

Experimentelle Untersuchungen zur Abwärmenutzung mit thermoelektrischen Generatoren (TEG)

Prof. Dr.-Ing. Stefan Beer
Ludwig Kinzler, M. Eng.
Dominik Bock, B. Eng.

Zusammenfassung

Das Ziel des F&E-Projekts war es, zunächst einen TEG-Prüfstand aufzubauen, mit dem es möglich ist, unterschiedliche TEG-Module in verschiedenen Temperaturbereichen zu testen und Ergebnisse sowohl bezüglich zu- und abgeführter Wärme als auch Werte zur maximalen entnommenen elektrischen Leistung zu erhalten.

Im weiteren Verlauf des Projekts sollten dann verschiedene Möglichkeiten getestet werden, den Betrieb eines TEG-Moduls möglichst effizient zu gestalten, indem die Wärmeübertragung auf das Modul optimiert wird.

Grundsätzlich werden zwei Konzepte des Wärmeübergangs verwendet. Zum einen durch erzwungene Konvektion von Luft auf einen Wärmeübertrager bei ca. 600 °C, zum anderen mit Thermoöl auf einen Wärmeübertrager bei ca. 300 °C. Die erste Herausforderung ergab sich durch die hohe Temperatur von 600 °C. Es gibt kaum ausgiebig getestete und haltbare Wärmeübergangsmaterialien.

Hauptausforderung ist es, einen möglichst effektiven Wärmeübergang zu realisieren, was bei einer recht hohen Wandwärmestromdichte von 140 kW/m² eine Herausforderung darstellt.

Folglich ist nicht nur die Zusammensetzung und der Aufbau eines TEG-Moduls wichtig, sondern dass vor allem auch die Einbaubedingungen entscheidenden Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Moduls haben. Die Verbesserung der Wärmeübertragung soll im weiteren Projektverlauf noch eingehender untersucht werden.

Abstract

The objective of the R&D project was first of all to build up a TEG test bench that allows to test different TEG modules in different temperature ranges and to receive results concerning heat transfer and dissipation and concerning the maximum value of the extracted electric power.

In the further course of the project different options for heat transfer optimization are tested to make the running of a TEG module more effective.

In principle, two concepts of heat transfer are used: The forced convection of air on a heat exchanger at about 600 °C and the use of a heat transfer fluid on a heat exchanger at about 300 °C. The first challenge resulted from the very high temperature of 600 °C. There exist barely thoroughly tested and durable heat transfer materials.

The main challenge is to realize the most effectively heat transfer that represents a big challenge by reason of the quite high heat flux density of 140 kW/m².

As a result regarding the efficiency of a module it should be noted not only the importance of the composition of a TEG module but also especially the installation conditions. The improvement of the heat transfer will be investigated in the further course of the project.

Aufbau eines TEG

Thermoelektrische Generatoren (kurz: TEG) erlauben es, unter Ausnutzung des Seebeck-Effekts eine zugeführte Wärmeenergie direkt in elektrische Energie umzuwandeln. Zwischen zwei Keramikplatten befinden sich mehrere Thermopaare, welche jeweils aus einem p-dotiertem und einem n-dotierten Halbleiterelement bestehen. Um in der Praxis nutzbare Spannungen zu erzeugen, werden mehrere dieser Thermopaare elektrisch in Reihe geschaltet.

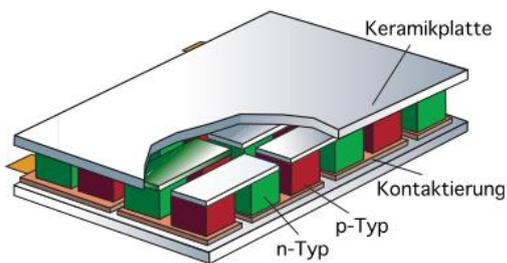


Abbildung 1: Aufbau eines TEG-Moduls [1]

Erzeugt man durch Verändern der Temperatur einer Keramikplatte einen Temperaturgradienten im Modul, verursacht dies eine Potentialdifferenz in den Halbleitern. Die Ladungsträger in den Halbleiterelementen fließen dabei von der warmen zur kalten Seite, wodurch eine elektrische Spannung entsteht.

