



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

PROJEKT

DAS THERMOELEKTRISCHE KRAFTWERK

Jahresbericht 2007

Autor und Koautoren	Prof. Fröhlich (A. Bitschi, C. Eisenhut)
beauftragte Institution	ETH Zürich, Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnologie - HVL
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	101356 / 151645
BFE-Projektleiter	Roland Brüniger
Dauer des Projekts (von – bis)	15. September 2005 bis 15. März 2009
Datum	30. November 2007

Zusammenfassung

Neue thermoelektrische Materialien in Kombination mit Nanostrukturierung (low-dimensionality) ermöglichen eine massive Verbesserung der Gütezahl ZT. Solche Materialien werden im gemeinsamen Projekt „Das thermoelektrische Kraftwerk“ an der EMPA Dübendorf synthetisiert und charakterisiert. Für erste Erkenntnisse über die „reale“ Performance wurden verschiedene Prototypen aufgebaut und messtechnisch untersucht. Die Ergebnisse dienten auch der Validierung der am HVL entwickelten 3D-Finite-Elemente Simulation. Die gute Übereinstimmung von Messung und Simulation erlaubt die Abklärung von Optimierungsstrategien für zukünftige Modulararchitekturen mittels Simulation.

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:

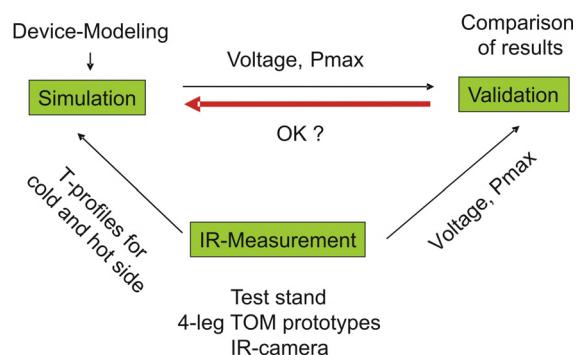
- Es ist ein Modell mit Simulation vorhanden, welches die Funktionalität unter Einbezug von ökonomischen und ökologischen Kriterien beschreibt.
- Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse werden die Charakteristika von verschiedenen thermoelektrischen Materialien, wie sie interaktiv an der EMPA erarbeitet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

Die ersten beiden Teilziele können wie folgt zusammen gefasst werden:

Entwicklung und Validierung eines Tools zur Optimierung von Modullarchitekturen mit Fokus auf neue Materialien.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Die durchgeführten Arbeiten können in 2 Teilebereiche aufgeteilt werden. Einmal die Erweiterung der Simulation auf ganze und Module und zweitens der Aufbau und die messtechnische Charakterisierung von ersten thermoelektrischen Generatorprototypen. Die Ergebnisse dieser Messungen wurden auch zur Validierung des oben erwähnten Modells verwendet. Der allgemeine Ansatz ist in Figur 1 visualisiert.

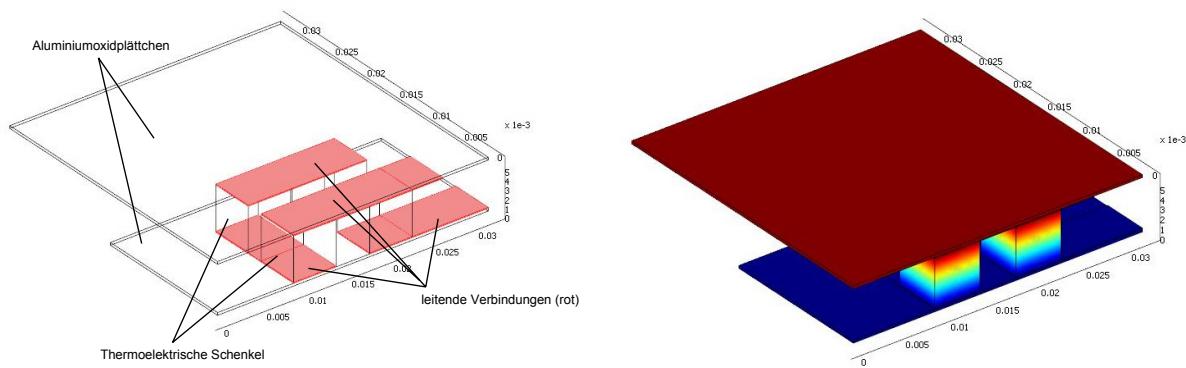


Figur 1: Allgemeiner Ansatz

Mehrdimensionale Analyse (FE-Simulation) von thermoelektrischen Modulen

Die vorhandene Simulation für einzelne thermoelektrische Komponenten (Schenkel) wurde für ganze Module (Multicouples) erweitert.

