

Diss. ETH No. 21783

Microfluidic Thermoelectric Heat Exchangers for Low-Temperature Waste Heat Recovery

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
Nina Zuzanna Wojtas
MSc ETH Micro and Nanosystems

born October 03, 1982
citizen of Illnau-Effretikon ZH

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Christofer Hierold, examiner
Prof. Dr. Dimos Poulikakos, co-examiner

2014

Abstract

More than half of the energy created by humanity is lost as waste heat into the environment. Over 75 % of this dissipated energy is classified as low grade waste heat and its temperature lies below 100 °C. By recovering part of this waste energy, the primary energy usage could be significantly reduced and thus the ecological footprint decreased. However, most technologies fail to produce electrical power at these low temperature levels. A possible solution is offered by thermoelectricity, where power can be generated starting from thermal gradients at arbitrary low temperatures.

There is a significant push to increase the output performance of thermoelectric generators (TEGs) in order to make them more competitive energy harvesters. The thermal coupling of TEGs has a major impact on the effective temperature gradient across the generator and therefore the power output achieved. This work reports on a novel approach combining efficient microfluidic thermal coupling and thin film generators in order to contribute to a significant thermoelectric output performance enhancement.

The proposed thermoelectric heat exchanger (TEHEX) for low temperature waste heat recovery consist of μ TEGs in between multi-layer micro heat transfer systems (μ HTSs) featuring very low heat transfer resistances and small pumping powers. The implementation of efficient thermal coupling allows for the application of thin film generators for a thermally matched system and thus maximal power output. Additionally, very compact systems and therefore high power densities can be achieved.

The TEHEXs are fabricated in two different size scales and characterized with respect to their net output performance. By means of a small size 8 x 8 mm device featuring high aspect ratio copper microchannels, the influence of the most relevant system parameters, i.e. the microchannel width, applied fluid flow rates and the μ TEG thickness on the system net output performance is investigated. It is shown that dimensions of the μ TEG and μ HTS can be optimized for specific temperature ranges applied, and the maximum net power can be tracked by adjusting the heat transfer resistance during operation. With the compact system, a total of 63 mW/cm² at a fluid inlet temperature difference of 60 K is measured. This corresponds to a net volumetric efficiency factor (VEF) of 37 W/m³K², which is by a factor of 4.8 higher than reported elsewhere. The fabricated 9 x 9 cm large

TEHEX demonstrates the feasibility of a scalable low-cost technology and represents a successful proof of concept for a commercial application in waste heat recovery. The system characterization yields a net power of 0.44 W for one TEHEX unit at an applied fluid thermal gradient of 50 K, corresponding to a net VEF of $5.1 \text{ W/m}^3\text{K}^2$ per active TEG area, also being the highest among reported net values.

With the characterized systems, the established 1D TEHEX model could be verified and used as a powerful tool for further system analysis and optimizations. By optimizing the geometric parameters of the system as well as the operating conditions, an output power enhancement of up to 65 % could be achieved at an applied thermal gradient of 50 K.

Zusammenfassung

Mehr als die Hälfte der von Menschen erzeugten Energie geht in Form von Abwärme verloren. Über 75 % dieser ungenutzten Energie wird als niedriggradige Abwärme klassifiziert, da ihre Temperatur unterhalb von $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt. Durch eine teilweise Rückgewinnung dieser verlorenen Energie könnte der Primärenergieverbrauch sowie der ökologische Fussabdruck signifikant reduziert werden. Im Niedertemperaturbereich versagen jedoch konventionelle Technologien der Energiegewinnung. Eine mögliche Lösung bietet die Thermoelektrizität, dank der bereits bei beliebig kleinen Temperaturgradienten Energie erzeugt werden kann.

Es besteht ein grosses Interesse die Leistung von thermoelektrischen Generatoren (TEG) zu steigern, um sie zu kompetitiveren Energiewandlern zu machen. Die thermische Ankopplung der TEG hat einen wesentlichen Einfluss auf den effektiven Temperaturgradienten über dem Generator und dementsprechend auf dessen Ausgangsleistung. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein neuartiges Konzept entwickelt, welches eine effiziente thermische Ankopplung mittels Mikrofluidik mit Dünnschichtgeneratoren verbindet. Dieser Ansatz führt zu einer erheblichen thermoelektrischen Leistungssteigerung des Systems.

Der vorgeschlagene Aufbau eines thermoelektrischen Wärmetauschers (TEHEX) für Abwärmerückgewinnung bei niedrigen Temperaturgradienten, besteht aus alternierend gestapelten μTEG und mehrschichtigen Mikrowärmeübertragungssystemen (μHTS). Die entwickelten μHTS weisen sehr tiefe Wärmeübergangswiderstände sowie eine kleine Pumpleistungen auf. Diese Implementierung der effizienten thermischen Ankopplung erlaubt die Verwendung von Dünnschichtgeneratoren für thermisch abgegliche Systeme, was zu einer Leistungsmaximierung führt. Zusätzlich können sehr kompakte Systeme mit hoher Leistungsdichte erreicht werden.

Die TEHEX werden in zwei verschiedenen Grössenordnungen hergestellt und bezüglich ihrer Nettoausgangsleistung charakterisiert. Mit dem kleinen $8 \times 8\text{ mm}$ System, welches Mikrokupferkanäle mit hohem Aspektverhältnis aufweist, werden die Einflüsse der wichtigsten Systemparameter (i.e. Breite der Mikrokanäle, applizierte Durchflussrate sowie Dicke der Generatoren) auf den Nettoleistungsertrag untersucht. Es wird gezeigt, dass die Dimensionen der μTEG und μHTS für spezifische Temperaturbereiche optimiert werden können und dass die maximale Nettoleistung während dem Betrieb mittels Anpassung der Wärmeüber-

gangswiderstände verfolgt werden kann. Mit dem kompakten System konnte eine Nettoleistung von 63 mW/cm^2 bei einem angelegten Fluidtemperaturgradienten von 60 K gemessen werden. Dies entspricht einem netto Volumeneffizienzfaktor (VEF) von $37 \text{ W/m}^3\text{K}^2$ und ist damit 4.8 Mal höher als anderweitig berichtet. Der fabrizierte $9 \times 9 \text{ cm}$ grosse TEHEX demonstriert die Realisierbarkeit einer skalierbaren und kostengünstigen Technologie und liefert den Machbarkeitsnachweis für eine kommerzielle Anwendung im Bereich der Abwärmehückgewinnung. Die Charakterisierung des Systems ergibt bei einem angelegten Temperaturgradienten von 50 K eine Nettoleistung von 0.44 W für eine TEHEX-Einheit. Dies entspricht einem netto VEF von $5.1 \text{ W/m}^3\text{K}^2$ pro aktive TEG Fläche, was ebenfalls einer der höchsten publizierten Nettowerte darstellt.

Anhand der charakterisierten Systeme konnte das aufgestellte eindimensionale Model des TEHEX validiert und als wichtiges Werkzeug für eine weiterführende Systemanalyse und Optimierung verwendet werden. Durch Optimierung der geometrischen Systemparameter und der Betriebsbedingungen konnte eine theoretische Leistungssteigerung von bis zu 65% bei einem angelegten Temperaturgradienten von 50 K aufgezeigt werden.