

Anwendungspotential thermoelektrischer Generatoren zur Abwärmenutzung in stationären Systemen

C. Stiewe, D. Ebling, E. Müller

Zusammenfassung

Thermoelektrische (TE) Materialien ermöglichen die direkte Umwandlung von Wärme in elektrische Energie und können dadurch zur Steigerung des Wirkungsgrades von Energieanlagen beitragen, autarke Stromquellen realisieren oder industrielle Abwärme in Elektrizität wandeln und für den Betrieb elektrischer Systemkomponenten bereitstellen.

Derzeit am Markt erhältliche TE Wandlermodule sind für Einsatztemperaturen bis maximal 250 °C geeignet. Ein Großteil der verfügbaren Abwärme in technischen Anlagen fällt jedoch bei höheren Temperaturen an. Die Entwicklung von thermoelektrischen Generatoren (TEG) für Heiseitentemperaturen zwischen 400 und 500 °C wird international vorangetrieben.

Die Bewertung der Nutzung industrieller Abwärme zur Verstromung durch den Einsatz von TEG erfordert die Identifikation und Quantifizierung von ungenutzten Abwärmeströmen des jeweiligen industriellen Systems. Entsprechend dem jeweiligen Temperaturbereich sind TEG-Module und –Systeme spezifisch anzupassen.

Application Potential of Thermoelectric Generators for Waste Heat Recovery in Stationary Systems

C. Stiewe, D. Ebling, E. Müller

Summary

Thermoelectric (TE) materials are able to convert directly thermal into electrical energy and can therefore contribute to an increase in efficiency of energy applications, autarcic power sources or to convert industrial waste heat into electricity for powering electrical system components.

Actual commercially available TE converter modules are usable for application temperatures of maximum 250 °C. A large quantity of the waste heat in technical systems is available at higher temperatures. Thermoelectric generators (TEG) for hot side temperatures between 400 and 500 °C are under development internationally.

The evaluation of utilizing industrial waste heat for electrical power generation using TEG requires the identification and quantification of unused heat flows of the individual industrial system. According to the temperature range specifically adapted TEG modules and systems are necessary.

Autoren

Dr. Christian Stiewe¹

Dr. Dirk Ebling²

Prof. Dr. Eckhard Müller^{1,3}

¹ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Institut für Werkstoff-Forschung, 51147 Köln

² Hochschule Niederrhein, Institut für Oberflächen-Technologie, 47805 Krefeld

³ Justus-Liebig-Universität Gießen, Institut für anorganische und analytische Chemie, 35392 Gießen

Einleitung

Vor dem Hintergrund der Energiewende wird die Frage einer gesicherten Energieversorgung insbesondere auch unter dem Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit in der Zukunft eine zunehmende Rolle spielen. Die Strompreisentwicklung der vergangenen Jahre weist einen starken Aufwärtstrend auf, der absehbar weiterhin anhalten wird [1, 2]. So ist die effizientere Nutzung von Abwärme bei energieintensiven Prozessen von besonderem Interesse. Dies wird durch unterschiedliche technische Ansätze (Kraft-Wärme-Kopplung, Organic Rankine Cycle, Kalina-Prozess u.a.) adressiert. Diese Konzepte zielen auf große Energieerzeuger und -verbraucher, bei denen noch immer ein großer Teil der eingesetzten Wärme ungenutzt an die Umgebung abgegeben wird. Die Nutzung vorhandener Wärmequellen ohne aufwändige Infrastruktur wurde bisher wenig thematisiert. Diese Art von Energienutzung wird z.T. durch das Erneuerbare-Energien-Wärme-Gesetz (EEWärmeG) und das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), beschrieben.

Berücksichtigt man, dass ca. zwei Drittel der eingesetzten Primärenergie aus verschiedenen Sektoren (Automotive, Industrie, Haushalte, ...) im ersten Umsetzungsprozess ungenutzt bleiben, wird das immense Potential für die Abwärmenutzung deutlich. Durch die Großindustrie (Glashütten, Stahlerzeugung, Aluminium- und Kunststoffverarbeitung, Keramik- und Papierherstellung u.a.), aber auch beim mittleren und Kleingewerbe fallen sehr große Mengen an Abwärme an, die bisher mit dem Kühl- oder Abwasser bzw. durch die Abluft in die Atmosphäre abgegeben werden. Vielfältige Ansätze zur Nutzung dieser Abwärme gibt es bereits; einer davon adressiert die Nutzung thermoelektrischer Generatoren (TEG) [3].