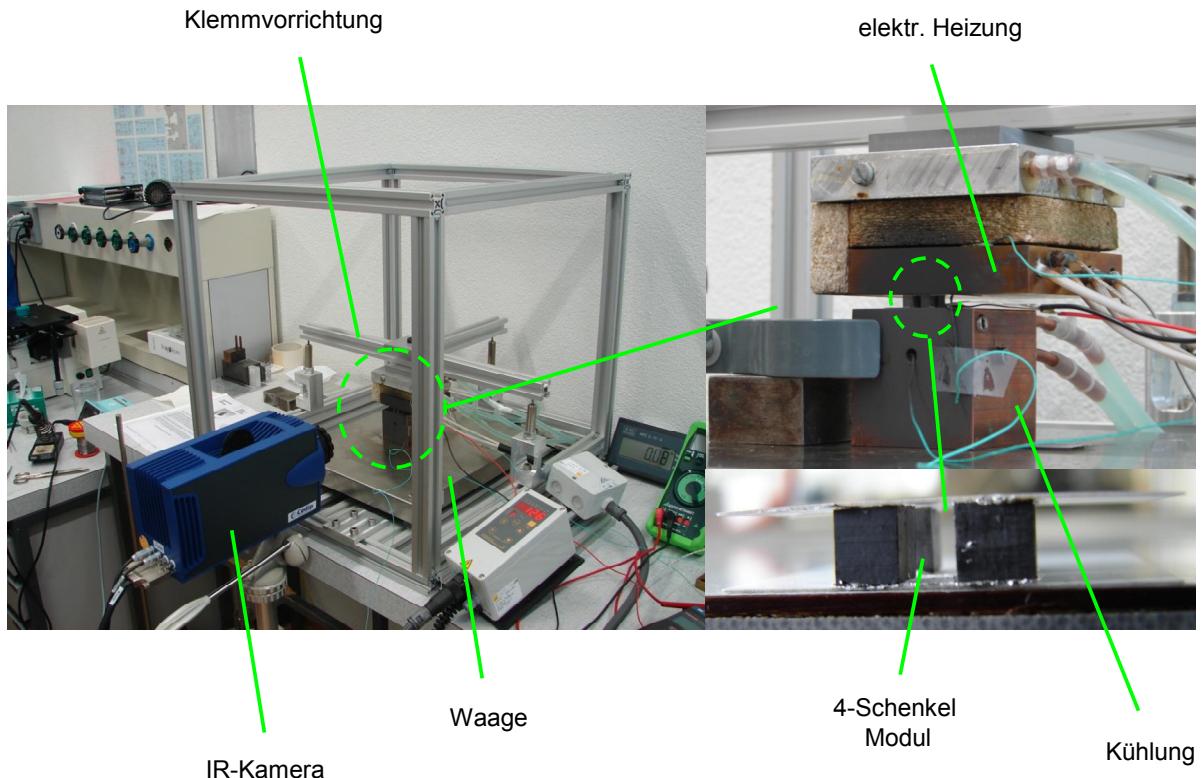
Für diese Erweiterung des Modells wurden „nichtthermoelektrische“ Komponenten wie die leitenden Verbindungen zwischen den einzelnen Schenkeln als auch die elektrisch isolierenden Aluminiumschichten mit all ihren temperaturabhängigen, nichtlinearen Materialeigenschaften integriert. (siehe Figur 2). Die Nichtlinearität der verschiedenen Materialgrößen wurden durch an Messdaten angepasste Funktionen höherer Ordnung berücksichtigt. Die Randbedingungen wurden erweitert und ermöglichen in Kombination mit der Verwendung eines parametrischen Solvers die Beurteilung bei verschiedenen Lastfällen. Die Modellierung berücksichtigt die meisten in der Literatur genannten Irreversibilitäten. Unberücksichtigt blieben die Kontaktwiderstände zwischen den Schenkel und den leitenden Verbindungen bzw. den leitenden Verbindungen und dem Isolationsmaterial. Diese Phänomene beeinflussen sowohl das thermische als auch das elektrische Verhalten und sind sehr stark von der Fertigungssorgfalt abhängig. Sie werden deshalb auch allgemein mit einem sog. „Manufacturing Factor“ berücksichtigt. Die somit entstehenden Mehrkomponentensysteme stellen speziell für die Rechnerinfrastruktur eine grosse Herausforderung dar, will man vernünftige Rechenzeiten einhalten. Ein Beispiel für eine durchgeführte Simulation ist ebenfalls in Figur 2 zu sehen.



