



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Schlussbericht 03.11.2015

Prototyping of a thermoelectric power generator

PowerHEX V2

Datum: 03.11.2015

Ort: Bern

Auftraggeber:

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

Auftragnehmer:

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

Autoren:

Florian Umbrecht, greenTEG AG, florian.umbrecht@greenteg.com
Wulf Glatz, greenTEG AG, wulf.glatz@greenteg.com

BFE-Bereichsleiter:

Dr. Michael Moser, michael.moser@bfe.admin.ch

BFE-Programmleiter:

Roland Brüniger, roland.brueniger@r-brueniger-ag.ch

BFE-Vertragsnummer:

SI/500639-02

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

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch

Zusammenfassung

Das vorliegende Projekt stellt die Fortsetzung des PowerHEX Projektes dar (Prototyping of a thermoelectric power generator, BFE SI/500639). Im Rahmen dieses Projektes wurde eine Leistungssteigerung von 1 Watt auf 3.5 Watt pro Lage und integriertem TEG erzielt, und damit die gesteckten Ziele grösstenteils erreicht. Diese Verbesserung um einen Faktor 3.5 wurde durch die folgenden durchgeführten Massnahmen ermöglicht.

Das TEG Design wurde auf die Anwendung im PowerHEX angepasst, das heisst die gesamte für den Herstellungsprozess zur Verfügung stehende Fläche (8 cm x 8 cm) wurde mit Thermopaaren gefüllt. Dadurch wurde die Anzahl der Thermopaare von 2280 auf 3630 Thermopaare (Faktor 1.6) gesteigert. Um den Innenwiderstand des TEGs zu reduzieren wurde der Durchmesser der Thermoschenkel von 0.6 mm auf 0.8 mm erhöht, wodurch das *Av Ratio* (Verhältnis von inaktiver zu aktiver Fläche) von 2.5 auf 0.7 gesenkt werden konnte. Zusätzlich wurde die thermische Integration der thermoelektrischen Generatoren optimiert. Die Eliminierung des 0-level Packagings und der thermischen Kurzschlüsse, sowie die Reduktion des thermischen Ankopplungswiderstandes resultieren in einer Erhöhung der über den TEG abfallenden Temperaturdifferenz von ca. 40% (von 38°C auf 53°C). Ein unter *worst case* und *best case* Bedingungen verbauter TEG zeigte eine Leistungssteigerung um 1.1 Watt, die ausschliesslich der Verbesserung der thermischen Integration zugeschrieben werden konnte. Damit wurde der Meilenstein bezüglicher der Optimierung der thermischen Integration erreicht.

Das mittels Galvanik abgeschiedene thermoelektrische Material konnte soweit verbessert werden, dass 4.5 Watt generierte Leistung pro Lage theoretisch mit dem neuen, optimierten Design erreichbar sind. Allerdings konnte der Nachweis nicht erbracht werden, da durch die Vergrösserung der aktiven Fläche die Standardparameter des Galvanikprozesses nicht gefahren werden konnten. Mit dem zur Verfügung stehenden Laborequipment konnte die erforderliche Stromdichte während der Galvanik nicht erreicht werden, wodurch der Innenwiderstand der gefertigten TEGs zu hoch ist um die geforderte Leistung zu erzielen. Mit dem Erwerb neuen Laborequipments wird es jedoch möglich sein auch den letzten fehlenden Schritt zu vollziehen und das Ziel von 4.5 Watt pro Lage und integriertem TEG zu erreichen.

Abstract

This project represents the continuation of the PowerHEX project (Prototyping of a thermoelectric power generator, BFE SI/500639). Within this project the objective has been mostly reached by increasing the generated power per integrated thermoelectric generator (TEG) from 1 Watt to 3.5 Watts. The improvement of the generated power by a factor of 3.5 has been achieved by working on the following areas.

