



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

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

**Schlussbericht** 30. April 2011

---

# **Realisierung eines thermoelektrischen Generators für die Stromerzeugung aus Niedertemperaturenergie**

---

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE

Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien & -anwendungen

CH-3003 Bern

[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Auftragnehmer:**

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ)

Institut für Elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik

FG Hochspannungstechnologie

Physikstrasse 3

CH-8092 Zürich

[www.eeh.ee.ethz.ch/de/power/hochspannungstechnik.html](http://www.eeh.ee.ethz.ch/de/power/hochspannungstechnik.html)

**Autoren:**

Andreas Bitschi, ETHZ, [abitschi@ethz.ch](mailto:abitschi@ethz.ch)

**BFE-Bereichsleiter:** Dr. Michael Moser

**BFE-Programmleiter:** Roland Brüniger

**BFE-Vertrags- und Projektnummer:** 154309/103346

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

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
Abstract	4
Resume	5
Einleitung/Projektziele	6
Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse	7
Gesamtsystem	7
Aufbau einer thermoelektrischen Generatoreinheit (Thermoelectric Generator Unit, TEGU, 1. Schritt)	8
Aufbau des thermoelektrischen Gesamtsystems (Thermoelectric Generator System, TES, 2. Schritt)	9
Optimierung der Module	10
Durchgeführte Tests und Messungen	12
Probleme und Konsequenzen	15
Bewertung und Ausblick	16
Nationale Zusammenarbeit	16
Referenzen	16

# Zusammenfassung

Die Stromerzeugung aus Wärmequellen mittels Thermoelektrizität wurde in mehreren, theoretischen Arbeiten untersucht und diskutiert (z.B. BFE-Projekt: „Das thermoelektrische Kraftwerk“). Prototypen und Demonstratoren von thermoelektrischen Energiewandlungssystemen wurden bisher hauptsächlich auf Materialebene für die Validierung von Modellen entwickelt und aufgebaut. Im vorliegenden Projekt wurde in zwei Schritten ein thermoelektrisches Energieerzeugungssystem realisiert, mit dem die Vorteile der Thermoelektrizität hervorgehoben und die grundsätzliche Realisierung der Stromerzeugung aus Niedertemperatur aufgezeigt wurde. In einem ersten Schritt wurde eine einzelne thermoelektrische „Stack“ Einheit entwickelt, mit welcher vorangegangene theoretische Arbeiten validiert werden konnten. Auf Basis weiterer Simulationen und Optimierungen wurde ein vollständiges thermoelektrisches Gesamtsystem (konvektive Wärmezufuhr und Wärmeabfuhr mit Wasser als Arbeitsmedium) aufgebaut und messtechnisch charakterisiert. Die Messungen bei verschiedenen Betriebsweisen ergaben eine maximale generierte Leistung von 215 W (90 Module), eine maximale netto generierte Leistung (generierte Leistung abzüglich Pumpenleistung) von 113 W und einen maximalen Systemwirkungsgrad von 1.68 %. Ein im Rahmen der Optimierung durchgeführtes mechanisches Bearbeitungsverfahren der Module führte nach längerem Betrieb zum Ausfall vieler Module, was weitere Tests und Messungen unmöglich machte. Für die weitere Nutzung des Generators müssten die schadhaften Module mit grossem Aufwand ausgetauscht werden.

## Abstract

The generation of electric energy from thermal energy based on thermoelectricity has been investigated and discussed in previous projects (e.g. BFE-Project: “Das thermoelektrische Kraftwerk”). So far, prototypes and demonstrators have mainly been developed in the field of material science in connection with the validation of theoretical models. In the present project a thermoelectric power generation system, which shows the advantages of thermoelectricity and the principle feasibility of power generation from low temperature heat was realized in two steps. First, a single generator stack unit was created, which permitted the validation of previous theoretical work. Based on further simulations and optimization procedures a total thermoelectric generator system was build up and characterized by measurement. The test reading at several operation modes showed a maximum generated output power of 215 W (90 modules), a maximum net generated output power (generated power less pump power) of 113 W and a maximum system efficiency of 1.68 %. Due to the mechanical processing (grinding) of the modules in connection with an optimization strategy during the generator assembling multiple modules failed after a longer operation period, making further tests and measurements impossible. For a further utilization of the generator the defective modules would have to be replaced at great expense.

## Résumé

La conversion de chaleur en électricité basée sur l'effet thermoélectrique est l'objet de plusieurs projets précédents (p.ex. le projet OFEN « la centrale thermoélectrique »). Jusqu'ici, des prototypes et des démonstrateurs de générateurs thermoélectriques ont été réalisés pour permettre la validation de modèles théoriques à l'échelle des matériaux. Ce projet est consacré à la réalisation en deux étapes d'un générateur thermoélectrique avec l'objectif d'établir les avantages du principe thermoélectrique et de démontrer la faisabilité de principe de la production d'électricité à partir de sources de chaleur à faible température. Dans un premier temps, un empilement d'éléments thermoélectrique destiné à valider les travaux théoriques a été réalisé. Un système thermoélectrique complet a ensuite été caractérisé sur la base de simulations et d'optimisations, puis réalisé (échange de chaleur avec de l'eau et par convection). Le mesures réalisées dans différents régimes ont permis d'atteindre une puissance électrique maximale de 215 W (pour 90 modules), une puissance nette maximale de 113 W (puissance maximale générée moins consommation des pompes) et un rendement total du système de 1.68%. Le traitement mécanique des modules durant la phase d'optimisation a engendré la défaillance de certains modules et rendu impossible la poursuite des mesures. L'utilisation ultérieure du générateur impliquerait un remplacement onéreux des modules défaillants.

# Einleitung/Projektziele

Die effiziente Nutzung der Energie entlang der gesamten Umwandlungskette und der Einsatz von erneuerbaren Energien sind wichtige Bestandteile eines zukünftigen, nachhaltigen Energieversorgungssystems. Bei vielen Prozessen und Umwandlungsvorgängen von Wirtschaft, Industrie, Energieerzeugung und Mobilität fallen grosse Mengen an sogenannter „Abfallwärme“ an. Diese Energie kann aufgrund ihrer niedrigen Temperatur und geringen Energiedichte meist nur schwer weiter genutzt bzw. in elektrische Energie umgewandelt werden [1]. Die Erzeugung von elektrischer Energie auf Basis der Thermo-elektrik hat in diesem Zusammenhang breites Interesse bei der akademischen Forschung und den Entwicklungsabteilungen der Industrie geweckt.

