



PROJEKT

ANWENDUNGSPOTENTIAL DER THERMO- ELEKTRISCHEN STROMERZEUGUNG IM HOCHTEMPERATURBEREICH

Jahresbericht 2007

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 / fröhlich@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 2005 bis 15. März 2009
Datum	30. November 2007

Zusammenfassung

Verschiedene relevante Szenarien für den Einsatz von thermoelektrischen Generatoren (TEGs) wurden bezüglich ihrer Leistungscharakteristika evaluiert und mit konventionellen Energiekonversionsverfahren verglichen. Abgesehen von der Abfallwärme - Nutzung (thermische Energie gratis) und Topping-up-Anwendungen erscheint der Einsatz von TEGs mit den heute verfügbaren Materialien ($ZT=1$) nicht sinnvoll bzw. konkurrenzfähig. Die Entwicklungen im Bereich der Materialwissenschaft sind jedoch enorm und versprechen mittelfristig die Verfügbarkeit von Materialien mit markant verbesserter Gütezahl. Es soll betont werden, dass die Thermoelektrizität das Potential hat sowohl Hochtemperatur als auch Niedertemperaturenergie effizient und konkurrenzfähig in elektrische Energie zu wandeln. Diese Perspektive sollte verstärkt Kräfte und Mittel frei setzen, um einen wertvollen Beitrag zur effizienteren Nutzung von Energie mit hoher ökologischer Verträglichkeit zu leisten.

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.

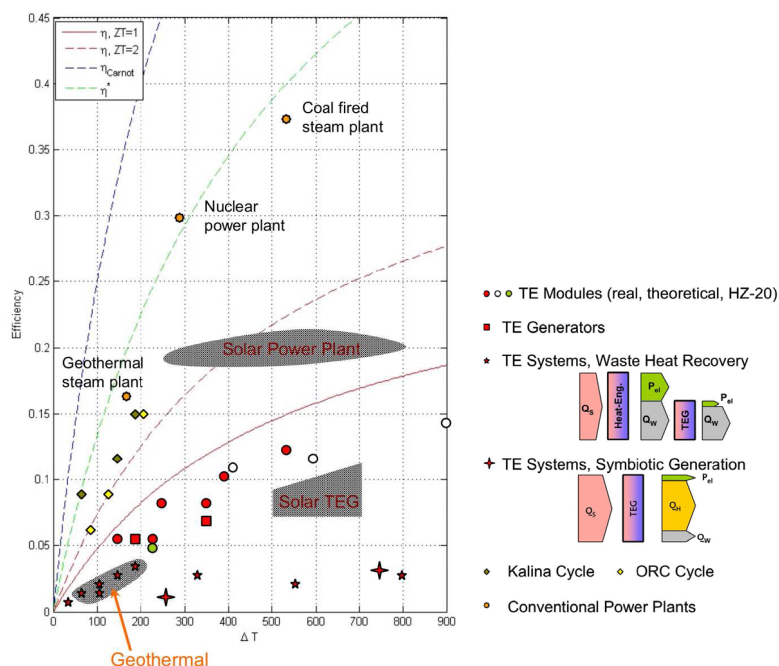
Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Mit den vorhandenen analytischen Modellen wurde die Performance von thermoelektrischen Generatoren im Hinblick auf mögliche Einsatzgebiete evaluiert.

1. Anwendungen thermoelektrischer Generatoren

Übersicht:

Abgesehen von kleinen Nischenprodukten hat sich der thermoelektrische Generator bis heute nur in der Raumfahrt durchgesetzt, in sogenannten Radionuklidbatterien. Terrestrische Anwendungen sind hauptsächlich in der Mess- und Regelungstechnik zu finden. Auch im Bereich der Kühltechnik finden sich verschiedene kommerzielle Anwendungen im Klein- und Kleinstleistungsbereich. Weitere Nischenprodukte, die in naher Zukunft dank besseren Materialien eine breitere Marktakzeptanz erreichen könnten, finden sich relativ zahlreich in der Literatur.



