

Jahresbericht 2005, 13. Dezember 2005

# Projekt

## Das Thermoelektrische Kraftwerk

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 / <a href="mailto:froehlich@eeh.ee.ethz.ch">froehlich@eeh.ee.ethz.ch</a> , <a href="http://www.eeh.ee.ethz.ch">www.eeh.ee.ethz.ch</a>
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	101356 / 151645
Dauer des Projekts (von – bis)	15. September 2005 bis 15. März 2009

### ZUSAMMENFASSUNG

Das Projekt „Das Thermoelektrische Kraftwerk“ wurde im August dieses Jahres gestartet und steckt noch in der Anfangsphase. Basierend auf der Tatsache, dass im Niedertemperaturbereich keine befriedigenden Lösungen für die Generierung elektrischer Energie existieren, werden verschiedene Szenarien untersucht, wie ein thermoelektrisches Kraftwerk zu realisieren wäre und welche minimalen Anforderungen an die Materialien und die Quellen gestellt werden müssen.

Als mögliche Szenarien wurden die Generation elektrischer Energie für Einfamilienhäuser, für grössere Wohnseinheiten und das thermoelektrische Kraftwerk definiert.

In Vorkalkulationen, die auf einem einfachen Modell des thermoelektrischen Generators basieren, wurde für grössere Wohnseinheiten das Potenzial einer tiefen Erdwärmesonde zur Bereitstellung thermischer und elektrischer Energie untersucht. Diese Berechnungen anhand eines einfachen Modells zeigen, dass mittels einer tiefen Erwärmesonde der elektrische Energiebedarf von einigen Haushalten gedeckt werden könnte (siehe Vorkalkulationen im Gebäudebereich).

## 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.*

Das Gesamtziel und die Teilziele gelten weiterhin.

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Die seit Beginn des Projekts durchgeführten Arbeiten können grob in zwei Teilbereiche unterteilt werden: Vorkalkulationen im Gebäudebereich und die 3-D Simulation von Thermoelementen.

Momentan werden im Projekt die folgenden Fragen behandelt:

- Wo werden thermoelektrische Generatoren bereits heute eingesetzt? Was sind die Schwierigkeiten?
- Wie werden thermoelektrische Generatoren modelliert (Thermoelemente, Wärmetauscher, Druckverluste, Wirkungsgrad, ...)?
- Welche Arten thermoelektrischer Generatoren gibt es (Anordnung vieler Module, Aufbau des Generators, Systemintegration, ...)?
- Welche warmen und kalten Quellen sind denkbar? Wie sehen die Charakteristika dieser Quellen aus?
- Wie kann das Gesamtsystem optimiert werden?
- Welche Forschungslücken existieren?

In einem Dokument „Methods for Modelling and Optimizing Thermoelectric Generators“ werden die Erkenntnisse und offenen Fragen zusammengefasst. Bis jetzt können folgende Aussagen gemacht werden:

- Im Bereich thermoelektrischer Materialien wurde in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich sehr viel Forschungsarbeit geleistet. Bis in die Mitte der Neunzigerjahre musste man davon ausgehen, dass der ZT-Wert<sup>1</sup> thermoelektrischer Materialien nicht höher als eins sein kann- jüngste Arbeiten haben diese Limite jedoch klar überschritten (ZT = 3..4) [4]. Für den Bau thermoelektrischer Generatoren sind heute Materialien mit ZT=1 üblich.
- In den Achtzigerjahren wurde viel Arbeit in die Evaluation von möglichen Anwendungen für thermoelektrische Generatoren investiert (ocean power plants, waste heat recovery) [5]. Bis heute haben sich aufgrund des tiefen elektrischen Wirkungsgrades aber nur An-

---

<sup>1</sup>  $ZT = (\alpha^2/\rho\lambda) \cdot T$ ; wobei  $\alpha$ : Seebeck-Koeffizient [V/K];  $\rho$ : elektrische Leitfähigkeit [ $\Omega m$ ];  $\lambda$ : thermische Leitfähigkeit [W/mK];  $T$ : mittlere Temperatur am Thermoelement [K]; Je höher der ZT-Wert des thermoelektrischen Materials, desto höher der elektrische Wirkungsgrad des Generators.

wendungen für aussergewöhnliche Randbedingungen durchgesetzt (Space Applikationen, Power Supply fern von elektrischen Netzen, kleine Leistungen für Geräte und Sensoren).

- Für die Modellierung von Thermoelementen und thermoelektrischer Generatoren wurden in den letzten dreissig Jahren diverse Modelle entwickelt, die sich jeweils für spezifische Aussagen eignen [2]. Eine Modellierung des Gesamtsystems thermoelektrischer Energieerzeugung fehlt weitgehend- meist sind warme und kalte Quellen als gegeben angenommen.
- Das Prinzip symbiotischer Erzeugung von elektrischer und thermischer Energie wurde bereits von diversen Autoren verfolgt [3]. Es verbessert den Systemwirkungsgrad, indem die Verlustwärme des Generators weitgehend genutzt wird. Obwohl der elektrische Wirkungsgrad dadurch reduziert wird und im Niedertemperaturbereich elektrische Energie nur als Beiprodukt thermischer Energie erzeugt werden kann, scheint dieses Konzept beispielweise für die Nutzung geothermischer Energie sehr sinnvoll zu sein.

