



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

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

**Jahresbericht 27.11.2013**

---

# **Entwicklung eines thermoelektrischen Energy Harvester Prototypen zur Stromversorgung eines intelligenten Heizungsventils**

---

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien & -anwendungen  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Auftragnehmer:**

greenTEG AG  
Technoparkstrasse 1  
CH-8005 Zürich  
[www.greenTEG.com](http://www.greenTEG.com)

**Autoren:**

Thomas Helbling, greenTEG AG, [thomas.helbling@greenTEG.com](mailto:thomas.helbling@greenTEG.com)  
Wulf Glatz, greenTEG AG, [wulf.glatz@greenTEG.com](mailto:wulf.glatz@greenTEG.com)

**BFE-Bereichsleiter:** Dr. Michael Moser  
**BFE-Programmleiter:** Roland Brüniger  
**BFE-Vertragsnummer:** SI/500917-01

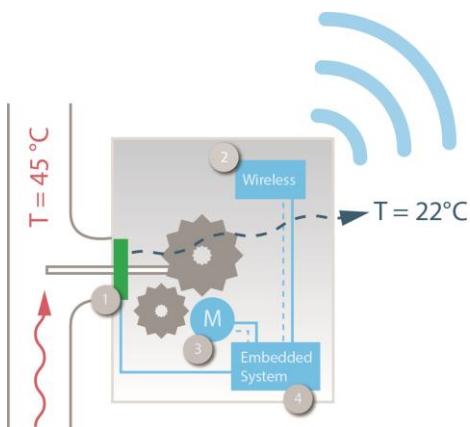
Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

## Projektziele

Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines thermoelektrischen Energy Harvester Prototypen, der Kernkomponente des intelligenten Heizungsventils. Die erwarteten Resultate sind essentiell für die geplante Produktentwicklung des Ventils, welche im Rahmen eines EU Innovationsprojektes mit nationalen und internationalen Partnern aus Industrie und Forschung stattfinden wird.

Durch den Einsatz intelligenter Heizungsventile in Gebäuden kann der Energieverbrauch für das Heizen stark gesenkt werden, was eine grosse Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstosses mit sich bringt. Die folgende Abschätzung zeigt das globale Potential zur Energie- bzw. CO<sub>2</sub>-Einsparung auf:

Gebäude tragen zu 40% zum weltweiten Energieverbrauch bei [1]. Davon stellen wiederum die Heizungen mit >50% den grössten Anteil und bieten somit den grössten Hebel zur Reduktion des Energieverbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen. In diesem Zusammenhang kommt der intelligenten Heizungssteuerung eine entscheidende Rolle zu. Laut einer Studie der Uni Bremen kann der Energieverbrauch von Heizungen um bis zu 50% gesenkt werden, wenn die Raumtemperatur in Abhängigkeit der Tageszeit, Außentemperatur und Nutzer- bzw. Bewohneranwesenheit gesteuert wird [2]. Wenn man die Emissionszahlen von 2004 zu Grunde legt, ergibt sich daraus ein **jährliches globales CO<sub>2</sub>-Vermeidungspotential von mehr als 2 Milliarden Tonnen**.



Schematischer Aufbau der Funktions- elemente des intelligenten Heizungsventils

Die Abbildung links zeigt den schematischen Aufbau des intelligenten Heizungsventils. Das thermoelektrische (TE) Energy Harvesting Modul (1) ist die einzige Komponente, welche mit den geforderten Spezifikationen nicht erhältlich ist. Deren Entwicklung ist somit ein Schlüssel zum Erfolg des intelligenten Heizungsventils. Das Energy Harvesting Modul gewinnt Energie aus der temporär anliegenden Differenz zwischen Raum- und Heizungsvorlauftemperatur und muss damit die Energieversorgung für das gesamte System bei allen denkbaren Anwendungsszenarien gewährleisten (Elektronik (4), Stellmotor (3) und Funkübertragung (2)). Aus Vorstudien und Abschätzungen zum Verbrauch der Komponenten und unter Berücksichtigung verschiedener Heizszenarien ergeben sich für den TE Energy Harvester folgende technische Zielspezifikationen:

