

Informationsbroschüre

Thermoelektrik: Grundlagen und Anwendungen

Stromerzeugung, Temperierung und Sensorik



Inhalt

Vorwort	4
Physikalische Grundlagen	6
Was ist Thermoelektrik?	7
Wie funktioniert Thermoelektrik?	9
Was sind "gute" thermoelektrische Materialien?	13
Thermoelektrische Materialien	15
Aufbau und Herstellung thermoelektrischer Module	21
Kontaktierung von thermoelektrischem Halbleiter und Kontaktbrücke	22
Oxidationsschutz	23
Stabilitätsaspekte	24
Welche Hochtemperatur-Module gibt es am Markt? Maximale Temperaturen?	25
Segmentierung / Kaskadierung	25
Flexible Module	26
Industrialisierung von thermoelektrischen Hochtemperatur Modulen (> 400 °C)	27
Anwendungsbeispiele der Thermoelektrik	28
Thermoelektrikanwendungen in der Raumfahrt: Die Welt ist nicht genug	31
Thermoelektrische Generatoren (TEG) zur Effizienzsteigerung in Kraftfahrzeugen	33
Energiewandlung – (Ab-)wärmenutzung mit thermoelektrischen Generatoren	38
Thermoelektrische Sensoren / Thermoelemente	41
Thermoelektrische Kühler (TEC) / Temperierung / Peltier-Module	44
Marktpotential	46
Literatur	48
Impressum	52



Autoren

Inhaltliche Koordination
Dr. Hans-Peter Martin, Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS, Dresden
Grundlagenphysik
Prof. Dr. Eckhard Müller, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Frontier Materials auf der Erde und im Weltraum, Köln, sowie Justus-Liebig-Universität Gießen
Materialien
FH-Prof. i. R. Dr. Karl-Heinz Gresslehner, ehemals FH-Wels
Module
Dr. Christian Stiewe, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Frontier Materials auf der Erde und im Weltraum, Köln
Arno Fey und Nils Rink, Isabellenhütte Heusler GmbH & Co. KG, Dillenburg
Anwendungen
Arne Stumpf, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart
Raumfahrt
Jun.-Prof. Dr. Johannes de Boor, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Frontier Materials auf der Erde und im Weltraum, Köln, sowie Universität Duisburg-Essen
Fahrzeugtechnik
Dr. Martin Kober, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart
Energiewandlung
Arne Stumpf, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart
Sensorik
FH-Prof. i. R. Dr. Karl-Heinz Gresslehner, ehemals FH-Wels, Dr. Gabriel Zieger, Leibniz Institut für Photonische Technologien, Jena
Temperierung/Peltier
Nils Katenbrink, Quick-Ohm Küpper & Co. GmbH, Wuppertal, Reinhard Sottong, Ferrotec Europe GmbH, Unterensingen

Vorwort

Mit diesem Artikel soll ein Überblick über aktuelle Entwicklungen und zum Potenzial der Thermoelektrik als Technologie gegeben werden. Die Deutsche Thermoelektrik-Gesellschaft e. V. (DTG) setzt sich dafür ein, das Verständnis für thermoelektrische Phänomene, Produkte und Anwendungen zu fördern. Dabei fungiert sie als Bindeglied zwischen allgemein Interessierten, Anwendern, Wissenschaftlern, Technikern und Marktteilnehmern.

Die Motivation für die Erstellung dieses Artikels durch Mitglieder der DTG beruht auf deren langjähriger wissenschaftlicher und praktischer Expertise. Ziel ist es, die genannten Interessengruppen zu erreichen und über aktuelle Entwicklungen sowie die Möglichkeiten thermoelektrischer Technologien zu informieren.

Bereits vor mehr als 200 Jahren beschrieben Alessandro Volta und Thomas Johann Seebeck als erste moderne Forscher thermoelektrische Effekte. In der Folgezeit wurde die so generierte elektrische Spannung als verlässliche Quelle für wissenschaftliche Versuche mit Elektrizität genutzt. In der heutigen Zeit werden thermoelektrische Wirkungen in vielen Industriebereichen und in der Medizintechnik vorteilhaft eingesetzt. Unter Nutzung des Seebeck- und Peltier-Effektes kann dabei entweder Wärme in elektrische Energie gewandelt werden, oder es wird durch Einsatz von elektrischer Energie ein Wärmestrom für exakte und schnelle Temperierungen genutzt. Ebenso können exakte Messungen von Temperatur und weiteren Parametern realisiert werden.

Die direkte festkörperphysikalische Wandlung von Wärmeenergie und elektrischer Energie unterscheidet sich deutlich von Energiewandlungen in Dampfkraftprozessen, bei denen die Transformation über eine mechanische Bewegung und häufig mit größerer Anlagentechnik erfolgt. Physikalisch bewegungsfreie Energietransformationen werden sonst nur in der Photovoltaik in größerem Maßstab technisch genutzt.

Als thermoelektrische Bauelemente in großer Stückzahl werden Peltier-Elemente, die zur Kühlung und Temperierung von Bauteilen verwendet werden, eingesetzt. Beispielsweise werden die Laserdioden für Datenübertragung in Glasfasern mit Peltier-Elementen gekühlt. Auch in der Medizintechnik steigt der Bedarf an diesen kleinen, hochpräzisen und effektiven Temperierbausteinen, da Polymer Chain Reaction (PCR)-Tests und andere Laboruntersuchungen an Bedeutung für zuverlässige medizinische Diagnosen gewinnen. Im Bereich der IT ist die Peltier-Technik

platzsparend, adaptierbar und effizient bei der Kühlung von Mikroprozessoren nutzbar eingesetzt. Auch andere Anwendungen wie Wärmetherapien oder mobile Kühlung und weitere Herausforderungen zum thermischen Management werden mit den kompakten Peltiermodulen gelöst. Der unikale Vorteil der Peltier-technik ist die einfach umsetzbare präzise Temperaturregelung auf kleinstem Raum.

Die direkte thermoelektrische Wandlung von Wärme in elektrische Energie ist in der Raumfahrt der zuverlässigste Weg zur Bereitstellung von Elektroenergie in sonnenfernen Flugkörpern. Als Wärmeenergiequelle in Kombination mit thermoelektrischen Generatoren (TEG) dienen dabei Radioisotopen-Generatoren. Die entscheidenden Vorteile für die Raumfahrtanwendung sind hier der geringe Platzbedarf, das niedrige Gewicht und die absolute Zuverlässigkeit und Wartungsfreiheit über viele Jahre. Mittlerweile halten auch terrestrischen Anwendungen bisher ungenutzte Potentiale zur Transformation von Wärme in elektrische Energie bereit. Trotz der etwas geringeren Wandlungseffizienz im Vergleich zu anderen Methoden besteht der entscheidende Vorteil thermoelektrischer Generatoren in ihrer Modularität und Anpassungsfähigkeit, sodass bislang ungenutzte Abwärmeenergie im kleinen bis mittleren Leistungssegment in einem breiten Temperaturbereich (40 – 600 °C) nahezu wartungsfrei und damit kosteneffizient transformiert werden kann.

Darüber hinaus sind thermoelektrische Generatoren zur autarken Stromversorgung für niedrigen elektrischen Leistungsbedarf nutzbar. Der Korrosionsschutz von Pipelines durch die Anhebung des elektrischen Potentials der Rohre greift beispielsweise auf die Stromversorgung aus thermoelektrischen Generatoren zurück. Gerade in der elektrischen Generatorik konnten in den letzten Jahren im Bereich der thermoelektrischen Wandler bemerkenswerte Fortschritte erzielt werden. Daraus ergeben sich immer mehr Anwendungsfälle mit einem akzeptablen Kosten-Nutzen-Verhältnis. Die derzeitigen Anforderungen im Energie- und Verkehrsbereich, sowie in der Industrie bieten neue Chancen für diese Technologie.

Eine seit langem genutzte Option der Thermoelektrik ist die Messung von Temperaturen mit Hilfe von Thermopaaren aus werkstofflich unterschiedlichen Partnern, wie bspw. Nickel-Chrom/Nickel. Die durch die unterschiedlichen Seebeck-Koeffizienten der Materialien und die Temperaturdifferenz zwischen

Mess- und Referenzstelle generierte elektrische Spannung liefert ein zuverlässiges elektrisches Messsignal.

In nahezu allen relevanten Industriebereichen und im alltäglichen Leben werden thermoelektrische Produkte oder Komponenten bereits in hohen Stückzahlen eingesetzt. Dabei findet die Rohstoff- und Komponenten-Abhängigkeit thermoelektrischer Produkte in Europa von internationalen Lieferketten noch zu wenig wirtschaftspolitische Aufmerksamkeit. Andererseits gibt es in Deutschland und in Europa sehr viel Wissen, Technologie und spezialisierte Firmen, die den Aufbau von Fertigungslinien für Peltier-Elemente und thermoelektrische Generator-Module zukünftig auch in der EU ermöglichen können. Damit könnte ein Beitrag zur Lösung von zukünftigen Aufgabenstellungen geleistet und dynamische Märkte besetzt werden. Als Deutsche Thermoelektrik-Gesellschaft e. V. möchten wir mit den folgenden Darstellungen den Blick hierauf lenken und zur Wahrnehmung der Potenziale aus der Thermoelektrik beitragen.

Ihr Vorstand der Deutschen
Thermoelektrik-Gesellschaft e. V.

Dr.-Ing. Martin Kober,
Dr.-Ing. Hans-Peter Martin und
Dipl.-Ing. Nils Katenbrink

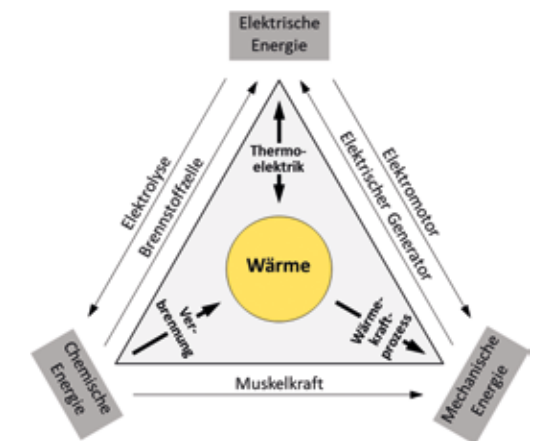


Abbildung 1: Energiedreieck nach Dolezal, 1983.

Eigene Darstellung in Anlehnung an Dolezal, 1983

Physikalische Grundlagen

Was ist Thermoelektrik?