## VORKALKULATIONEN IM GEBÄUDEBEREICH

Für die Nutzung der thermischen Energie aus einer tiefen Erdwärmesonde wurden zwei mögliche Systemvarianten in einem einfachen Modell quantitativ untersucht: Die Nutzung der thermischen Energie nur für die Erzeugung elektrischer Energie (maximaler elektrischer Wirkungsgrad) sowie die Nutzung der thermischen Energie für Warmwasser, Heizung und Erzeugung elektrischer Energie (symbiotische Energieerzeugung). Für beide Varianten beträgt die Tiefe der Erdsonde 2500 m, und die Temperatur am Ausgang der Sonde liegt dadurch im Bereich von 85 °C. Es ist somit eine thermische Leistung von 70 kW<sub>th</sub> verfügbar.

### Grosser elektrischer Wirkungsgrad

Im ersten Beispiel wird die gesamte zur Verfügung stehende thermische Energie zur Generation elektrischer Energie verwendet.

Um den Wirkungsgrad gross zu halten, muss die Temperatur an den Thermoelementen des Generators auf der warmen und auf der kalten Seite praktisch konstant gehalten werden, was mit grossen Massenströmen pro Flächeneinheit erreichbar ist.

Da sich das Fluid auf der kalten Seite aufgrund des grossen Massenstromes kaum erwärmt, kann die Verlustwärme sehr schlecht genutzt werden, sie muss im Kühlkreislauf vernichtet werden.

Die Berechnungen haben gezeigt, dass mit einer tiefen Erdwärmesonde neun (ZT = 3) bis vierzehn (ZT = 10) Einfamilienhäuser (36 bis 56 Personen) mit elektrischer Leistung versorgt werden könnten. Um die Spitzen zu decken, wäre allerdings auf der elektrischen Seite ein Speicher (Batterien, Supercaps) notwendig. Die thermische Leistung der Sonde würde für die thermische Versorgung von knapp 90 Einfamilienhäusern (360 Personen) ausreichen.

### Minimale Wärmeverluste (hoher Systemwirkungsgrad)

Da im thermoelektrischen Generator grosse Wärmeverluste entstehen, wird versucht, diese entsprechend zu nutzen und nicht einfach im Kühlkreislauf zu vernichten. Im zweiten durchgerechneten Beispiel wird die Verlustwärme des thermoelektrischen Generators deshalb zur Warmwasserbereitung genutzt. Der Massenstrom auf der kalten Seite des Generators entspricht also dem Warmwasserverbrauch aller Personen, die mittels der tiefen Erdwärmesonde mit thermischer Energie versorgt werden. Da der Massenstrom pro Fläche auf der kalten Seite sehr klein ist, erwärmt sich das kalte Wasser bei geeigneter Flächenwahl des Generators immer gleich stark- im vorliegenden Fall immer um 43 K, was für die Warmwasserversorgung ausreicht. Auf der warmen Seite des Generators wird ein hoher Massenstrom verwendet, um die Temperatur annähernd konstant zu halten (höherer elektrischer Wirkungsgrad). Mit der tiefen Erdwärmesonde könnten so 85 Einfamilienhäuser (340 Personen) mit thermischer Leistung (Heizung und Warmwasser) versorgt werden.

Der Temperaturanstieg auf der kalten Seite bewirkt eine kleinere mittlere Temperaturdifferenz am Generator und somit ein kleinerer elektrischer Wirkungsgrad. Im Falle von  $ZT = 10$  reicht die gewonnene elektrische Energie zur Versorgung von dreieinhalb Einfamilienhäusern (14 Personen).

Elektrische Energie ist hier also ein kleines Nebenprodukt der thermischen Energie. Im Gegensatz zum ersten Beispiel kann hier jedoch praktisch die gesamte thermische Energie der Sonde genutzt werden.

Diese Vorkalkulationen lassen erste Schlüsse zu:

- Die Verbesserung thermoelektrischer Materialien (Vergrösserung des ZT-Wertes) bewirkt einen signifikanten Anstieg im Wirkungsgrad, jedoch stark begrenzt von der Art und Temperatur der Quelle.
- Falls die Abwärme genutzt wird, sinkt zwar der elektrische Wirkungsgrad, es kann jedoch fast die gesamte thermische Energie der Sonde genutzt werden.
- Für elektrische Energie als Beiproduct thermischer Energie liefert der thermoelektrische Generator interessante Anwendungsgebiete im Niedertemperaturbereich

