



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

PROJEKT

ANWENDUNGSPOTENTIAL DER THERMO-ELEKTRISCHEN STROMERZEUGUNG IM HOCHTEMPERATURBEREICH

Jahresbericht 2006

Autor und Koautoren	Prof. Fröhlich (A. Bitschi, C. Eisenhut)
beauftragte Institution	ETH Zürich, Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnologie
Adresse	Physikstrasse 3, 8092 Zürich
Telefon, E-mail, Internetadresse	044 632 2777 / froehlich@eeh.ee.ethz.ch , www.eeh.ee.ethz.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	101706 / 152367
BFE-Projektleiter	Roland Brüniger
Dauer des Projekts (von – bis)	15. September 2006 bis 15. März 2009
Datum	30. November 2006

Zusammenfassung

Die Aktivitäten im Bereich der Thermoelektrizität haben weltweit stark zugenommen. Entsprechend sind verschiedene Materialien entdeckt worden, die eine Gütezahl bis ca. ZT = 3 erreichen. In der Praxis brauchbare Materialien mit stark verbesserten Eigenschaften sind leider noch nicht in Sicht und die Fachwelt streitet auch darüber, wie stark und ob thermoelektrische Materialien überhaupt signifikant verbessert werden können.

Neue, effiziente Materialien, die insbesondere im Hochtemperaturbereich gute thermoelektrische Eigenschaften zeigen und zudem langzeitbeständig und relativ preiswert sind, könnten einigen Anwendungen im Bereich der Hochtemperatur-Abwärmenutzung (Metallindustrie) oder Kraft-Wärme-Kopplung zum Durchbruch verhelfen.

Dieses Projekt wurde erst kürzlich lanciert und setzt den Fokus auf potenzielle Anwendungen im Hochtemperaturbereich. Eine genaue Modellierung des Thermoelektrischen Generators ermöglicht einen einfachen Vergleich und eine Bewertung verschiedener Anwendungsszenarien. Dank einem analytischen Modellansatz können diverse Anwendungen grob klassifiziert werden. Die detaillierte Beurteilung erfordert jedoch numerische Modellierungsansätze, die wesentlich aufwändiger sind und noch ausgebaut werden müssen.

Projektziele

Im Projektantrag [1] wurden Ende Oktober 2006 die folgenden Zielsetzungen definiert:

Ziele:

Generell soll das Anwendungspotential Thermoelektrischer Generatoren für die Nutzung von Hochtemperatur-Quellen mittels theoretischer Betrachtungen, Simulationen und punktuellen, experimentellen Abklärungen aufgezeigt werden. Da im Projekt „Das Thermoelektrische Kraftwerk“ [2] der Niedertemperatur-Bereich abgedeckt wird, kann schlussendlich ein Überblick über den gesamten nutzbaren Temperaturbereich gegeben werden. So wird es auch möglich sein, die Systeme zur Abwärmenutzung zu beurteilen.

Teilziele:

- Die konventionellen (Konkurrenz-) Systeme der Hochtemperatur - Energiekonversion sind einheitlich dargestellt und verglichen.
- Es ist ein Modell mit Simulation vorhanden, welches die Funktionalität des Thermoelektrischen Generators in der Nutzung von Hochtemperatur – Wärmequellen beschreibt.
- Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse werden die Charakteristika von verschiedenen thermoelektrischen Materialien, wie sie interaktiv an der EMPA erarbeitet und beschrieben werden, validiert. \Rightarrow Mindestanforderungen an die thermoelektrischen Materialien
- Applikationsmöglichkeiten werden aufgezeigt und bewertet.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Analytisches TEG-Modell

Um mögliche Einsatzgebiete thermoelektrischer Generatoren sowie deren Abmessungen schnell und einfach einschätzen zu können, sind analytische Modelle erforderlich, die die Leistung und den Wirkungsgrad beliebig grosser Generatoren hinreichend genau beschreiben.

Das Verhalten eines einzelnen Generatorelementes (pn-Couple) kann analytisch nur dann sehr genau beschrieben werden, wenn die Generatorschenkel aus jeweils einem Material mit hinreichend konstanten Materialparametern resp. konstanter thermoelektrischer Gütezahl Z aufgebaut sind. Einfache Thermoelektrische Generatoren, wo die Temperaturen auf der warmen und kalten Seite konstant sind, können entsprechend analytisch hinreichend genau beschrieben werden [4]. Falls Thermoelektrische Generatoren für den Hochtemperaturbereich aus zwei oder mehreren thermoelektrischen Materialien pro Schenkel bestehen, wird die Modellierung komplizierter. Snyder hat mit seinem Compatibility-Approach [5] eine Methode definiert, die eine Optimierung entsprechender Schenkel ermöglicht. Falls die einzelnen Materialien im jeweiligen optimalen Temperaturbereich und bei optimaler Stromdichte betrieben werden können, erreicht der Wirkungsgrad ein Optimum.

