



Schlussbericht 31. Juli 2013

Prototyping of a thermoelectric power generator (Power-HEX)



Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm „Elektrizitätstechnologien und –anwendungen“
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

Elektrizitätswerke der Stadt Zürich (EWZ)
Tramstrasse 35
CH-8050 Zürich

Energie Uster AG (EUAG)
Oberlandstrasse 78
CH-8610 Uster

Auftragnehmer:

greenTEG GmbH
Technoparkstrasse 1
CH-8005 Zürich

Autoren:

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

BFE-Bereichsleiter: Michael Moser

BFE-Programmleiter: Roland Brüniger

BFE-Vertrags- und Projektnummer: SI/500639-01 / SI500639

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung / Projektziele.....	5
2	Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse	5
2.1	TEG Produktion	5
2.1.1	Planung und Installation der Prototypenlinie	5
2.1.2	Einfahren der Prototypenlinie.....	6
2.1.3	Produktion von Prototypen.....	6
2.2	Packaging.....	6
2.2.1	Testaufbauten Packaging	7
2.2.2	Materialtests Packaging.....	7
2.2.3	Prozessentwicklung Packaging	8
2.2.4	Belastungstest verpackter TEGs.....	8
2.3	Design und Herstellung des Wärmetauscherprototypen	9
2.3.1	Design und Simulation des Wärmetauscherprototypen.....	9
2.3.2	Prozessentwicklung zur Herstellung der Wärmetauscher Komponenten	10
2.3.3	Herstellung und Charakterisierung.....	10
2.3.4	Optimierung.....	11
3	Nationale Zusammenarbeit.....	15
4	Bewertung und Ausblick	15
4.1	Bewertung	15
4.2	Ausblick	15
5	Referenzen.....	16

Zusammenfassung

Thermoelektrische Generatoren (TEGs) ermöglichen Wärme direkt in Strom zu wandeln. Um das Potential dieser Technologie im Niedertemperaturbereich ($\leq 150^{\circ}\text{C}$) zu demonstrieren ist das Ziel dieses Projektes die Herstellung eines stromerzeugenden Wärmetauscherprototypen. Dies beinhaltet die Fertigung von TEGs, deren Verpackung (Packaging) sowie deren Integration in einen Wärmetauscher.

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurden die zur Herstellung der TEGs benötigte Produktionslinie erfolgreich geplant, aufgebaut und eingefahren, so dass der benötigte Bedarf an TEGs über den gesamten Zeitraum des Projektes gedeckt werden konnte. Der Prozess zur Verpackung der TEGs wurde entwickelt und in greenTEGs Serienfertigung der TEG Module integriert.

Das Design des Wärmetauscherprototypen wurde entsprechend vorgegebener Kriterien entworfen, so dass das Ergebnis ein modulares System ist, in welchem die Anzahl der integrierten TEGs variabel und einfach herzustellen ist. Mit dem bestehenden PowerHEX System konnte dessen Konzept verifiziert sowie die Skalierbarkeit an einem zehnlagigen Aufbau demonstriert werden. Aus wirtschaftlichen Gründen wurden Optimierungsarbeiten an einlagigen Wärmetauscherprototypen durchgeführt. Dabei konnte eine signifikante Steigerung der generierten Leistung von 24 Milliwatt auf 1.03 Watt pro Lage erreicht werden. Mittels durchgeführter Simulationen wurde gezeigt, dass durch weitere Optimierungsmassnahmen eine generierte Leistung von 4.7 Watt pro Lage erreichbar ist. Damit ist das ursprüngliche Ziel, 200 Watt generierte Leistung bei kompakter Bauweise, in Reichweite und Bestand zukünftiger Entwicklungstätigkeiten.

Abstract

Thermoelectric generators (TEGs) enable the direct conversion of heat to electricity. In order to show the potential of this technology in the low temperature regime ($\leq 150^{\circ}\text{C}$), the objective of this project is the fabrication of a power generating heat exchanger prototype. This includes the fabrication of TEGs, the adequate packaging and the integration of the TEGs into a heat exchanger.

For the fabrication of the TEGs, the required production line has been successfully planned and set-up and the required number of TEGs needed during the project has been delivered. The process for the TEG's packaging has been developed and integrated into greenTEGs fabrication process.

The concept for the integration of the TEGs into a power generating heat exchanger prototype has been worked out. The focus was set on a modular system which allows holding a variable number of TEGs and which is easy to fabricate. The developed system has been used to demonstrate its scaling concept by building a ten layered prototype. Based on economic reasons the optimization of the system has been carried out using one-layered prototypes. A significant increase of power output from 24 Milliwatts to 1.03 Watts has been achieved. Further, the potential of an additional increase of power output has been demonstrated by simulations, showing that an power output of 4.7 Watts per layer is feasible.

Therefore, the initial objective, the generation of 200 Watts with a compact design, is within reach and in the focus of future developments.

1 Einleitung / Projektziele

Energie ist eine äusserst knappe Ressource. Aktuelle Diskussionen in Politik, Wissenschaft, Wirtschaft und Medien bekräftigen das allgemeine Bedürfnis nach neuen Lösungen. Dabei kristallisiert sich heraus, dass es nicht mehr die „eine Lösung“ geben wird, sondern dass eine nachhaltige Energieversorgung aus unzähligen Puzzleteilen bestehen wird. Diese neuen Lösungen werden über alle Wertschöpfungsstufen verteilt sein, also nicht nur die Produktion und Umwandlung der Energie beinhalten, sondern auch die Verteilung und die effiziente Nutzung.

Das Ziel des vorliegenden Projekts ist es ein Puzzleteil zu der oben beschriebenen Problematik zu entwickeln. Das Potential von bisher verlorener Abwärme soll durch Wandlung in elektrischen Strom teilweise nutzbar gemacht werden. Dies soll durch die Integration thermoelektrischer Generatoren (TEGs) in einen Wärmetauscher ermöglicht werden. An der ETH wurden neuartige TEGs entwickelt, die sich aufgrund ihrer Eigenschaften besonders für den Einsatz in einem Wärmetauscher eignen. Die greenTEG GmbH, ein Spin-off Unternehmen der ETH Zürich entwickelt und kommerzialisiert diese Technologie.