Thermoelektrik ist das **Mitführen eines Wärmefflusses mit einem elektrischen Strom** und damit ein elektrisch angetriebenes Pumpen von Wärme einerseits und die direkte **Umwandlung eines Teils eines fließenden Wärmestroms in elektrische Leistung** andererseits – die Thermoelektrik funktioniert bei der Wandlung zwischen elektrischer und Wärmeenergie in beide Richtungen. Das Grundprinzip fand Thomas Johann Seebeck 1821, als er beobachtete, dass eine Kompassnadel in der Nähe von zwei unterschiedlichen, miteinander zu einem geschlossenen Ring verbundenen Metallkörpern ausgelenkt wird, wenn man eine der Verbindungsstellen zwischen den Körpern erwärmt (Seebeck, 1821). Die Auslenkung der Nadel nimmt dabei mit der Temperaturdifferenz zwischen beiden Verbindungsstellen zu. Grund ist ein elektrisches Feld, das durch das Temperaturgefälle in den Leitern entsteht. Es generiert einen elektrischen Strom im Ring, der ein Magnetfeld erzeugt, welches die Magnetnadel auslenkt.

Jean C. A. Peltier entdeckte 1834, dass sich dieser Effekt umkehren und zum elektrischen Pumpen von Wärme nutzen lässt: Schickt man einen elektrischen Strom durch verbundene Leiter aus verschiedenen Materialien, wird an der Verbindungsstelle Wärme aufgenommen oder freigesetzt – abhängig von der Art der Materialien und der Richtung des Stromes. In einem beidseitig kontaktierten Leiter kann so Wärme transportiert werden (Peltier, 1834; Goldsmid, 1954). Der Peltier-Effekt lässt sich zum Wärmen oder Kühlen einsetzen. Wird die an den Kontaktstellen freigesetzte bzw. aufgenommene Wärme nicht unmittelbar und vollständig mit der Umgebung ausgeglichen, bildet sich ein Temperaturgefälle. Die maximal mögliche Ausbeute der thermoelektrischen Umwandlung eines Wärmestroms in elektrische Energie wird durch den Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses beschränkt, liegt aber in realen thermoelektrischen Materialien deutlich darunter.

Abbildung 2: Die Pioniere der Thermoelektrik: Thomas Johann Seebeck (1770–1831, oben) und Jean Charles Athanase Peltier (1785–1845, unten).

Quelle: public domain via Wikimedia (Unknown XIX century artist – <http://www.thermoelectrics.caltech.edu/thermoelectrics/history.html>, Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=30312984>; <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4d/ThomasSeebeck.jpg>



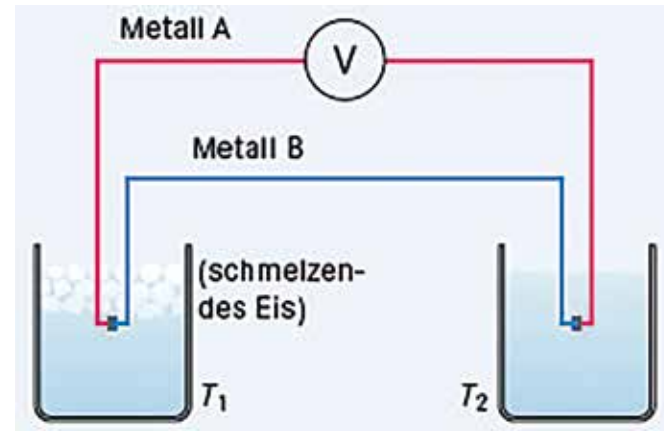


Abbildung 3: Temperaturmessung mit Hilfe eines Thermoelements. Werden zwei Leitungen aus verschiedenartigen Materialien von einer Temperaturvergleichsstelle mit bekannter Temperatur (hier schmelzendes Eis, $T_1 = 0^\circ\text{C}$) zu einer Messstelle T_2 geführt, bildet sich zwischen ihnen eine Thermospannung aus, die mit der Temperaturdifferenz zwischen Mess- und Vergleichsstelle ansteigt. Damit kann die Temperatur der Messstelle über bekannte Kennlinien genau bestimmt werden.

Quelle: <https://learnattack.de/schuelerlexikon/physik/thermoelektrizitaet>

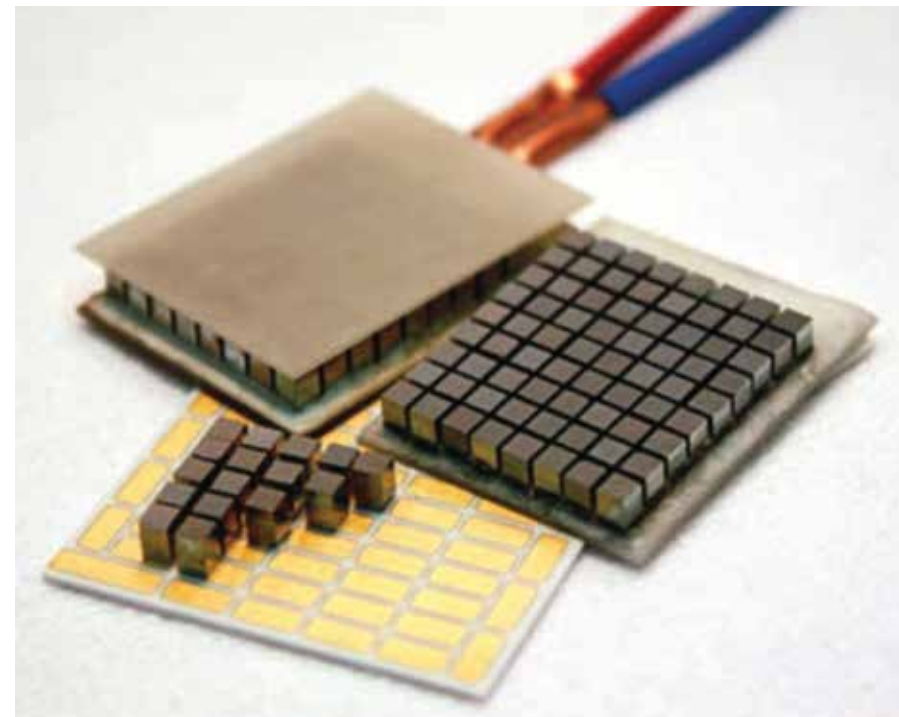


Abbildung 4: Bauteile und innerer Aufbau eines thermoelektrischen Moduls

Quelle: Fraunhofer IPM

Wie funktioniert Thermoelektrik?

Die Wandlung von Wärme in Elektrizität in einem thermoelektrischen Material wird durch den Seebeck-Effekt möglich, der direkte Transport von Wärme mit dem elektrischen Strom durch den Peltier-Effekt.

Grundlegendes Prinzip für die thermoelektrische Stromerzeugung ist der Seebeck-Effekt. Er tritt in jedem leitenden Material mehr oder weniger stark auf. Die physikalische Ursache ist die Tatsache, dass Elektronen als die Träger des elektrischen Stroms im Material nicht nur durch elektrische und magnetische Felder, sondern auch durch Temperaturunterschiede bewegt werden können, da sie wie jedes Teilchen bei höherer Temperatur eine höhere kinetische Energie besitzen. In einem Temperaturgefälle (einem „Temperaturgradienten“) bewegen sich die Ladungsträger deshalb bevorzugt in Richtung der kalten Seite. Diese Erscheinung ist als Thermodiffusion der Ladungsträger bekannt und führt zu einer Anreicherung der Ladungsträger an der kalten Seite.

Dadurch bildet sich im Leiter ein elektrisches Feld aus, das als Thermospannung zwischen beliebigen Punkten des Materials gemessen werden kann, die sich auf unterschiedlicher Temperatur befinden. In Halbleitern treten je nach Wahl der Dotierung neben den Elektronen (im „n-Leiter“) auch positiv geladene Defektelektronen („Löcher“ im „p-Leiter“) als Ladungsträger auf, die im Temperaturgradienten ebenfalls zur kalten Seite streben. Damit ist eine Zusammenschaltung von p- und n-leitenden Materialstücken (Drähte oder kleine Blöcke = „Schenkel“) zu „Thermopaaren“ für ihre Anwendung sehr vorteilhaft. Durch die thermische Parallelschaltung zweier elektrisch in Reihe geschalteter thermoelektrischer Schenkel (ein p- und ein n-Schenkel) in einer Temperaturdifferenz addieren sich die Thermospannungen beider Schenkel (Abbildung 5). Da die entstehende Thermospannung an einem einzelnen Thermopaar recht klein ist und oft nur wenige Millivolt beträgt, wird für eine technische Anwendung eine Vielzahl von Schenkelpaaren zu thermoelektrischen „Modulen“ verbunden.

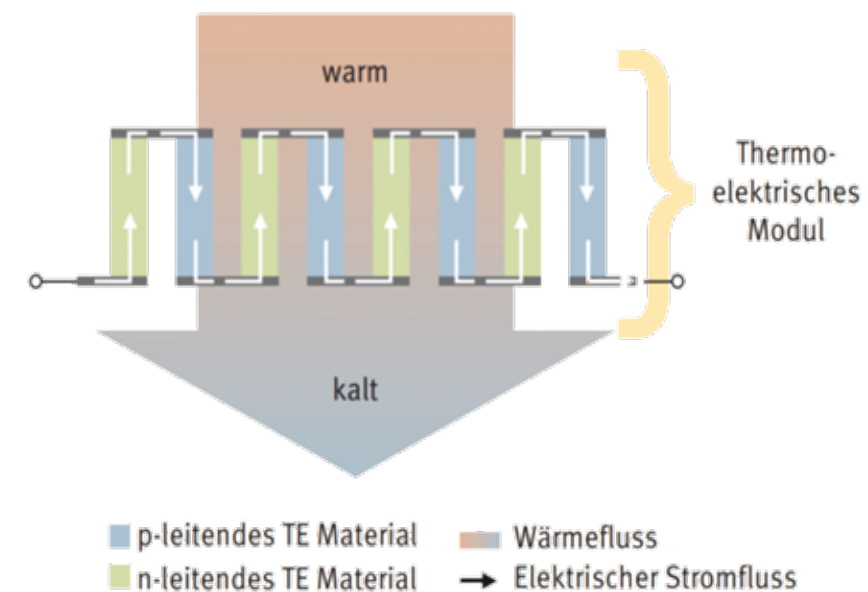


Abbildung 5: Wärmestrom und elektrischer Stromfluss durch ein thermoelektrisches Modul: Der Temperaturunterschied zwischen warmer und kalter Seite verursacht eine elektrische Thermospannung, die bei geschlossenem Stromkreis zu einem elektrischen Strom führt, mit dem ein elektrischer Verbraucher versorgt werden kann. Mit dem Stromfluss nimmt – durch Peltier-Wärmetransport – auch der durch das Modul fließende Wärmestrom zu.