Ziel des hier beschriebenen Projektes ist die Entwicklung und der Aufbau eines thermoelektrischen Energiekonversionssystems für die Nutzung von Niedertemperaturquellen. Es soll die Vorteile der Thermoelektrizität hervorheben und auf zukünftige effizientere und billigere Materialien und Module [2] vorbereitet sein. Das System umfasst alle notwendigen Komponenten zwischen den thermischen Quellen bis zur Einspeisung ins elektrische Netz. Mit diesem Demonstrator soll die grundsätzliche Machbarkeit der thermoelektrischen Energiegewinnung gezeigt werden und durch experimentelle Untersuchungen Leistungscharakteristika und Effizienzbetrachtungen bei verschiedenen Betriebsweisen beurteilt werden.

## Teilziele:

- Entwicklung und Aufbau eines thermoelektrischen Energiekonversionssystems im Bereich von mehreren hundert Watt bis einzelnen kW.
- Validierung der entwickelten theoretischen Modelle (Projekt „Das thermoelektrische Kraftwerk“) anhand experimenteller Untersuchungen
- Messungen und Untersuchungen von verschiedenen Einsatzarten und Betriebsweisen

Es soll die technische Realisierung der Stromerzeugung aus Niedertemperaturenergie nachgewiesen werden. Die Flexibilität des TEG für verschiedene Wärmequellen soll gezeigt werden und optimierte Betriebsweisen für den Einzelbetrieb, Co-Generation und KWK-Betrieb gefunden werden. Weiter soll das System auch als Demonstrationsobjekt für etwaige Veranstaltungen genutzt werden können.

# Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Als Grundlage für dieses Projekt dienen detaillierte theoretische Arbeiten im Bereich Modellierung und Simulation, die im Rahmen einer abgeschlossenen Dissertation [3] durchgeführt wurden.

## Gesamtsystem:

Die im Vorfeld entwickelte Gesamtsystemkonfiguration für das detaillierte Design des thermoelektrischen Generators (TEG) ist in Fig. 1 (oben) dargestellt. Der „eigentliche“ TEG soll als sogenannter „Stack“ aufgebaut werden, was bedeutet, dass mehrere Lagen von thermoelektrischen Modulen zwischen Strömungskanälen eingebettet werden. Die Strömungskanäle werden abwechselnd von einem warmen bzw. einem kalten Fluid im Gegenstrom durchströmt. Die Wärmezufuhr bzw. Wärmeabfuhr erfolgt über Pumpen in geschlossenen Kreisläufen. Die Temperatur des Arbeitsmediums wird in den jeweiligen thermischen Speichern (warm und kalt) geregelt bzw. können die Speicher mit thermischen Quellen oder Senken verbunden werden. Die erzeugte elektrische Energie wird mit Leistungselektronik für die Speicherung in einer Batterie konditioniert. Für die Versorgung von Wechselstromlasten bzw. die Einspeisung ins elektrische Netz ist zusätzlich ein DC/AC Wandler vorgesehen. Für die Überwachung und Steuerung der Betriebsparameter werden verschiedene Sensoren in den Aufbau integriert und über ein Interface an einen Mess- und Steuercomputer angeschlossen.

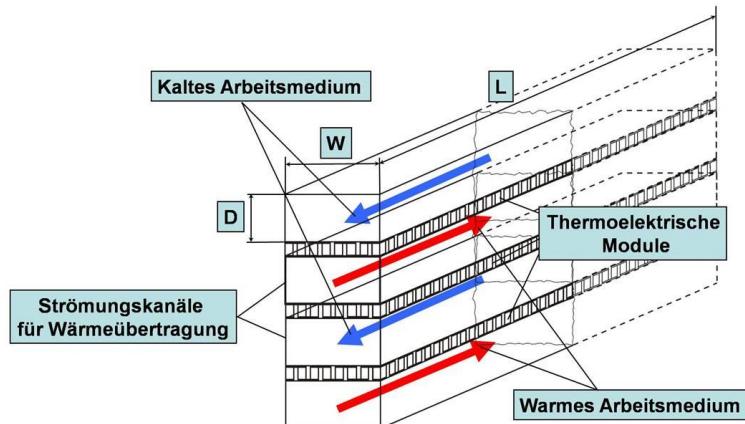
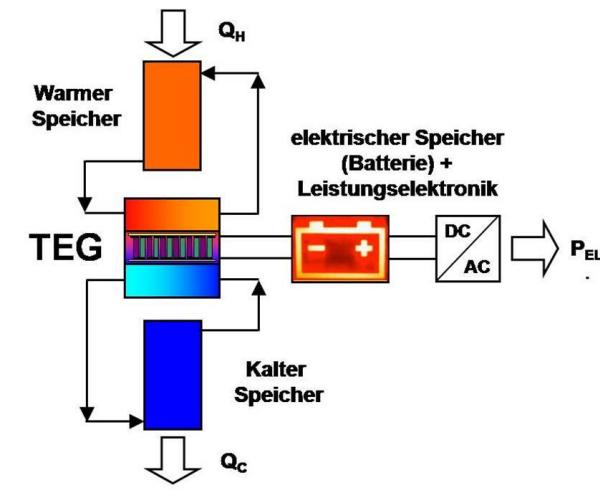


Fig.1 Gesamtsystemkonfiguration (oben), Prinzip der „stack“ Struktur des TEG (unten); (Quelle: ETH Zürich)

Die Durchführung dieses Projektes wurde in zwei Stufen angedacht. In einem ersten Schritt wurde eine einzelne thermoelektrische Generator(stack)einheit aufgebaut. Diese Einheit wurde mit der notwendigen Peripherie zu einem Experimentier- und Teststand erweitert. Die durchgeführten Messungen ergaben weitere Validierungsergebnisse für die theoretischen Modelle und dienten mit weiteren Simulationen als Grundlage für den Aufbau des Gesamtsystems (2. Schritt).

### Aufbau einer thermoelektrischen Generatoreinheit (Thermoelectric Generator Unit, TEGU, 1. Schritt):

Die in Figur 2 (B und C) dargestellte TEGU besteht aus fünf elektrisch in Serie und thermisch parallel geschalteten, thermoelektrischen Modulen, die mit zwei Einbaurahmen verklemt wurden. Zwischen den Modulen wurden sogenannte „Spacer“ eingebaut, die die NTC-Sensoren für die Temperaturmessung beinhalten. In die Einbaurahmen wurden auch die Anschlüsse für die Fluidzuführung integriert. Die Besonderheit dieser Anordnung ist der direkte Kontakt der Fluide mit den (keramischen) Oberflächen der Module, was einen verbesserten Wärmeübergang ermöglicht.

