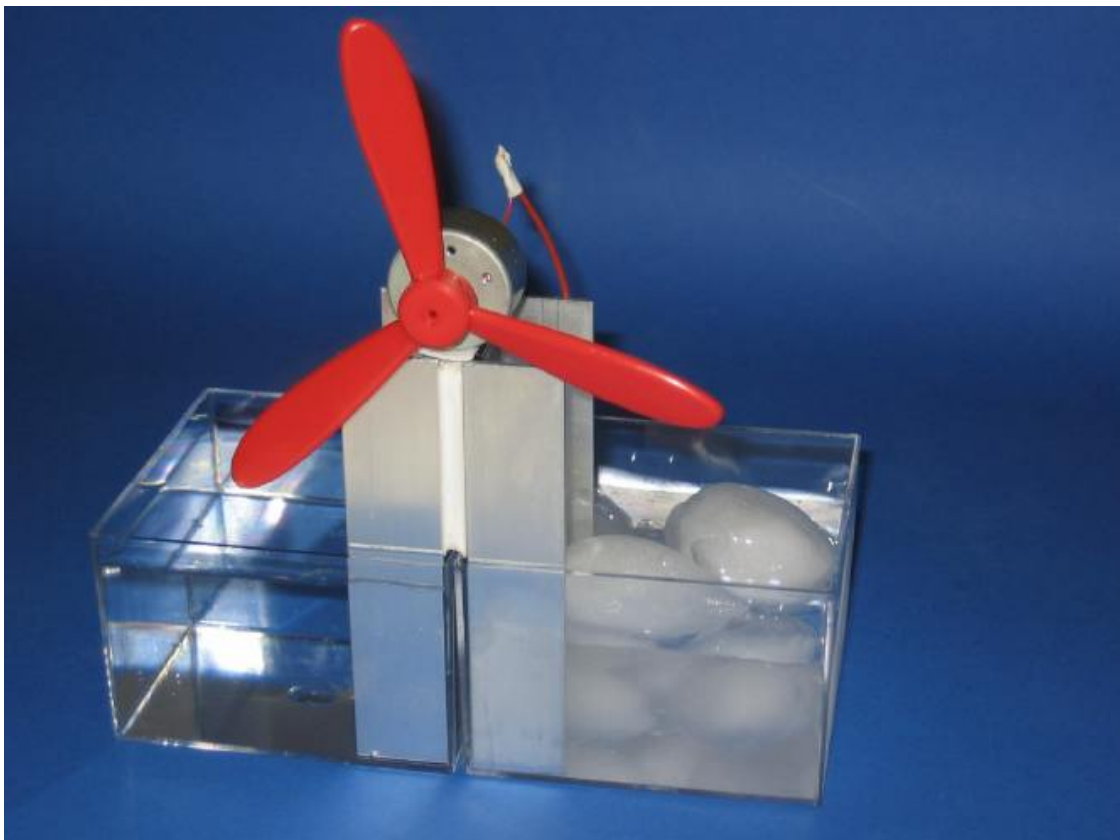
**Frühjahrsschule Thermoelektrik der Deutschen Thermoelektrischen  
Gesellschaft vom 7. - 11. April 2008 im IPM in Freiburg**

Peltierelemente in der Anwendung  
Kühlen – Heizen – Regeln – Stromerzeugung

**Exponate**

Thermoelektrischer Generator

Die Temperaturdifferenz zwischen kaltem und warmen Behälter führt zu  
einem Wärmefluß, der im Peltierelement einen elektrischen Stromfluß  
induziert.



