



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Schlussbericht 31.08.2014

Konzept / Machbarkeitsstudie eines 50kW-TEGenerators im Schwerindustrienumfeld

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien & -anwendungen
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Firma Main GmbH
Wassbergstrasse 28
CH-8127 Forch
www.main-switzerland.com

Autoren:

Heinrich Marti, Main GmbH, marti@main-switzerland.com
Dr. Andre Heel, ZHAW Winterthur, andre.heel@zhaw.ch
Dr. Sascha Populoh, Empa Dübendorf, sascha.populoh@empa.ch
Oliver Brunko, Empa Dübendorf, olivier.brunko@empa.ch
Dr. Markus Roos, NM Numerical Modelling GmbH, markus.roos@nmtec.ch
Dr. Yves Acremann, ETH Zürich, acremann@solid.phys.ethz.ch
Gerold Meier, Semix AG, semix@bluewin.ch
Patrick Hurschler, Main GmbH, patrick.hurschler@gmail.com
Roland Uebersax, Main GmbH, Uebersax@main-switzerland.com

BFE-Bereichsleiter:	Dr. Michael Moser
BFE-Programmleiter:	Roland Brüniger
BFE-Vertragsnummer:	SI/500942-01

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

Zusammenfassung

In Wärmeprozessen wie z.B. in Stahlwerken und Giessereien, fallen bei Öfen, Gieß-, und Walzwerk-anlagen grosse Mengen von Abwärme an. Anhand dieser Beispiele wird auf verschiedenen Ebenen aufgezeigt, wo die zur Zeit meist ungenutzten Abwärmeströme rekuperiert werden könnten und welche Pilotprojekte zur Rekuperation von grossen Abwärmeströmen in der Stahlindustrie bereits existieren. Die Investitionen in solche Anlagen sind jedoch so substanziell, dass eine Rückführung der Investitionskosten für die Betreiber noch zu lange dauern.

Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie wurde deshalb untersucht, inwiefern derzeit kommerziell erwerbbarer thermoelektrische Generatoren (TEG) dafür geeignet sind, einen Teil der anfallenden Abwärmeenergie direkt in elektrische Energie zu wandeln. Auf Basis von einzelnen TEG-Modulen (<10Watt) bis hin zu bestehenden Kleinsystemlösungen (<1kW) werden die Grundlagen, Materialien und die sich daraus ergebenden Möglichkeiten und Anwendungen für ein 50kW Konzept dargestellt und diskutiert.

In verschiedenen Iterationsschritten wurde ein Konzept und das dazugehörige Engineering für einen 1kW und einen skalierbaren Multi-kW-TEGenerator erarbeitet, bei dem lediglich kommerziell erwerbliche TEG-Elementmodule zum Einsatz kommen. Die dargestellte Lösung ist aus 19 1kW Modulen aufgebaut und stellt einen Kompromiss aus Systemgrösse, Moduleffizienz und beherrschbarem Engineering dar. Um die Zielgrösse von 50kW zu erreichen, ist ein Aufbau aus drei dieser Einheiten denkbar, insofern die entsprechende Abwärmemenge vorhanden ist.

Die Grundlagen für die Material-, beziehungsweise Elementmodulwahl, Wärmezufuhr, Kühlung, Serie- und Parallelschaltung der Elemente, physikalische und thermodynamische Möglichkeiten zur Auslegung, Beurteilung, sowie Massnahmen zur elektrischen- und toxischen Sicherheit, der Konstruktions- und Auslegungsvorschlag und die zugehörigen thermomechanischen Berechnungen sind dargestellt. Zudem wurde eine allgemein anwendbare Berechnungsgrundlage mit Rechenmodell geschaffen, um die Eigenschaften von TEG-Modulen auf Systemebene zu simulieren.

Unter Berücksichtigung von heutiger State-of-the-Art TEG Modulen, die in den hierfür benötigten Mengen käuflich erwerbbar sind, ist bei Wasserkreisläufen und Temperaturdifferenzen von ca. 100°C nicht genügend Effizienz vorhanden, um mit einem TEGenerator eine gewisse Rentabilität zu erreichen. Die finale Konstruktion ist deshalb für die Verwendung Heissgas auf der heissen Seite und Flüssigkeit (Wasser) auf der Kühlseite ausgearbeitet.

Um eine homogene, aber gleichzeitig hohe Wärmekonversion zu erreichen, ist bei unserer Lösung der Wärmeeintrag durch eine gestufte Wabenstruktur optimiert. Abschliessend wird eine Wertung der möglichen Anwendungsbereiche zur Rückgewinnung von Abwärme dargestellt und Grenzkosten werden überlegt.

Résumé

Dans les domaines de l'usinage de l'acier tels que la siderurgie et la fonderie, d'énormes quantités d'énergie sont dissipées lorsque l'acier est réalisé dans des fours ainsi que par les procédés de coulée et de laminage. Afin de récupérer l'énergie dissipée, des techniques ont été développées. Néanmoins, le coût de ces systèmes reste trop élevé et le temps pour amortir l'investissement est trop long pour être viable dans ce domaine de l'industrie.

L'objection de cette étude est d'évaluer si les modules convertisseurs thermoélectriques (CTE) sont appropriés pour générer de l'électricité à partir de la chaleur dissipée dans l'industrie de l'acier.

L'étude porte sur plusieurs CTE allant des modules singuliers (<10W) jusqu'aux des petits systèmes (<1kW) en prenant en compte leurs aspects théoriques, les matériaux qui les composent et leurs applications potentielles. Une discussion autour de ces aspects a été mise en place et un concept intégrant les principaux critères y est présenté. D'autre part, une étude d'ingénierie portant sur les modules commerciaux disponibles de 1kW a été réalisée et a montré qu'il était possible d'élever la puissance du système jusqu'à 50kW comme désirée.

La solution présentée est un système qui comprend 19 modules de 1kW, ce qui représente un compromis entre la taille du système, le rendement des modules et l'ingénierie de contrôle. Trois de ces systèmes pourront être mis ensemble de façon à atteindre la puissance désirée de 50kW.

Les caractéristiques fondamentales pour la sélection des matériaux et des modules, le transfert de chaleur, le refroidissement, les connexions électriques en série ou en parallèle, les aspects thermodynamiques pour le dimensionnement du système et sa planification ont été évalués et décrits,

tout comme les considérations thermomécaniques et les précautions de sécurité. Grâce à cette étude, un outil de simulation a été réalisé permettant de simuler les propriétés des modules CTE. Considérant l'état de l'art des modules CTE disponibles dans le commerce, la conversion de l'énergie issue des circuits de refroidissement avec une différence de température proche de 100°C ne rempli pas les critères pour une application industrielle. Cette étude a alors été orientée vers l'application d'un gaz chaud dans la partie à haute température du dispositif et d'un liquide de refroidissement (de l'eau) dans la partie froide, afin d'augmenter la différence de température des modules CTE. Pour atteindre une conversion à haute température et en même temps homogène, une structure formée d'alvéoles hexagonales, semblable aux nids d'abeille, est prévu. Une recommandation sur l'éventuelle application à grande échelle d'un système CTE pour la récupération de chaleur issue de l'industrie est présentée ainsi que le calcul des coûts marginaux d'une telle installation.

Abstract

In the field of steel processing, such as steel works or foundries, huge amounts of waste heat arise from steel processing in furnaces, casting installations or in rolling mill equipment. On base of these applications it is shown, how unused waste heat can be recuperated and which conventional strategies already exist for this purpose. However, the investment amount for such systems is substantial and the time for the return of investment is still too long for this industry branch.

The aim of this feasibility study was to investigate, if commercially available thermoelectric converter (TEC) modules are suitable to recuperate electricity from waste heat. On base of single TECs (<10W) up to small systems (<1kW), fundamental aspects, materials and resulting possibilities and applications are discussed and an integrated concept is presented. Furthermore, the necessary engineering of commercially available modules for modular 1kW system is elaborated, which can be scaled up to the aimed 50kW system.

The presented system solution comprises 19 single 1kW modules and represents a compromise between system size, module efficiency and controllable engineering. To reach the target aim of 50kW, three of such systems have to be combined.

The fundamentals for the selection of materials and modules, heat transfer, cooling, serial or parallel electrical connections, thermodynamic possibilities for the system dimensioning, planning, and assessment as well as safety precautions and thermomechanical considerations are described and evaluated. On base of this a commonly applicable simulation tool is set up, from which the properties of TEC modules can be simulated.

Under consideration of commercially available state-of-the-art TEC modules, waste heat recovery from watercooling circuits with temperature differences in the range of 100°C are not efficient enough to fulfill industrial expectations. This feasibility study was therefore focusing on the application of a hot gas on the hot side and a cooling liquid (water) on the cold side, to reach a higher temperature difference across the TEC modules. For reaching a homogeneous, but at the same time high heat conversion, in our design a staggered honeycomb structure is applied.

Finally, a judgement about the possible application in terms of a large scale TEC system for the recuperation of waste heat is given, together with thoughts on subsequent costs of such installations.

1. Ausgangslage

1.1 Energie aus Abwärme an den Beispielen Stahlwerk oder Giesserei

Wärmeprozesse insbesondere in Stahlwerken und Giessereien werden heute zumeist ohne Nutzung der Abwärme betrieben. Diese Abwärme stellt einen grossen Teil der eingesetzten Energiekosten dar. Da die Energieträgerkosten stetig steigen, werden aus zunehmend ökonomischen Gründen Überlegungen angestellt, zumindest einen Teil dieser ungenutzten Energie zu rekuperieren.

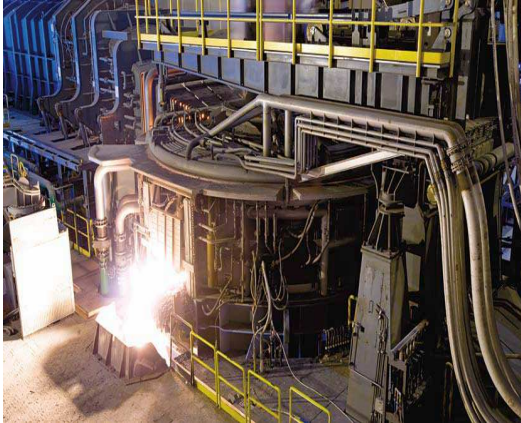


Abbildung 1: Schmelzofen mit Schrottvorwärmung (Tenova)



Abbildung 2 Offgas Leitung am Schmelzofen

Mögliche Anwendungsbeispiele zur Abwärmerekuperation im Stahlindustrienumfeld:

- Einsatz beim Schmelzofen mit der Möglichkeit von integralen TEGeneratoren in Wasserkühlkreisen für Gefäss und Deckel: Die Dimensionen der Kühlrohre und Schläuche sind gut sichtbar.
- Zur Nachverbrennung der Abgase und deren Kühlung wird durch den sichtbaren Spalt Luft angesogen. Das Abgas gibt beim Tenova iRecovery System Wärme über Strahlung und danach über Konvektion an wassergekühlte Rohrbündelleitungen und Wärmetauscher ab, wobei das Kühlwasser bei 180-250°C und einem Druck von bis 15 bar gefahren wird und nach der Expansion eine ORC-Turbine (Organic Rankine Cycle) treibt. Die Rekuperation von mehreren **MW elektrisch** werden erreicht.
- Bei einer Stranggiessanlage, beispielsweise im Kokillenköhlkreis, was den Anstoss für die Überlegungen zur Anwendung eines 50kW-TEGenerators gab, oder bei einer Bandgiessanlage, bei der mit Giessrollen die Erstarrungswärme über geschlossene Wasserkreisläufe abgeführt wird.
- Abkühlen von Brammen von ca. 800°C auf 50°C. SMS-Siemag AG hat in einem Patent dargestellt, wie über Strahlung und Konvektion Energie beim Abkühlen von Brammen, Blooms, Knüppeln und oder fertiggewalzten Produkten wie Coils, zurückgeführt werden könnte. Es wurde auf unserer Seite überlegt, ein Teil der Abwärme durch Strahlung mit TEGeneratoren direkt oder über die gezeigten Kühlkreise abzunehmen.
- Abkühlen von gegossenen Produkten in Giessereien von 700°C auf 50°C:
Heute werden gegossene Teile lediglich an Luft abgekühlt. Die Rückgewinnung der abgestrahlten Wärme wäre für die Industrie von hohem Interesse. Auch hier werden ähnliche Überlegungen angestellt, mit TEGeneratoren direkt oder über Kühlkreise die Abstrahlungswärme zu nutzen.

Bisher bereits angewendete Abwärmennutzung in der Industrie:

- Warmwassernutzung zu Heizzwecken. Die Abwärme ist nur bedingt und in kalten Jahreszeiten nutzbar.
- Warmwassernutzung für beheizte Prozesse, zum Beispiel bei der Spanplattenproduktion.

- Bei integrierten Hüttenwerken wird das Abgas von Hochöfen über Turbinen genutzt. Typische elektrische Leistung liegen bei ca. 7MW pro Hochofen. Da diese Hochöfen konstant über Jahre arbeiten ist die Rückgewinnung attraktiv und wird auch seit Jahren so genutzt.
- Verwendung einer Schrottvorwärmung durch Abgas aus Schmelzöfen. Dazu gibt es aufwändige Lösungen. Es besteht die Gefahr von Dioxinbildung.

