



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN**

**VIENNA  
UNIVERSITY OF  
TECHNOLOGY**

# **DIPLOMARBEIT**

## Master Thesis

# **Aufbau und Einsatz von Thermogeneratoren**

Unter der Leitung von

Ao. Univ. Prof. Dipl. - Ing. Dr. techn. Wolfgang Hadrian

Betreut von

Dipl.-Ing. Dr. techn. Mohamed Hassan

Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe - TU Wien

eingereicht an der Technischen Universität Wien

von

Redzep Sula  
Matr. Nr. 9825393

Wien, im November 2013

# Danksagung

Zu aller Erst möchte ich mich bei Prof. Dr. Wolfgang Hadrian für seine Hilfsbereitschaft, seine Geduld und freundliche Unterstützung bedanken.

Weiters bedanke ich mich insbesondere auch bei Dr. Mohamed Hassan, ohne dessen Hilfe diese Diplomarbeit nicht zu Stande gekommen wäre.

Ich bedanke mich ganz herzlich bei allen Freunden, die mir mit Rat und Tat zur Seite standen.

Einen großen Dank möchte ich meiner Frau aussprechen, die mich mit Geduld und Einfühlungsvermögen unterstützt und immer wieder aufgebaut hat, ohne deren Hilfe wäre vieles nicht möglich gewesen.

Weiters möchte ich auch meiner Schwiegerfamilie dafür danken, dass sie immer für mich da waren und mir mit viel Geduld entgegen gekommen sind.

Ein besonderer Dank ergeht an meine Familie, vor allem an meine Eltern und meine Brüder, die immer hinter mir gestanden sind, Verständnis zeigten und mich für dieses Studium motivierten.

# Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden der Aufbau thermoelektrischer Generatoren sowie deren Einsatzmöglichkeiten anhand von Beispielen beschrieben. Ausführlich sind zwei praktische Anwendungsgebiete aus verschiedenen Literaturen dargestellt.

Das erste Beispiel zeigt die Anwendung von Thermogeneratoren bei der Anlagenüberwachung. Dabei wird die gesamte Energie, die für die Messsensoren und für die drahtlose Übertragung der Messdaten vom Thermogenerator Typ MPG-D751 benötigt wird, zur Verfügung gestellt.

Im zweiten Beispiel ist die Demonstration einer thermoelektrischen Stromerzeugungsanlage mit Pelletfeuerung von einem Team des Bio Energy Centres dargestellt. Dabei wird aus der Abwärme ausreichend elektrische Leistung umgewandelt, die die Anlage für den Brennstofftransport zum Tagesbehälter und für die Verteilung der Wärme im Heizkreislauf benötigt. Zusätzlich wird die Wärme, die der Kaltseite des Thermogenerators entnommen wird, dem Kessel für die Warmwasseraufbereitung zugeführt.

Abschließend wird ein theoretisches Konzept für die Integration der Thermogeneratoren bei Gasthermen vorgestellt. Die Überprüfung und die technische Umsetzung dieses Konzeptes konnten bislang wegen mangelnder finanzieller Hilfsmittel nicht realisiert werden.

# Abstract

Within the scope of this paper the structure of thermoelectric generators as well as their typical fields of application have been examined by means of different examples. Two useful fields of application have been thoroughly described based on different references.

The first example demonstrates the application of thermogenerators for plant supervision. In this process the entire energy which is necessary for measuring sensors as well as for the wireless transmission of performance data of the thermogenerator type MPD-G751 is provided.

The second example serves as a demonstration of a thermoelectric electricity generation plant using a pellet furnace, which was presented by a team of the Bio Energy Centre. Thereby thermal discharge is converted into sufficient electric power for the transportation of combustible material to the daily tank and for the distribution of heat inside the heating circuit. Furthermore, heat, which is extracted from the cold part of the thermogenerator, is delivered into the boiler for the water heating system.

Concluding a theoretical concept for the integration of thermogenerators into gas furnaces is presented. However, the inspection and technical realization of this concept could not yet be implemented due to a lack of financial aid.

# Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1.....	7
1. Einleitung.....	7
Kapitel 2.....	8
2. Werkstoffeigenschaften.....	8
2.1 Elektrischer Widerstand .....	8
2.2 Thermische Werkstoffeigenschaften .....	10
2.3 Wärmeleitfähigkeit.....	10
2.4 Elektrische Eigenschaften der Metalle.....	13
2.5 Elektrische Leitfähigkeit .....	13
2.6 Thermoelektrische Effekte .....	16
Kapitel 3.....	19
3. Thermogeneratoren.....	19
3.1 Aufbau der Thermogeneratoren.....	19
3.2 Wirkungsgrad des thermoelektrischen Thermogenerators.....	22
3.3 Thermoelektrische Materialgüte - "Figure of Merit" ZT .....	23
3.4 Thermoelektrische Materialien.....	27
Kapitel 4.....	31
4. Der Einsatz von Thermogeneratoren bei Anlagenüberwachung.....	31
4.1 Energy Harversting .....	31
4.2 Aufbau und Funktion.....	32
4.2.1 Micropelt Thermogenerators und Module .....	33
4.2.2 Wärmefluss und Wärmewiderstand .....	35
4.2.3 Spannungs-Regelung und Versorgung .....	41

4.2.4 Transmittersystem .....	42
4.2.5 Sensoren .....	44
4.2.6 Der Einsatz des Systems für die Überwachung von ASE-Anlagen.....	45
Kapitel 5.....	47
5. Stromerzeugung mit Hilfe einer Pelletfeuerung .....	47
5.1. Aufbau eines Thermogenerators für eine Pelletfeuerung .....	47
5.2 Integration des Prototypen in der Gesamt Anlage der Pelletfeuerung .....	49
5.3 Versuchsergebnisse .....	52
5.4 Wärmeauskopplung über den Thermogenerator .....	52
5.5 Der Wirkungsgrad des Thermogenerators .....	54
5.6 Elektrischer Systemwirkungsgrad .....	56
Kapitel 6.....	58
6.1 Integration von Thermogeneratoren in einer Gastherme.....	58
Kapitel 7.....	60
7. Schlussfolgerungen.....	60
Literaturverzeichnis.....	61

# Kapitel 1

## 1. Einleitung

Fast zwei Drittel der primär eingesetzten Energie wird zu Abwärme. Das ist jener Anteil an Wärmeenergie der bei der Krafterzeugung, Wärmeerzeugung und in industriellen chemischen Prozessen gezielt oder ungewollt erzeugt wird und ungenützt in die Umwelt entweicht.

Unter dem Begriff „Energy Harvesting“ versteht man das Ernten von Energie aus unserer Umgebung. Mit Hilfe von thermoelektrischen Generatoren wird diese Energie, die also in Form von Abwärme auftritt, in elektrische Energie umgewandelt. Thermogeneratoren, auch TEGs genannt, zeichnen sich durch ihre Robustheit, Größenanpassung und Langlebigkeit aus und da sie kein Arbeitsmedium und keine beweglichen Teile benötigen, zusätzlich noch durch ihre Wartungsfreiheit.

Die ersten Anwendungen fanden die TEGs in der Raumfahrt, wo sie zuverlässig und langlebig für elektrischen Strom sorgten. Heutzutage versorgen TEGs, dank der Dünnschichttechnologie, energieautarke Sensoren mit Strom und werden bei der Überwachung von Anlagen eingesetzt. Durch die Entwicklung neuer Materialien, die ein  $ZT = \alpha^2 \sigma T / \lambda$  (Figur of Merit) über eins aufweist, wird intensiv über die Anwendungsgebiete des TEGs und der dafür notwendigen Technologien geforscht. In den letzten Jahren wurden Versuche zur Integration der Thermogeneratoren in Fahrzeugen durchgeführt. Die Idee dabei ist, die TEGs am Auspuff des Fahrzeuges einzubauen und mit dem Kühler einen Kreislauf herzustellen. In wärmetechnischen Anlagen, wie in Kraftwerken, versucht man die Wärmetauscher durch TEGs zu ersetzen.

Viele Anlagen, wie beispielsweise Pelletfeuerung und Gasthermen, brauchen für ihren Betrieb eine gewisse Höhe an elektrischer Leistung. Von der Abwärme die bei der Verbrennung entsteht, könnte man mit TEGs elektrische Leistung erzeugen, die den Eigenbedarf der Anlage an elektrischer Energie netzunabhängig macht.

Ein Team der Bio Energy Centre hat einen Prototyp mit Pelletfeuerung entwickelt, welcher die Anforderungen eines netzunabhängigen Betriebes erfüllt.

Gelingt es, neue Materialien mit hohen ZT-Werten und geringeren Herstellungskosten zu erzeugen, werden TEGs zukünftig überall dort, wo Abwärme entsteht, eine Anwendung finden.

# Kapitel 2

## 2. Werkstoffeigenschaften

### 2.1 Elektrischer Widerstand

Betrachten wir einen Draht, dessen Enden mit dem Ausgang einer Gleichstromquelle verbunden sind, so ist der Strom in ihm proportional zum Spannungsabfall über die Länge des Drahtes,  $U=R \cdot I$ . Der Widerstand  $R$  hängt von den Dimensionen ab, also von der Länge und Fläche des Drahtes und ist dabei unabhängig von der Größe des Stromes und des Spannungsabfalls.

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.1)$$

Der spezifische elektrische Widerstand  $\rho$  ist eine materialspezifische Größe. In allen Metallen stehen Ladungsträger mit hoher unveränderlicher Teilchendichte zu Verfügung, wobei die Werte von  $\rho$  zwar konstant, aber temperaturabhängig sind. Sein reziproker Wert  $\sigma$  wird als Leitfähigkeit bezeichnet,  $\sigma=1/\rho$ .

$$U = R \cdot I = \rho \frac{l}{A} \cdot I \quad (2.2)$$

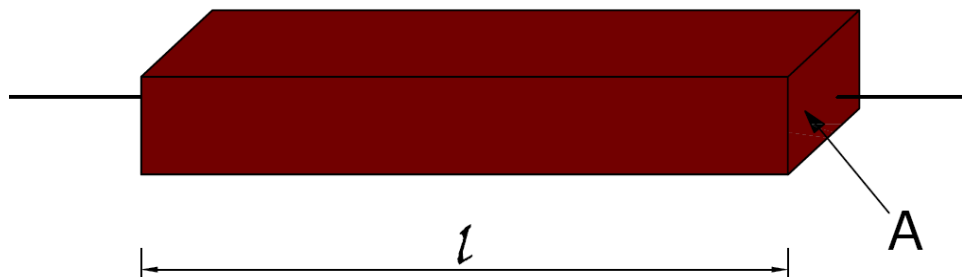


Abb.2.1 Abmessungen zur Widerstandsbestimmung



Aus der Gleichung 2.1 ergibt sich der spezifische Widerstand zu:

$$\rho = \frac{U}{l} \cdot \frac{A}{I} \quad (2.3)$$

wobei der Quotient  $U/l$  und  $A/I$  den Betrag der elektrischen Feldstärke bzw. der Stromdichte darstellt.

Zwischen den zwei Querschnittflächen deren Abstand  $l$  ist, tritt die Spannung  $U$ , somit wird eine Leistung von  $P = U \cdot I = I^2 \cdot R$  in Wärme umgesetzt (Joule Verluste). Aus der Gleichung 2.1 und 2.4 und den Beträgen  $E=U/l$  bzw.  $J=I/A$  können wir die Dichte der Joule-Verluste bezogen auf den Volumeninhalt  $V=A \cdot l$  bestimmen. [1]

$$\frac{U}{l} = \rho \cdot \frac{I}{A} \quad (2.4)$$

$$P = \frac{P}{V} = \frac{U \cdot I}{l \cdot A} = \rho \cdot J^2 \quad (2.5)$$

Wenn durch einen Leiter mit einem bestimmten Widerstand ein elektrischer Strom fließt, werden bei den Stößen der Elektronen mit den Rumpfatomen, Phononen angeregt und gleichzeitig findet dabei eine Umwandlung der kinetischen Energie in Wärme statt. Die Joule Verluste die in Form von Wärme abgestrahlt werden, müssen wir uns verteilt über den Leiter vorstellen. Diese Wärmeproduktion ist an jedem Ort proportional der dort herrschenden Stromdichte. [2]

## 2.2 Thermische Werkstoffeigenschaften

Hat ein Festkörper eine niedrigere Temperatur als seine Umgebung, so versucht dieser einen thermischen Gleichgewichtszustand mit seiner Umgebung herzustellen, in dem er solange Wärme aus seiner Umgebung aufnimmt bis er sich auf derselben Temperatur befindet und umgekehrt. Fügt man der Materie Wärme zu, so kann man drei wichtige Phänomene beobachten:

die Materie absorbiert Wärme und nimmt dabei eine höhere Temperatur an

die Materie dehnt sich bei Temperaturerhöhung aus und

die Materie zeigt das Phänomen der Wärmeleitung

## 2.3 Wärmeleitfähigkeit

Durch die Wärme können die Eigenschaften der Werkstoffe verschlechtert werden und dadurch reduzieren sich die Brauchbarkeitsdauer und die Anwendungsgebiete stark.

Damit die Funktionsfähigkeit der Stoffe in solchen Fällen nicht gestört und nicht eingeschränkt bleibt, muss die Wärme, die beispielsweise an einer Stelle im Metall entstanden oder von außen zugeführt ist, abgeleitet werden. Die Strömung der thermischen Energie innerhalb eines Körpers, von einem Ort zum anderen oder durch einen Festkörper unter dem Einfluss eines Temperaturgradienten, bezeichnen wir als Wärmeleitung. Dies ist bei Metallen in den meisten Fällen der bedeutsamste Vorgang.

Tritt durch ein Flächenstück  $A$  in der Zeit  $dt$  die Wärmemenge  $dQ$  hindurch, so ist  $dQ$  dem Temperaturgefälle in Richtung der Flächennormalen  $gradT$  proportional:

$$dQ = -\lambda \cdot gradT \cdot dt \cdot A \quad (2.6)$$

Das Vorzeichen (-) steht dafür, dass die Wärmemenge in Richtung abnehmender Temperatur fließt. Der Proportionalitätsfaktor  $\lambda$  wird als Wärmeleitfähigkeit bezeichnet. [3] Diese beschreibt den Wärmestrom  $dQ/dt$ , der senkrecht durch eine Fläche  $A$  unter Wirkung des Temperaturgefälles  $dT/dl$ , fließt. Siehe Abb.2.2.

$$\frac{dQ}{dt} \sim \frac{dt}{dl} \quad \frac{dQ}{dt} \perp A, \quad \frac{dQ}{dt} = \lambda \cdot A \frac{dt}{dl} = P \quad (2.7)$$

$$\lambda = \frac{dQ}{dt} \cdot \frac{dl}{dT} \cdot \frac{1}{A} \quad (2.8)$$

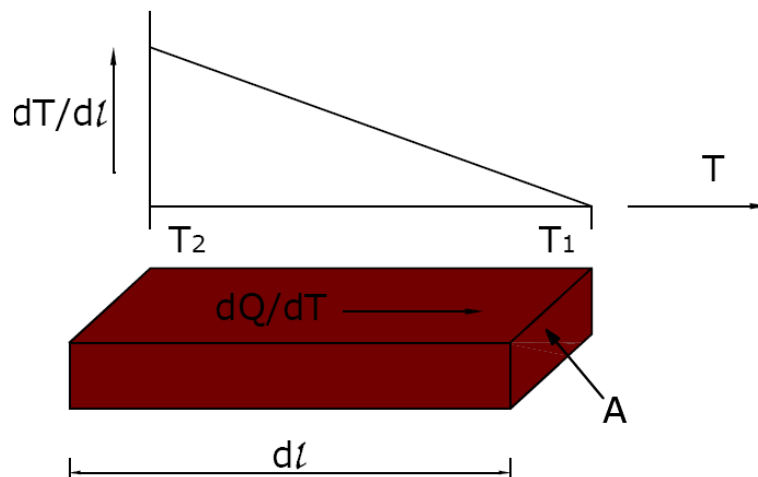


Abb.2.2 Zur Definition der Wärmeleitfähigkeit

Die freien Elektronen sind nicht nur für die elektrische Leitfähigkeit verantwortlich, sondern auch maßgebend für die Wärmeleitung. Die Wärme kann auch durch Gitterschwingungen (Phononen) transportiert werden. Dabei steigt die Wärmeleitfähigkeit mit der Dichte des Werkstoffes an. Demzufolge wird die Wärme einerseits durch Phononen, also Gitterschwingungen und andererseits durch das Elektronensystem transportiert.

$$\lambda = \lambda_{el} + \lambda_{phonon} \quad (2.9)$$

Da sowohl die Wärmeleitfähigkeit als auch die elektrische Leitfähigkeit von der Beweglichkeit  $\mu$  der freien Elektronen abhängig sind, besteht zwischen den Beiden die Verknüpfung, welche folglich durch das Wiedman-Franz-Lorenzsche Gesetz beschrieben wird:

$$\frac{\lambda}{\sigma \cdot T} = \frac{\pi^2 \cdot k^2}{3|e|^2} = 2,44 \times 10^{-8} \frac{V}{K} \quad (2.10)$$

Dieser Wert, bekannt als Lorenz-Zahl  $\lambda / \sigma \cdot T$  ist für alle Metalle eine konstante Größe. Es gibt Werkstoffe in dem der Anteil der Elektronen an der Leitfähigkeit reduziert ist (Halbleiter, Legierungen etc.). Hier ist das Wiedman-Franz-Lorenzsche-Gesetz nur für den elektronischen Anteil der Wärmeleitfähigkeit gültig. [4]

Obwohl in der Praxis die Gl.2.10 nur ungenau erfüllt ist, stellt sich trotzdem für viele Metalle eine brauchbare Näherung dar. Verwendet man die Elektronengasttheorie von P. Drude so erhält man die Lorenz-Zahl bei 293,5K zu:

$$\frac{3 \cdot k^2}{3|e|^2} = 2,22 \times 10^{-8} \frac{V}{K}. \quad (2.11)$$

Bei thermoelektrischen Materialien tendiert man zu Werkstoffen mit geringerer Wärmeleitfähigkeit, damit sowohl bei Thermogeneratoren, als auch bei der thermoelektrischen Kühlung ein hoher Temperaturgradient aufrecht erhalten wird.