**Frühjahrsschule Thermoelektrik der Deutschen Thermoelektrischen  
Gesellschaft vom 7. - 11. April 2008 im IPM in Freiburg**

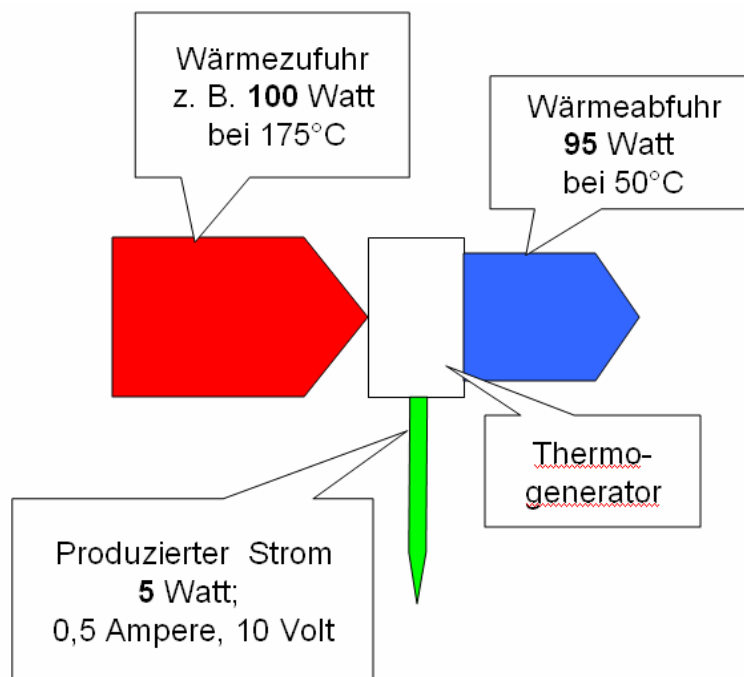
Peltierelemente in der Anwendung  
Kühlen – Heizen – Regeln – Stromerzeugung

**Stromerzeugung**

Ein Thermogenerator produziert aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften eine elektrische Spannung, die einen Gleichstrom induziert. Die so produzierte elektrische Leistung ist umso größer, je größer der Temperaturunterschied am Thermogenerator ist.

Jedes Peltierelement kann als Thermogenerator eingesetzt werden  
Pro 40 °C Temperaturunterschied kann der Thermogenerator ca. 1-1,5 % der im Wärmestrom enthaltenen Energie in Strom umformen, eine optimale Abstimmung des elektrischen Widerstandes des nachgeschalteten Stromverbrauchers unterstellt.

Die obere Prozesstemperatur ist durch die Haltbarkeit des Materials limitiert, die untere ist durch die Temperatur der Wärmesenke definiert.



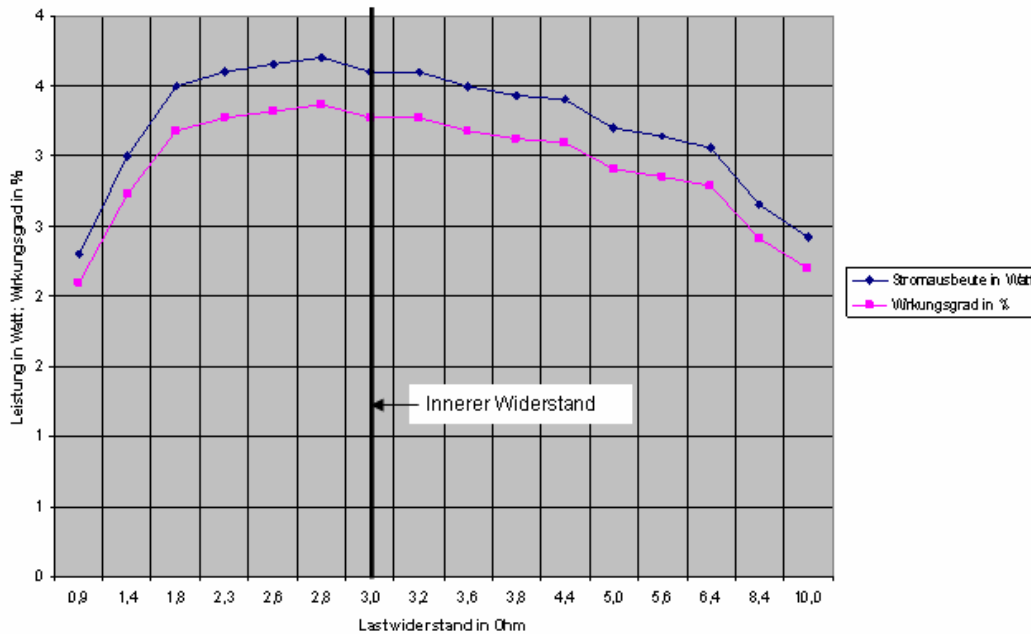
**Frühjahrsschule Thermoelektrik der Deutschen Thermoelektrischen Gesellschaft vom 7. - 11. April 2008 im IPM in Freiburg**

