



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Schlussbericht 31.07.2015

Entwicklung eines thermoelektrischen Energy Harvester Prototypen zur Stromver- sorgung eines intelligenten Heizungsventils

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien & -anwendungen
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

greenTEG AG
Technoparkstrasse 1
CH-8005 Zürich
www.greenTEG.com

Autoren:

Etienne Schwyter, greenTEG AG, etienne.schwyster@greenTEG.com
Wulf Glatz, greenTEG AG, wulf.glatz@greenTEG.com
Lukas Durrer, ETH Zürich, lukas.durrer@micro.mavt.ethz.ch
Thomas Helbling, ETH Zürich, thomas.helbling@micro.mavt.ethz.ch

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.

Zusammenfassung

Die Individuelle Raumtemperaturregulierung erfolgt heutzutage bei den meisten Gebäuden immer noch von Hand durch Drehen des Heizventils am Heizkörper. Vor allem in öffentlichen Gebäuden wird diese manuelle Regulierung meistens nicht vorgenommen, da sie zu aufwändig und umständlich ist. Ein per Funk gesteuertes intelligentes Heizungsventil könnte da Abhilfe schaffen. Studien haben gezeigt, dass durch den Einsatz intelligenter Ventile der Heizenergieverbrauch stark gesenkt werden kann, was zu einer abgeschätzten Reduktion des globalen jährlichen CO₂-Ausstosses um mehr als 2 Milliarden Tonnen führt. Damit aufwendige Batteriewechsel wegfallen und somit die Ventile benutzerfreundlich werden, muss das Regelsystem energieautark gestaltet sein.

In diesem vom BFE geförderten Projekt konnten thermoelektrische Generatoren hergestellt werden, welche durch die Nutzung der Temperaturdifferenz zwischen Raumluft und Heizkörper genügend Energie zur Verfügung stellen, um die Mechanik und das Funkmodul eines intelligenten Heizventils betreiben zu können. Die in diesem Projekt hergestellten TEG-Prototypen erfüllen die angepeilten quantitativen Ziele von Modulseebeck $> 35\text{mV/K}$ und elektrischer Widerstand $< 400\ \Omega$. Die Module wurden erfolgreich in einem Prototyp eines autonomen Heizungsventils eingebaut und getestet.

Dieses Ziel wurde erreicht durch Optimierung der TEG Geometrie, Reduktion parasitärer thermischer Widerstände der TEG Verpackung sowie Verbesserung des thermoelektrischen Materials.

Summary

Today, individual room temperature regulation is still made by hand. To adapt the temperature in a room, the user needs to turn the heating valve at the heating radiator. Due to this circumstantial handling, individual room regulation does not take place in public buildings. This could be changed with the use of intelligent heating valves where the room regulation is controlled over wireless communication. Studies have shown that the use of autonomous heating valves could lead to a reduction of the global CO₂ emission by up to 2 milliard tons per year. However, to make the intelligent heating valve user friendly and to avoid time-consuming and costly battery replacements, the valve needs to be energy autonomous.

In this project funded by the BFE thermoelectric generators were developed. By attaching those to the hot radiator they provide enough energy for the operation of an intelligent autonomous heating valve by converting the heat energy from the radiator into electrical energy. Fabricated TEG prototypes fulfill the quantitative project goals of module Seebeck $> 35\text{mV/K}$ and electrical resistance $< 400\ \Omega$. The developed thermoelectric generators were successfully tested in a prototype of an intelligent autonomous heating valve.

The goal was successfully reached through optimization of TEG geometry, reduction of parasitic thermal resistances of a TEGs packaging as well as improvements of the thermoelectric material.

Ausgangslage

Die Verknüpfung von Computertechnologie mit der herkömmlichen Gebäudetechnik schreitet in hohem Tempo voran. Neue, innovative Lösungen lassen das seit langem propagierte smart Home Wirklichkeit werden. Ein Smart Home soll nebst einer Verbesserung des Wohnkomfort auch die Energienutzung optimieren und dadurch reduzieren. Heutige Thermostatventile von Heizkörpern sind nicht kompatibel mit dem smart Home, weil sie ohne elektrische Energieversorgung auskommen müssen und daher nicht mit der Computertechnologie verknüpft werden können.

Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines thermoelektrischen Energy Harvester Prototypen. Dieser Energy Harvester erzeugt elektrische Energie aus der Temperaturdifferenz zwischen Heizkörpernlauf und Umgebung. Die erzeugte Energie soll genutzt werden, um das Thermostatventil intelligent zu machen und es als solches in das Smart Home Konzept zu integrieren.

Durch den Einsatz intelligenter Heizungsventile können Energieverbrauch und somit CO₂-Emissionen für das Heizen in Gebäuden stark gesenkt werden. Ein energieautarkes Ventil erlaubt die Umrüstung bestehender Gebäude und erhöht die Kundenakzeptanz.

Die erwarteten Resultate sind essentiell für die geplante Produktentwicklung des Ventils, welche im Rahmen eines EU-Innovationsprojektes (ClimateKIC) mit nationalen und internationalen Partnern aus Industrie und Forschung stattfinden wird [1].

Durch den Einsatz intelligenter Heizungsventile in Gebäuden kann der Energieverbrauch für das Heizen stark gesenkt werden, was eine grosse Reduktion des CO₂-Ausstosses mit sich bringt. Die folgende Abschätzung zeigt das globale Potential zur Energie- bzw. CO₂-Einsparung auf: Gebäude tragen zu 40% zum weltweiten Energieverbrauch bei [2]. Davon stellen wiederum die Heizungen mit >50% den grössten Anteil und bieten somit den grössten Hebel zur Reduktion des Energieverbrauchs und der CO₂-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, Aussen-temperatur und Nutzer- bzw. Bewohneranwesenheit gesteuert wird [3]. Wenn man die Emissionszahlen von 2004 zu Grunde legt, ergibt sich daraus ein jährliches globales CO₂-Vermeidungspotential von mehr als 2 Milliarden Tonnen.

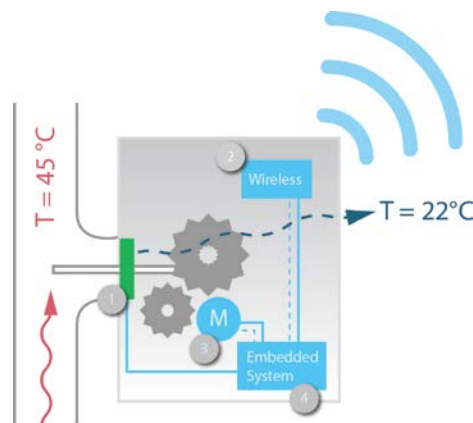


Abbildung 1: Schematischer Aufbau der Funktionselemente des intelligenten Heizungsventils. 1) Energy Harvesting Subsystem inklusive des in diesem Projekt entwickelten TEG 2) Elektronik für die Funkübertragung von Steuerungsinformationen zwischen einer Basisstation und dem Ventil 3) Elektrischer Motor für die Stellbewegungen und 4) Low-Power Elektronik für die Überwachung und Steuerung des Ventils.

Abbildung 1 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 zu 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: $> 35\text{ mV/K}$,
- Elektrischer Widerstand: $< 400\ \Omega$
- Elektrische Leistung: $> 1\ \mu\text{W/K}^2$ (bei 10 K Temperaturdifferenz entspricht das $> 0.1\ \text{mW}$)
- Lebensdauer: > 10 Jahre bei Einsatztemperatur $< 80^\circ\text{C}$

Ziel der Arbeit

Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines thermoelektrischen Energy Harvester Prototypen. Der Harvester ist die Kernkomponente eines intelligenten, energieautarken Heizungsventils, welches in einem EU-ClimateKIC Projekt entwickelt wird. Hauptziel ist, dass der Harvester bereits bei 40°C Vorlauftemperatur genügend elektrische Leistung erzeugt um ein autonomes Heizungsventil zu betreiben.