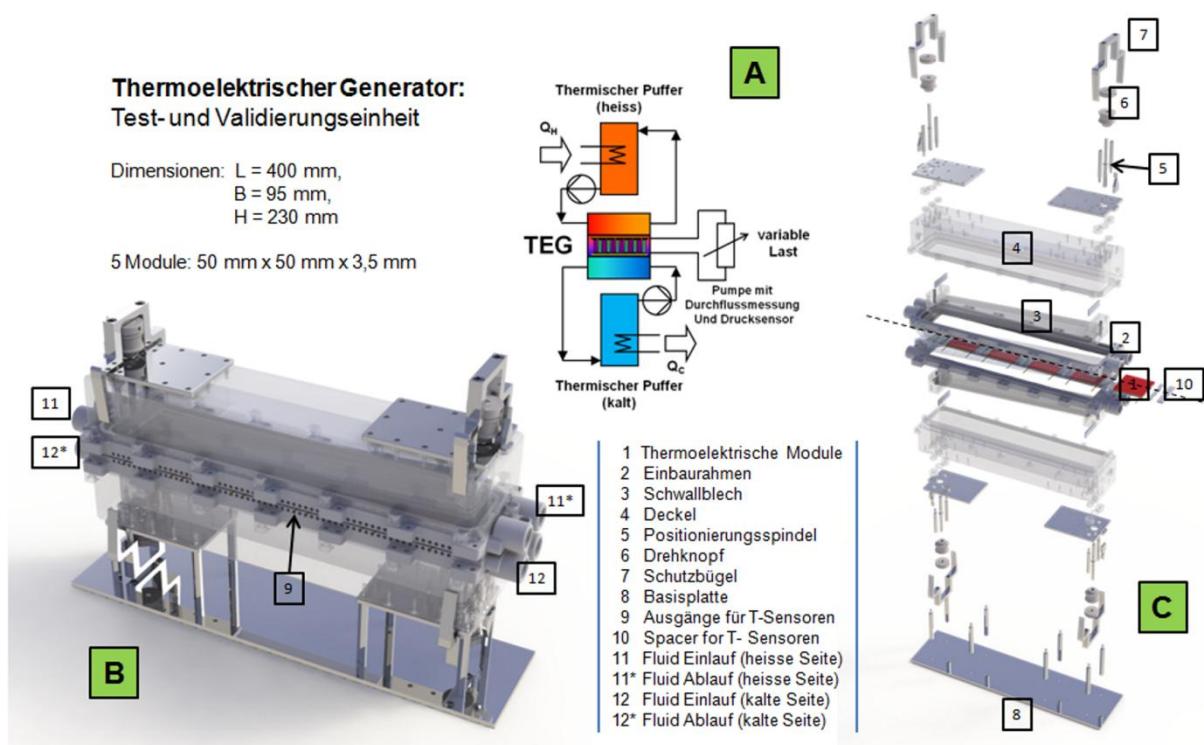


Fig.2 A) Systemkonfiguration thermoelektrischer Teststand, B) Thermoelektrische Generatoreinheit (Rendering), C) Thermoelektrische Generatoreinheit (Explosionsansicht) (Quelle: ETH Zürich)

Die Einbaurahmen wurden jeweils mit einem Deckel verschlossen. Innerhalb des so entstandenen Volumens befinden sich Schwallbleche mit denen jeweils unabhängig die Höhe der Strömungskanäle für die kalte und warme Seite eingestellt werden können. Die TEGU wurde, wie in den Figuren 2A (systematisch) und 3 ersichtlich mit den notwendigen Komponenten wie Pumpen, Durchflussmessung, Drucksensoren, variabler Last, Messelektronik und Steuer-PC zu einem Testaufbau vervollständigt. Die Zufuhr des warmen Fluides (Wasser) erfolgte aus einem elektronisch regelbaren Temperierbad. Das kalte Fluid (Wasser) wurde über den hausinternen Kühlkreislauf temperiert.

Die durchgeführten Tests und Messungen bestätigten die erwarteten Ergebnisse aus den theoretischen Untersuchungen. Sowohl der thermoelektrische Teil bezüglich Leistungscharakteristik als auch die hydraulische Komponente können als Entwicklungs- und Designgrundlage für thermoelektrische Energieerzeugungssysteme verwendet werden.

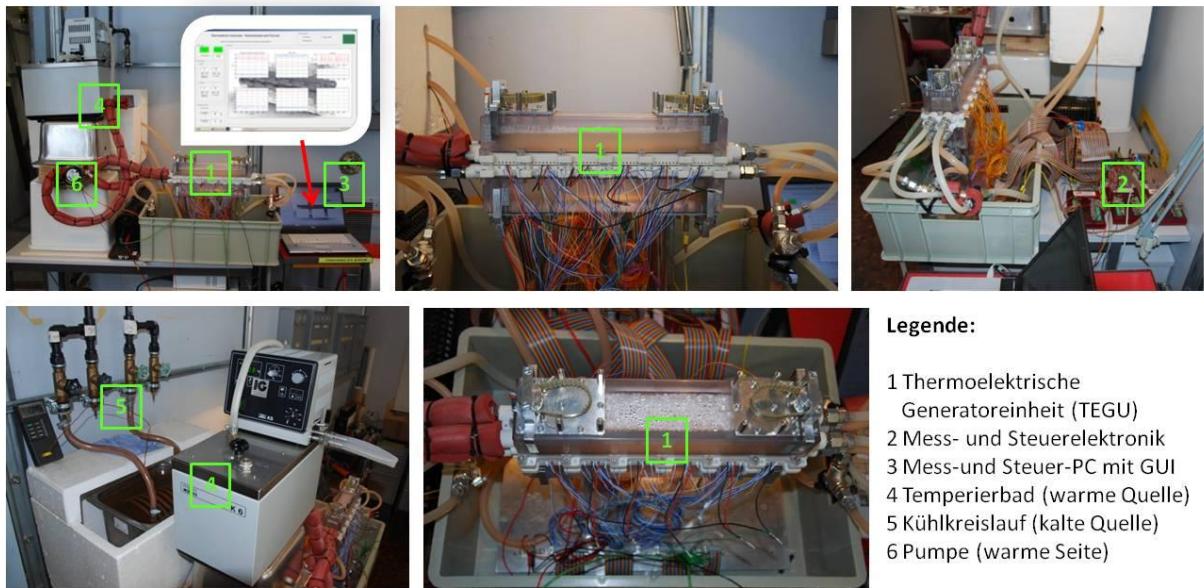


Fig.3 Überblick und Detailansichten des thermoelektrischer Teststands (Quelle: ETH Zürich)

Auf Basis der mittels Teststand erlangten Erkenntnisse in Kombination mit weiteren Simulationen wurde der TEG für das Gesamtsystem entwickelt.