Das Ziel des Projektes ist der Aufbau eines stromerzeugenden Wärmetauscherprototypen, der das Potential der Technologie demonstriert. Mit diesem Prototypen sollen Kunden, Partner und Investoren für die Kommerzialisierung gewonnen werden. Die Zielspezifikationen sind eine generierte Leistung von 200 Watt bei kompakter Bauweise und einem Temperaturbereich $\leq 80^\circ\text{C}$.

Um dieses Ziel zu erreichen ist das Projekt wie folgt unterteilt:

1. Produktion: Herstellung der thermoelektrischen Module
2. Packaging: Entwicklung einer robusten Schutzschicht für die thermoelektrischen Generatoren
3. Design und Herstellung: Entwicklung und Aufbau des Wärmetauscherprototypen

2 Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

2.1 TEG Produktion

Das Ziel der TEG Produktion ist es, den zur Durchführung des PowerHEX-Projektes benötigten Bedarf an TEGs zu sichern. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde eine Prototypenlinie geplant, installiert und eingefahren.

2.1.1 Planung und Installation der Prototypenlinie

Um den benötigten Durchsatz und die Reproduzierbarkeit der Fertigungslinie zu gewährleisten, müssen die in Tabelle 1 genannten Kriterien erfüllt sein.

Tabelle 1: Wichtigste Kriterien zur Steigerung des Durchsatzes und der Reproduzierbarkeit der geplanten Produktionslinie.

Durchsatz	Reproduzierbarkeit
Parallelisierung	Prozessstabilität
Batch-Fertigung	Fehlerminimierung
Reduktion der Prozessschritte	Standardisierung
Vereinfachen der Prozesse	Messbarkeit
Ausschussrate minimieren	

Diese Kriterien sind massgebend für die erfolgreiche Umsetzung einer Produktionslinie. Folglich wurden alle bisher bestehenden und alternative TEG Fertigungsprozessschritte auf ihre Kompatibilität geprüft und mit Hilfe einer ausführlichen FMEA (Fehlermöglichkeits- und

Einfluss-Analyse) auf ihre Industrietauglichkeit bewertet. Daraus wurde ein neuer industrietauglicher Herstellungsprozess für die TEGs abgeleitet, der diverse Bedingungen an die Räumlichkeiten für die Fertigung (Platzbedarf, verfügbare Medien, Chemielüftung) stellt. Diese Voraussetzungen sind im Technopark Zürich am besten erfüllt und es wurden Laborräume gemietet, in denen die Prototypenlinie termingerecht in Q4 2011 installiert wurde.

2.1.2 Einfahren der Prototypenlinie

Die Kernprozesse des industrietauglichen Herstellungsprozess der TEGs sind die Photolithographie, Galvanik und das Flatschleifen. Zur Qualitätskontrolle der einzelnen Prozessschritte wurden optische und elektrische Prüfverfahren installiert. In der Ramp-up Phase wurde jeder einzelne dieser Prozesse eingefahren und in den entsprechenden Prozess- und Wartungshandbüchern dokumentiert. Zur Produktionsablaufsteuerung wurde ausserdem ein Kanban System eingeführt. Dieser Meilenstein wurde mit dem ersten gefertigten TEG Modul bereits zu Beginn des ersten Quartals 2012 erfolgreich abgeschlossen. Ein gefertigtes TEG Modul (10cm x 10cm) ist in Abbildung 1 zu sehen.

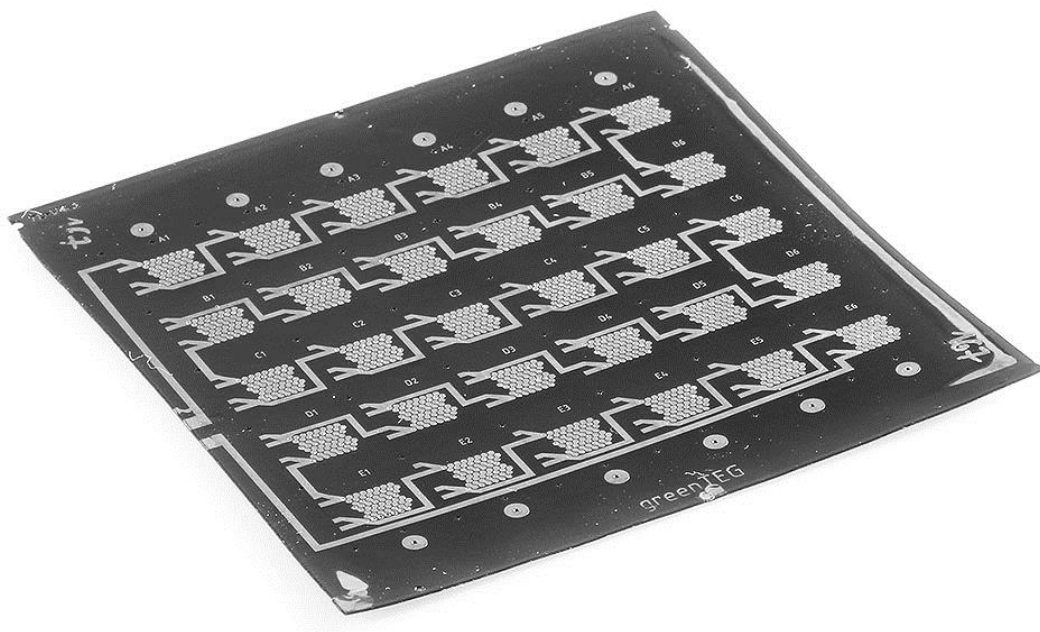


Abbildung 1: Gefertigtes TEG Modul (10cm x 10cm), bestehend aus 30 Untereinheiten, die seriell miteinander verbunden sind.