Vorgehen, Methode

Die von greenTEG vor Projektstart im Jahr 2013 gefertigten TEG-Module wurden für die gSKIN® Wärmeflussensoren sowie für den Einbau in Wärmetauscher-Demonstratoren verwendet. Obschon für diese beiden Anwendungen geeignet, sind sie für den Einsatz in einem Heizungsventil ungeeignet.

Um die TEG-Module für Energy Harvesting Anwendungen einsetzen zu können, bedurfte es einiger Anpassungen des TEG-Designs. Diese Anpassungen waren aufgrund neuer thermischer Randbedingungen erforderlich. Das Ziel dieses Projektes war die Optimierung der TEGs für Energy Harvesting Anwendungen und beinhaltete die Maximierung der Thermosäulendichte (d.h. Anzahl Thermosäulen pro TEG Fläche) unter Berücksichtigung der Grenzen des von greenTEG entwickelten TEG Herstellungsprozesses, die Stapelung einzelner Lagen von TEGs aufeinander sowie die Entwicklung einer einfachen und robusten elektrischen Verbindung zwischen TEG und Elektronik.

In einem zweistufigen Prozess wurden zuerst die Parameter für die elektrochemische Abscheidung der thermoelektrischen Materialien in kleine Löcher (Durchmesser $300\mu\text{m}$, Höhe $200\mu\text{m}$) mit Hilfe geeigneter Design of Experiment Verfahren (DoE) in einem TEG-Design mit 105 Thermopaaren optimiert. In einem zweiten Schritt wurde die Säulendichte weiter erhöht, indem der Abstand zwischen den Säulen minimiert wurde. Diese beiden Anpassungen wurden zuerst auf dem Laborsetup vorgenommen, anschliessend auf das Produktionssetup von greenTEG übertragen und auf letzterem weiter optimiert.

Damit die elektrische Leistung für die ENH-Anwendung bei gegebenen thermischen Randbedingungen erreicht werden kann, müssen zwei oder mehr TEGs übereinander gestapelt werden. Hierfür wurde ein Prozess entwickelt, welcher die Stapelung auf Batchgrösse erlaubt.

Das Packaging der Module stellt in einer Energy Harvesting Anwendung einen unerwünschten thermischen Widerstand dar. In einem zweiten Arbeitspaket wurde das Packaging optimiert, so dass nicht nur die thermischen Widerstände massiv reduziert wurden, sondern auch der gesamte Verpackungsprozess vereinfacht werden konnte.

Für die elektrische und thermische Integration der TEGs in das Heizungsventil wurde ein Verfahren entwickelt, in welchem die TEGs als Surface Mount Devices (SMD) auf Alukern-PCBs gelötet werden. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass die thermische und elektrische Integration in das Heizungsventil möglichst einfach ist, so dass es beim Kunden angewandt werden kann.

Im letzten Arbeitspaket wurden die TEGs in ein vom ClimateKIC Projektkonsortium entwickelten Heizungsventilprototypen eingebaut und an einer von greenTEG umgebauten Apparatur charakterisiert. Dabei sollte bei einer Vorlauftemperatur von $\geq 40^\circ\text{C}$ der Prototyp funktionsfähig sein. Dieses Endziel wurde erreicht. Die resultierende TEG Spannung betrug $405\ \text{mV}$, was ausreichte um die dahinterliegende Elektronik (DC-DC Booster) zu starten und zu betreiben. Die generierte elektrische Leistung betrug $131\ \mu\text{W}$. Hochgerechnet können somit durchschnittlich ca. $7.7\ \text{J/Tag}$ an Energie gewonnen

werden, welche einem berechneten Verbrauch von ca. 6.2 J/Tag gegenüberstehen. Somit konnte demonstriert werden, dass die in diesem Projekt entwickelten TEGs für Energy Harvesting Anwendungen im Allgemeinen und für die Energieversorgung eines autonomen Heizungsventils im Speziellen geeignet sind.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Arbeitspaket 1: Anpassung des Moduldesigns

Erhöhung der Säulendichte

Ziel dieses Teilarbeitspakets war es, die Dichte an thermoelektrischen Säulen in einem TEG so zu erhöhen, dass in der Anwendung mindestens 300 mV bei einem elektrischen TEG Widerstand von weniger als 400 Ohm erreicht werden. Die Schwelle von 300 mV muss erreicht werden, damit die dem TEG nachgeschaltete Elektronik (DC-DC Booster) gestartet wird und genügend Leistung erzeugt, um das Heizungsventil zu betreiben.