Peltierelemente in der Anwendung  
Kühlen – Heizen – Regeln – Stromerzeugung

**Abhängigkeit der Stromerzeugung vom Lastwiderstand**

Der Lastwiderstand sollte in der gleichen Größe liegen wie der innere Widerstand des Generators. Bei stärkeren Abweichungen entstehen hohe Verluste, wie die Grafik zeigt.

Stromausbeute in Abhängigkeit vom Lastwiderstand  
Thermogenerator mit 126 Thermopaaren  
innerer Widerstand: 3 Ohm (Daten des Herstellers)



**Frühjahrsschule Thermoelektrik der Deutschen Thermoelektrischen  
Gesellschaft vom 7. - 11. April 2008 im IPM in Freiburg**

Peltierelemente in der Anwendung  
Kühlen – Heizen – Regeln – Stromerzeugung

**Stromerzeugung**

Gemessen am Carnot Wirkungsgrad  $\eta_c$  ist die Stromausbeute sehr klein.  
Der Carnot Wirkungsgrad ist die theoretisch maximal erzeugbare  
Menge an Strom bei einem stationären Kreisprozess, der durch eine  
obere und eine untere Temperatur bestimmt ist..

Er ist definiert als  $\Delta T/T_o$ . Hierbei ist  $\Delta T$  die Temperaturdifferenz zwischen  
höchster Temperatur und niedrigster Temperatur innerhalb eines  
Kreisprozesses.

$T_o$  ist die obere Prozesstemperatur in [K].

Am genannten Beispiel ist  $\eta_c (175^\circ\text{C}-50^\circ\text{C})/(175^\circ\text{C}+273^\circ\text{C}) = 0,279$

Die konventionelle Stromerzeugung erreicht mehr als 80% des  $\eta_c$ .

Die Temperaturfestigkeit des derzeit verfügbaren Materials limitiert die  
Einspeisetemperatur und damit auch die maximal erzielbare  
Temperaturdifferenz.

**Frühjahrsschule Thermoelektrik der Deutschen Thermoelektrischen  
Gesellschaft vom 7. - 11. April 2008 im IPM in Freiburg**

Peltierelemente in der Anwendung  
Kühlen – Heizen – Regeln – Stromerzeugung

**Stromerzeugung**

**Komponenten für ein Stromerzeugungssystem**

**Folgende Komponenten werden für die Stromgeneration benötigt:**

1. Die Heranführung der Wärme  
(kann entfallen, wenn der Generator unmittelbar auf ein Wärmereservoir montiert werden kann)  
Falls erforderlich, muß die Temperatur des Wärmestroms gezielt abgesenkt werden, um eine Zerstörung des Generators zu verhindern.
2. Der Generator als Kernbestandteil des Systems
3. Die Wärmeabfuhr  
(kann entfallen, wenn der Generator unmittelbar auf ein Kältereservoir montiert werden kann)
4. Stromeinspeisung  
Der Strom muß je nach Anwendungsfall bedarfsgerecht konditioniert werden (Spannung muß angepaßt werden; evtl. ist eine Reihenschaltung der Generatoren zu realisieren; Strom muß in einen Wechselstrom umgewandelt werden u. a. m.)
5. Stromspeicherung  
Falls Stromerzeugung und Stromverbrauch nicht streng synchron auftreten, ist eine Speichermöglichkeit des erzeugten Stroms vorzusehen