2.1.3 Produktion von Prototypen

Das Ziel des zweiten Meilensteins der TEG Produktion beinhaltete die Fertigung von 20 TEG Modulen. Zur weiteren Verbesserung der Prozessüberwachung wurde eine Prozessdatenbank programmiert und in die Produktion der TEG Module implementiert. Diese ermöglicht es Abweichungen der einzelnen Prozesse frühzeitig zu erkennen und entsprechende korrigierende Massnahmen einzuleiten. Die Produktion der 20 TEG Module wurde im zweiten Quartal 2012 und somit auch dieser Meilenstein fristgerecht erreicht.

Für Q1 und Q2 2013 lag der Fokus in der Produktion der TEG Module auf der kontinuierlichen Verbesserung des Herstellungsprozess.

2.2 Packaging

Für die Integration der hergestellten TEGs in einen Wärmetauscher sind die Anforderungen an das Packaging vielseitig. Um den thermischen, mechanischen und chemischen Dauerbelastungen standhalten zu können muss das Packaging robust sein sowie elektrisch isolie-

rend. Gleichzeitig müssen Leistungseinbussen durch das Packaging gering gehalten werden, d.h., es muss möglichst dünn und thermisch sehr gut leitend sein. In einer Literaturrecherche wurden mögliche Materialien und industrietaugliche Prozesse identifiziert die geeignet sind, um die TEGs elektrisch isolierend, thermisch leitend und für Wasser undurchlässig zu verpacken. Nachfolgend werden die Testaufbauten zur Prüfung der evaluierten Verpackungsmaterialien sowie die resultierenden Testergebnisse beschrieben.

2.2.1 Testaufbauten Packaging

Folgende Methoden die zur Charakterisierung des Packagings dienen, wurden evaluiert und die entsprechenden Testaufbauten geplant und in Q1 2012 in Betrieb genommen.

- Adhäsionstest: Bestimmung der Adhäsion zwischen TEG und Packaging
- Biegetest: Zyklische Biegebelastung der Testsamples
- Temperaturzyklen
- Beschleunigte Belastungstests unter erhöhter Temperatur und Luftfeuchtigkeit (highly accelerated stress test, HAST).
- Abrasionstest: Bestimmung der Abrasion (Sandstrahler) unter definierten Bedingungen (Zeit, Auftreffwinkel, Korngrösse, Abstand)
- Elektrische Durchschlagsspannung (electrical break down test)

Tabelle 2 zeigt eine Übersicht der Testmethoden, Referenzen auf die angewandten Standards, Details zu den durchgeführten Tests und die Analysemethode zur Auswertung der Tests.

Tabelle 2: Übersicht der evaluierten Testmethoden zur Charakterisierung des Packagings.

Test	El. BD	Adhesion	Abrasion	Bending	Thermal cycling	Thermal stress
According to standard	Custom made set-up	ISO-2409	Edward Schramm: Sandblast-Abrasion Test for Glazes.	ISO-6860	ASTM D6944 -09	EN 60749-4
Experiment	Voltage vs. current measurement	Tape test on blended sample	Sandblast with defined particle sizes and defined boundary conditions	400 bending cycles	30 thermal cycles between 5°C and 100°C	96 h at 70°C ,at rel. humidity of 85% and potential applied to the sample

2.2.2 Materialtests Packaging

Um die TEG Module im Einsatz vor äusseren Einflüssen zu schützen, wird ein sogenanntes Packaging (Verpackung) benötigt. Die Anforderungen an das Verpackungsmaterial sind vielfältig, da es mechanisch und chemisch stabil, sowie elektrisch isolierend sein muss. Gleichzeitig sollte die Beschichtung so dünn wie möglich sein um die thermischen Verluste über den Generator zu minimieren. Aus diesen Gründen lag bei der Materialevaluation der Fokus auf keramischen und polymerbasierten Werkstoffen. Die in Tabelle 3 dargestellten Materialien (MP1-MP4) wurden mittels den in Tabelle 2 aufgeführten Methoden auf ihre Robustheit getestet.

Tabelle 3: Übersicht der zur Auswahl stehenden Materialien für das 0-Level Packaging. Dabei handelt es sich um keramische sowie polymerbasierte Materialien.

Material	Durchschlags spannung [kV/mm]	Thermische Leitfähigkeit [W/mK]	Max Temperatur [°C]	Thermische Ausdehnung [ppm/°C]
MP1	18-35	16-35	1750	8.4
MP2	16	0.19	>150	45 - 65
MP3	276	0.126	80	69
MP4	220	0.084	100	35

Dazu wurden TEGs mit den jeweiligen Materialien des 0-Level Packagings beschichtet und den Belastungstests unterzogen. Nach der Analyse der durchgeführten Tests zeigte das Verpackungsmaterial MP2 die besten Ergebnisse (Tabelle 4) und wurde folglich als Verpackungsmaterial ausgewählt und der Meilenstein in Q2 2012 abgeschlossen.

Tabelle 4: Ergebnisse der Tests zur Charakterisierung des 0-Level Packagings bestehend aus MP2.

Test	Ergebnis
El. Durchschlag (vor den Tests)	Kein Durchschlag
Adhäsion	81 %
Abrieb	Kein Durchschlag, sehr schwacher Abrieb
Biegetest	Kein Durchschlag, kein sichtbarer Defekt
Thermische Zyklen	Kein Durchschlag, kein sichtbarer Defekt
HAST	Kein Durchschlag, kein sichtbarer Defekt

Der Prozess zur Herstellung des 0-level Packaging mittels dem polymerbasierten Material MP2 bietet ausserdem folgende, für die Produktion wichtigen, Vorteile:

- Skalierbar auf grosse Flächen (wichtig im Hinblick auf die angestrebte Skalierung von greenTEGs Produktion Ende 2015)
- Zuverlässiger Standardprozess in der Leiterplattenindustrie
- Keine Vakuumtechnologie benötigt, im Gegensatz zu Sputter- oder ALD-Prozessen (atomic layer deposition)
- Bestehendes Potential zur weiteren Steigerung der Adhäsion mittels Oberflächenvorbehandlung

2.2.3 Prozessentwicklung Packaging

Zur Prozessentwicklung des 0-Level Packagings mit Verpackungsmaterial MP2 konnte auf die Erfahrung aus der Leiterplattenindustrie zurückgegriffen werden. In Zusammenarbeit mit einem externen Anbieter wurde der Prozess auf die Bedürfnisse von greenTEG optimiert und im Anschluss erfolgreich in die Prototypenlinie transferiert (Q4 2012).