Die Drude Theorie der Metalle besagt, dass sich ein Elektron nach jedem Stoß mit der Geschwindigkeit bewegt, die gleich der lokalen thermischen Geschwindigkeit ist: Je wärmer der Bereich in dem ein Stoß stattfindet, desto höher ist die Geschwindigkeit mit der die Elektronen den Ort des Stoßes verlassen.

Abb.2.3 zeigt eine schematische Darstellung der Beziehung zwischen Temperaturgradient und Wärmestrom. Die Elektronen die in der Mitte des Stabes von links ankommen, sind energiereicher als jene, die sich von rechts bewegen, da sie ihren Stoß im Bereich höherer Temperatur hatten. Dadurch ergibt sich effektiv ein Wärmestrom nach rechts. Diesen Vorgang nennt man Thermomodiffusion. [2]

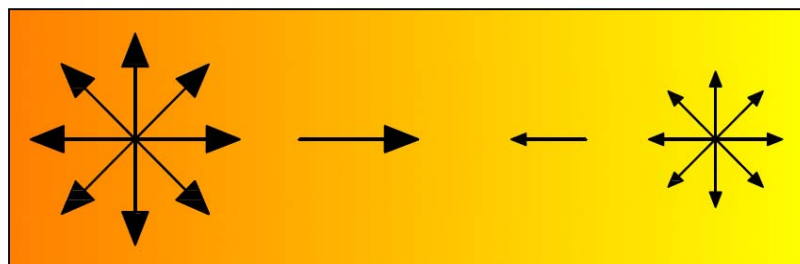


Abb.2.3 Darstellung der Beziehung zwischen Temperaturgradient und Wärmestrom.

## 2.4 Elektrische Eigenschaften der Metalle

Metalle und metallische Legierungen haben eine Reihe von günstigen Eigenschaften, die es ermöglichen sie als Leiter, Supraleiter, Widerstand und als Konstruktionswerkstoff anzuwenden. Die Metalle sind durch die hohe Konzentration beweglicher Elektronen gekennzeichnet, mit der die hohe elektrische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, der metallische Glanz und die plastische Verformbarkeit verbunden sind. Wie in 2.1 bereits erwähnt, besitzen Metalle spezifische Widerstände in der Ordnung von  $10^{-6}\Omega\text{cm}$  und  $10^{-5}\Omega\text{cm}$ . Bei Metallen gilt das Ohmsche Gesetz, d.h. der Strom wächst linear mit der Spannung. Bei tiefen Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt werden viele Metalle und Legierungen supraleitend. [5]

## 2.5 Elektrische Leitfähigkeit

Jedes Elektron eines Bandes besitzt einen bestimmten Wert an (kinetischer) Energie und somit eine bestimmte Geschwindigkeit. Die Richtung der Geschwindigkeitsvektoren ist nicht definiert d.h. es ist statistisch beliebig verteilt, solange auf die Elektronen keine elektrische Feldstärke einwirkt. Zu jeder Bewegung eines Elektrons in eine Richtung gehört eine andere antiparallele Bewegung d.h. in entgegengesetzter Richtung. Obwohl daher eine Elektronenbewegung existiert, fließt kein elektrischer Strom, da die mittlere Geschwindigkeit der Elektronen Null ist. Sobald wir ein elektrisches Feld der Feldstärke  $E$  anlegen, wird eine Kraft  $F = |e| \cdot E$  auf jedes freie Elektron ausgeübt d.h. es kommt zu einer Driftbewegung. Dabei entstehen Reflexionen der Elektronen durch die verschiedenen Gitterbaufehler und die temperaturbedingten Atomvibrationen. Die Kraft  $F$  beschleunigt die Elektronen entgegen der Feldrichtung aufgrund der negativen Ladung der Elektronen.

In der gleichen Zeit erfahren die Elektronen eine Reibung, die proportional zu ihrer Geschwindigkeit ist. Diese Reibung wird durch die Zusammenstöße mit den Atomrümpfen im Gitter und durch die Verunreinigungen im Metall verursacht. Die mittlere Geschwindigkeit der Elektronen ist durch:

$$v_n = -\mu_n \cdot E \quad \text{mit} \quad (2.12)$$

$$\mu_n = \frac{e}{m_n^*} \cdot \tau_n$$

(2.13)

Die Beweglichkeit  $\mu_n$  ist der Proportionalitätsfaktor zwischen mittlerer Geschwindigkeit und der Feldstärke, wobei  $e$  die Elektronenladung,  $\tau_n$  die Relaxationszeit und die Größe  $m_n^*$  die effektive Masse des Elektrons ist.

Für die Stromdichte ergibt sich

$$i = -e \cdot n \cdot v_n = n \cdot e \cdot \tau_n \cdot \frac{E}{m_n^*} \quad (2.14)$$

und stellt das Ohmsche Gesetz in differentieller Form dar.

In der Gl.2.14 ist die Stromdichte der Feldstärke  $E$  proportional mit dem Proportionalitätsfaktor  $\sigma$  die als elektrische Leitfähigkeit bezeichnet wird.

$$\sigma = n \cdot e^2 \cdot \frac{\tau_n}{m_n^*} \quad (2.15)$$

In der oberen Gleichung ist eindeutig zu erkennen, dass die Leitfähigkeit umso größer ist, je größer die mittlere freie Kollisionszeit (Relaxationszeit) ist. Und umgekehrt, je größer die effektive Masse  $m_n^*$ , desto kleiner die elektrische Leitfähigkeit. Da die effektive Masse  $m_n^*$  im Kristall richtungsabhängig ist, ist dadurch auch die elektrische Leitfähigkeit richtungsabhängig.

Bei den Kristallen mit niedrigerer Symmetrie ergeben sich unterschiedliche Werte der Leitfähigkeit, wenn man einen Stromfluss in Richtung der hexagonalen Hauptachse oder senkrecht dazu fließen lässt.

Bei Kristallen mit hoher Symmetrie ergibt sich ein isotropes Verhalten, d.h. die elektrische Leitfähigkeit und damit der spezifische Widerstand ( $\rho=1/\sigma$ ) sind richtungsunabhängig.

Es gibt zwei Streumechanismen die die ungestörte Elektronenausbreitung behindern:

Der erste ist die Streuung an Gitterbaufehlern und der zweite die Streuung an den temperaturbedingten Gittervibrationen.

Da die Zahl der Ladungsträger bei Metallen unabhängig von der Temperatur ist und darüber hinaus die Streuung an Gitterbaufehlern kaum von der Temperatur und die Gittervibrationen

kaum von den Gitterbaufehlern abhängt, ergibt sich der Gesamtwiderstand aus zwei Summanden:

$$\rho = \rho_G + \rho_T \quad (2.16)$$

$\rho_G$ -temperaturunabhängiger Anteil zufolge Streuung an fest vorgegebenen Gitterbaufehlern

$\rho_T$ -temperaturabhängiger Anteil zufolge Streuung an thermisch bedingten Atomschwingungen.

Der Summand  $\rho_G$ , kann durch das Legieren in reines Kupfer beeinflusst werden, d.h. durch Einbringen von Gitterbaufehlern. Der Widerstand verschwindet dann, wenn wir einen idealen Kristall haben, wo weder Störstellen eingebaut noch durch Temperaturbewegung die Atome aus ihrer Idealposition im Gitter ausgelenkt sind ( $T=0K$ ).

Bei tiefen Temperaturen ist der Widerstand zunächst proportional zu  $T^5$  und ist bei höheren Temperaturen schließlich linear proportional zu  $T$ .

Ein paar Beispiele für die Widerstandsänderung zufolge verschiedener Streumechanismen für die Elektronen:

Widerstandserhöhung: durch Legieren in reine Metalle werden unregelmäßige Störstellen eingebaut.

Der Übergang zu geordneten Kristallstrukturen führt zu Widerstandsverringern. Durch einen Glühprozess wird der betreffende Mischkristall mit statistisch ungeordnet gelagerten Atomen in ein Metalloid von hohem Ordnungsgrad überführt. So kommt es zu einer Widerstandserhöhung.

Durch Einbau von geometrischen Gitterfehlstellen, kommt es zu Widerstandserhöhung.

Ausleihen von geometrischen Gitterfehlstellen mit Hilfe eines Glühprozesses führen zu Widerstandsverringern.

Durch die Vergrößerung der thermischen Vibration infolge von Temperaturerhöhung kommt es zur Widerstandserhöhung. [3]

## 2.6 Thermoelektrische Effekte

Man kann drei Effekte unter den thermoelektrischen Effekten, bei denen eine Wechselwirkung zwischen elektrischen Strömen und Wärmeströmen entsteht, zusammenfassen. Die weitere Wechselwirkung mit Magnetfeldern wird durch die magnetothermischen Effekte eingeschlossen. Einer der bekanntesten thermoelektrischen Effekte ist der Seebeck -Effekt, der nach seinem Entdecker Thomas Johannes Seebeck (1821) benannt wurde. Stehen die Lötstellen zwei verschiedener Metalle A und B auf unterschiedliche Temperaturen, so entsteht eine Spannung, deren Größe vom Temperaturgradienten abhängt. (Abb.2.4) Sobald ein geschlossener Stromkreis mit ohmschen Widerständen hergestellt wird, fängt ein elektrischer Strom an zu fließen und es wird elektrische Leistung generiert.

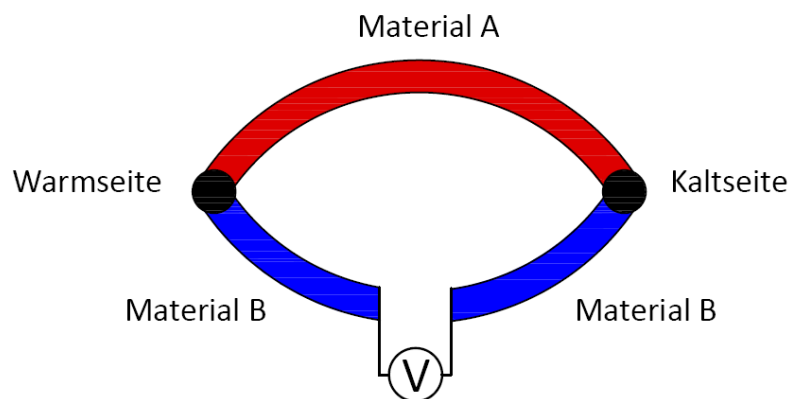


Abb.2.4 Seebeck-Effekt

$$\alpha = \frac{U_{th}}{\Delta T} \quad (2.17)$$

Im umgekehrten Fall, wenn wir eine Spannung von außen anlegen, wird es auf einer Seite der Lötstelle warm (Wärme wird abgegeben) und auf der anderen kalt (Wärme wird aufgenommen). D.h. es entsteht ein Temperaturgradient, der zu Kühlzwecken verwendet werden kann. [6] Dieser Effekt ist unter dem Namen Peltier - Effekt (J.Peltier, 1835) bekannt.



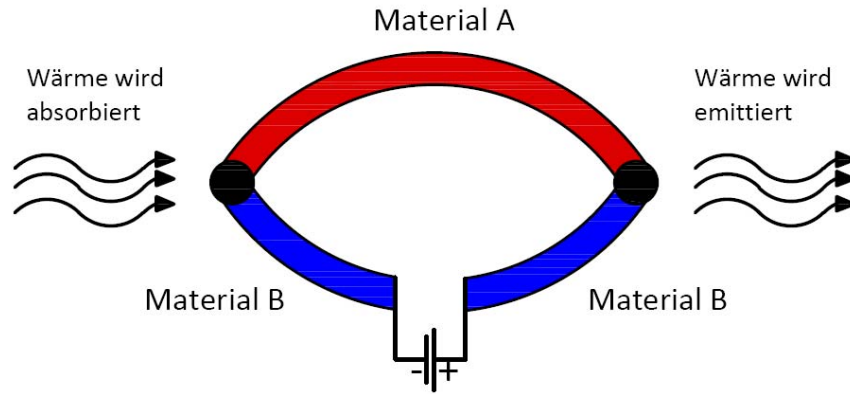


Abb.2.5 Peltier-Effek

Die Richtung des Wärmetransports ist von der Flussrichtung des elektrischen Stromes abhängig. Für den Wärmefluss gilt:

$$\dot{Q} = \Pi \cdot I = T \cdot \alpha \cdot I \quad (2.17)$$

wobei  $\Pi = T \cdot \alpha$  den Peltier-Koeffizient darstellt.

Bei dem dritten Effekt handelt es sich um den Thomson Effekt, der sich als Temperaturänderung beim Durchleiten eines elektrischen Stromes durch einen Draht manifestiert, wenn Teile eines Drahtes unterschiedlich warm sind. Fließt der Strom in Richtung fallender Temperatur, so erzeugt er Wärme und umgekehrt wird Kälte erzeugt. Dieser Effekt addiert sich zusätzlich zu der Erwärmung des elektrischen Leiters aufgrund des Ohmschen Widerstandes. [7]

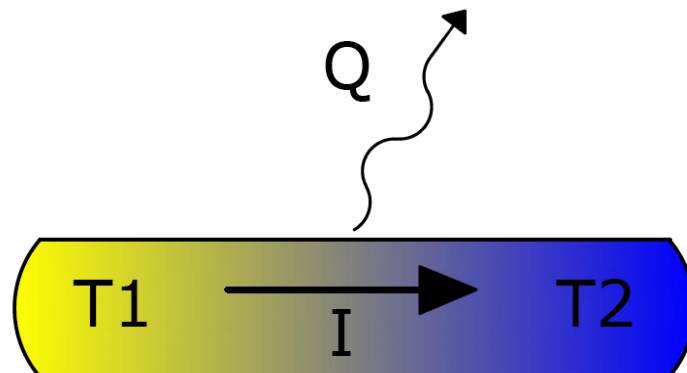


Abb.2.6 Thomson-Effekt

$$\Gamma = \frac{Q}{I \cdot \Delta T} = T \frac{\Delta \alpha}{\Delta T} \quad (2.18)$$

Der Zusammenhang zwischen den Seebeck und dem Thomsonkoeffizient ist in der Gl.2.18 wiedergegeben.

# Kapitel 3

## 3. Thermogeneratoren

Ein thermoelektrischer Konverter auch Thermogenerator genannt, kann Wärme in elektrische Energie umwandeln oder Wärme mittels elektrischer Energie transportieren. Basierend auf dem Seebeck-Effekt, kann man mit Hilfe eines Thermogenerators und somit aus Wärme Strom gewinnen und durch Strom (Peltier-Effekt) elektronische Bauteile kühlen.

### 3.1 Aufbau der Thermogeneratoren

Aufgrund der Materialeigenschaften werden meistens Halbleiter für die Herstellung der Thermogeneratoren (TEG) verwendet.

Der TEG, wie in Abb.3.1 dargestellt wird, ist aus thermoelektrischen Paaren n und p aufgebaut. Der Kontakt der beiden Paare und der weiteren Element-Paare wird durch die Elektroden hergestellt, die für die elektrische Verbindung der einzelnen Elemente verantwortlich sind.

Für die elektrische Isolation und als mechanischer Schutz der Element-Paare, dienen keramische Platten die auf der unteren und oberen Seite der Element-Paare montiert werden.

Die Keramikplatten müssen einerseits elektrisch isolierend sein und andererseits eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit aufweisen, um möglichst viel Wärme zu transportieren. Weiters müssen der Ausdehnungskoeffizient der Keramikplatten und der der Elektroden möglichst gleich sein, damit die bei der Aufwärmung und bei der Kühlung des TEG entstehende mechanische Spannung, keine Risse in der Verbindung bilden kann.

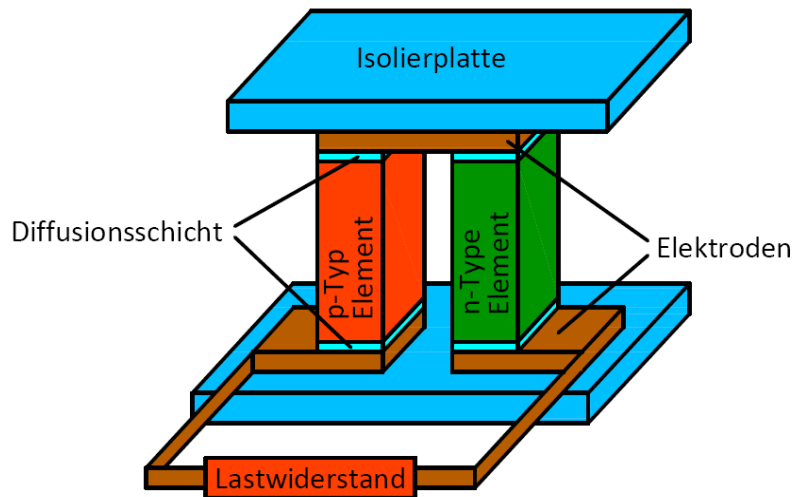


Abb.3.1 Aufbau des Thermogenerators

Die Auswahl des Elektrodenmaterials und der Dimensionen der Elektroden ist für den gesamten Wirkungsgrad der TEG mitverantwortlich. Daher muss das Material einen geringen elektrischen Widerstand und eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Erhöht man die Dicke der Elektroden um den Widerstand zu verringern, so erhöht sich gleichzeitig der Temperaturabfall an der Elektrode und letztendlich auch am Element-Paar.

Zwischen den thermoelektrischen Elementen und den Elektroden ist eine Diffusionsschicht vorgesehen, die für die Bindung der Materiale sorgt und eine Reaktion zwischen den beiden verhindert. Das wiederum erhöht den gesamten Innenwiderstand des TEGs.

