



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Jahresbericht 16. November 2012

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	Einfahren der Prototypenlinie.....	5
2.1.2	Produktion von Prototypen.....	6
2.2	Packaging.....	6
2.2.1	Testaufbauten Packaging	6
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, Charakterisierung und Optimierung	10
3	Nationale Zusammenarbeit.....	11
4	Bewertung 2012 und Ausblick 2013	11
4.1	TEG Produktion	11
4.2	TEG Packaging	12
4.3	Design und Herstellung des Wärmetauscherprototypen	12
5	Referenzen.....	12

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 Jahr 2012 wurde die Prototypenlinie zur Herstellung der TEG Module erfolgreich eingefahren, so dass die zur Herstellung des Wärmetauscherprototypen benötigten TEGs zur Verfügung stehen. Des Weiteren wurde ein Packaging Material evaluiert, der entsprechende Prozess zur Verpackung der TEGs entwickelt und in die 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 ist und das einfach herzustellen ist. Der Messaufbau zur Charakterisierung des Wärmetauscherprototypen wurde installiert und erste Messungen mit einem einlagigen Prototypen wurden erfolgreich durchgeführt.

Resumé

La conversion directe de chaleur en électricité est rendue possible grâce à l'utilisation de générateurs thermoélectriques (GTEs). Ce projet a pour but de démontrer l'efficacité de cette technologie à faible température ($\leq 150^{\circ}\text{C}$) grâce à la fabrication d'un prototype échangeur de chaleur permettant de générer de l'électricité. Cette étude comprend plusieurs étapes : la fabrication des GTEs, le développement d'un conditionnement adéquat ainsi que le couplage de GTEs à un échangeur de chaleur.

La nouvelle ligne de production, inaugurée début 2012, a permis l'approvisionnement en GTEs nécessaires à la fabrication des prototypes "PowerHEX". En outre, un procédé d'emballage des TEGs a été développé après évaluation de différents matériaux. Ce dernier a été intégré au processus de fabrication des générateurs. Les prototypes "PowerHEX" ont été conçus afin de pouvoir assembler de manière simple et rapide un nombre variable de générateurs thermoélectriques. Le premier prototype comprenant une couche unique de TEGs a été caractérisé avec succès sur l'appareil de mesures développé spécialement à cet effet.

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 geplanten Prototypenlinie ist es den Durchsatz, die Qualität und Reproduzierbarkeit signifikant zu erhöhen. Nach der erfolgreichen Planung und dem Aufstellen der Prototypenlinie 2011, waren die für 2012 in Angiff genommenen Meilensteine das Einfahren der Prototypenlinie, sowie die Produktion der TEG Module.

2.1.1 Einfahren der Prototypenlinie

Die Kernprozesse des industrietauglichen Herstellungsprozess der TEGs sind die Photolithographie, Galvanik und das Flachschleifen. 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.