2.2.4 Belastungstest verpackter TEGs

Mit MP2 verpackte TEGs wurden den Belastungstests ausgesetzt und im Anschluss der Seebeck-Koeffizient gemessen sowie dessen relative Änderung bestimmt. Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse der Belastungstests für verschiedene Konfigurationen für das Verpackungsmaterial MP2.

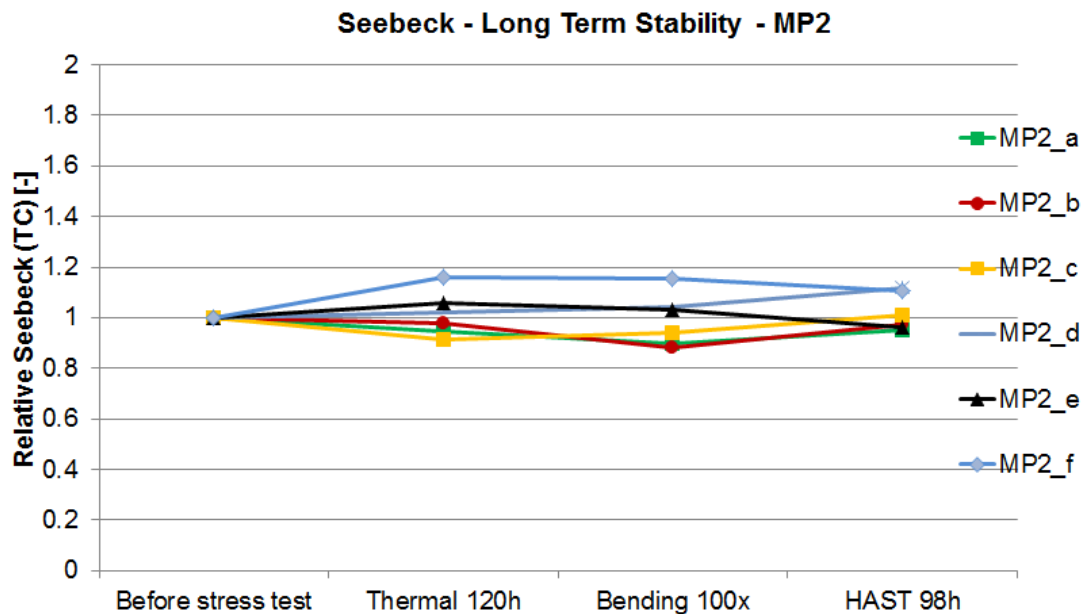


Abbildung 2: Ergebnisse Belastungstests: Resultierende relative Änderung des gemessenen Seebeck-Koeffizienten mit unterschiedlichen Konfigurationen für das Verpackungsmaterial MP2.

Somit konnte das Teilprojekt Packaging planmässig in Q4 2012 abgeschlossen werden.

2.3 Design und Herstellung des Wärmetauscherprototypen

2.3.1 Design und Simulation des Wärmetauscherprototypen

Design

Das Design des Wärmetauscherprototypen wurde unter Berücksichtigung folgender Kriterien entworfen:

- Die Integration von 10cm x 10cm TEG Modulen muss möglich sein.
- Das Design muss so gewählt sein, dass der Wärmetauscherprototyp modular mit zusätzlichen TEG Modulen erweiterbar ist.
- Die mechanische Fixierung der TEG Module muss reproduzierbar und zuverlässig möglich sein.
- Die einfache Wartung sowie der einfache Austausch der TEG Module müssen gewährleistet sein.
- Die Dichtheit (intern und extern) des Gesamtsystems ist zwingend erforderlich.
- Der Wärmetauscherprototyp wird im Gegenstromprinzip betrieben.
- Die einfache Herstellung der benötigten Komponenten muss möglich sein.
- Das Gehäuse muss robust und mechanisch stabil sein.

Unter Berücksichtigung der obengenannten Spezifikationen wurde das in Abbildung 3 zu sehende Design entworfen. Durch Hinzufügen weiterer Kanalplatten und Platten mit integrierten TEGs ist das System modular erweiterbar.

