



PROJEKT

DAS THERMOELEKTRISCHE KRAFTWERK

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 / fruehlich@eeh.ee.ethz.ch , www.eeh.ee.ethz.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	101356 / 151645
BFE-Projektleiter	Roland Brüniger
Dauer des Projekts (von – bis)	15. September 2005 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. Diese Tatsache hat eine angepasste Zielsetzung dieses Projektes zur Folge. Der Begriff des Thermoelektrischen Kraftwerks umfasst neu auch die Abwärmenutzung und die Kraft-Wärme-Kopplung.

Im Bereich der Modellierung Thermoelektrischer Generatoren und einzelner Halbleiterschenkel wurden die grössten Fortschritte erzielt. Nebst einem numerischen Generatormodell wurden analytische Ausdrücke gefunden, die eine Dimensionierung und Funktionsabschätzung eines Thermoelektrischen Generators (TEG) sehr einfach erlauben. Parallel dazu wurde ein auf finiten Elementen basierendes Modell eines Thermoelementes konstruiert, das die Temperaturabhängigkeiten der Materialeigenschaften sowie die 3-dimensionale Verteilung von Temperatur, elektrischem Strom und Potential mit berücksichtigt. Dieses „exakte“ Modell eines Thermocouples kann also gleichzeitig auch zur Validierung des Generatormodells dienen.

Nebst möglichen Anwendungen im Niedertemperaturbereich werden in einem Parallelprojekt [2] auch Anwendungen im Hochtemperaturbereich untersucht. In einzelnen Anwendungsbereichen werden auch Studentenprojekte betreut.

Projektziele

Im Projektantrag [1] wurden Ende August 2005 die folgenden Zielsetzungen definiert:

„Generell soll die Machbarkeit eines thermoelektrischen Kraftwerks mittels theoretischen Betrachtungen, Simulationen und punktuellen, experimentellen Abklärungen erarbeitet werden.“

Teilziele:

- *Es ist ein Modell mit Simulation vorhanden, welches die Funktionalität unter Einbezug von ökonomischen und ökologischen Kriterien beschreibt.*
- *Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse werden die Charakteristika von verschiedenen thermoelektrischen Materialien, wie sie interaktiv an der EMPA erarbeitet und beschrieben werden, validiert → Mindestanforderungen an die thermoelektrischen Materialien.*
- *Applikationsmöglichkeiten werden aufgezeigt und bewertet.*

Obige generelle Zielsetzung sowie die Teilziele für das Projekt gelten weiterhin, allerdings muss der Begriff des Thermoelektrischen Kraftwerks angepasst werden.

Wie im Abschnitt „Abschätzung des TEG-Einsatzes in der Geothermie“ beschrieben wird, müsste die Gütezahl wirtschaftlich nutzbarer thermoelektrischer Materialien mindestens den Wert 5 erreichen, um in TEG-Systemen Wirkungsgrade vergleichbar zu konventionellen Umwandlungsprozessen (ORC, Kalina) zu erhalten. Dieser Wert wird mittelfristig und ev. auch langfristig für kommerziell erhältliche Materialien nicht erreicht.

Der Begriff des Thermoelektrischen Kraftwerkes muss also folgendermassen verstanden werden:

- Thermoelektrische Generatoren ermöglichen eine effizientere Nutzung der Ressourcen dank Abwärmenutzung oder Wärme-Kraft-Kopplung
- Der Thermoelektrische Generator ist also entweder direkt an einen konventionellen Prozess gekoppelt oder die TEG-Abwärme wird als Wärme weiter genutzt.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Die durchgeführten Arbeiten können grob in die 4 Teilbereiche *mehrdimensionale Analyse*, *SMILE-Modelle*, *analytisches Modell* und *Bewertung von möglichen Applikationen* unterteilt werden. Die einzelnen Punkte sind im Folgenden näher beschrieben.

Mehrdimensionale Analyse (FE-Simulation) von thermoelektrischen Bauteilen

Für die Bestimmung der Ausgangsleistung und der Effizienz sind verschiedenen Modellierungstechniken bekannt. [3] Der einfachste Ansatz bedient sich der Anwendung von gemittelten Werten für die verschiedenen Materialparameter. Neben iterativen Methoden (infinite staging) werden auch analytisch exakte Methoden angewendet, die jedoch nur mit hoher mathematischer Kunst bzw. numerischen Verfahren gelöst werden können.