Die Erhöhung der Säulendichte wurde in zwei Entwicklungsschritten vorgenommen. In einem ersten Schritt wurde der Säulendurchmesser von 600 um auf 300 um reduziert. In einen zweiten Schritt wurde der Abstand zwischen zwei Säulen von 200 um auf 100 um halbiert.

Die errechneten Spezifikationen des TEG-Prototypen sind in Tabelle 1 aufgelistet. Ein Bild mehrerer Prototypen ist in Abbildung 2 gezeigt.

Tabelle 1: Typische Parameter von einem der hergestellten TEG-Prototypen. Die Messungen am TEG wurden gemacht, als dieser im Ventilprototypen integriert war (siehe Arbeitspaket 4).

Parameter	Wert
Module Seebeck	37 mV/K
Anzahl Thermopaare	200/TEG
Säulendurchmesser	300 um
Abstand von Säule zu Säule (Steg)	100 um
Elektrischer Widerstand	81 Ohm
Modulgrösse	8x8 mm ²
TEG Spannung und Leistung in der Ventil Anwendung bei 40°C Vorlauf.	Vg ~405 mV, Pg ~131 uW

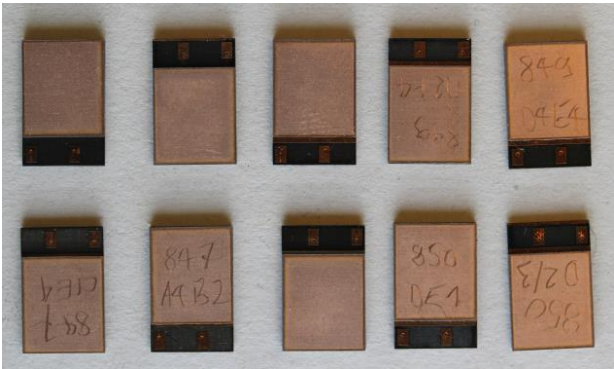


Abbildung 2: Funktionierende TEG-Prototypen welche alle die Projektspezifikationen erreichen.

Entwicklung des Prozesses für das Stapeln von Modulen

Damit die im Heizungsventil integrierten TEGs die erforderliche Minimalspannung erreichen, müssen mindestens 2 TEG Module übereinander gestapelt werden (Details und Berechnungen sind dem Jahresbericht 2013 zu entnehmen). Für das Stapeln von TEGs wurde ein batchtauglicher Produktionsprozess entwickelt und demonstriert. Abbildung 3 zeigt zwei Batches mit je 42 TEGs, welche erfolg-

reich übereinander gestapelt und verklebt werden. Im gleichen Prozessschritt wird auch das neu entwickelte Packaging (Details dazu siehe Arbeitspaket 2) mitverklebt. Die Vereinzelung der TEGs erfolgt durch einen neu entwickelten Laserschnitt. Die TEGs aus Abbildung 2 wurden auf diese Weise hergestellt.

Somit ist der Meilenstein M2 erfüllt.



Abbildung 3: Zwei übereinander gestapelte TEG Batches inklusive Packaging vor der Vereinzelung

Entwicklung und Einfahren von Prozessparameter für die Herstellung von TEGs in Kleinserien

Der Prozess zur Herstellung gestapelter und verpackter TEGs wurde weiterentwickelt und optimiert, so dass Kleinserien im Batchverfahren mit einer Ausbeute von rund 60% hergestellt werden können.