Zu erwähnen ist auf jeden Fall die thermische Ausdehnung, die in der Höhe des Isoliermaterials liegt und mit dem des thermoelektrischen Elements übereinstimmen sollte.

Sollte der Ausdehnungskoeffizient unterschiedlich hoch sein, dann kann das bei Temperaturunterschieden von 600 K und bei thermischen Zyklen zu Rissbildungen führen, wie beim Übergang zwischen Isolationsmaterial und Elektrode. Damit erhöht sich nicht nur der thermische, sondern auch der elektrische Widerstand. Einen großen Beitrag bei der Energieumwandlung und Effizienz leistet der Kontaktwiderstand und deshalb sollte der so niedrig wie möglich gehalten werden.

Die Element-Paare oder Thermopaare werden in Serie geschaltet, siehe Abb.3.2, nicht nur um eine hohe Spannung zu erzielen, sondern um so auch Blindströme zu vermeiden. Die

Blindströme könnten aufgrund der verschiedenen erzeugten Spannungen in verschiedenen Thermopaaren bei unterschiedlichen Temperaturdifferenzen entstehen. [8]

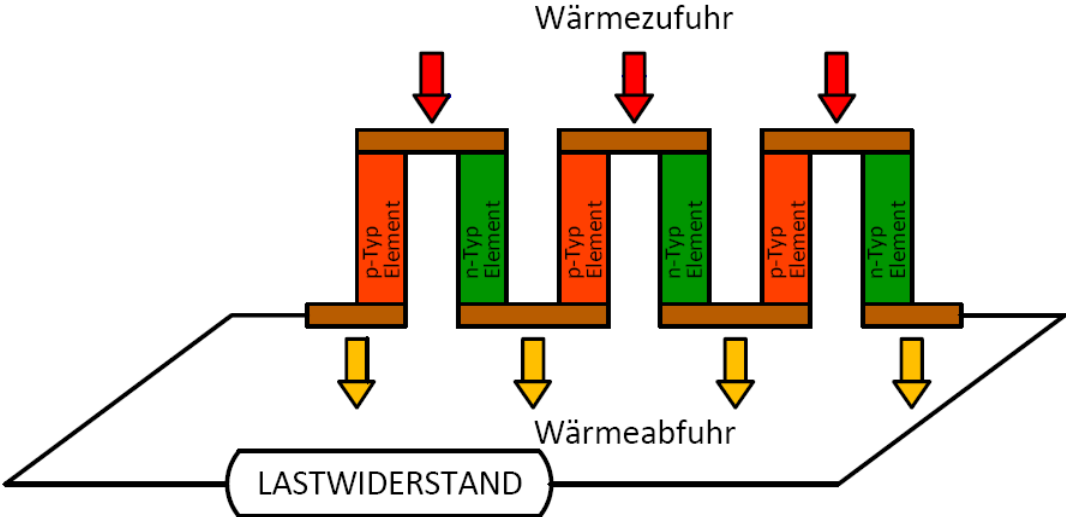


Abb.3.2 Serienschaltung der Element-Paare

## 3.2 Wirkungsgrad des thermoelektrischen Thermogenerators

Der Wirkungsgrad eines thermoelektrischen Generators wird wie folgt beschrieben:

$$\eta = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_h} \quad (3.1)$$

wobei  $P_{el}$  für die elektrische Ausgangsleistung des Generators steht und  $\dot{Q}_h$  die Wärmemenge ist, die auf der heißen Seite pro Zeit vom Generator aufgenommen wird.

Die elektrische Leistung  $P_{el}$  lässt sich einfach über den elektrischen Strom  $I$  und den Lastwiderstand  $R_L$  als:

$$P_{el} = I^2 \cdot R_L \quad (3.2)$$

darstellen.

Andererseits kann die elektrische Leistung durch den Differenz der Aufgenommene und des abgegebenen Wärmestroms (unter Vernachlässigung der Konvektion und Wärmestrahlung) wie folgt dargestellt werden:

$$P_{el} = \dot{Q}_h - \dot{Q}_c \quad (3.3)$$

### 3.3 Thermoelektrische Materialgüte - "Figure of Merit" ZT

Durch folgende charakteristische Kennzahlen wird die Leistung eines Thermogenerators beschrieben: seine Effizienz, seine gesamte elektrische Leistung und seine Leistungsdichte. Diese Kennzahlen werden durch verschiedene Parameter begrenzt. Sowohl Materialeigenschaften wie der Seebeck-Koeffizient und die elektrische und thermische Leitfähigkeit, als auch geometrische Einflussfaktoren sind zu erwähnen. Die Gütezahl oder Figure of Merit fasst diese Materialeigenschaften zusammen und wird oft zur Beschreibung eines thermoelektrischen Materials herangezogen.

Die elektrische Leistung, die am Lastwiderstand gewinnbar ist, lässt sich durch

$$P_{el} = U_L \cdot I = I^2 \cdot R_L = \left[ \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)(T_1 - T_2)}{R_L + R_i} \right]^2 \cdot R_L \quad (3.4)$$

ausdrücken. Der zugeführte Wärmestrom kann wie folgt beschrieben werden:

$$\dot{Q}_{zu} = K(T_1 - T_2) + (\alpha_p - \alpha_n)IT_1 - \frac{I^2 R_i}{2} \quad (3.5)$$

Die Temperaturen  $T_1$  und  $T_2$  sind die Temperaturen am heißen und kalten Ende des Thermogenerators. Siehe Abb. 3.3. Bei einer idealen Anbindung wäre  $T_1 = T_h$  und  $T_2 = T_c$  d.h. gleich der Temperaturen der Wärmequelle und Wärmesenke.  $\alpha_p$  und  $\alpha_n$  sind die Koeffizienten der beiden Element-Paare.  $R_i$  ist der Innenwiderstand und der gemittelte thermische Leitwert der beiden Schenkelpaare ist durch

$$K = \frac{\kappa_p \cdot A_p}{l_p} + \frac{\kappa_n \cdot A_n}{l_n} \quad (3.6)$$

angegeben.

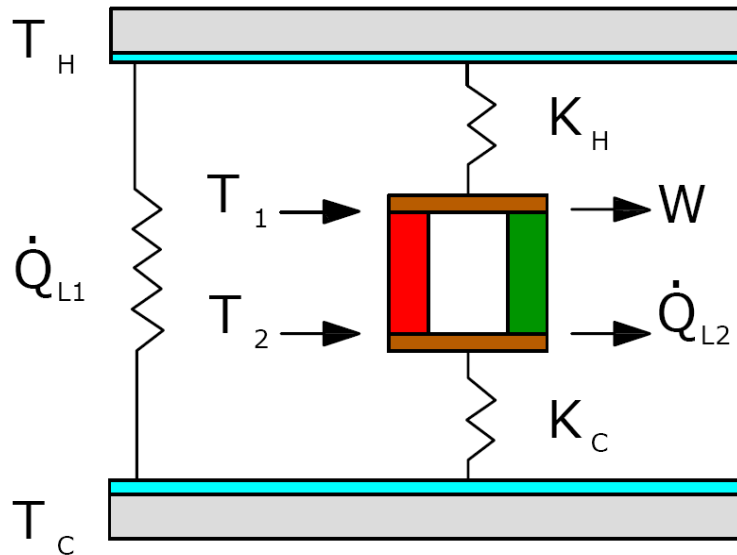


Abb.3.3 Darstellung eines Thermogenerators in Analogie zur Wärmekraftmaschine.[9]

Die maximale Leistung ist nun mit der Bedingung  $\partial P / \partial R_L = 0$  nach dem Lastwiderstand aufzulösen. Wie schon bekannt, ergibt sich für den optimalen Lastwiderstand  $R_L = R_i$ . Somit ist die gewinnbare Leistung am Lastwiderstand gleich der Hälfte der Leistung beim Carnot'schen Wirkungsgrad  $\eta_c = 1 - T_c / T_h$ . Genau so wie die Ermittlung der maximalen Leistung, kann auch die maximale Effizienz bestimmt werden. Für die Berechnung der maximalen Effizienz hat Ioffe noch das Verhältnis  $m = R_L / R_i$  dazu eingeführt [10] und bestimmt damit das optimale  $m$  zur Erreichung der maximal möglichen Effizienz.

$$M = \sqrt{1 + Z \frac{T_1 + T_2}{2}}. \quad (3.7)$$

Die maximale Umwandlungseffizienz eines TEG ist nach Ioffe durch das Produkt der idealen reversiblen thermodynamischen Prozesseffizienz und den Faktor, der durch die Joulsche Erwärmung und die thermische Leitfähigkeit (inkl. thermische Kontaktwiderstände) entstehende Energieverluste innerhalb des Bauteils, sind gegeben [11] durch:

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \frac{M - 1}{M + \frac{T_2}{T_1}} \quad (3.8)$$

Für die Gütezahl  $Z$  für beide Element-Paare des TEG bei angepasster Geometrie ergibt sich

$$Z = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2}{\left( \sqrt{\frac{\lambda_p}{\sigma_p}} + \sqrt{\frac{\lambda_n}{\sigma_n}} \right)^2}. \quad (3.9)$$



Da die Materialien der Element-Paare über ähnliche Eigenschaften verfügen, wird die Gütezahl meistens durch

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda} \quad (3.10)$$

ausgedrückt.[9]

Dabei wird meistens die Definition:  $ZT = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda} T$  bevorzugt, da sie keine Dimension besitzt. Durch die dimensionslose Leistungskennzahl  $ZT$  (figure of merit) wird die Leistungsfähigkeit eines bestimmten Materials für thermoelektrische Anwendungen bestimmt. Die obere Gleichung zeigt dass, die bestimmenden Größen der Leistungskennzahl, der Seebeckkoeffizient  $\alpha$ , die elektrische Leitfähigkeit  $\sigma$  und die thermische Leitfähigkeit  $\lambda$  sind, wobei durch  $T$  die Temperatur dargestellt wird.  $ZT$  Werte für p- und n- Halbleiter sind und Abb.3.7 getrennt dargestellt.

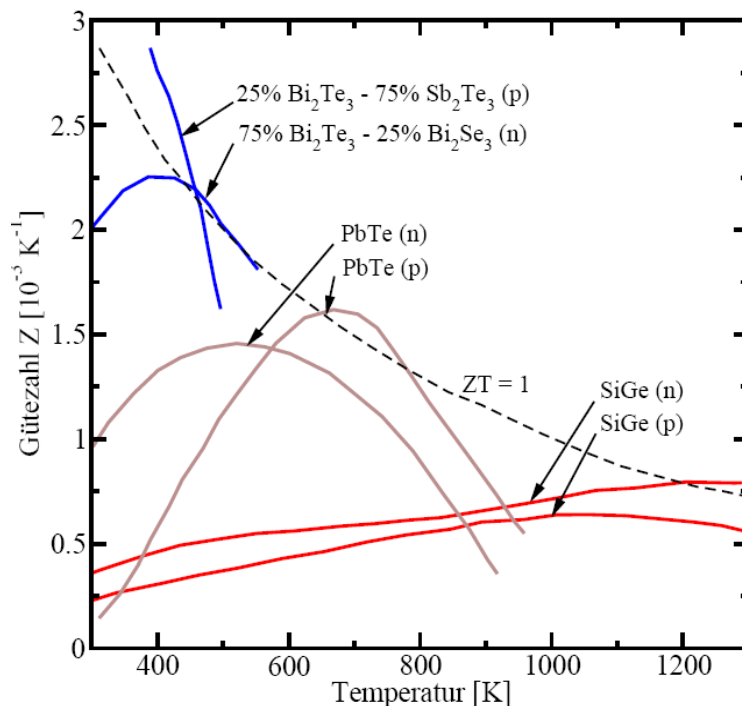


Abb.3.4 ZT-Werte in Abhängigkeit der Einsatztemperatur, nach [12], [9]

Somit sollte ein gutes thermoelektrisches Material neben einem hohen Seebeck-Koeffizienten, auch eine hohe elektrische Leitfähigkeit und eine niedrige thermische

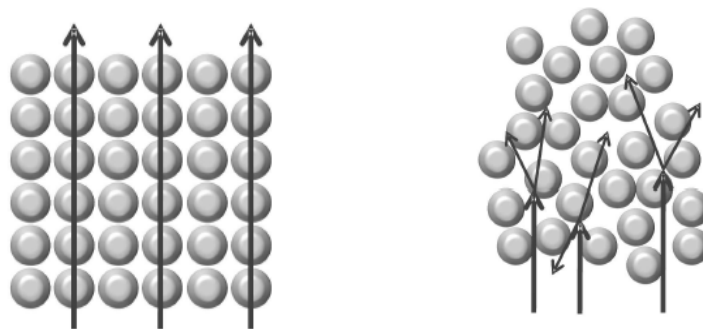
Leitfähigkeit besitzen. Da aber die Elektronen auch für den Wärmetransport mitverantwortlich sind, lassen sich die elektrische und die thermische Leitfähigkeit teilweise nicht unabhängig voneinander optimieren.

### 3.4 Thermoelektrische Materialien

Um eine Hohe Gütezahl zu erzielen, sollte die Materialien sowohl eine gute elektrische Leitfähigkeit als auch eine niedrige thermische Leitfähigkeit aufweisen. Bei den Metallen lassen sich diese Eigenschaften nicht unabhängig voneinander optimieren, da es zu einer deutlichen Überlagerung der Wärmeleitenden Komponente des Kristallgitters durch eine höhere Komponente der Wärmeleitung, durch freie Elektronen kommt. Somit geschieht der Wärmetransport in Metallen ausschließlich durch die freien Elektronen ( $\lambda_{ges} = \lambda_{el}$ ).

Bei den Halbleitern wird die thermische Leitfähigkeit sowohl von den freien Ladungsträgern (Elektronen oder Löcher) als auch von Phononen transportiert. Im Gegensatz zu den Metallen ist bei den Halbleitern der Beitrag der Phononen zur thermischen Leitfähigkeit von der elektrischen Leitfähigkeit trennbar ( $\lambda_{ges} = \lambda_{el} + \lambda_{ph}$ ). [12]

Dieser Ansatz zur Optimierung der Gütezahl ZT beruht auf einer Reduktion des Wärmetransportes durch Phononen, welcher bereits 1979 von Glen erkannt wurde und in seinem "Electron Crystal and Phonon Glass Model" (ECPG) beschrieben ist. [14] Diesem Modell entsprechend, soll das thermoelektrische Material aus phononischer Sicht, Wege von geringerer Ordnungsstruktur, sprich kurze freie Weglängen und damit eine geringere Wärmeleitfähigkeit, ähnlich wie in amorphen Festkörpern aufweisen und für die Elektronen hingegen, soll große frei Weglängen entlang gut definierter Bahnen, ähnlich wie die Struktur eines Kristalls ermöglichen. Siehe Abb.3.5.



Das ideale thermoelektrische Material  
Sicht der Ladungsträger

Das ideale thermoelektrische Material aus  
aus Sicht der Phononen

Abb.3.5 Electron Crystal and Phonon Glass Model [9]

Einer dieser Materialien die diesen Ansatz erfüllen sind Skutterudite, vor allem wegen ihres Kristallgitters. Das kubische Gitter besitzt viele Freiräume in die Fremdatome, meist seltene Erden, eingebracht werden können. Da die Füllatome schwach an ihre Nachbarn gebunden sind, können sie in diesen Käfigen leicht zu unabhängigen Schwingungen angeregt werden. Somit stellen die Atome Streuzentren für Phononen dar, welche die Wärmeleitfähigkeit des Gitters drastisch senken ohne die elektronischen Eigenschaften des Materials maßgeblich zu beeinflussen. [8] Andere Materialien, die auch solche Eigenschaften besitzen, sind Clathrate. [15]

Weitere Methoden die zur Senkung der Wärmeleitfähigkeit beitragen, basieren in der Erhöhung der Phononenstreuung durch Nanostrukturierung des Materials, wie durch das Einbringen vieler Korngrenzen. Das thermoelektrische Material wird beispielsweise gemahlen und mit Hilfe verschiedener Kurzzeitintervallverfahren konsolidiert. Die Nanostrukturierung erfolgt künstlich in Schichtsystemen oder durch Zugabe von Nanopartikeln. [16]

Die Erhöhung des Seebeck-Koeffizienten durch angepasste Dotierung und Manipulation der elektronischen Struktur im Bereich der Fermie-Energie, führt zur Erhöhung der Gütezahl  $ZT$ . Somit ist der Seebeck-Koeffizient von der Konzentration an Fremdatomen im Halbleiter (Dotierung) abhängig. Der Seebeck-Koeffizient ist positiv für p-dotierte Materialien und negativ für n-dotierte Materialien. In Abb.3.6 ist eindeutig zu erkennen, dass hohe  $ZT$ -Werte mit Halbleitern, die eine Ladungsträgerkonzentration in der Höhe von etwa  $10^{19}/\text{cm}^3$  aufweisen, zu erreichen sind.