Die vorher genannten Methoden gehen von eindimensionalen Verteilungen der Temperatur und des elektrischen Potentials aus. Obgleich diese Annahme im Allgemeinen eine gute Annahme ist, gibt es Konfigurationen, für die diese Annahme möglicherweise nicht gültig sein kann. Es wurde eine Methode entwickelt, die nicht auf dieser Annahme beruht und eine Analyse erlaubt, in der die Temperatur- und die elektrische Potentialverteilung ein, zwei oder dreidimensional sein kann.

Dafür wurden zuerst die Bestimmungsgleichungen für die mehrdimensionale Temperatur- und Potentialverteilung in thermoelektrischen Materialien für den stationären Zustand unter Abwesenheit von angelegten magnetischen Feldern aufgestellt. Dabei entsteht ein System aus zwei gekoppelten partiellen Differentialgleichungen mit zwei abhängigen Variablen, der Temperatur T und dem elektrischen Potential V . Die exakte Lösung dieses nichtlinearen Gleichungssystems kann aufgrund komplizierter Funktionen für die Randbedingungen sehr schwierig werden. In diesem Fall wurde die Methode der finiten Elemente zurückgegriffen. Das Gleichungssystem konnte mit einer erweiterten Form der gedämpften Newton-Methode gelöst werden. Erste Ergebnisse zur Illustration der multidimensionalen Effekte werden folgend gezeigt.

Simulation eines thermoelektrischen n-Schenkels:

Die nachfolgenden Bilder (Fig. 1-3) zeigen Ergebnisse einer FE-Simulation für die Temperatur, das elektrische Potential und die Stromdichte. Der Querschnitt des Schenkels beträgt in diesem Beispiel 25 mm^2 , die Länge 10 mm die Temperatur auf der heissen Seite $T_h = 900\text{ K}$ und die Temperatur auf der kalten Seite $T_c = 300\text{ K}$. Die Randbedingungen sind in Tabelle 1 gegeben.