### Aufbau des thermoelektrischen Gesamtsystems (Thermoelectric Generator System, TES, 2. Schritt):

Der thermoelektrische Generator (TEG) (Fig.4 & Fig.5 B) für das Gesamtsystem enthält 9 thermoelektrisch aktive Lagen, die wie bereits beschrieben (siehe Gesamtsystem) als sogenannte „Stack“-Struktur aufgebaut sind. Eine einzelne Lage besteht in der Mitte aus einem Multilayerprint, in welchen sowohl die elektrischen Leiterbahnen für die Verschaltung der Module als auch für die NTC-Sensoren für die Temperaturmessung integriert sind (Fig.4 A & Fig.5 B). Die Module als auch die NTC-Sensoren wurden mit geeigneten Klebstoffen in die vorgesehenen Aussparungen bzw. Tiefenfräslungen eingeklebt und entsprechend verlötet. In einer Lage wurden 10 Module in zwei Reihen zu je 5 Stück eingebaut. Durch die interne Führung der Leiterbahnen im Multilayerprint wurde jeweils eine Reihe pro Print (5 Module) elektrisch in Serie geschaltet und herausgeführt. Die Signale der Temperatursensoren wurden intern auf einen Stecker zusammengeführt und konnten über Flachbandkabel mit der Messelektronik verbunden werden. Die Messelektronik konnte von der TEGU nach kleinen Erweiterungen übernommen werden.

An die Enden der Multilayerprints wurden jeweils zwei Anschlusstücke mit zwei runden Öffnungen ebenfalls aus Printmaterial (FR4) angeklebt (Fig.4 A & Fig.5 C). Durch diese Öffnungen wurden das warme und das kalte Fluid zu- bzw. abgeführt. Die Grösse der Öffnungen wurde so gewählt, dass sie der Summe der Strömungsquerschnitte des jeweiligen Fluidstroms durch den Stack entspricht.

Zwischen den Prints sorgten sogenannte Labyrinthscheiben aus Aluminium für eine abwechselnde Zuführung der Fluide in die Strömungskanäle. Die Dicke der Labyrinthscheiben beträgt 2,5 mm, was somit auch der Höhe der Strömungskanäle

entspricht. Die Labyrinthscheiben sind von einem Rahmen (Aluminium) umgeben und werden über Dichtungen gegen die Printplatten verpresst. (Fig.4 C)

Am oberen und unteren Ende des Stacks wurden 12 mm starke Aluminiumplatten angebracht, in die die Zu- und Ablaufstutzen für den jeweiligen Fluidstrom eingeschraubt waren. Die Aluminiumplatten (Deckel), die Prints mit den Modulen, die Rahmen und die Labyrinthscheiben wurden mit einer Vielzahl von Gewindestangen (42 Stück) miteinander verpresst. Für das Erreichen der Trennung von warmem und kaltem Fluidstrom und der Dichtheit des TEGs nach aussen wurden in jeder Lage an den entsprechenden Stellen Dichtungen eingelegt. (Fig.4 C & Fig.5 B)

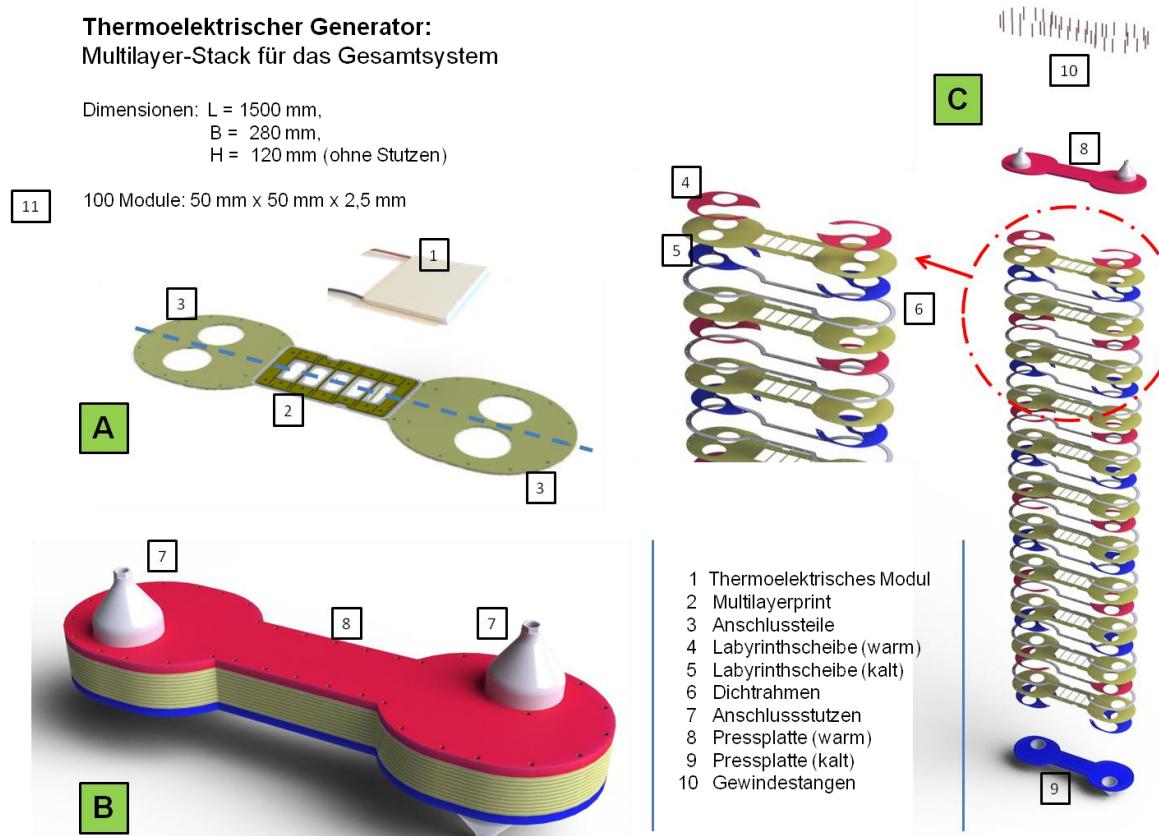


Fig.4 Multilayerprint mit Anschlussstücken (A), TEG für das thermoelektrische Gesamtsystem (B und C); (Quelle: ETH Zürich)

### Bearbeitung der thermoelektrischen Module zur Optimierung der Ausgangsleistung

Die Keramikschichten der hier verwendeten thermoelektrischen Module haben im Lieferzustand eine Dicke von je 1 mm. Dies verursacht einen nicht unerheblichen thermischen Widerstand der den wirksamen Temperaturunterschied an den Halbleiterkristallen beträchtlich verringert. Theoretische Untersuchungen basierend auf den Ergebnissen der TEGU ergaben, dass eine Verringerung der Dicke der Keramikschichten von 1 mm auf 0.3 mm an beiden Seiten der Module eine Erhöhung der Leerlaufspannung von 10-12 % bzw. eine Erhöhung der Ausgangsleistung bei gleichbleibendem Innenwiderstand und angepasster Last von 21 bis 25 % erwarten lässt.