Figur 1: Wirkungsgrade im Vergleich

Figur 1 zeigt die Wirkungsgrade von verschiedenen Wärme-Kraft-Maschinen in Abhängigkeit des Temperaturunterschiedes der Wärmequelle und -senke. Dabei finden sich im unteren Teil die thermoelektrischen Wandler. Die Bedeutung der Symbole ist im Bild rechts angegeben. Die rot-durchgezogenen Linie zeigt den theoretischen Wirkungsgrad eines idealen thermoelektrischen Generators mit einer Gütezahl $ZT = 1$. Die heutigen thermoelektrischen Module (Kreise), thermoelektrischen Generatoren (Quadrate), thermoelektrischen Systeme zur Abwärmenutzung (5-Stern) und thermoelektrischen Systeme zur Wärme-Kraft-Kopplung (4-Stern) kommen aufgrund der bescheidenen Effizienz heutiger Materialien nicht über diese theoretische Grenze hinaus. Wo der theoretische Wirkungsgrad eines idealen thermoelektrischen Generators mit $ZT = 2$ liegen würde, zeigt die rot-strichlierte Linie.

Als absolute Grenze ist der Carnot-Wirkungsgrad mit

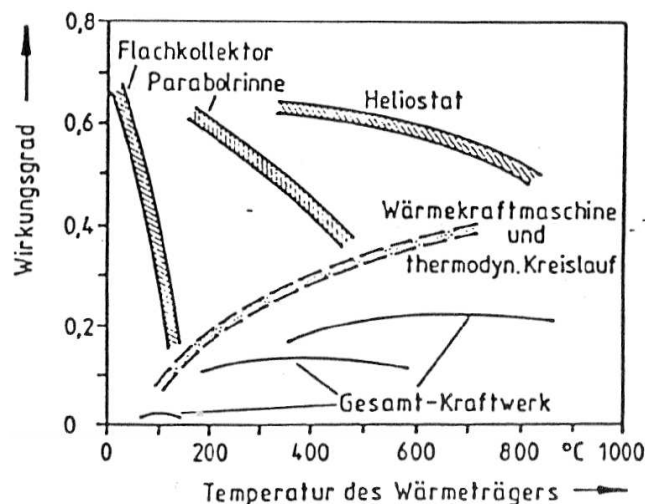
$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

gegeben (blau-gestrichelt). Dieser gilt für reversible Wärme-Kraft-Maschinen. Da alle realen Prozesse irreversibel verlaufen, kann dieser Wirkungsgrad nie erreicht werden. Ausserdem würde ein Carnot-Prozess in seiner idealen Ausführung unendlich lang dauern, was die Leistung gleich null setzt. Zur Beschreibung von konventionellen Wärme-Kraft-Maschinen, die im Bereich der maximalen Leistungsdicht betrieben werden, eignet sich die Curzon-Ahlborn-Effizienz

$$\eta^* = 1 - \left(\frac{T_C}{T_H} \right)^{0.5}$$

Wesentlich besser. In Figur 1 ist dieser Wirkungsgrad grün-strichliert dargestellt. Als Vergleich dazu sind weiters die Wirkungsgrade eines Kohle-Kraftwerks und des Geothermiekraftwerkes in Lardarello (ITA) dargestellt. Zum Effizienzvergleich mit weiteren Technologien sind in Figur 1 ausserdem die folgenden drei Bereiche (grau schraffiert) dargestellt.

Solar Power Plant: Der Wirkungsgradbereich von Solarthermischen Kraftwerken vom Tower-Typ (Heliostaten mit einem zentralen Absorber) bewegt sich im Bereich von maximal 20 %, siehe Figur 2. Der Wirkungsgrad des Kraftwerks ist dabei einerseits durch die Effizienz der Wärme-Kraft-Maschine (Turbine) wie auch durch die Effizienz der Heliostaten und des Absorbers begrenzt.



