



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Jahresbericht 15. November 2011

Prototyping of a thermoelectric power generator (Power-HEX)

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm
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: Dr. Michael Moser
BFE-Programmleiter: Roland Brüniger
BFE-Vertragsnummer: SI/500639-01

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

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung / Projektziele	5
2	Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse	5
2.1	TEG-Produktion	5
2.1.1	Planung der Prototypenlinie	5
2.1.2	Aufstellen der Prototypenlinie.....	6
2.2	Packaging	6
2.2.1	Packaging Design	6
2.2.2	Testaufbauten Packaging.....	7
2.3	Design und Herstellung des Wärmetauscherprototypen.....	7
2.3.1	Design, Simulation und Planung des Wärmetauscherprototypen	7
3	Nationale Zusammenarbeit	9
4	Bewertung 2011 und Ausblick 2012	9
4.1	TEG-Produktion	9
4.2	TEG-Packaging.....	9
4.3	Design und Herstellung des Wärmetauscherprototypen.....	9
5	Referenzen	9

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 sowie deren Integration in einen Wärmetauscher. Zur Herstellung der TEGs wurde die dazu benötigte Produktionslinie erfolgreich geplant und aufgebaut. Mögliche Materialien zur Verpackung der TEGs sowie geeignete Tests zur Charakterisierung der Verpackung wurden evaluiert und erste Vorversuche begonnen. Das Konzept zur Integration der TEGs in einen stromerzeugenden Wärmetauscher-Prototypen wurde ausgearbeitet. Der Fokus lag dabei auf einem modularen System, in dem die Anzahl der integrierten TEGs variabel ist und das einfach herzustellen ist. Darauf basierend wurde die Strategie zum weiteren Vorgehen festgelegt.

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. Potential materials for the packaging of the TEGs and the suited tests for the characterization of the packaging have been evaluated and first packaging experiments were started. 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. Based on this the strategy for the further proceeding was defined.

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. Dans le cadre de la fabrication des GTEs, une ligne de production a été mise en place avec succès. Par ailleurs, plusieurs matériaux utilisables pour le conditionnement des GTEs ainsi que des techniques de caractérisation adéquates pour leur évaluation ont été sélectionnés. Des tests ont déjà été réalisés sur une première série de conditionnements et le concept de l'intégration d'un GTE à un échangeur de chaleur a été confirmé. Pour finir l'objectif ultérieur de cette étude est la préparation d'un module permettant l'intégration simple d'un nombre variable de GTEs à un échangeur de chaleur. Suivant cette idée, de nouvelles étapes d'optimisation ont été définies.

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 Projekts 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

Um das Projektziel eines stromerzeugenden Wärmetauschers zu realisieren, müssen erst die Grundlagen geschaffen werden, eine solche Fertigungskapazität in der geplanten Frist zu erreichen. Bis zu diesem Zeitpunkt wurden die TEGs im Forschungslabor gefertigt, was in einer geringen Produktionskapazität und Reproduzierbarkeit resultierte.

Das Ziel der geplanten Prototypenlinie ist es, den Durchsatz, die Qualität und Reproduzierbarkeit signifikant zu erhöhen.

2.1.1 Planung der Prototypenlinie

Mit der Prototypenlinie wird das Ziel verfolgt, TEGs in genügender Anzahl mit gleichbleibender Qualität zu fertigen. In der untenstehenden Tabelle 1 sind Punkte aufgezählt, welche den Durchsatz und die Reproduzierbarkeit der Fertigungslinie positiv beeinflussen.

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

Tabelle 1: Wichtigste Kriterien der Produktionslinie.

Diese Kriterien sind massgebend für die erfolgreiche Umsetzung einer Produktionslinie. Folglich wurden alle bisher bestehenden und alternativen TEG-Fertigungsprozessschritte auf ihre Kompatibilität geprüft und mit Hilfe einer ausführlichen FMEA auf ihre Industrietauglichkeit bewertet. Daraus wurde ein neuer, industrietauglicher Herstellungsprozess für die TEGs abgeleitet, dessen Kernprozesse die Photolithographie, Galvanik und das Flachsleifen darstellen. Die Kernprozesse wurden entsprechend Abbildung 1 in drei Prozessgruppen eingeteilt, wobei möglichst jede Prozessgruppe in einem eigens dafür vorgesehenen Labor untergebracht ist.



Abbildung 1: Einteilung der Kernprozesse in die entsprechenden Prozessgruppen.

Die Umsetzung des Herstellungsprozesses in die Praxis wurde detailliert geplant. Neben den erwähnten Kriterien wurden auch die Investitionskosten und benötigten Prozessentwicklungszeiten mit bewertet.

Alle Bestellungen für die Anlagen wurden nach eingehender Prüfung und Verhandlung der Offerten ausgelöst. Mit der Vergabe der Bestellaufträge kann dieser Meilenstein als erfolgreich abgeschlossen betrachtet werden.