**Die Qualität und die Preiswürdigkeit des Gesamtsystems hängt maßgeblich von der Abstimmung der Einzelkomponenten aufeinander ab.**

**Frühjahrsschule Thermoelektrik der Deutschen Thermoelektrischen  
Gesellschaft vom 7. - 11. April 2008 im IPM in Freiburg**

**Peltierelemente in der Anwendung  
Kühlen – Heizen – Regeln – Stromerzeugung**

**Temperaturregelung mit Peltierelementen**

Anwendungsbeispiele

Die wichtigste Anwendung bei der Regelung mit Peltierelementen ist die PCR

(Polymerase Kettenreaktion – **p**olymerase **c**hain **r**eaction)

Dieses Verfahren ist die Voraussetzung für die dramatischen Fortschritte in der Biotechnologie und Genforschung. Ohne die Peltiertechnik ist die hochtechnisierte Anwendung der PCR und der heute erreichte Stand der Technik nicht denkbar.

Das besondere daran ist die Präzision und die Geschwindigkeit, mit der ein oberer und ein unterer Temperaturpunkt angesteuert wird.

Zu starke Überschwinger oder falsche Beharrungszeiten führen zur Degeneration der Reaktionspartner oder zu unspezifischen, nicht gewollten Reaktionen.

**Bei der PCR sind zwingend zyklenfeste Peltierelemente erforderlich.**

Ein weiteres Beispiel für Temperaturregelung ist der Test von Chips. Deren Verhalten (bzw. Fehlerrate) wird nicht nur von der Temperatur, sondern auch von der Temperaturänderungsgeschwindigkeit beeinflusst. Für diese Testaufgabe ist das Peltierelement ebenfalls prädestiniert.

Ein weiterer wichtiger Anwendungsfall ist das Regeln von Dioden gepumpten Lasern. Ohne eine Temperaturregelung sind keine genauen Wellenlängen erreichbar.

**Frühjahrsschule Thermoelektrik der Deutschen Thermoelektrischen  
Gesellschaft vom 7. - 11. April 2008 im IPM in Freiburg**

**Peltierelemente in der Anwendung  
Kühlen – Heizen – Regeln – Stromerzeugung**

**Temperaturregelung mit Peltierelementen**

Eine Regelung speist das Peltierelement immer genau mit der Strommenge in der Stromrichtung, die für den jeweiligen Regelstatus erforderlich ist.

Die Stromstärke wird über die Modulation der Pulsweite bestimmt. Dabei wird innerhalb einer Schaltperiode das Verhältnis zwischen Ein- und Ausschaltzeit verändert.

Die Schaltfrequenz ist dabei im kHz-Bereich.

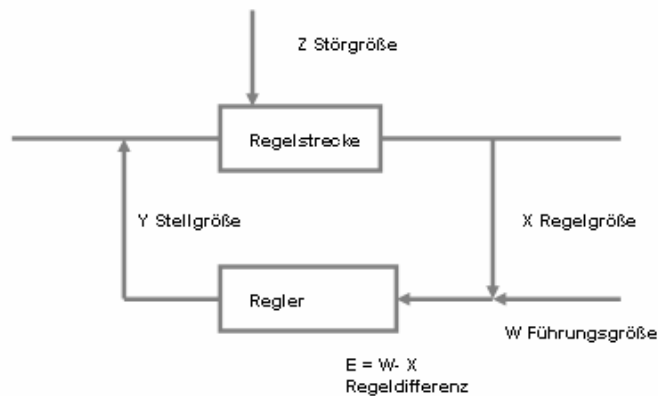
Der Strompuls wird anschliessend geglättet, so dass das Peltierelement quasi mit einem Konstantstrom versorgt wird.