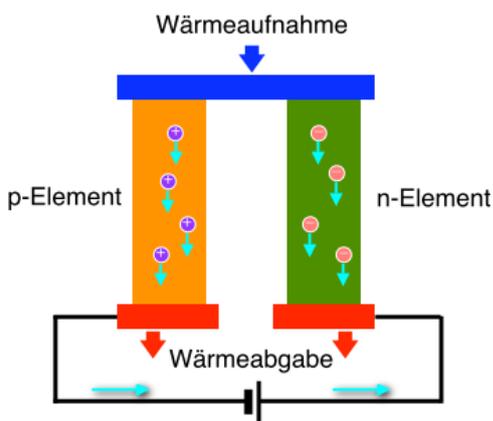


Abbildung 2: Thermopaar aus p- und n-dotiertem Halbleiter [1]

Ähnlich wie in der Photovoltaik können dann durch Anpassung der elektrischen Belastung Stromstärke und Spannung so variiert werden, dass die maximale elektrische Leistung entnommen werden kann.

Güteziffer und Wirkungsgrad von TEG

Wie gut ein TEG funktioniert, hängt sehr stark vom verwendeten Material der Halbleiterelemente ab. Eine wichtige Kenngröße, um die Effektivität der verschiedenen Materialien zu unterscheiden, ist die temperaturabhängige dimensionslose Güteziffer (figure of merit) zT :

$$zT = \frac{\alpha^2 \cdot \sigma \cdot T}{\lambda}$$

α Seebeckkoeffizient ($\frac{\mu\text{V}}{\text{K}}$), σ spez. el. Leitfähigkeit ($\frac{\text{S}}{\text{m}}$),

T Temperatur (K), λ Wärmeleitfähigkeit ($\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$)

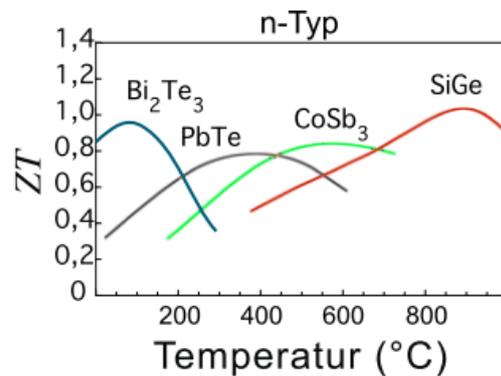


Abbildung 3: Güteziffer für verschiedene n-Halbleiter [2]

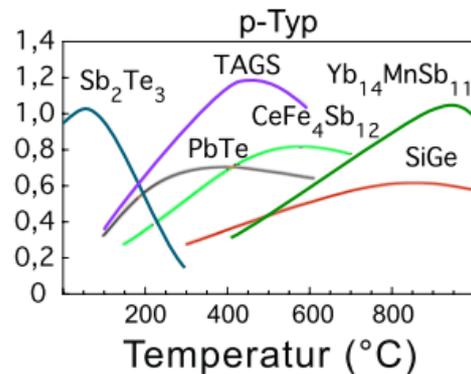


Abbildung 4: Güteziffer für verschiedene p-Halbleiter [2]

Wie in den Abbildungen 3 und 4 erkennbar ist, liegt das Maximum der Güteziffer für jedes Material in einem anderen Temperaturbereich, was zur Folge hat, dass jedes TEG-Modul ebenfalls je nach Materialwahl nur in einem bestimmten Temperaturbereich gute Leistungen erzielt.