- Elektrische Spannung pro Kelvin Temperaturdifferenz am Modul: > 40mV/K,
- Elektrischer Widerstand: < 400 Ohm
- Elektrische Leistung: > 1 uW/K<sup>2</sup> (bei 10K Temperaturdifferenz entspricht das > 0.1 mW)
- Lebensdauer: > 10 Jahre bei Einsatztemperatur < 80°C

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

### Arbeitspaket 1: Modul Design Anpassungen

Die aktuell von greenTEG gefertigten TEG Module werden für die gSKIN® Wärmeflussensoren sowie für den Einbau in Wärmetauscher Demonstratoren verwendet. Um die TEG Module für Energy Harvesting Anwendungen einzusetzen zu können, bedarf es einiger Anpassungen des TEG Designs. Die Anpassungen sind aufgrund der unterschiedlichen thermischen Rahmenbedingungen der Anwendungen erforderlich. Das Energy Harvesting erfordert vor allem eine höhere Säulendichte [3], [4]. Die grundlegenden Zusammenhänge sind wie folgt: Für eine Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zwischen der warmen und der kalten Systemseite fällt nur ein Teil über dem TEG ab ( $\Delta T_g$ ). Der Zusammenhang der Systemtemperaturdifferenz und der Temperaturdifferenz über dem TEG wird bei gegebenen thermischen Anschlusswiderständen auf der kalten Systemseite,  $K_c$  und der warmen Systemseite,  $K_h$  mit der folgenden Formel beschrieben:

$$\Delta T_g = K_g / (K_c + K_h + K_g) * \Delta T \quad (1)$$

Die TEG Spannung  $V_g$  wiederum beträgt

$$V_g = m * \alpha * \Delta T_g, \quad (2)$$

wobei  $m$  für die Anzahl Thermopaare steht und  $\alpha$  die mittlere Seebeck-Spannung eines Thermopaars darstellt.

Es kann gezeigt werden, dass die maximale Leistung erzeugt wird, wenn  $\Delta T_g \sim 0.5 * \Delta T$ , d.h.  $K_g \sim K_c + K_h$  [4]. Da in den meisten Energy Harvesting Anwendungen die Anschlusswiderstände relativ gross sind, muss das TEG Design so gewählt werden, dass auch  $K_g$  gross ist. Dieses  $K_g$  kann bei gegebenen Materialien durch geeignete Wahl der TEG Fläche und der TEG Dicke eingestellt werden. Gleichzeitig soll  $V_g$  bei gegebener Fläche gross sein. Dies erreicht man nur durch die Erhöhung der Säulen-dichte, um die Anzahl Thermopaare,  $m$ , für eine gegebene Fläche zu maximieren.

Aufgrund der Prozessgrenzen von greenTEG wurde für die Labortests ein Design erstellt, das aus einer Fläche von  $0.45 \text{ cm}^2$  besteht und 105 Thermopaare aufweist. Die Thermosäulen sind zylinderförmig und haben einen Durchmesser von 300um und eine Höhe von ca. 200 um. Das neue Design ist in Abbildung 1 zu sehen.

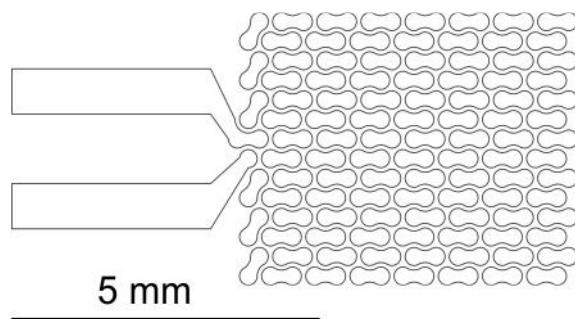


Abbildung 1: Design des neuen TEGs für Energy Harvesting Anwendungen (CAD Maskendaten)

Die für das neue Design benötigten Masken wurden entworfen und hergestellt. Die Matrizen wurden mit einem Laser gelocht. Der restliche Produktionsprozess wurde entsprechend angepasst sowie die Parameter eingefahren.

Die thermoelektrischen n- und p-Materialien wurden auf einem Laborsetup abgeschieden. Die Parameter für die elektrochemische Abscheidung der Materialien wurden mit Hilfe geeigneter Design of Experiment Verfahren (DoE) gefunden.