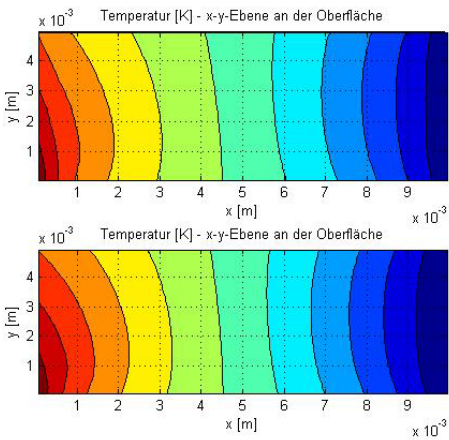


Fig. 1: Temperatur

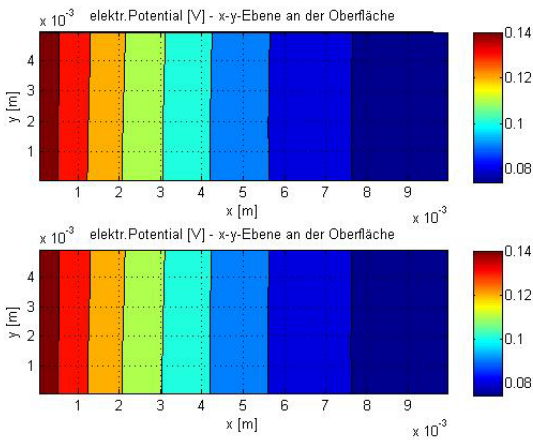


Fig. 2: Elektrisches Potential

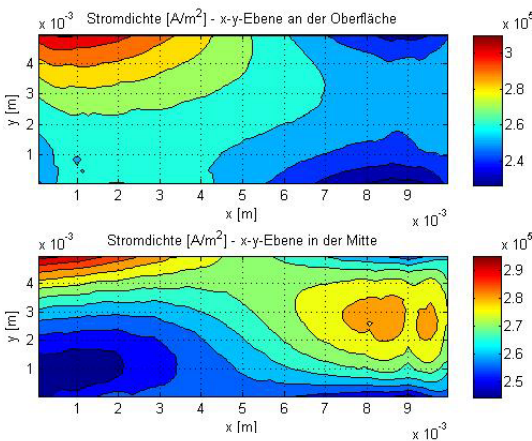


Fig. 3: Stromdichte

	Fläche:	Randbedingung:	Randbedingung:
	1	thermisch	elektrisch
	2 - 5	$T = T_h - 150 \cdot (y/L_y)$ $h = 200\text{ W/m}^2\text{K}$ $T_u = (T_h + T_c)/2$	$V_0 = \alpha(T) \cdot \Delta T$ $n \cdot J = 0;$
	6	T_c	$V_0/2$

Tabelle 1 :Randbedingungen für die FE-Simulation

SMILE-Modell des Thermoelektrischen Generators (TEG)

SMILE ist eine objektorientierte Umgebung für die Modellierung und Simulation dynamischer Systeme mit kontinuierlichem und diskretem Charakter. Das linuxbasierte Softwarepaket wurde an der TU Berlin und am Fraunhofer-Institut (FIRST) entwickelt. Bestehende Modellbibliotheken decken weite Bereiche thermischer Energiesysteme und der Gebäudesimulation ab.

Die Objektorientierung erlaubt einen einfachen und übersichtlichen Aufbau komplexer Modelle. Für den Thermoelektrischen Generator wurde die in Fig. 4 gezeigte Modellstruktur gewählt.

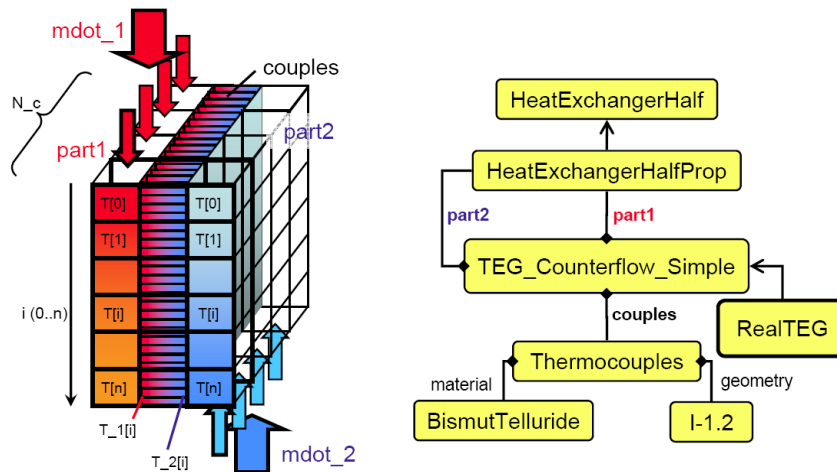


Fig. 4: Smile-Modell des Thermoelektrischen Generators. Modellaufbau (links) und Modellkomponenten (rechts)

Der Generator besteht aus zwei Wärmetauschern (warme Seite mit dem Massenstrom \dot{m}_{dot_1} , kalte Seite mit dem Massenstrom \dot{m}_{dot_2}) und den Halbleiterschenkeln (Thermocouples). Zur Modellierung der Temperaturänderung im Fluid wird der Generator in der Flussrichtung des Fluids in einzelne Bereiche aufgeteilt (jeweils eindimensionale Arrays $T[0..n]$, $T_{_1}[0..n]$, ...). Da in dieser Generatorkonfiguration zwei identische Wärmetauscher eingebaut sind, reicht ein Wärmetauschermodell (HeatExchangerHalf) aus. Ein „Kind“ dieses Modells (HeatExchangerHalfProp) beschreibt zusätzlich die Temperaturabhängigkeiten der Fluidparameter. Die beiden von dieser Klasse instanziierten Objekte part1 und part2 beschreiben die beiden Wärmetauscher und sind Teil des Generatormodells (TEG_Counterflow_Simple). Die Modellklasse „Thermocouples“ beinhaltet zwei Objekte, die die Materialdaten und Daten zur Couple-Geometrie enthalten. Dieser Aufbau ermöglicht somit eine einfache Änderung der Materialdaten und Geometrien.