Thermoelektrische Generatoren

Thermoelektrische Generatoren (TEG) sind in der Lage, über einen Festkörpereffekt Wärme ohne mechanische Bewegung direkt in elektrische Energie umzuwandeln. Sie stellen damit eine Alternative zu elektrischen Maschinen nach dem Dynamoprinzip dar, auch insofern, als durch TEG Gleichstrom erzeugt wird. Ein TEG besteht aus Wärmetauschern an der Heiß- und Kaltseite, einem meist plattenförmigen thermoelektrischen Modul (siehe Abbildung 1 und Abbildung 3) und ggf. einer DC/DC-Wandler-Elektronik zur Einspeisung der elektrischen Energie in eine Batterie oder das externe Netz. Die über das Modul abfallende Temperaturdifferenz führt dazu, dass mit dem Wärmestrom ein elektrischer Strom durch das thermoelektrische Bauteil getrieben wird. Mit diesem Prinzip verbindet sich eine sehr kompakte Bauweise (plattenförmige Module von wenigen mm Dicke), Langlebigkeit, hohe Zuverlässigkeit ohne Wartungsbedarf, was insbesondere im dezentralen Einsatz oder an schwer zugänglichen Stellen in Großanlagen einen erheblichen Vorzug gegenüber etablierten Technologien wie z. B. ORC oder Stirling bietet. Im Raumfahrteinsatz haben TEG ihren jahrzehntelangen störungsfreien Betrieb unter Beweis gestellt, u.a. in der jüngst beendeten sehr erfolgreichen NASA-Mission Cassini. TEG sind weitaus unempfindlicher gegenüber diskontinuierlichen Primärwärmeströmen als herkömmliche Verfahren. Allerdings hat sich die Technologie auf-

grund des bislang relativ geringen Wirkungsgrades kommerzieller thermoelektrischer Module bisher nur in einigen Nischenanwendungen stabil etablieren können.

Thermoelektrisch erzeugte elektrische Leistung ist aufgrund der noch zu hohen Investitionskosten für TEG (vor allem aufgrund des Fehlens etablierter Herstellungstechnologien) bislang gegenüber der konventionellen Stromversorgung wirtschaftlich nicht konkurrenzfähig. Insbesondere sind wegen des niedrigen Wirkungsgrades thermoelektrische APUs (auxiliary power units – TEG-Hilfsstromquellen mit eigenständiger Brennstoffversorgung) in Standardsituationen nicht wirtschaftlich. Veränderte ökonomische Bedingungen liegen für die netzferne bzw. netzautarke Stromversorgung vor, in mobilen Systemen oder wenn Steuer-, Mess- bzw. Überwachungssysteme mit geringer Leistungsaufnahme dauerhaft mit extrem hoher Versorgungssicherheit betrieben werden sollen. Günstige Randbedingungen bestehen auch bei Nutzung vorhandener Abwärmequellen, da hier kein technischer Aufwand für eine separate Wärmequelle erforderlich ist und die Primärwärme kostenfrei zur Verfügung steht. Insbesondere in stationären Energieanlagen mit kontinuierlichem Betrieb über sehr lange Zeiträume können TEG aufgrund ihres jahrzehntelangen wartungsfreien Betriebs rentabel eingesetzt werden.

Niedertemperatur-TEG

Der aktuelle Stand der Technik wird im kommerziell etablierten Bereich fast ausschließlich durch Module aus Bismuttellurid (Bi_2Te_3) und seinen Mischkristallen geprägt. Dieses Material erzielt bei Temperaturen bis zu ca. 100 °C seinen höchsten Wandlungswirkungsgrad. Damit ist ein Einsatz nur für Anwendungen im Niedertemperaturbereich (< 250 °C) sinnvoll; zudem erlaubt auch die eingeschränkte thermische Stabilität von Bi_2Te_3 keinen Einsatz bei höheren Temperaturen. TEG-Peltier-Module auf Basis von Bi_2Te_3 werden kommerziell breit vertrieben. Mit speziellen TEG-Modulen werden maximale Wirkungsgrade bis zu 7.2 % und Leistungsdichten bis ca. 1 Wcm^{-2} erreicht [4]; die meisten handelsüblichen Peltier-Module erreichen wegen der eingeschränkten Temperaturbelastbarkeit im TEG-Betrieb nur 3–4%.