2.1.2 Aufstellen der Prototypenlinie

Der neue Herstellungsprozess der TEGs stellt diverse Bedingungen an die Räumlichkeiten für die Fertigung (Platzbedarf, verfügbare Medien, Chemielüftung). Diese Voraussetzungen sind im Technopark Zürich am besten erfüllt und es konnten erfolgreich drei Labore für die Prototypenlinie zur Miete erstanden werden. Die Labore konnten somit entsprechend der Prozessgruppen eingerichtet werden (Abbildung 1). Zwischenzeitlich sind erste Anlagen und Geräte eingetroffen und wurden installiert (Flachsleifen und Photolithographie). Somit konnten erste Schulungen und Maschineneinführungen durchgeführt und mit dem Einfahren dieser Prozessschritte bereits begonnen werden.

2.2 Packaging

Für die Integration der hergestellten TEGs in einen Wärmetauscher muss der TEG so robust verpackt sein, dass er den thermischen, mechanischen und chemischen Dauerbelastungen standhalten kann. Damit jedoch nur ein Minimum an Leistung durch das Package verloren geht, sollte dieses möglichst dünn und thermisch gut leitend sein. Die Realisierung beider Punkte benötigt ein separates Teilprojekt, um das Package in Bezug auf Material, Design und Dicke zu entwickeln und zu optimieren.

2.2.1 Packaging Design

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. Abbildung 2 zeigt eine Übersicht der im Fokus liegenden Materialgruppen, deren Vor- und Nachteile sowie mögliche Prozessierungsverfahren.

Material-klasse	Polymere	Komposite	Keramiken
Eigen-schaften	+ Billig	- Teuer	
	+ Flexibel	- Spröde	
	+ CTE passend zu TEGs	- CTE passt nicht zu TEGs	
	- Temperaturbeständigkeit	+ Thermisch stabil	
Prozess-ierungs-verfahren	- Hoher thermischer Widerstand	+ Geringer thermischer Widerstand	
	• Sprühen	• PVD-Verfahren	
	• Rotationsbeschichten	• Sputter-Verfahren	
	• Tauchbeschichten	• CVD-Verfahren	
	• Brushing	• ALD-Verfahren	
	• Molding		

Abbildung 2: Übersicht der im Fokus liegenden Materialklassen für das Packaging, deren Vor- und Nachteile sowie mögliche Prozessierungsverfahren.

Erste Samples zu Vorversuchen mit einem „Dip coating“-Prozess auf Epoxy-Basis wurden an einen möglichen Partner versandt.

2.2.2 Testaufbauten Packaging

Neben dem bereits vorhandenen Versuchsaufbau für den Breakdown-Test werden folgende weitere Tests evaluiert, die zur Charakterisierung des Packaging dienen:

- Adhäsionstest: Bestimmung der Adhäsion zwischen TEG und Packaging
- Biegetest: Zyklische Biegebelastung der Testsamples
- Temperaturzyklen
- Beschleunigte Stress Tests unter erhöhter Temperatur und Luftfeuchtigkeit
- Abrasionstest: Bestimmung der Abrasion (Sandstrahler) unter definierten Bedingungen (Zeit, Auftreffwinkel, Korngröße, Abstand)

Die Aufbauten und Messgeräte, die zur Durchführung dieser Tests benötigt werden, wurden evaluiert und fehlende Komponenten in Auftrag gegeben.

2.3 Design und Herstellung des Wärmetauscherprototypen

Zur Übertragung von Wärme zwischen Medien existieren verschiedene Prinzipien. Es wird zwischen Regeneratoren (zeitlich versetzte Durchströmung), Rekuperatoren (stationär betrieben, Fluide physikalisch/mechanisch getrennt) und Apparaten mit direktem Wärmeaustausch zwischen den beteiligten Fluiden unterschieden [1]. In dieser Arbeit steht der Trennwand-Wärmetauscher im Fokus (Rekuperator), in dem die strömenden Flüssigkeiten in räumlich getrennten Bahnen/Kanälen geführt werden und die Wärme über die Trennwände übertragen wird. In diesem Projekt werden die Trennwände mit TEGs bestückt oder die TEGs selbst stellen die Trennwand dar. Die Stromführung bezeichnet den Lauf der Massenströme im Wärmetauscher, wobei zwischen folgenden Hauptstromarten unterschieden wird: Gleichstrom, Kreuzstrom und Gegenstrom. Aufgrund der Erkenntnisse des vorangegangenen BFE-Projekts [2] wird der Fokus auf die Gegenstromführung gelegt (Minimierung der Austauschfläche).

2.3.1 Design, Simulation und Planung des Wärmetauscherprototypen

Nach der Evaluation kommerziell erhältlicher Wärmetauscher und nach Rücksprache mit einem führenden Wärmetauscherhersteller wurden zwei Konzepte (invasiv, nicht invasiv) für die Integration von TEGs herausgearbeitet (Tabelle 2).