The new design of the TEG has been adapted for its application inside the PowerHEX, i.e. the active area has been expanded to 8cm x 8cm as this is the maximum available area during the fabrication process. Consequently, the number of thermocouples has been increased from 2280 to 3630, a factor of 1.6. In order to reduce the TEGs electrical inner resistance, the thermo leg's diameter has been increased from 0.6mm to 0.8mm which reduced the *AV ratio* (the ratio of inactive area to active area) from 2.5 to 0.7. Additionally, the thermal integration of the TEG into the heat exchanger setup has been optimized. The elimination of thermal shorts and the reduction of the thermal interface resistance resulted in an increased temperature gradient applied on/across the TEG (53°C instead of 38°C, increase of ca. 40%). The improved thermal integration has been demonstrated by integrating the same TEG under *worst case* conditions and *best case* conditions, which increased the generated power by 1.1Watt. This concluded the milestone with respect to the optimization of the TEG's thermal integration. The thermoelectric material used for the TEG's fabrication has been optimized to such an extent (resistivity, Seebeck coefficient) that the aimed 4.5 Watts per integrated TEG are within reach with the new optimized TEG design. However, due to the increase of the TEG's active area, the standard process parameters used in the fabrication process could not be applied. During the electrochemical deposition of the semiconductor material the maximum required current density could not be provided by the available laboratory equipment. This resulted in an increased electrical resistance of the TEG. With the acquisition of more powerful laboratory equipment the standard fabrication process will be feasible and the final goal of 4.5 Watts per integrated TEG will be reached.

Résumé

Ce projet constitue la continuation du projet PowerHEX (Prototyping of a thermoelectric power generator, BFE SI/500639). Pendant le cours du projet, la puissance par TEG et par couche intégrée a été portée de 1W à 3.5W. Avec ceci, la plus grande partie des objectifs ont été rejoints.

L'amélioration de la puissance par un facteur de 3.5 a été accomplie avec les moyens suivants: Le design du TEG a été adapté spécifiquement à l'utilisation dans le PowerHEX. La surface disponible pour le procès de fabrication (8x8cm) a été entièrement remplie de thermocouples. Ainsi, le nombre de thermocouples a pu être augmentée de 2280 à 3630 (facteur 1.6).

Pour réduire la résistance électrique du TEG, le diamètre des thermocouples a été augmenté de 0.6 mm à 0.8 mm, menant à une réduction du AV-ratio (rapport entre surface inactive et active du TEG) de 2.5 à 0.7. En outre, l'intégration thermique du générateur thermoélectrique a été optimisée.

L'élimination du 0-level Package, des Court-circuits thermiques et la réduction de la résistance thermique d'interface ont augmenté le gradient thermique à travers du TEG de 40% (de 30K à 58K).

La différence en puissance entre un TEG bien intégré thermiquement (best case) et le même TEG mal intégré (worst case) remonte à 1.1W. Cette différence peut être uniquement expliquée par une amélioration de l'intégration thermique. Avec ceci, la borne miliaire concernant l'intégration thermique a été rejoindre.

Le matériel thermoélectrique, fabriqué par déposition galvanique, a été amélioré au point, qu'il serait possible de rejoindre 4.5W par couche avec le design optimisé.

Cependant il n'a pas été possible de vérifier le fait puisque il n'a pas été possible de appliquer les paramètres standard de fabrication. L'équipement de laboratoire n'avait pas la densité de courant requise, de sorte que la résistance des TEG fabriqués était trop haute pour rejoindre la puissance exigée. En achetant de l'équipment plus puissant il va être possible de faire le dernier pas et de rejoindre le but de 4.5 W par couche et TEG intégré.

Projektziele

Das vorliegende Projekt stellt die Fortsetzung des PowerHEX Projektes dar (*Prototyping of a thermo-electric power generator, BFE SI/500639*) [1]. Ziel ist es, durch Design- und Materialoptimierung des zuvor entwickelten Systems die generierte Leistung von 1 Watt auf 4.5 Watt pro Lage/integriertem TEG zu steigern, um das Ziel von generierten 200 Watt bei kompakter Bauweise und einem Temperaturbereich von 5°C bis 80°C zu erreichen. Um dieses Ziel zu erreichen, liegt der Fokus der Weiterentwicklung auf der Optimierung des Designs der TEGs, der Optimierung der thermischen Integration der TEGs, sowie der Optimierung der Materialeigenschaften des verwendeten Halbleitermaterials.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Mit dem bestehenden PowerHEX System konnte dessen Konzept verifiziert sowie die Skalierbarkeit demonstriert werden. Im Fokus der zu bearbeitenden Optimierungsfelder stand das Design der TEGs, die thermische Integration der TEGs in den Wärmetauscher und die Optimierung der Materialeigenschaften. Zur Berechnung und Abschätzung der erwarteten Leistungszunahme bei entsprechender Optimierungsmassnahme wurde das im Vorgängerprojekt entwickelte Simulationstool verwendet.