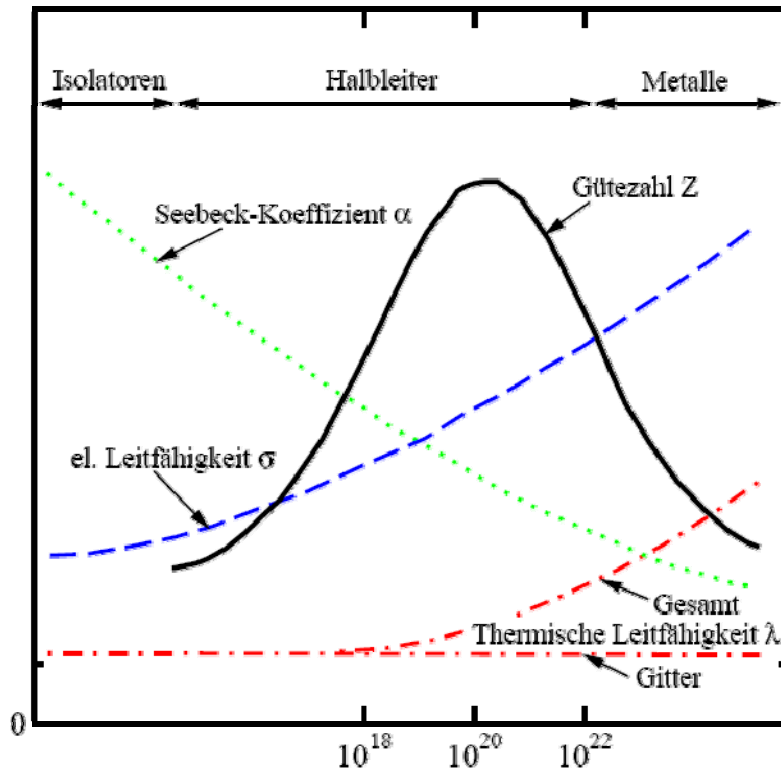


Abb.3.6 Qualitativer Einfluss der Ladungsträgerkonzentration auf den Seebeck-Koeffizient, der thermischen und elektrischen Leitfähigkeit und Gütezahl  $Z$ , nach [12], [9]

Aufgrund der elektrischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften der Materialien, ist ein bestimmtes Material nur in einem bestimmten Temperaturbereich einsetzbar.

Bei niedrigeren Temperaturen kommen Materialien der V. Hauptgruppe, Bismut Bi und Antimon Sb sowie deren Legierungen zum Einsatz. Bismut Bi ist im elementaren Zustand ein Metall aber die Legierung BiSb ist halbleitend.  $\text{Bi}_{0,88}\text{Sb}_{0,12}$  weist ein optimalen  $ZT$ -Wert von ca.0,88 bei 100 K.

Für Temperaturen um die 300 K werden überwiegend V-IV-Verbindungen auf Basis des  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  Bismuth-Tellurid verwendet. Bei einem Bi-Überschuss ist  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  p-leitend und bei einem Te Überschuss n-leitend. Die Mischkristallreihen die  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  mit  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  (Bismuth-Selenide) und  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  bilden können, sind wesentlich effizienter als  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  allein. Als optimale Verbindungen innerhalb des  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ -  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ -  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  Systems haben sich die Verbindungen  $\text{Bi}_2(\text{Te}_{0,9}\text{Se}_{0,1})_3$  für n-leitendes und  $(\text{Bi}_{0,25}\text{Sb}_{0,75})_2\text{Te}_3$  für p-leitendes herausgestellt.

Für den Einsatz bei Temperaturen von 600 bis 1200 K eignen sich PbTe (Bleitellurid) bzw. SiGe (Silizium-Germanium)- Legierungen. PbTe wird hauptsächlich bei Temperaturen von 550 bis 800 K eingesetzt und lässt sich durch Zugabe von Alkalimetallen (Akzeptoren z.B. Na)

bzw. Halogenen (Donatoren, z.B. I) dotieren. Sowie bei der  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  Verbindung zeigt sich auch bei der  $\text{PbTe}$  Verbindung, dass Mischkristalle bessere thermoelektrische Eigenschaften aufweisen als  $\text{PbTe}$  alleine. Es gibt zwei Materialgruppen die innerhalb dieser Mischkristalle verstärkt weiterentwickelt wurden: TAGS sind Verbindungen vom Typ  $(\text{AgSbTe}_2)_{1-x}(\text{GeTe})_x$  und LAST sind Verbindungen vom Typ  $\text{Ag}_{1-x}\text{Pb}_m\text{SbTe}_{2+m}$ . Thermoelektrische Materialien die auf  $\text{SiGe}$ -Legierungen (vorzugsweise  $\text{Si}_{0,8}\text{Ge}_{0,2}$  und  $\text{Si}_{0,7}\text{Ge}_{0,3}$ ) basieren, können bei Temperaturen bis maximal 1300 K eingesetzt werden.[13]

Neue Materialien die aktuell für den Bereich dieser Temperaturen intensiv erforscht werden, sind etwa Skutterudite auf Basis von  $\text{CoSb}_3$  und sogenannte Halb-Heusler-Verbindungen.

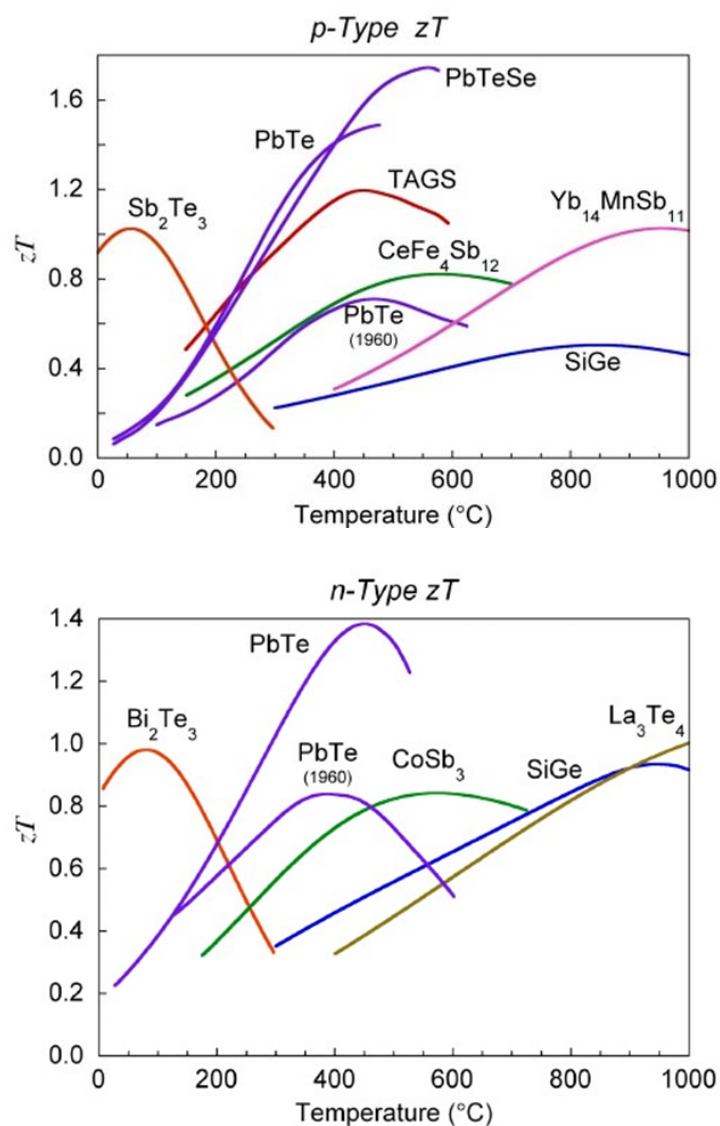


Abb.3.7  $zT$  für thermoelektrische Materialien in Abhängigkeit der Temperatur[17].

# Kapitel 4

## 4. Der Einsatz von Thermogeneratoren bei Anlagenüberwachung [18]

### 4.1 Energy Harversting

Unter dem Begriff „Energy Harversting“ versteht man das Ernten von Energie aus unserer Umgebung. Der Thermogenerator, der hier zur Umwandlung der Energie zur Verfügung steht, ist ein wichtiger Teil des Energy Harversting Systems. Die Hauptaufgabe beim Energy Harversting für die Mikroelektronik besteht in erster Linie nicht darin, möglichst viel Energie zu ernten, sondern darin in Verbindung mit energieeffizienter Elektronik, eine oder mehrere Anwendungen mit der zur Verfügung stehenden Energie effektiv und wartungsfrei zu betreiben. Für die Entwicklung eines autark arbeitenden Systems, müssen alle Komponenten die sich im Prozess beteiligen, inklusive der Software, bezüglich ihres Leistungsverbrauchs und ihrer Konfigurationsmöglichkeiten genauestens berechnet und mit dem möglichen Harvester plus Energiespeicher, sowie dem Einsatzzweck ins Gleichgewicht gebracht werden.

## 4.2 Aufbau und Funktion

Mit der durch den Thermogenerator bereitgestellten Leistung, werden ein Drahtloses Kommunikationsmodul und mehrere Sensoren mit Energie versorgt.

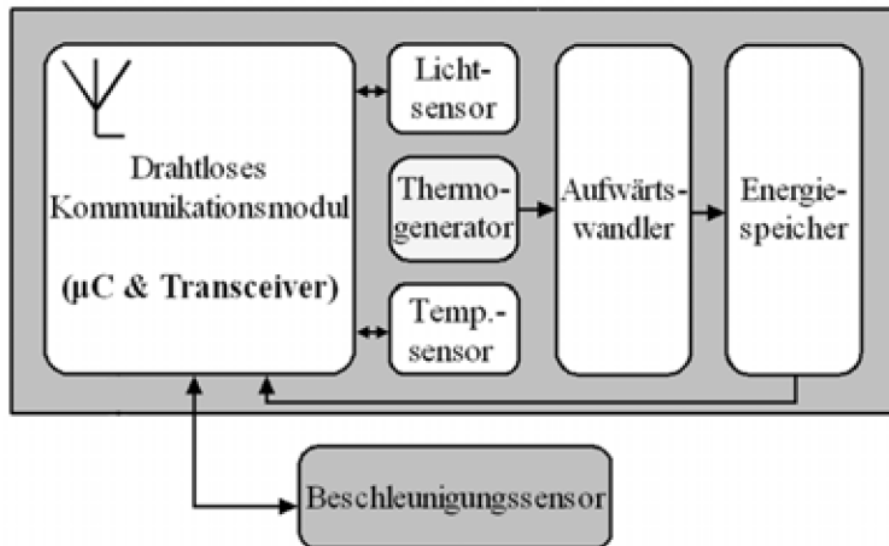


Abb.4.1 Prinzipschaltbild des thermogeneratorbetriebenen Systems

Die vom Thermogenerator erzeugte elektrische Spannung, wird mit Hilfe eines Aufwärtswandlers erhöht und nach dem sie gespeichert ist, wird sie als Versorgungsspannung für das gesamte System genutzt. Die von den Sensoren aufgenommenen Messdaten, werden durch das Kommunikationsmodul mittels eines energieoptimierten Protokolls an einen USB-Empfänger gesendet und können an einem Computer ausgewertet. Daran werden noch Licht-, Temperatur-, und Beschleunigungssensoren gekoppelt.



## 4.2.1 Micropelt Thermogenerators und Module

Da auch bei geringen Temperaturunterschieden eine elektrische Spannung erzeugt werden kann, die für das System von Nutzen ist, wurde der Thermogenerator vom Typ MPG-D751 der Firma Micropelt gewählt.



Abb.4.2 Thermogenerator MPG-D751 von Micropelt.

Dieser Typ von Thermogenerator, der dem Seebeck-Effekt entsprechend auf Halbleiterbasis arbeitet, hat eine höhere Leistung als konventionelle Elemente. Die Thermogeneratoren sind aus zwei mikrostrukturierten Dünnschichten die miteinander verlötet sind, aufgebaut und haben in etwa eine 400-fach höhere Spannung pro  $\text{mm}^2$  als herkömmliche Seebeck-Elemente.

Mit Strukturen von  $35\mu\text{m}$  sind das bis zu 100 Thermopaare pro  $\text{mm}^2$  und dies entspricht der 50- bis 100-fachen Packungsdichte herkömmlicher Elemente.

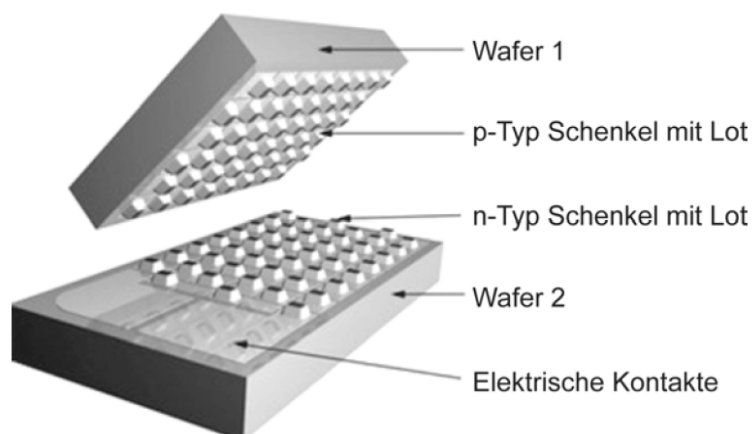


Abb.4.3 Aufbau der Thermogenerator-Chips der Firma Micropelt.

Der Seebeck-Koeffizient von MPG-D751 liegt bei  $\alpha = 0.14 \text{ V/K}$  und daraus ergibt sich eine Spannung von etwa 1.4V schon bei einem Temperaturunterschied von 10K.

$$U_{\text{Th}} = \alpha \cdot \Delta T = 0.14 \text{ V/K} \cdot 10 \text{ K} = 1.4 \text{ V} \quad (4.1)$$

Diese Spannung, ist die Leerlaufspannung, die direkt an den Ausgangsklemmen des Thermogenerators liegt. Also kann der Thermogenerator als eine reale Spannungsquelle mit einem Innenwiderstand  $R_i$  (Abb.4.4) dargestellt werden.

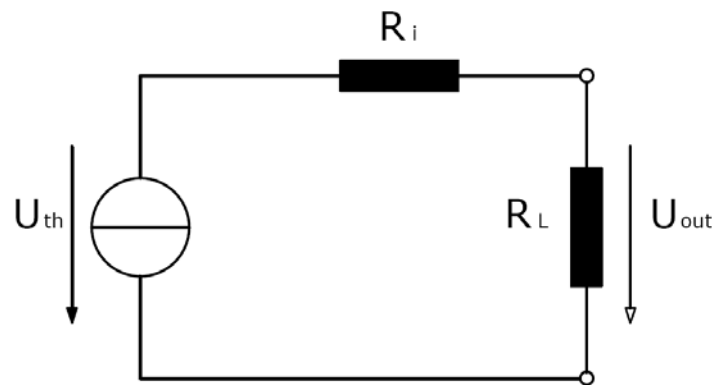
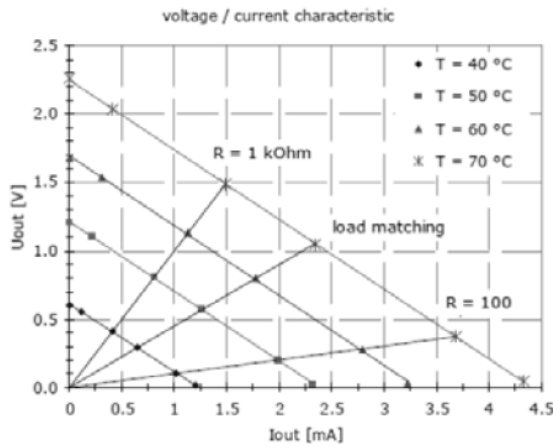


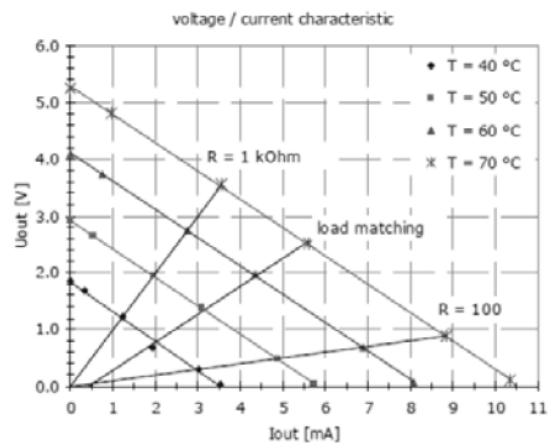
Abb.4.4 Ersatzschaltbild des Thermogenerators.

Sobald ein Lastwiderstand  $R_L = R_i$  am Ausgang angeschlossen wird, liegt nur noch die halbe Leerlaufspannung vor. Der Lastwiderstand wird in der Regel in etwa gleich groß wie der Innenwiderstand gewählt, da die Leistung des Thermogenerators in dem Fall am höchsten ist.

Anhand der in der Abb.4.5 dargestellten Kennlinien wird deutlich, dass bei einem Lastwiderstand von ca.  $350 \Omega$  der TEG die maximale Leistung liefert. Der Innenwiderstand liegt dabei laut Datenblatt des MPG-D751 bei einer Temperatur von 23 K bei etwa  $300 \Omega$ .



Natürliche Konvektion



Erzwungene Konvektion

Abb.4.5 Leistungskurven des Thermogenerators MPG-D51

## 4.2.2 Wärmefluss und Wärmewiderstand

Um einen hohen Temperaturgradienten zu erzielen, sollte ein guter Wärmefluss zum Thermogenerator auf der Warmseite und eine hohe Ableitung der Wärme von der Kaltseite, bestehen. Damit eine maximale Leistung genutzt werden kann, muss auf den Wärmepfad besonders Wert gelegt werden. Ist der Temperaturgradient am Thermogenerator groß, so haben wir einen hohen Wärmefluss durch den Wärmepfad. Um dabei einen hohen Wärmefluss zu erzielen, müssen wir Materialien auswählen, die einen kleinen Wärmewiderstand aufweisen.

In der Abb. 4.6 ist der Wärmepfad des gesamten Systems dargestellt, der hauptsächlich aus einer Aluminiumbasis, dem Thermogenerator, einem Aluminiumblock und einem drauf liegenden Kühlkörper besteht.