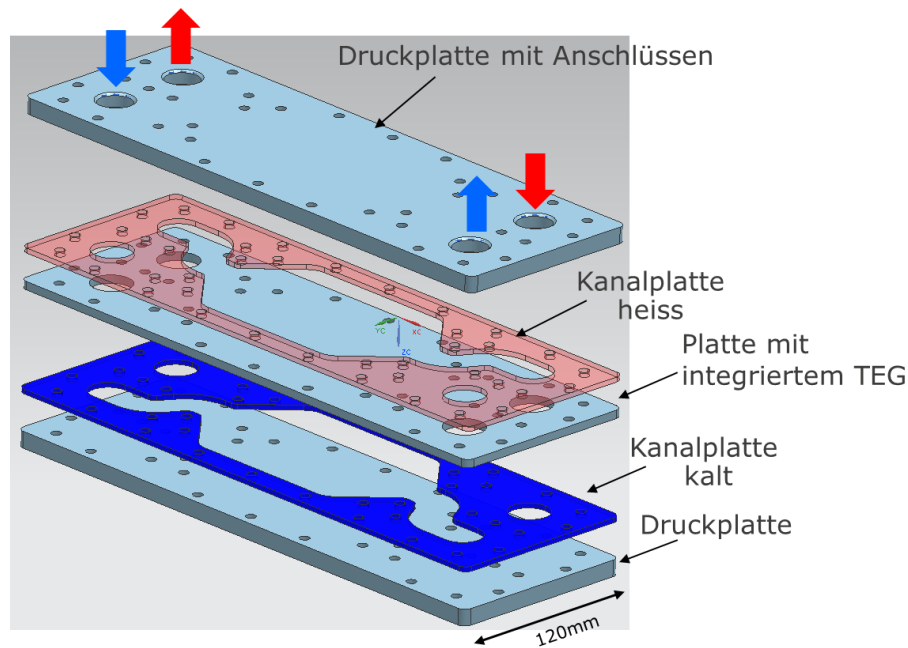


Abbildung 3: Design des Wärmetauscherprototypen. Durch Hinzufügen weiterer Kanalplatten und Platten mit integrierten TEGs ist das System modular erweiterbar.

Simulation

Die numerische Simulation des entwickelten Designs bezüglich der thermischen und fluidodynamischen Eigenschaften wurde implementiert. Dabei wurden die Erkenntnisse des Vorgängerprojektes [1] berücksichtigt und integriert. Die Bedienung erfolgt über eine graphische Benutzeroberfläche. Die Simulation beinhaltet folgende Parameter:

- Kanalgeometrien (Länge, Höhe, Breite)
- Eingangsströmungen heiss/kalt
- Eingangstemperaturen des heissen/kalten Fluids (Wasser)
- Anzahl und Eigenschaften der TEG Module (Dicke, Seebeck Koeffizient, elektrische und thermische Leitfähigkeit des Halbleitermaterials)
- Eigenschaften des Packagings (Dicke, thermische Leitfähigkeit)

Die Simulation liefert die geforderten Zielgrößen:

- Die zu erwartenden Wärmeströme sowie die Austrittstemperaturen der kalten und warmen Seite
- Ausgangsspannungen/Leistung der integrierten TEG Module
- Erzielte Effizienz

2.3.2 Prozessentwicklung zur Herstellung der Wärmetauscher Komponenten

Zur Herstellung der Wärmetauscher Komponenten sind konventionelle mechanische Zerspanungsverfahren geeignet (Bohren und Fräsen). Zur flexiblen und schnellen Prototypenfertigung wird eine neu installierte CNC Tischfräsanlage verwendet. Für die kostengünstige Fertigung der Komponenten in hohen Stückzahlen wird Spritzguss in Betracht gezogen.

2.3.3 Herstellung und Charakterisierung

Der zur Charakterisierung verwendete Testaufbau besteht aus je einem geschlossenen Heiss- und Kaltwasserkreislauf. Beide Kreisläufe werden mit Hilfe von Sensoren überwacht (Temperatur- und Drucksensoren am Ein- und Ausgang sowie einem Flusssensor), die mittels Software kontinuierlich ausgelesen werden. Die Flussraten werden über Drosselventile eingestellt. Abbildung 4 zeigt einem zusammengebauten Wärmetauscherprototyp inklusive Temperatur- und Drucksensoren.

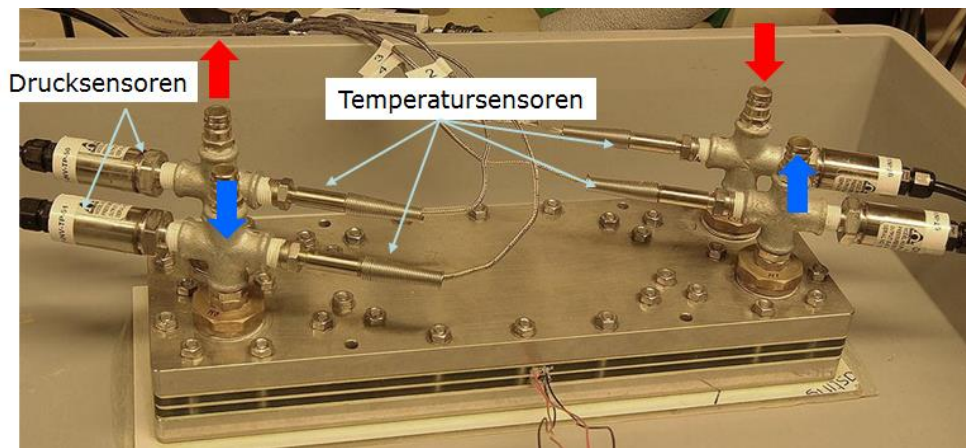


Abbildung 4: Zusammengebauter Wärmetauscherprototyp inklusive Temperatur- und Drucksensoren.

Ausgangslage/erste Messung:

Abbildung 5 zeigt die vollständige Darstellung der erhaltenen Messwerte des ersten einlagigen Prototypen bei einer Eingangstemperatur der heißen Seite $T_{in_hot} = 65^\circ\text{C}$ und kalter Eingangstemperatur $T_{in_cold} = 15^\circ\text{C}$. Die gemessene Ausgangsspannung des TEGs ist über den angelegten Fluss der kalten Seite aufgetragen. Dabei entspricht jedes Symbol einem eingestellten Fluss der heißen Seite. Eine maximale Spannung von 1.68 Volt konnte bei maximalen Flüssen (cold 4.9l/min, hot 4.4l/min) erreicht werden. Bei einem Innenwiderstand des Generators von 30 Ohm entspricht dies einer generierten Leistung von lediglich 24 Milliwatt.