Der Wirkungsgrad eines TEG-Moduls hinsichtlich zugeführter Wärmemenge bezogen auf die gewonnene elektrische Leistung ist relativ gering. So ist selbst bei Modulen mit den besten thermoelektrischen Materialien nur ein Bruchteil des Carnot-

Wirkungsgrades möglich, so dass häufig nur Wirkungsgrade im einstelligen Prozentbereich zu erreichen sind. Der limitierende Faktor ist hierbei die Gütezahl:

$$\eta = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{zu}} = \frac{T_{hot} - T_{cold}}{T_{hot}} \cdot \frac{\sqrt{1 + zT} - 1}{\sqrt{1 + zT} + \frac{T_{cold}}{T_{hot}}}$$

$P_{el} = I^2 \cdot R_L$ elektrische Leistung (W), \dot{Q}_{zu} zugeführter Wärmestrom (W), T_{hot} Temperatur auf der heißen Seite (K), T_{cold} Temperatur auf der kalten Seite (K), zT Gütezahl

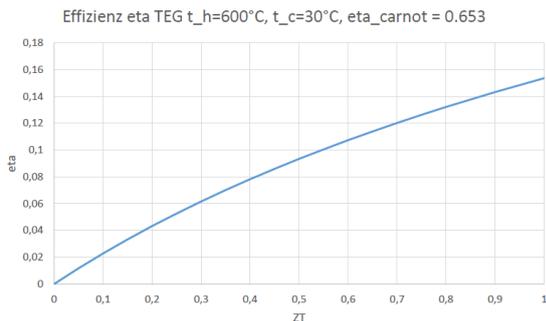


Abbildung 5: Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Gütezahl zT

Neben der Materialwahl hat auch die Art und Weise, wie die Wärme auf das TEG-Modul übertragen wird, entscheidenden Einfluss auf die Effizienz des Moduls. Während im Bereich der Herstellung und der Materialien bei hohem Forschungsaufwand nur mehr geringfügige Leistungsverbesserungen erzielt werden können, bietet die Optimierung der Wärmeübertragung zwischen Wärmeübertrager und TEG-Modul hingegen ein sehr großes und dazu noch relativ kostengünstig zu erschließendes Potential, weshalb es das Hauptziel dieses Projekts ist, diesen Wärmeübergang zu maximieren.

Grundsätzlich soll beim Einbau eines TEG-Moduls zunächst ein System vorhanden sein, das Wärme auf der einen Seite für das Modul bereitstellt und auf der anderen Seite abführt. Dazu bieten sich zwei verschiedene Arten der Wärmeübertragung an: die direkte und die indirekte. Die direkte Wärmeübertragung hat jedoch vor allem bei der Verwendung von Flüssigkeiten die Schwierigkeit, ein flüssigkeitsdichtes System zu schaffen, was häufig der indirekten Wärmeübertragung den Vorrang gibt. Bei dieser wird ein Kontaktkörper verwendet, der von der Flüssigkeit oder dem Gas durch- bzw. umströmt wird. Zu beachten ist hierbei der unterschiedliche Wärmeübergangskoeffizient der Medien. Mit einem Wärmeübergangskoeffizienten von etwa 1.000 W/m²K besitzt Thermoöl beispielsweise eine mehr als fünfmal so hohe Intensität, Wärme an eine Fläche

abzugeben, als dies mit einem Gas zu bewerkstelligen ist, was zur Folge hat, dass die Oberfläche des Kontaktkörpers bei einer Verwendung von Heißgas durch Berippung sehr stark vergrößert werden muss.