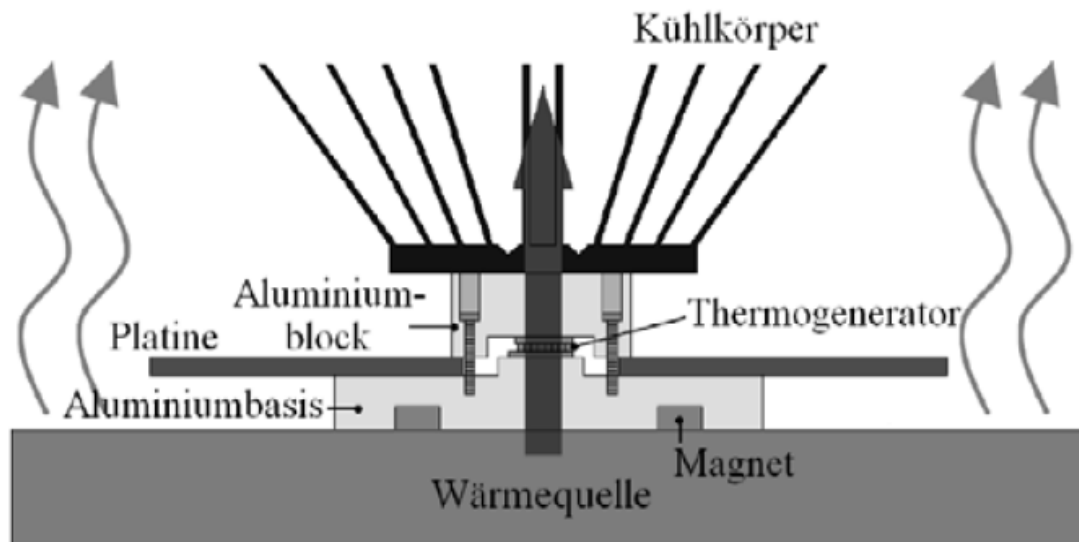


Abb.4.6 Wärmepfad des Energy-Harvesting-Transmittersystems.

### Berechnung des Wärmewiderstandes der Aluminiumbasis

Der Wärmetransport von der Wärmequelle zum Thermogenerator erfolgt über die Aluminiumbasis. Auf der Aluminiumbasis befindet sich eine kleine Erhebung, auf der direkt der Thermogenerator befestigt ist. Auf einem Aluminiumblock, der direkt über dem Thermogenerator liegt, wird aus Platzgründen und für eine bessere Handhabung der Kühlkörper befestigt. Die Höhe der Aluminiumbasis ist so gewählt, dass sie mit dem Aluminiumblock zusammen verschraubt werden kann. Auf der Unterseite sind zwei Vertiefungen eingefräst für das Aufbringen von Magneten. Somit kann das gesamte Transmittersystem auf metallischen Wärmequellen auch durch die Magneten befestigt werden.

Um genügend Platz für das Aufbringen der elektronischen Bauelemente zu sichern und eine starke Erwärmung der Bauteile zu verhindern, wird die Platine größer als die Aluminiumbasis dimensioniert. Erwähnenswert ist, dass die meisten der verwendeten Materialien auf die Platine eine maximale Temperatur von 85°C zulassen.

Somit ergibt sich eine Fläche von  $A_{\text{Basis}} = 40\text{mm} \cdot 1880\text{mm} = 1880\text{ mm}^2$  und eine Höhe von  $L_{\text{Basis}} = 4,5\text{mm}$  für die Aluminiumbasis. Als Material wurde eine Aluminiumlegierung AL6063 (AlMg0,7Si) für die Basis, den Block und den Kühlkörper verwendet. Die Wärmeleitfähigkeit dieser Legierung liegt bei  $\lambda = 200\text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$  und somit lässt sich der Wärmewiderstand der Aluminiumbasis wie folgt berechnen:

$$R_{Th,Basis} = \frac{L_{Basis}}{\lambda \cdot A_{Basis}} = \frac{4,5mm}{200 \frac{W}{K \cdot m} \cdot 1880mm^2} = 0,01197 \frac{K}{W} \quad (4.2)$$

Da nicht der gesamte Teil des Wärmestroms durch die Aluminiumbasis zum Thermogenerator gelangt, ergibt sich für den Wärmewiderstand, der sich aus den Flächenverhältnissen der Aluminiumbasis zur unteren Site des Thermogenerator zusammensetzt, folgendes:

$$R'_{Th,Basis} = \frac{A_{Basis}}{A_{TEG}} \cdot R_{Th,Basis} = \frac{1880mm^2}{14,3mm^2} \cdot 0,01197 \frac{K}{W} = 01,58 \frac{K}{W} \quad (4.3)$$

### **Wärmewiderstand des Thermogenerators**

Der Thermogenerator vom Typ MPG-D751 beträgt einen Widerstand von maximal 12,5 K/W. Auf die obere Seite wird der Thermogenerator, empfohlen von Micropelt, mit einer Graphitfolie HT2505 ca. 130  $\mu m$  dünn von der Firma GrafTech, befestigt. Die Graphitfolie, die eine Wärmeleitfähigkeit von 16W/(K·m) besitzt, wird mit einer Wärmeleitpaste auf beiden Seiten versehen und dient gleichzeitig als Schutz vor mechanischen Belastungen des Aluminiumblockes.

### **Wärmewiderstand des Kühlkörpers**

Der Wärmewiderstand des Kühlkörpers ATS-50270P-C2-R0 der Firma Advanced Thermal Solution beträgt maximal  $R_{Th,Kk} = 3,7$  K/W. Das verwendete Material besteht wie bereits erwähnt aus Aluminium, auf dem eine eloxierte Schutzschicht aufgetragen ist, um eine bessere Abstrahlung der Wärme zu erzielen. Um eine große Gesamtfläche und damit eine noch höhere Wärmeabstrahlung zu erreichen, sind die Lamellen des Kühlkörpers fächerförmig aufgebaut.

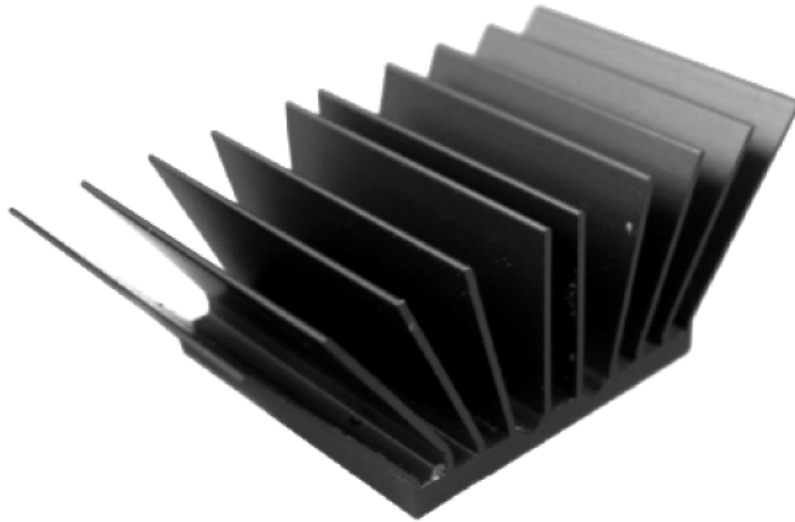


Abb.4.7 Passender Kühlkörper der Firma Advanced Thermal Solution.

#### **Wärmewiderstand des Aluminiumblockes**

Aus technischen Gründen ist der Kühlkörper auf einem Aluminiumblock befestigt. Das wiederum führt zu einer Erhöhung des Gesamtwiderstands. Deshalb ist es notwendig den Aluminiumblock so klein wie möglich, sofern die technische Realisierung es erlaubt, zu bauen. Da aber der Thermogenerator und beide Temperatursensoren unter dem Block und der Kühlkörper darauf platziert werden muss, sind die Aufbaudimensionen des Aluminiumblockes dadurch vorgegeben.

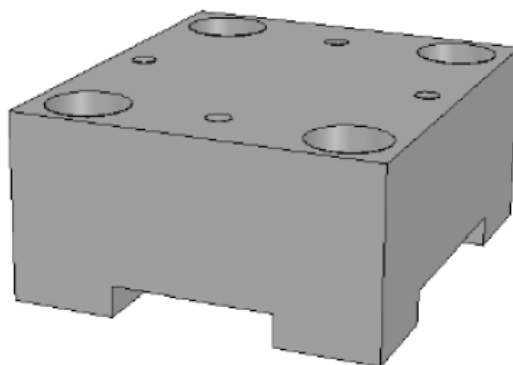


Abb.4.8 Aluminiumblock zur Befestigung des Kühlkörpers.

$$\dot{Q}_{TEG} = \frac{\Delta T}{R_{Th,TEG}} = \frac{2,2K}{12,5 \frac{K}{W}} = 0,176W$$

Die Verbindung zwischen Kühlkörper und Aluminiumblock und dann schließlich mit der Aluminiumbasis erfolgt durch Schrauben.

Der Block hat eine Fläche von  $A_{Block} = 17,8 \text{ mm} \cdot 20,6 \text{ mm} = 366,7 \text{ mm}^2$  und eine Höhe von  $L_{Block} = 7,9 \text{ mm}$ . Damit haben wir einen Wärmewiderstand wie folgt:

$$R_{Th,Block} = \frac{L_{Block}}{\lambda \cdot A_{Block}} = \frac{7,9mm}{200 \frac{W}{K \cdot m} \cdot 366,7mm^2} = 0,11 \frac{K}{W} \quad (4.4)$$

Unter der Berücksichtigung der Kontaktflächen zwischen dem Thermogenerator und des Aluminiumblockes, lässt sich der Wärmewiderstand wie folgt berechnen:

$$R'_{Th,Block} = \frac{A_{Block}}{A_{TEG}} \cdot R_{Th,Block} = \frac{366,7mm^2}{11,23mm^2} \cdot 0,11 \frac{K}{W} = 3,59 \frac{K}{W} \quad (4.5)$$

### Betriebstemperatur und Gesamtwiderstand

Auf dem, im Aufwärtswandler befindliche Transistor, muss eine Spannung von mindestens 0,3 V liegen, damit der Transistor aufsperrt. Mit den Werten des Thermogenerators MPG-D751 für den Seebeck-Koeffizient mit  $\alpha = 0,140 \text{ V/K}$ , ergibt sich für eine Spannung von 0,3 V folgender Temperaturunterschied:

$$U_{Th} = \alpha \cdot \Delta T \quad (4.6)$$

$$\Delta T = \frac{U_{TH}}{\alpha} = \frac{0,3V}{0,14 \frac{V}{K}} = 2,2K \quad (4.7)$$

Für den Temperaturgradient sollte ein Wärmestrom von mindestens:

$$\dot{Q}_{TEG} = \frac{\Delta T}{R_{Th,TEG}} = \frac{2,2K}{12,5 \frac{K}{W}} = 0,176W \quad (4.8)$$

0,176 W fließen, damit eine Spannung von 0,3 V erzeugt wird. Weiters ist der minimale Temperaturunterschied zwischen Wärmequelle und Wärmesenke zu berechnen. Ausgehend von dem Wärmefluss des Thermogenerators folgt:

$$\dot{Q}_{Ges} = \frac{\Delta T}{R_{Th,Ges}} \geq \dot{Q}_{TEG} \quad (4.9)$$

$R_{Th,Ges}$  ist die Summe der Wärmewiderstände des gesamten Wärmepfades. Der Wärmewiderstand der Wärmeleitpaste und Graphitfolie wird nicht mitberücksichtigt.

$$\begin{aligned} R_{TH,GES} &= R'_{Th,Basis} + R_{Th,TEG} + R_{Th,Kk} + R'_{Th,Block} = \\ &= 1,58 \frac{K}{W} + 12,5 \frac{K}{W} + 3,7 \frac{K}{W} + 3,59 \frac{K}{W} = 21,37 \frac{K}{W} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Somit ergibt sich ein Temperaturunterschied von:

$$\Delta T = T_{Hot} - T_{Cold} \geq \dot{Q}_{TEG} \cdot R_{Th,Ges} = 0,176W \cdot 21,37 \frac{K}{W} = 3,76K \quad (4.11)$$

Um den Aufwärtswandler betreiben zu können, bei einer Umgebungstemperatur von 23 °C, ergibt sich folgende minimale Temperatur der Wärmequelle:

$$T_{Hot} \geq \dot{Q}_{TEG} \cdot R_{Th,Ges} + T_{Cold} = 3,76^{\circ}C + 23^{\circ}C \approx 27^{\circ}C \quad (4.12)$$

Da aber nach kürzerer Zeit der Aluminiumblock und der darauf liegende Kühlkörper, auch erwärmt werden, reichen die 4°C nicht um den Aufwärtswandler mit genügender Spannung zu versorgen. Der Temperaturunterschied zwischen Wärmequelle und Wärmesenke sollte sicherheitshalber bei etwa 10 K liegen, da nicht nur die Wärmewiderstände der Leitpaste und Graphitfolie nicht mitberechnet wurden sondern auch keine idealen Anbindungen zwischen den einzelnen Bauelementen zu schaffen sind.



### 4.2.3 Spannungs-Regelung und Versorgung

Die vom Thermogenerator erzeugte Spannung, die bei 0,3 V liegt, muss mit Hilfe eines Aufwärtswandlers erhöht werden und deshalb sollten die Aufwärtswandler einen guten Wirkungsgrad von ca.70% haben.

Als Zwischenspeicher wurde ein NiMH-Akku (Varta 3V250H) verwendet. Bei vergleichbarer Baugröße haben Akkus höhere Ladungskapazitäten als Doppelschichtkondensatoren. Der aufgeladene Akku kann mehrere Wochen ohne Nachladung das gesamte System mit Energie versorgen. Bei der Überwachung der Anlage ergibt sich bei 85°C ein Strom von 2,6mA. Der Akku erlaubt ein permanenten Stromdurchfluß von  $Q_{Bat/30}$  bis  $Q_{Bat/20}$ , wobei  $Q_{Bat}$  die Ladungskapazität des Akkus darstellt. Dieser Art der Ladung wird als Trickle Charging bezeichnet und führt bei dem verwendeten Akku weder zu einer Beschädigung oder noch zu einer Lebensdauerverkürzung.

$$Q_{Bat} = I_{Out} \cdot 30h = 2,6mA \cdot 30h = 78mAh \quad (4.13)$$

Der Akku arbeitet mit einer Nennspannung von 3,6 V und verkraftet einen maximalen Dauerladestrom von 8 mA. Bei einer starken Luftkonvektion liefert der Thermogenerator mehr Leistung und könnte zur Überladen des Akkus führen. Der Akku wird bei Strömen ab 24 mA überladen. Im Akku ist ein Ventil eingebaut der sich im Falle einer Überladung öffnet und das entstehende Gas durch das Überladen freisetzt.

Da der NiMH- Akku so ausgewählt ist, dass ein Strom ihn permanent durchladen kann, ist eine Strombegrenzende Regelung nicht notwendig. Es wird nur ein Spannungsregler dem Akku vorgesetzt. Ein dazu parallel geschalteter Low - ESR – Elektrolytkondensator sorgt auch dafür, dass kurzfristig höhere Leistungen zur Verfügung gestellt werden. Ein Low - ESR bedeutet, dass der Kondensator der einen äquivalenten, seriellen Widerstand besitzt in der Lage ist, für eine kurze Zeit die Applikation mit Leistung zu überbrücken.

Die Schottky Diode sorgt dafür, dass sich der Akku und der Kondensator nicht in Richtung des Spannungsreglers entladen.

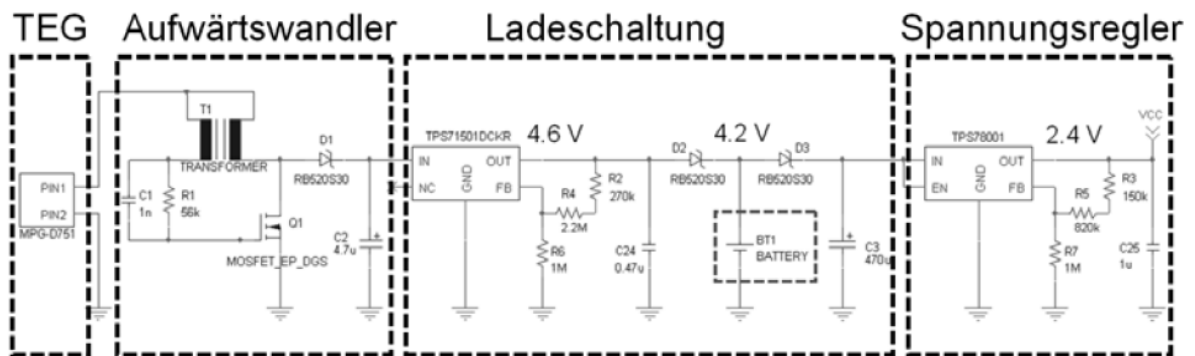


Abb.4.9 Die komplette Kette der Spannungsversorgung.

Der 3V250H Akku besteht aus drei in Reihe geschalteten Knopfzellenakkus, mit jeweils 1,2 V, die in einem Gehäuse mit einer Nennspannung von 3,6 V zusammen gebracht sind. Die Ladespannung beträgt 4,2 V, und sollte das ein und halb fache der Nennspannung nicht überschreiten. Mit Hilfe von Widerständen wird die Spannung am Ausgang des Spannungsreglers TPS71501DCKR von Texas Instruments auf 4,6 V eingestellt und nach einem Spannungsabfall von 0,3 V bis 0,4 V an der Schottky-Diode, liegt eine Akkuladespannung von 4,2 V an. Der Spannungsregler ist für eine Höchstspannung von 24 V vorgesehen und hat einen sehr geringen Stromverbrauch, der im unteren  $\mu\text{A}$  Bereich liegt. Für eine stabile Spannungsversorgung von 2,4 V der Elektronik, sorgt der Spannungsregler TPS78001.

#### 4.2.4 Transmittersystem

Das Transmittersystem ist aus einem Mikrocontroller und einem Transceiver, an dem eine Chip-Antenne in SMD-Ausführung angeschlossen ist, aufgebaut. Der Mikrocontroller leitet, die durch Sensoren erfassten Daten, über die SPI-Schnittstelle an den Transceiver weiter. Die aufgenommenen Daten werden über die Antenne an einen USB-Empfänger, der an einem Computer angeschlossen ist, weiter gesendet.