Abbildung 2: Prozessbilder eines TEGs für Energy Harvesting Anwendungen. Links ist ein Modul nach der n-Material Abscheidung zu sehen, rechts ist das fertige Modul nach der Kontaktierung (mit Maskendaten mit verbesserten Prozesskontroll-Möglichkeiten).

Die Kennwerte des neuen Energy Harvesting Moduls sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Der erste Meilenstein des Projekts ist somit erreicht.

**Tabelle 1: Werte des Energy Harvesting TEG Moduls**

Parameter	Wert
Dimensionen des Moduls	6.0 x 7.5 x 0.2 mm <sup>3</sup>
Modul Seebeck @ Raumtemperatur	~10 mV/K
Elektrischer Widerstand	~25 Ω
# Thermopaare	105

### **Arbeitspaket 2: Entwicklung des Prozesses für die Stapelung von Modulen**

Das zweite Arbeitspaket beinhaltet die notwendigen Prozessanpassungen und –Entwicklungen, damit gemäss Formel (1) der thermische Modulwiderstand durch aufeinanderstapeln (Stacking) von einzelnen TEG Modulen verdoppelt, verdreifacht oder vierfacht werden kann. Das Stapeln von TEGs ist eine effektive Methode, um das  $K_g$  für verschiedene Energy Harvesting Anwendungen zu optimieren.

Da die Stapelung von TEGs jedoch auch parasitäre thermische und elektrische Widerstände mit sich bringt, ist es äusserst wichtig, dass die Klebeschichten zwischen den TEG Modulen thermisch optimiert sind. Thermische Optimierung kann durch das Verwenden sehr dünner Klebeschichten oder durch die Verwendung von thermisch gut leitendem Kleber erreicht werden.

Die elektrische Verschaltung der einzelnen Module muss zuverlässig und thermisch stabil sein und zudem geringe Übergangswiderstände aufweisen. Vorzugsweise wird mit Metallen gearbeitet. Verschiedene Möglichkeiten werden in diesem Arbeitspaket untersucht.

Der Hauptfokus der vergangenen Monate lag in der Optimierung der thermischen Übergangswiderstände. Dazu wurden Dummy TEG Module hergestellt, welche mit verschiedenen Kleber und Verfahren zusammengepresst werden. Es wurden verschiedene Werkzeuge entwickelt, um diese TEG Dummy Module mit hoher Genauigkeit zu alignieren und zu verpressen. Ein in dieser Studie hergestellter Dummy TEG ist in Abbildung 3 zu sehen.

In den kommenden Monaten werden die optimierten Stapelungsprozesse an echten TEG Modulen getestet. Dazu werden zuerst TEGs mit dem alten Design mit 29 Thermopaaren und einem Säulen-durchmesser von 600 um verwendet. Erst wenn diese Stapelung einwandfrei funktioniert und die thermischen Übergangswiderstände bekannt sind und optimiert wurden, wird der Prozess an Modulen des neuen Designs angewendet.