Die Nutzbarkeit von kommerziell erhältlichen thermoelektrischen Modulen für die Abwärmenutzung konnte kürzlich in dem Projekt ENERTEG erfolgreich demonstriert werden, das durch das Ministerium für Wirtschaft, Energie, Industrie, Mittelstand und Handwerk, NRW, gefördert wurde (2013–1015). Hierbei wurde in einem Umformprozess für Stahl die Verlustwärme beim Abkühlen der Formteile über Strahlungskopplung durch TEG genutzt (siehe Abbildung 2), die eigens für die mechanischen und thermischen Belastungen im industriellen Prozess angepasst wurden. Dabei konnten Wirkungsgrade von ca. 3% oder ca. 1 kW/m^2 Wärmetauscherfläche erreicht werden[5].

Hoch-Temperatur-TEG

TE Module aus Bleitellurid-Materialien (dotiertes PbTe und $(\text{Pb},\text{Sn})\text{Te}$) werden praktisch seit Jahrzehnten in konfektionierten Komplettsystemen eingesetzt, sind jedoch als Einzelmodule kaum erhältlich. Sie finden bislang in recht geringem Umfang Anwendung, wobei die Einsatz-

fälle im Hinblick auf thermische Zyklierung und mechanische Beanspruchung oft weniger anspruchsvoll sind als im Automobil. So haben sich Module auf Basis von PbTe neben der Raumfahrtanwendung (Radioisotopengeneratoren für Satelliten und Lande-Module) für den kathodischen Korrosionsschutz von Pipelines bewährt¹. Bei dieser Anwendung ist die Wandlungseffizienz nicht das entscheidende Kriterium, und die konstanten Betriebsbedingungen sowie ein in der Regel nicht limitierter Bauraum lassen einen vergleichsweise einfachen Generatorkonstruktion zu. PbTe als TE Material selbst konnte in den vergangenen Jahren massiv weiterentwickelt werden. So wurde unter Laborbedingungen für n-leitendes PbTe ein ZT-Wert von rund 1.4 bei einer Temperatur von 450 °C erreicht [6], während für das p-leitende Bleitellurid sogar bis zu 2.2 bei 550 °C berichtet wurde [7].

Nicht nur das TE Material selbst ist für die Effizienz thermoelektrischer Wandler ausschlaggebend. Eine Reihe von technologischen Aspekten ist darüber hinaus zu berücksichtigen, um die Materialeigenschaften möglichst verlustfrei in der Anwendung wirksam werden zu lassen. Einer ausgereiften Modultechnologie (insbesondere der Verbindungstechnik der TE Materialien mittels elektrisch und thermisch hoch leitender Kontaktierungen) und der spezifischen Systemintegration (Anpassung der Modulgeometrie auf den vom System bereitgestellten Wärmefluss) kommen hier große Bedeutung für den erreichten Gesamtwirkungsgrad und die langzeitliche Funktionsstabilität des Systems zu.

Durch den prinzipiellen Aufbau thermoelektrischer Generatoren, welcher auf einer elektrischen Reihen- und thermischen Parallelschaltung der p- und n-leitenden Halbleiterelemente (Pellets) beruht, ist eine Vielzahl interner Kontaktflächen bedingt (siehe Abbildung 3), die jeweils mit einem unerwünschten thermischen und elektrischen Widerstand behaftet sind. Für jede auftretende Materialkombination ist in einem aufwändigen separaten Entwicklungsprozess eine Einzellösung für eine haltbare und langfristig temperaturstabile Kontaktierung zu finden. Neben der rein thermoelektrischen Funktionsoptimierung sind hier insbesondere Fragen der Thermomechanik, Thermozyklrierbarkeit, der mechanischen Integrität bei Schock und Vibration und der chemischen Langzeitstabilität durch eine individuell angepasste Aufbau- und Verbindungstechnologie (AVT) zu lösen. Die international noch zu geringe Fokussierung der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten auf diese Problematik ist ein Hauptgrund, weshalb den seit Jahren ansprechenden Ergebnissen bei der Materialgüte neuer HT-Materialien wenige ausgereifte Modulentwicklungen gegenüber stehen. In jüngster Vergangenheit wird jedoch vermehrt im Zuge von Präsentationen² und Publikationen [8-10] von erfolgreichen Modulrealisierungen für den Hochtemperaturbereich berichtet.