Dieses Optimierungspotenzial sollte beim Stack genützt werden. Nach einer Kontaktaufnahme über den Händler mit dem Hersteller der Module bezüglich der Fertigung von Modulen mit Keramikschichten geringerer Stärke, konnte nur eine sehr teure und zeitlich inakzeptable Lösung gefunden werden. Aus diesem Grund wurde die Zusammenarbeit mit dem Institut für anorganische Chemie der ETH Zürich und dem Geo Machine Shop am

Institut für Geochemie und Petrologie der ETH Zürich gesucht. Durch die kompetente und unkomplizierte Unterstützung der Abteilung Keramik und des Geo Machine Shop konnte nach einigen Tests eine Möglichkeit gefunden werden, die Keramikschichten entsprechend zu bearbeiten. Dabei wurden im Rahmen eines Nass-Schleifverfahrens auf einer Flachbettenschleifmaschine mit einer Diamantscheibe stufenweise Schichten von wenigen  $\mu\text{m}$  abgenommen bis die gewünschte Dicke von 0,3 mm, welche als Untergrenze für eine ausreichende mechanische Festigkeit festgestellt wurde, erreicht war. Vor und nach dem Schleifen jeder Charge von 10 Stück Modulen wurde der Innenwiderstand eines jeden Moduls überprüft um eventuell entstandene Schäden durch thermische oder mechanische Überbeanspruchung zu erkennen. Nach erfolgter Durchführung dieser Arbeiten standen 90 Stück Module mit optimierter Keramikschichtdicke für den Einbau in den TEG zur Verfügung.

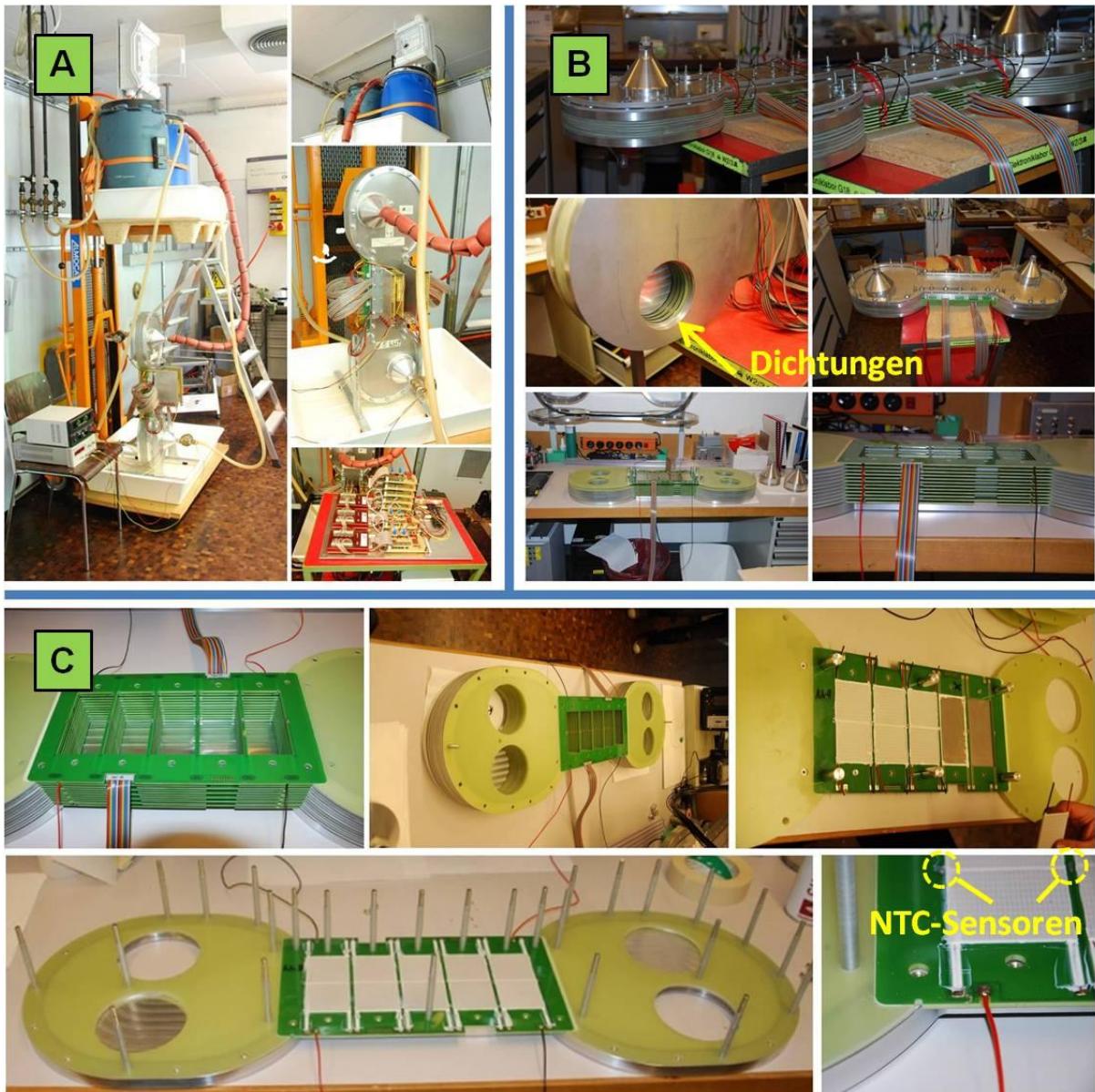


Fig.5 Gesamtsystemkonfiguration (A), Details des TEG für das TES (B), Details Multilayerprint (C); (Quelle: ETH Zürich)

An den zusammengebauten TEG wurden Pumpen, Durchflussmessungen und Drucksensoren angebracht und über entsprechende Leitungen (Schläuche) mit dem warmen bzw. kalten thermischen Buffer verbunden. Das kalte Reservoir wurde mittels des hausinternen Kühlkreislaufs auf einer Temperatur von  $T_C = 10^\circ\text{C}$  gehalten, das warme Reservoir konnte mit einem geregelten elektrischen Heizsystem realisiert. (Fig.5 A)

## Durchgeführte Tests und Messungen

Nach den Inbetriebnahmeroutinen wurden erste Versuche zur Charakterisierung des thermoelektrischen Gesamtsystems durchgeführt:

Mittels Softwareregelung wurde das thermoelektrische Gesamtsystem bezüglich folgender Ausgangsgrößen optimiert bzw. folgende Betriebsweisen untersucht:

- Maximale erzeugte Leistung  $P_{\text{generated MAX}}$   
Maximaler Generatorwirkungsgrad  $\eta_{\text{Generator MAX}}$ ,
- Maximale netto erzeugte Leistung  $P_{\text{Net MAX}}$ , erzeugte Leistung abzüglich Pumpenleistung  $P_{\text{Pump}}$
- Maximaler Systemwirkungsgrad  $\eta_{\text{System MAX}}$ ,

geometrische und konstante, physikalische Parameter während der Messung:

Arbeitsmedium : Wasser

Höhe der Strömungskanäle:

$d_{\text{Tube}} = 2.6 \text{ mm}$ ,

Länge der Strömungskanäle:

$L_{\text{Tube}} = 300 \text{ mm}$ ,

Breite der Strömungskanäle:

$w_{\text{Tube}} = 120 \text{ mm}$ ,

Die Abmessungen der Strömungskanäle beziehen sich auf den mit Modulen bestückten Bereich

Einlauftemperatur des warmen Fluids:

$T_{H \text{ IN}} = 85^\circ\text{C}$ ,

Einlauftemperatur des kalten Fluids:

$T_{C \text{ IN}} = 10^\circ\text{C}$ ,

Die für die Optimierung veränderten Parameter waren die Massenströme des warmen bzw. kalten Fluides, welche synchron verändert wurden. Die Ergebnisse der Messungen sind in den Abbildungen Fig.6 bis Fig.8 zu sehen. (Für die Darstellung der Messwerte wurde das Rauschen geglättet)

### Diskussion der Messergebnisse:

*Betriebsart: Maximale erzeugte Leistung  $P_{\text{generated MAX}}$ ,*  
*Maximaler Generatorwirkungsgrad  $\eta_{\text{Generator MAX}}$*

Aus Fig.6 ist ersichtlich, dass die maximale Generatorleistung  $P_{\text{generated MAX}}$  von 214 W (siehe Fig.6, oben, rechts) bei einem Massenstrom (siehe Fig.6, unten, links) von 0.275 kg/s pro jeweiligem Strömungskanal (5 warme Kanäle und 5 kalte Kanäle) erreicht wird, was annähernd dem maximalen Durchfluss (5,6 m<sup>3</sup>/h) der Pumpen entspricht. Größere Pumpen würden bis zu einer gewissen Sättigung [maximaler Wärmedurchgang Wasser(warm) – Modul – Wasser(kalt)] eine weitere Steigerung der maximalen Generatorleistung ermöglichen, jedoch auch den Bedarf der Pumpenleistung erhöhen und somit den Systemwirkungsgrad weiter verschlechtern (siehe Fig.6, mitte, links). Der Generatorwirkungsgrad verhält sich analog zur Generatorleistung und beträgt  $\eta_{\text{GeneratorMAX}} = 2.57\%$ .

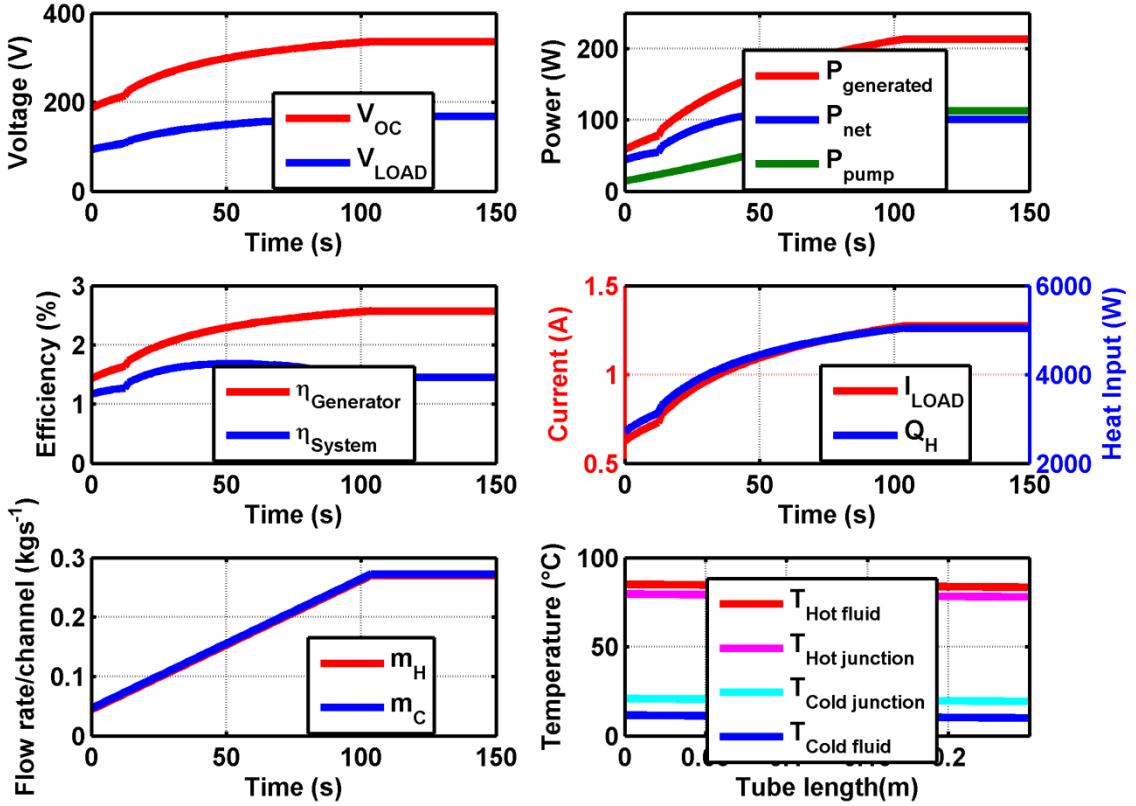


Fig.6 Messdaten für die elektrische und thermische Charakterisierung des TES im Betriebsfall:

MAXIMALE GENERATORLEISTUNG  $P_{MAX}$  (Quelle: ETH Zürich)

Der Systemwirkungsgrad  $\eta_{System}$  beträgt in diesem Fall 1.45 %. Die netto erzeugte Leistung  $P_{Net} = 101$  W und die benötigte Pumpenleistung  $P_{Pump} = 113$  W. Die jeweiligen elektrischen Größen Leerlaufspannung  $V_{OC}$ , Spannung an der Last  $V_{LOAD}$ , Laststrom und die zugeführte Wärmeleistung  $Q_H$  sind aus Fig.6 (oben links) bzw. Fig.6 (mitte rechts) ersichtlich. Das Temperaturprofil entlang einer einzelnen Lage für den genannten Betriebsfall zeigt Fig.6 (unten rechts).