Figur 2: Modell eines thermoelektrischen Modul-Prototypen (links), Temperaturverteilung simuliert (rechts)

Aufbau und messtechnische Charakterisierung von thermoelektrischen Oxid Modulen

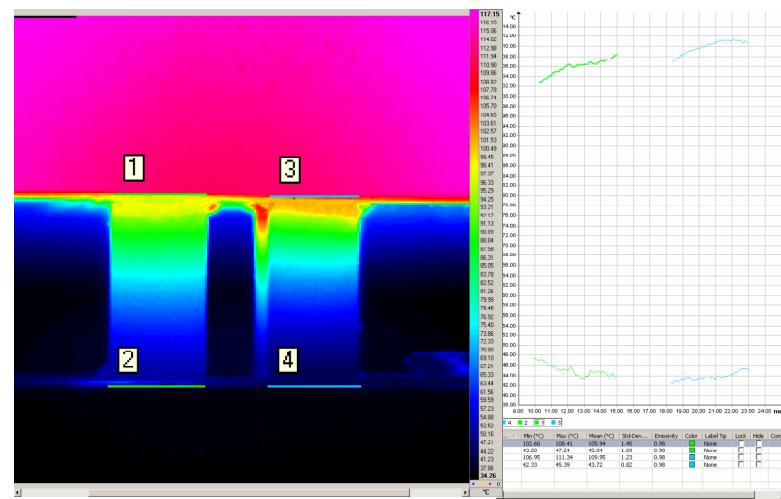
Für erste Leistungscharakteristika wurden verschiedene Module mit thermoelektrischen Oxiden (TOMs) aufgebaut. Dafür wurden, an der EMPA Dübendorf Abteilung Festkörperchemie und Katalyse, neu entwickelte und synthetisierte n- und p- Materialien zu Barren mit einem Querschnitt von $5*5\text{ mm}^2$ gesintert und in Längen 2, 5 und 10 mm zugeschnitten. Die leitenden Verbindungen wurden mit einer Mischung aus Silberleitpaste, Kupfer und weiteren Beigaben hergestellt. Die gesamte Anordnung wurde zwischen zwei Aluminiumoxidplättchen, welche die warme bzw. kalte Seite des Moduls darstellen, eingebettet. Speziell die Herstellung der leitenden Verbindungen stellte eine grosse Herausforderung dar, da die Mixtur sehr empfindlich (ungenügende Bindung bis partielles Verdampfen) auf die nachfolgende Temperaturbehandlung reagierte. Nach der abschliessenden Wärmebehandlung entstanden somit 4-Schenkel-TOMs mit guten thermischen und elektrischen Kontakten sowie ausreichender mechanischer Festigkeit. Für die messtechnische Charakterisierung wurde ein Messstand mit einer Klemmeinrichtung und integrierter Waage für einen definierten und reproduzierbaren Wärmeübergang aufgebaut. Die warme Quelle wurde mit einer regelbaren elektrischen Heizung, die kalte Quelle mit einem regelbaren Wasserkühler realisiert. Die Daten der Temperaturmessung und der Messung der elektrischen Größen wurden über eine Messwertkarte und einem LABVIEW-Applet aufgezeichnet. Um die Temperaturverteilung an der Oberfläche der thermoelektrischen Schenkel sichtbar zu machen wurden zusätzlich Aufnahmen mit einer IR-Kamera gemacht. Einen Überblick über den gesamten Messaufbau gibt Figur 3. Für die Bestimmung der Leistungscharakteristik wurden die Module mit einem schaltbaren Widerstandsnetzwerk bei verschiedenen Temperaturen belastet. Die gesamte Prozedur wurde mehrfach durchgeführt, um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Der gesamte Teststand ist seit seinen Anfängen stark weiterentwickelt und verbessert worden und stellt heute eine komfortable Möglichkeit für die Charakterisierung von Modulen dar.