Optimierung des TEG Designs

Durch Optimierungen des TEG Designs wurde per Simulation eine potentielle Leistungszunahme von 1.4 Watt generierter Leistung pro Lage prognostiziert. Durch einen Erhöhung der Packungsdichte und Nutzung der gesamten zur Verfügung stehenden Fläche wurden die generierte Spannung und die erzeugte Leistung gesteigert.

Ergebnisse 1 (Q4 2013)

Vor der Optimierung der thermischen Integration wurde einer ersten Designanpassung die Anzahl der Thermopaare von 2280 auf 3465 Thermopaare erhöht. Dieser Schritt wurde bereits in Q4 2013 umgesetzt (Abbildung 1). Messungen ergaben bei einer Temperaturdifferenz von 69.8 °C eine generierte Spannung von 32.5 Volt. Bei einem Innenwiderstand des Generators von 161 Ohm entspricht dies einer generierten Leistung von 1.6 Watt (*matched load*) und einer Leistungssteigerung um 0.6 Watt.

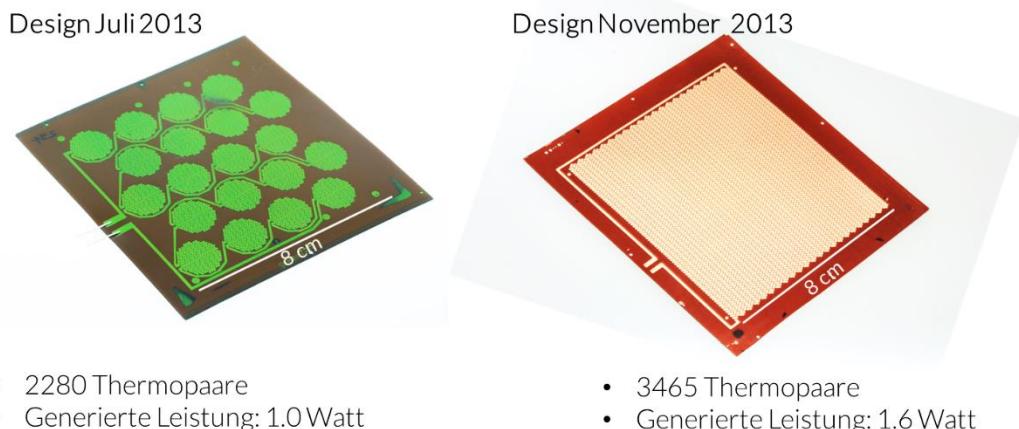


Abbildung 1: Links: Design mit 2280 Thermopaaren Stand Projektende PowerHEX V1. Rechts: Angepasstes Design mit 3465 Thermopaaren in Q4 2013, Innenwiderstand 161 Ohm.

Ergebnisse 2 (Q3 2015)

Die durchgeführten Messungen in Q3 2015 wurden zu Projektende durchgeführt, also nach abgeschlossener Optimierung der thermischen Integration des TEGs in den Wärmetauscher. In einer zweiten Designanpassung wurde der Lochdurchmesser von 0.6mm auf 0.8mm vergrößert (Abbildung 2). Dadurch wird die aktive Fläche erhöht, d.h. die mit Halbleitermaterial gefüllte Fläche, und zusätzlich reduziert diese Anpassung den elektrischen Widerstand des TEGs, wodurch die generierte Leistung gesteigert wird. Außerdem wurde die Anzahl der Thermopaare erhöht, von 3465 auf 3680 Ther-

mopaare, um die zur Verfugung stehende Fluche optimal zu nutzen.