Aufwändiger wird die Modellierung im Falle eines TEGs, der mit konvektiven Quellen (z. B. Wasser) sowohl gespeist als auch gekühlt wird. Die Änderung der Temperaturen auf der heissen und kalten Seite des Generators müssen dann zusätzlich berücksichtigt werden.

Im Rahmen des Projektes „Das Thermoelektrische Kraftwerk“ [2] wurde an der 25. Internationalen Konferenz für Thermoelektrik (6. bis 10. August 2006 in Wien) ein analytisches Modell vorgeschlagen, das sich zur einfachen Beschreibung eines grossen Thermoelektrischen Generators, auch unter Berücksichtigung der Temperaturänderung auf der heissen und kalten Seite, sehr gut eignet [3]. Die Modellvereinfachungen können dabei wie folgt zusammengefasst werden:

- Materialparameter wie die thermische Leitfähigkeit, die elektrische Leitfähigkeit und der Seebeck-Koeffizient sind als Konstanten angenommen. Bei stark veränderlichen Materialparametern, beispielsweise in Abhängigkeit der Temperatur, müssen die Werte entsprechend gemittelt werden
- Die Wärmeübergänge vom Fluid in den Festkörper und durch den Isolator zu den Thermoelementen sind in einer Konstante (Overall heat transfer coefficient) zusammengefasst. Die Werte müssen also je nach Strömungsbedingung und Wärmetauscherdesign jeweils neu bestimmt werden.
- Ein einfacher analytischer Ausdruck ergibt sich nur für den Fall gleicher Massenströme auf der heissen und kalten Seite des Generators.

Bei Kenntnis der Quellentemperaturen des warmen und kalten Fluids (T_H^{in} , T_L^{in}), der thermoelektrischen Gütezahl Z, der Wärmedurchgangszahl L, der Dicke der Halbleiterschenkel d, der thermischen Leitfähigkeit des Halbleitermaterials λ , der Wärmekapazität C_p , und des Massenstroms m kann die Leistung sehr einfach berechnet werden zu

$$P_4 = \beta^* \gamma \dot{m} C_p \frac{Ld}{\lambda} Z (T_H^{in} - T_L^{in})^2$$

γ kann als Geometriefaktor interpretiert werden. Für thermoelektrische Generatoren basierend auf dem Gegenstromprinzip gilt

$$\gamma = \frac{X}{4 \cdot (1 + X)^2}$$

Wobei X als relative Grösse des Thermoelektrischen Generators bezeichnet werden kann:

$$X = \frac{Lwl}{\beta \dot{m} C_p}$$

Hier ist w die Breite und l die Länge des Generators, das Produkt wl entspricht also der gesamten Querschnittsfläche des Thermoelektrischen Generators. β und β^* sind Konstanten, die den Peltier-Effekt mitberücksichtigen (siehe [3]).

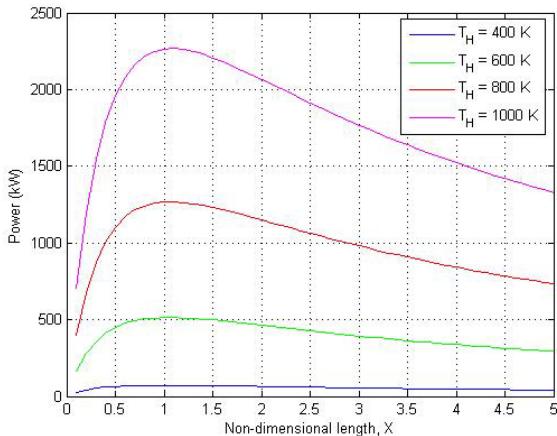


Fig. 1: Elektrische Leistung eines TEG in Abhängigkeit der relativen Grösse X für verschiedene Quellentemperaturen.

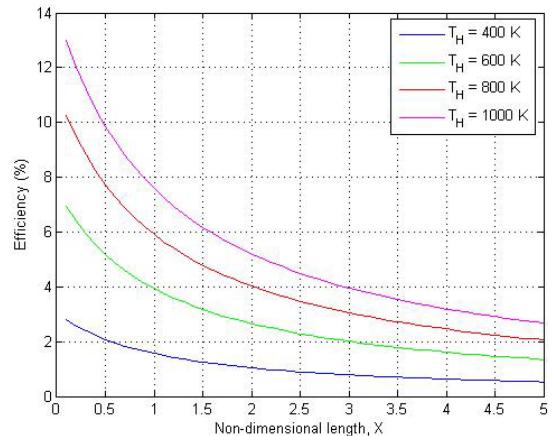


Fig. 2: Wirkungsgrad eines TEG in Abhängigkeit der relativen Grösse X für verschiedene Quellentemperaturen

Fig. 1 zeigt die TEG-Leistung in Abhängigkeit von X für verschiedene relative Größen X und Temperaturen der heißen Quelle T_H^{in} . Im Beispiel beträgt der Massenstrom auf der warmen und kalten Seite jeweils 20 kg/s, die Quellentemperatur der kalten Seite beträgt 288 K und die Materialdaten entsprechen einer durchschnittlichen Gütezahl ZT von 1.