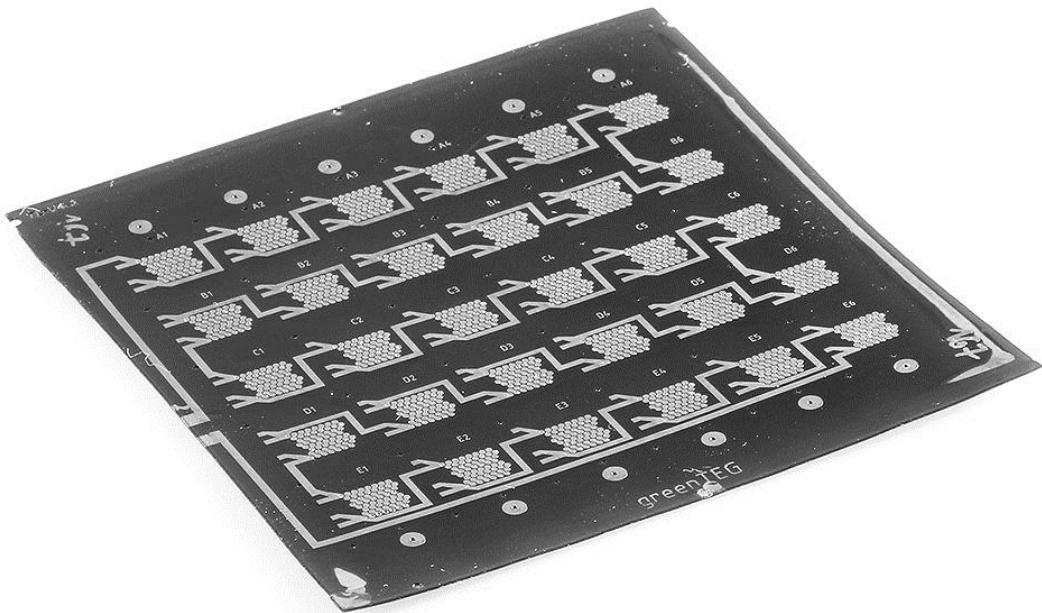


Abbildung 1: Gefertigtes TEG Modul (10cm x 10cm), bestehend aus 30 Untereinheiten die seriell miteinander verbunden sind.

2.1.2 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 Prozess frühzeitig zu erkennen und entsprechende Massnahmen einzuleiten. Die Produktion der 20 TEG Module wurde im zweiten Quartal 2012 und somit auch dieser Meilenstein fristgerecht erreicht.

Für 2013 wird der Fokus in der Produktion der TEG Module auf die kontinuierliche Verbesserung der Ausbeute (Yield), der Reproduzierbarkeit sowie auf die Steigerung des Durchsatzes gerichtet.

2.2 Packaging

Für 2012 standen die Fertigstellung und Inbetriebnahme der Testaufbauten im Fokus die zur Charakterisierung des Packagings installiert wurden. Die evaluierten Verpackungsmaterialien wurden mit den Testaufbauten auf ihre Tauglichkeit geprüft. Anhand der Testergebnisse, wurde das Material für das Packaging ausgewählt sowie der Prozess für dessen Verarbeitung entwickelt und in die Prototypenlinie implementiert. Abschliessend wurden verpackte TEGs den Belastungstests unterzogen und der Einfluss auf deren Leistungsmerkmale analysiert.

2.2.1 Testaufbauten Packaging

Folgende Methoden die zur Charakterisierung des Packagings dienen wurden evaluiert und die entsprechenden Testaufbauten 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 (El. Break Down test)

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der Testmethoden Referenzen auf die angewandten Standards, Details zu den durchgeführten Tests und die Analysemethode zur Auswertung der Tests.

Tabelle 1: Übersicht der 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, a rel. humidity of 85% and potential applied to the sample

2.2.2 Materialtests Packaging

Die in

Tabelle 2 dargestellten Materialien (MP1-MP4) wurden mittels den in Tabelle 1 aufgeführten Methoden auf ihre Robustheit getestet.

Tabelle 2: Übersicht der zur Auswahl stehenden Materialien für das 0-Level Packaging.

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 3) und wurde folglich als Verpackungsmaterial ausgewählt.

Tabelle 3: Ergebnisse der Tests zur Charakterisierung des 0-Level Packagings bestehend aus MP2.

Test	Ergebnis
El. Durschlag vor den Tests	Kein Durschlag
Adhäsion	81 %
Abrieb	Sehr schwacher Abrieb
Biegetest	Kein Durschlag, kein sichtbarer Defekt
Thermische Zyklen	Kein Durschlag, kein sichtbarer Defekt
HAST	Kein Durschlag, kein sichtbarer Defekt

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

- Skalierbar auf grosse Flächen
- Standardprozess in der Leiterplattenindustrie
- Keine Vakuumtechnologie benötigt
- Potential zur weiteren Steigerung der Adhäsion vorhanden

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 Protoopenlinie transferiert.

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.