Arbeitspaket 2: Thermische Optimierung der TEGs für die Integration in ein Heizungsventil

Das zweite Arbeitspaket befasste sich mit der Optimierung der thermischen Integration der TEGs in das Heizungsventil. Das Ziel war, den thermischen Widerstand des Packagings um 10% zu reduzieren und eine Druckfestigkeit von 15kg/TEG zu erreichen. Vor Projektstart war das Packaging gemäss Abbildung 4a ausgestaltet. Das Herstellungsverfahren war wie folgt: Zuerst wurde der TEG zur elektrischen Isolation in einem Tauchverfahren mit einem spezial Epoxy von 10 um Dicke beschichtet (0-level). Anschliessend wurde eine Aluminiumfolie von 100 um Dicke mit einem thermisch hochleitfähigen Spezialkleber verklebt. Die Aluminiumfolie hat einerseits die Aufgabe, die TEGs vor mechanischer Beschädigung zu schützen und andererseits die Temperatur auf der Oberfläche zu homogenisieren. Das in diesem Projekt neuentwickelte, verbesserte Verfahren ist in Abbildung 4 b) schematisch dargestellt. In Zusammenarbeit mit einer britischen Firma wurde eine anodisierte Aluminiumfolie entwickelt. Diese Folie wird direkt mit dem TEG verklebt. Die anodisierte Schicht ist sehr zentral, weil sie einerseits sehr dünn, thermisch leitfähig und andererseits elektrisch isolierend ist. Dadurch kann das frühere 0-level Epoxy durch die anodisierte Schicht substituiert werden.

Das neue Verfahren führte zu einer Reduktion des thermischen Gesamtwiderstands der TEGs um 26%. Wir gehen davon aus, dass der thermische Widerstand der Verpackung mehr als halbiert wurde. Der Widerstand der Verpackung ist mittlerweile so gering, dass direkte Messungen der thermischen Widerstände nicht mehr aussagekräftig sind.

TEGs, die mit dem neuen Packaging versehen wurden, haben eine Druckfestigkeit von $> 20\text{kg/cm}^2$ bei einer TEG Fläche von $< 1\text{cm}^2$. Dies ist weit mehr als dem im Projekt festgelegtem Ziel. Das Arbeitspaket 2 ist somit abgeschlossen und die dazugehörigen Meilensteine sind erreicht.



Abbildung 4: Schematische Darstellung von zwei Packaging-Verfahren für TEGs. a) das herkömmliche Verfahren in welchem der TEG mit einer 10 µm dicken Epoxy Schicht geschützt wird und Aluminium als 1-level-Packaging verklebt wird und b) das neue, verbesserte Verfahren bei welchem anodisiertes Aluminium direkt mit dem TEG verklebt wird. Das Verfahren unter b) führte zu einer Reduktion des thermischen Gesamtwiderstands des TEGs um 26%.

Arbeitspaket 3: Elektrische Integration

Ein wichtiger Punkt für den Erfolg des Energy Harvesting ist die elektrische Integration des TEGs, das heisst das Anbinden des TEGs an die Elektronik des Heizungsventils. Das Ziel dieses Arbeitspakets war es daher, eine geeignete Schnittstelle und Kompatibilität zur Ventil-Elektronik zu gewährleisten und zu demonstrieren.

Im Rahmen eines Entwicklungsprojekts für Wärmeflussensor-Anwendungen hatten wir die Idee, die Sensoren als sogenannte Surface Mount Devices (SMD) auf Alukern-PCBs zu löten. Die Vorteile dieses Verfahrens liegen auf der Hand. Die TEGs sind via Lötzinn thermisch und mechanisch sehr gut mit dem darunterliegenden PCB verbunden. Die Kontakte des oberen TEGs im Stapel können dann mittels eines Wirebond-Drahts mit den dafür vorgesehenen Kontaktstellen auf dem PCB verbunden werden. Die PCB-Technologie ermöglicht es, mehrere TEGs elektrisch in Serie zu verbinden. Standardstecker können via SMD-Technologie auf die PCBs gelötet werden und ermöglichen so die Verbindung zur Ventil-Elektronik. Eine schematische Darstellung des Prozesses ist in der Abbildung 5 dargestellt.