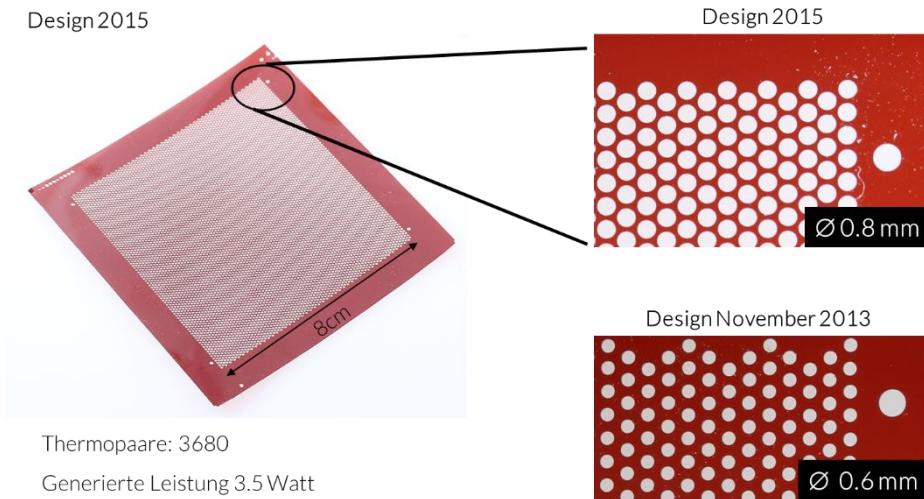


Abbildung 2: Links: aktuelles TEG Design (Q2 2015) mit 3680 Thermopaaren. Rechts oben: Ausschnitt des aktuellen TEG Designs. Der Lochdurchmesser ist 0.8mm. Rechts unten: Zum Vergleich: TEG Design Q4 2013 mit einem Lochdurchmesser von 0.6mm.

In Abbildung 3 ist der Aufheizvorgang des Wärmetauscheraufbaus dargestellt. Dabei wird die Temperatur der heißen Seite stetig auf 85°C erhöht, während die kalte Seite konstant auf 10°C gehalten wird. Die abgegriffene Spannung des TEGs ist über die angelegte Temperaturdifferenz aufgetragen. Die lineare Abhängigkeit ist deutlich zu erkennen (0.47 V/°C).

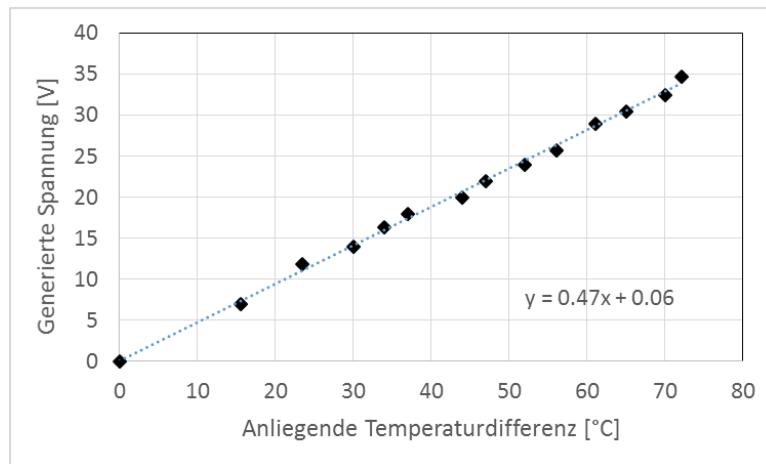


Abbildung 3: Messergebnisse des aktuellen TEG Designs. Heizvorgang: Die generierte TEG Spannung ist über die angelegte Temperaturdifferenz aufgetragen. Die lineare Abhängigkeit ist deutlich zu erkennen (0.47 V/°C). Während der Aufheizphase beträgt die Flussrate im heißen und kalten Kanal des Wärmetauschers 3l/min.

Ist der Aufheizvorgang beendet, wird die Flussrate des Systems beidseitig (heisse und kalte Seite) auf bis zu 7 l/min erhöht. Die generierte Spannung und daraus berechnete Leistung werden über die anliegende Flussrate aufgetragen (Abbildung 4). Dabei ist die angelegte Temperaturdifferenz konstant

bei 75°C.

Es ist gut zu erkennen dass mit steigender Flussrate die generierte Spannung steigt. Durch den erhöhten Fluss wird an der Grenzfläche Flüssigkeit/Manifold der Wärmeübergangskoeffizient erhöht und somit der Temperaturabfall über diese Grenzfläche reduziert. Daraus resultiert ein höherer Temperaturabfall über den TEG und somit steigt die generierte Spannung. Mit weiter steigender Flussrate sättigt die generierte Spannung und Leistung. Der Wärmeübergangskoeffizient kann trotz steigendem Fluss nicht weiter erhöht werden und somit bleibt die direkt über dem TEG anfallende Temperaturdifferenz konstant. Die maximale generierte Spannung beträgt 43.7 Volt. Bei einem Innenwiderstand des TEGs von 137 Ohm entspricht dies einer generierten Leistung von 3.5 Watt.