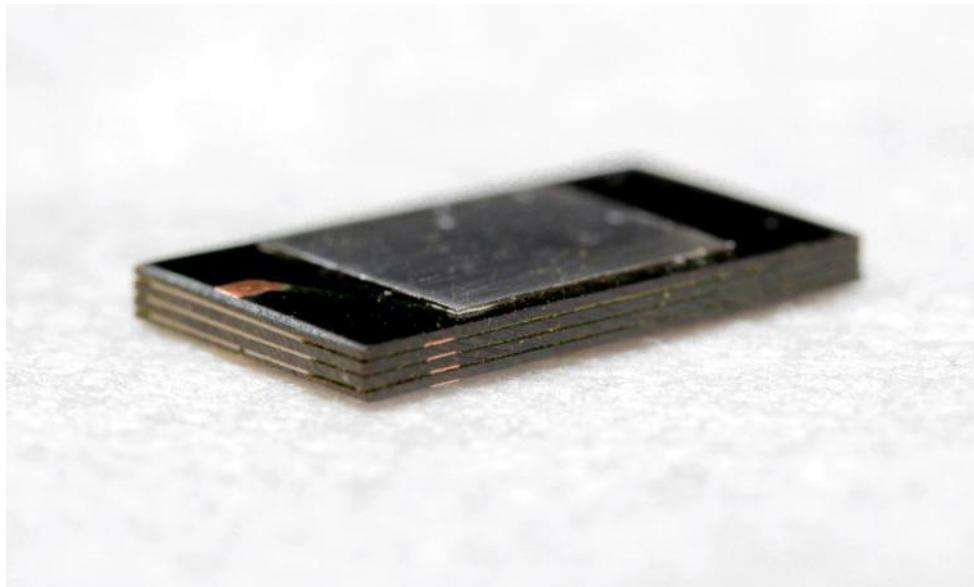


Abbildung 3: 4-fach Stapelung von Dummy TEG Modulen. Diese Dummy TEGs werden verwendet, um verschiedene Stapelungs-Prozesse zu untersuchen und zu optimieren.

## Nationale Zusammenarbeit

- Prof. Hierold, Micro- and Nanosystems, Department Maschinenbau und Verfahrenstechnik, ETH Zürich.

## Bewertung 2013 und Ausblick 2014

### Arbeitspaket 1: Modul Design Anpassungen

**Bewertung:** Die Resultate des Arbeitspakets 1 zeigen, dass der Herstellungsprozess von greenTEG eine weitere Verdichtung des Designs erlaubt. Erste Module mit einem um den Faktor 3 höhere Thermosäulendichte konnten im Labor hergestellt werden. Damit dies möglich war, mussten entlang des gesamten Laborprozesses neue Masken erstellt werden und die Parameter für jeden Prozessschritt neu eingefahren werden.

Die Ausbeute des Laborprozesses ist noch gering und nur einzelne Module konnten bis zum Prozessende durchgezogen werden. Dennoch zeigen die Resultate die Machbarkeit eines Energy Harvesting Moduls mit dem Prozess von greenTEG. Diese wichtige und kritische Erkenntnis legt den Grundstein für weitere Anpassungen.

### Arbeitspaket 2: Entwicklung des Prozesses für Stacking von Modulen

Das Stacking von Modulen stellt einen wichtigen Freiheitsgrad für Energy Harvesting Anwendungen dar. Weil jede Energy Harvesting Anwendung unterschiedliche thermische Randbedingungen aufweist, müsste für jede Anwendung ein eigenes TEG Design erstellt werden. Über die Stapelung von Modulen können mit einem Design unterschiedliche Anwendungen bedient werden.

Erste Stapelungstests mit Dummy TEG Modulen verliefen vielversprechend und die Basis zur erfolgreichen Stapelung wurde durch die Entwicklung verschiedener Stapelungsverfahren gelegt.

## Ausblick 2014

**Prozess:** Im nächsten Jahr wird der Herstellungsprozess der TEG Module im Labor weiter verbessert. Sobald die Prozesse im Labor genügend stabil sind, werden die Prozessschritte auf die Produktionsgrösse von 10 cm x 10 cm skaliert und eingefahren.

**Stapelung:** Der Stapelungsprozess wird zum einen an TEGs getestet, die noch das alte Design aufweisen (29 Thermopaare/TEG). Sobald mehr TEG Module mit dem neuen Design vorhanden sind, wird der Prozess auf diesen TEGs eingefahren und optimiert.

**Design:** Damit die Module für Energy Harvesting Anwendungen genutzt werden können, müssen noch mehr Thermosäulen in Serie geschaltet werden (>105). Eine weitere Design-Anpassung steht im Jahr 2014 an. Diese wird jedoch erst angegangen, wenn statistische Informationen zu dem aktuellen TEG vorliegen (Leistung, Seebeck, etc.).

## Referenzen

- [1] IEA, "Energy Use in the New Millennium - Trends in the IEA Countries," 2007.
- [2] M. Mevenkamp and M. Mayer, "Energy efficiency in educational buildings using KNX / EIB," in *KNX Scientific Conference*, 2005.
- [3] J. Su, V. Leonov, M. Goedbloed, Y. van Andel, M. C. de Nooijer, R. Elfrink, Z. Wang, and R. J. M. Vullers, "A batch process micromachined thermoelectric energy harvester: fabrication and characterization," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 20, no. 10, p. 104005, Oct. 2010.
- [4] M. Freunek, M. Müller, T. Ugan, W. Walker, and L. M. Reindl, "New Physical Model for Thermoelectric Generators," *Journal of Electronic Materials*, vol. 38, no. 7, pp. 1214–1220, Jan. 2009.