*Betriebsart: Maximale netto erzeugte Leistung  $P_{Net MAX}$*

Die maximale netto erzeugte Leistung  $P_{Net MAX}$  beträgt 113 W bei Massenströmen von 0.2 kg/s pro Strömungskanal (siehe Fig. 7). Die Generatorleistung liegt bei 186 W und die zugehörige Pumpenleistung bei 73 W. Der Generatorwirkungsgrad erreicht 2,4 % und der Systemwirkungsgrad 1,65 %.

Die jeweiligen elektrischen Größen Leerlaufspannung  $V_{OC}$ , Spannung an der Last  $V_{LOAD}$ , Laststrom  $I_{LOAD}$  und die zugeführte Wärmeleistung  $Q_H$  sind aus Fig.7 (oben links) bzw. Fig.7 (mitte rechts) ersichtlich. Das Temperaturprofil entlang einer einzelnen Lage für den genannten Betriebsfall zeigt Fig.7 (unten rechts).

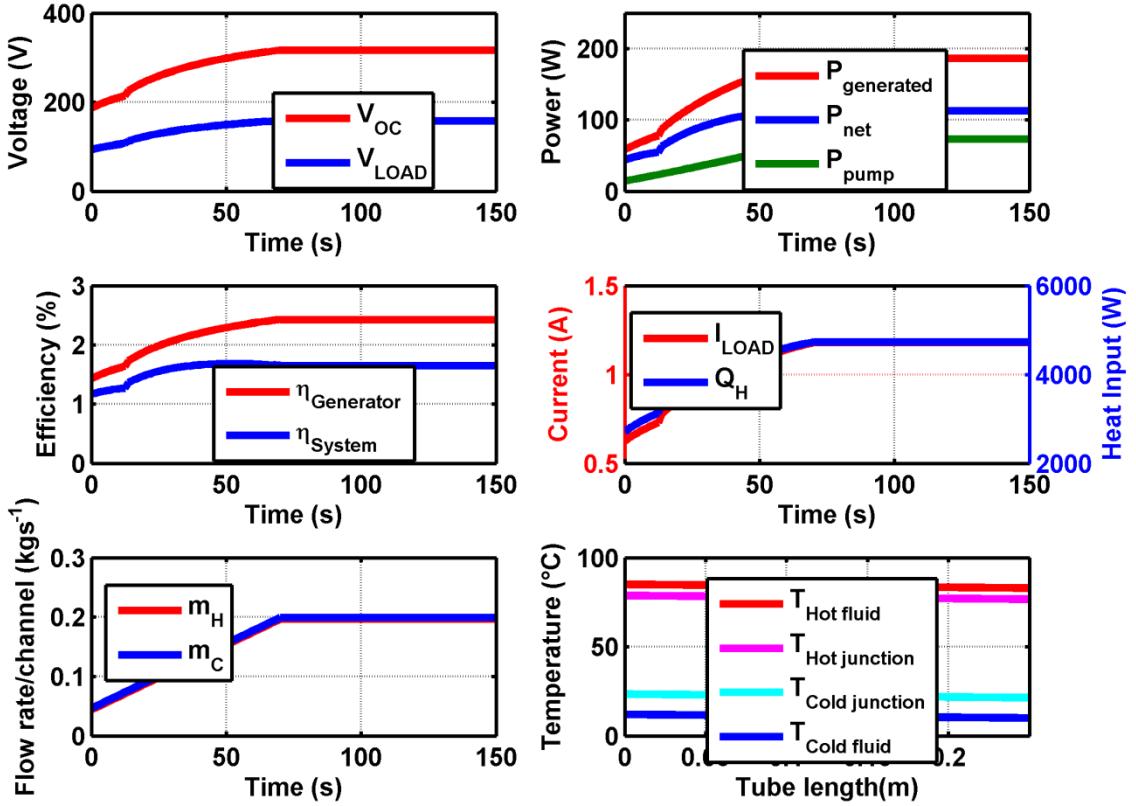


Fig.7 Messdaten für die elektrische und thermische Charakterisierung des TES im Betriebsfall:  
MAXIMALE NETTO ERZEUGTE LEISTUNG  $P_{\text{Net Max}}$  (Quelle: ETH Zürich)

Betriebsart: Maximaler Systemwirkungsgrad  $\eta_{\text{System Max}}$

Der maximale Systemwirkungsgrad erreicht 1.68 % bei Massenströmen von 0.16 kg/s pro Strömungskanal (siehe Fig. 8). Der Generatorwirkungsgrad liegt hier bei 2.3 %. Die Generatorleistung, die netto erzeugte Leistung und die zugehörige Pumpenleistung betragen 168 W, 110 W und 58 W.

Die jeweiligen elektrischen Größen Leerlaufspannung  $V_{\text{OC}}$ , Spannung an der Last  $V_{\text{LOAD}}$ , Laststrom  $I_{\text{LOAD}}$  und die zugeführte Wärmeleistung  $Q_{\text{H}}$  sind aus Fig.8 (oben links) bzw. Fig.8 (mitte rechts) ersichtlich. Das Temperaturprofil entlang einer einzelnen Lage für den genannten Betriebsfall zeigt Fig.8 (unten rechts).