Quelle: Fraunhofer IPM

Seebeck-Effekt: Aus Wärme wird Elektrizität

In einem offenen Leiterkreis aus zwei unterschiedlichen Leitermaterialien (Abbildung 6) induziert ein Temperaturunterschied zwischen den Kontaktstellen Thermospannungen in den beiden Materialien. Der Seebeck-Koeffizient α eines Materials stellt das Verhältnis zwischen erzeugter Thermospannung und ursächlicher Temperaturdifferenz dar: $U = -\alpha (T_h - T_c)$ (Das Minuszeichen vorn ist erforderlich, weil die Ladungsträger zur kalten Seite streben, andererseits aber festgelegt wurde, dass p-Leiter positive Werte und n-Leiter negative Werte des Seebeck-Koeffizienten haben sollen.) Im Leiterkreis aus den Materialien A und B kann die Differenz der beiden Thermospannungen U_A und U_B an den freien Leiterenden gemessen werden. Da die beiden Materialien in Stromflussrichtung gezählt dem umgekehrten Temperaturunterschied ausgesetzt sind, müssen beide Werte subtrahiert werden: $U_{AB} = U_A - U_B = -(\alpha_A - \alpha_B) (T_h - T_c)$. Die Differenz der Seebeck-Koeffizienten der beiden Materialien im Kreis $\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B$ wird als Seebeck-Koeffizient oder differentielle Thermospannung (früher auch „Thermokraft“) der Materialpaarung A-B bezeichnet (Birkholz, 1984). Der Seebeck-Koeffizient wird üblicherweise in $\mu\text{V/K}$ angegeben.

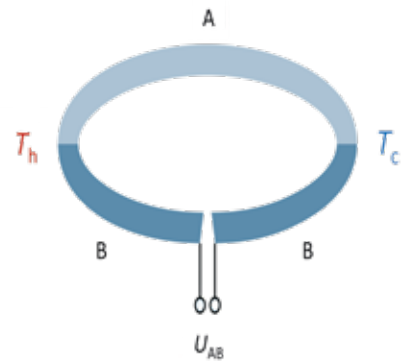


Abbildung 6: Offener elektrischer Zweileiterkreis aus den Materialien A und B mit einer Temperaturdifferenz zwischen den Kontaktstellen auf einer wärmeren Temperatur T_h und einer kälteren Temperatur T_c . Durch den Seebeck-Effekt wird die Thermospannung U_{AB} erzeugt.

Quelle: Fraunhofer IPM

Peltier-Effekt: Wärme pumpen mit elektrischem Strom

Der Peltier-Effekt ermöglicht eine direkte elektrische Kühlung oder Temperaturregelung. Dies funktioniert so: Fließt ein Strom durch einen thermoelektrischen Schenkel, wird mit dem Strom gleichzeitig Wärme transportiert (Abbildung 7), weil jeder Ladungsträger aufgrund seiner Temperatur kinetische Energie mit sich führt. Der damit verbundene, im homogenen Material nicht mess- und spürbare Wärmestrom („Peltier-Wärmestrom“) Q_{π} ist also proportional zur Stromstärke I : $Q_{\pi} = \pi I$. Das Verhältnis π zwischen der transportierten Wärme und der Stromstärke heißt Peltier-Koeffizient. Aufgrund der Quantennatur des Elektronentransports im Festkörper ist die transportierte Energie nicht nur proportional zur Temperatur, sondern auch materialspezifisch unterschiedlich; dies aufgrund der unterschiedlichen Energiebandstruktur der Festkörper, aber auch aufgrund unterschiedlicher Streuprozesse der Ladungsträger, die auch für den elektrischen Widerstand verantwortlich sind. Solche Streuprozesse werden durch thermische Schwingungen und Baufehler des Kristallgitters verursacht, die nicht nur von Material zu Material, sondern auch, je nach Herstellung und Temperaturvorgeschichte, bei ein und demselben Material von einer Probe zur anderen stark variieren können. Damit ergeben sich für Materialwissenschaftler viele Beeinflussungsmöglichkeiten der thermoelektrischen Eigenschaften. Fundamentale thermodynamische Betrachtungen, die mit dem Namen William Thomson (Lord Kelvin, 1824–1907) verbunden sind, haben zu der Erkenntnis geführt, dass die transportierte Wärme eng mit dem Seebeck-Koeffizienten eines Materials zusammenhängt: $\pi = \alpha T$ (Thomson, 1851). Diese Beziehung ist als 1. Kelvin-Relation bekannt und drückt den engen fundamentalen Zusammenhang zwischen Seebeck-Effekt und Peltier-Effekt aus.

Thermisch-elektrische Energieumwandlung: Physikalische Ursache

Die gleichzeitige Abhängigkeit des Peltier-Koeffizienten von Temperatur und Material ist der physikalische Grund für das Stattfinden der thermoelektrischen Energieumwandlung. Fließt ein Strom im homogenen Material über eine Temperaturdifferenz ΔT , ändert sich die mit dem Strom transportierte Peltier-Wärme,

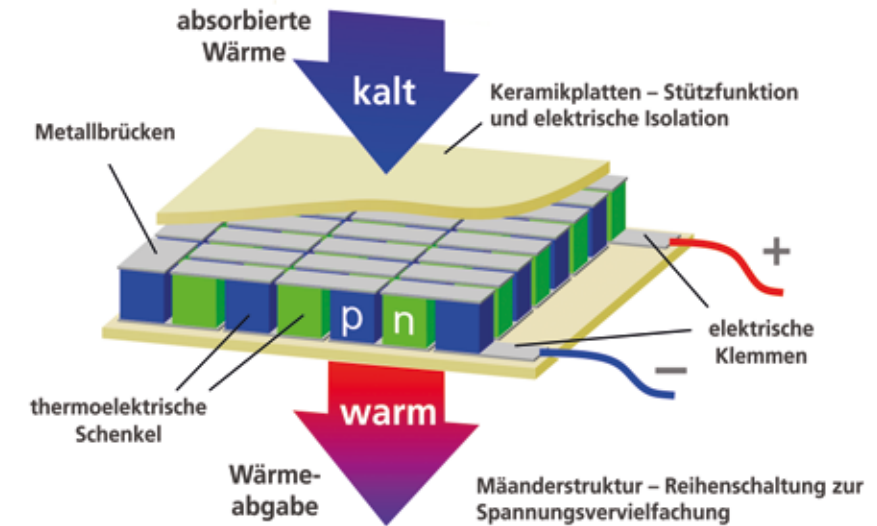


Abbildung 7: Schematischer Aufbau eines Peltier-Moduls. Wird das thermoelektrische Halbleitermaterial vom Strom durchflossen, kühlt sich eine Seite ab, die andere erwärmt sich. Durch die brückenförmige Anordnung der pn-Paare (π -Form, damit thermische Parallelschaltung) pumpen beide Schenkel die Wärme in dieselbe Richtung
Quelle: PANCO GmbH

und der Betrag ihrer Änderung, $\Delta Q_{\pi} = \alpha \Delta T I = U I = P_{el}$ steht als elektrische Leistung zu Verfügung, wenn die Ladungsträger sich von höherer zu niedriger Temperatur bewegen. Dies ist das Prinzip des Thermogenerators. Sollen sich die Ladungsträger in entgegengesetzter Richtung bewegen, muss dazu elektrische Energie von außen zugeführt werden, die die transportierte Peltier-Wärme vergrößert. Eine angeschlossene elektrische Spannungsquelle verspürt dabei zusätzlich zum Ohmschen Widerstand des thermoelektrischen Elements in diesem Fall einen weiteren elektrischen Widerstand, der Peltier-Widerstand genannt wird und auftritt, da auch die dem Stromfluss entgegengerichtete Thermospannung, die aufgrund der Temperaturdifferenz auftritt, kompensiert werden muss.

Die Änderung der transportierten Peltier-Wärme infolge eines Materialübergangs, $\Delta Q_{\pi} = \Delta \alpha T I$ wird als Peltier-Wärme am Materialübergang freigesetzt (oder aufgenommen). Sie ist umso größer, je stärker sich der Seebeck-Koeffizient beider Materialien unterscheidet und wechselt ihr Vorzeichen (von Wärmefreisetzung zu

Wärmeaufnahme) mit der Stromrichtung. In einem Stromkreis aus zwei verschiedenen Materialien (ähnlich Abbildung 6), wird also bei Stromfluss Wärme von der einen zur anderen Verbindungsstelle transportiert; dies stellt eine thermoelektrische Wärmepumpe dar. Werden beide Übergangsstellen auf gleicher Temperatur gehalten, verbraucht dieser thermoelektrische Wärmetransport keine Energie (abgesehen von der unvermeidlichen Joule-Wärme aufgrund des elektrischen Widerstands), erfolgt also reversibel.

Innere Peltier-Wärme: Der Thomson-Effekt

Ein weiterer, weniger bekannter thermoelektrischer Effekt ergibt sich, weil der Seebeck-Koeffizient praktisch aller bekannten Materialien eine deutliche Temperaturabhängigkeit aufweist. Fließt ein Strom in einem Material über eine Temperaturdifferenz, so ändert sich dabei mit der Temperatur auch der Seebeck-Koeffizient des Materials entlang des Gradienten, damit auch die transportierte Peltier-Wärme. Dies ist, analog zum Peltier-Effekt an Material-

übergängen, mit einer Wärmeaufnahme oder -abgabe (Thomson-Wärme) im Inneren des Materials verbunden. Dies wird als Thomson-Effekt bezeichnet.

Galvanomagnetische und thermomagnetische Effekte

Weitere physikalische Effekte ergeben sich, wenn zusätzlich ein Magnetfeld einwirkt. Die Lorentzkraft, die im magnetischen Feld auf quer zum Feld bewegte Ladungsträger wirkt, führt mit der Umlenkung des elektrischen Stroms auch zu einem Quertransport der transportierten Peltier-Wärme. Die Folge sind neben elektrischen Effekten – der Ausbildung einer Querspannung durch den Hall-Effekt und der Änderung des elektrischen Widerstandes („Magnetowiderstand“) – auch zusätzliche geringe Temperaturgradienten quer (Ettingshausen-Effekt) und längs zur Stromrichtung. Ähnlich führt ein Magnetfeld quer zu einem Wärmestrom auch zu einer Thermospannung senkrecht zu beiden (Nernst-Effekt) sowie auch längs zur Stromrichtung. Obwohl diese Effekte im Allgemeinen sehr schwach sind und vor allem zur Halbleiterphysikalischen Untersuchung von thermoelektrischen Materialien genutzt wurden, ist mit speziellen Materialien auch eine technische Nutzung denkbar, beispielsweise durch die „Nernst-Kühlung“ (Harman et al., 1967; Li et al., 2022). oder magnetothermoelektrische Generatoren, die mit einer wesentlich geringeren Anzahl von TE Schenkeln sowie ohne anfällige elektrische Kontakte auf der Heißeite auskommen.