Beispielgebend sind hier die auf den Raumfahrteinsatz ausgerichteten Aktivitäten des Jet Propulsion Laboratory der NASA in Pasadena. Für den Einsatz in RTG wurden zur Realisierung von segmentierten TE-Materialverbunden, bestehend aus Bi₂Te₃-Mischkristallen und Skut-

¹ <http://www.globalte.com>

² Z.B. <http://www.hotblock.fr/> oder <http://tecteg.com/>

teruditen Entwicklungsschritte für die AVT bis hin zur Implementierung von prototypisch hergestellten Modulen in ein Gesamtsystem erfolgreich realisiert [11].

Auch in China laufen intensive und fachlich hochstehende Aktivitäten, so am Shanghai Institute of Ceramics der Chinesischen Akademie der Wissenschaften (SIC CAS), wo langzeitstabile Kontaktverbindungen zwischen TE Material und elektrischer Brücke mit einer Einsatztemperatur bis 500 °C entwickelt werden konnten [12]. Auch in Österreich werden forcierte Anstrengungen unternommen, auf Skutterudit-Basis modular aufgebaute TEG für den Einsatz im Fahrzeug zu entwickeln [13, 14].

Im Hinblick auf ein effektives Gesamtsystem (Kosten, Gewicht, Leistungsdichte, Effizienz) sind Grenzflächeneigenschaften und mechanische Materialeigenschaften nicht nur im Modul selbst sondern auch in der unmittelbaren Systemumgebung des TEG optimal einzustellen, da sich die Leistungsfähigkeit der Wärmetauscher gleichermaßen durch geringe Übergangsverluste, die Stabilität von Verbunden und die Strukturintegrität der Bauteilkomponenten bestimmt. Der Erfolg der thermoelektrischen Energierückgewinnung hängt deshalb vor allem von zwei Fragestellungen ab: Wie gelingt die möglichst verlustfreie, stabile elektrische Kontaktierung der Materialien, und wie gewährleistet man einen maximalen Wärmefluss zwischen Wärmeträger (Abgas, Fluid, heißes bzw. kaltes Bauteil/Aggregat) und thermoelektrischem Material. Da jede Grenzfläche im Wärmestrompfad prinzipiell einen Temperaturabfall bedeutet, kann nur ein integriertes Generatordesign, in dem das thermoelektrische Modul möglichst direkt und verlustarm mit der Wärmequelle verbunden ist, zum Erfolg führen. Abseits des Niederleistungsbereichs (mW bis einige W) wurde ein solches integriertes Modulkonzept für TEG bislang weder im Automobil- noch im stationären Bereich breiter etabliert. Andererseits ist aus der Fahrzeugerprobung bekannt, dass bei Volllast zu hohe Heißeitens Temperaturen am Abgas-TEG vorliegen, die eine Zerstörung zur Folge haben können. Über einen Bypass in der Abgasführung kann der Zustrom zum Schutz der Rekuperationsaggregate abgeregelt werden. In jedem Fall bedarf es einer systemübergreifenden Betrachtung der Auswirkungen des Einsatzes von TEG für die komplette Bandbreite möglicher Betriebszustände, um verlässliche Aussagen zur Eignung bzw. zum Potential treffen zu können.

International werden die grundlagenorientierte Optimierung der TE Materialeigenschaften und die Suche nach neuen Materialklassen anhaltend stark vorangetrieben. Ebenso verfolgen immer mehr Arbeiten der Forschungsinstitutionen, Automobilhersteller und ihrer Zulieferer Fragestellungen zur Wirtschaftlichkeit der TEG und berichten in diesem Zusammenhang über die Aufskalierung von Fertigungsabläufen [15-18] und die Prüfung von Ausgangsmaterialien technologischer Qualität zur Substitution teurer hochreiner Ausgangsstoffe [19-21].