Neue Technologien:

- Pilotprojekte der Abgasnutzung z.B. von Tenova für Elektroschmelzöfen.
- Pilotprojekte von Speicherung der Abwärme mit geschmolzenem Salz als Wärmespeicher bei Temperaturen von 430°C aus Abgasen bei Konvertern oder Elektroschmelzöfen durch VAI Siemens.

Die Payback Zeit für diese Lösungen werden mit 6-12 Jahren angegeben, was solche Investitionen zu heutigen Zeit eher uninteressant machen.

Diese Betrachtung gab den Anstoss, eine erste Machbarkeitsstudie zur Nutzung von Abwärme über thermoelektrische Generatoren anzustellen. Es soll ein skalierbarer TEGenerator geschaffen werden, der bis zu 50kW elektrische Leistung erzeugen kann. Eine Anwendung in dieser Grösse ist bisher nicht bekannt. Es sollen käufliche TEG Module, sowie bisherige Entwicklungen und bekannte Anwendungen beleuchtet und Lösungen erarbeitet werden.

1.2 Thermoelektrische Materialien, Anwendung von Modulen, Wirkungsweise

1.2.1 Thermoelektrische Materialien

Abhängig von der Temperatur werden unterschiedliche thermoelektrische Materialien genutzt:

- Für den Temperaturbereich **bis 250°C** eignet sich **Bismutellurid**.
- Für den mittleren Temperaturbereich **bis 400°C** werden **Bleitellurid** und künftig andere neuere, nicht toxische Materialien verwendet.
- Für den Temperaturbereich **600-800°C** werden **Silizium-Germanium-Verbindungen**, Skutterudite oder Heussler-Verbindungen, beziehungsweise eine Kombination getestet.

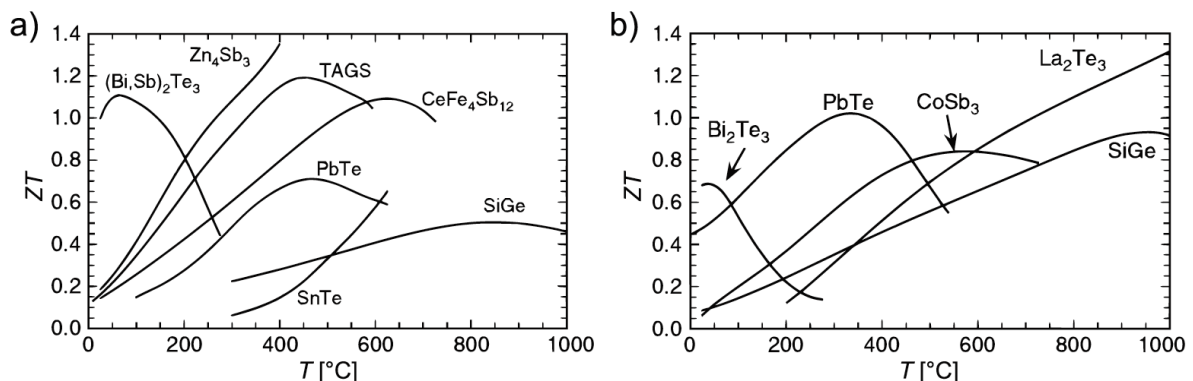


Abbildung 2: ZT (Gütezahl)-Werte typischer thermoelektrischer Materialien (p-Typ links, n-Typ rechts) in Abhängigkeit von der Temperatur (Dissertation A. Schmitz, Köln 30.4.2013).

1.2.2 Thermoelektrische Flach-Module

Die EMPA stellt Flachmodule für Forschungszwecke in ihrem Labor her (siehe EMPA News, Jahrgang 11/ 39/ 2013 Seiten 19-21).

Die Grösse der Flachmodule ergibt sich aus der Würfeldimension und Anzahl der verwendeten p und n-Halbleiter-Materialien. Typische Dimensionen sind etwa B = 4, L = 4, H = 5mm.

Die gesinterten Würfel werden vergoldet und danach versilbert. Der Abstand zwischen den p und n Würfeln ist ca. 1mm.

Die p- und n-Würfel werden in Serie auf ein keramisches Al₂O₃-Grund- und Deckplättchen von je 0.2-0.5mm Stärke verlötet. Dazu werden diese mit Lotmaterial vorab mit einem Siebdruckverfahren

so belegt, wie die p- und n-Würfel danach alternierend in Serie, durch Aufheizen in einem Ofen, mit diesen Lotbahnen verbunden werden. Die resultierende Dicke der Module liegt bei ca. 5,5 bez. 6mm.

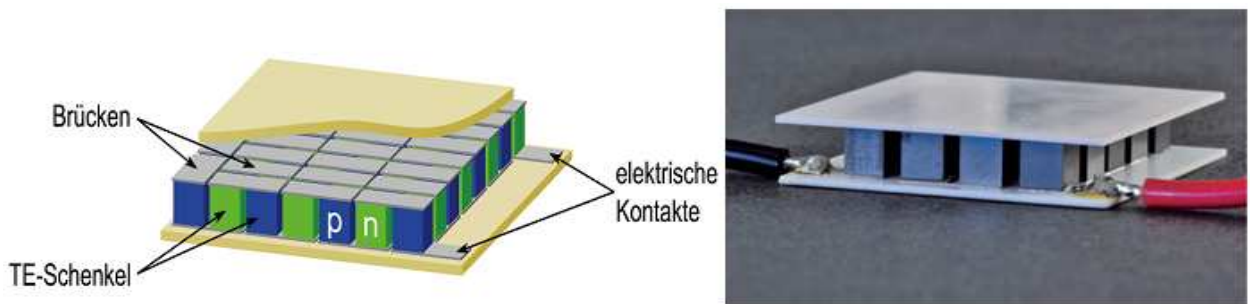


Abbildung 3: Links-Darstellung eines thermoelektrischen Moduls
Die grün und blau dargestellten Schenkel aus p- und n-leitenden Halbleitermaterialien sind über metallische Brücken elektrisch in Serie verschaltet (Dissertation A.Schmitz 30.04.2013).

Rechts-Flachmodul Empa News 39/13

Die von der Empa hergestellten Module sind 34x34mm gross und sind mit 4x5 p- und n-Würfeln belegt. Kleinere und grössere Module sind möglich. Über die optimale Grösse der Würfel wurde diskutiert. Abhängig von den Materialien ist die Spezifikation der Module bezüglich Betriebstemperatur warm/kalt, Stromerzeugung, Spannungserzeugung, Widerstand, Wärmequerfluss und Lot unterschiedlich.

Es gibt verschiedene Firmen, die TEG-Flachmodule (ca. 56x56x4,5mm) aus verschiedenen Ländern, wie USA, Russland, Japan und China anbieten. Eine umfassende Übersicht ist unter www.thermalforce.de zu ersehen (Stand 06.06.2014).

1.2.3 BMW Rohrförmige thermoelektrische Elemente

BMW legt in verschiedenen Veröffentlichungen einen Wärmetauscher mit 18 rohrförmigen TEG-Modulen mit ca. 450mm Länge dar. Als Material wird Bleitellurid verwendet. Die Durchmesser Aussen/Innen sind mit 12/6mm angegeben.

Die Gaseintrittstemperatur beträgt ca. 600°C, die Austrittstemperatur 270°C und der verwendete Kühlwasserstrom hat eine Temperatur von 100°C. Damit kann eine Leistung bis ca. 800W erzeugt werden.

1.2.4 greenTEG-Thermo Elektrische Generatoren

Auf einer vorstrukturierten, gelochten Polymer-Kunststoffbahn wird thermoelektrisches Material (dotierte Bismutelluride) elektrochemisch in den Löchern abgeschieden. Die Dicke der TEG-Folie ist etwa 0,5mm. Die Herstellung ist bezüglich Kostenreduktion automatisierbar. Gegenwärtig wird noch eine relativ kleine Leistung erzeugt. Diese Technologie könnte jedoch später für eine solche Anwendung, wie hier diskutiert, interessant sein.

1.2.5 O-Flexx, Power Strap

O-Flexx aus Duisburg will einen Beitrag im Bereich der Abwärmenutzung leisten. Heute geht weltweit 60% der verwendeten Energie als Abwärme verloren. Das grösste Potential ist im Bereich von Abwärmemetemperaturen von ca. 100°C und darunter zu finden.

In diesem Bereich ist O-Flexx mit der Anwendung von thermoelektrischen Generatoren aktiv.

O-Flexx sieht in Ihrem Produkt Power Strap ein grosses Potential. Beeindruckend sind die Überlegungen im thermomechanischen Bereich und in der Anwendung von p/n-Modulen.

1.2.6 Global Thermoelectric Calgary

Global Thermoelectric hat tausende von Anlagen für Stromerzeugung gebaut. Die Anlagen werden mit Gas betrieben zur Erzeugung von Strom in Bereichen, wo kein elektrischer Strom vorhanden ist. Die Firma baut Einheiten bis ca. 1kW mit PbZn-Te. Hier wird mit Gas die Innenseite eines Keramikzylinders auf ca. 650°C beheizt, auf dem die TEGs aussen in Zylinderform angeordnet sind. Die Anpressung erfolgt über einen flexiblen Zylinderbehälter, der mit einem Medium auf die TEGs einwirkt und die Wärme an Kühlrohre abgibt. Darin ist eingefülltes Wasser, welches verdampft und durch luftgekühlte Finnen laufend kondensiert (US Patent 8.362,351 B2 von Stork Fokker AESP B.V, Erteilung 29.1.2014).

1.2.7 Telgen Russland

Telgen zeigt verschiedene thermoelektrische Generator-Konstruktionen mit konventionellen TEG-Modulen bis 350W für ähnliche Anwendungen wie bei Global Thermoelectric.

Das Gas wird direkt von Pipelines entnommen, um in unwegbaren Gebieten Strom zu erzeugen.

Es wird ebenfalls ein Rohrgenerator für Dampf bei 275°C gezeigt. Die Modulleistung beträgt 125W bei 12V, 3% Effizienz und einem Gewicht von 4kg, beziehungsweise mit Dampf von 600°C wird eine Effizienz von 7% dargestellt. Beachtlich ist hier die relativ kleine Einheit und das niedrige Gewicht.

1.2.8 GM

GM hat zusammen mit Marlow Energy eine Kombination von Skutterudite und Bi-Te Materialien verwendet (Bi-Te-TEG: Am Eingang $7 \times 3 \times 2 = 42$ Bi-Te-Module, Gas bei max 480°C. An der TEG Front herrschen 250°C am Ende 150°C oder Hybrid-TEG: Am Eingang $4 \times 3 \times 2 = 24$ Skutterudite Module, am Ende $3 \times 3 \times 2 = 18$ Bi-Te Module.

1.2.9 Ford

Ford/BMW mit Amerigon hat für einen 3,5L V6 GTDI Motor ein 600W Modul entwickelt, (Peak-Leistung = 700W). Es wird ein Bypass verwendet.

1.2.10 ETHZ-TEG für Niedertemperaturenergie

Dr. Andreas Bitschi von der ETHZ (Institut für Elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnologie) hat ein BFE-gefördertes Konzept mit Flachmodulen erarbeitet, das für Niedertemperaturenergie zur Anwendung kommen sollte. Die Idee wurde ausgeführt, ist aber nach ersten Versuchen und Messungen wegen auftretenden Schäden an den Flach-TEG-Modulen, bei denen zur Effizienzsteigerungen die Keramikplatten von 1,0 auf 0,3mm geschliffen wurden, abgebrochen worden.

Die Einlaufftemperatur des warmes Fluids liegt bei 85°C, die Einlaufftemperatur des kalten Fluids bei 10°C. Die maximale erzeugte Leistung betrug 186W, bei einem Wirkungsgrad von 2,4%. Im Falle der Verwendung von Kühlfluiden ist die benötigte Pumpleistung zu beachten: Diese betrug 73W, d.h. der Systemwirkungsgrad sinkt damit auf 1,65%.

1.2.11 Empa-T-Hex

Untersuchungen an der Empa (Oliver Brunko) für den unten beschriebenen TEGenerator, welcher an einem 1-Zylindermotor zur Anwendung kam, zeigen, dass mit dem T-Hex-System 120W erzeugt werden konnten. Die Daten sind im Dokument „Development of a thermoelectric heat exchanger (T-Hex)“ ausführlich dargestellt und es sei an dieser Stelle darauf verwiesen. Erwähnenswert ist der Aufbau, weil T-HEX hinter dem Katalysator verbaut wird und eine mit der Länge variierende Finnengeometrie besitzt, um eine gleichmässige Wärmeübertragung über die Gesamtlänge zu erreichen. Hier sind 4x6-TEG-Module verwendet, welche abschnittsweise und damit individuell mit Wasser gekühlt werden.