Das Beispiel zeigt, dass mit Materialien im Bereich ZT=1 maximale Wirkungsgrade zwischen 10 % und 20 %¹ des Carnot-Wirkungsgrades erreicht werden können, was im Vergleich zu konventionellen Wärmekraftmaschinen sehr bescheiden ausfällt.

Vergleicht man die Abbildung mit Fig. 2, so fällt auf, dass die relativen Maxima für die Leistung und den Wirkungsgrad nicht an derselben Stelle (relativ zu X) liegen. Für X=1 liefert der Generator maximale Leistung, X nahe 0 bedeutet einen hohen Wirkungsgrad (entweder hoher Massenstrom oder kleine TEG-Fläche). Die relative Grösse X des Thermoelektrischen Generators erlaubt also eine einfache Abschätzung der Generatorgrösse, je nach zur Verfügung stehenden Quellen und gewünschtem Betriebszustand.

¹ Ein maximaler Wirkungsgrad von 3% bei $T_H=400$ K, $T_L=288$ K und $X=0$ entspricht 10% des Carnot Wirkungsgrades $(T_H-T_L)/T_H$; ein maximaler Wirkungsgrad von 14% bei $T_H=1000$ K, $T_L=288$ K und $X=0$ entspricht 20% des Carnot Wirkungsgrades.

Mögliche Anwendungen

Aufgrund des tiefen Wirkungsgrades thermoelektrischer Generatoren sind- analog zum Niedertemperaturbereich, speziell Anwendungen im Bereich der Abwärmenutzung und Kraft-Wärme-Kopplung interessant. Szenarien, wo beispielsweise in Gas- oder Dampfkraftwerken konventionelle Wärme- kraftmaschinen durch TEGs ersetzt werden, sind mittelfristig und wohl auch langfristig sehr unrealistisch. Allerdings könnten TEGs in Kombination mit konventionellen Prozessen den Anlagenwirkungs- grad erhöhen. Eine detaillierte Betrachtung der verschiedenen Szenarien liegt noch nicht vor.

Nationale Zusammenarbeit

Folgende Organisation mit Sitz in der Schweiz tritt ebenfalls als Projektpartner auf:

- EMPA Dübendorf: Dr. Anke Weidenkaff, Festkörperchemie und Analytik (Projekt GeoTEP)

Als akademische Ansprechpartner treten an der ETH Zürich folgende Institute auf:

- Institut für Leistungselektronik und Messtechnik (Prof. Kolar)
- Institut für Energietechnik (Prof. A. Steinfeld, Prof. D. Poulikakos)

Internationale Zusammenarbeit

Dieses Projekt ist momentan in keinem internationalen Projekt integriert. Gepflegt werden akademische Kontakte zum Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), zur Kyoto University of Technology (Prof. R. O. Suzuki) sowie zum Österreichischen Bioenergie-Zentrum.

Bewertung 2006 und Ausblick 2007

Die im vorliegenden Projekt zum Ziel gesetzten Modellierungen und Simulationen thermoelektrischer Generatorsysteme im Hochtemperaturbereich sind eine optimale Ergänzung zu den Betrachtungen im Niedertemperaturbereich [2]. Zusammen wird sich so die Möglichkeit bieten, mögliche TEG- Anwendungen gesamthaft zu bewerten. Da das Hochtemperatur-Projekt erst kürzlich lanciert wurde, liegen noch keine ausführlichen Resultate vor. Die erstellten Modelle thermoelektrischer Generatoren können jedoch relativ einfach auch im Hochtemperaturbereich angewandt werden. Allerdings müssen zusätzliche Faktoren wie zunehmende Wärmeverluste oder Segmentierung der Materialien in der Modellierung mitberücksichtigt werden.

Referenzen

- [1] **BfE-Projektantrag Anwendungspotential der thermoelektrischen Stromerzeugung im Hochtemperaturbereich**, Oktober 2006
- [2] **BfE-Projektantrag Das thermoelektrische Kraftwerk**, August 2005
- [3] C. Eisenhut and A. Bitschi. **Thermoelectric Conversion System based on Geothermal and Solar Heat**, Proceedings of 25th International Conference on Thermoelectrics, Vienna 2006
- [4] K. Matsuura and D. M. Rowe. **Handbook of Thermoelectrics**, chapter 44, pages 573-593. CRC Press, Inc., 1995.
- [5] G. J. Snyder. **Thermoelectrics Handbook, Macro to Nano**, chapter 9, pages 9.1-9.26. CRC Press, Inc., 2006