Die Abwärmemengen in industriellen Anwendungen sind immens hoch. Allein aus der Abkühlenergie bei der Umformung von Aluminium bzw. Stahl ergeben sich signifikante Energieeinsparpotentiale. Geht man von einem derzeitigen Strompreis für die Industrie von ca. 15

ct/kWh aus [1], so lässt sich eine Amortisierungsdauer von ca. 9 Jahren für ein TEG-System berechnen. Dieser Abschätzung liegen Kostenannahmen von 10 €/W für die TE Module³ sowie zusätzliche 2 €/W für das System eines TEG (Wärmetauscher, elektrische Verschaltung usw.) zugrunde, die sich auf gegenwärtige Preise für geringe Stückzahlen beziehen. Nach Aussagen der Industrie sind Amortisierungszeiten von bis zu 5 Jahren akzeptabel, während 10 Jahre als deutlich unrentabel beurteilt werden. Hieraus ergibt sich eine klare Zielsetzung zur kosteneffektiveren Herstellung von TEG-Systemen. Kosten im Bereich von 2–4 €/W für TE Module sind dabei derzeit akzeptabel.

Die Verringerung der Herstellungskosten von TE Modulen z.B. durch die Einführung automatisierter Massenproduktion, ist geeignet, TEG-Systeme für viele Anwendungen attraktiv zu machen. Abschätzungen zeigen, dass sich für bestimmte Anwendungen die Amortisierungsdauer durch den Einsatz von Hochtemperaturmodulen etwa halbieren lässt. Dieses Ziel gilt es durch die Förderung von technologischen Entwicklungen zu unterstützen, um Amortisierungszeiten von max. 4 Jahren zu realisieren.

Roadmap

Für Temperaturen bis 250 °C können kommerziell verfügbare TE Module mit typischen Wirkungsgraden von 3-4% eingesetzt werden. Zum Aufbau eines solchen TEG werden Wärmetauscher für die Heiß- und Kaltseite der TE Module benötigt, die auf die jeweilige Anwendung abgestimmt sein müssen. Der Fokus der Entwicklung liegt hier auf der Darstellung angepasster Systeme zur optimalen Abwärmennutzung.

Im Bereich oberhalb 250 °C sind derzeit nur wenige Anbieter kommerzieller TE Module bekannt. Hocheffiziente TE Materialien wurden identifiziert und wesentliche Fortschritte beim Aufbau thermoelektrischer Hochtemperatur-Module wurden in den vergangenen Jahren erzielt; hier sind weitere F&E-Arbeiten besonders im Bereich der Langzeitstabilität zu leisten.

Bei der Nutzung industrieller Abwärme durch thermoelektrische Generatoren wurden bislang nur wenige Anwendungen demonstriert (siehe z.B. ⁴ und [22]). Günstig ist eine Wärmestromdichte in der Größenordnung von mindestens 10 W/cm², damit die elektrische Leistungsausbeute pro TE Modul ausreichend hoch ist. Andernfalls sinkt die spezifische Leistung, was sich nachteilig auf Kosten und Amortisationszeiten auswirkt. Besonders vorteilhaft sind Konstellationen, in denen hohe Wärmeflüsse bei hohen Temperaturdifferenzen bereitstehen. Demgegenüber ist z. B. die Nutzung der Abwärme von Kühltürmen aufgrund der geringen Wärmestromdichten kaum möglich, wenn man keinen direkten Kontakt zu den Heißwasserleitungen nutzen kann. Bei vielen industriellen Prozessen treten jedoch deutlich höhere Wärmestromdichten auf.

Im höheren Leistungsbereich besteht eine Konkurrenzsituation der TEG zu ORC-Anlagen mit typischen Wirkungsgraden von 10–20%. In bestimmten Szenarien wiegen aber Vorzüge der

³ z.B. HZ20-Module der Fa. Hi-Z, USA

⁴ <http://www.kelk.co.jp/english/generation/index.html>

Thermoelektrik wie Langlebigkeit, hohe Zuverlässigkeit und minimaler Wartungsaufwand den geringeren Wirkungsgrad auf. Hier muss eine genaue Analyse der Einsatzbedingungen und Aufwandsabschätzungen im Einzelfall über die Systemwahl entscheiden.

Es zeigt sich, dass die Möglichkeiten und Chancen der Thermoelektrik im industriellen Umfeld vielfach noch zu wenig bekannt sind. In der Kommunikation zu Anwendern konnte großes Interesse für die Thematik geweckt werden, es wurde aber auch deutlich, dass vielfach konkrete Angaben über bereitstehende Abwärmemengen und -temperaturen nur in unzureichendem Maße vorliegen.