Neben der Dimensionierung eines geeigneten Wärmeübertragers, der die Wärme bereitstellt, ist es ebenfalls sehr wichtig, den Kontaktwärmübergang zwischen TEG-Modul und Wärmeübertrager zu optimieren. Um große Leistungsverluste zu vermeiden, sollte ein TEG-Modul deshalb nicht einfach nur lose zwischen die beiden Wärmeübertrager gelegt werden. Bestehende Luft-einschlüsse würden so eine sehr ungleichmäßige Temperaturverteilung erzeugen, was zu Verlusten führt, und könnten das TEG-Modul im schlimmsten Fall sogar beschädigen. Um dies zu verhindern und um eine möglichst gleichmäßige Temperaturverteilung zu erreichen, sollten deswegen einerseits Wärmeleitpasten oder -folien verwendet werden, die den Kontakt zwischen TEG-Modul und Kontaktkörper verbessern. Zusätzlich sollte auch der Anpressdruck des Moduls auf die Kontaktkörper erhöht werden und im Bereich von etwa 12 bis 15 kg pro cm² liegen.

Grundüberlegungen zum Wärmeübergang bei Gasen und Flüssigkeiten

Zu Beginn der Auslegung wurden die verschiedenen Möglichkeiten der Wärmeübertragung (Konvektion, Strahlung...) betrachtet. Daraus ergeben sich die verschiedenen Wärmeübergangskoeffizienten der verschiedenen Medien. Die maximal zu erreichenden Wärmeübergangskoeffizienten sind in den Tabellen 1 und 2 aufgeführt.

TEG: Methode zur Wärmeübertragung

Medium	WÜ-Koeffizient α [W/m ² K]	WÜ-Modus
Gas	200	Konvektion
Wasser	2000	Konvektion
Thermoöl	1000	Konvektion
Cu/Al	≥ 5000	Kontakt
Wasser	10000	Blasensieden
Dampf	10000	Filmkondensation

Tabelle 1: Übersicht Methoden der Wärmeübertragung

Durch diese Vorüberlegungen entschied man sich den Wärmeübergang mit Gas und Thermoöl genauer zu betrachten.

$q_{p,Wand}$ [kW/m ² K]	WÜ- Koeffizient [W/m ² K]	Temperatur des Fluides bezogen auf T- Oberfläche TEG von 600 °C
140	200	1573 K \approx 1300 °C

Tabelle 2: Wärmeübergang von Heißluft

Eine sinnvolle Nutzung mit Heißluft ist daher nur über einen berippten Kontaktkörper mit starker Oberflächenvergrößerung möglich.

Es wird eine ca. 28-fache Oberflächenvergrößerung bei einem realistischen Wärmeübergangskoeffizienten von 100 W/m²K und einer vorgegebenem Heißlufttemperaturdifferenz von 50 K für die Anwendung von Gas für ein TEG benötigt.

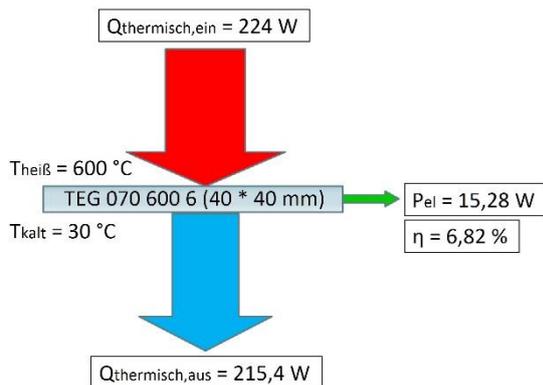


Abbildung 6: Energiebilanz an einem TEG bei 600 °C

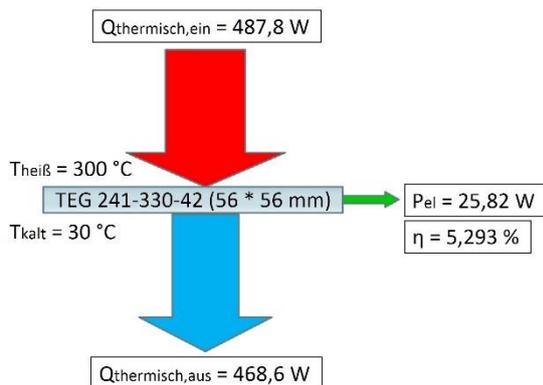


Abbildung 7: Energiebilanz an einem TEG bei 300 °C

Aufbau der Versuchsanlage

Der im Projekt erbaute TEG-Prüfstand unterteilt sich in den Thermoöl-Bereich und in den Heißluft-Bereich, was einen Betrieb mit zwei Medien mit