Figur 2: Wirkungsgrade verschiedener solarthermischer Kraftwerke

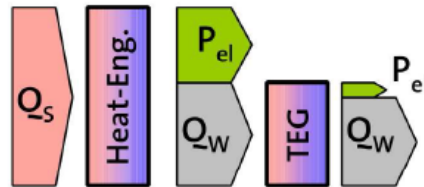
Solar TEG: Als Vergleich zum obigem Punkt ist der theoretische Wirkungsgradbereich eines Solarthermischen Kraftwerkes basierend auf thermoelektrischen Generatoren ($ZT \approx 1$) dargestellt.

Geothermal: Die abgeschätzten Werte für die Nutzung der Geothermie mittels thermoelektrischer Generatoren ($ZT \approx 1$), siehe Abschnitt 1.3.1, bewegen sich alle im Bereich der in der Literatur angegebenen Wirkungsgrade für TEG-Systeme zur Abwärmenutzung. Als Vergleich dazu sind auch die Wirkungsgrade von konventionellen Systemen basierend auf dem Kalina- und ORC-Prozess eingezeichnet.

In den folgenden Abschnitten werden die Prinzipien der Abwärme-Nutzung, der Wärme-Kraft-Kopplung und der reinen Elektrizitätserzeugung mittels thermoelektrischer Generatoren näher erläutert.

1.1 Abwärme-Nutzung

Das Prinzip der Abwärme-Nutzung mittels thermoelektrischer Generatoren ist in Figur 3 dargestellt. Die in einem konventionellen System zur Erzeugung elektrischer Energie (Heat-Engine) anfallende Abwärme Q_W könnte in vielen Fällen weiter genutzt werden.



Figur 3: Prinzip der Abwärme-Nutzung mittels thermoelektrischer Generatoren

Beispiele der Nutzung von Abwärme sind

- Abgase in Fahrzeugen
- Abwärme in diversen Prozessen der Industrie
- Kehrlicht-Verbrennungsanlagen

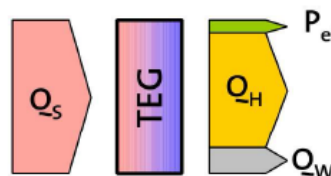
Da zahlreiche Abwärme-Quellen eine oder mehrere der folgenden Charakteristika zeigen

- Grosse Anzahl von (kleinen) Quellen
- Breiter Temperaturbereich
- Grosse Variation von Wärmeleistung, Massenstrom etc.
- Anforderung an Robustheit
- Kleine Energiedichte

eigenen sich thermoelektrische Generatoren besonders gut zur Nutzung von Abwärme. Einziger grosser Nachteil bleibt dabei der bescheidene Wirkungsgrad. Da die Kosten der Energiequelle in der Abwärmenutzung oft vernachlässigbar sind, spielt jedoch der Wirkungsgrad eine untergeordnete Rolle. Dies ist auch der Grund, weshalb auf dem Gebiet der Abwärmenutzung weltweit eine sehr grosse Forschungsaktivität beobachtet werden kann.

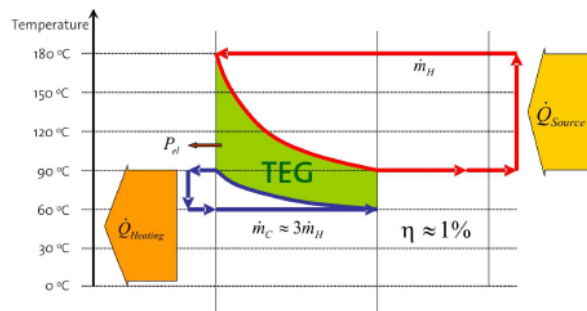
1.2 Wärme-Kraft-Kopplung

Eine weitere Möglichkeit, den bescheidenen Wirkungsgrad thermoelektrischer Generatoren zu umgehen, sind Anwendungen basierend auf dem Prinzip der Wärme-Kraft-Kopplung (siehe Figur 4).