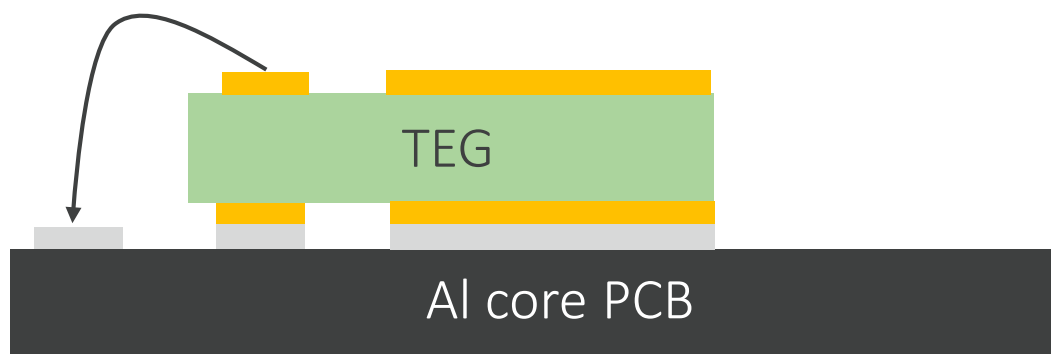


Abbildung 5: Konzept zur thermischen und elektrischen Integration der TEGs in ein Heizungsventil mittels Reflow-Löten und Wirebonding auf ein Aluminiumkern-PCB.

Eine von uns durchgeführte Materialstudie hat gezeigt, dass sich ein Kupfer-Package gut auf ein PCB löten lässt. Zusammen mit der britischen Firma wurden Versuche gefahren, bei welchem mit Kupfer beschichtete anodisierte Aluminiumfolien als Verpackung verwendet wurden. Das Verfahren wurde so optimiert, dass Reflow-Löten ermöglicht wurde. Beispielsweise mussten wir vor dem Löten ein Verfahren anwenden, um das Kupfer von der sich natürlich bildenden Oxidschicht zu befreien, welches gleichzeitig den TEG nicht angreift. Ein Beispiel zweier gestapelter TEGs integriert in ein für die Heizungsventil Anwendung entworfenes PCB ist in der Abbildung 5 zu sehen.

Das Arbeitspaket 3 ist somit abgeschlossen und der Meilenstein M4 ist erfüllt.

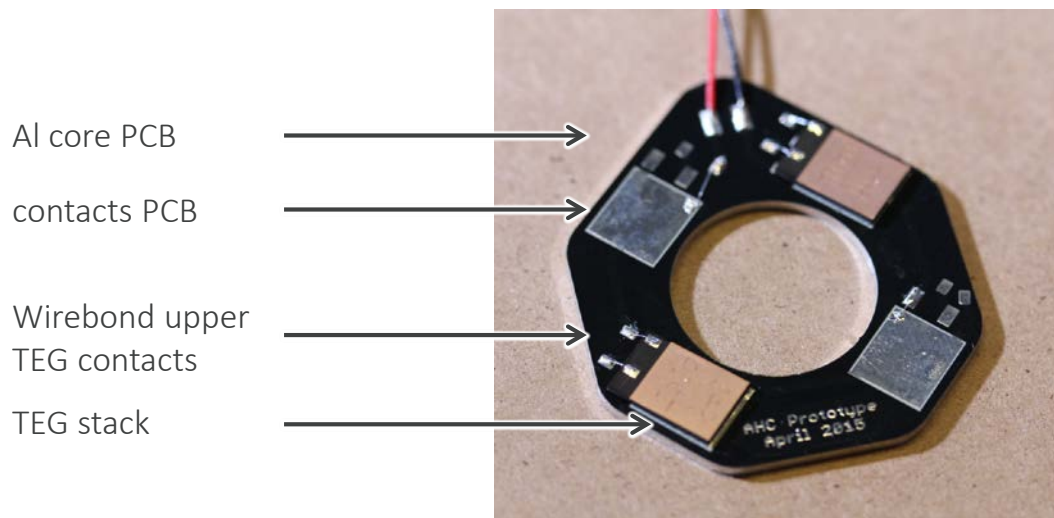


Abbildung 6: Zwei TEG Stapel welche thermisch und elektrisch auf ein Aluminium-Kern-PCB gelötet wurden. Das PCB wurde speziell für die Integration in das Heizungsventil entworfen.