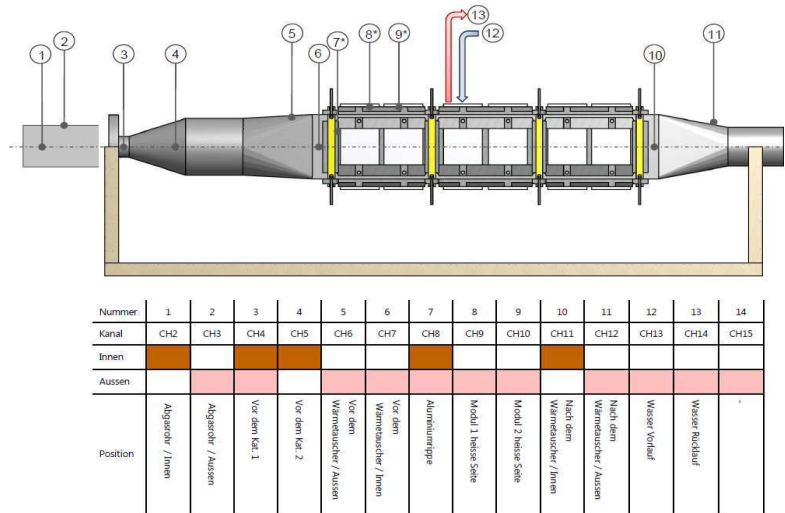


Abbildung 4: T-Hex TEGenerator (EMPA).

- Treibstoffmassenfluss	34kg/h
- Eintrittstemperatur Gas (Methangas)	540°C
- Austrittstemperatur Gas	223°C
- Temperatur Rohr vor TEGenerator	vorn 500°C
- Temperatur Rohr nach TEGenerator	hinten 107°C
- Kühlwassermenge (zusammengerechnet) d.h. pro TEG	60l/min 2,5l/min
- Wassertemp Eintritt Versuch A	40°C
- Kühlwasser Motor, bei optimalen Bedingungen, Eintritt Versuch B	80°C
- Wassertemperaturerhöhung gesamt	10°C
- Heisseste Temp unter Modul	278°C
- Anpressdruck Kühlbereich auf TEGs	4kg/cm ²
- Leistung bei Gastemp. Max. 278°C, Kühlwassereintritt 40°C, Versuch A	PMax 120W
- Leistung bei Gastemp. Max. 278°C Kühlwassereintritt 80°C, Versuch B	PMax 79W
- PMax- TEG 1max	8,1W
- P Min TEG 12	3,1W

Zusammenfassung:

Aus den gezeigten Darstellungen und Beispielen, die nicht abschliessenden Charakter aufweisen, kann abgeleitet werden, dass bereits Lösungen für Leistungen bis ca. 700W vorhanden sind. Die geringen Wirkungsgrade machen es jedoch notwendig, neue Materialien und Konzepte zu erforschen, um höhere Wirkungsgrade erbringen zu können.

2. Ziel der Arbeit

In dieser Arbeit werden die Grundlagen und Materialien mit den sich daraus ergebenden Möglichkeiten und Anwendungen für ein Konzept dargestellt, welches sich aus einzelnen 1kW-TEGeneratoren zu einem Multi-kW-TEGenerator zusammenfügt. Eine solche Lösung soll unter Verwendung kommerziell erwerblicher TEG-Flachmodule für die direkte Rückgewinnung von Wärmeenergie in elektrische Energie im Umfeld der Schwerindustrie, z.B. in einer Giesserei, in einem Stahlwerk, oder bei andern thermischen Prozessen Anwendung finden.

3. Vorgehen / Methode

Basierend auf den dargestellten Anwendungsmöglichkeiten erfolgt die Erarbeitung eines Konzeptes und des Engineerings mit einer Machbarkeitsstudie für einen integralen Multi-kW TEGenerator, unter

Verwendung kommerziell erwerblicher TEG-Elementmodule zu einer Einheit für die direkte Rückgewinnung von Wärmeenergie in elektrische Energie im Umfeld der Schwerindustrie, respektive einer Giesserei oder in einem Stahlwerk.

Dies beinhaltet die Erarbeitung der Grundlagen für Material-, beziehungsweise Elementmodulwahl, Wärmezufuhr, Kühlung, Serie- und Parallelschaltung der Elemente, physikalische und thermodynamische Möglichkeiten zur Auslegung einer machbaren, sinnvollen Multi-kW-Einheit, Beurteilung und Massnahmen zur elektrischen- und toxischen Sicherheit, dem Konstruktions- und Auslegungsvorschlag und den zugehörigen Berechnungen.

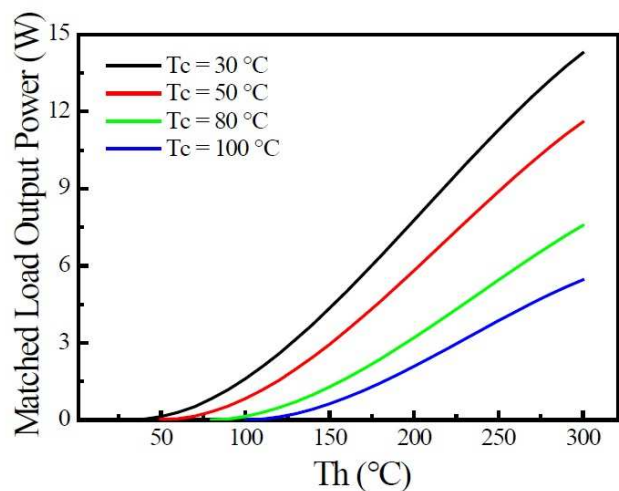
4. Ergebnisse / Erkenntnisse

4.1 Festlegung Flachmodule, Wärmeleithilfen und Anpressdruck

4.1.1 Ausgewählte TEG-Flachmodule

Die Empa hat die Wahl der Flachmodul-TEGs überprüft. Momentan sind nur auf Bi_2Te_3 basierende thermoelektrische Module auf dem kommerziellen Markt leicht erhältlich. Anhand einer Marktstudie der wichtigsten TEG Lieferanten wie Thermalforce, Quickohm, Thermonamic und TEG Power, wurden die Produkte der chinesischen **Firma Thermonamic** TEP1-12656-0.8 und TEHP1-24156-1.2 mit den Abmassen **56x56x4.5mm**, gewählt. Diese liefern die höchste Leistungen und auf Grund von Diffusionssperren eine Temperaturstabilität bis 330°C auf der heissen Seite. Die Leistungs-übersicht dieser beiden Module ist nachfolgend abgebildet.

<u>Spezifikation of the Module TEP1-1265-0.8</u>	
Hot side temperatur (°C)	300
Cold side temperatur (°C)	30
Open circuit voltage (V)	9.9
Matched load resistance (ohms)	1.67
Matched load output voltage (V)	5
Matched load output current (A)	2.9
Matched load output power (W)	14.5
Heat flow across the module (W)	~ 302
Heat flow density (W cm ⁻²)	~ 9.6
AC resistance (ohms) measured under 27 °C at 1000 Hz	0.7 ~ 1.0



<u>Spezifikation of the Module TEHP1-24156-1.2</u>	
Hot side temperatur (°C)	330
Cold side temperatur (°C)	30
Open circuit voltage (V)	14.4
Matched load resistance (ohms)	2.5
Matched load output voltage (V)	7.2
Matched load output current (A)	2.9
Matched load output power (W)	20.9
Heat flow across the module (W)	~ 418
Heat flow density (W cm ⁻²)	~ 13.3
AC resistance (ohms) measured under 27 °C at 1000 Hz	1.1 ~ 1.35

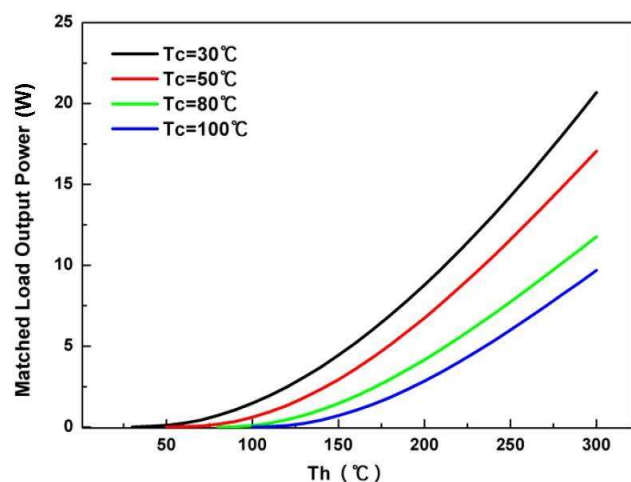


Abbildung 5:Leistungsdaten zu den Modulen TEP1-12656-0.8 und TEHP1-24156-1.2 von Thermonamic.

Auf Grund der höheren maximalen Heissseiten-Temperatur und des höheren Energieertrages von 20,9W bei $T_{\text{heiss}} 330^{\circ}\text{C}$ und $T_{\text{kalt}} 30^{\circ}\text{C}$ wurde Modul **TEHP1-24156-1.2** als optimal für diese Machbarkeitsstudie betrachtet. Zu beachten: Bei steigender Kaltseitentemperatur nimmt die Leistung stark ab.

4.1.2 Wärmeübergänge und Wärmeleit-Folien

Für die Wahl der geeigneten Wärmeleitfolien für den gewählten Temperaturbereich wurde innerhalb dieser Arbeit von der Empa eine Untersuchung durchgeführt:

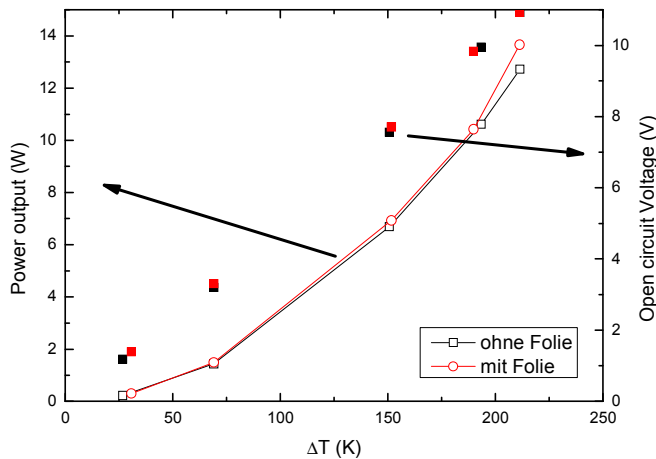


Abbildung 6: Power Output als Funktion der angelegten Temperaturdifferenz (TEHP1-24156-1.2).

Die Grafik zeigt den Leistungsvergleich des Moduls TEHP1-24156-1.2 von Thermanamic im Teststand der Empa einmal mit- und einmal ohne zusätzliches Wärmeleitpad (Folie). Die offenen Symbole stellen die elektrische Leistung, die geschlossenen Symbole die Leerlaufspannung dar.

Die Unterschiede sind sowohl bei der Leerlaufspannung als auch bei der elektrischen Leistung gering, was darauf hindeutet, dass die an den Modulen angebrachten Graphitfolien bereits eine ausreichende Verringerung des Wärmewiderstandes bieten. Es wird entschieden, TEGs mit vom Lieferanten aufgetragenen Graphitfolien zu verwenden und auf zusätzliche Wärmeleitfolien für unsere Anwendung zu verzichten.

4.1.3 Anpressdruck

Für die ausgewählten Flachmodule gibt der Lieferant Thermanamic einen Anpressdruck von ca. 15kg/cm^2 an, sofern die Module mit 2 Schrauben angepresst werden.

Beim T-Hex (Empa) hat man bei den Flachmodulen des gleichen Lieferanten, zuerst 2 Schrauben und wegen der Instabilität des Anpressbügels, in der Mitte eine 3. Schraube angebracht. Der Anpressdruck wurde auf „nur“ 5kg/cm^2 festgelegt und als ausreichend angesehen.

Die Anpresskraft wird vom Lieferanten der TEGs, möglicherweise wegen den entstehenden unterschiedlichen Wärmeausdehnungen der verschiedenen Materialien, hoch gelegt. (zur Erhöhung der Lebensdauer bei zyklischem Betrieb).

Es ist ein möglichst konstanter Druck auf die TEGs aufzubringen, um solche thermomechanischen Aspekte berücksichtigen zu können.

4.2 Physikalische Berechnungsgrundlagen

Vorab wurden die physikalischen Grundlagen für die möglichen Anwendungen im Hinblick auf die Zielanwendung erarbeitet, was folgende Fragestellungen aufwarf:

- Inwiefern kann die Strahlung genutzt werden?
- Ist es möglich mit Wasserkreisläufen und Temperaturdifferenzen von ca. 100°C genügend Effizienz zu erhalten?
- Ist es bei einer Mitteltemperatur um 400°C und auf der Hochtemperaturseite um 650°C möglich, die Wärmemenge durch die TEGs zu leiten, um die maximale Leistung zu erbringen?
- Wie kann die Temperaturführung gleichmäßig gestaltet werden?

Die Nutzung der Abstrahlung wurde physikalisch überlegt. Das Resultat zeigt, dass bei Temperaturen unter 600°C die abstrahlende Energie gering wird. Beim Abkühlen von Teilen sinkt diese rasch darunter, womit die Wirtschaftlichkeit nicht gegeben ist. Bei Abgasen und bei kontinuierlich durchlaufenden, heissen Produkten mit Temperaturen über 600°C, wäre eine Anwendung über Abstrahlung und in Kombination mit Konvektion möglich. Auf diese Anwendung wird in diesem Projekt nicht weiter eingegangen.

Für die Konvektion wurde eine Berechnungsgrundlage mit Rechenmodell geschaffen, um Eigenschaften von TEG-Systemen zu simulieren. (Berechnungen 13.11.2013 Dr. Markus Roos)

Die Rechnungen zeigen einen sehr tiefen Wirkungsgrad bei kleinen Temperaturdifferenzen z.B. bei einer Temperatur von 70°C und 100°C auf der warmen und 30°C auf der kalten Seite. Ein Betrieb mit Wasser bei Temperaturen von ca. 300°C zur Steigerung des Wirkungsgrads, würde Drücke im Bereich von 13 bar benötigen, um die Verdampfung zu verhindern, oder es müssten Zusätze oder Öle verwendet werden.