Thermoelektrische Transporttheorie

Die Halbleiterphysikalischen Vorgänge hinter den thermoelektrischen Effekten versuchte man zunächst unter Annahme eines quasi-freien Elektronengases genauer zu verstehen (Drude-Modell) (Drude, 1900), das jedoch aufgrund der Herangehensweise basierend auf der klassischen Physik nur teilweise zutreffende Erklärungen liefert. Erst mit einer quantenmechanischen Betrachtung der Elektronen und ihrer Bewegung im ortsperiodischen Potential eines kristallinen Materials konnte in der Sommerfeld-Theorie die Verknüpfung des Ladungs- und Wärmetransports im thermoelektrischen Material zutreffend erklärt werden (Sommerfeld, 1931). Im Zusammenspiel der Energieverteilung der Ladungsträger und ihrer Streuung an verschiedenartigen Kristalldefekten wurden aus der Boltzmann-Gleichung der Elektronen physikalische Formeln entwickelt, die die Temperatur- und Dotierungsabhängigkeit der thermoelektrischen Eigenschaften beschreiben und einen Vergleich von Modellrechnungen mit gemessenen thermoelektrischen Eigenschaften als Basis zum Verständnis der komplexen wirkenden Festkörperphänomene ermöglichen (Kittel 1983 und Ziman 1972).



Was sind „gute“ thermoelektrische Materialien?

Thermoelektrische Energieumwandlung findet nur statt, wenn ein elektrischer Strom fließt. Im Allgemeinen sind in thermoelektrischen Anwendungen deshalb Seebeck-Effekt, Peltier-Effekt und Thomson-Effekt nicht isoliert, sondern meist gleichzeitig wirksam. Diese rein thermoelektrischen Effekte sind prinzipiell verlustfrei und umkehrbar (reversible Effekte). Jedoch ist ein Stromfluss durch ein reales Material stets mit einem Leistungsverlust durch den nicht vermeidbaren Ohmschen Widerstand verbunden, der durch die Umwandlung eines Teils der erzeugten thermoelektrischen Leistung in Joule-Wärme auch den Wirkungsgrad und die Leistungsfähigkeit thermoelektrischer Bauelemente begrenzt. Wünschenswert sind deshalb Materialien mit möglichst hoher elektrischer Leitfähigkeit σ , d. h. mit geringem spezifischem Widerstand.

Was zeichnet Materialien mit guter Fähigkeit zur thermoelektrischen Energieumwandlung darüber hinaus aus? Die größten Thermospannungen werden bei möglichst hohem Seebeck-Koeffizienten erhalten. Um einen Thermogenerator zu betreiben, muss eine Temperaturdifferenz zwischen beiden Seiten aufrechterhalten werden. Neben dem Wärmestrom, der aufgrund des Peltier-Effekts mit dem elektrischen Strom durch die Schenkel transportiert wird, fließt auch unabhängig vom elektrischen Stromfluss Wärme aufgrund der herkömmlichen Wärmeleitung über das thermoelektrische Material (Fourier-Wärme). Bei der Ermittlung des Wirkungs-

grades der thermoelektrischen Wandlung wird die erzeugte elektrische Leistung ins Verhältnis zum aufgenommenen Wärmestrom gesetzt. Um letzteren möglichst gering zu halten, ist eine niedrige Wärmeleitfähigkeit κ thermoelektrischer Materialien wünschenswert.

Grundsätzliche Betrachtungen zum Wirkungsgrad von Thermogeneratoren, die bereits um 1909 von Edmund Altenkirch (Altenkirch 1909) angestellt und später von A. F. Ioffe (Ioffe 1957) und Goldsmid (Goldsmid 1960) weitergeführt wurden, führen zu einer thermodynamischen dimensionslosen Kennzahl, die den Einfluss des thermoelektrischen Materials und der Bauteilgestaltung auf den Thermogenerator-Wirkungsgrad ebenso wie auf die Kühlleistungsziffer und die maximal erreichbare Temperaturdifferenz eines Peltier-Elements zusammenfasst. Diese dimensionslose thermoelektrische Gütezahl eines Bauteils $ZT = \frac{\alpha^2}{RK} T$, fasst die genannten Tendenzen – hoher Seebeck-Koeffizient, niedriger elektrischer Widerstand R und niedriger Wärmeleitwert K des thermoelektrischen Bauteils – in einem einfachen mathematischen Ausdruck zusammen. Dieser gilt für einen Einzelschenkel ebenso wie für ein pn-Schenkelpaar oder ein ganzes Modul. Neben den Eigenschaften des thermoelektrischen Materials gehen in die Größen R und K auch Merkmale des Bauteils ein und vergrößern diese und verschlechtern damit den ZT -Wert. Elektrische Zuleitungs- und Kontaktwiderstände vergrößern den

elektrischen Widerstand des Bauteils, und thermische Nebenschlüsse, also parasitäre Pfade des Wärmestroms zwischen Heiß- und Kaltseite parallel zu den thermoelektrischen Schenkeln, beispielsweise durch Wärmestrahlung oder Wärmeleitung längs mechanischer Befestigungen, erhöhen den Wärmeleitwert. Ein Temperaturabfall über Trägerplatten, Befestigungen, Kontakte usw., die thermisch in Reihe zu den thermoelektrischen Schenkeln angeordnet sind, führt dazu, dass nicht die gesamte Temperaturdifferenz zwischen heißer Quelle und kalter Senke am Thermogenerator über das thermoelektrische Material anliegt. Damit reduziert sich der effektive Seebeck-Koeffizient des Bauteils gegenüber dem des thermoelektrischen Materials.

Unter idealen Bedingungen (vernachlässigbare parasitäre Temperaturabfälle, Widerstände und thermische Nebenschlüsse) und bei gleichartig gutem p- und n-leitendem Halbleitermaterial erreicht die Bauteil-Gütezahl ihr Maximum und kann auf eine Materialkennziffer zurückgeführt werden, in die alle genannten thermoelektrische Materialeigenschaften eingehen. Dies ist die dimensionslose thermoelektrische Gütezahl eines Materials, $zT=\frac{\alpha^2\sigma}{\kappa}T$, die für den mit einem bestimmten Material maximal erreichbaren Wirkungsgrad eine Thermogenerators maßgeblich ist. Die Größe $z=\frac{\alpha^2\sigma}{\kappa}$ heißt thermoelektrische Effektivität eines Materials und zeigt wie alle darin verknüpften thermoelektrischen Eigenschaften im Allgemeinen eine ausgeprägte Temperaturabhängigkeit.

Wirkungsgrad des Thermogenerators, Kühlleistungsziffer des Peltier-Kühlers

Mit der thermoelektrischen Gütezahl zT lässt sich der Nutzeffekt thermoelektrischer Materialien in Anwendungen bewerten. Je höher ihre Gütezahl ist, desto effektiver werden die Materialien in Thermogeneratoren und Peltier-Wärmepumpen wirksam. Daher ist es ein Hauptziel der thermoelektrischen Materialforschung, die thermoelektrische Gütezahl zu erhöhen. Die derzeit für Anwendungen verfügbaren Materialien erreichen, gemittelt über ihren Einsatztemperaturbereich, typische Werte um $zT=0,8$. Spitzenwerte der temperaturabhängigen Gütezahl aus der wissenschaftlichen Materialentwicklung erreichen heute den Wert $zT(T)_{\max}=2,0$. Gemeinsam mit der mittleren Gütezahl entscheiden auch wesentlich die im Anwendungsfall anliegende Tempera-

turdifferenz zwischen Heiß- (T_h) und Kaltseite (T_c) sowie die mittlere Temperatur $T_m=\frac{T_h+T_c}{2}$ über Wirkungsgrad bzw. Leistungsziffer thermoelektrischer Anwendungen. Die elektrische Stromstärke durch das thermoelektrische Bauteil muss auf einen optimalen mittleren Wert eingestellt werden, damit ein Thermogenerator seinen maximalen Wirkungsgrad

$$\eta_{\max}=\frac{T_h-T_c}{T_h}\cdot\frac{\sqrt{1+ZT_m}-1}{\sqrt{1+ZT_m}+\frac{T_c}{T_h}}$$

oder ein Peltier-Kühler seine maximale Kühlleistungsziffer

$$\Phi_{\max}=\frac{T_c}{T_h-T_c}\cdot\frac{\sqrt{1+ZT_m}\cdot\frac{T_h}{T_c}}{\sqrt{1+ZT_m}+1}$$

erreicht. Dies liegt an der unterschiedlichen Stromabhängigkeit einerseits der ausgenutzten reversiblen Effekte und andererseits der Verluste durch Joule-Wärme. Während Peltier-Wärmetransport und die in einem thermoelektrischen Element generierte elektrische Leistung proportional zum Strom zunehmen, wächst die Joule-Wärme quadratisch und kompensiert bei hohen Strömen die gewünschten Effekte. Beide Wirkungsgrad-Größen, $\eta_{\max}$ (Abbildung 8) und $\Phi_{\max}$, nehmen mit steigender Gütezahl zu. Unter den genannten idealen Bedingungen kann in beiden Formeln die Bauteil-Gütezahl ZT_m durch die Material-Gütezahl zT_m ersetzt werden. Dies stellt zugleich das obere physikalische Limit dieser Wirkungsgradgrößen dar. Gute thermoelektrische Bauteile erfordern also neben guten thermoelektrischen Wandlermaterialien auch eine sorgfältige Konstruktion und Verarbeitung, insbesondere hochwertige Kontakte mit geringem thermischem und elektrischem Widerstand.

Da alle thermoelektrischen Eigenschaften von der Temperatur abhängen und diese im typischen Betriebsfall entlang der thermoelektrischen Schenkel erheblich variiert, ist die exakte Berechnung des thermoelektrischen Verhaltens eines thermoelektrischen Funktionselements auch bei idealisierenden Annahmen nur über eine computergestützte numerische Modellierung der sich ausbildenden räumlichen Temperaturverteilung möglich. Die Modelle basieren auf der Lösung einer partiellen Differentialgleichung, die von Domenicali (*Domenicali 1954*) entwickelt wurde und alle genannten Effekte berücksichtigt. Man kann jedoch auch mit den genannten einfachen Wirkungsgradformeln bereits genaue Abschätzungen erhalten, obwohl sie von der Vereinfachung

konstanter (also temperaturunabhängiger) Materialeigenschaften ausgehen. Dafür sind aus den realen temperaturabhängigen Materialeigenschaften geeignete repräsentative Festwerte α , σ , κ zu bilden, am einfachsten durch eine Mittelwertbildung über den Temperaturbereich der Anwendung zwischen T_c und T_h .