Figur 3: Überblick Messaufbau

Validierung der 3D-Finite Elemente Simulation

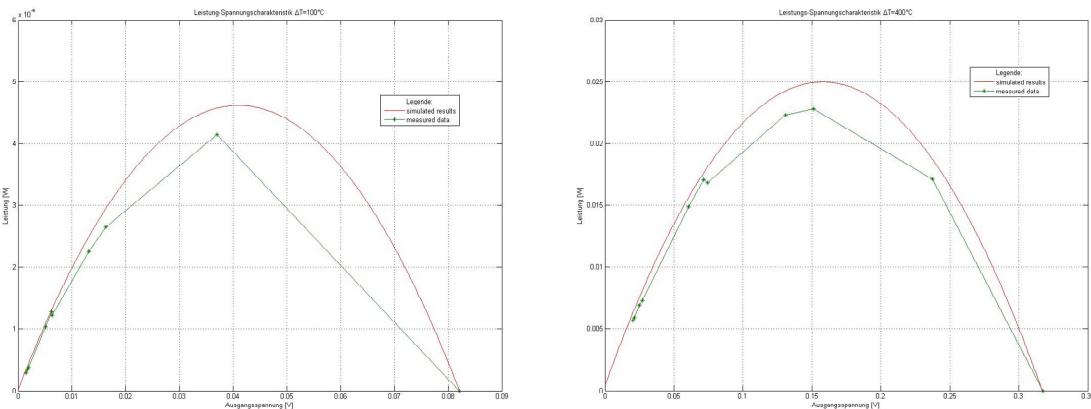
Für die Validierung der Simulation wurden die Temperaturprofile der IR-Messung als Randbedingungen für die Simulation verwendet (siehe Figur 4). Als eigentliche Vergleichsgrößen wurden die generierten Spannungen am Modul bzw. die Leistungen bei verschiedenen Lasten herangezogen. Die gute Übereinstimmung von Messdaten und Simulationsergebnissen (siehe Figur 4) erlaubt die Beurteilung und Optimierung von neuen Moduldesigns mit neuen thermoelektrischen Materialien mittels Simulation.



Figur 4: Temperaturprofile aus IR-Messung

Übersicht der Resultate:

Als Beispiel sind die Ergebnisse von Messung und Simulation in Figur 5 dargestellt. Es ist eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse sichtbar. Die Abweichungen bewegen sich Bereich von 5-8%. Eine mögliche Ursache könnten die Verbindungen zum Widerstandsnetzwerk darstellen. Der sehr kleine (speziell bei hohen Temperaturen) Innerwiderstand dieser Prototypen Module liegt in den Grössenordnungen von 1 – 4 Ohm. Dies entspricht ca. 2 m Kupferleitung mit $d = 0.25$ mm.



Figur 5: Vergleich der gemessenen Daten und simulierten Resultate für ein 5mm TOM bei $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ (links) und 400°C (rechts)

Diese Einflüsse werden sich jedoch selbst verringern bzw. auflösen, da die nächste Ausbaustufe von Modulen bereits eine bedeutend grössere Zahl von Couples beinhaltet und somit der Innenwiderstand in Dimensionen anwächst, dem gegenüber die Zuleitungen vernachlässigbar sind.

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

Mit der validierten Simulation steht ein Tool für die Evaluierung und Optimierung neuer Moduledesigns zur Verfügung. Für das Erreichen der angedachten Ziele wurden die richtigen Wege eingeschlagen. Diese sollen weitergeführt werden und speziell im Materialbereich verstärkt werden. Systemtechnisch stellt ein thermoelektrisches Kraftwerk eine Wärme-Kraft-Maschine dar, die den gleichen Gesetzen der Thermodynamik zu folgen hat, wie konventionelle thermische Kraftwerke. Die sich daraus ergebenden Limitierungen sind bekannt und in der Literatur mannigfaltig behandelt. Im Bereich der Simulation werden vorerst keine weiteren Schritte eingeleitet.

Referenzen

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