verschiedenen Wärmeübergangskoeffizienten ermöglicht. Zugleich bietet der Aufbau auch die Möglichkeit, unterschiedliche TEG-Module, die jeweils bei anderen Temperaturdifferenzen ihre optimale Leistung erzielen, zu analysieren (240 °C beim Thermoöl- und 570 °C beim Heißluft-Aufbau).

Beide Versuchsaufbauten bestehen aus jeweils einem oder mehreren TEG-Modulen, einem Wasser-Kühlkörper und einem Wärmeübertrager mit den jeweiligen Medien Thermoöl und Heißluft. Die TEG-Module werden zusätzlich mit einer elektronischen Last verkabelt, die es ermöglicht, verschiedene elektrische Widerstände einzustellen, um so die optimale vom TEG-Modul abgegebene elektrische Leistung bestimmen zu können.

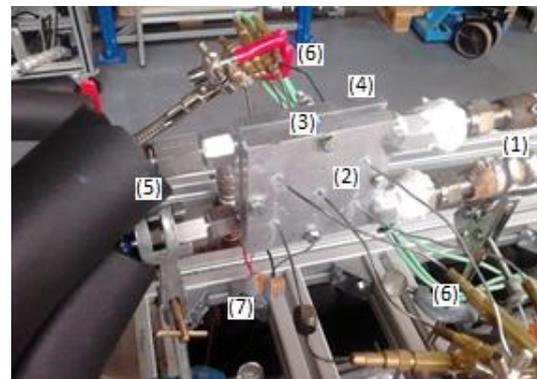


Abbildung 8: Versuchsaufbau Thermoöl
(1) Thermoölzufuhr, (2) Wärmetauscher, (3) TEG-Modul, (4) Kühlkörper, (5) Wasserzufuhr, (6) Temperaturfühler, (7) Verkabelung zur elektronischen Last

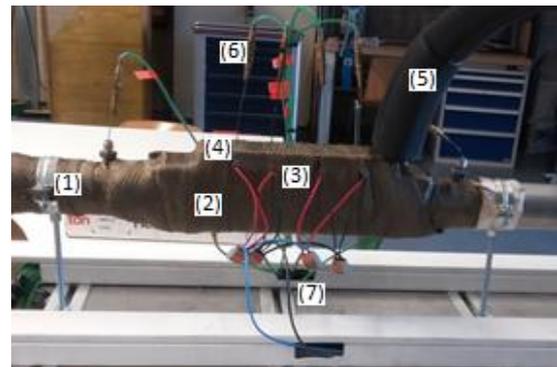


Abbildung 9: Versuchsaufbau Heißluft
(1) Heißluftzufuhr, (2) Wärmetauscher, (3) vier TEG-Module, (4) Kühlkörper, (5) Wasserzufuhr, (6) Temperaturfühler, (7) Verkabelung zur elektronischen Last

Ein Versuchsablauf baut sich so auf, dass die warme Seite des TEG-Moduls bis auf Maximaltemperatur aufgeheizt wird, während die kalte Seite bei einer Temperatur von 30 °C gehalten wird. Beim Aufheizevorgang werden in bestimmten Temperaturschritten die maximal erreichbaren elektrischen Leistungen festgehalten.