Üblicherweise werden die Leistungsdaten thermoelektrischer Anwendungen im stationären Betrieb, also mit zeitlich unveränderlichen Temperaturen und Stromwerten angegeben. Um das zeitabhängige Verhalten, etwa beim Einschalten oder einer von außen vorgegebenen Temperaturänderung zu berechnen, muss auch die Wärmekapazität des thermoelektrischen Materials und aller anderen Komponenten des technischen Aufbaus berücksichtigt werden.

Eine Zusammenfassung über die historische Entwicklung der Thermoelektrik sowie eine systematische Hinführung zur Optimierung thermoelektrischer Bauelemente durch Segmentierung bzw. Gradierung der thermoelektrischen Schenkel findet man in einem aktuellen Buch von C. Goupil (*Goupil 2016*).

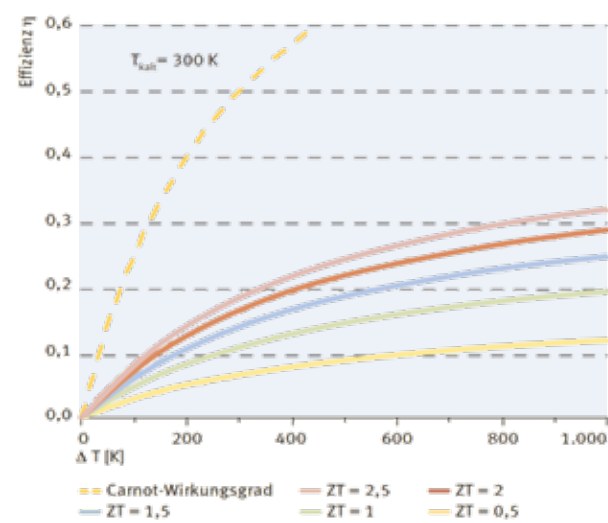


Abbildung 8: Wandlungswirkungsgrad eines thermoelektrischen Generators in Abhängigkeit des Temperaturunterschiedes zwischen Heiß- und Kaltseite (Kaltseitentemperatur fest bei 300 K) für verschiedene mittlere Gütezahlwerte der thermoelektrischen Materialien

Quelle: Fraunhofer IPM

Thermoelektrische Materialien

Das thermoelektrisch aktive Material ist das Herzstück eines jeden thermoelektrischen Moduls (Peltier-Kühler oder thermoelektrischer Generator). Seine Leistungsfähigkeit wird durch den dimensionslosen Gütefaktor zT charakterisiert. Je größer der zT -Wert ist, desto effizienter gelingt die thermoelektrische Umwandlung von Wärme in Elektrizität. Die Werkstoffentwicklung für thermoelektrische Materialien hat deshalb folgende Ziele (*Weißgärber et al., 2015*):

- hoher Seebeck-Koeffizient α , damit bei einer gegebenen Temperaturdifferenz eine hohe elektrische Spannung erzeugt wird,
- hohe elektrische Leitfähigkeit σ , damit bei einer gegebenen elektrischen Spannung ein hoher elektrischer Strom möglichst verlustarm fließen kann, und
- niedrige Wärmeleitfähigkeit κ , zur Aufrechterhaltung der für die elektrische Spannung ursächlichen Temperaturdifferenz.

Ein weiterer Material-Gütefaktor ist der sogenannte Leistungsfaktor (power factor) $PF=\alpha^2\cdot\sigma$, der angibt, welche maximale elektrische Leistung – unabhängig vom fließenden Wärmestrom – in einer gegebenen Temperaturdifferenz gewonnen werden kann. Festzuhalten ist, dass die Betrachtung des Leistungsfaktors als Qualitätsgröße für ein thermoelektrisches Material nur dann zielführend ist, wenn der Aufwand für die Bereitstellung der zugeführten Wärme und die Wärmeabführung auf der Kaltseite eines thermoelektrischen Moduls von untergeordneter Bedeutung ist. Primär bleibt für die Bewertung von thermoelektrischen Materialien der zT -Wert ausschlaggebend, da dieser in unmittelbarem Zusammenhang mit dem maximalen Wirkungsgrad steht.

Die komplexe Herausforderung bei der Entwicklung thermoelektrischer Materialien ist nun, dass die genannten physikalischen Größen α , σ und κ voneinander abhängig sind und zusätzlich noch von der Temperatur abhängen. Abbildung 9 zeigt für eine konstante Temperatur die Abhängigkeit für α , σ und κ – und damit des zT -Wertes – von der Ladungsträgerkonzentration (*Altmanninger, 2002; Snyder et al., 2008*). Der resultierende zT -Wert

steigt zunächst mit zunehmender Ladungsträgerkonzentration an, erreicht ein Maximum und fällt dann wieder ab. Das Maximum des zT -Wertes korreliert mit typischen Ladungsträgerkonzentrationen für stark dotierte Halbleitermaterialien.

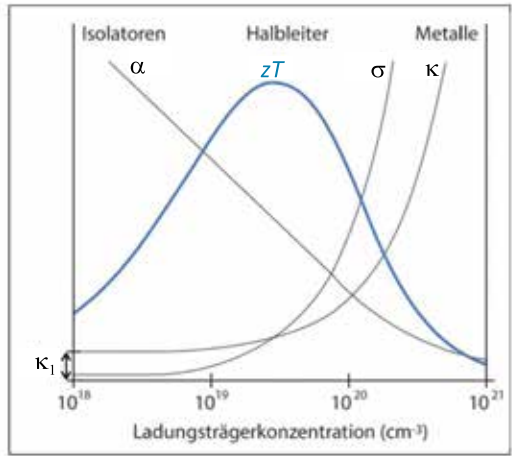


Abbildung 9: Zusammenhang zwischen der Ladungsträgerkonzentration und den thermoelektrischen Größen Seebeck-Koeffizient α , elektrische Leitfähigkeit σ , thermische Leitfähigkeit κ und der dimensionslosen Material-Gütezahl zT bei fester Temperatur T (Altmanninger, 2002).

Abbildung 10 zeigt für verschiedene repräsentative anorganische n- und p-leitende bulk-Materialien eine Auswahl der bis 2019 publizierten zT -Werte in Abhängigkeit von der Temperatur (Beretta et al. 2019). Durch die Temperaturabhängigkeit der thermoelektrischen Eigenschaften ergibt sich, dass jedes thermoelektrische Material effizient nur in einem bestimmten Temperaturbereich betrieben werden kann. Aus diesem Grund wurden segmentierte bzw. kaskadierte TE-Module entwickelt, (s. unten).

Für den Einsatz in thermoelektrischen Modulen sind ebenso die thermische, mechanische und chemische Stabilität sowie die Lebensdauer von wesentlicher Bedeutung. D. h. es sind neben den thermoelektrischen Eigenschaften der Materialien und Verbindungstechnik noch folgende Punkte zu berücksichtigen:

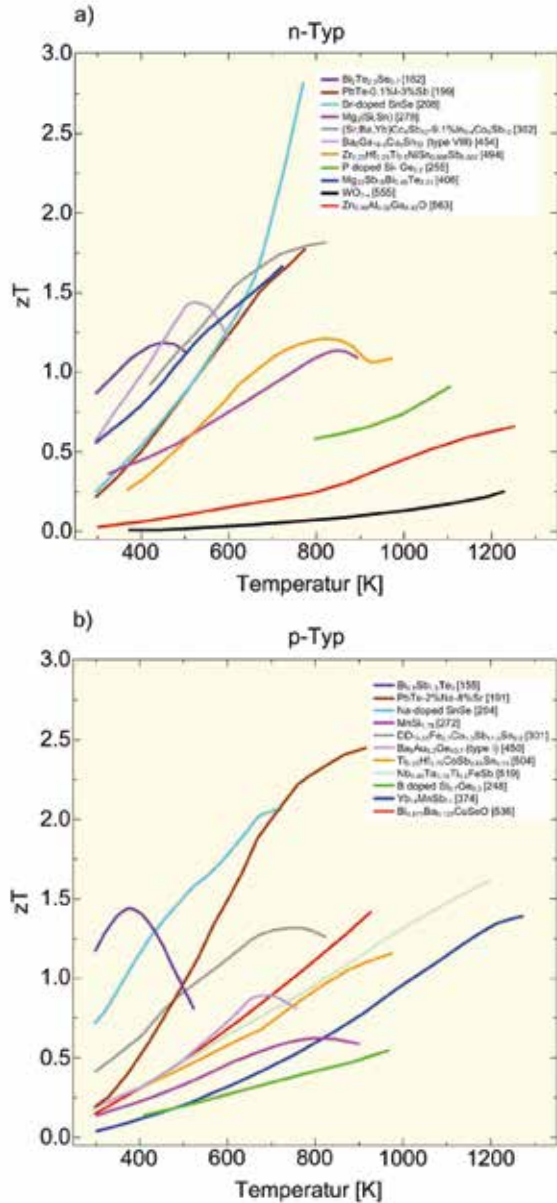


Abbildung 10: zT -Werte verschiedener Materialien: a) n-Typ und b) p-Typ in Abhängigkeit von der Temperatur (in Anlehnung an Beretta et al., 2019).

- Thermische Beständigkeit gegenüber Abdampfen und Aufschmelzen des Grundmaterials oder der Kontaktierung bei den zu erwartenden Betriebstemperaturen mit Einrechnung von möglichen Übertemperaturen aufgrund von Prozessfehlern
- Ausreichend hohe mechanische Festigkeit und Bruchzähigkeit zur Beherrschung thermisch induzierter mechanischer Spannungen aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der eingesetzten Materialien; hohe Temperaturwechselbeständigkeit: Verarbeitbarkeit bei der Modulherstellung und
- hohe chemische Beständigkeit bzw. Schutzvorkehrungen gegen Oxidation oder chemische Korrosion entsprechend der Betriebsumgebung insbesondere während des Einsatzes bei hohen Temperaturen.

Nicht zuletzt sind aus Sicht der industriellen Anwendung auch die Aspekte der Verfügbarkeit, Gesundheitsgefährdung, Umweltbelastung und Kosten der Ausgangsmaterialien zu beachten, weil sie die technische Umsetzbarkeit begrenzen oder verhindern könnten. Insbesondere für mobile Anwendungen ist die Massendichte des Materials ein zusätzlicher Faktor, da niedrige Dichte das Gewicht der Module gering hält.