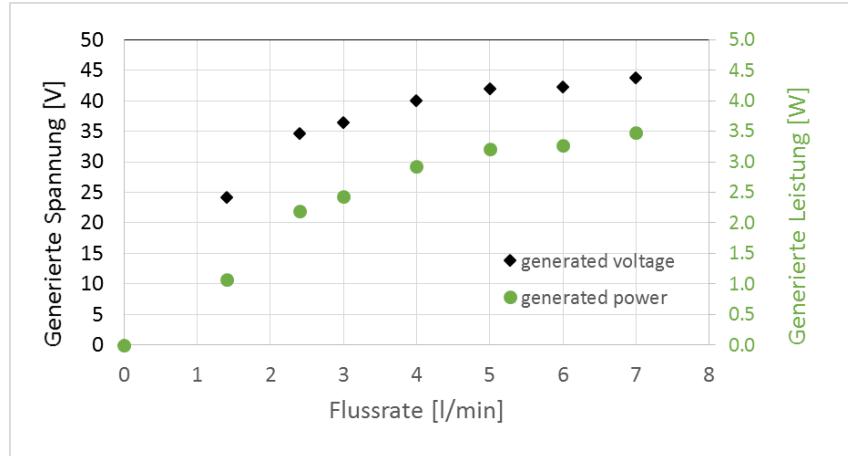


Abbildung 4: Die generierte Spannung des TEGs und daraus berechnete Leistung sind über die Flussrate aufgetragen. Die angelegte Temperaturdifferenz ist konstant bei 75°C.

Optimierung der thermischen Integration

Da die gewonnene Leistung quadratisch mit der über den TEG angelegten Temperaturdifferenz steigt, ist die Optimierung der thermischen Anbindung und Integration der TEGs essentiell, das heisst, die thermischen Verluste zu minimieren und dadurch die über dem TEG abfallende Temperaturdifferenz zu maximieren ($U_{TEG} \sim \Delta T_{TEG}$ und $P_{TEG} \sim U_{TEG}^2$). Abbildung 5 zeigt das thermische Ersatzschaltbild eines in den Wärmetauscher integrierten TEGs.

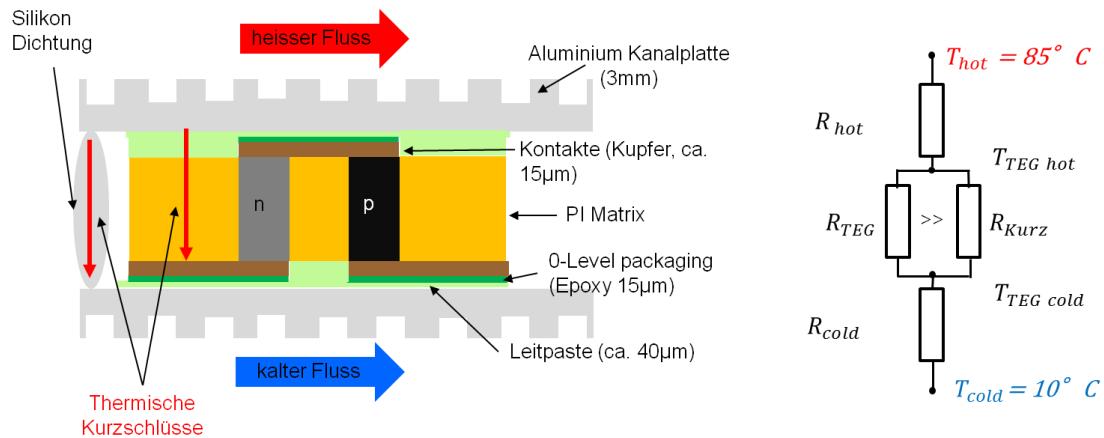


Abbildung 5: Schematische Ansicht eines TEGs im Querschnitt (links) und vereinfacht dargestelltes thermische Ersatzschaltbild (rechts).

Aus dem thermischen Ersatzschaltbild wurden folgende Massnahmen zur Optimierung der thermischen Integration abgeleitet und durchgeführt:

- Eliminierung der thermischen Kurzschlüsse.