Der Mikrocontroller ist vom Typ MSP430F2274 von der Firma Texas Instruments. Der Aufbau der Architektur mit den fünf Low Power-Modi erlaubt bei entsprechender Programmierung eine lange Betriebsdauer des Systems. Im aktiven Modus wird eine Leistung von 270  $\mu\text{A}$ , bei einem Takt von 1 MHz (max.16 MHz) beansprucht sowie eine

Spannung von 2,2 V, die im Bereich der 1,8 V und 3,6 V liegen darf. Der Leistungsbedarf im Standby-Modus beträgt 0,7  $\mu$ A. Der MSP430F2274 Mikrocontroller ist mit einem 1 KByte RAM Speicher und einem Flash Speicher von 32 kByte ausgestattet.

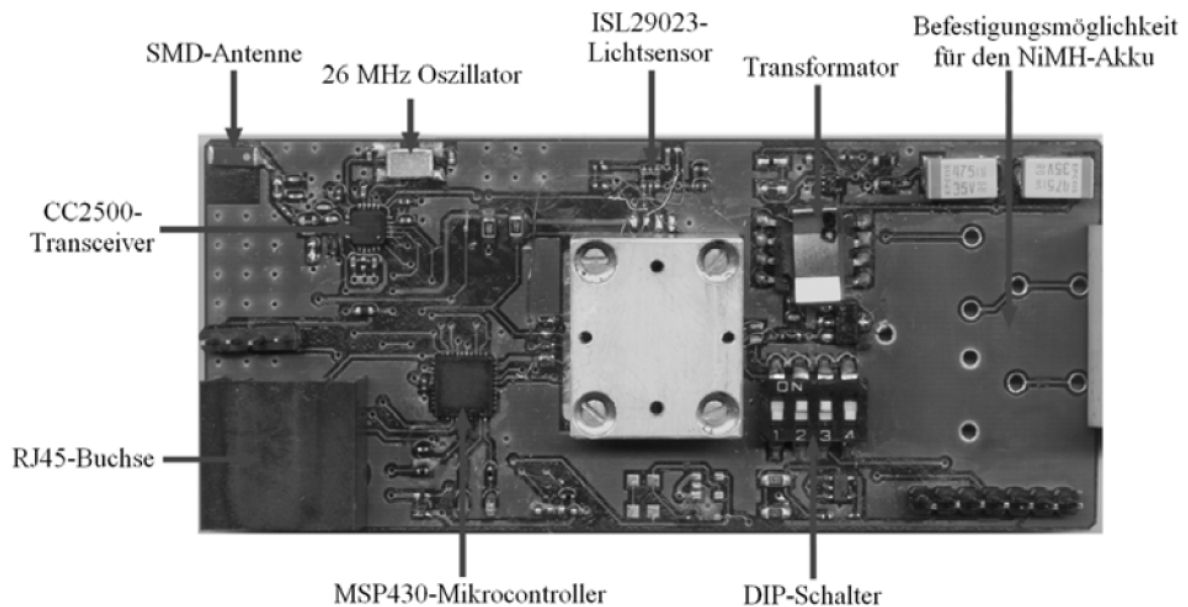


Abb.4.10 Das aufgebaute System mit abgenommenem Kühlkörper . Der DIP-Schalter ist für die Umschaltung der Polarität des Thermogenerators vorgesehen.

Als Transceiver wird der Type CC2500 eingesetzt und wird mit dem Mikrocontroller per SPI verbunden.

Als Empfänger wird das eZ430-RF2500 Modul der Firma Texas Instruments verwendet. Mit dem Empfangsmodul können nicht nur die gesendeten Daten von Transmitter empfangen und per COM-Port-Emulation in einem Computer verarbeitet werden sondern auch der MSP430 des Transmittersystems mit dem Modul programmiert werden. Somit muss man das eigentliche Empfangsmodul von der USB Platine trennen und das Transmittersystem an der USB Platine anschliessen. Dabei wird die Spy-Bi-Wire-Schnittstelle mit den vier Signalen VCC, TEST, RST, GND für die Programmierung verwendet.

## 4.2.5 Sensoren

Für das komplette System sind zwei Temperatursensoren TMP102 der Firma Texas Instruments, ein Beschleunigungssensor ADXL345 der Firma Analog Devices, sowie ein Lichtsensor ISL29023 der Firma Intersil eingebaut. Der Beschleunigungssensor wird auf einer separaten Platine gelötet und wird mit Hilfe eines Kabels mit dem System verbunden. So besteht die Freiheit, dass das System mit dem Thermogenerator an der heißen Stelle der Anlage angebracht wird und der Beschleunigungssensor an einer exponierten Stelle der Anlage positioniert wird.

### Temperatursensoren TMP102

Die Temperatursensoren TMP102 sind auf beiden Seiten des Thermogenerators angebracht. Anhand der gemessenen Temperaturen lassen sich die vom Thermogenerator erzeugte Spannung und die generierte elektrische Leistung berechnen. Der Verbrauch der digitalen Temperatursensoren, die speziell für Low-Power-Anwendungen ausgelegt sind, liegt bei 10  $\mu\text{A}$  im aktiven Modus und 1  $\mu\text{A}$  im Shutdown-Modus.

### Beschleunigungssensor –ADXL345

Der Beschleunigungssensor ADXL345 dient zur Messung der Beschleunigungs- und Vibrationsvorgänge an der Anlage. Dieser Typ von Sensor kann Beschleunigungsvorgänge in allen drei Achsen aufnehmen. Der Verbrauch liegt bei 145  $\mu\text{A}$  im aktiven Zustand, 140  $\mu\text{A}$  im Low-Power-Modus und 0,1  $\mu\text{A}$  im Standby-Modus.

Bei Inaktivität bzw. Aktivität der Anlage kann eine Auto-Sleep- und eine Auto-Wake-Funktion aktiviert werden. Der ADXL345 besitzt die Funktion, einen Interrupt an den Mikrocontroller zu senden. Für das Senden eines Interrupt lassen sich acht Bedingungen einstellen unter deren auch die Detektion von Aktivität und Inaktivität dazu gehört. Für die Überwachung von Maschinen und Anlagen die im Betrieb Vibrationen erzeugen, lässt sich die Bedingung für einen Interrupt bei Detektion von Inaktivität einstellen, die den Ausfall einer überwachten Maschine sofort erkennt.

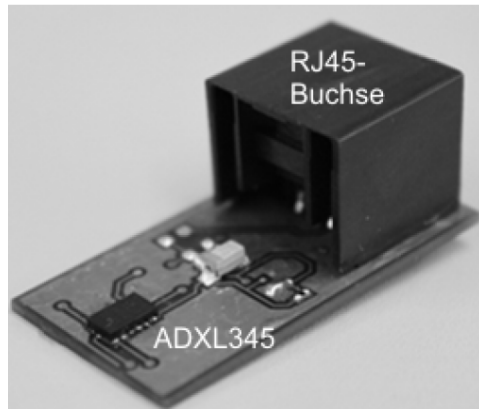


Abb.4.11 Für den Beschleunigungssensor ist eine eigene Platine vorgesehen.

Wie bereits erwähnt wird der Beschleunigungssensor nicht auf der Platine des Moduls gelötet, sondern wird separat auf eine eigene Platine an der Anlage positioniert. Sowohl auf der Platine des Moduls als auch auf der Platine des Beschleunigungssensors ist jeweils eine RJ45-Buchse angebracht. Der Transport der Daten erfolgt über ein Netzwerkkabel. Abb.4.11.

#### **4.2.6 Der Einsatz des Systems für die Überwachung von ASE-Anlagen**

Für die Überwachung einer ASE-Anlage (Advanced Silicon Etching), die Ätzprozesse für die Herstellung von Siliziumstrukturen durchführt, hat sich das System gut bewert. Es sind einige Stellen mit ausreichender Wärme, an denen man das Modul platzieren könnte. Da auf der unteren Seite des Moduls zwei Vertiefungen für Magnete vorgesehen sind, kann das Modul an das Metall der Anlage durch Magneten einfach fixiert werden.

Die Positionierung und die Lage des Systems auf einer Wärmequelle sind für die durch den Thermogenerator erzeugte elektrische Leistung sehr entscheidend. Dabei spielt die Lage der Lamellen des Kühlkörpers und die Luftkonvektion eine sehr große Rolle.

Da die natürliche Wärmekonvektion von unten nach oben verläuft, sollte eine Anbringung des Systems wie im Abb.4.12 links, auf jeden Fall vermieden werden. Im mittleren Bild sind eine bessere Positionierung und damit auch eine bessere Lage des Kühlkörpers gegeben. Die ideale Positionierung des Systems ist im rechten Bild angezeigt. Diese Lage ermöglicht dem Kühlkörper, aufgrund der natürlichen Wärmekonvektion, seine Wärme an die Umgebung am besten abzugeben und damit einen höheren Temperaturgradienten zwischen den beiden

Seiten des Thermogenerators zu erreichen. Sollte der Kühlkörper durch eine kalte Luft erfasst werden, dann hätten wir einen idealen Fall.

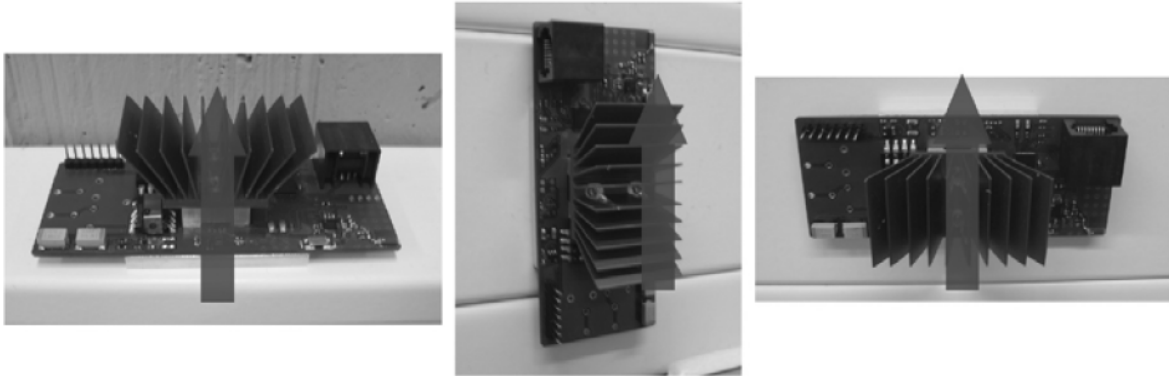


Bild.4.12 Die Positionierung und Orientierung des Systems hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Konvektion und damit den Temperaturgradienten.

An der ASE-Anlage kann mit der Hilfe des Moduls eine Leistung in der Höhe von ca. 4 mW bereitgestellt werden. Der Akku hat eine Kapazität von 250 mA/h und benötigt 4 Tage, bei einem Strom von 2,6 mA, bis er vollgeladen ist. Der Akku wird aufgrund des Trickle Charging Ladeprinzips ständig nachgeladen und es ist unwahrscheinlich, dass er an der verwendeten ASE-Anlage leerläuft.

Damit eine ständige Überwachung gewährleistet ist, gibt es keine Entkoppelung von der Messung und dem Übertragen an den USB-Empfänger. Das System arbeitet mit einem Mess- und Sendezyklus von 1 s, das Senden nimmt 5 ms in Anspruch und stellt dabei einen Stromverbrauch von 13 mA ein. Für die Messung wird ein Gesamtverbrauch von ca. 90  $\mu$ As benötigt. Damit kann das System 120 Tage lang autark arbeiten, ohne dass es nachgeladen wird.

# Kapitel 5

## 4. Stromerzeugung mit Hilfe einer Pelletfeuerung [19]

Der Strom, den eine Pelletfeuerung für die Pellets- und Verbrennungsluftzufuhr sowie für die Zündung nötig hat, könnte durch thermoelektrische Generatoren bereitgestellt. Das Ziel des Austrian Bio Energy Centre Teams war einen Prototyp zu entwickeln, damit eine elektrische Leistung von 200 W bei einer Brennstoffwärmeleistung von 10 kW erzeugt wird, sowie die Bestätigung der Möglichkeit, dass es ohne die Versorgung mit elektrischer Energie von Außenetz, die notwendige Energie die Anlage selbst zur Verfügung stellt.

### 5.1. Aufbau eines Thermogenerators für eine Pelletfeuerung

Für die Auslegung des Thermogenerators, ausgehend von einer Serienmäßige Pelletfeuerung mit einer Brennstoffwärmeleistung von 10 kW und den Anforderungen eines Thermogenerators an effizienter Stromerzeugung, wurden folgende Rahmenbedingungen festgelegt:

- Elektrische Nennleistung: 200 W (im Auslegepunkt)
- Elektrischer Wirkungsgrad: 4% (im Auslegepunkt)
- Thermoelektrisches Material:  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$
- Generatöraufbau: Einstufig

Für die Element-Paare oder Schenkeln des Thermogenerators, sowohl für die p-dotierten als auch für die n-dotierten, wurde jeweils ein Material verwendet. Aufgrund der Temperatur des Kesselwassers, welches die Wärme des Thermogenerators auf einem Temperaturniveau

von 60 °C abführen soll, ist Bismut-Tellurid verwendet worden. Die Heißseite wurde mit einer Temperatur von 250 °C ausgelegt. Wie in Abb.3.7 zu sehen ist, eignet sich  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  am besten für den Einsatz bei solchen Temperaturen.

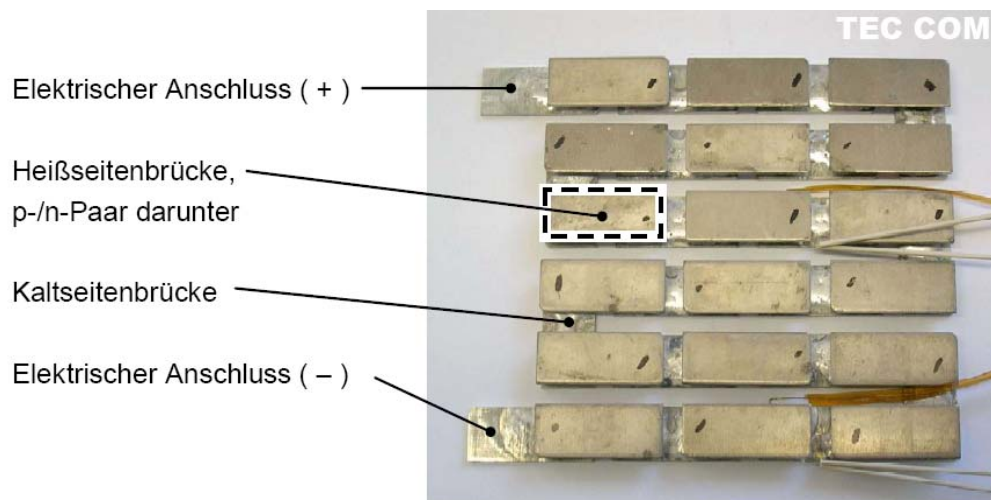


Abb.5.1. Thermoelektrisches Modul (Entwicklung der Fa.TEC COM) [20]

In der Abb.5.1 ist das verwendete Modul dargestellt, das eine Nennspannung von 550 mV und eine Größe von ca. 9 x 9 cm hat. Unter der Voraussetzung des optimal gewählten Lastwiderstandes beträgt die elektrische Nennleistung eines Modul 12,54 W. Daher sind 16 thermoelektrische Module notwendig um die geforderte elektrische Nennleistung von 200 W zu erreichen. Das ergibt eine Gesamtspannung der Module von 8,8 V.

Um den angestrebten Wirkungsgrad zu erreichen, hat ein Wärmestrom von 5 kW durch den Thermogenerator zu fließen. Für einen kontrollierbaren Wärmestrom sind auf beiden Seiten des Thermogenerators, sowohl auf der heißen als auch auf der kalten Seite, geeignete Wärmeleiter montiert. Zwischen den Wärmeleitern und dem Modul, ist auf beiden Seiten eine elektrisch isolierende Sperrschicht anzubringen.



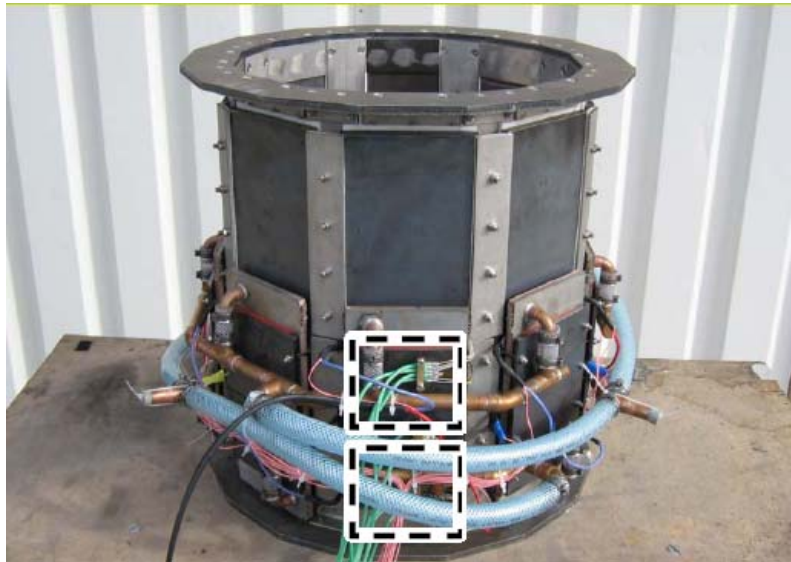


Abb.5.2 Prototyp des thermoelektrischen Generators [20]

Der Prototyp Abb.5.2 wurde in Kooperation mit der Firma TEC CON geplant und umgesetzt. Die Module sind in zwei übereinanderliegenden Reihen (Bildmarkierung), jeweils acht pro Reihe, aufgebaut.