Dieses Anforderungsspektrum stellt die Herausforderung der Materialentwicklung dar, bei der Physiker, Chemiker, Werkstoffwissenschaftler, Konstrukteure und Elektroingenieure interdisziplinär zusammenarbeiten müssen.

Bei der weiteren Entwicklung zukünftiger thermoelektrischer Materialien mit hohen zT -Werten haben sich folgende Strategien

herauskristallisiert (Beretta et al., 2019; Snyder et al., 2008; und He et al., 2017).

- Gezielte Manipulation von Gitterschwingungen (Phononen) um die Wärmeleitfähigkeit des Halbleitermaterials herabzusetzen. Diese Maßnahme wird in der Fachliteratur als Phonon engineering bezeichnet und kann z. B. mittels Nanostrukturierung erfolgen.
- Gezielte Manipulation der elektronischen / elektrischen Eigenschaften des Halbleitermaterials. Diese Maßnahmen werden in der Fachliteratur mit dem Sammelbegriff Optimierung des Leistungsfaktors $\alpha^2 \cdot \sigma$ bezeichnet (engl: power factor optimization oder band structure engineering).

Der Schwerpunkt beim aktuellen Stand der Materialforschung liegt bei anorganischen kristallinen Volumenmaterialien (bulk materials) verfügbarer und für den industriellen Einsatz geeigneter thermoelektrischer Materialien mit hohen zT -Werten (Kober, 2020; Skipidarov et al., 2019; Funahasi, 2021; Kurosaki et al., 2020; und Tiwari et al., 2019). Darüber hinaus sind anorganische und organische Dünnschichtmaterialien bekannt sowie Werkstoffe auf Basis elektrisch leitfähiger organischer Polymerverbindungen, die derzeit erforscht, aber noch nicht technisch eingesetzt werden.

Wie aus Abbildung 10 ersichtlich ist, gibt es mittlerweile eine Vielzahl von thermoelektrischen Materialien, die in einem weiten Temperaturbereich – zwischen 300 K bis 1250 K – eingesetzt werden können. Dabei können im Wesentlichen drei Temperaturbereiche unterschieden werden (Tabelle 1).

Tabelle 1: Einsatztemperaturen häufig verwendeter TE-Materialien.

Niedertemperaturbereich: 300 bis 600 K	Hochtemperaturbereich: 600 bis 850 K	Höchsttemperaturbereich: >850 K
Bismutellurid-Mischkristalle Magnesium-Silber-Antimon Magnesium-Bismut-Antimon Bismut-Antimon-Legierungen	Halb-Heusler-Verbindungen Skutterudite Magnesiumsilizid (Mg_2X) Tetrahedrite Bleitellurid TAGS LAST	Oxide Höheres Mangansilizid Eisendisilizid Silizium-Germanium Lanthantellurid 14-1-11-Verbindungen (Zintl) Borcarbid Clathrate

Die derzeit am besten untersuchten und am häufigsten genutzten Materialien sind:

- Chalkogenide, z. B. Bismut-Tellurid (Bi_2Te_3), Blei-Tellurid (PbTe) und seine Mischkristalle mit GeTe und SnTe , darunter Systeme mit selbstorganisierenden Nanostrukturen (TAGS, LAST, TAST, etc.), aber auch Silizium-Germanium (SiGe),
- Skutterudite Zinnselenid (SnSe), z. B. Cobalt-Antimonid (CoSb_3), und
- Halb-Heusler Verbindungen, z. B. Mischkristalle basierend auf den Systemen TiNiSn und NbFeSb .

Tabelle 2 zeigt eine quantitative und qualitative Bewertung einiger anorganischer thermoelektrischer Materialien hinsichtlich maximaler zT -Werte für n- und p-Typ Materialien und anderer wichtiger Eigenschaften wie mechanische und thermische Stabilität, Toxizität, Vorkommen und Dichte (*Skipidarov et al., 2019*).

Tabelle 2: Bewertung wichtiger thermoelektrischer Werkstoffe mit Angaben zu wichtigen Materialeigenschaften (in Anlehnung an Skipidarov et al., 2019).

Quelle: DLR FM Köln

Material	Mecha-nisch	Thermisch	toxisch	Verfüg-bar	ZT		Dichte g·cm ⁻³
					p-Typ	n-Typ	
Bi_2Te_3	-	+	-	-	1,9 (320 K)	1,2 (370 K)	7,7
LAST*	0	0	-	-	1,7 (800 K)	2,2 (800 K)	8,0
PbTe	0	0	-	-	2,2 (915 K)	1,6 (775 K)	8,16
Clathrate	+	+	0	-	0,61	1,35 (900 K)	5,8
$\beta\text{-Zn}_4\text{Sb}_3$	-	0	0	0	1,3 (670 K)		6,2
Skutterudite	0	+	0	-	0,93	1,7 (850 K)	7,4
SnSe	-	-	-	-	2,6 (900 K)		6,18
Mg_2Si	-	-	+	+	0,65	1,3 (700 K)	2,0
Halb-Heusler	+	+	0	0	1 (1073 K)	1 (1073 K)	10,0
SiGe	+	+	+	-	1	1,3 (1173 K)	4,0
PLEC**	0	0	0	+	1,5 (1000 K)	0,6	6,5
Zintl phase	0	0	-	-	1,3 (1223 K)	0,86	8,3
Oxide	0	+	+	+	1,4 (923 K)	1,4 (923 K)	8,0

* ein quaternären Mischsystem, benannt nach den elementaren Bestandteilen Lead-Antimony-Silver-Tellurium.

** PLEC ist die englische Abkürzung für das sogenannte phonon-liquid, electron-crystal Konzept, eine Erweiterung des phonon-glass, electron-crystal (PGEC)-Konzepts, welches thermoelektrische Materialien beschreibt, die eine glasähnliche (d. h. geringe) Wärmeleitfähigkeit aber gleichzeitig eine kristallähnliche (d. h. sehr gute) elektrische Leitfähigkeit aufweisen.

Metall-Chalkogenide

- Metall-Chalkogenide sind Verbindungen, die aus einem Metall (Bi, Pb, Sn) und aus Chalkogenen (S, Se, Te) aufgebaut sind. Die prominentesten Vertreter dieser Materialklasse sind die Mischkristalle von Bi_2Te_3 und Blei-Tellurid (PbTe).
- Die anwendungsbezogen wichtigsten ternären Mischkristalle von Bi_2Te_3 sind n-leitendes $\text{Bi}_2\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x \approx 0,3$) und p-leitendes

$\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$ ($x \approx 1,5$). Sie weisen herausragende thermoelektrische Eigenschaften auf und werden im Temperaturbereich von 200 – 600 K in vielen kommerziellen Produkten eingesetzt. Der zT -Wert für die am Markt erhältlichen Materialien und Module liegt im Bereich von 0,8 bis 1. Unter Laborbedingungen können deutlich höhere Werte erreicht werden.

Clathrate ($\text{A}_8\text{M}_{16}\text{X}_{30}$)

Clathrate sind intermetallische Verbindungen und gehören (ähnlich wie die Skutterudite) zu den sogenannten Käfigeinschlussverbindungen. Diese entsprechen dem phonon-glass, electron-crystal (PGEC)-Konzept (Tabelle 2). Entsprechend ihrer komplexen Gitterstruktur werden Clathrate in Typ I bis Typ IX eingeteilt (*Rowe, 2006*). Typische Vertreter von Typ I-Clathraten sind die intermetallischen Verbindungen mit der chemischen Summenformel $\text{A}_8\text{M}_{16}\text{X}_{30}$ mit $\text{A} = \text{Sr}, \text{Ba}$; $\text{M} = \text{Ga}, \text{In}$, und $\text{X} = \text{Si}, \text{Ge}$. In Baitinger (*Baitinger 2021*) wird für das p-Material $\text{Ba}_{7,8}\text{Au}_{5,3}\text{Ge}_{40,7}$ ein zT -Wert von ca. 1,3 bei 670 K angegeben.

Zintl-Phasen (AB_2X_2)

Zintl-Phasen sind intermetallische Verbindungen, benannt nach dem deutschen Chemiker Eduard Zintl. Die bekanntesten Vertreter für die Verwendung als thermoelektrische Materialien haben die chemische Summenformel AB_2X_2 mit $\text{A} = \text{Ca}, \text{Ba}, \text{Sr}, \text{Mg}, \text{Yb}, \text{Eu}$; $\text{B} = \text{Mn}, \text{Zn}, \text{Mg}, \text{Cd}$ und $\text{X} = \text{Sb}, \text{Bi}, \text{P}, \text{As}$ (*Skipidarov et al. 2019; Funahashi 2021; D’Angelo 2023*). In Skipidarov (*Skipidarov 2019*) werden maximale zT -Werte von 1,14 @ 650 K für das p-Material $\text{YbCd}_{1,85}\text{Mn}_{0,15}\text{Sb}_2$ und 1,6 @ 750 K für das n-Material $\text{Mg}_3\text{Sb}_{1,48}\text{Bi}_{0,48}\text{Te}_{0,04}$ angegeben.

Silizide

Silizide sind Verbindungen, die aus Silizium und einem stärker elektropositiven Element wie z. B. Mg und Mn gebildet werden. Die thermoelektrisch relevanten Verbindungen sind dabei Mg_2Si , $\text{Mg}_2\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$, $\text{Mg}_2\text{Si}_{1-x-y}\text{Sn}_x\text{Ge}_y$ sowie die sogenannten höheren Mangan-Silizide (HMS) mit der chemischen Formel MnSi_x ($1,71 \leq x \leq 1,75$).

Der thermoelektrisch günstige Einsatzbereich dieser Materialien liegt zwischen 600 K und 900 K. Die zT -Werte liegen für n-Materialien bei etwa 0,6 bis 1,4 @ 800 K und für p-Materialien bei etwa 0,3 bis 0,5 @ 700 K. Für Sb-dotiertes n- $\text{Mg}_2\text{Si}_{0,5}\text{Sn}_{0,5}$ wurde ein maximaler zT -Wert von 1.6 @ 615 K und für p- $\text{Mg}_2\text{Li}_{0,025}\text{Si}_{0,4}\text{Sn}_{0,6}$ ein maximaler zT -Wert von 0,7 @ 675 K publiziert (*Kurosaki 2020*).

Ein technisch wichtiger Vorteil dieser Verbindungen liegt da-

rin, dass die verwendeten chemischen Elemente häufig in der Erdkruste vorkommen, eine niedrige Toxizität und zusätzlich eine geringe Dichte ($2 - 3 \text{ g/cm}^3$) aufweisen.