Insgesamt gibt es für die Nutzung industrieller Abwärme zur Verstromung durch den Einsatz von TEG großes Potential. Jedoch sind bereitstehende Abwärmemengen und ihre Stromdichten von Betreibern bislang oft nicht ausreichend analysiert. Die Identifikation und Quantifizierung von ungenutzten industriellen Abwärmeströmen bedarf der Unterstützung durch die Industrie und erfordert eine genaue Betrachtung des jeweiligen technischen Systems, der individuellen Einsatzmöglichkeiten, der Implementierung von Wärmetauschern in bestehende Prozesse, auftretende Temperaturen und Wärmeströme. Solche Analysen sind Voraussetzung für eine zuverlässige quantitative Bewertung der Nutzenpotentiale.

Literatur

1. BDEW-Strompreisanalyse Mai 2017, 2017, BDEW - Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.: <https://www.bdew.de/internet.nsf/id/bdew-strompreisanalyse-de>.
2. DIHK - Faktenpapier Strompreise in Deutschland 2017, 2017, Deutscher Industrie- und Handelskammertag: <https://www.dihk.de/themenfelder/innovation-und-umwelt/info/faktenpapiere>. p. 55.
3. Stiewe, C. and E. Müller, *Anwendungspotential thermoelektrischer Generatoren in stationären Systemen – Chancen für NRW: Studie im Auftrag des Ministeriums für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen 2015*, Ministerium für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen online. p. 84.
4. Kaibe, H., et al., *Thermoelectric generating system attached to a carburizing furnace at Komatsu Ltd., Awazu Plant*. AIP Conference Proceedings, 2012. **1449**(1): p. 524-527.
5. Ebling, D.G., et al., *Development of a System for Thermoelectric Heat Recovery from Stationary Industrial Processes*. Journal of Electronic Materials, 2016. **45**(7): p. 3433-3439.
6. LaLonde, A.D., et al., *Lead telluride alloy thermoelectrics*. Materials Today, 2011. **14**(11): p. 526-532.
7. Zhang, X. and L.-D. Zhao, *Thermoelectric materials: Energy conversion between heat and electricity*. Journal of Materiomics, 2015. **1**(2): p. 92-105.
8. Salvador, J.R., et al., *Thermal to Electrical Energy Conversion of Skutterudite-Based Thermoelectric Modules*. Journal of Electronic Materials, 2012. **42**(7): p. 1389-1399.
9. García-Cañadas, J., et al., *Fabrication and Evaluation of a Skutterudite-Based Thermoelectric Module for High-Temperature Applications*. Journal of Electronic Materials, 2013. **42**(7): p. 1369-1374.
10. Zhang, Y., et al., *High-temperature and high-power-density nanostructured thermoelectric generator for automotive waste heat recovery*. Energy Conversion and Management, 2015. **105**(Supplement C): p. 946-950.
11. El-Genk, M.S., et al., *Tests results and performance comparisons of coated and uncoated skutterudite based segmented unicouples*. Energy Conversion and Management, 2006. **47**(2): p. 174-200.
12. Zhao, D., H. Geng, and L. Chen, *Microstructure Contact Studies for Skutterudite Thermoelectric Devices*. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2012. **9**(4): p. 733-741.
13. Salzgeber, K., et al., *Thermoelectric materials for automotive applications?* Journal of Electronic Materials, 2010. **39**: p. 2078-2078.
14. Micallef, A., et al. *Detachable Contacts for Simultaneous Thermoelectric Characterization*. in *36th International Conference on Thermoelectrics*. 2017. Pasadena, USA.
15. Biswas, K., et al., *High-performance bulk thermoelectrics with all-scale hierarchical architectures*. Nature, 2012. **489**: p. 414-418.
16. Guo, Q.-S., et al., *Microstructure and thermoelectric properties of p-type filled skutterudite $Ce_{(0.3)}Fe_{(1.5)}Co_{(2.5)}Sb_{(12)}$ prepared by melt-spinning method*. Acta Physica Sinica, 2010. **59** (9): p. 6666-6672.