Arbeitspaket 4: Funktionstests Funkventil

Im Rahmen eines europäischen ClimateKIC Innovationsprojekts wird ein Heizungsventil zusammen mit Partnern aus der Wissenschaft und Industrie entwickelt. Das im ClimateKIC Projekt entwickelte Ventildesign darf aus rechtlichen Gründen nicht gezeigt werden.

Ziel des Meilensteines war es zu demonstrieren, dass bei 40°C Vorlauftemperatur die generierte Leistung des TEGs ausreicht, um das Heizungsventil betreiben zu können. Der Energieverbrauch zur Betreibung des Ventils und der Elektronik wurden im Rahmen des ClimateKIC Projekt an Prototypen gemessen. Von Simulationen konnte abgeleitet werden, dass bei einer Heizkurve von 1.1 rund 6.9 Joule/Tag und bei einer Heizkurve von 1.3 rund 9.2 Joule/Tag an elektrischer Energie erzeugt werden können.

Für die Charakterisierung der TEGs wurden jeweils wie geplant 2 TEG-Stapel auf das PCB gelötet (Abbildung 6) und dann in das Heizungsventil verschraubt. Das Heizungsventil wurde an ein extra dafür umgebautes Mess-Setup angebracht, was die Kontrolle der Vorlauftemperatur ermöglichte. Nebst der Spannungsmessung wurden Temperatursensoren zur Messung der Temperatur auf der heißen und kalten Seite des TEGs und der Lufttemperatur angebracht.

Die Messungen wurden jeweils über einen längeren Zeitraum gemacht, so dass sich eine stationäre Spannung einstellen konnte. Abbildung 7 zeigt eine solche thermisch quasi-stationäre Messung. Man sieht, dass die Spannung (blaue Kurve) leicht abnimmt. Grund dafür war, dass die Vorlauftemperatur wegen der hohen thermischen Trägheit des Mess-Setup leicht variiert. Die gemessene Temperaturdifferenz ($T_{\text{water}} - T_{\text{air}}$) ist rot dargestellt und fällt wie die Spannung leicht ab.

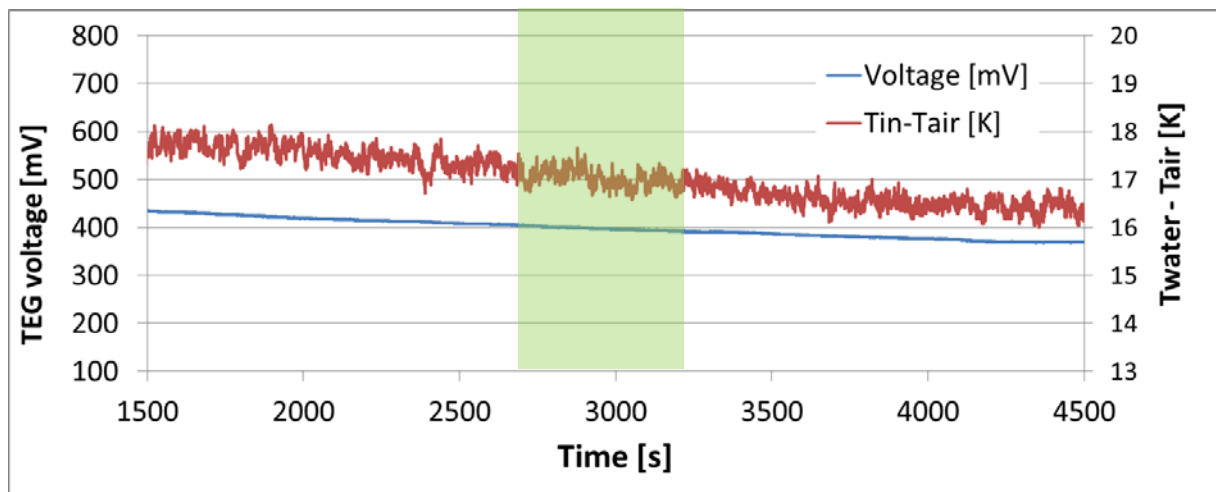


Abbildung 7: Messung der TEG-Spannung im Heizungsventil bei thermisch quasi-stationärem Zustand bei einer Vorlauftemperatur von 40°C.