Als Konsequenz wurde deshalb in Betracht gezogen, die Warmseite mit heisser Luft/Gas im Bereich bis 500°C (max bis 650°C) zu beaufschlagen, um so eine entsprechende Energieausbeute zu erzielen.

Generell konnten aus dem Modell folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Da der Wärmeübergang Rohr/Modul vom Anpressdruck der Module abhängt, muss dieser sehr gross sein. (Flächenleitwert)
- Nur turbulente Strömungen liefern ausreichend hohe Wärmeübergänge.
- Die Wärmeübergangszahlen Fluid/Wand (heisse und kalte Seite) müssen sorgfältig auf die thermischen Eigenschaften der TEGs abgestimmt werden, um einen ausreichenden Wirkungsgrad zu erhalten.
- Eine möglichst gleichbleibende Temperatur über die TEGs entlang der Strömung ist anzustreben, um diese effizient nutzen zu können.

4.3 Konstruktionsentwicklung und Berechnungen

4. 3.1 Erste Konstruktions-Ideen

Es wurden verschiedene Konstruktionsentwürfe erarbeitet, die sich aus den Berechnungen und Erkenntnissen entwickelt haben. Die wichtigsten Ideen werden nachfolgend genannt:

- Ein früher Entwurf baut auf einem 6-Kantrohrgebilde auf, bei dem auf jeder der 6 Flächen je 20 Flachmodule über die Rohrlänge verteilt sind. Die Module werden auf zwei Seiten mit Schrauben und einer Metalleiste verspannt, um den notwendigen Anpressdruck aufzubringen. Im Spalt der Rohrkanten, werden die Module seriell verbunden.
Die thermomechanischen Berechnungen zeigen, dass die gewählte Verspannung der TEGs mit Schrauben keinen gleichmässigen Anpressdruck auf die ganze Fläche der TEG-Module ergeben. (Berechnungsbericht Nr. 1 / 22.1.2014 Patrick Hurschler)
- Wegen der starken Abnahme der zur Verfügung stehenden Wärme, die von den vorangegangenen TEG Modulen aufgenommen wird, reduziert sich auch die erzeugte elektrische Energie über die Länge eines TEG-Generators. Beim T-Hex Generator, wurden unterschiedlich hohe Finnen über die Länge erstellt. In diesem Vorschlag wurde nach Lösungen gesucht, das Wärmeangebot durch Weichen so zu steuern, dass abgekühltes Gas über ein zentrales Rohr abgeführt werden könnte, während zusätzliches Heissgas weiter hinten eingebracht wird.
- Es wurde eine Lösung untersucht, um den Bedenken Rechnung zu tragen, dass die Anpresskraft mit den 2 vorgesehenen Anpress-Schrauben pro TEG-Element, ungenügend sein könnte. Weiter sollte die durch die Erwärmung von Innen erzeugte radiale Ausdehnung gegen einen starrereren Aussenring dazu genutzt werden, den Wärmeübergang zu verbessern. Daraus ist eine Lösung mit Ringen entstanden, womit bis zu 4 (5) Aufdruckpunkte pro Flachmodul möglich sind. Die Aufdruckplatten sind zur Abdichtung des Wasserkreises mit Folien zu einem „Strumpf“-ähnlichen Gebilde zusammengeschweisst oder geklebt. Dieses Gebilde wird dann über die Flachmodule gestülpt und über die Ringe fixiert. Die Schrauben drücken über Platten auf die TEG-Flachmodule.

- Die TEGs sind in dieser Lösung mit einer Metallfolie mit sehr gutem Wärmeübergang und Dehnungsfalten in den Kantecken eingefasst und achsial verlötet, verschweisst oder verleimt. Um die TEGs in Position zu halten werden diese mit Reitern und einem Umreifungsband, ähnlich wie bei der Kartonage-Verpackung fixiert. Der Anpressdruck wird durch ein hydraulisches Anpressmedium aufgebracht. 6-, beziehungsweise 12-Kant Konstruktionen ergeben unterschiedliche Ergebnisse. Deshalb wurde die Konstruktion auf beide Ausführungen erweitert. Für eine akzeptable Gesamtgrösse eines Multi-kW-TEGenerators, wurden folgende Lösungen untersucht:

- 6-Kant-TEGenerator: 55 Einheiten
- 12-Kant-TEGenerator: 19 Einheiten

Für beide Lösungen wurden über eine Kantenlänge 10 Einzel-TEGs angeordnet.

4.3.2 Überarbeitete Modellrechnung mit Rohrkanälen

In der Berechnung wird die 6-Kant-Lösung mit der 12-Kant-Variante verglichen, welche als minimale- und maximale Anzahl evaluiert wurde. Anstelle von Finnen wurden aus modellierungsgründen Rohrbündel (Wandstärke 2,4mm, Rohrdurchmesser 12mm) approximiert.

Beim ausgeführten 6er/12er Vergleich kann aus der Rechnung entnommen werden, dass für die getroffenen Annahmen mit 55 mal 6-Kant-, als auch mit 19 mal 12-Kant-Einheiten, etwa die gleiche Leistung erzeugt werden kann, wobei die 6er Struktur wesentlich mehr TEGs benötigt. d.h. diese 6-Kant Lösung benötigt ca 1,7 mal mehr TEG Einzelmodule, um die gleiche Ausgangsleistung zu erreichen.

α_{eff} erreicht für die 6er Lösung 400W/K/m^2 und für die 12er Lösung 560W/K/m^2 . Die Strömungsverluste mit dieser Rohrbündellösung sind auf der heissen Seite im Bereich von 96Pa (6er) und 121Pa (12er). Damit wird dafür eine mechanische Leistung von ca. 480W (6er) beziehungsweise 600W (12er) benötigt, wobei angenommen wird, dass diese durch Kaminwirkung erzeugt wird, beziehungsweise durch Ventilatoren ohnehin aufgebracht werden muss und deshalb nicht zu berücksichtigen ist. Die benötigte Leistung auf der Wasserseite muss beachtet werden, es sei denn, dass der Kühlkreis ohnehin auch ohne TEGs benötigt wird.

Unter der Annahme, dass die TEG Module lediglich eine Temperatur von 330°C ertragen (Herstellerangabe), können die TEGs in dieser Konstruktion jedoch einer Gastemperatur von 600°C ausgesetzt werden, ohne diese zu zerstören, da der Wärmeeintrag nicht ohne entsprechende Wärmeübergangsverluste von staten geht.

Das durchströmte Volumen ist entscheidend für die Leistung, die geerntet werden kann. Der Wärmeübergang muss auf der heissen Seite gleichmässig gestaltet werden und kann max. 1000W/K/m^2 betragen

Voraussetzungen: Wärmedurchgang $u_{\text{TEG}} = 500\text{W/K/m}^2$. Alle Zu- und Abführungen zu und von den TEGs, sollten nicht wesentlich tiefer sein als dieser Wert, weil sonst die Nutztemperaturdifferenz (d.h. der maximale Unterschied von heisser zu kalter Seite) nur ungenügend genutzt werden kann.

Wärmedurchgangszahlen: Für Strukturteile, die bei unserem Gerät auftreten können:

3mm Stahl: $u_{\text{Stahl}} = 20'000\text{W/K/m}^2$

8mm Wasser: $u_{\text{Druckmantel}} = 75\text{W/K/m}^2$

Wärmeübergang:

an Wasser (kalte Seite): $u_{\text{Kalt}} = 5'000\text{W/K/m}^2$ vom

Gas (heisse Seite): $u_{\text{Heiss}} = 50\text{W/K/m}^2$ (ohne Finnen)

$u_{\text{Heiss}} = 1'200\text{W/K/m}^2$ (mit 72 Finnen) und turbulenter Strömung

Die effektive Wärmedurchgangszahl errechnet sich aus den (bezüglich dem Wärmestrom) in Serie geschalteten Teilleitwerten gemäss $u_{\text{Total}} = 1/(1/u_1 + 1/u_2 + \dots + 1/u_n)$ (d.h. der Kehrwert der Summe der Kehrwerte)

Folgerungen:

- Es müssen sämtliche Wärmeübergänge von heiss nach kalt wesentlich grösser als 500W/K/m^2 sein, damit die Wärme hauptsächlich an den TEGs genutzt werden kann.
- Metallische Zwischenschichten spielen kaum eine Rolle.

- Als kritisch sind die Wärmeübergänge anzusehen, die durch einen Druckmantel (falls Wasser als Medium verwendet wird) und auf der heissen Seite (mit gasförmigem Medium) auftreten können.
- Auf der heissen Seite darf die Temperatur des heissen Mediums wesentlich über der angegebenen maximalen TEG-Betriebstemperatur von 330°C liegen (z.B. bei 450°C) und damit wird $u_{\text{Heiss}} = 1200 \text{ W/K/m}^2$ vernachlässigbar, weil im vorliegenden Fall ca. 150°C durch den heissen Wärmeübergang abfallen. Folglich fällt der Rest hauptsächlich über die TEGs ab. Das gilt aber nicht für die kalte Seite, da man hier nicht tiefer als auf Raumtemperatur gehen kann.
- Es gibt die Möglichkeit, dass der Kühlkreis direkt über den TEGs gelegt wird, welche z.B. mit einer Kupferfolie abgedeckt werden. Die Konstruktion arbeitet via Distanzhalter (hier als grob poröses Material gezeigt) wie bei einer Blutdruckmessmanschette, welche den Druck auf die TEGs überträgt.

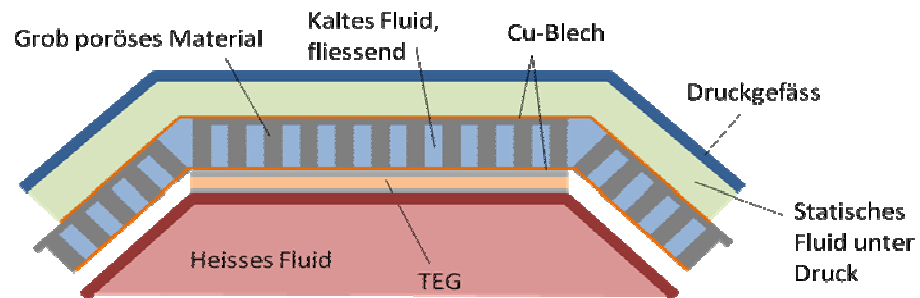


Abbildung 7: Schema und Konzept mit Druckbeaufschlagung via Fluid.

- Die Kühlung wird auf der Skizze gezeigt, nach innen verlegt und anstelle des porösen Materials können auch Metallpads mit Finnen verwendet werden.
- Die Verschweissung der Druckmanschetten an den Enden muss für 6 bar gebaut sein.
- Der Kühlkanal ist mit einer Profilstruktur gefüllt, welche Kräfte in radialer Richtung überträgt, aber auch Schubkräfte, Wärmedehnungen und Unebenheiten der TEGs aufnehmen kann.
- Der hydraulische Widerstand in Längsrichtung muss genügend tief liegen, damit die Wasserkühlung nicht zu grosse Druckdifferenzen aufweist, der Kühlkanal steht nicht unter nennenswertem Druck. Die Ecken werden mit Restriktoren versehen, um zu verhindern, dass das Kühlwasser sich den Weg des geringeren Widerstandes nehmen könnte. Diese dienen gleichzeitig als Stützen für die Folie, und der TEG-Moduldeckplatten, um eine Überlastung derselben zu eliminieren, wie dies in der thermomechanischen Berechnung Bericht Nr. 2 dargestellt ist. (Bericht Nr. 2 17.6.2014 Patrick Hurschler)

4.3.3 Modellrechnung für die 6-Kant Geometrie

Aufgrund der Berechnungen wurde anstelle einer 12-Kant-Einheit ein 6-Kant-TEGenerator mit 2x10 Flachmodulen über die Kantenlänge festgelegt.

Die Modellrechnung wurde erweitert und eine Wabenkonstruktion wurde einbezogen. Die Rechnung ergibt für 18 der neuen Einheiten ca. 20kW Leistung.

Um Systeme mit Heissgas als Arbeitsfluid besser untersuchen zu können, wurde das Rechenmodell in Bezug auf die näherungsweise Berechnung des Wärmeübergangs Heissgas / TEGs für strukturierte Rohre erweitert. Hintergrund ist die Erkenntnis, dass eine besser Nutzung der TEGs resultiert, wenn man deren Heisstemperatur möglichst konstant halten kann.

Um die kontinuierliche Temperaturabnahme entlang des Systems zu kompensieren, wird ein örtlich variabler Wärmeübergangswert realisiert. Das umgesetzte Modell erlaubt die Abschätzung des effektiven Wärmeübergangs einer längsdurchströmten Wabenstruktur, wobei alle Parameter (Material, Wandstärke, Wabendimension) beliebig eingestellt werden können. Erste Resultate zeigen, dass dieser Ansatz mit seinen inhärenten Konstruktionsfreiheitsgraden grosses Potential zur Realisierung von mit Heissgas betriebenen TEG-Systemen hat, insbesondere dann, wenn das heisse Gas sonst einfach abgeblasen würde, d.h. wenn der variable Temperaturunterschied Gas / TEG (bei konstanter Temperatur auf dem TEG) nicht stört. Auf diese Weise ist ein einstufiges System zur Energierückgewinnung realisierbar.