17. Rogl, G., et al., *Multifilled nanocrystalline p-type didymium - Skutterudites with ZT > 1.2*. Intermetallics, 2010. **18**(12): p. 2435 - 2444.
18. Rogl, G., et al., *In-doped multifilled n-type skutterudites with ZT = 1.8*. Acta Materialia, 2015. **95**: p. 201-211.
19. Zhang, L., et al., *Mechanical properties of filled antimonide skutterudites*. Materials Science and Engineering: B, 2010. **170**(1-3): p. 26 - 31.
20. Zhang, L., et al., *MmFe₄Sb₁₂- and CoSb₃-based nano-skutterudites prepared by ball milling: Kinetics of formation and transport properties*. Journal of Alloys and Compounds, 2009. **481**(1-2): p. 106-115.
21. LeBlanc, S., *Thermoelectric generators: Linking material properties and systems engineering for waste heat recovery applications*. Sustainable Materials and Technologies, 2014. **1-2**(Supplement C): p. 26-35.
22. Kuroki, T., et al., *Thermoelectric Generation Using Waste Heat in Steel Works*. Journal of Electronic Materials, 2014. **43**(6): p. 2405-2410.
23. Schmitz, A., C. Stiewe, and E. Müller, *Preparation of Ring-Shaped Thermoelectric Legs from PbTe Powders for Tubular Thermoelectric Modules*. Journal of Electronic Materials, 2013. **42**(7): p. 1702-1708.

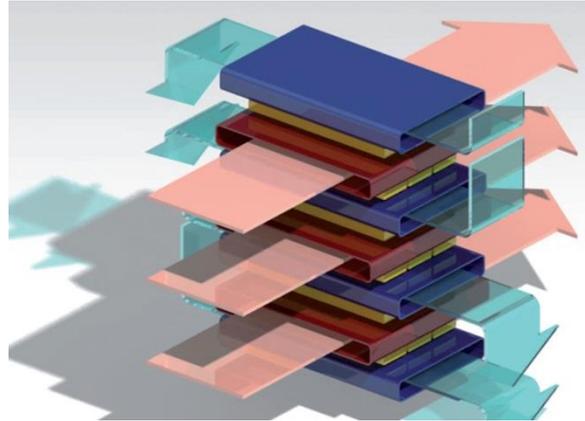


Abbildung 1: Lamellares Aufbaukonzept eines TEG mit Heiß- und Kaltseitenwärmetauschern (rot und blau) sowie thermoelektrischen Modulen (gelb)



Abbildung 2: TEG-Demonstrator über Abkühlband (rechts oberhalb der Bildmitte; Werkbild Fa. Seissenschmidt GmbH). Für die durchgeführten Praxisversuche wurden die Demonstratoren über einem Abkühlband einer Hatebur-Pressen installiert

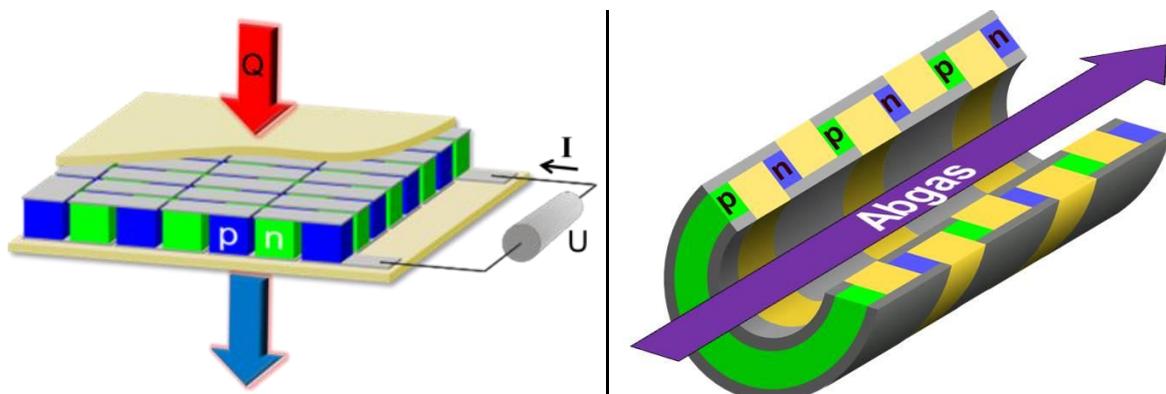


Abbildung 3: Schematischer Aufbau eines thermoelektrischen Generators; gekennzeichnet sind p- und n-leitende Halbleiterelemente. Links: planare Ausführung, rechts: zylindrisch [23]