- Minimierung der Schichtdicke der aufgetragenen Wärmeleitpaste auf 40 µm circa 17 µm.
- Austausch der verwendeten Wärmeleitpaste (doppelte thermische Leitfähigkeit).
- Eliminierung des 0-Level Packaging (wurde ermöglicht durch eine Oberflächenbehandlung der verwendeten Aluminiumplatten).
- Steigerung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten (durch Erhöhung des Aspektverhältnisses der Kanäle in der Kanalplatte [2-3]).

Durch diese Massnahmen wird mittels Simulation eine Steigerung der über den TEG abfallenden Temperaturdifferenz von 15°C vorhergesagt (38°C auf 53°C, Zunahme von 39%). Entsprechend wird eine Erhöhung der generierten Spannung um 39% ($U_{TEG} \sim \Delta T_{TEG}$) erwartet sowie der generierten Leistung um 93% ($P_{TEG} \sim U_{TEG}^2$).

Ergebnisse

Um den Einfluss der getroffenen Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Integration zu verifizieren wurde ein Generator (Design November 2013, Innenwiderstand 180 Ohm) unter *worst case* und *best case* Szenarien bezüglich der thermischen Integration verbaut. Nach den durchgeföhrten Optimierungsmassnahmen stieg die generierte Spannung von 30.9 Volt auf 42 Volt (35.9%) und entsprechend die generierte Leistung (*matched load*) von 1.3 Watt auf 2.4 Watt (84.6 %). Diese Ergebnisse sind in guter Übereinstimmung mit den mittels Simulation berechneten Werten. Somit wurde der Meilenstein bezüglich der Optimierung der thermischen Integration erreicht.

Optimierung der Materialeigenschaften

Unter Annahme gleichbleibender Materialeigenschaften (bezogen auf das Design Nov 2013), und zu diesem Zeitpunkt vollzogener Optimierung der thermischen Integration, wurden für das aktuelle Design (*Design 2015*) des TEGs folgende Ergebnisse erwartet (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, Spalte: *Design 2015 berechnet*): Ein Innenwiderstand von 108 Ohm, eine generierte Spannung von 44.5 Volt sowie eine generierte Leistung von 4.6 Watt. Allerdings mussten durch die Anpassung des Designs 2015 auch die Abscheideparameter der Galvanik im Herstellungsprozess angepasst werden. Bedingt durch die vergrösserte aktive Fläche konnten die Standardparameter in der Fabrikation nicht mehr gefahren werden, da die benötigte Stromdichte während der Galvanik nicht

Vergleich der TEG Designs		Design Nov. 2013	Design Nov. 2013 ther. optimiert	Design 2015 berechnet	Design 2015	Design 2015 Material optimiert
Messung		Q4 2013	Q3 2014	-	Q2 2015	Q3 2015
Lochdurchmesser	mm	0.6	0.6	0.8	0.8	0.8
Anzahl der Thermopaare	#	3465	3465	3680	3680	3680
Av Ratio (inaktive/aktive Fläche)	-	2.3	2.3	0.7	0.7	0.7
Widerstand	Ohm	161	180	108	162	137
Max. Spannung	Volts	32.5	41.9	44.5	42.8	43.7
Max. generierte Leistung	Watt	1.6	2.4	4.6	2.8	3.5

erreicht werden konnte.

Tabelle 1: Übersicht der TEG Designs und der erzielten Ergebnisse. Grün unterlegt sind die angestrebten Ziele, die basierend auf den Materialeigenschaften der Messungen in Q3 2014 berechnet wurden. Das Design 2015 (rot unterlegt) zeigt einen zu hohen Innenwiderstand, zurückzuföhren auf das limitierte Laborequipment (Stromdichte des Standardprozesses konnte nicht erreicht werden). Eine zusätzlich eingeführte Dotierung des Halbleitermaterials (p-Typ) mit Antimon konnte den Widerstand zwar deutlich um 25 Ohm reduzieren, jedoch nicht auf die erwarteten 108 Ohm senken.

Die angepasste Stromdichte resultierte hauptsächlich in einem höherem Innenwiderstand des TEGs (Spalte: *Design 2015, Messung Q2 2015*, 162 Ohm statt 108 Ohm). Dadurch konnte auch der Zielwert

von 4.6 Watt nicht erreicht werden, sondern lediglich 2.8 Watt. Da für die Fertigung des TEGs das Laborequipment der limitierende Faktor ist, wurde durch eine Dotierung des p-Halbleitermaterials mit Antimon eine Verringerung des elektrischen Widerstandes erreicht. Dadurch konnte der Widerstand auf 137 Ohm reduziert, sowie eine Leistung von 3.5 Watt erzeugt werden.