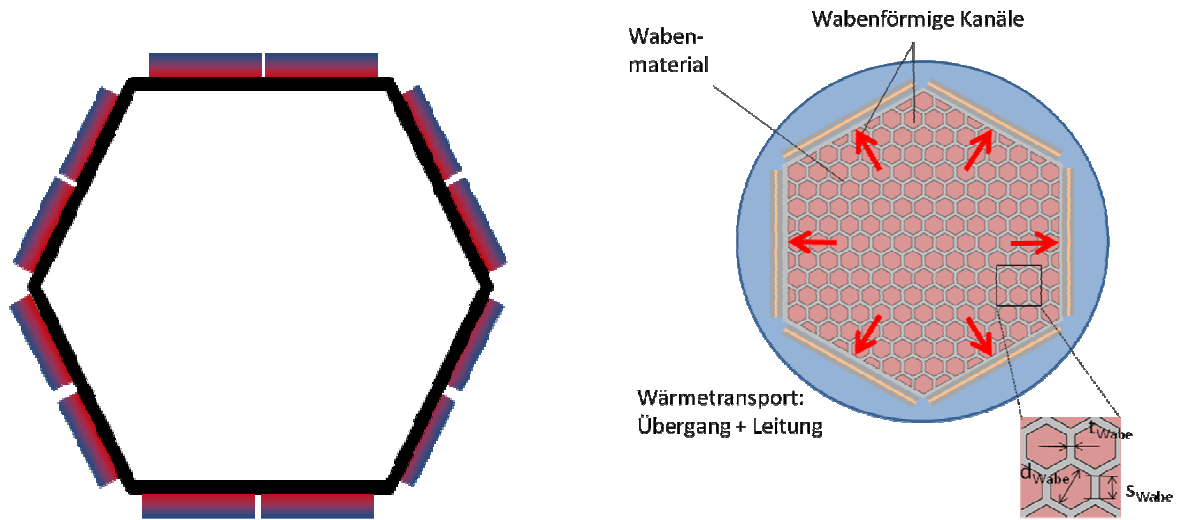
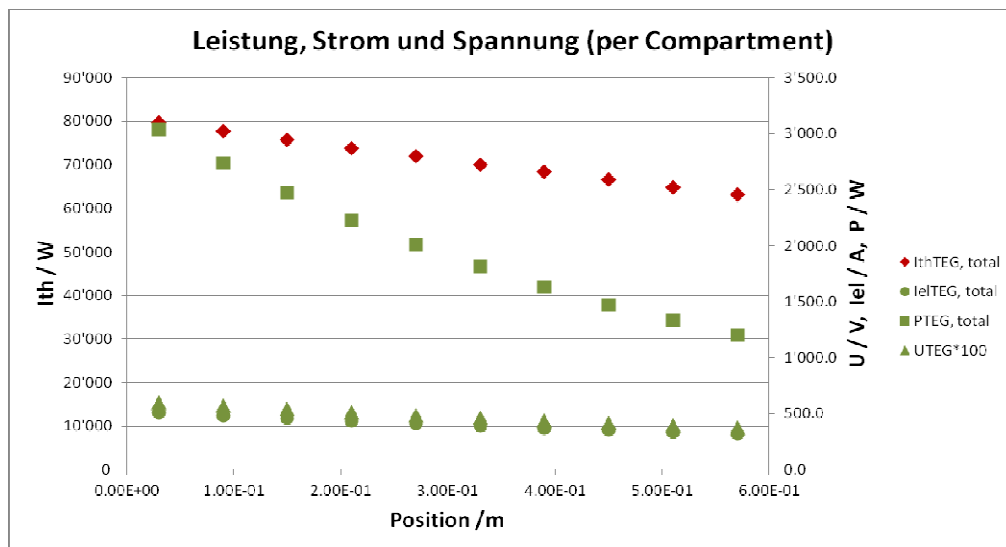
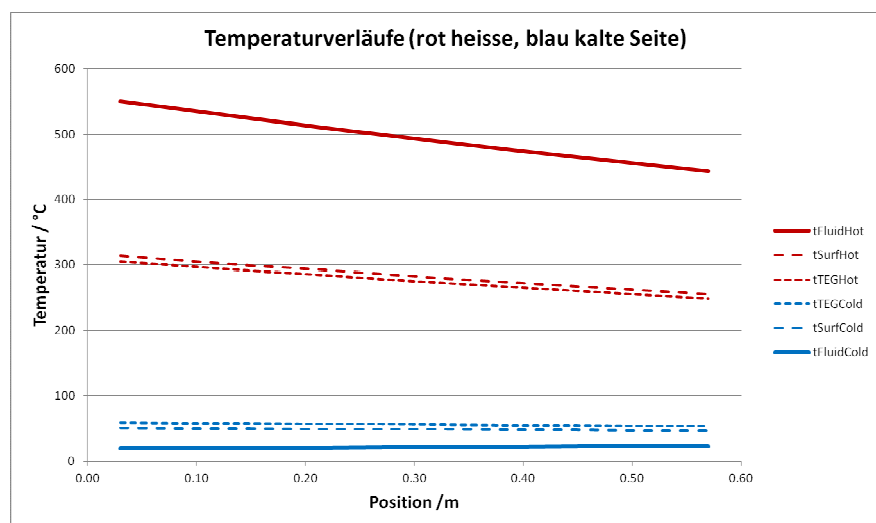


Abbildung 8: TEG Module als 6-Kant Ausführung.

Einbezug der Wabenstruktur in das Rechenmodell



Leistung, Strom und Spannung pro horizontale Ebene (Compartments) über die Länge des TEGGenerators



Temperaturverlauf über die Länge des TEGGenerators, 10 TEGs hintereinander ca. 0,60m Länge

Abbildung 9: Bilder von der Modellerweiterung mit Finnen (Waben)

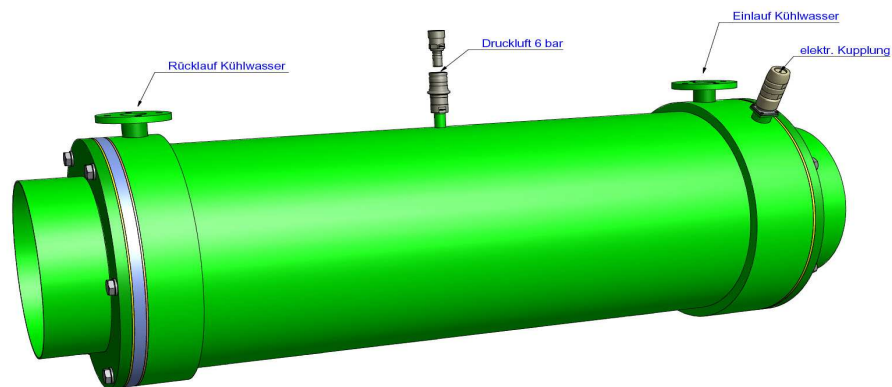
4.3.4 Resultierende Konstruktion

Um eine optimale „Rohrnetzverteilung“ einzubringen wird an einer 6-Kant-Lösung festgehalten, wobei pro Fläche 2 Modulreihen angebracht werden (10 x 2 TEG Module je Kantenlänge). Das Rohrnetz wird mit einem 6-Kant-Wabennetz, mit Stegen von 2,5mm versehen. Die mittlere Wabenweite wird mit 12mm gewählt.

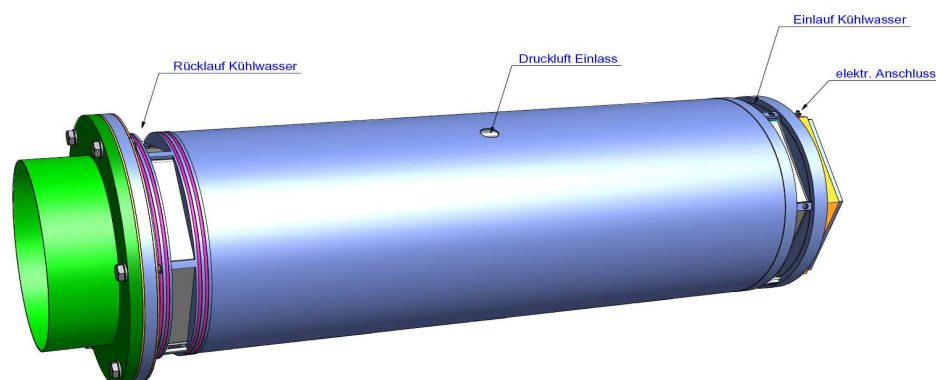
Die gefundene Wabenkonzeption erlaubt über die vordere Länge des Rohrmoduls im Zentrum weniger Waben anzubringen um damit das Wärmeangebot über der Länge an die TEGs ausgleichener zu gestalten.

4.3.4.1 Einzel 1kW-TEGenerator

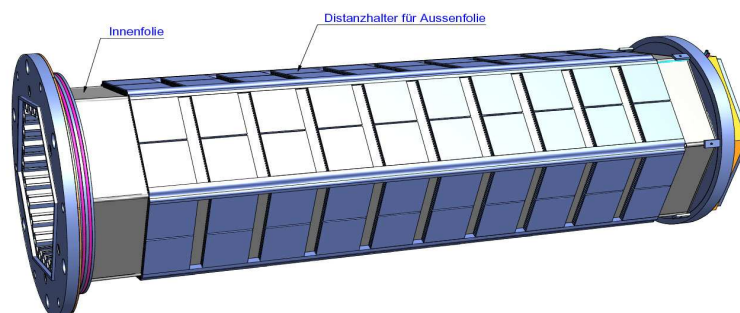
Hier werden die wichtigsten Zeichnungen für den entstandenen 1kW-TEGenerator dargestellt.



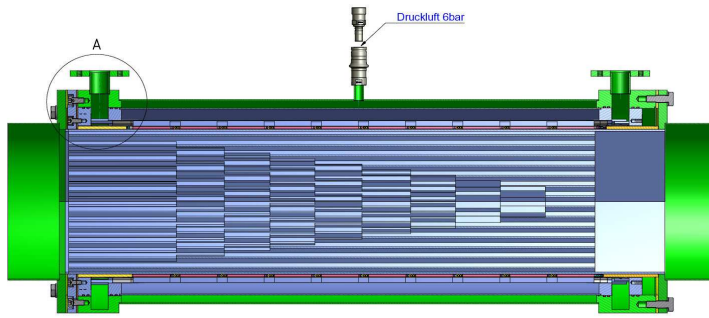
Ansicht 1kW-TEGenerator



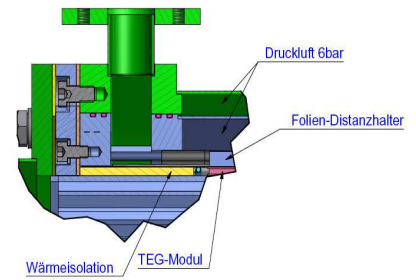
Ansicht ohne äusseres Gehäuse



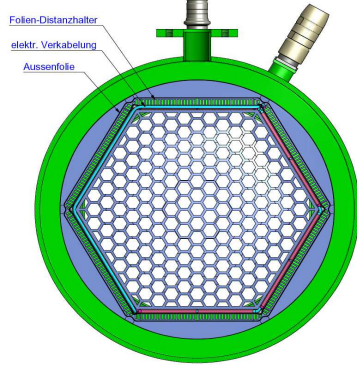
Ansicht mit Innenfolie und Distanzhalter, Aussenfolie entfernt



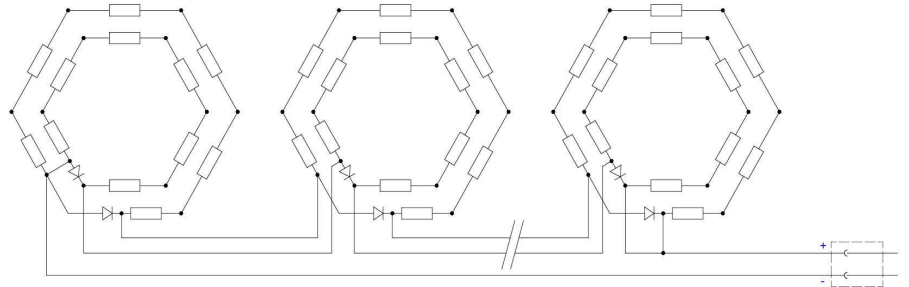
Längsschnitt durch 1kW-TEGenerator mit zunehmenden Waben über der Länge