Figur 4: Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung mittels thermoelektrischer Generatoren

Das Prinzip beruht ganz einfach darauf, dass ein grosser Teil der im thermoelektrischen Generator entstandenen Abwärme weiter genutzt wird (Q_H), beispielsweise zu (Vor-)Heizzwecken. Zur Illustration dieses Prinzips ist in Figur 5 ein fiktives Beispiel zur Nutzung tiefer Erdwärme ($T_H = 180\text{ °C}$) für die Versorgung eines Fernwärmenetzes mit einer Vorlauftemperatur von 90 °C und einer Rücklauftemperatur von 60 °C dargestellt.

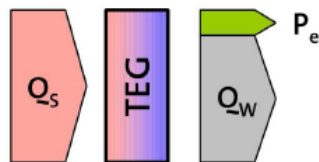


Figur 5: Beispiel einer Kraft-Wärme-Kopplung durch einen thermoelektrischer Generator

Bei dreifachem Massenstrom \dot{m}_C und gleichen Wärmekapazitäten der Wärmeträger wird sich zwischen dem Kreislauf der Wärmequelle und dem Kreislauf des Fernwärmenetzes ein Temperaturunterschied einstellen, der über einem thermoelektrischen Generator genutzt werden könnte. Der Generator ersetzt hier also den sonst üblichen Wärmetauscher. Für den dargestellten Temperaturbereich würde für einen TEG basierend auf $ZT = 1$ ein Wirkungsgrad $\eta = 1\%$ resultieren, was einem bescheidenen Ertrag elektrischer Energie gleichkäme. Dieses Prinzip ist besonders interessant für Heizsysteme, die einen Eigenbedarf an elektrischer Energie haben.

1.3 Elektrizitätserzeugung

Thermoelektrische Systeme zur reinen Elektrizitätserzeugung haben, verglichen mit obigen Systemen, aufgrund des schlechten Wirkungsgrades und der dadurch grossen Abwärmemengen (Verluste) ein deutlich geringeres Durchsetzungspotenzial. Das Prinzip dazu ist in Figur 6 dargestellt. Nur im Falle sehr geringer Energiekosten der Quellenwärme Q_S oder der Anforderung nach sehr hoher Robustheit, Wartungsfreiheit, Geräuschlosigkeit oder hoher Energiedichte (Radio-Nuklidbatterien) kann ein entsprechendes System Erfolgchancen haben. Aus der Sicht der Thermoelektrizität existieren für potentielle zukünftige Anwendungen heute Technologien, die bezüglich Effizienz und Leistungsdichte die Nase vorne haben.



Figur 6: Beispiel einer Kraft-Wärme-Kopplung durch einen thermoelektrischer Generator

Dies sind beispielsweise:

- Konventionelle Wandler im Niedertemperaturbereich, ORC- oder Kalina-Prozess für die Geothermie
- Stirling-Prozess für Kraft-Wärme-Kopplung im Gebäudesektor
- Photovoltaik für die Nutzung der Sonnenenergie.

Das technische Potenzial für den Einsatz thermoelektrischer Generatoren in der Erdwärmenutzung, in der Nutzung der Sonnenenergie und der Nutzung im Gebäudebereich ist in den folgenden Abschnitten detaillierter beschrieben.

1.3.1 Thermoelektrizität in der Erdwärmenutzung

Die Nutzung der Geothermie mittels thermoelektrischen Generatoren ist auf den ersten Blick vielversprechend, insbesondere wenn dabei das Prinzip der Wärme-Kraft-Kopplung angewendet wird und entsprechend die Abwärme der Generatoren weiter zu Heizzwecken genutzt wird. Ein Beispiel basierend auf dem Stand der Technik heutiger Generatoren ist in Figur 5 dargestellt.