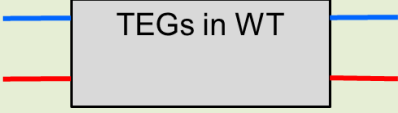
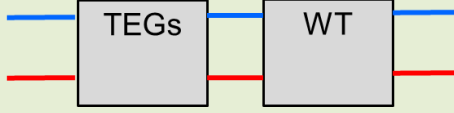
Invasiv	Nicht invasiv
	
Ein bereits bestehender Wärmetauscher wird mit TEGs nachgerüstet	Ein Wärmetauscher wird speziell für die TEG Integration entwickelt
- Schwierige Integration	+ TEG-WT kann spezifisch entwickelt werden
- Ein bereits optimierter Wärmetauscher wird durch die Integration negativ beeinflusst und evtl. Primärfunktionen gestört	+ Bereits bestehender Wärmetauscher wird nicht beeinträchtigt

Table 2: Konzepte zur Integration von TEGs in einen Wärmetauscher.

Demnach ist das nicht invasive Konzept zu bevorzugen. Ein Wärmetauscher, der für die Integration von TEGs entwickelt wird, muss folgende Spezifikationen erfüllen:

- Gegenstromprinzip
- Modulares System
- TEGs austauschbar
- Einfache Herstellung

Unter Berücksichtigung der oben genannten Spezifikationen wird die in Abbildung 3 dargestellte Strategie zur Herstellung des Wärmetauscherprototypen verfolgt. Bis zur Fertigstellung der ersten TEGs wird in einem ersten Schritt die Wärmetauscherstruktur ohne integrierte TEGs hergestellt und getestet. Die gewonnenen Erkenntnisse werden zur Optimierung der Wärmetauscherstruktur verwendet. Der erste Wärmetauscherprototyp beinhaltet 1-3 TEGs, deren Integration auf zwei Ansätzen beruht, die in diesem Stadium getestet und bewertet werden. Zuletzt erfolgt die Optimierung und Skalierung des Prototypen, basierend auf den Ergebnissen des dritten Schritts.

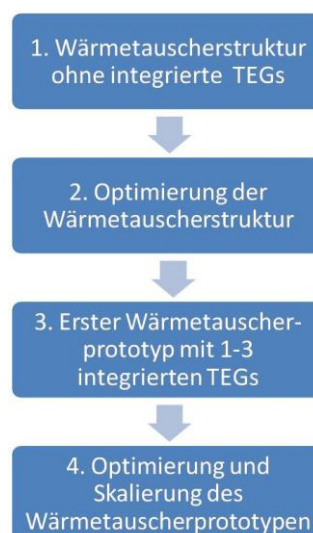


Abbildung 3: Strategie zur Herstellung des Wärmetauscherprototypen.

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 2011 und Ausblick 2012

4.1 TEG-Produktion

Die Planung der Prototypenlinie wurde erfolgreich abgeschlossen und erste Geräte wurden im neuen Standort Technopark installiert und in Betrieb genommen. Bis Jahresende wird mit der vollständigen Installation und Inbetriebnahme aller Geräte gerechnet, so dass das Aufstellen der Prototypenlinie fristgerecht abgeschlossen sein wird.

Für 2012 steht das Einfahren der Prototypenlinie im Fokus, so dass ab dem 2. Quartal 2012 mit der Produktion von Prototypen begonnen werden kann.

4.2 TEG-Packaging

Materialien und Prozesse zur industrietauglichen Verpackung der TEGs wurden evaluiert und erste Samples für Vorversuche an einen möglichen Industriepartner versandt. Zusätzlich wurden Tests zur Charakterisierung evaluiert und die dazu benötigten Aufbauten konstruiert und in Auftrag gegeben, so dass damit gerechnet wird, die Testaufbauten planmässig im 1. Quartal 2012 in Betrieb nehmen zu können.

Für 2012 stehen die Fertigstellung und Inbetriebnahme der Testaufbauten im Fokus sowie die Ergebnisse der evaluierten Verpackungsmaterialien.

4.3 Design und Herstellung des Wärmetauscherprototypen

Nach der Evaluation kommerziell erhältlicher Wärmetauscher und nach Rücksprache mit einem führenden Wärmetauscherhersteller wurde das Konzept für einen Wärmetauscherprototypen definiert.

Für 2012 steht die Simulation des ausgewählten Designs bezüglich der thermischen und fluiddynamischen Parameter im Vordergrund mit dem Ziel, die Effizienz zu bestimmen und zu optimieren. Zusätzlich stehen der Aufbau der Test- und Messumgebung des Wärmetauscher-Prototypen sowie dessen Prozessentwicklung im Fokus.

5 Referenzen

[1] W. Wagner "Wärmeaustauscher", Vogel, 2009

[2] A. Bitschi "Realisierung eines thermoelektrischen Generators für die Stromerzeugung aus Niedertemperaturenergie" BFE- Jahresbericht 23. November 2010