Untersuchung des Anpressdrucks

Schon früh zeigte sich in den Versuchen, dass die gewonnene elektrische Leistung stark vom Anpressdruck der Wärmeübertrager auf das TEG-Modul abhängig ist. Das heißt, je fester diese mit dem Modul verbunden sind, desto besser kann die Wärme zu- bzw. abgeführt werden. Um künftige Versuchsreihen miteinander vergleichbar zu machen, wurde deshalb die Verschraubung, welche die Wärmeübertrager zusammenpresst, im Thermoöl-Aufbau mithilfe eines Drehmomentschlüssels auf bestimmte Drehmomente eingestellt. Diese Drehmomente konnten hinterher wieder in den Anpressdruck umgerechnet werden. Mehrere Messreihen mit verschiedenen Drücken zeigten dann genauere Ergebnisse zum Einfluss des Anpressdrucks auf die elektrische Leistung.

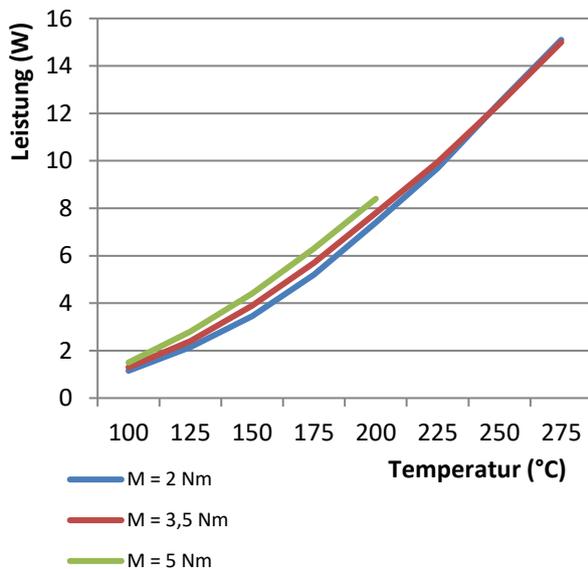


Abbildung 10: Vergleich verschiedener Anpressdrücke anhand des eingestellten Drehmoments M

Die Ergebnisse zeigen, dass die Leistungskurve mit steigendem Anpressdruck wie erwartet immer steiler wird und die Wärmeübertragung auf das TEG-Modul und damit einhergehend auch die gewonnene Leistung immer besser wird.

Zur Kompensierung des nicht konstanten Anpressdrucks, der durch die Wärmedehnung der unterschiedlichen Materialien der Wärmeübertrager und der Verschraubung entsteht, wurde im Verlauf des Projekts für den Heißluft-Aufbau ein Feder-System entwickelt, welches diese Schwankungen ausgleichen soll.

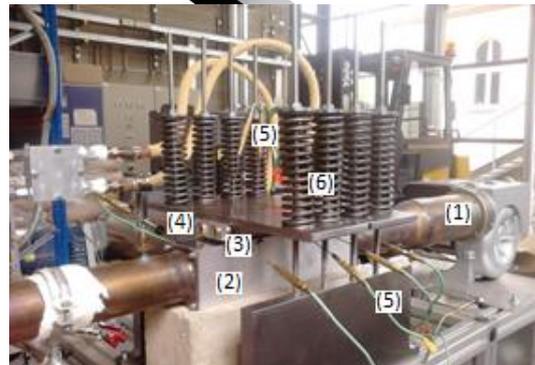
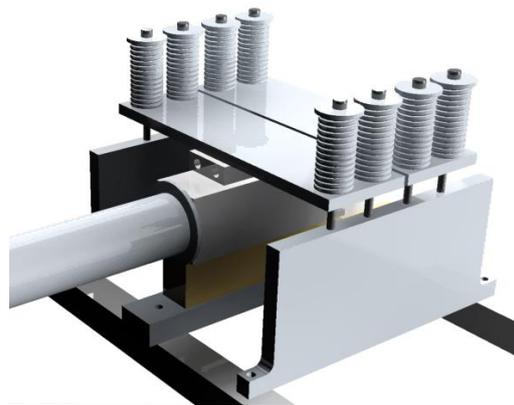


Abbildung 11: Feder-System
(1) Heißluftzufuhr, (2) Wärmetauscher, (3) vier TEG-Module, (4) Kühlkörper, (5) Temperaturfühler, (6) Federkonstruktion mit Druckplatten