Für die Berechnung der Energiebilanz wurden die 405mV bei 3000s gewählt (grün eingefärbter Bereich), da dort die Vorlauftemperatur 40°C betrug. Wie in Tabelle 3 dargestellt, betrug der elektrische Gesamt Widerstand der beiden Module 300 Ohm, was eine Leistung von 131 μ W ergibt.

Tabelle 3: Messresultate

Measurement results		Sufficient for	
TEG open circuit voltage	405 mV	✓	DC-DC booster
Electrical resistance	312 ohm	✓	DC-DC booster
TEG Power	131 μ W	✓	Energy consumption

Damit der DC-DC Booster betrieben werden kann, werden 300mV bei 400 Ohm benötigt, was mit den gemessenen Werten gewährleistet ist.

Die Leistung von 131 μ W resultiert in eine berechnete Energieproduktion von durchschnittlich 7.7 Joule/Tag (für eine Heizkurve von 1.1) und 11.5 für die Heizkurve von 1.3. Diese Beträge sind beide höher als die Energie (6.2 Joule/Tag respektive 9.2 Joule/Tag) welche eingangs simuliert wurden. Damit weist der Prototyp eine positive Energiebilanz auf.

Somit wurde der Endmeilenstein erreicht.

Diskussion / Würdigung der Ergebnisse / Erkenntnisse

Alle Projektmeilensteine konnten erfolgreich abgeschlossen werden. Die im Rahmen des Projektes entwickelten TEG-Module von greenTEG erfüllen die Anforderungen für den Gebrauch im autonomen Heizungsventil. Bei der vom Kunden vorgegebenen minimalen Vorlauftemperatur von 40°C wird mit den TEG Modulen mehr Energie produziert, als für den Betrieb der Funksteuerung und der Mechanik benötigt wird (gemäß einer ersten Abschätzung).

Durch die Entwicklung des batchtauglichen Stapelungsprozesses können gestapelte TEG-Module mit hoher Ausbeute in der Produktion von greenTEG fabriziert werden.

Die Resultate des Arbeitspakets 2 übertreffen die Erwartungen bei weitem. Der parasitäre thermische Widerstand des Packagings konnte für die TEG-Anwendung massgebend reduziert werden. Der neue Packaging-Prozess wurde zudem auch in den bestehenden Wärmeflussprodukten angewandt.

Durch die thermische und elektrische Kontaktierung der TEGs mittels Reflowlötten auf Alu-Kern-PCBs

wurde eine kundenfreundliche Integrationsmöglichkeit geschaffen, so dass die thermische Ankopplung auch beim Einbau durch den Kunden immer optimal gewährleistet ist.

Ausblick, nächste Schritte nach Projektabschluss

In einem nächsten Schritt werden die im Projekt entwickelten TEG-Prototypen in grösserer Menge hergestellt. Dadurch werden zu neuen Erfahrungen in Bezug auf Ausbeute, Prozessvariationen etc. gesammelt, zum anderen auch die Möglichkeit geschaffen, eine grössere Anzahl an Ventil-Prototypen für die Heizperiode 2015/16 mit TEGs auszustatten und diese an realen Radiator-Heizkörpern auszu-testen und Erfahrungen unter realen Umgebungsbedingungen zu sammeln. Erste Produktserien mit Stückzahlen von rund 10'000 Thermostatventilen sind für die anschliessende Heizperiode von 16/17 geplant. Anschliessend antizipiert unser Projektpartner jährliche Wachstumsraten (CAGR) zwischen 60% und 150%.

Wir erwarten, dass für diese Tests weitere kleinere Anpassungen an die TEG-Geometrie und an den Integrationsmethoden notwendig sein werden.

- [1] ClimateKIC, "AHC Innovationsprojek." [Online]. Available: <http://platformtbe.org/projects/adhc/>.
- [2] IEA, "Energy Use in the New Millennium - Trends in the IEA Countries," 2007.
- [3] M. Mevenkamp and M. Mayer, "Energy efficiency in educational buildings using KNX / EIB," in *KNX Scientific Conference*, 2005.