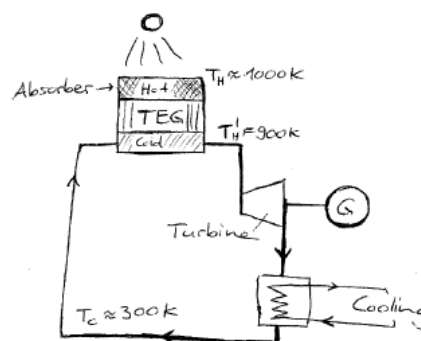
	Kalina	ORC	TEG ZT=1	TEG ZT=3	TEG ZT=5
Quellentemperatur (°C)	150	150	150	150	150
Massenstrom (kg/s)	20	20	20	20	20
Kühltemperatur (°C)	15	15	15	15	15
Rücklauftemperatur (°C)	86	64	82	82	82
Thermische Leistung (MW)	5.35	7.19	5.69	5.69	5.69
Wirkungsgrad (%)	11.8	8.8	2.5	6	8
Elektrische Leistung (kW)	629	630	142	341	455
Wärmetauscherfläche (m ²)	1212	956	142	341	455

Tabelle 1: Abschätzung der elektrischen Leistung und des Wirkungsgrades von TEG-Systemen zur Nutzung der Erdwärme für verschiedene ZT-Werte

In Tabelle 1 sind Ergebnisse solcher Abschätzungen aufgeführt. Sie zeigen, dass die Gütezahl thermoelektrischer Materialien mindestens verfünffacht werden müsste, um in denselben Wirkungsgradbereich zu kommen wie konventionelle Systeme zur Nutzung der Geothermie. Haben allerdings eine hohe Verfügbarkeit und Robustheit eine grössere Priorität oder zeigt die Quelle eine grosse Temperaturbandbreite und Leistungsschwankung, könnten thermoelektrische Wandler schon bei deutlich geringerem Wirkungsgrad attraktiv werden. Ideen zur Nutzung der Erdwärme mittels thermoelektrischen Energiewandlern sind nicht neu. Interessant erscheinen dabei in jüngster Zeit spezielle Hybridsysteme, die eine Energieversorgung basierend auf Thermoelektrizität, Photovoltaik und teilweise konventionellen Systemen vorschlagen.

1.3.2 Thermoelektrizität in der Sonnenenergienutzung

Besonders in den späten 70er Jahren und 80er Jahren war die Nutzung der Sonnenenergie mittels thermoelektrischen Generatoren ein aktuelles Thema an diversen Konferenzen. Mit zahlreichen Verbesserungen im Bereich der Photovoltaik scheint jedoch die Thermoelektrizität in diesem Bereich praktisch verschwunden zu sein. Eine Idee, konventionelle solarthermische Kraftwerke mittels thermoelektrischen Generatoren noch effizienter zu gestalten, könnte dank dem Topping-Up-Prinzip dann erfolgreich sein, wenn besonders robuste und effiziente Materialien für den Bereich sehr hoher Temperaturen gefunden werden.



Figur 7: Idee des Topping Up Prinzips zur Verbesserung der Effizienz solarthermischer Kraftwerke mittels thermoelektrischen Generatoren

In Abbildung 14 ist das Topping-Up-Prinzip dargestellt. Die gesamte solare Wärmemenge, die im Absorber bei sehr hoher Temperatur anliegt, könnte über einen im Absorber integrierten thermoelektrischen Generator geleitet werden. Auf der kalten Seite des TEG könnte sich das Arbeitsmedium der Dampfturbine bis zur maximalen (begrenzten) Temperatur aufheizen. Das Prinzip entspricht also im Wesentlichen dem Konzept aus Abschnitt 3.3, nur wird hier die Verlustwärme des thermoelektrischen Generators genutzt, um eine konventionelle Wärme-Kraft-Maschine anzutreiben. Für thermoelektrische Generatoren basierend auf Materialien mit $ZT = 1$ und einer mittleren Temperaturdifferenz $\Delta T = 350 \text{ K}$ würde ein Wirkungsgrad von $\eta_{\text{TEG}} = 6 - 8 \%$ resultieren. Die Effizienz eines konventionellen solarthermischen Kraftwerkes ($\eta = 20 \%$) könnte also theoretisch um η_{TEG} gesteigert werden. Allerdings müssten bei einer näheren Untersuchung unbedingt folgende Punkte beachtet werden:

- Wie stark sinkt die Effizienz des Absorbers aufgrund der höheren Absorbertemperatur (grössere Strahlungsverluste) und des aufgrund des TEG grösseren thermischen Widerstandes vom Absorber zum Arbeitsmedium?
- Lässt sich überhaupt eine genügend hohe Temperatur am thermoelektrischen Generator solar ohne grosse Verluste generieren?
- Lässt sich ein Absorber mit integriertem TEG überhaupt realisieren? Die Turbine könnte mit einem Bypass umgangen werden, um auch bei Randbedingungen, die für die Turbine nicht ausreichen, einen Teil der solaren Strahlung in elektrische Energie zu wandeln. Nebst diversen möglichen Anwendungen in der Abwärmenutzung hoher Temperaturen zeigt dieses Beispiel, dass die Entwicklung neuer Materialien mit guten thermoelektrischen Eigenschaften nicht nur im Niedertemperaturbereich, sondern ebenso für sehr hohe Temperaturen notwendig ist. Gewünscht sind insbesondere Materialien, die über einen grossen Temperaturbereich gute Eigenschaften zeigen und trotz hoher Temperaturen sehr robust und günstig sind.

1.3.3 Thermoelektrizität in Gebäuden

Der Einsatz thermoelektrischer Generatoren erscheint überall dort sinnvoll, wo grosse Wärmemengen, Möglichkeiten zur Kühlung, signifikante Temperaturunterschiede und der Bedarf an elektrischer Energie gegeben sind. In der Energieversorgung von Gebäuden sind diese Rahmenbedingungen grösstenteils gegeben. Verschiedene Möglichkeiten dazu sind in Abbildung 15 skizziert.

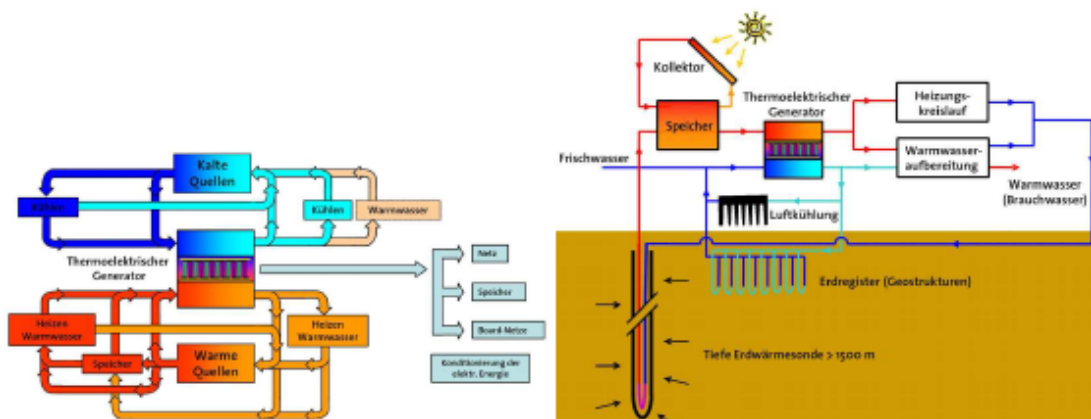


Figure 8: Verschiedene Möglichkeiten für den Einsatz thermoelektrischer Generatoren in Gebäuden

Besonders erfolgversprechend ist ein Einsatz eines thermoelektrischen Generators dann, wenn es sich um eine Abwärmenutzung oder eine Kraft-Wärmekopplung handelt (siehe Abschnitte 1.1 und 1.2). Zwei Studienarbeiten, die am HVL im Wintersemester 06/07 durchgeführt wurden, sind im Folgenden kurz erwähnt.