Nachteilig ist hingegen deren Oxidationsanfälligkeit. Deshalb muss das Material entweder passiviert oder das thermoelektrische Modul in inerter Atmosphäre eingekapselt werden (*Funahashi 2021*).

Halb-Heusler-Verbindungen

Halb-Heusler (HH)-Verbindungen gehören zu den thermoelektrischen Hochtemperaturmaterialien mit einem Einsatzbereich von 700 K bis 1200 K. Ihre chemische Zusammensetzung ist vom Typ XYZ, wobei X und Y Übergangsmetalle sind (typischerweise X = Ti, Zr, Hf, und Y = Fe, Co, Ni) und Z ein Halbmetall (z. B. Sn, Sb).

n-leitende HH-Materialien bestehen aus der Basis-Verbindung XNiSn, p-leitende HH-Materialien aus der Basis-Verbindung XCoSb.

Die zT -Werte für n-HH liegen im Bereich von 0,45 bis 1,3 @ $\approx 800 \text{ K}$ und für p-leitende im Bereich von 0,8 bis 1,5 @ $\approx 1000 \text{ K}$. Für den p-Mischkristall $(\text{Nb}_{1-x}\text{Ta}_x)_{0,8}\text{Ti}_{0,2}\text{FeSb}$ ($x = 0,36$ und $0,40$) wurde ein zT -Wert von 1,6 @ 1200 K publiziert (*Kurosaki et al., 2020*).

Silizium-Germanium ($\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$)

SiGe ($\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ mit $x = 0,2 - 0,4$) ist ein Hochtemperaturmaterial mit einer Einsatztemperatur von 500 K bis etwa 1300 K. Es wird bevorzugt in der Raumfahrt als Radionuklid-Batterie (Radioisotope Thermoelectric Generator, RTG) eingesetzt. Die RTG sind das Flaggschiff in der Anwendung der Thermoelektrizität und haben sich sowohl in der Raumfahrt als auch beim Einsatz auf der Erde (typischerweise in entlegenen Regionen) als zuverlässige und langlebige Energiequelle bewährt. Kein RTG hat bis dato jemals ein Versagen einer Raumfahrtmission verursacht. Eine sehr ausführliche Darstellung über den Einsatz der RTG in der Raumfahrt findet sich in Woerner (*Wörner 2023*).

Die maximalen zT -Werte von SiGe liegen bei 0,9 (n-Material) bzw. 0,5 (p-Material) bei jeweils etwa 1000 K.

Aufgrund des hohen Preises von Germanium wird wahrscheinlich der Einsatz von SiGe auf Raumfahrtanwendungen beschränkt bleiben.

Keramische Thermoelektrikwerkstoffe

Metall-Oxide sind chemische Verbindungen zwischen Metall-Kationen und Sauerstoff-Anionen und haben gegenüber anderen thermoelektrischen Materialien viele Vorteile. Sie können aus nicht-toxischen, in der Erdkruste häufig vorkommenden (und damit kostengünstigen) chemischen Elementen hergestellt werden. Ihre Stärke liegt vor allem in der Hochtemperaturbeständigkeit und für einige Oxide auch in der Korrosionsbeständigkeit und hohen mechanischen Stabilität. Einsatztemperaturen bis 1300 K sind möglich. Bei diesen hohen Temperaturen liegt die technische Limitierung bei den elektrischen und thermischen Kontaktierungen der Module und der Temperaturwechselbeständigkeit im Betrieb.

Die effizientesten p-leitenden Metall-Oxide sind dotierte Cobaltate wie Natriumcobaltoxid (NaCoO_2) mit einem zT -Wert von 0,92 @ 960 K und Calciumcobaltoxid ($\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$) mit einem zT -Wert von 0,87 @ 973 K . Allerdings konnte wegen der instabilen Sauerstoff-Stöchiometrie im Austausch mit der umgebenden Atmosphäre kein stabiles Einsatzverhalten erreicht werden. Als weiteres sehr effizientes p-Material hat sich das Oxy-Chalkogenid BiCuSeO herauskristallisiert. Für den Mischkristall $\text{Bi}_{0,875}\text{Ba}_{0,125}\text{CuSeO}$ wurde ein zT -Wert von 1,4 @ 923 K erreicht.

Bei oxidischen n-Materialien sind die erreichten zT -Werte geringer als bei den p-Materialien. So konnten mit Mischkristallen basierend auf SrTiO_3 zT -Werte $\geq 0,6$ erreicht werden. Theoretische Abschätzungen lassen erwarten, dass n-leitende Metall-Oxide mit zT -Werten > 1 möglich sind.

Auch einfach aufgebaute Oxide wie $\text{Ti}_n\text{O}_{2n-1}$ oder dotiertes ZnO werden in der Literatur beschrieben, die zwar nur niedrige zT -Werte im Bereich von 0,2 erreichen, aber im Vergleich zu anderen Thermoelektrika sehr kostengünstig hergestellt werden können (*Backhaus-Ricolt 2014*).

Extrem hohe Betriebstemperaturen sowie zT -Maxima bei $> 1700 \text{ K}$ werden in Innocent et al. (*Innocent 2017*) für Borcarbid beschrieben. Auch hier gibt es die Möglichkeit, wie beim Titanoxid die Zusammensetzung in einem weiten Bereich zu variieren (*Bouchacourt 1985*). Allerdings konnte eine technisch zuverlässige Umsetzung dieses Materialkonzepts bisher noch nicht erreicht werden.

Aufbau und Herstellung thermoelektrischer Module



Thermoelektrische Module (TEM) bilden die funktionelle Einheit eines thermoelektrischen Generators (TEG). Da die Effizienzen der enthaltenen thermoelektrischen Materialien stark von der Temperatur abhängen, müssen die einzusetzenden Materialien entsprechend den auftretenden Temperaturen und Wärmemengen (Exergie) in der adressierten Anwendung ausgewählt werden (siehe hierzu Kapitel "Thermoelektrische Materialien").

Während für den Niedertemperaturbereich bereits seit langem TEM am Markt verfügbar sind, existieren bislang für den Hochtemperaturbereich kaum kommerzielle Lösungen, obwohl leistungsfähige TE-Materialien für diese Temperaturen gut untersucht sind. Der Grund dafür besteht wesentlich in der Schwierigkeit, diese Materialien industriell zu synthetisieren und aus diesen Hochtemperatur-Materialien TEM aufzubauen, die den notwendigen Anforderungen nach Stabilität und Haltbarkeit entsprechen.

Das auf Temperaturen zwischen Raumtemperatur und ca. 200 °C ausgelegte Materialsystem Bismuttellurid (Bi_2Te_3) wird seit Jahrzehnten erfolgreich für Peltierelemente eingesetzt. Hier sind die vielfältigen Anforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnologie (AVT) weitestgehend technologisch gelöst.

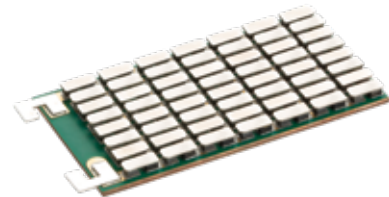
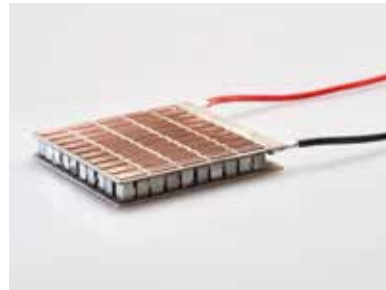


Abbildung 11: Oben: Prototyp eines TE-Hochtemperatur-Moduls auf Skutterudit-Basis ($4 \times 4 \text{ cm}^2$; Quelle: DLR Köln); unten: Modul auf Halb-Heusler-Basis ($2,8 \times 5,2 \text{ cm}^2$; Quelle: Isabellenhütte).

Aufwändiger wird dies bei Hochtemperaturmodulen, die Temperaturdifferenzen von mehreren hundert Kelvin standhalten müssen. Dabei wurden verschiedene Ansätze auch zur geometrischen Ausführung der Module, z. B. in Ring- oder Zylinderform, verfolgt. Diese sind jedoch in der Fertigung sehr aufwändig und erfordern im Verhältnis zur Leistungsdichte einen zu hohen TE-Materialeinsatz, sodass sich planare TE-Module (Abbildung 11) in der Anwendung durchgesetzt haben.

Um solche TEM effektiv einsetzen zu können, müssen die Temperaturen der Wärmequelle und -senke möglichst verlustfrei an das Modul thermisch angekoppelt werden, d.h. es bedarf möglichst geringer thermischer Übergangswiderstände, damit ein hoher Wärmefluss sichergestellt ist (siehe Kapitel "Physikalische Grundlagen").

Auch die Anforderungen an die Kontakte innerhalb eines TEM sind hoch:

- Der elektrische Kontaktwiderstand zwischen TE-Material und Metallbrücke muss klein sein gegenüber dem elektrischen Widerstand des TE Schenkels, um ohm'sche Verluste gering zu halten.
- Der thermische Übergangswiderstand zwischen TE-Material und Metallbrücke sollte möglichst gering sein, um den Temperaturabfall am Kontakt klein gegenüber dem im TE-Schenkel zu halten.
- Die Kontaktstelle muss stabil sein gegenüber mechanischer und thermischer Langzeit- und Zyklenbelastung. Hierfür ist eine möglichst gute Übereinstimmung der thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Fügepartner notwendig.
- Eine Diffusion zwischen TE-Halbleiter und Metallelektrode muss verhindert oder in gewünschter Weise gesteuert werden, sodass die TE-Eigenschaften des Halbleiters nicht durch eindiffundierendes Material ungewollt verändert werden.
- Die zur Fügung notwendige Temperatur darf die maximale Einsatztemperatur der TE-Materialien nicht deutlich überschreiten, um eine Veränderung der optimierten TE-Eigenschaften der Materialien zu verhindern. Gleichzeitig sollte die Erweichungstemperatur der Fügung oberhalb der vorgesehenen Einsatztemperatur der TEM liegen.
- Für eine industrielle Umsetzung der AVT sollten die an die TE-Materialien angepassten Fügetechnologien möglichst einfach umsetzbar sein.