Ausschnitt Wasserführung



Querschnitt mit Waben

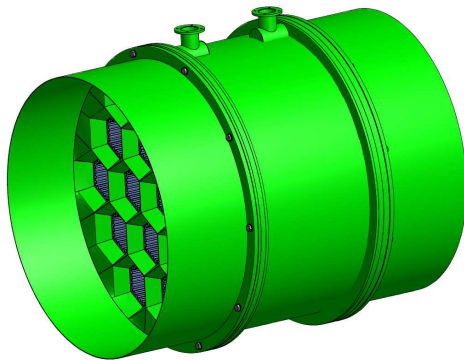


Elektrische Schaltung der TEG-Module

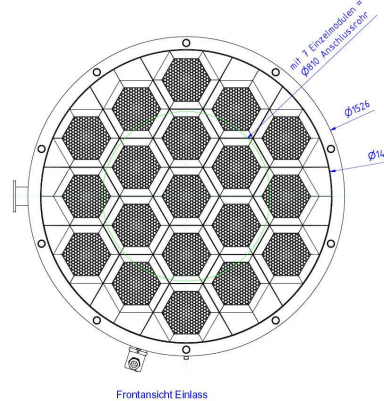
Abbildung 10: Bilder voran: Einzel 1kW-TEGenerator aus den Zeichnungen 2013-TEG-014-B Blatt 1-10

4.3.4.2 Multi-kW-TEGenerator

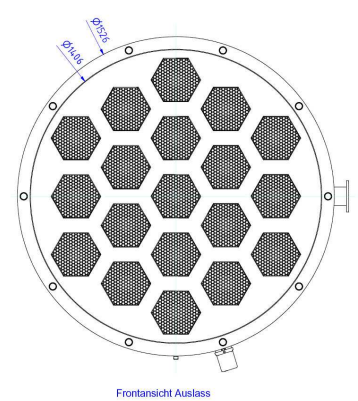
Die nachfolgenden Bilder zeigen den Multi-kW-Generator mit 19 1kW-TEG-Einheiten



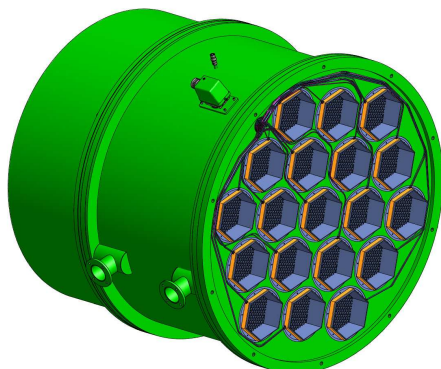
Gesamtansicht Einlassseite



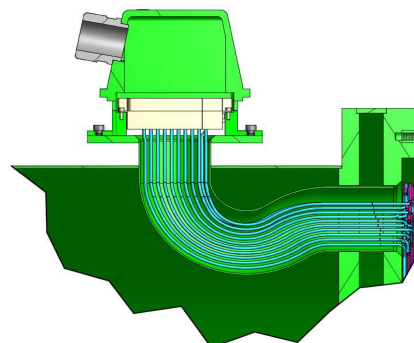
Ansicht von vorn



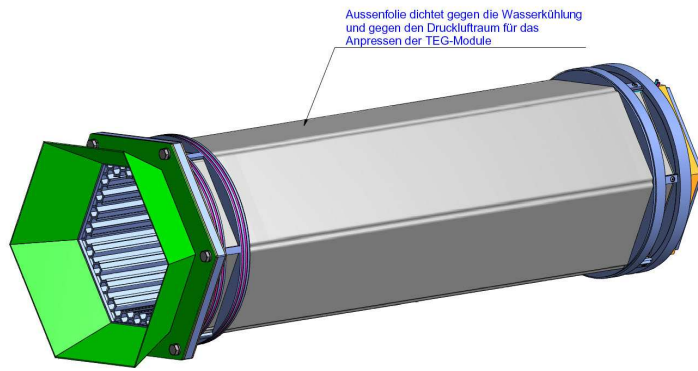
Ansicht von hinten



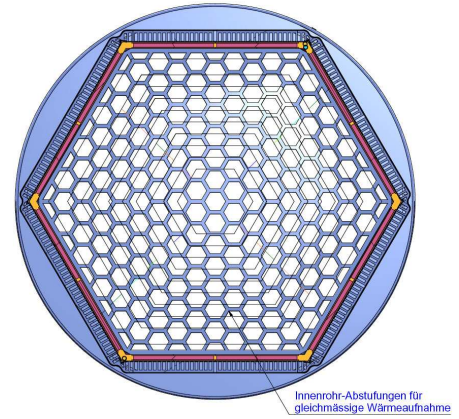
Ansicht von hinten mit Kabelführung



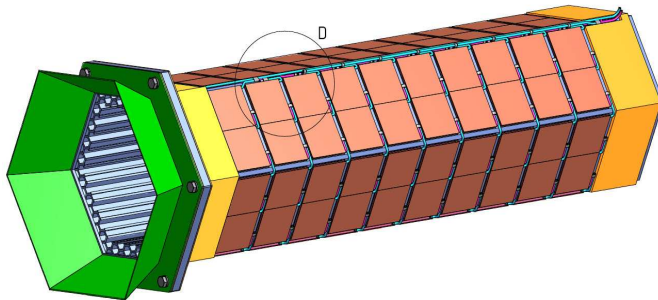
Kabelführungsdetail mit Steckverbindung



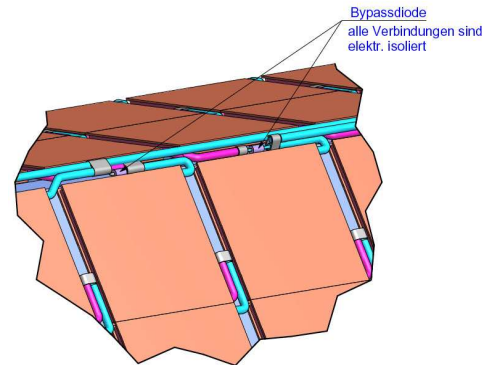
1kW TEGenerator-Modul mit Aussenfolie



Querschnitt mit Waben



1kW TEGenerator mit TEG-Flachmodulen



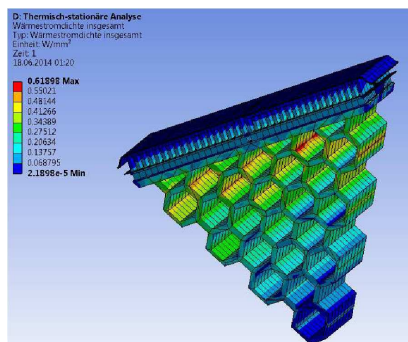
Verkabelung der TEG-Flachmodule

Abbildung 11: Bilder voran: Multi-kW-Modul aus Zeichnungen 2013-TEG-013-B Blatt 1-12

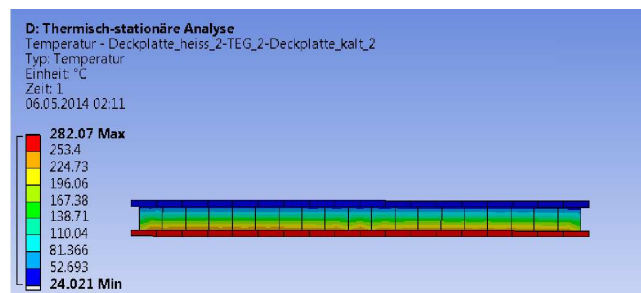
4.3.4.3 Thermomechanische Berechnungen

Basierend auf der 6-Kant Lösung mit pro Fläche 2 Modulreihen (10 x 2 TEG Module je Kantenlänge) und Wabenkonstruktion, wurden die thermomechanischen Berechnungen erneut gerechnet. Siehe Berechnungsbericht Nr. 2, 06.05.2014 Patrick Hurschler.

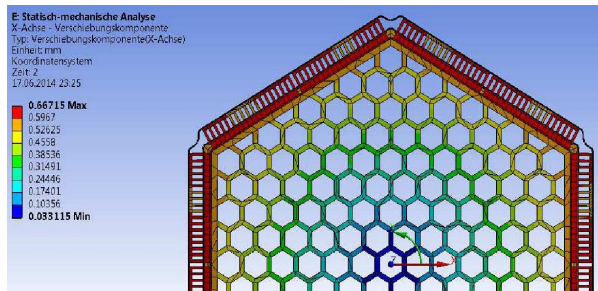
- Die Folien sind in der Rechnung an den Ecken überlastet und würden reissen. Durch die getroffenen Massnahmen mit den Eckstützen kann dieses Problem behoben werden.
- Verglichen mit dem ersten Modell ist der Anpressdruck sehr viel besser verteilt. Die Veränderung mit den Eckenabstützungen sollte die Verteilung weiter verbessern.
- Die im Modell auftretenden Spannungen bei den Deckplatten der TEGs sind in der Rechnung ohne diese Stützen zu hoch. Die Deckplatten auf der kalten Seite würden, wo sie nicht mehr durch das TEG-Material gestützt wären, gebogen.



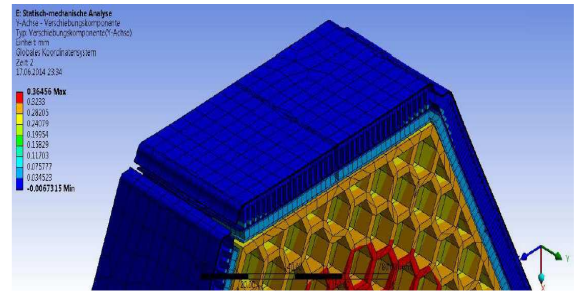
Berechnung Wärmestromdichte



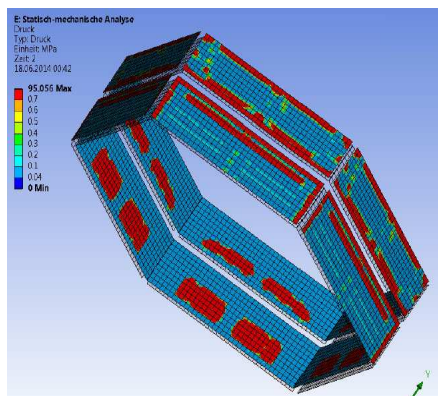
Temperaturverlauf über die TEG-Module



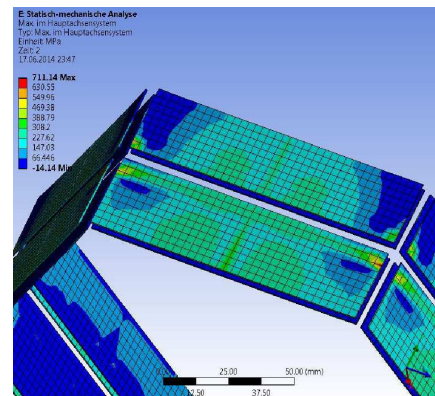
Radiale Ausdehnung



Längsausdehnung (Mitte 0,36mm über gerechnete Länge)



Anpressdruck pneumatisch



Spannungen Deckplatten der TEG Flachmodule

Abbildung12: Bilder voran aus Berechnungsbericht Nr. 2, 06.05.2014, Patrick Hurschler

4.4 Elektrischer Teil des TEGenerators

4.4.1 Allgemeine Betrachtungen

Der TEGenerator erzeugt eine Gleichspannung, welche über einen Wechselrichter ins Wechselstromnetz eingespeisen werden kann.

Bei einer Leistung von 50kW bietet sich in Europa an, in das bestehende Netz 3x400V / 50Hz einzuspeisen. Bei der Einspeisung ins öffentliche Stromnetz sind diverse Richtlinien bezüglich Sicherheit und Netzstabilität zu berücksichtigen.

In der Fotovoltaik ist die Aufgabenstellung ähnlich und es werden viele Produkte auf dem Markt angeboten, welche den Richtlinien entsprechen und auch für einen TEGenerator verwendet werden können.

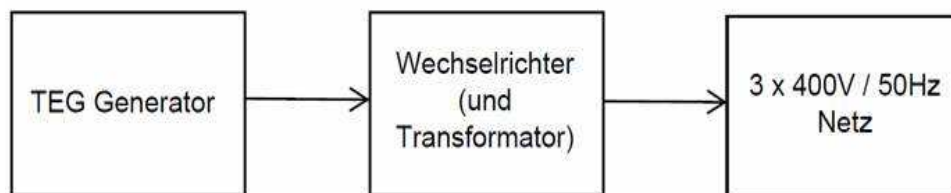


Abbildung 13: Mögliche Verschaltung der TEG Module.

Die maximale Spannung sollte unter 1000VAC und 1500VDC sein, damit man im Bereich der Niederspannung bleibt. Gängige Fotovoltaik Wechselrichter sind bis zu einer Systemspannung von maximal 1000VDC verfügbar. Bei den TEG Modulen muss die absolut maximale Leerlaufspannung beachten werden, da diese anliegt, wenn kein Strom fließt. Wird die maximale Eingangsspannung von einem Wechselrichter überschritten, führt dies zu einem irreversiblen Defekt. Die verwendeten Module haben eine maximale Leerlaufspannung von 14,4V pro Modul.

Die Wechselrichter aus der Fotovoltaik sind nicht für einen TEGenerator entwickelt worden und somit erfüllen sie nicht zu 100% die Anforderungen des TEGenerators. Die TEG Module haben einen weiten Bereich, in dem sie Energie abgeben. Deshalb kann das Verhältnis von maximale Leerlaufspannung (14,4V beim gewählten Modul) zur optimalen Spannung eines Betriebspunktes weit auseinander liegen. Beim gewählten Modul ist im idealen Betriebspunkt schon ein Faktor 2 dazwischen. Die Nominalspannung bei idealem Betrieb beträgt 7,2VDC.