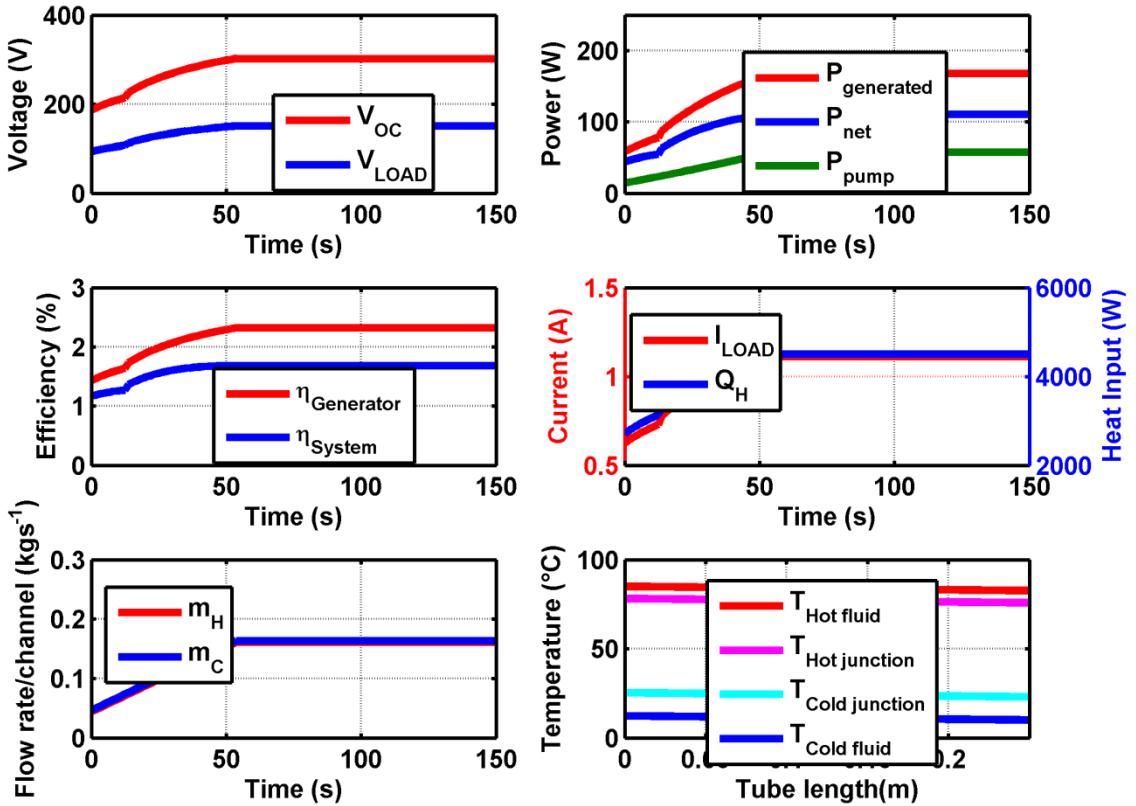


Fig.8 Messdaten für die elektrische und thermische Charakterisierung des TES im Betriebsfall:

MAXIMALER SYSTEMWIRKUNGSGRAD  $\eta_{\text{System MAX}}$  (Quelle: ETH Zürich)

### Probleme und Konsequenzen

Beim Versuch weiterer Messungen traten unerwartete Probleme auf. Der Innenwiderstand des Generators stieg sprungartig stark an, so dass die generierte Leistung auf annähernd 0 W abfiel. Ein einzelnes schadhaftes Modul konnte ausgemacht werden und wurde von aussen überbrückt. Im weiteren Verlauf der Messungen kam es immer wieder zu solchen Ausfällen von Modulen, was schlussendlich weitere Messungen unmöglich machte.

Als Grund für dieses Versagen der Module wurden folgende Ursachen erkannt.

Das Schleifen der Module hatte zwar keine unmittelbar erkennbaren Schäden hinterlassen, die Kombination aus thermischem und mechanischem Stress während des Schleifens führte jedoch zu einer mechanischen Schwächung der Module im Innern (Halbleiterkristalle und oder Verbindung Halbleiter/Kupfer), welche bei einer erneuten Belastung zum Versagen führte.

Für die weitere Nutzung des Generators müssten die schadhaften Module ersetzt werden, was mit einem erheblichen Aufwand verbunden wäre. Das Entfernen der eingeklebten Module erfordert höchste Sorgfalt um Beschädigungen des Multilayerprints zu vermeiden. Da es bis anhin nicht möglich war, Module mit dünneren Keramikschichten zu beschaffen (siehe Seite 8), müsste das Bearbeitungsverfahren (Schleifen) und die Qualitätskontrolle während des Schleifens weiter verbessert werden bzw. eine schonendere Bearbeitungstechnologie gefunden werden. Der Einbau von unbearbeiteten Modulen wäre nicht sinnvoll, da die geometrischen Abmessungen der anderen Komponenten (Print, Labyrinthscheiben, und Rahmen) auf die Module abgestimmt sind und die Verhältnisse in

den Strömungskanälen somit nicht mehr optimal wären, was zu verschlechterten Leistungscharakteristiken führen würde.

## Bewertung und Ausblick

In einem ersten Schritt wurde ein thermoelektrisches Energieerzeugungssystem (TES) in Form eines Teststands realisiert. Durchgeführte Tests und Messungen bestätigten die erwarteten Ergebnisse aus theoretischen Vorarbeiten. Darauf aufbauend wurde ein Generatorstack für ein TES im Leistungsbereich 1 kW bei  $\Delta T = 100$  K geplant, entwickelt und konstruiert. Die Inbetriebnahme des thermoelektrischen Gesamtsystems (TES) verlief erfolgreich und erste Charakterisierungen bei verschiedenen Betriebsweisen konnten durchgeführt werden. Aus diesen Ergebnissen ist ersichtlich, dass mit thermoelektrischen Systemen elektrische Energie aus Niedertemperaturenergie generiert werden kann. Der Wirkungsgrad des Generators liegt dabei bei 11 % der Carnoteffizienz, der des Gesamtsystems bei 8 % der Carnoteffizienz.

Bei weiteren Messungen kam es zu einem multiplen Modulversagen, begründet durch eine vorangehende Überbeanspruchung der Module während der Optimierung der Module mittels eines Schleifverfahrens. Die Substitution der schadhaften Module durch neue Module war aus zeitlichen Gründen im Rahmen dieses Projektes nicht mehr möglich. Der ebenfalls angestrebte Einsatz des TES als Demonstrationsobjekt ist somit derzeit nicht möglich.

Es ist weiter vorgesehen die wertvollen Erkenntnisse dieses Projekt im Rahmen eines „Know how transfers“ an die ETH Spin-off Firma *greenTEG* weiterzugeben.

## Nationale Zusammenarbeit

EMPA Dübendorf: Dr. Anke Weidenkaff, Festkörperchemie und Analytik (Projekte GeoTEP und SolarTEP)

Weitere Unterstützung erfolgte durch:

ETH Zürich, Institut für anorganische Chemie, Abteilung Keramik

ETH Zürich, Institut für Geochemie und Petrologie

## Referenzen

- [1] A. Bitschi, K. Fröhlich, Thermoelektrische Systeme in der Stromerzeugung, Electrosuisse VSE, Bulletin 7/2010.
- [2] T. Tomes, R. Robert, M. Trottmann, L. Bocher, M.H. Aguirre, A. Bitschi, J. Heijmanek und A. Weidenkaff, Synthesis and Characterization of New Ceramic Thermoelectrics Implemented in a Thermoelectric Oxide Module, Journal of Electronic Materials, Volume 39, No 9, 2010
- [3] A. Bitschi, Dissertation „Modelling and Simulation of thermoelectric devices for electric power generation“, doi:10.3929/ethz-a-005936533