Sind alle entsprechenden Modellparameter bekannt, erlaubt obiges Modell eine sehr genaue Simulation des TEG-Betriebsverhaltens. Eine Herausforderung ist die genaue Behandlung des Wärmeübergangs vom Fluid in die Halbleiterschenkel sowie die genaue Kenntnis der thermischen und elektrischen Kontaktparameter (Kontaktwiderstände). Aus der Literatur können zwar verlässliche Daten gewonnen werden, ein eigener Versuchsaufbau zwecks Validierung des Modells ist aber dennoch notwendig.

SMILE-Modell einer tiefen Erdwärmesonde

Ein zweites in SMILE implementiertes Modell beschreibt eine tiefe Erdwärmesonde. Die einfache Struktur des Modells ist in Fig. 5 gezeigt. Wie im TEG-Modell erlaubt die Objektorientierung auch hier eine einfache Unterteilung des Modells in die Sonde (Tube) und das Erdreich (Earth). Die Modellstruktur wurde dabei im Wesentlichen aus einer an der TU-Berlin durchgeführten Diplomarbeit übernommen [6]. Durch die Diskretisierung des Modells können die Temperaturen der Sondenflüssigkeit (T_i , T_o) als eindimensionales Array, die Temperatur im Erdreich als zweidimensionales Array definiert werden.

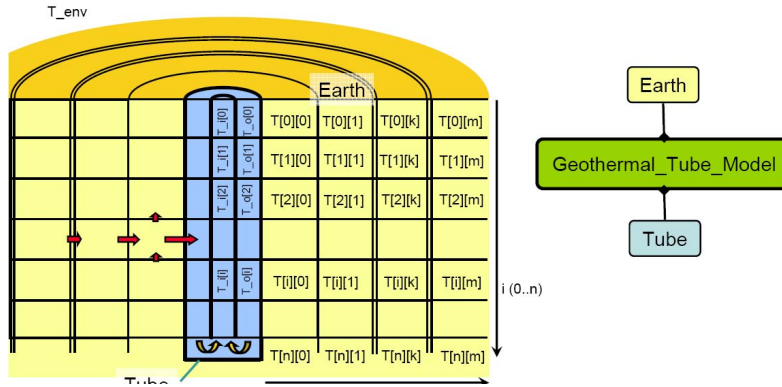


Fig. 5: Smile-Modell einer tiefen Erdwärmesonde. Diskretisierung (links) und Modellkomponenten (rechts)

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 sehr genau beschrieben werden. Auch einfache Thermoelektrische Generatoren, wo die Temperatur auf der warmen und kalten Seite als konstant angenommen wird, können analytisch hinreichend genau beschrieben werden [7]. Für den Fall eines TEGs, der mit konvektiven Quellen (z. B. Wasser) sowohl gespeist als auch gekühlt wird, hat Suzuki [5] gute Näherungen für verschiedene Generatorkonstruktionen gefunden. Allerdings führt die Vernachlässigung des Peltier-Effektes zu sehr optimistischen Modellergebnissen.

Im Rahmen dieses Projektes wurde an der 25. Internationalen Konferenz für Thermoelektrik (6. bis 10. August 2006 in Wien) ein verbessertes analytisches Modell vorgeschlagen, das den Peltier-Effekt berücksichtigt und verglichen mit numerischen Generatorberechnungen sehr geringe Modellabweichungen zeigt [4]. 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 Halbleiterschlenkel d , der thermischen Leitfähigkeit des Halbleitermaterials λ , der Wärmekapazität C_p , und des Massenstroms \dot{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 [5]).

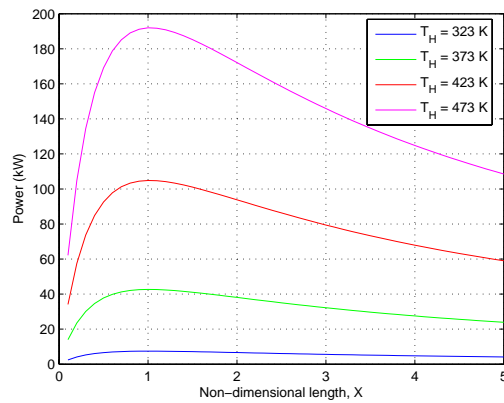


Fig. 6: Elektrische Leistung eines TEG in Abhängigkeit der relativen Grösse X für verschiedene Quellentemperaturen.