### 3-D SIMULATION EINES THERMOELEMENTES

Um ein möglichst reales Verhalten des thermoelektrischen Wandlers nachbilden zu können wurde ein dreidimensionales, physikalisches Modell eines einzelnen Thermocouples (je ein n- und p-Schenkel) aufgebaut [6-8]. Beim Aufbau der Geometrie wurde mit möglichst einfachen Formen gearbeitet um unangenehmen Effekten bei der Generierung des Netzes vorzubeugen und den Rechenaufwand für die numerische Lösung in einem bewältigbaren Bereich zu halten. Die thermoelektrische Energiewandlung stellt ein gekoppeltes thermisches und elektrisches Problem dar. Daraus ergeben sich auch verschiedenste Nichtlinearitäten bei den Materialgrössen, die in bisherigen Betrachtungen vernachlässigt wurden. Mathematisch werden solche Vorgänge durch partielle Differentialgleichungen (PDE's) beschrieben. Die Lösung dieser stark nicht-linearen sowie gekoppelten Systeme von PDE's wurde mit FEMLAB unter Verwendung der bewährten Methode der finiten Elemente durchgeführt. Die Zu- und Abführung der thermischen Energie wurde durch erzwungene Konvektion modelliert. Dabei wurde in einer ersten Version von einer vollausgebildeten, laminaren Strömung ausgegangen. Die Ergebnisse der ersten Simulationen wurden indirekt durch Ergebnisse aus analytischen Modellberechnungen und gut dokumentierten Versuchen validiert.

Weitere Vorgehensweise:

- Verbesserung des Modells im Bereich der Wärmeübertragung (Strömungsmechanik - turbulente Strömung)
- Erweiterung der Simulation für ein Modul (Multi-couples in Serie)
- Aufbau, Modellierung, Simulation eines thermoelektrischen Generators mit Modulen und Wärmeübertragungseinheiten

### 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 mit Aussicht auf eine spätere Beteiligung in Form von Diplomanden treten an der ETH Zürich folgende Institute auf:

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

## Bewertung 2005 und Ausblick 2006

Das in der zweiten Hälfte des Jahres 2005 gestartete Projekt steckt noch in der Anfangsphase, die Teilziele für das erste Jahr (Skizzieren von verschiedenen Szenarien, Entwicklung von physikalischen Modellen) müssen noch fertig erarbeitet werden. Die gemachten Vorkalkulationen bilden eine Grundlage für alle weiteren Projektschritte.

Ein zentrales Element der kommenden Aktivitäten ist die Abklärung der Frage, unter welchen Umständen ein thermoelektrisches Kraftwerk im Niedertemperaturbereich (warme Quellen bis 150°C) überhaupt realisierbar ist oder ob grundsätzlich Quellen mit höherer Exergie für die elektrische Energieerzeugung benötigt werden. Weiter bleibt die Frage zu klären, ob die Erzeugung elektrischer Energie als Beiproduct thermischer Energie, wie in den Vorkalkulationen erwähnt, ökonomisch sinnvoll ist oder nicht.

Der Aufbau eines Engineering-Tools zur Bewertung verschiedener Systeme zur thermoelektrischen Energieerzeugung wird viel Zeit in Anspruch nehmen. Ebenfalls ist für die Modellierung des Gesamtsystems eine Validierung einzelner Systemaspekte notwendig. Im kommenden Jahr sollen diese Aspekte klar dargestellt werden und mit dem Aufbau eines Generatorsystems im Labor zur Modellvalidierung begonnen werden.

Zusammenfassend werden im kommenden Jahr 2006 folgende Punkte behandelt:

- Fortsetzung der Literaturrecherche, Vervollständigung des Dokuments „Methods for Modelling and Optimizing Thermoelectric Generators“ und Beantwortung der genannten Fragen unter „Literaturrecherche“.
- Modellierung des Gesamtsystems: Aufbau eines Engineering-Tools zur Beurteilung verschiedener Systemvarianten des thermoelektrischen Generators
- Ausführliche Modellierung eines Thermoelementes (3D)
- Beginn des Aufbaus eines Generatorsystems im Labor zur Validierung verschiedener Modellaspekte

## Referenzen

- [1] **BfE-Projektantrag Das thermoelektrische Kraftwerk**, August 2005
- [2] D. M. Rowe (Editor), **Handbook of Thermoelectrics**, CRC Press, Inc. 1995
- [3] G. Min, D. M. Rowe, **Recent Concepts in Thermoelectric Power Generation**, 21<sup>st</sup> International Conference on Thermoelectrics (2002)
- [4] L. H. Dubois, **An Introduction to the DARPA Program in Advanced Thermoelectric Materials and Devices**, 18<sup>th</sup> International Conference on Thermoelectrics (1999), 1
- [5] D. K. Benson, T. S. Jayadev, **Thermoelectric Energy Conversion – Economical Electric Power from Low Grade Heat**, Proceedings of the 3rd International Conference on Thermoelectric Energy Conversion, 27
- [6] A. Brandstetter, E. P. Chock, **Generalized Analysis of Thermoelectric Device Configurations**, **Energy Conversion**, Vol. 16, pp 125-131
- [7] P. G. Lau, R. J. Buist, **Temperature and Time Dependent Finite-Element Model of a Thermoelectric Couple**, 15<sup>th</sup> International Conference on Thermoelectrics (1996), 227
- [8] P. G. Lau, R. J. Buist, **Calculation of Thermoelectric Power Generation Performance using Finite Element Analysis**, 16<sup>th</sup> International Conference on Thermoelectrics (1997), 563