**Frühjahrsschule Thermoelektrik der Deutschen Thermoelektrischen Gesellschaft vom 7. - 11. April 2008 im IPM in Freiburg**

Peltierelemente in der Anwendung  
Kühlen – Heizen – Regeln – Stromerzeugung

**Temperaturregelung mit Peltierelementen**

Anwendung des Controllers:



Begriff	Formelzeichen	Beispiel
Regelgröße	X	Spannung (Temperaturfühler)
Führungsgröße	W	Sollspannung (Potentiometer)
Stellgröße	Y	Stromstärke
Regeldifferenz	E	Spannungsdifferenz
Störgröße	Z	Wärmestrom
Regler		Peltiercontroller

Ein Peltiercontroller ist dazu geeignet, eine gewünschte Temperatur mittels Peltierelement zu erreichen und zu halten. Die Voraussetzung hierfür ist die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems. Wenn das Peltierelement nicht ausreichend dimensioniert ist oder das Kühlsystem für das Peltierelement das Erreichen der Temperaturgrenzen nicht zulässt, sind die gewünschten Grenzwerte nicht erreichbar. Eine Kühlaufgabe mit einem Peltierelement kann nur gelingen, wenn das Peltierelement mit einem angemessen leistungsfähigen Kühlkörper verbunden ist.

Die Temperatur ist eine abgeleitete Größe. Sie wird von dem Temperaturfühler (Standard NTC 10K) vermittelt in Form eines Spannungssignals. Dieses wird mit dem Spannungssignal des Potentiometers, also der Führungsgröße, verglichen. Aus der Differenz beider Werte, also der Regeldifferenz, bildet der Regler eine bestimmte Stromstärke, also die Führungsgröße, die im Peltierelement eine Temperaturänderung erzeugt.

Der Controller ist nur für den Fall geeignet, dass die Zieltemperatur unter der Ausgangstemperatur liegt. Falls diese Voraussetzung nicht gegeben ist, muß der Controller eingesetzt werden, der zum Heizen geeignet ist (QC-PC-C02).

## Frühjahrsschule Thermoelektrik der Deutschen Thermoelektrischen Gesellschaft vom 7. - 11. April 2008 im IPM in Freiburg

Peltierelemente in der Anwendung  
Kühlen – Heizen – Regeln – Stromerzeugung

### Temperaturregelung mit Peltierelementen

Eine üblich Variante eines Regelverfahrens ist der PID-Regler.

Der P-Regler besteht ausschließlich aus einem proportionalen Anteil der Verstärkung  $K_p$ . Mit seinem Ausgangssignal  $u$  ist er proportional dem Eingangssignal  $e$ .

Der I-Regler ist auf Grund seiner (theoretisch) unendlichen Verstärkung ein genauer aber langsamer Regler. Er hinterlässt keine bleibende Regelabweichung.

Das D-Glied ist ein Differenzierer, der nur in Verbindung zu Reglern mit P- und/oder I-Verhalten als Regler eingesetzt wird. Er reagiert nicht auf die Regelabweichung, sondern nur auf deren Änderungsgeschwindigkeit.

Der PID-Regler besteht aus den Anteilen des P-Gliedes  $K_p$ , des I-Gliedes und des D-Gliedes.

Neuere Entwicklungen nutzen die **Fuzzy-Logik**. Danach verhält sich der Regler nicht nach einem fest vorgegebenen Regelschema, sondern er steuert die Zieltemperatur mit maximaler Geschwindigkeit an und nimmt die Stellgröße zum optimalen Zeitpunkt zurück, den der Regler selber nach mehrmaligen Zyklen ermittelt hat.

Bei der Genauigkeit eine Regelaufgabe ist die Abweichung des Sensors eine wichtige Größe. Genauigkeiten von unter  $0,2^\circ\text{C}$  sind nur mit genauen und geeichten Sensoren erreichbar. Der Controller ist meistens nicht der limitierende Faktor.

Bei der Auswahl eines geeigneten Reglers ist zu beurteilen, ob der Regler die Stromrichtung umkehren muß. Wenn er entweder immer nur gekühlt oder immer nur geheizt wird, kann man eine wesentlich kostengünstigere Lösung realisiert werden.