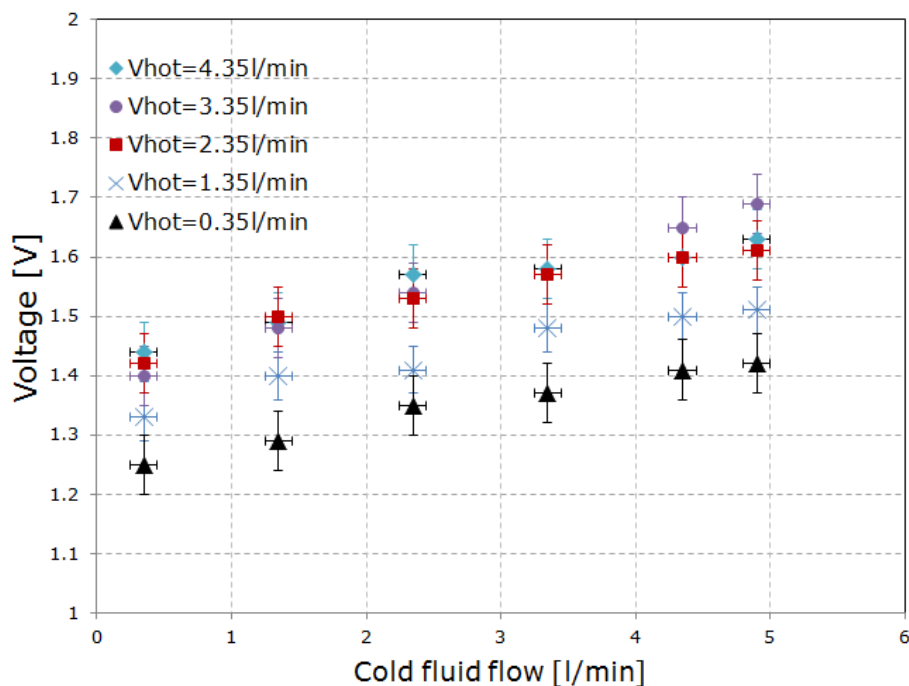


Abbildung 5: Messkurve des einlagigen Wärmetauscherprototypen (TEG Ausgangsspannung vs. Flussrate) bei $T_{in_hot} = 65^\circ\text{C}$ und $T_{in_cold} = 15^\circ\text{C}$. Die generierte Leistung bei 30 Ohm Innenwiderstand ist 24 Milliwatt.

2.3.4 Optimierung

Um eine Steigerung der generierten Leistung zu erreichen sind Massnahmen in folgenden Bereichen möglich:

- Skalierung (mehrere Lagen/integrierte TEGs)
- Optimierung der thermische Integration
- Optimierung des TEG Designs
- Erhöhung der Temperaturdifferenz

- Optimierung der Materialeigenschaften (nicht Bestandteil der im folgenden beschriebenen Optimierungsmassnahmen)

Skalierung

Die Integration mehrerer TEGs ist eine Möglichkeit die Ausgangsleistung zu erhöhen. Um das Modulare Konzept des PowerHEX Designs zu bestätigen wurde in Q2 2013 ein Prototyp mit zehn Lagen aufgebaut. Um diesen zehnlagigen Prototypen betreiben zu können wurde die Peripherie des Aufbaus entsprechend nachgerüstet (Steigerung der Durchflusskapazität, verbesserte Ansteuerung der Pumpen sowie Austausch der Fluss-Sensoren).

Mit dem in Abbildung 6 gezeigten zehnlagigen Prototypen wurden erfolgreich Messungen durchgeführt. Dabei war die interne/externe Dichtheit des Systems zu jedem Zeitpunkt garantiert und somit wurde das modulare Konzept des PowerHEX eindrucksvoll demonstriert. Die generierte Leistung skalierte linear mit der Anzahl integrierter TEGs (max. 220 mW generierte Leistung). Da die Funktionalität des modularen Konzeptes bestätigt werden konnte, wurden die anschliessenden Optimierungen anhand des einlagigen PowerHEX Prototypen vorangetrieben.

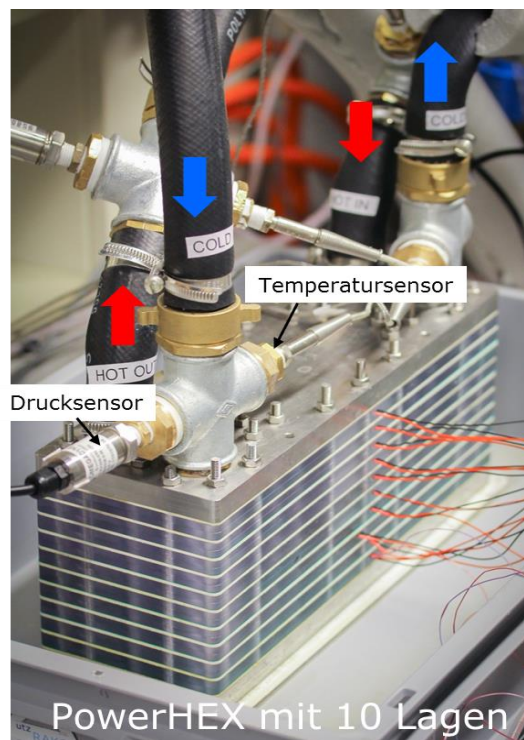


Abbildung 6: Zusammengebauter 10 lagiger Wärmetauscherprototyp inklusive Temperatur- und Drucksensoren.

Thermische Integration

Einer der wesentlichen Schlüssel zur Optimierung der genierten Leistung des TEGs ist dessen thermische Integration in den Wärmetauscherprototypen. Abbildung 7 zeigt ein vereinfachtes thermisches Ersatzschaltbild des integrierten TEGs. Um die Temperaturdifferenz über den TEG zu erhöhen, müssen:

1. thermische Kurzschlüsse eliminiert werden (K_{Folie} , resultierend aus den Bereichen des TEGs in denen kein halbleitendes Material vorhanden ist, Abbildung 1),
2. Verluste bei den konvektiven Übergängen minimiert werden ($K_{\text{Konv heiss}}$ und $K_{\text{Konv kalt}}$ reduziert).