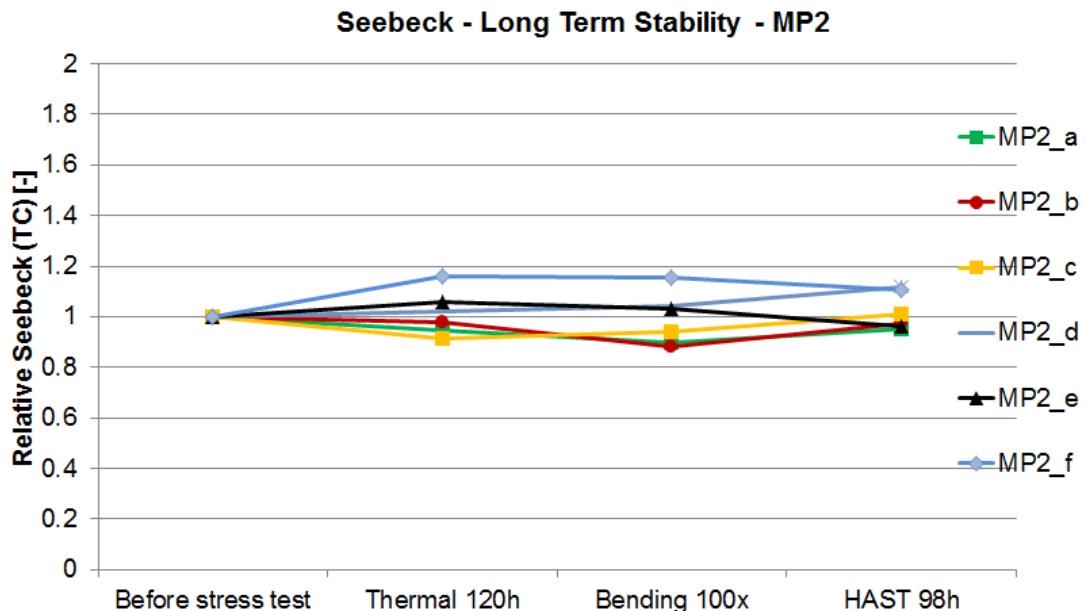


Abbildung 2: Ergebnisse Belastungstests: Resultierende relative Änderung des gemessenen Seebeck-Koeffizienten mit unterschiedlichen Konfigurationen für das Verpackungsmaterial MP2.

2.3 Design und Herstellung des Wärmetauscherprototypen

Der Schwerpunkt in der Herstellung des Wärmetauscherprototypen lag 2012 in der Festlegung eines Designs, der Simulation des ausgewählten Designs hinsichtlich der erzielbaren Effizienz sowie der Prozessentwicklung zur Herstellung der Wärmetauscherkomponenten. Zusätzlich wurde der benötigte Teststand zur Charakterisierung des Wärmetauscherprototypen geplant und aufgebaut.

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 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.

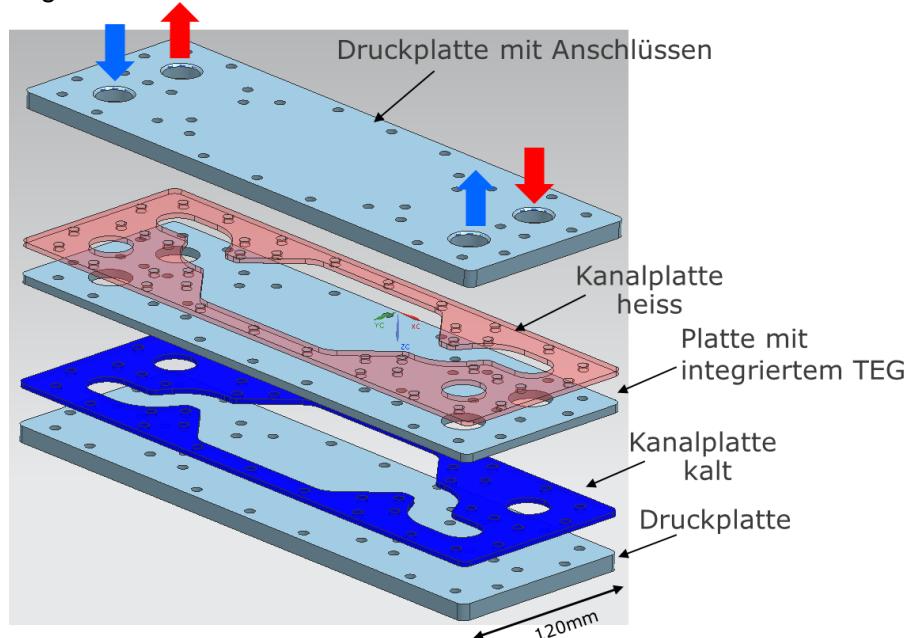


Abbildung 3: Design des Wärmetauscherprototypen.

Simulation

Die numerische Simulation des entwickelten Designs bezüglich der thermischen und fluiddynamischen 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)
- Eingangsströmungen heiss/kalt
- Eingangstemperaturen des heissen/kalten Fluids (Wasser)
- Eigenschaften der TEG Module (Dicke, Seebeck Koeffizient, elektrische und thermische Leitfähigkeit des Halbleitermaterials)
- Eigenschaften des Packaging (Dicke, thermische Leitfähigkeit)
- Anzahl und Eigenschaften der integrierten TEG Module

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, Charakterisierung und Optimierung

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.