Nationale Zusammenarbeit

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

Bewertung und Ausblick

Bewertung

Im Rahmen dieses Projektes wurde eine Leistungssteigerung von 1 Watt auf 3.5 Watt pro Lage und integriertem TEG erzielt, und damit die gesteckten Ziele grösstenteils erreicht. Diese Verbesserung um einen Faktor 3.5 wurde durch die in Abbildung 6 dargestellten Massnahmen erreicht (Designoptimierungen, Optimierung der thermischen Integration und die Optimierung der Materialeigenschaften). Das mittels Galvanik abgeschiedene thermoelektrische Material konnte soweit verbessert werden, dass 4.5 Watt generierte Leistung pro Lage theoretisch mit dem optimierten Design erreichbar sind. Allerdings konnte der Nachweis nicht erbracht werden, da durch die Vergrösserung der aktiven Fläche die Standardparameter des Galvanikprozesses nicht gefahren werden konnten. Mit dem zur Verfügung stehenden Laborequipment konnte die erforderliche Stromdichte während der Galvanik nicht erreicht werden, wodurch der Innenwiderstand der gefertigten TEGs zu hoch ist um die geforderte Leistung zu erzielen.

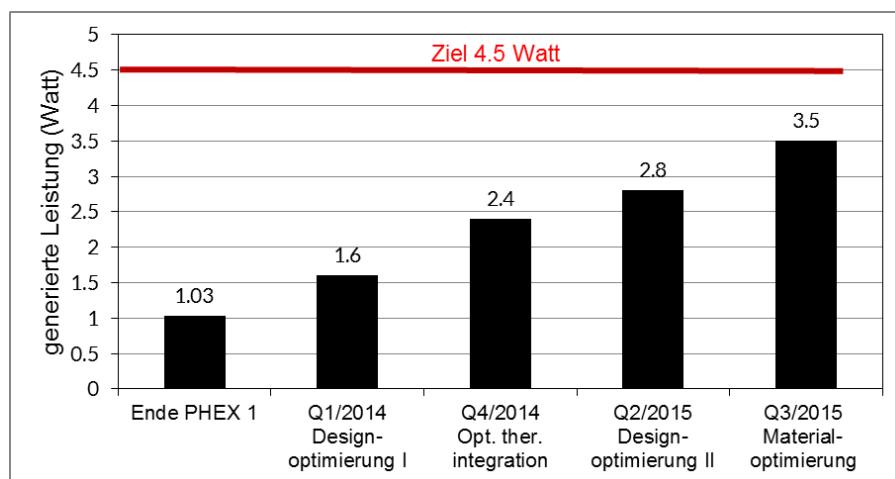


Abbildung 6: Entwicklung der erzielten Leistung pro Lage und integriertem TEG über die Projektdauer. Im Rahmen dieses Projektes wurde eine Leistungssteigerung von 1 Watt auf 3.5 Watt pro Lage und integriertem TEG erreicht, und damit die gesteckten Ziele grösstenteils erreicht.

Ausblick

Mit Hilfe geeigneten Laborequipments wird es möglich sein auch den letzten fehlenden Schritt zu vollziehen und das Ziel von 4.5 Watt pro Lage und integriertem TEG zu erreichen. Dadurch wird mit vollzogener Produktionsskalierung der greenTEG AG der Grundstein zur kostengünstigen Umsetzung des PowerHEX gelegt sein, sowie die Möglichkeit gegeben sein, Kunden und Partner für dessen Kommerzialisierung zu gewinnen.

Referenzen

- [1] F. Umbrecht, W. Glatz "Prototyping of a thermoelectric power generator", BFE SI/500639, 2013.
- [2] N. Wojtas, M. Grab, W. Glatz, and C. Hierold, "Stacked micro heat exchange system for optimized thermal coupling of microTEGs", Journal of Electronic Materials, vol. 42, no. 7, pp. 2103-2109, 2013.
- [3] N. Wojtas, L. Rüthemann, W. Glatz, and C. Hierold, "Optimized thermal coupling of micro thermoelectric generators for improved output performance," Renewable Energy, vol. 60, pp. 746–753, 2013.