Versuche mit unterschiedlichen Wärmeleitmedien

Wie bereits erwähnt, stellt ein weiterer sehr wichtiger Aspekt bei der Effizienz eines TEG-Moduls neben dem Anpressdruck auch das verwendete Wärmeleitmedium dar. Um einen möglichst optimalen Wärmeübergang zwischen dem TEG-Modul und dem Wärmeübertrager bzw. dem Kühlkörper zu erreichen, können verschiedenste Wärmeleitmedien verwendet werden. Diese umfassen unterschiedliche Pulver, Folien und Pasten aus Metallen oder anderen Materialien wie Graphit oder Diamant. Auch hier wurden mehrere Versuchsreihen mit unterschiedlichen thermischen Leitmedien, unter anderem auch mit handelsüblicher Alufolie, durchgeführt, wobei sich herausstellte, dass mit Graphitfolie und Diamantwärmeleitpaste die besten Ergebnisse erzielt werden können. In zukünftigen Versuchsreihen wird jedoch aufgrund der besseren Handhabung beim Austausch vor allem auf Folien zurückgegriffen.

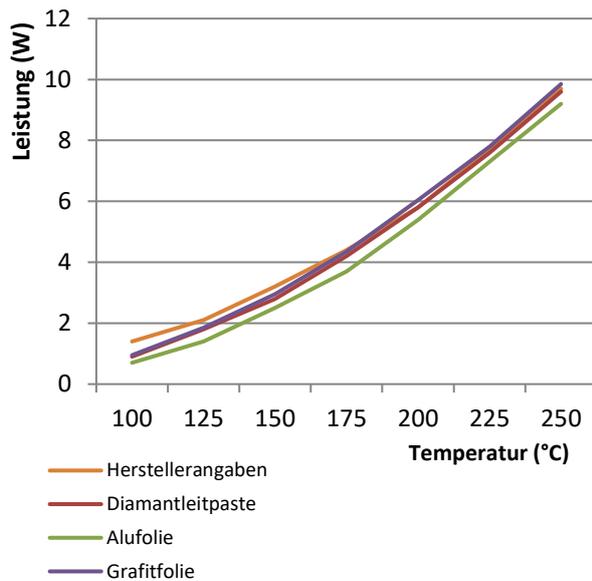


Abbildung 12: Vergleich verschiedener Wärmeleitmedien

Entwicklung eines Systems zur Erfassung des Wärmestroms

Die Erfassung des Wärmestroms beim Thermoöl-Aufbau, der vom Thermoöl an das TEG-Modul abgegeben wird, wurde zunächst mithilfe eines Durchflussmessgerätes vorgenommen. Mithilfe der Dichte des Mediums, seiner Wärmekapazität und der Temperaturdifferenz des zum TEG-Modul zufließenden und abfließenden Stroms sollte so der Wärmestrom errechnet werden:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T$$

\dot{Q} Wärmestrom (W), $\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho$ Massenstrom ($\frac{\text{kg}}{\text{s}}$),

c spezifische Wärmekapazität ($\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$), ΔT Temperatur – differenz (K)

Aufgrund unzuverlässiger Messwerte des Durchflussmessgerätes im oberen Temperaturbereich, wurde zur Erfassung des Wärmestroms jedoch ein neues Konzept erarbeitet. Dazu wird auf der gekühlten Seite ein Kupferblock (mit bekannter Wärmeleitfähigkeit) zwischen den Kühlkörper und das TEG-Modul gesetzt. Präzise Pt100-Temperaturfühler messen dann bei laufendem Versuch die Temperaturdifferenz zwischen Vorder- und Rückseite des Kupferblocks. Mithilfe dieser Daten und den Abmessungen des Kupferblocks kann dann der abgeführte Wärmestrom berechnet werden, welcher wiederum Rückschlüsse auf den zugeführten Wärmestrom zulässt:

$$\dot{Q} = \lambda \cdot \frac{A}{d} \cdot \Delta T$$

\dot{Q} Wärmestrom, λ Wärmeleitfähigkeit, A Fläche, d Dicke, ΔT Temperaturdifferenz