## 5.2 Integration des Prototypen in der Gesamt Anlage der Pelletfeuerung

Um den Verbrennungsprozess, in dem eine vollständige Verbrennung der Gase aus gesetzlicher Sicht gefordert wird nicht zu beeinträchtigen, sind Maßnahmen zur genaueren Positionierung der Thermogeneratoren erforderlich. Andererseits sollen aus der Sicht des Thermogenerators ein gleichmäßiger Wärmestrom und eine möglichst gleichmäßige Temperatur auf den gesamten Wärmeleiteroberflächen in alle Betriebspunkten der Anlage herrschen.

Oberhalb der handelsüblichen Brennkammer ist der Prototyp aufgesetzt. Dieser überträgt die Wärme weiter auf die Heißseite des Thermogenerators. Auf den Prototypen ist ein Gassammler positioniert, der die Verbrennungsgase zentral zum folgenden Wmeleiter leitet und Schließlich dem Schornstein abgibt.

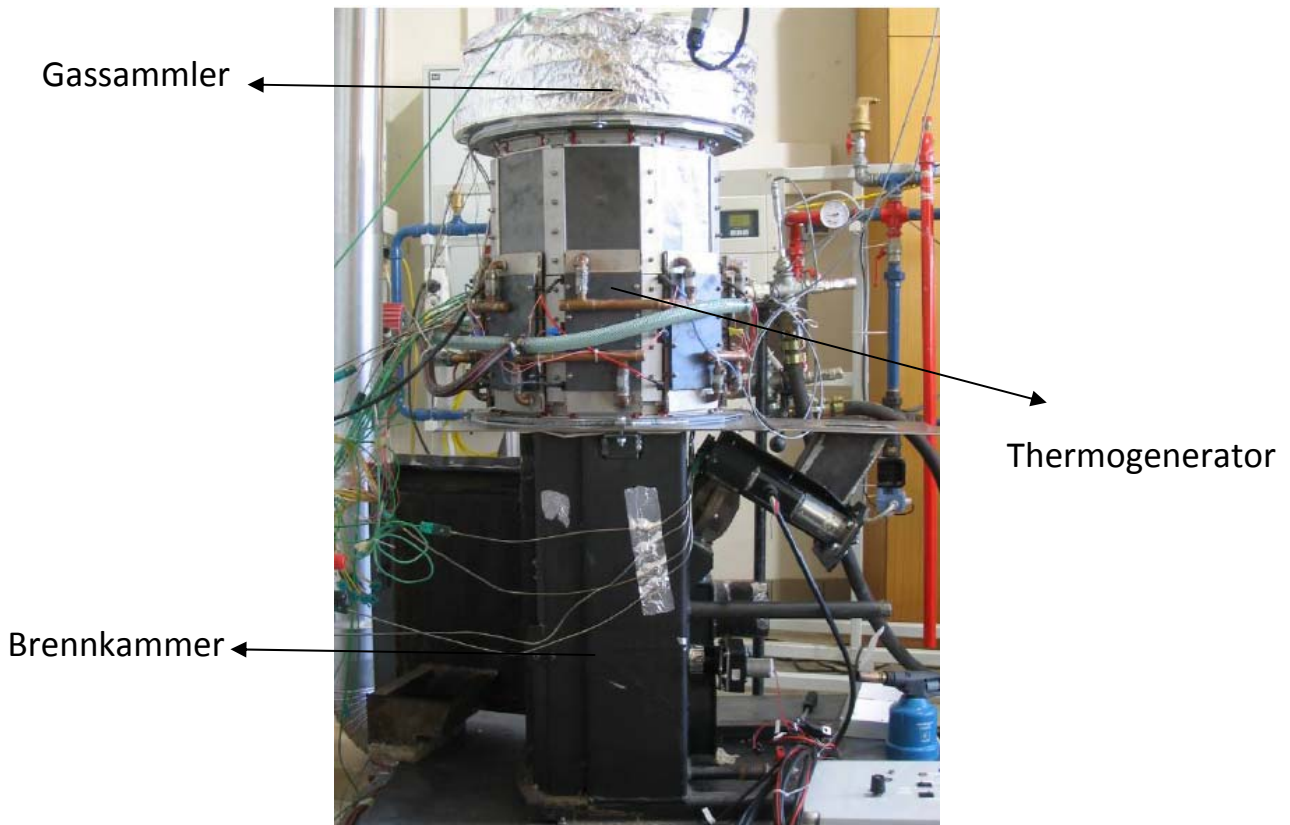


Abb.5.3 Der Gesamtaufbau der Anlage

Der Energiefluss der gesamt Anlage ist maßstäblich in Abb.5.4 dargestellt.  $\dot{Q}_{BS}$  ist die Wärmemenge die in der Brennkammer pro Zeit erzeugt wird. Der mögliche Anteil der Wärmeauskopplung senkt sich durch jegliche Wärmeabgabe, die vor und bei der Wärmeleitung zum Thermogenerator auftritt ( $\dot{Q}_{WA,BK}$  und  $\dot{Q}_{WA,TEG}$ ). Teil der zugeführten Wärmemenge des TEG ( $\dot{Q}_{TEG}$ ) wird in elektrische Energie ( $P_{el}$ ) umgewandelt und mit der Wärmemenge  $\dot{Q}_{H,TEG}$  auf der Kaltseite des TEGs wird Warmwasser für den Kessel aufbereitet (d.h. das Wasser fließt durch den Wärmeleiter die auf der der Kaltseite des TEGs montiert sind, und so führen sie die Wärme vom TEG ab).

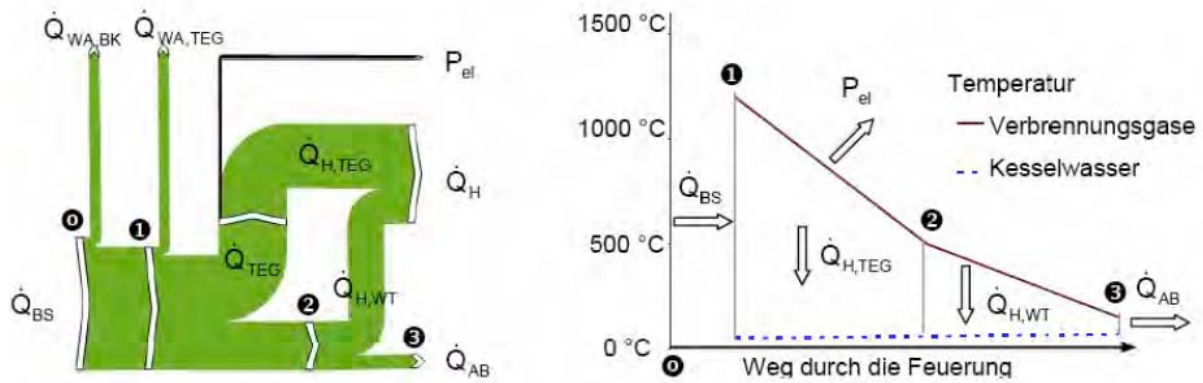


Abb. 5.4 Energiefluss und die Temperaturniveaus

Die Temperatur des Verbrennungsgases ist nicht ausreichend für eine effiziente elektrische Stromerzeugung. Ein Teil der mitgeführten Wärme wird mit Hilfe eines konventionellen Wärmeleiters an das Kesselwasser abgegeben ( $\dot{Q}_{H,WT}$ ). Im Anschluss verlässt die Restwärme die Anlage mit dem Abgasstrom ( $\dot{Q}_{AB}$ ). In der Abb.5.4 sind die untergeordneten Wärmeverluste, die durch unverbrannte Bestandteile in der Asche und im Abgas, sowie durch weitere Abstrahlung verursacht, nicht berücksichtigt. Der auf die Brennstoffwärmeleistung bezogene elektrische Wirkungsgrad  $\eta_{el, Sys}$  ist aus dem elektrischen Wirkungsgrad  $\eta_{TEG}$  und dem Anteil der Wärmeauskopplung  $\dot{Q}_{TEG} / \dot{Q}_{BS}$  zusammengesetzt.

$$\eta_{el, Sys} = \eta_{TEG} \frac{\dot{Q}_{TEG}}{\dot{Q}_{BS}} \quad (5.1)$$

Mit dem einstufigen Generatorkaufbau und der Temperatur von 250 °C auf der Heißeite, wird ein elektrischer Systemwirkungsgrad von etwa 2% angestrebt.

## 5.3 Versuchsergebnisse

Bei den Ergebniswerten handelt es sich um einen Auszug aus den im Zuge der Entwicklung durchgeführten Versuchsreihen. Es wurden vergleichbare Ergebnisse (keine Spitzenwerte) dargestellt, die für die Bestimmung des Entwicklungsfortschritts bei Standardversuchsreihen von Bedeutung waren.

## 5.4 Wärmeauskopplung über den Thermogenerator

Neben dem Wirkungsgrad des TEG ist die Wärmeauskopplung  $\dot{Q}_{TEG} / \dot{Q}_{BS}$  für den gesamten Wirkungsgrad des Systems entscheidend. Es wurde eine Wärmeauskopplung von 50 % im Auslegungspunkt angestrebt.

Im idealisierten Fall könnte über den TEG, bei einer Heiseitentemperatur von 250 °C und einem im Abgasenthaltenen Restsauerstoffgehalt von 10 %, ein Wärmestrom von maximal 83 % erreicht werden, ohne Luftvorwärmung und Abgasrezirkulation.

Der Wärmestrom der zum Generator geführt wird, wird um die Wärmeabgabe der Brennkammer  $\dot{Q}_{WA,BK}$  und um den nicht an der Stromerzeugung beteiligten Wärmestrom durch den TEGs  $\dot{Q}_{WA,TEG}$  reduziert. Um eine gleichmäßige Verteilung der Wärme auf der Heißseite des TEGs zu ermöglichen, sind eine entsprechende Dichte des Wärmestroms und eine kompakte Wärmeleitfläche erforderlich. Zwischen der Heiseitentemperatur des TEGs und der aus dem Bereich des TEGs ausströmenden Verbrennungsgases ist ein Temperaturgefälle notwendig. So kommt es in der Versuchsanlage bei Reduktion der Wärmeauskopplung auf den angestrebten Wert.

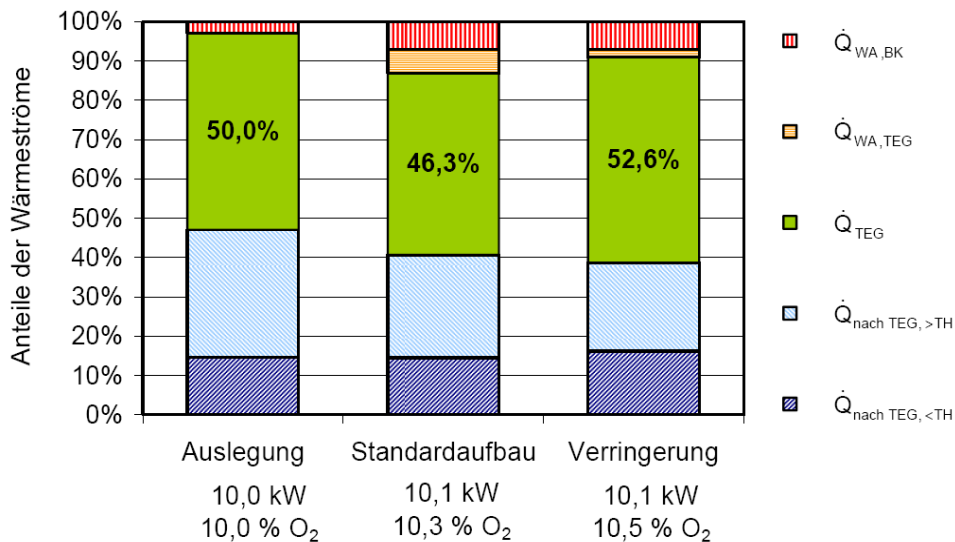


Abb.5.5 Wärmeauskopplung

In der Abb.5.5 sind Berechnungsergebnisse der Auslegung und experimentell ermittelte Ergebnisse für zwei Versuchsaufbauten ersichtlich. Der Unterschied gegenüber dem Standardaufbau liegt in der Verringerung der Wärmeabgabe über den TEG durch zusätzliche Wärmedämmung. Im Standardaufbau beträgt die Summe von  $\dot{Q}_{WA,BK}$  und  $\dot{Q}_{WA,TEG}$  1,3 kW und nach der Wärmedämmung kommt man auf etwa 0,9 kW. Somit kommt es zur Erhöhung der Wärmeauskopplung von 46,3 % auf 52,6 %. Durch Absenken des Luftüberschusses der Verbrennung sind Spitzenwerte von 56 % zu erreichen.

Die gleichmäßige Verteilung der Temperatur auf den Oberflächen des TEGs, ist ein wichtiger Punkt für die Wärmeauskopplung. Die Kühlung, wie erwähnt erfolgt durch das Wasser des Heizkreislaufes, welches eine niedrigere Temperatur als die der Kaltseite des TEGs hat. Die Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen Modulen liegt bei 1- 2 K. Abb.5.6 zeigt die Spannungen der einzelnen Module. Die resultierenden Modulspannungen sind proportional zum Wärmestrom durch die einzelnen Module und damit auch zur Heißeitentemperatur des TEG. Mit Ausnahme von Modul 1-oben und 8-unten und die Modulen 1-unten und 6-unten sind die Modulspannungen fast identisch. Verdreht man die erwähnten TEGs im Bezug auf die Brennkammer, ergeben sich wieder geringere Spannungen.

Das bestätigt dass der Spannungsabfall nicht aus Ungleichmäßigkeiten in der Wärmeleitung resultiert, sondern aus Gründen der thermischen Kontaktierung der einzelnen Schichten der thermoelektrischen Module entsteht.

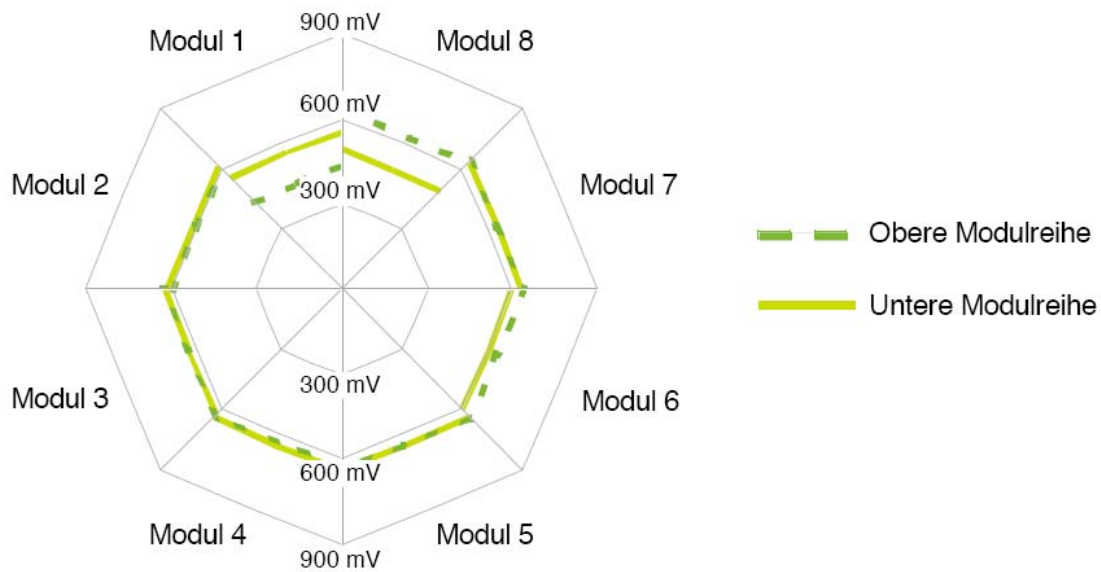


Abb.5.6 Beispiel für die Verteilung der Modulspannungen

Die Oberflächentemperaturen der Heißseite wurden über die Höhe des TEGs an vier Positionen gemessen und ergeben eine durchschnittliche Temperaturdifferenz von etwa 10K.

## 5.5 Der Wirkungsgrad des Thermogenerators

Die einzige Einflussgröße auf den elektrischen Wirkungsgrad, in Bezug auf die Systemintegration in eine Pelletfeuerung, ist der Temperaturunterschied zwischen der Heiß- und Kaltseite am TEG. In Abb.5.7 ist der Wirkungsgrad des TEG in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz dargestellt. Der Wirkungsgrad ist mit 4 % bei einem Temperaturunterschied von 190 K ausgelegt. Da aber vier Module nicht die entsprechende Leistung aufbringen, fällt der Wirkungsgrad bei knappen 4 %. Durch eine in Abb.5.7 strichlierte Kurve ist die Anhebung des Wirkungsgrades unter der Annahme der in etwa gleichen Erzeugung der Leistung aller Module, gezeichnet.