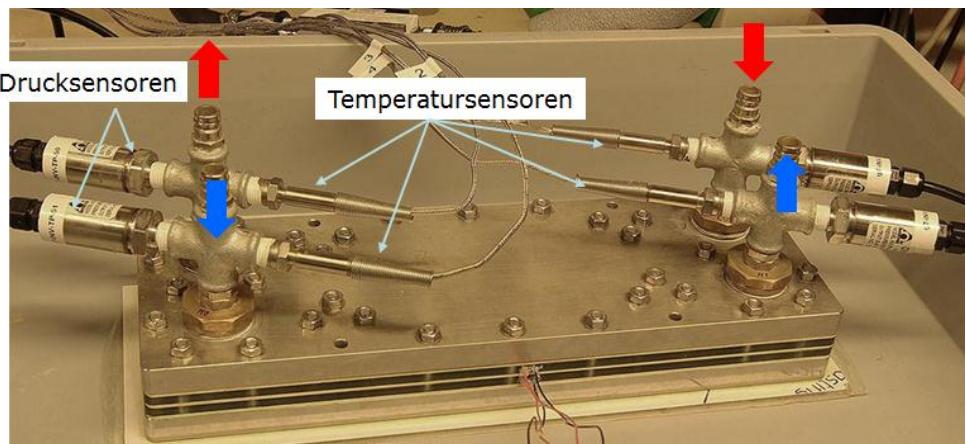


Abbildung 4: Zusammengebauter Wärmetauscherprototyp inklusive Temperatur- und Drucksensoren.

Ein einlagiger Wärmetauscherprototyp (ein integriertes TEG Modul) wurde erfolgreich hergestellt und charakterisiert. Abbildung 5 zeigt die Auswertung der erhaltenen Messwerte (TEG Aussgangsspannung vs. Flussrate) bei Eingangstemperatur der heissen Seite $T_{in_hot} = 65^\circ\text{C}$ und kalter Eingangstemperatur $T_{in_cold} = 15^\circ\text{C}$. Höhere Temperaturdifferenzen sind mit vorhandenem Setup aufgrund der beschränkten Kühlleistung des kalten Kreislaufes nicht realisierbar.

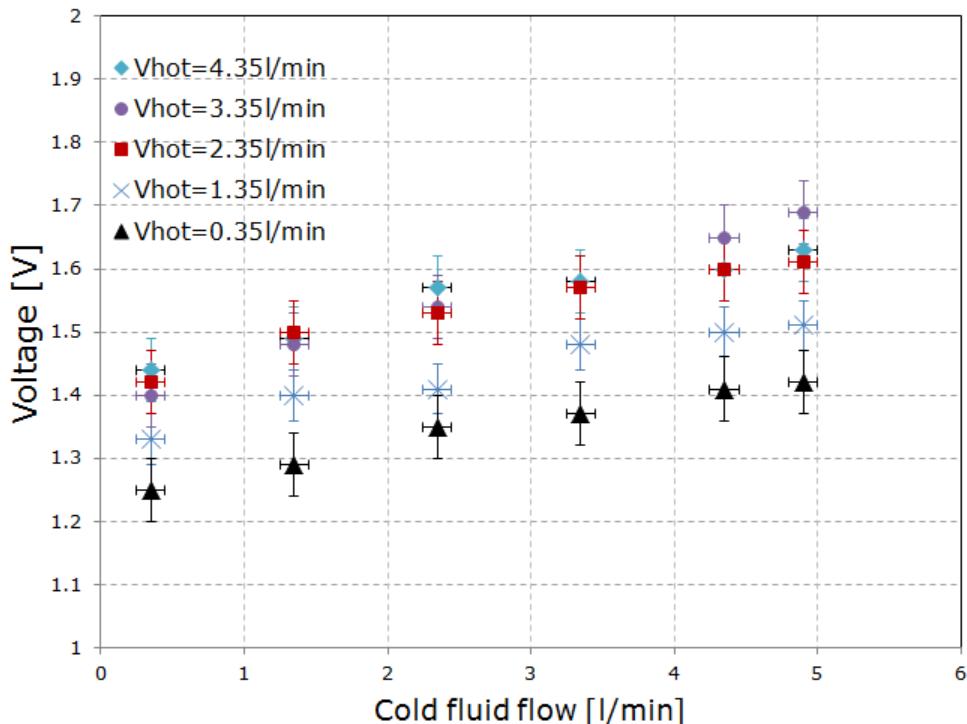


Abbildung 5: Messkurve des einlagigen Wärmetauscherprototypen (TEG Ausgangsspannung vs. Flussrate) bei $T_{in_hot} = 65^\circ\text{C}$ und $T_{in_cold} = 15^\circ\text{C}$.