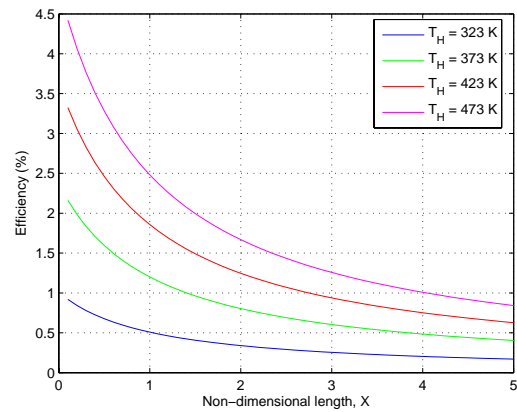


Fig. 7: Wirkungsgrad eines TEG in Abhängigkeit der relativen Grösse X für verschiedene Quellentemperaturen

Fig. 6 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 den besten heute erhältlichen Materialien (Bi_2Te_3). Vergleicht man die Abbildung mit Fig. 7, 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.

Abschätzung des TEG-Einsatzes in der Geothermie

Das im obigen Abschnitt vorgestellte Modell erlaubt einfache Abschätzungen zur Performance eines Thermoelektrischen Generators. Tabelle 2 zeigt einen Vergleich konventioneller Verfahren für die Niedertemperaturenergiekonversion geothermischer Energie mit Thermoelektrischen Generatoren basierend auf verschiedenen Gütezahlen ZT . Die berechneten TEG-Werte in der Tabelle sind Abschätzungen, die Anhand des analytischen Modells gemacht werden können. Eine detaillierte Analyse wird folgen. Die Ergebnisse zeigen allerdings klar, dass ZT -Werte von mindestens 5 erreicht werden müssten, um Generatoren mit vergleichbarer Effizienz erreichen zu können.

	Kalina	ORC	TEG $ZT = 1$	TEG $ZT = 3$	TEG $ZT = 5$
Quellentemperatur	150 °C	150 °C	150 °C	150 °C	150 °C
Massenstrom	20 kg/s	20 kg/s	20 kg/s	20 kg/s	20 kg/s
Kühlwassertemperatur	15 °C	15 °C	15 °C	15 °C	15 °C
Rücklauftemperatur	86 °C	64 °C	82 °C	82 °C	82 °C
Thermische Leistung	5.35 MW _{Th}	7.19 MW _{Th}	5.69 MW _{Th}	5.69 MW _{Th}	5.69 MW _{Th}
Wirkungsgrad therm. - elektr.	11.8 %	8.8 %	2.5 %	6 %	8 %
Elektrische Leistung	629 kW _{el}	630 kW _{el}	142 kW _{el}	341 kW _{el}	455 kW _{el}

Tabelle 2: Vergleich konventioneller Verfahren der Niedertemperaturenergiekonversion [9] mit möglichen zukünftigen Thermoelektrischen Generatoren

Die Vergleiche in der Tabelle zeigen, dass für die erfolgreiche Verdrängung konventioneller Wärmekraftmaschinen Materialien benötigt würden, die mittelfristig nicht erhältlich sein werden. Es besteht

ausserdem keine Einigkeit darüber, ob es überhaupt jemals möglich sein wird, Werte wie $ZT=5$ praktisch zu erreichen.

Die Aktivitäten im Bereich der Thermoelektrizität sind jedoch in den letzten Jahren weltweit sehr stark gewachsen. Mit der Aussicht auf mögliche verbesserte Materialien steigt auch die Zahl der möglichen Anwendungen, wie der folgende Abschnitt zeigt.