Ein TEG ist sehr gut als Spannungsquelle mit Innenwiderstand beschreibbar. Dabei ist zu beachten, dass sowohl der Innenwiderstand wie auch die Leerlaufspannung von den Temperaturen auf der kalten und der heißen Seite abhängen. Die Leerlaufspannung ist proportional zur Temperaturdifferenz, währenddem der Innenwiderstand nicht so stark von den Temperaturen abhängt. Dieses Verhalten ist somit anders als das Verhalten einer Solarzelle, welche eine Stromquelle darstellt. Aus den Innenwiderständen und Leerlaufspannungen, als Funktion der Temperaturen, wurde ein einfaches Modell erstellt, um das Verhalten bei der Parallel- und Serienschaltung der TEGs bei verschiedenen Variationen der Temperaturen zu untersuchen. Da die TEGs als Spannungsquellen mit Innenwiderstand beschrieben werden können, darf man diese ohne nennenswerte Verluste in Serie schalten. Schaltet man diese jedoch parallel, besteht die Gefahr, dass die unterschiedlichen Spannungen zu Verlustströmen führen. Dies ist bei der Solarzelle genau umgekehrt: Diese kann man gut parallel schalten, Serieschaltungen sollten jedoch vermieden werden.

Da aufgrund der Wärmeabgabe, die Temperatur über der Länge abnimmt, sind die TEGs am besten radial pro Reihe in Serie zu schalten. Danach werden die folgenden Reihen ebenfalls radial in Serie geschaltet. Es werden folgende Annahmen getroffen:

- TEGs sind in Serie geschaltet, bis eine Spannung von 700...1000VDC erreicht wird.
- Betriebspunkte der TEGs: Jeweils 6 TEGs am Umfang des 6-Kantrohrs, haben eine Bypass-Diode (ähnlich wie bei der Fotovoltaik). Damit können Elemente die defekt sind, überbrückt werden.

Strangwechselrichter, wie beispielsweise die MT- Serie von Solarmax, haben ein Verhältnis der minimalen Betriebsspannung zur maximalen Eingangsspannung von ca. 3,5V. Dies muss bei der Auslegung eines Stranges mit den TEG Modulen berücksichtigt werden.

DC-DC Leistungsoptimierer haben ein Verhältnis der minimalen Betriebsspannung zur maximalen Eingangsspannung von 6 – 10V, was die Dimensionierung erleichtert.

Es wurden Überlegungen für die Schaltung der TEGs angestellt und dazu ein kleines Programm erstellt.

4.4.2. Idealfall

Wenn man davon ausgehen kann, dass alle 120 TEG Module eines 6-Kant Rohres in einem ähnlichen Betriebspunkt betrieben werden, kann man die TEGs wie folgt verschalten:

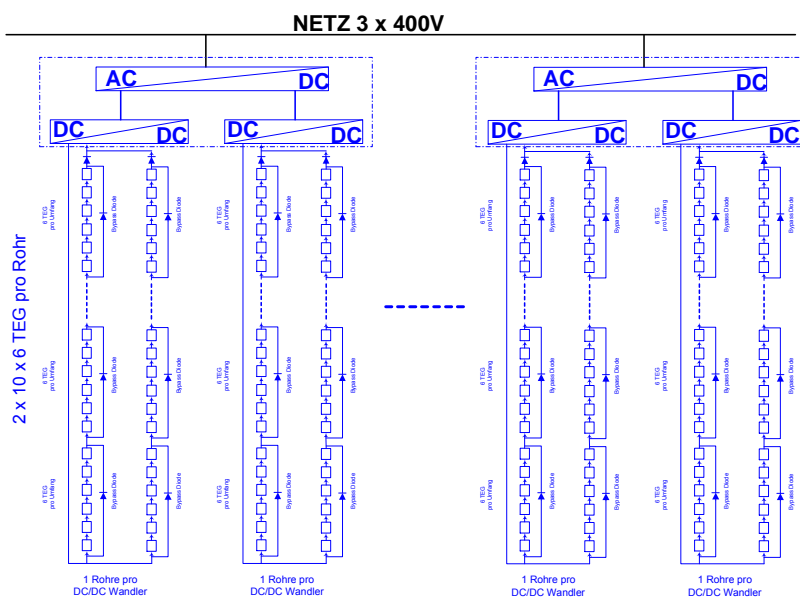


Abbildung 14: Konzept für ähnliche elektrische Betriebspunkte aller TEG.

Vorteile:

- Nur 2 elektr. Leitungen kommen aus dem 6-Kant Rohr
- Minimaler Aufwand auf der Seite der Wechselrichter

Nachteile:

- Falls die Betriebspunkte der TEGs voneinander abweichen, wird die Energieausbeute dadurch etwas verringert, da in einem seriellen Strang die Zelle mit dem niedrigsten Strom limitierend ist und bei parallelen Strängen Zellen mit niedrigem Strom als Verbraucher agieren. Mit entsprechenden Strang- und Bypassdioden können die Effekte etwas verringert werden.
- Der Maximum Power Point Tracker des Wechselrichters kann Mühe haben den optimalen Arbeitspunkt zu finden, wenn die Zellenleistungen stark voneinander abweichen.

Eckdaten eines 6-Kant Rohrs mit 120TEGs:

- Leerlaufspannung 864VDC
- Nominalspannung bei idealem Betrieb 432VDC
- Nominalstrom bei idealem Betrieb 5,8ADC
- Maximale Leistung bei idealem Betrieb 2500W

Wechselrichter:

- 2 6-Kant Rohre an einem Wechselrichter (z.B. SolarMax SM6MT2)
- Bei 19 6-Kant Rohren sind dies 10 Wechselrichter

Es wurde abgeschätzt, was passiert, wenn man „viele“ TEGs in Serie schaltet. Dafür wurden die realistischen Innenwiderstände und Leerlaufspannungen aus den Herstellerangaben verwendet, welche linear angenähert werden können. Es zeigt sich, dass man ohne Probleme TEGs mit verschiedenen Temperaturen in Serie schalten darf. Die Innenwiderstände sind (im Gegensatz zu Solarzellen) nur unwesentlich von der Temperatur abhängig. Dies macht eine Schaltung mit wenigen DC/DC-Wandlern sinnvoll. Einzig bei der Parallelschaltung ist Vorsicht angebracht. Dies besonders dann, wenn man mit dem Ausfall einzelner Elemente rechnen muss. Die Dioden verhindern in diesem Fall, dass das ganze Rohr ausfällt, aber die Spannung ist dann um ein Rohr-Segment reduziert.

Nimmt man, wie beschrieben, zwei Stränge pro Rohr an und für den ersten Strang setzt man 60 TEGs einer auf der heissen Seite variierenden Temperatur von 200-300°C und im zweiten Strang von 150-250°C, so ergibt sich der schlechteste Fall. Die Kühlwassertemperatur ist mit 30°C angenommen.

Wenn man jeden TEG einzeln über einen DC/DC-Wandler betreiben würde (mit 100% Wirkungsgrad des Wandlers) wären 1,2kW pro Rohr zu erhalten. Wenn man die einzelnen Stränge je auf einen "perfekten" DC/DC-Wandler geben würde, könnte man 1,19kW pro Rohr erhalten. Schaltet man die zwei Stränge parallel, erhält man immer noch 1,16kW (dies entspricht genau der Lösung "Idealfall"). Nimmt man nun an, dass im 2. Strang 1 TEG ausfällt, so fallen dank der Diode nur 6 TEGs effektiv aus, und nicht der ganze Strang. Dies ergibt somit folgendes Bild:

Jeder Strang einzeln an einem DC/DC-Wandler: 1,13kW, Parallelschaltung der zwei Stränge: 1,08kW
Jeder TEG einzeln (mit 6 ausgefallen): 1,14kW.

Man kann also ohne weiteres den "Idealfall" realisieren, ohne massiv an Leistung zu verlieren.

4.5 Toxizität, Wahl der Materialien, Sicherheit, Regelung

Für die Sicherheit gegen Stromschlag und Toxizität werden Massnahmen dargestellt.

Zur Toxizität von Bi_2Te_3 sind wenig aussagekräftige Dokumente zu erhalten. Im Falle einer Exposition ist das folgende Szenario denkbar: Die Schmelztemperatur des Bi_2Te_3 wird überschritten, diese liegt bei 585°C. Da aber deutlich höhere Temperaturen anliegen müssten (ca. 300°C höher), ist als erste Sicherheitsmassnahme sicherzustellen, dass diese Temperaturen nicht erreicht wird.

Sollte dies jedoch geschehen, ist zu erwarten, dass sich Bi_2Te_3 (metallisch) zu den entsprechenden Oxiden zersetzt. Um dies zu verhindern, muss der Gasstrom durch den Generator mittels einer Bypass-Klappe umgeleitet werden können. Diese Klappe muss beim Ausfall der Kühlung, sowie bei einem übermässigen Anstieg der Temperatur im Generator, diesen automatisch ausser Betrieb nehmen. Die Bypass-Klappe und dessen Regelung ermöglicht es auch, den Generator bei der maximal zulässigen Temperatur (und somit beim höchsten Wirkungsgrad) zu betreiben.

In der Apparatur wären bei den vorgesehenen TEGs grosse Mengen Bi_2Te_3 vorhanden. Es ist sicherzustellen, dass dieses nicht austreten kann. Eine Barriere für die Umwelt ist das einhüllende

Rohr, welches die TEGs vom heissen Gas trennt. Die andere Barriere ist eine dünne Folie, welche das Kühlwasser von den TEGs trennt. Der Kühlkreislauf muss in einem geschlossenen Kreis z.B. über einen Wärmetauscher geführt werden.

Es ist notwendig, Massnahmen zu treffen, damit die Halbleitermaterialien nicht in die Umwelt gelangen können. Wir sehen zwei Massnahmen, um dies zu verhindern:

- Je nach Auslegung des Kühlkreislaufes müssen die genannten Massnahmen getroffen werden, damit bei einem allfälligen Leck in einem TEGenerator das mit Bi- und Te-verschmutzte Kühlwasser nicht in die Umwelt gelangt.
- Für zukünftige grössere Projekte sehen wir den Bedarf für Forschung an Alternativen, nicht toxischen und in grossen Mengen verfügbaren Materialien.

4.6 Anwendungsbereiche unserer Technologie und Wertung

Über die Zeit der Bearbeitung dieses Projektes haben sich für die Anwendung zur Rückgewinnung von Abwärme folgende Bereiche als attraktiv dargestellt:

- Automotive Abgasnutzung: In diesem Sektor sind insbesondere die verschiedenen Autohersteller intensiv an der Entwicklung von Lösungen wie BMW, Ford, GM und andere, z.B. Empa mit T-Hex tätig. Die Anwendung ist auch bei grösseren Dieselmotoren möglich (Kraftfahrzeuge, Lokomotiven).
Potential: hoch, Ausbeute: beträchtlich, Medium: heisse Seite Abgas bis 650°C, kalte Seite Wasser bis 80°C **+++**
Mit den erarbeiteten Ideen und dem Wissen des Teams, wäre eine Mitarbeit einzelner Mitglieder des Teams bei einem Projekt, das in dieser Richtung vorankommen möchte, eine Möglichkeit.
- Anwendung im Abgasbereich von Öfen, wie Induktions- und AC/DC-Elektroöfen, Warmhalteöfen, Wärmeangebot im MW-Bereich (zyklisch), Abgasrestwärme bei Feuerungsanlagen / Heizkessel, Müllverbrennungsanlagen,
Potential: mittel, Ausbeute: mittel, Medium: heisse Seite Abgas 650-1200°C, kalte Seite Wasser bis 30°C. **++**
In diesem Bereich wäre eine Testanlage als Einzel- oder Mehrfach-Modul möglich.
- Stromerzeugung bei Heizungen, oder direkt über Brenner (Global Thermoelectric, Telgen)
Potential: mittel, Ausbeute: gering, Medium: heisse Seite Gas bis 650°C, kalte Seite Wasser 10°C / kalte Luft bis unter 0°C. **++**
Anwendung in unwirklichen Gegenden ohne elektrischen Anschluss oder in abgelegenen Gebäuden, wie Alphütten. Eine Anwendung in abgelegenen Gegenden wäre für unsere Lösung möglich.
- Nach Dampferzeugern (Telgen)
Potential: gering, Ausbeute mittel, Medium: heisse Seite Dampf 450-650°C, kalte Seite Wasser bis 30°C **++**
Telgen hat eine interessante Lösung mit Dampf als Energieträger gebaut.
- Niedertemperaturenergie bei Kühlkreisen (Dr. Andreas Bitschi ETHZ BFE Projekt 2011). Mögliche Anwendung z.B. bei Schmelzöfen zur Kühlung der Gefässe, Deckel und der Abgasrohre meist als Rohrkühlerkonstruktion, welche mit Wasserkühlauslauftemperaturen im Bereich von 100°C gefahren werden könnten, ebenfalls bei geschlossenen Kühlkreisen von Warmhalteöfen, Giess-, und Walzwerken, Kühlhauben beim Abkühlen gegossener-, oder gewalzter Teile, bei Kompressoren, Spritzguss-, Knet-, Extrudieranlagen, chem. Prozessen, Solaranlagen im Hybridbetrieb.
Potential: beträchtlich, Ausbeute: gering, Medium: heisse Seite Wasser bis 110 °C, kalte Seite Wasser bis 30°C **+++**
Eine Anwendung bei vielen Wärmeprozessen ist bei schlechtem Wirkungsgrad möglich.