Für Ende Jahr ist die Herstellung eines dreilagigen Prototypen geplant sowie diverse Änderungen und Verbesserungen im Testaufbau (höhere Pumpenleistung für mehrlagige Wärmetauscherprototypen, präzise Steuerung der Flussraten via Software, höhere Kühlleistung). Weitere Optimierungen des Wärmetauscherprototypen (Verbesserung der thermischen Ankopplung) sowie die Herstellung eines 10-lagigen Prototypen sind für 2013 vorgesehen.

3 Nationale Zusammenarbeit

- Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut für Produkt- und Produktionsengineering IPPE, FHNW Windisch.
- Prof. Hierold, Micro- and Nanosystems, Department Maschinenbau und Verfahrenstechnik, ETH Zürich.

4 Bewertung 2012 und Ausblick 2013

4.1 TEG Produktion

Die Prototypenlinie wurde erfolgreich installiert und in Betrieb genommen, so dass das erste TEG Modul wie geplant im ersten Quartal 2012 gefertigt werden konnte. Zur Produktionsablaufsteuerung wurde ein Kanban System eingeführt und zur verbesserten Prozessüberwachung eine Prozessdatenbank implementiert. Dadurch konnte der Meilenstein „Fertigung von 20 TEG Modulen“, planmäßig im zweiten Quartal 2012 abgeschlossen werden.

Für 2013 wird der Fokus auf die kontinuierliche Verbesserung der Ausbeute (Yield), der Reproduzierbarkeit sowie auf die Steigerung des Durchsatzes gerichtet.

4.2 TEG Packaging

Die Testaufbauten zur Beurteilung der Qualität eines potentiellen Packaging Materials wurden im ersten Quartal 2012 fristgerecht installiert und zur Evaluation der Materialien für das 0-Level Packaging verwendet. Anhand der Testergebnisse wurde das Material für das 0-Level Packaging ausgewählt, der entsprechende Prozess wurde entwickelt und bereits im dritten Quartal 2012 erfolgreich in die TEG Produktion integriert und das Arbeitspaket „TEG Packaging“ abgeschlossen.

4.3 Design und Herstellung des Wärmetauscherprototypen

In der ersten Hälfte 2012 wurde das Design des Wärmetauscherprototypen unter Berücksichtigung der vorgegebenen Kriterien entworfen. Das Simulationstool zur Bestimmung und Auslegung der thermischen, fluidodynamischen Eigenschaften des Designs sowie zur Berechnung der Performance Parameter wurde entwickelt. Der erste Meilenstein „Design, Simulation und Planung“ wurde somit termingerecht im zweiten Quartal 2012 abgeschlossen. Die Fertigungsprozesse zur Herstellung der Wärmetauscher Komponenten wurden definiert und ein erster Wärmetauscherprototyp hergestellt. Der Messaufbau zur Charakterisierung des Wärmetauscherprototypen wurde geplant und umgesetzt, so dass bereits vorzeitig erste Messresultate eines einlagigen Prototypen generiert werden konnten.

Weitere Optimierungen des Wärmetauscherprototypen (Verbesserung der thermischen Ankopplung mittels Oberflächenstrukturierung [2,3]), die Herstellung eines 10-lagigen Wärmetauscherprototypen und die Weiterentwicklung des Messaufbaus sind für 2013 vorgesehen.

5 Referenzen

- [1] A. Bitschi "Realisierung eines thermoelektrischen Generators für die Stromerzeugung aus Niedertemperaturenergie" BFE- Jahresbericht 23. November 2010.
- [2] K.M. Stone "Review of Literature on Heat Transfer Enhancement in Compact Heat Exchangers", ACRC TR-105, August 1996.
- [3] S. Kakac et al. "Heat Transfer Enhancement of Heat Exchangers", Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1999.