Mögliche TEG-Anwendungen

Aufgrund obiger Ergebnisse wird der Fokus in diesem Projekt nebst möglichen Anwendungen in der Nutzung der Geothermie auf weitere Anwendungen im Niedertemperaturbereich gesetzt. Besonders die beiden Konzepte der Abwärmenutzung und der Kraft-Wärme-Kopplung sind mittelfristig für neue TEG-Anwendungen am wahrscheinlichsten. Es werden also vermehrt Anwendungen verfolgt, wo entweder der Wirkungsgrad eine untergeordnete Rolle spielt und/oder die Verlustwärme des Generators noch weiter genutzt werden kann. Die ausführlichere Betrachtung möglicher Anwendungen hatte zur Folge, dass im Oktober zwei Studienarbeiten gestartet wurden (siehe „Laufende Semester- und Diplomarbeiten“). Die Konzepte sind hier kurz beschrieben:

- *Abwärmenutzung (Waste Heat Recovery)*

In der Nutzung der in Industrieprozessen oder thermischen Kraftwerken auftretenden Abwärme spielt der Wirkungsgrad eine untergeordnete Rolle, da die Wärme „nichts kostet“. Kriterien wie Investitionskosten (Kosten des Generators) und Leistungsdichte sind entsprechend viel wichtiger. Aufgrund der Wartungsfreiheit, des einfachen Aufbaus und der Modularisierbarkeit bieten TEG-Systeme in diesem Feld enorme Vorteile. Besonders in der Nutzung der Abgaswärme von Verbrennungsprozessen (Fahrzeuge und Gaskraftwerke), der Abwärme in Industrieprozessen (besonders Stahlindustrie) oder in Müllverbrennungsanlagen liegt ein enormes Potenzial.

- *Kraft-Wärme-Kopplung (Symbiotic Generation)*

Wird das Fluid auf der kalten Seite des Generators stark erwärmt, so dass die Temperatur des Fluids einen Einsatz für Heizzwecke erlaubt, kann die Verlustleistung entsprechend genutzt werden. Als Nebenprodukt der thermischen Energie liefert der TEG einen kleinen Bruchteil an elektrischer Energie dazu. Dieses Prinzip wurde in diversen Prototypen für Heizsysteme erprobt, die sich selbst mit elektrischer Energie für Pumpen und Elektronik versorgen. In naher Zukunft könnten thermoelektrische Kraft-Wärmekopplungs-Systeme in Gebäuden an Bedeutung gewinnen.

- *TEG als „Haupt-Kraftwerk“*

Thermoelektrische Generatoren zur Energieversorgung kompletter Systeme machen bislang nur in der Raumfahrt Sinn. Radionuklidbatterien sind die einzige Möglichkeit, über sehr lange Zeit bei sehr hoher Energiedichte konstant Energie zu liefern. Wie Tabelle 2 zeigt, ist beispielsweise die Effizienz von TEG-Systemen für die Niedertemperatur-Energiekonversion noch deutlich zu klein.

Laufende Semester- und Diplomarbeiten

- *Thermoelektrische Energie-Konversion in Gebäuden*

Im Rahmen einer Semesterarbeit evaluiert Damian Schneider potentielle Einsatzmöglichkeiten thermoelektrischer Generatoren in Gebäuden. Dabei soll anhand einfacher Modellierungen und Simulationen gezeigt werden, wie viel elektrische Leistung zwischen verschiedenen Wärmequellen und -senken generiert werden könnte. Die Motivation dazu sind verschiedene Prototypen für Heizsysteme, wo mittels TEGs die Pumpen und die Steuerungselektronik angetrieben werden kann. Die Arbeit dauert bis Februar 2007.

- *Peltier-Wäschetrockner*

In Zusammenarbeit mit der Firma VZug untersucht der ETH Diplomand Roman Gmünder den Einsatz von Peltier-Elementen in Wäschetrocknern. Dabei wird die Frage behandelt, wie viel Kondensationswärme mit heutigen Peltierelementen gepumpt werden kann und wie sich dies in Zukunft mit neuen Materialien entwickeln könnte. Nebst einer detaillierten Modellierung und

Simulation wird ein Versuchsmuster aufgebaut und in einem Tumbler zur Modellvalidierung eingebaut. Die Arbeit dauert bis Ende April 2007.