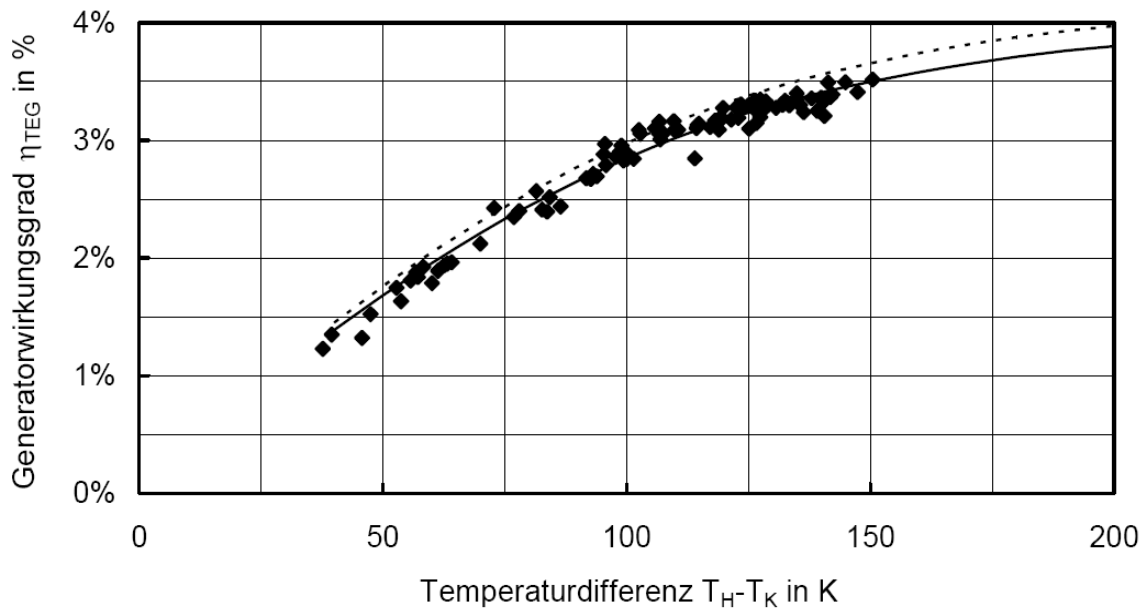


Abb.5.7 Wirkungsgrad des TEG in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz

Die Messergebnisse der Versuchsreihen zeigten einen maximalen Temperaturunterschied von 150 K. Das führt auf den Aufbau des TEGs zurück, in dem der Wärmewiderstand zu gering gewählt wurde. Obwohl der Zielwert für den elektrischen Wirkungsgrad nicht erreicht wurde, sind zwei fertigungstechnisch behebbare Ursachen gefunden worden. Erzielen des gewünschten Wirkungsgrads scheint bestätigt zu sein.

## 5.6 Elektrischer Systemwirkungsgrad

Das angestrebte Ziel ist das Erzeugen einer elektrischen Leistung von 200 W bei einer Brennstoffwärmeleistung von 10 kW, sowie die Bestätigung der Möglichkeit einer von elektrischer Hilfsenergie unabhängigen Betriebsweise.

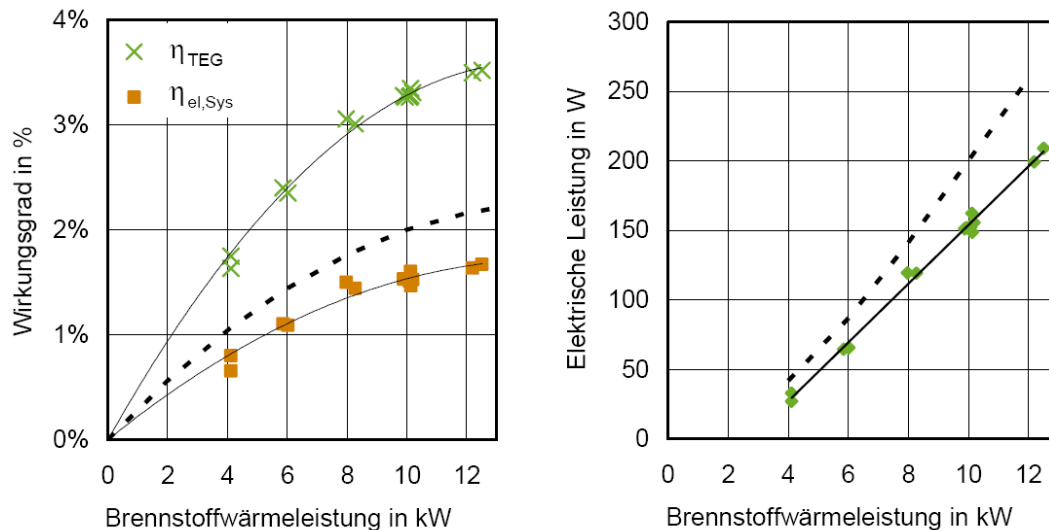


Abb.5.8 Generator-  $\eta_{TEG}$  und elektrischer Systemwirkungsgrad  $\eta_{el, Sys}$  in Abhängigkeit von der Brennstoffwärmeleistung

Der elektrische Generatorwirkungsgrad und der elektrische Systemwirkungsgrad sowie die elektrische Leistung der Gesamtanlage sind in der Abb.5.8 dargestellt. Beim Standardversuchsaufbau konnte im Auslegungspunkt ein Systemwirkungsgrad von knapp über 1,5 %, dementsprechend eine elektrische Leistung von 150 W, erreicht werden. Im verbesserten Aufbau mit Wärmedämmung im Bereich des TEGs wurden im Auslegungspunkt elektrische Systemwirkungsgrade von 1,7 % und somit eine elektrische Leistung von 170 W gemessen. Angenommen wir haben gleichwertige thermoelektrische Module und einer wirksame Temperaturdifferenz von 190 K über den TEGs, dann ergibt sich aus der Extrapolation ein elektrischer Systemwirkungsgrad von etwa 2 % und draus eine elektrische Leistung von etwa 200 W. Dies sind in der Abb.5.8 durch strichlierte Linien dargestellt. Der Verbrauch an Hilfsenergie im stationären Betrieb ist kleiner als die generierte elektrische Leistung. Die mit Gleichstromkomponenten ausgestattete Anlage verbraucht bei Vollast unter 20 W, bei 30 % Teillast nur noch 10 W. Somit ist für den Brennstofftransport zum Tagesbehälter und die Verteilung der Wärme im Heizkreislauf ausreichend Energie aus Eigenproduktion vorhanden.



Ein mehrstufiger Aufbau des Thermogenerators ermöglicht einen Entwicklungsschritt für eine Erhöhung der Heißseitentemperatur auf 400 °C. Dadurch sollten der elektrische Wirkungsgrad des TEGs auf 8-9 % und der elektrische Systemwirkungsgrad auf maximal 4 % steigen. Dafür wird ein Pelletkessel mit 12 kW Nennleistung und ein Pelletofen mit 8 kW Nennleistung, für die Integration der Thermogeneratoren und der Demonstration der Energieversorgung mit Hilfsenergie, verwendet.

# Kapitel 6

## 6.1 Integration von Thermogeneratoren in einer Gastherme

Gewöhnliche Gasthermen, welche man in vielen Wohnungen und kleineren Haushalten vorfindet, sind meistens ohne externe Wasserspeicher ausgestattet. Dabei wird das Warmwasser sowohl für Wasch- als auch für Heizzwecke direkt im Brennraum aufgeheizt und sofort zur Armatur oder zum Heizkörper weitergeleitet. Thermen sind aus zwei getrennten Kreisläufen aufgebaut.

Während des Heizens wird das Rücklaufwasser vom Heizkörper zuerst zum TEGs geleitet. Da das Rücklaufwasser eine niedrigere Temperatur als die Temperatur des Wärmetauschers des TEGs aufweist, wird Wärme vom TEGs abgeführt und das Rücklaufwasser erwärmt sich dabei etwas und wird schließlich zum Brennraum der Gastherme wieder zurückgeführt.

Beim Wasseraufbereiten, fließt das Kaltwasser direkt aus der Kaltwasserleitung zum TEGs. Erst danach wird das Wasser in den Brennraum geführt, wo es weiter auf die gewünschte Temperatur aufgeheizt wird (siehe Abb. 6.1). Da Kaltwasser eine niedrigere Temperatur aufweist als das Rücklaufwasser des Heizkörpers, wird durch den Kaltwasserdurchfluss mehr Abwärme vom TEGs als beim Heizen abgeführt.

Somit strömt durch die Kaltseite des TEGs entweder das Rücklaufwasser des Heizsystems oder das Kaltwasser des Waschsystems.

Wie stark die mechanische Festigkeit auf der Kaltseite des TEGs bei so einem schnell wechselnden Temperaturunterschied von kalt auf heiß beansprucht wird, muss noch geklärt werden.

Die Wärme zur Heißseite des TEGs, wird mit Hilfe einer Metallplatte die im Inneren des Verbrennungsraums montiert wird, transportiert. Insofern es die gesetzlichen Bestimmungen erlauben, sollte ein Weg für den Wärmetransport hergestellt werden. Dafür wird ein Ausschnitt auf die Schamottwand benötigt. Auf die Ausschnittsflächen werden die Metallplatten montiert, die einerseits für die Wärmeübertragung und andererseits dafür sorgen, dass kein Abgas nach Außen gelangt.

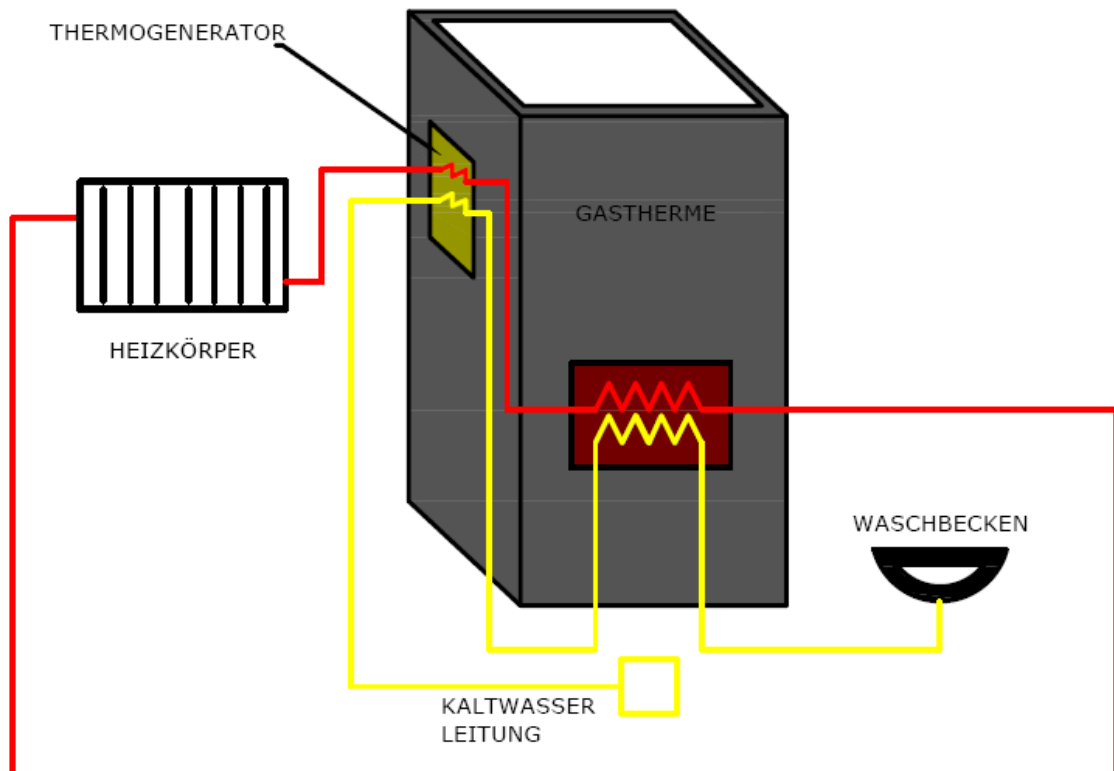


Abb.6.1 Konzept der Stromerzeugung durch TEGs bei Gasthermen.

Da die Abgastemperatur einen bestimmten Wert nicht unterschreiten darf, hängt die Höhe der Energieausbeute aus dem Brennraum großteils von der Abgastemperatur ab. Deshalb soll möglichst effizient viel Wärme auf die Heißseite des TEGs übertragen werden. Die Teile, die nicht am Wärmetransport zum TEGs beteiligt sind, und dabei nach außen Wärme abführen könnten, müssen gut gedämmt werden. Dabei sollten die Flächenverhältnisse zwischen der Heißseite des TEGs und der Platte, die an der Wand des Verbrennungsraums montiert sind, sehr gut optimiert werden. Eine große Rolle spielt auch der Kontaktwiderstand, der sollte möglichst klein gehalten werden.

Ob die technische Umsetzung dieses Konzeptes realisierbar ist und die daraus regenerierbare elektrische Leistung für den Eigenenergieverbrauch ausreicht, müsste im Rahmen einer praktischen Durchführung überprüft werden.

# Kapitel 7

## 7. Schlussfolgerungen

Sensoren werden zunehmend zu unsichtbaren Helfern in unserem Alltag. Die notwendige Energie, die sie für die Messung und Übertragung brauchen, wird von Thermogeneratoren zur Verfügung gestellt. Die Bedingung einer wartungsfreien Arbeit im Bereich der Elektronik wird durch den Einsatz dieser Thermogeneratoren erfüllt. Ein Batteriewechsel wäre dadurch nicht mehr nötig.

Drahtlose Sensornetzwerke, die sich mit kleinen Temperaturdifferenzen betreiben lassen, werden für Messzwecke in folgenden Bereichen verwendet: Produktion und Anlagentechnik, automatische Steuerung der Klimatisierung von Gebäuden, Überwachung von Materialmündungen in Flugzeugen und Fahrzeugen, kabellose medizinische Sensorik, etc.

Vorteilhaft sind diese drahtlosen Sensornetze, da sie preiswert und sicher sind. Daher können sie gut in verschiedenen Bereichen der Überwachung und Steuerung eingesetzt werden.

Größere Potentiale an elektrischer Energiegewinnung aus Abwärme gibt es bei Verbrennungsanlagen, Kraftwerken, Fahrzeugen und Hochtemperatur-Industrieprozessen. Neben dem in Kapitel 5 beschriebenen Versuch, haben verschiedene Institute bereits an der Implementierung der TEGS am Auspuff eines Fahrzeuges gearbeitet. Nach heutigem Stand der Technik, sind allerdings aufgrund des hohen Aufwands und der hohen Herstellungskosten noch keine Verfahren für eine serienmäßige Produktion entwickelt. Deshalb wird intensiv nach Materialien, die bei hohen Temperaturen einsetzbar sind und eine Gütezahl höher eins besitzen, geforscht.

# Literaturverzeichnis

- [1] Prechtel. Adalbert, "Vorlesung über die Grundlagen der Elektrotechnik", 1. Mit 265 Wiederholungsfragen, 225 Aufgaben und Lösungen. Springer Verlag, Wien, 2., unveränd. Aufl.. 2006.
- [2] Neil W. Ashcroft, David N. Mermin, "Festkörperphysik", Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 3. verbesserte Auflage, 2007.
- [3] Fasching Gerhard, "Werkstoffe für die Elektrotechnik", Springer Verlag, Wien, 4. Auflage, 2005.
- [4] Diethart Spickermann, "Werkstoffe der Elektrotechnik und Elektronik", J. Schlembach Fachverlag, Weil, 2002.
- [5] Ellen Ivers-Tiffée, Waldemar von Münch, "Werkstoffe der Elektrotechnik", B.G.Teubner Verlag / GWV Fachverlag, Wiesbaden, 10. "bearbeitete und erweiterte Auflage, 2007.
- [6] Kapitel 1. "Grenzgebiete zwieschen Thermodynamik und anderen Gebieten der Physik", [Online] 7 November 2013, <http://duepublico.uni-duisburg-essen.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-175/grd3iiij.pdf>.
- [7] Rudolf Gross, Achim Marx, "Festkörperphysik" Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2012.
- [8] Peter Retschnig, "Berechnung der Leistungsparameter eines thermoelektrischen Generators", Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 2010.
- [9] Holger Ulland, "Entwicklung von neuartigen thermoelektrischen Generatoren und ihr Einsatz in thermischen Solaranlagen", Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2011
- [10] A. Ioffe, "Semiconductor Thermoelements and Thermoelectric Cooling" 1957.
- [11] C. Wood, Aufl.. 2006 "Materials for Thermoelectric Energy Conversion," Rep. Prog. Phys., vol. 51, pp. 459–539, 1988]
- [12] Z. Dughaish, "Lead Telluride as a Thermoelectric Material for Thermoelectric Power Generation," Physica B, vol. 322, pp. 205–223, 2002.
- [13] Jana Sommerlatte, Kornelius Nielsch, Harald Böttner, "Thermoelektrische Multitalente Physica Journal 6 (2007) Nr.5 Wiley – VCH Verlag, Weinheim
- [14] G. Slack, Solid State Physics, vol. 34. Academic Press, 1979.

- [15] Mattias Saneyuki Ikeda, Thermoelektrische Eigenschaften komplexer intermetallischer Verbindungen, Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 2009.
- [16] Andreas Schmitz, "Bleitellurid mit erhöhter mechanischer Stabilität für zylindrische thermoelektrische Generatoren", Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2013.
- [17] G. Jeffrey Snyder, Eric S. Toberer, "Complex Thermoelectric Materials", Nature Materials 7, 105-114 (2008), [Online], 4 November 2013, <http://www.its.caltech.edu/~jsnyder/thermoelectrics/>.
- [18] Klaus Dembowski, "Energy Harvesting für die Mikroelektronik" Energieeffiziente und autarke Lösungen für drahtlose Sensorsystemen, VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 2011
- [19] Thomas Nussbaumer, (Hrsg.): 10. Holzenergie-Symposium: "Ökonomie, Technik und Luftreinhaltung", [Online], 1 November 2013, <http://www.verenum.ch/Publikationen/08%20BaillifardCFD.pdf>
- [20] Günther Friedl, "Pelletfeuerung mit thermoelektrischer Stromerzeugung", 10. Holzenergie-Symposium, Zürich, 2008, [Online], 28 Oktober 2013, <http://www.bioenergy2020.eu/files/publications/pdf/I1-1247.pdf>.
- [21] Wilhelm Moser, "Intellegent Heat Transfer with Thermoelectric Generators", Bioenergy, Jyväskylä, 2007, [Online], 28 Oktober 2013, [http://www.bioenergy2020.eu/files/publications/pdf/Austrian\\_Bioenergy\\_Moser\\_\(September\\_5th,\\_Combined\\_Heat\\_and\\_Power\).pdf](http://www.bioenergy2020.eu/files/publications/pdf/Austrian_Bioenergy_Moser_(September_5th,_Combined_Heat_and_Power).pdf)