Peltier-Tumbler: Roman Gmünder hat in seiner Diplomarbeit [6] in Zusammenarbeit mit der Firma V-Zug AG ein Zusatzsystem für einen Wäschetrockner entwickelt, aufgebaut und getestet. Das System ermöglicht es, einen Teil der Kondensationswärme mittels Peltier-Elementen auf ein höheres Temperaturniveau zu pumpen und so zwecks Erwärmung der Luft nutzbar zu machen. Der aufgebaute Prototyp verhalf dem konventionellen Wäschetrockner zu einem Schritt in Richtung Energieeffizienzklasse A. Zusammen mit den erwarteten Fortschritten auf der Materialseite in Richtung höherer Effizienz und tieferen Kosten, könnte diese Technologie in Zukunft eine interessante Alternative zu Wärmepumpen - Trocknern darstellen. Das Ziel der Arbeit war der Funktionsnachweis zur Effizienzsteigerung von Wäschetrocknern mittels Peltier-Elementen. Weiter sollten die Grenzen und limitieren-

den Faktoren klar aufgezeigt und Verbesserungsvorschläge skizziert werden. Die Diplomarbeit wurde absolut praxisgerecht durchgeführt und erfüllt entsprechend obige Erwartungen des Instituts und der Firma V-Zug AG vollumfänglich. Der V-Zug AG steht somit eine wichtige und wertvolle Grundlage für die Zukunft der Wäschetrockner - Technologie zur Verfügung. Das Peltier-System verbraucht zwar zusätzlich Energie, bei optimalem Betrieb kann jedoch ein signifikanter Anteil eingespart werden. Für ein marktreifes Produkt müssten jedoch insbesondere effizientere Peltier-Module erhältlich sein, wie auch die Wärmetauscher und das Gesamtsystem noch optimiert werden.

Potenziale für thermoelektrische Generatoren: In seiner Semesterarbeit hat Damian Schneider das Einsatzpotenzial für thermoelektrische Generatoren in der Haustechnik untersucht. Mit der Ausnahme der Kombination Holzofen/TEG zeigen alle Szenarien nur sehr geringe Wirkungsgrade im Bereich von 1%. Da die Wärmemengen im Gebäudebereich nicht unbegrenzt und gratis zur Verfügung stehen, reicht diese Effizienz für eine sinnvolle Anwendung noch nicht aus.

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 2007 und Ausblick 2008

Die relevanten Anwendungsszenarien wurden untersucht und bezüglich ihrer Leistungscharakteristik evaluiert. Allgemein kann der Schluss gezogen werden, dass TEGs eine Alternative sind, wenn die Kosten für die thermische Energie gering oder gleich null sind. (Abwärme-Nutzung) Um mit konventionellen Systemen zu konkurrieren ist eine starke Verbesserung der Güte der Materialien unumgänglich.

Bei Verfügbarkeit entsprechender Materialien können die Szenarien mit den entsprechenden Materialparametern einfach neu bewertet werden. Die Entwicklungen im Materialbereich zeigen enorme Fortschritte und deuten darauf hin, dass konkurrenzfähige Materialien mittelfristig zugänglich sein müssten.

Weitere Abklärungen sind zurzeit nicht angedacht. Der Einfluss der Materialeigenschaften auf die Gesamtperformance ist derart stark, dass weitere Modelloptimierungen keine signifikanten Verbesserungen bringen würden.

Referenzen

- [1] **BfE-Projektantrag Anwendungspotential der thermoelektrischen Stromerzeugung im Hochtemperaturbereich**, Oktober 2006
- [2] **BfE-Projektantrag Das thermoelektrische Kraftwerk**, August 2005