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

Betrachtet man die hohen Anforderungen an thermoelektrische Materialien für konkurrenzfähige Niedertemperatur-Energiewandlungssysteme (Beispiel Geothermie), so ist das ursprüngliche Ziel, die Machbarkeit Thermoelektrischer Kraftwerke im Niedertemperaturbereich zu demonstrieren (bsp. Geothermie), mittelfristig sehr unrealistisch. Dieses ursprüngliche Ziel kann deshalb sicher nicht erreicht werden. Der zukünftige Blickwinkel umfasst deshalb Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der Abwärmenutzung und Kraft-Wärme-Kopplung. Zusätzlich zum Niedertemperaturbereich wird auch der Hochtemperaturbereich [2] behandelt. Die relativ zu den einzelnen Teilzielen erzielten Fortschritte werden im Folgenden kurz kommentiert.

- *1. Teilziel: Es ist ein Modell mit Simulation vorhanden, welches die Funktionalität unter Einbezug von ökonomischen und ökologischen Kriterien beschreibt.*

Bezüglich der physikalischen Modellierung des Thermoelektrischen Generators konnte ein grosser Bereich dieses Teilziels erreicht werden: Für grosse Thermoelektrische Generatoren bestehend aus zahlreichen Modulen (die wiederum aus zahlreichen Halbleiterschnecken aufgebaut sind) ist nebst der vorgestellten analytischen Modellgleichung ein numerisches Modell des gesamten Generators verfügbar, womit TEGs mit verschiedenen Geometrien, Grössenordnungen und Materialeigenschaften einfach simuliert werden können. Die Modellvalidierung konnte bisher jedoch nur anhand von Werten aus der Literatur durchgeführt werden. Ausserdem sind FE-Simulationen einzelner Halbleiterschnecken und Modulen verfügbar, die ebenfalls Aussagen über die Modellgenauigkeit des Generatormodells erlauben. Ökonomische und ökologische Kriterien werden in einem nächsten Schritt beurteilt.

- *2. Teilziel: Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse werden die Charakteristika von verschiedenen thermoelektrischen Materialien, wie sie interaktiv an der EMPA erarbeitet und beschrieben werden, validiert → Mindestanforderungen an die thermoelektrischen Materialien.*

Im Rahmen des Konferenzbeitrages in Wien wurde am Beispiel eines grossen imaginären TEGs für die Geothermie gezeigt, wie sich verschiedene Massnahmen zur Verbesserung von ZT auf die Effizienz des Generators auswirken [4]. Die kommende Zusammenarbeit mit der EMPA muss in diesem Punkt fortlaufend zeigen, in welche Richtungen die Materialverbesserungen in Zukunft gehen könnten. Darauf aufbauend kann mit den Modellrechnungen gezeigt werden, wie sich dies auf mögliche Anwendungen auswirkt.

- *3. Teilziel: Applikationsmöglichkeiten werden aufgezeigt und bewertet.*

Eine Übersicht möglicher Anwendungen im Niedertemperaturbereich ist bereits vorhanden und wird in der Semesterarbeit zur TEG-Anwendung in Gebäuden ergänzt. Dazu werden im Rahmen eines zusätzlichen Projektes [2] mögliche Anwendungen im Hochtemperaturbereich untersucht.

Referenzen

- [1] **BfE-Projektantrag Das thermoelektrische Kraftwerk**, August 2005
- [2] **BfE-Projektantrag Anwendungspotential der thermoelektrischen Stromerzeugung im Hochtemperaturbereich**, August 2005
- [3] Sherman, B., Heikes, R.R., and Ure, R.W. Jr., **Calculation of efficiency of TE devices**, J. Appl. Phys., 31(1), 1 – 16, 1960.
- [4] C. Eisenhut and A. Bitschi. **Thermoelectric Conversion System based on Geothermal and Solar Heat**, Proceedings of 25th International Conference on Thermoelectrics, Vienna 2006
- [5] R. O. Suzuki and D. Tanaka. **Mathematical simulation of thermoelectric power generation with the multi-panels**. Journal of Power Sources, 122:201–209, February 2003.
- [6] J. Rädler. **Modellierung und Simulation einer geothermischen Tiefensonde zur Untersuchung eines kombinierten geo- und solarthermischen Energieversorgungssystems**
- [7] K. Matsuura and D. M. Rowe. **Handbook of Thermoelectrics**, chapter 44, pages 573-593. CRC Press, Inc., 1995.
- [8] S. Köhler. **Geothermisch angetriebene Dampfkraftprozesse, Analyse und Prozessvergleich binärer Kraftwerke**, Dissertation, TU Berlin 2005.