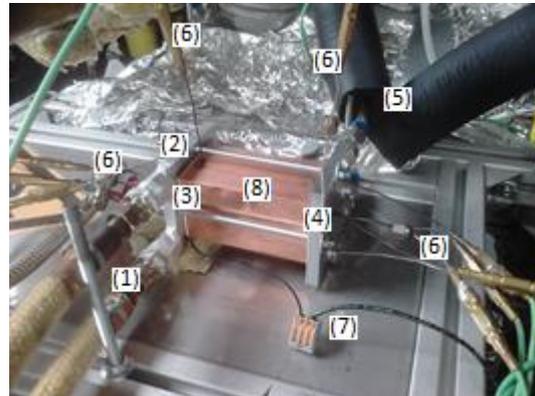


Abbildung 13: Thermoöl-Versuchsaufbau mit Kupferblock (1) Thermoölzufuhr, (2) Wärmetauscher, (3) TEG-Modul, (4) Kühlkörper, (5) Wasserzufuhr, (6) Temperaturfühler, (7) Verkabelung zur elektronischen Last, (8) Kupferblock



Abbildung 14: Kupferblock mit Dämmung

Ausblick

Die bisher gewonnenen Ergebnisse des Projekts geben einen kurzen Ausblick darauf, wie wichtig nicht nur die Zusammensetzung und der Aufbau eines TEG-Moduls ist, sondern dass vor allem auch die Einbaubedingungen entscheidenden Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Moduls haben. Die Verbesserung der Wärmeübertragung soll im weiteren Projektverlauf noch eingehender untersucht werden.

Durch ihre hohen Anschaffungskosten und ihren niedrigen Wirkungsgrad fanden TEG-Module zunächst nur in Nischenbereichen wie der Raumfahrt z.B. zur Stromversorgung von Satelliten Beachtung. Durch die derzeit sinkenden Herstellungskosten werden sie jedoch auch für breitere Geschäftsfelder immer interessanter und werden heutzutage bereits im Alltag für kleinere Anwendungen wie Taschenlampen oder Akkuladegeräte vielfach

genutzt. Vor allem aber rücken TEG-Module mit dem Gedanken des „Energy Harvesting“ immer mehr in den Vordergrund. So könnten in naher Zukunft TEG-Module durch ungenutzte Abfallwärme betrieben werden, wie sie bei Verbrennungsmotoren, Heizungsanlagen oder ähnlichem entsteht, um kostengünstig kleine Mengen an elektrischer Energie zu erwirtschaften, die dann wiederum für den Betrieb von elektrischen Anzeigen, der Bordelektronik in Fahrzeugen usw. verwendet werden kann. Die sehr große Zuverlässigkeit und der sehr geringe Wartungsbedarf sind weitere Vorteile der Module. Durch den Umstand, dass TEG-Module sehr kompakt gebaut sind und keine beweglichen

Teile besitzen, überstehen sie sogar mehrere Jahrzehnte ohne größere Leistungseinbußen, wie die jahrelange Verwendung in der Raumfahrt beweist.

Quellen:

- [1] C. B. Vining: Semiconductors are cool. Nature 413 (2001) 577.
- [2] G. J. Snyder, E. S. Toberer: Complex thermoelectric materials. Nature Mater. 7 (2008) 105.

Kontakt: Prof. Dr.-Ing. Stefan Beer



Prof. Dr.-Ing. Stefan Beer
Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik
Kaiser-Wilhelm-Ring 23
92224 Amberg

s.beer@oth-aw.de



Ludwig Kinzler M. Eng.
Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik
Kaiser-Wilhelm-Ring 23
92224 Amberg

l.kinzler@oth-aw.de