Festlegung Medien/Temperaturen: Aufgrund des zu erreichenden Wirkungsgrades, soll für diese Studie der TEGenerator für die heisse Seite mit Gas/Abluft/Dampf bis 650°C und für die kalte Seite mit Wasser 20°C ausgelegt werden. Eine Anwendung im Niedertemperaturbereich wäre sehr interessant, jedoch ist mit den heutigen Flachmodulen die zurückgewonnene Energiemenge nicht genügend, um diese Anwendung als Produkt darstellen zu können.

4.7 Marktpotential

Im Verlaufe der Bearbeitung sind die Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung von thermoelektrischen Generatoren sichtbar geworden.

- Das grösste Potential besteht sichtbar im Anlagen-Bereich von einzelnen kW.
- Das Potential für die Anwendung von Multi-kW-Anlagen im Abgasbereich ist in unserer Abschätzung kleiner. Mit einer Marktabklärung müsste dieses Segment genauer erfasst werden (chem. Prozesse, andere Wärmeprozesse, Heizkessel/Verbrennungsanlagen etc).
- Eine Anwendung im Niedertemperaturenergiebereich bei einer effizienteren Energiegewinnung wird ein riesiges Potential erschliessen und sollte unbedingt weiter verfolgt werden.

Die Herstellkosten sind nach der Überarbeitung der Konstruktion und Fertigplanung im Détail anzufragen und zu kalkulieren. Grenzkostenbetrachtungen wurden durch Einholen von Offerten für die Flachmodule und die Elektrik, sowie durch abschätzen der Herstellkosten für die mechanischen Teile ermittelt. Die angenommenen Stückzahlen sind durch Befragung des Marktes zu verifizieren.

5. Diskussion / Würdigung der Ergebnisse / Erkenntnisse

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie konnten grundsätzliche Fragen umfassend beantwortet werden. Mit der Bearbeitung sind Erkenntnisse gewachsen, die ermöglichen, die reele Anwendung zur Rückgewinnung von Abwärme mit thermoelektrischen Generatoren darzustellen.

Die gemeinsam erarbeitete Konzeption für ein 1kW TEGenerator und der Verwendung in einem Multi-kW-TEGenerator, ist in dieser Art nicht bekannt. Der erarbeitete Multi kW-TEGenerator kann skaliert werden. Die gezeigte Lösung ist mit 19 1kW-TEGenerator-Einheiten bestückt. Um 50kW zu erreichen, ist denkbar 3 entsprechende Multi-TEGeneratoren hintereinander zu schalten, falls die entsprechende Abwärmemenge vorhanden ist.

Gemeinsam wurden interessante spezifische Lösungen gefunden, z.B Wärmeeintrag über Wabenkontur und Wärmeverteilung über der Länge, die Kühlung der TEGs zwischen einer Innen- und Aussenhaut mit pneumatischer Anpressung über der Aussenhaut. Die Erkenntnisse der Fotovoltaik bei der Verschaltung mit Anwendung von Dioden, Wechselrichtern und Leistungsoptimierern, konnten verwendet werden.

Zudem konnten Erkenntnisse in folgenden Bereichen gewonnen werden:

- Die Führung der Leitungen, insbesondere bei einem Multi-kW-Anlage zu Steckverbindungen, wurden im Detail untersucht.
- Der Vergleich der getroffenen Lösung zu einer 100kW-Fotovoltaikanlage, zeigt einen interessanten Vergleich auf, wie Zyklizität Sommer/Winter, Sonne/Wolken bei der Fotovoltaik.
- Die Kosten der TEG- Flachmodule, die Kosten der elektrischen Anlage und die der mechanischen Teile wurden überlegt.
- Die mögliche Anwendungsbereiche wurden aufgezeichnet und gewertet.

Anwendungsbereiche:

- Die Studie hat sich auf die Verwendung von Heissgas bis ca. 650°C Temperatur festgelegt. Anwendungen für Temperaturen wesentlich über 650°C direkt auf TEGs wurden nicht bearbeitet, da die Entwicklung der möglichen Materialien noch im Gange ist.
- Eine Anwendung im Tieftemperaturenergiebereich wurde wegen des heute noch schlechten Wirkungsgrades, mit den zur Verfügung stehenden Materialien, nicht weiter untersucht.
- Die Nutzung der Abstrahlung wurde nur physikalisch betrachtet, da diese zeigte, dass bei Temperaturen unter 600°C die abstrahlende Energie wirtschaftlich zu gering wird, wenn in Kühlhauben Teile auf Raumtemperatur absinken. Eine Anwendung bei Abgaskanälen mit sehr hohen Temperaturen wie z.B. an Elektroöfen, oder bei kontinuierlich durchlaufenden Produkten mit Temperaturen über 600°C, wäre eine Anwendung über Abstrahlung und in Kombination mit Konvektion möglich.

6. Schlussfolgerungen, Ausblick, nächste Schritte nach Projektabschluss, Anschlussprojekt

Diese Machbarkeitsstudie zeigt einen Weg auf, wie mit käuflichen Flach-TEG-Elementen ein 1-kW-TEGenerator, beziehungsweise ein Multi-kW-TEGenerator gebaut werden kann. Die Anwendung für die Rückführung von Wärmeenergie im kW-Bereich ist am Anfang. Mit der erwarteten Verbesserung der verwendbaren TEG-Materialien wird diese an Bedeutung gewinnen. Die benötigten Investitionen, um diese Technologie voranzubringen, sind beträchtlich. Es bedarf für den nächsten Schritt eine starke Organisation oder mehrere Partner, um die in der Studie dargestellte Lösung voranzubringen. Es stehen einzelne Teammitglieder auch weiterhin innerhalb der Möglichkeiten zur Verfügung. Die Main GmbH als Auftragnehmer ist bereit, sich weiterhin einzubringen.

Im Bereich der relativ tiefen Temperaturen von ca. 100°C gibt es bei Wärmekühlprozessen ein sehr grosses Potential. Die dafür geeignete Materialwahl, auch aus toxischer Sicht, sollte weiter diskutiert werden (heute Bi_2Te_3).

Das Team schlägt im Sinne eines Ausblicks vor, das erarbeitete Produkt als Pilotanlage zu bauen und auszutesten. Einzelne 1kW-TEGeneratoren können in einem Gehäuse zu verschieden grossen Einheiten zusammengefasst werden:

- Es wäre sehr wertvoll 1 bis 3 einzelne 1kW-TEGeneratoren herzustellen und zu testen und parallel ein Multi-kW-Generator z.B. mit 7 Modulen zu erstellen, um die Einflüsse unterschiedlicher Beaufschlagung der Module auf der elektrischen Seite zu verifizieren. Die Anlagen sollten für Heissgas bis 650°C/Kaltwasser 20-80°C eingesetzt werden.
- Es wird vorgeschlagen, davon 1 oder 2 entsprechende 1kW-TEGeneratoren an einem geeigneten Kühlkreis Wasser heiss bei ca. 85-100°C / Kaltwasser bei 20-30°C auszutesten.
- Als Ziel sollte ein neues skalierbares Produkt entstehen.
- Es sollten unbedingt neue TEG-Module erarbeitet werden, die besser und effizienter als die heutigen Module sind. Dazu sollten Beziehungen zur Empa und zu verschiedenen Firmen, die bereits aktiv in dieser Technologie sind, weiter genutzt werden.

In einem Ausführungsprojekt müssen ferner folgende Punkte überlegt werden:

- Kritische Ueberprüfung der Machbarkeitsstudie und der gefundenen Lösung
- Überprüfung der gewählten TEG-Module, allenfalls Einbezug anderer Alternativen
- Festlegung Einsatz, siehe Anwendungsbereiche (z.B. Giesserei, Stahlwerk, Chem. Industrie, Stromerzeugung)
- Abklärungen Team, Partner, Kooperationen, Übernahme
- Überarbeitung und Verfeinerung der Grundlagen, physikalische-, thermomechanische Fluid-Flow Rechnungen
- Überarbeitung der Konstruktion, Detail-Engineering der Demonstrationsanlage
- Abklären Materialwahl
- Fertigungsmöglichkeiten
- Genaue Erfassung der Kosten durch Einholen detaillierter Offerten
- Wahl des Partners für den Einsatz und die Tests der TEGeneratoren
- Einplanung und Anpassungskonstruktion
- Bereitstellungen Daten
- Abklären Fertigung (Abzweiger, Abblendklappen, Kühlung, Aufbauten, Stromeinspeisung)
- Montage
- Tests, Messungen, Auswertungen und Berichterstattung
- Adaption Produkt aufgrund der Messungen und Erfahrung
- Patentschutz, Produktdarstellung, Marktuntersuchung
- Eruierung Kostenübernahme, Finanzierung, zusätzliche Eigner, Businessplan
- Markteinführung

7. Referenzen / Literaturverzeichnis

- Erfahrungen Thermoelektrische Rückgewinnung für einen Hybridantrieb EMPA, dargestellt am Trendwatching Meeting in Rüschlikon am 13.12.2013 von O. Brunko
- T-Hex: Development of a thermoelectric heat exchanger for application in a car, Empa 2013: O.Brunko S.Populoh M.Trottmann, A.Weidenkaff
- Ein Turbo für die Brennstoffzelle HITTEC Empa News Seiten 19-21
- Realisierung thermoelektrischer Generator für Niedertemperaturenergie ETHZ: A.Britschgi
- Global Thermoelectric US Patent 8.362,351 B2 von Stork Fokker , Erteilung 29.1.2014
- PCT-Patent Application-Method for utilisation of thermal energy, in particular in a continuous casting plant, 31.01.2013 Main GmbH
- PCT-Patent Application-Energy-Recovery in Hotstrip Mills, by converting the cooling heat of the continuous casting plant and the residual heat of slabs and coils into electrical energy, or otherwise utilizing the captured process heat, SMS Siemag AG WO 2010/099920 A2
- US-Patent-Module comprising a thermoelectric generator, as well as power source, 29. 01. 2013 Fokker AESP B.V.Stork (Global Theroelectric)
- Publication-Global Thermoelectric CP 8550 Generator Calgary, Alberta,CA
- SMI Wakayama-Works-Blast Furnace Top Gas Recovery System
- Potential and difficulties of heat recovery in steel plants, Carsten Born, Ralf Graderath, Tenova RE Energy GmbH MPT International 2/2013
- vonRoll casting-Spezialisierung Nischenbereich essenziell, Schweiz. Maschinenmarkt 07/2013
- Anfallende und nutzbare Abwärme in einer modernen Giesserei, Dr. Anton Rechsteiner, Trendwatching Meeting Rüschlikon 20012
- Swisselectric Research-Kostengünstige thermoelektrische Generatoren entwickelt-Swiss Award to Dr. Wulf Glatz greenTEG16.09 2012
- Meetings 2012 Rüschlikon, 2013 Dübendorf, Presentation Dr G. Span, www.o-flexx.com
- BMW Benteler Emitec Publikation-Der Thermoelektrische Generator, ein neuer Mitspieler in der Abgasanlage 11/2009
- BMW Emitec-Der Thermoelektrische Generator zur Reduktion der CO₂-Emission-Rekuperation der Energieverluste in Abgassystemen 01/2010
- Bleitellurid mit erhöhter mechanischer Stabilität für zylindrische thermoelektrische Generatoren, Doktorarbeit von Andreas Schmitz, Köln 30.04 2014
- Ford/Amerigon-Combustion Exhaust Gas, Heat to Power, using Thermoelectric Engine, John LaGrandeur 10. 5. 2011
- School of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lavayette, IN USA and GM R+D, Warren, MI, USA-Thermoelectric Generators for Automotive Waste Heat Recovery Systems-Parametric Evaluation and Topological Studies, Sumeet Kumar, Steven Heister, Xianfan Xu, James Salvador, Gregory Meisner 05 .03.20
- GM R+D Publication DEER 2011 The Module Design, Skutterudite Material, need Protection, Durability,Efficiency
- Cornell University Library-Theory of the Spin Seebeck Effect Hiroto Adachi and all. 21.02.2013
- Thermalforce.de- Wie sinnvoll ist der Einsatz von Thermogeneratoren? Steffen Heimke
- Material Safety Data Sheet Bismuth Telluride-ESPI Metals Oregon, S.Dierks rev. April 2011
- Berechnungsgrundlagen, TEG-Berechnungsblatt 9.4.2014 Dr. Markus Roos
- Modellrechnungen 16.04.2014 Dr. Markus Roos
- Thermomechanischer Bericht Nr 1. 04.02.2014 Patrick Hurschler
- Thermomechanischer Bericht Nr 2. 17.06.2014 Patrick Hurschler

Dank an BFE, Empa und TEAM

Main, H. Marti bedankt sich für die Unterstützung bei der Erarbeitung dieser Machbarkeitsstudie, insbesondere bei Herrn Roland Brüniger BFE, Dr. André Heel ZAHW, Dr. Sascha Populoh Empa, Oliver Brunko Empa, Dr. Yves Acremann ETH, Dr. Markus Roos NM Modelling, Gerold Meyer Semix, Samuel Summermatten BeNetz AG, Patrick Hurschler Main und Roland Uebersax Main.

Es hat Freude bereitet, mit diesem Team diese anspruchsvolle Arbeit zu gestalten. Es wäre gut, wenn sich Teammitglieder in einem Anschlussprojekt wiederfinden würden.