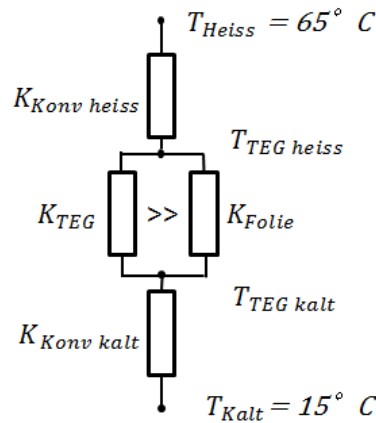


Abbildung 7 : Vereinfachtes thermisches Ersatzschaltbild eines integrierten TEGs.

Um Verluste durch den thermischen Kurzschluss zu minimieren, wurden „*funneling*“ Strukturen integriert. Mit dieser Strukturierung wird der Kontakt zwischen dem TEG und der Platte auf die aktive TEG Fläche beschränkt. Der Wärmestrom durch die passive TEG-Matrix ist somit eliminiert. Dies bewirkt eine Erhöhung des Temperaturabfalls über den TEG und somit eine Leistungssteigerung.

Um den konvektiven Widerstand zu minimieren (Wärmeübergangskoeffizienten α erhöhen), wurden zwei Ansätze realisiert. Zum einen wurde eine Chevron-Struktur verwendet („Fischgrätenmuster“, Standard in industriellen Plattenwärmetauschern), und zum anderen eine *Manifold*-Kanalstruktur [2]. Dieser Manifold Ansatz erreicht durch die Umlenkung der Strömung senkrecht zur Wand eine hohe Kühlleistung bei geringem Druckabfall und stammt aus der Anwendung in der Kühlung von Mikrochips.

Optimierung des TEG Designs

Eine weitere Optimierung erfolgte auch bezüglich des TEG Designs. Mit einer neuen Variante wurde die aktive Fläche des Generators um den Faktor 2.7 vergrößert (Abbildung 8), bei einem Innenwiderstand von 84 Ohm.

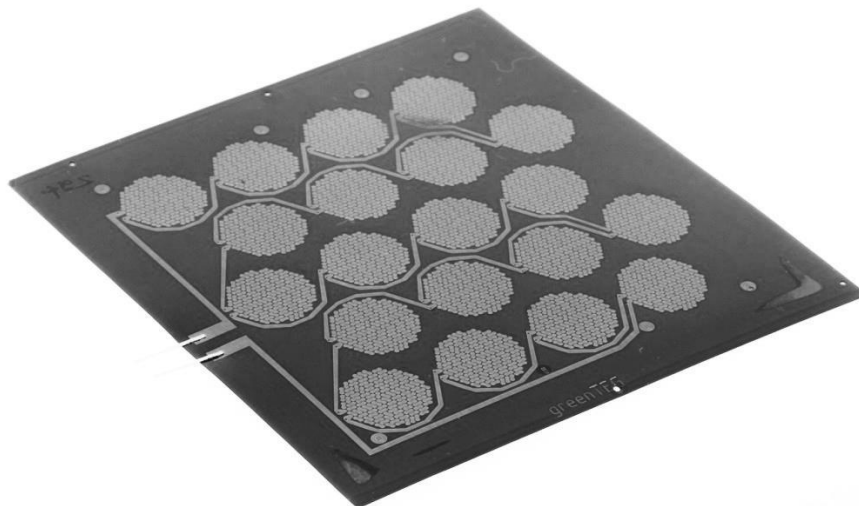


Abbildung 8: Optimiertes TEG Design (10cm x 10cm). Die aktive Fläche wurde um den Faktor 2.7 vergrößert.

Erhöhung der Temperaturdifferenz

Eine weitere Möglichkeit zur Steigerung der generierten Leistung ist die Erhöhung der angelegten Temperaturdifferenz. Im Vergleich zur ersten Messung (Abbildung 5, $T_{\text{cold}} = 15^{\circ}\text{C}$ und $T_{\text{hot}} = 65^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 50^{\circ}\text{C}$) wurde die Temperatur der heißen Seite auf $T_{\text{hot}} = 85^{\circ}\text{C}$ erhöht und die Temperatur der kalten Seite auf $T_{\text{cold}} = 10^{\circ}\text{C}$ reduziert und somit die angelegte Temperaturdifferenz auf $\Delta T = 75^{\circ}\text{C}$ erhöht (Dieser Zustand ist auf Grund der geringen Kühlleistung des verfügbaren Umlaufkühlers nicht dauerhaft aufrecht zu erhalten).

Ergebnisse

In Abbildung 9 ist der Effekt der angewandten Optimierungsmassnahmen auf die generierte Leistung des TEGs dargestellt. Der erste Optimierungsschritt (OPT1) ist die Skalierung von einem integrierten TEG auf 10 integrierte TEGs (10 Lagen). Die verbleibenden Optimierungsschritte wurden an einlagigen Prototypen durchgeführt, d.h. die Leistungsangaben zu OPT2-OPT5 resultieren aus einem integrierten TEG. Die durchgeführten Optimierungsschritte sind nachfolgend in chronologische Reihenfolge erläutert.

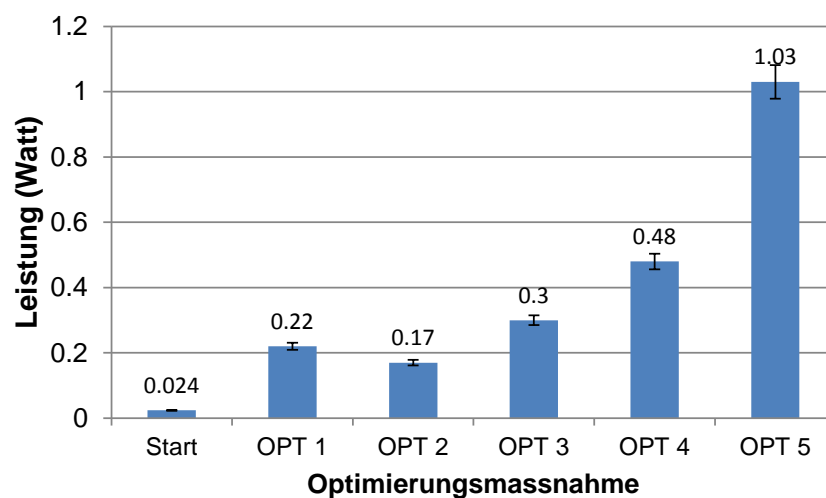


Abbildung 9: Übersicht des Effekts der Optimierungsmassnahmen auf die generierte Leistung des TEGs, dargestellt in chronologischer Reihenfolge.

- **Start:** Stellt die Ausgangslage dar (Abbildung 5: Messkurve des einlagigen Wärmetauscherprototypen (TEG Ausgangsspannung vs. Flussrate) bei $T_{\text{in_hot}} = 65^{\circ}\text{C}$ und $T_{\text{in_cold}} = 15^{\circ}\text{C}$. Die generierte Leistung bei 30 Ohm Innenwiderstand ist 24 Milliwatt. Abbildung 5).
- **OPT1:** Skalierung: Mit dem zehnlagigen Prototypen (Abbildung 6) konnte die Leistung nahezu verzehnfacht werden.
- **OPT2:** Eliminierung des thermischen Kurzschlusses durch Integration der „funneling“ Strukturen.
- **OPT3:** Reduzierung des konvektiven Wärmewiderstands durch Oberflächenstrukturierung („Chevron“ Struktur) der Kontaktfläche zum Fluid.
- **OPT4:** Integration des neuen TEG Designs (Abbildung 8) und des Anwendung des Manifold Ansatzes.
- **OPT5:** Erhöhung der angelegten Temperaturdifferenz ΔT von 50°C auf 75°C .

Nach der Durchführung der beschriebenen Optimierungsschritte wurde die generierte Leistung um mehr als das 40-fache gesteigert (24 mW / 1.03 W).

3 Nationale Zusammenarbeit

- Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut für Produkt- und Produktionsengineering IPPE, FHNW Windisch. Zusammenarbeit bei der Strukturierung der Polymermatrizen.
- Prof. Hierold, Micro- and Nanosystems, Department Maschinenbau und Verfahrenstechnik, ETH Zürich. Zusammenarbeit und Austausch im Themenbereich „Manifold“.

4 Bewertung und Ausblick

4.1 Bewertung

Die Prototypenlinie zur Herstellung der für das Projekt benötigten TEGs wurde erfolgreich geplant, installiert und in Betrieb genommen. Das erste TEG Modul wurde wie geplant im ersten Quartal 2012 gefertigt und der Bedarf an TEGs konnte während der gesamten Projektdauer gedeckt werden.

Des Weiteren wurden mögliche Materialien zur Verpackung der TEGs sowie geeignete Tests zur Charakterisierung des Packagings evaluiert. Nach Auswertung der Testergebnisse wurde das Verpackungsmaterial ausgewählt, der Prozess zur Verpackung der TEGs entwickelt und erfolgreich in greenTEGs Fertigung der TEG Module integriert.

Das Design des Wärmetauscherprototypen wurde entsprechend vorgegebener Kriterien entworfen, so dass ein modulares System entstand in welchem die Anzahl der integrierten TEGs variabel ist und das einfach herzustellen ist. Dabei wurde das numerische Simulationstool des Vorgängerprojekts weiterentwickelt und zur Auslegung und Optimierung des Wärmetauscherprototypen eingesetzt. Mit dem bestehenden PowerHEX System konnte dessen Konzept verifiziert sowie die Skalierbarkeit an einem zehnlagigen Aufbau demonstriert werden. Aus wirtschaftlichen Gründen wurden Optimierungen an einlagigen Wärmetauscherprototypen durchgeführt. Dabei konnte eine signifikante Steigerung der generierten Leistung von 24 Milliwatt auf 1.03 Watt erreicht werden. Das Hauptziel (200 Watt generierte Leistung) wurde nicht erreicht, da die Integration von 200 TEGs zwar technisch machbar ist, jedoch den finanziellen Rahmen des Projektes gesprengt hätte. Die detaillierte Kostenanalyse des TEG-Produktionsprozesses ergab, dass eine ökonomische Grundlage des PowerHEX Systems mit der für Ende 2015 geplanten Skalierung von greenTEGs Produktion gegeben ist.

4.2 Ausblick

Um das Ziel, 200 Watt generierte Leistung, zu erreichen ist aus wirtschaftlicher Sicht die Optimierung des einlagigen Systems einer Skalierung vorzuziehen. Weitere Optimierungen sind in den Bereichen der thermischen Integration, des TEG Designs sowie der Materialoptimierung realisierbar. Mittels durchgeführter Simulationen konnte gezeigt werden, dass durch entsprechende Massnahmen eine generierte Leistung von 4.7 Watt pro Lage erreichbar ist. Damit ist das ursprüngliche Ziel in Reichweite und Gegenstand zukünftiger Entwicklungstätigkeiten. Durch die Weiterentwicklung eines einlagigen Systems können wichtige Projektergebnisse bei überschaubarem finanziellem Aufwand erzielt werden. Daher empfiehlt greenTEG das PowerHEX Projekt auf einem einlagigen System weiter zu optimieren bis die Skalierung des entwickelten Systems Ende 2015 finanzierbar ist, sowie die kommerzielle Umsetzung des PowerHEX ermöglicht.

5 Referenzen

- [1] A. Bitschi "Realisierung eines thermoelektrischen Generators für die Stromerzeugung aus Niedertemperaturenergie" BFE- Jahresbericht 23. November 2010.
- [2] N. Wojtas, E. Schwyter, W. Glatz, S. Kuhne, W. Escher, and C. Hierold, "Power enhancement of micro thermoelectric generators by microfluidic heat transfer packaging," *Sensors and Actuators A*, vol. 188, pp. 389-395, 2012.