Kontaktierung von thermoelektrischem Halbleiter und Kontaktbrücke

Durch diese Anforderungen ist der Aufbau von TEM material-spezifisch zu entwickeln und stellt derzeit die wesentliche Hürde bei der industriellen Herstellung von Hochtemperatur-Modulen dar. In Abbildung 12 ist ein sog. TE-Doppelschenkel schematisch dargestellt. Er bildet die kleinste funktionelle Einheit eines TEM und besteht aus je einem p- und n-leitenden TE-Schenkel, den verbindenden Metallbrücken auf Heiße- und Kaltseite sowie den Metallisierungen zur Kontaktierung. Dabei sind je nach TE-Material die Herausforderungen durchaus unterschiedlich und ggf. nicht alle dargestellten Metallisierungen notwendig (material-spezifische Details sind im Kapitel "Thermoelektrische Materialien").

So können z. B. für die Materialklasse der Halb-Heusler-Legierungen für die Verbindungen zu den Metallbrücken auf der Heiße-seite Hartlote mit einem Schmelzpunkt von $> 800 \text{ °C}$ erfolgreich eingesetzt werden, ohne Degradation infolge von Diffusion des Hartlotes in das TE-Material. Für andere Hochtemperatur-Materialklassen, z.B. Skutterudite und Magnesiumsilizide („ Mg_2X “) führen solch hohe Temperaturen bereits zu deutlichen und unerwünschten Veränderungen der TE-Eigenschaften. Für Mg_2X zeigt das Verfahren des direkten Versinterns von Metallelektroden mit dem TE-Materialpulver unter hohem Druck und Temperatur die bislang besten Ergebnisse. Dabei bildet sich zwischen dem Metall und dem TE-Material eine oder mehrere intermetallische Phasen

aus, die thermisch stabil sind und eine weitere Diffusion verhindern. Wichtig ist bei diesem Verfahren die Wahl der Metallelektrode. Deren thermischer Ausdehnungskoeffizient muss dem des p- bzw. n-leitenden Mg_2X möglichst ähnlich sein, da es sonst zu Rissbildungen im relativ spröden TE-Material infolge unterschiedlicher thermischer Dehnungen der Fügepartner kommen kann.

Im Falle der Skutterudite stellt nicht nur die mögliche Diffusion von Metallatomen in das TE-Material, sondern auch die Diffusion von Antimon (der Hauptbestandteil von TE Skutteruditen) in die Gegenrichtung eine besondere Herausforderung dar. Hier hat sich das Verfahren des sog. TLP-Bonding (Transient Liquid Phase Bonding) unter Verwendung einer angepassten Metallisierung als Diffusionsbarriere als geeignet erwiesen. Beim TLP-Verfahren werden zwei Metallschichten mit deutlich unterschiedlichen Schmelzpunkten auf die Fügepartner aufgebracht (z.B. mittels Physikalischer Gasphasenabscheidung PVD). Während der nachfolgenden Wärmebehandlung schmilzt eine dieser Metallschichten und bildet mit der anderen Metallisierung intermetallische, höherschmelzende Phasen aus. Durch die geeignete Wahl der Metallisierungen kann eine zum TE-Material passende Fügetemperatur gewählt werden, sodass die intermetallischen Phasen erst deutlich oberhalb der vorgesehenen Anwendungstemperatur schmelzen.

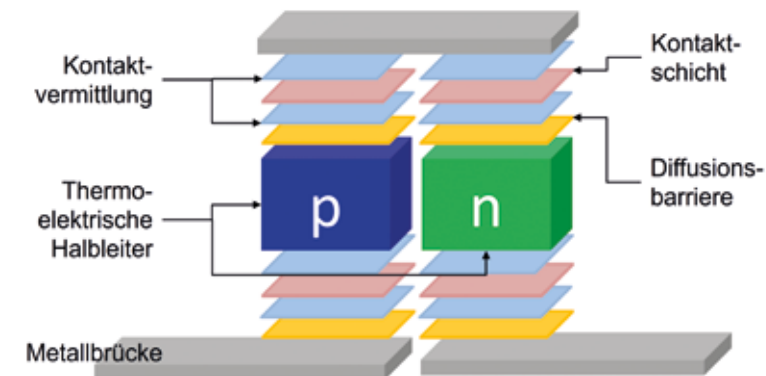


Abbildung 12: Schematische Darstellung eines TE-Doppelschenkels
Quelle: DLR Köln

Oxidationsschutz

Eine weitere Aufgabe besteht in der Vermeidung einer möglichen Oxidation der TE-Materialien bei hohen Einsatztemperaturen. Innerhalb eines typischen Moduls sind die Seitenflächen der Einzelschenkel dem Kontakt mit Luft und Feuchtigkeit in der Anwendung ausgesetzt. Bei Verwendung von oxidationsempfindlichen TE-Materialien sind diese entsprechend zu schützen. Dies kann durch eine Versiegelung der Seitenflächen der einzelnen Schenkel oder des gesamten Moduls erfolgen. Eine derartige Versiegelung muss jedoch elektrisch isolierend sein, um Kurzschlüsse im Modul zu vermeiden und im thermischen Ausdehnungskoeffizienten dem TE-Material angepasst sein, um Rissbildung und somit möglichen Sauerstoffeintrag zu verhindern. Es gibt eine Reihe von Gläsern unterschiedlicher Schmelzpunkte und thermischer Ausdehnungskoeffizienten, die für solche Beschichtungen in Frage kommen. Dabei spielt auch die Haftung dieser Gläser auf den zu versiegelnden Oberflächen eine entscheidende Rolle. Alternativ lassen sich keramische Beschichtungen durch technische Verfahren wie Gasfluss-Sputtern oder Atomic Layer Deposition (ALD) gleichmäßig und allseitig auf die freien Oberflächen aufbringen. Obwohl keramische Materialien typischerweise deutlich geringe thermische Ausdehnungskoeffizienten aufweisen als die verwendeten TE-Materialien, konnte z. T. eine recht hohe Schutzwirkung unter thermischer Zyklierung erreicht werden ohne sichtbare Rissbildungen. Es ist hilfreich, dass die geringen Schichtdicken im Nanometerbereich zu einem günstigen thermo-mechanischen Verhalten führen.

Falls die beschriebene Versiegelung nicht möglich ist, kann das gesamte Modul in einer Metallhülle verkapselt werden. Eine solche Einhausung muss eine möglichst geringe Wandstärke aufweisen, um die auftretenden thermischen Nebenschlüsse gering zu halten. Um dem Problem entgegenzuwirken kann auch der gesamte Generator in ein Schutzgasgehäuse eingebaut werden.

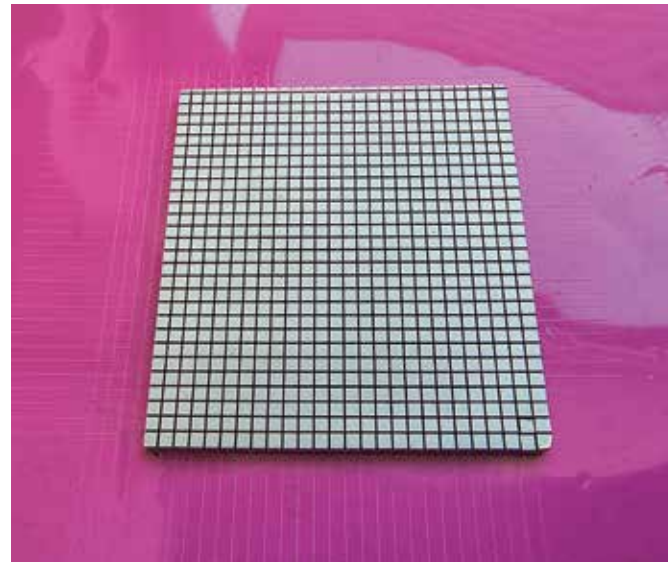
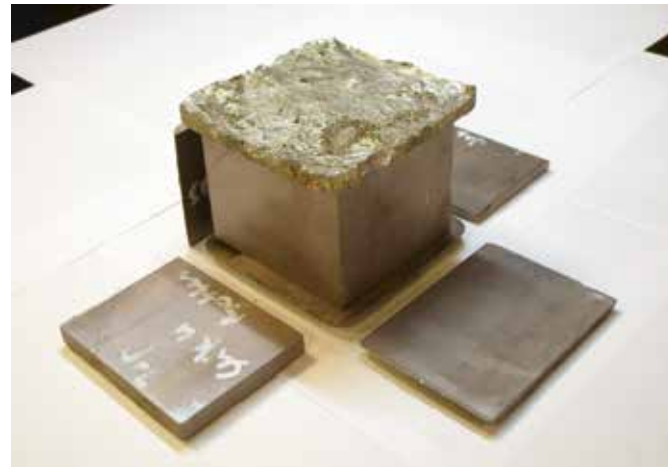


Abbildung 13: TE-Material auf halb-Heusler-Basis; links: Schmelztechnisch hergestellter Materialblock nach dem Besäumen (Kantenlänge ca. 8 cm); rechts: Gesägte Einzelschenkel (Kantenlänge ca. 1 mm) für die Modulfertigung

Quelle: Isabellenhütte Heusler GmbH Co. KG

Stabilitätsaspekte

Ein wesentlicher Vorteil thermoelektrischer Module in der Anwendung ist ihre Wartungsfreiheit und hohe Zuverlässigkeit. Hierfür müssen eine Reihe von Anforderungen erfüllt werden, um gleichbleibende Leistung über lange Einsatzzeiten zu erreichen:

- **Materialstabilität:** Das TE Material darf sich auch bei maximalen Anwendungstemperaturen nicht verändern, z. B. durch Entmischung oder Änderung der Kristallstruktur. Dies wird durch die Auswahl des geeigneten TE Materials je nach den Einsatztemperaturen gewährleistet.
- **Stabile Kontaktierung:** Die Verbindung zwischen den Metallbrücken und den TE Materialien im Modul darf auch bei einer längeren Anwendung nicht zu hohen Kontaktwiderständen führen, z. B. in Folge einer Reaktion zwischen den Kontaktpartnern. Eine solche Reaktion könnte auch durch Diffusion die Eigenschaften des TE Materials verändern und damit die Leistungsfähigkeit verringern. Die materialspezifisch entwickelten Kontaktierungen entsprechen diesen Anforderungen z.B. durch den Einsatz von Hochtemperaturloten oder Diffusionsbarrieren.
- **(Thermo-)Mechanische Stabilität:** Die Moduls substrate und -Geometrien müssen entsprechend den mechanischen Belastungen der Anwendung gewählt werden, um Risse oder Brüche in den Bauteilen zu vermeiden.

Auch starke Unterschiede der thermischen Ausdehnungskoeffizienten oder zu große Temperaturgradienten können infolge thermisch induzierter mechanischer Spannungen verursachen. Bei der Auswahl der Kontaktpartner müssen die entsprechenden thermischen Ausdehnungskoeffizienten berücksichtigt werden, um Rissbildungen oder ein Versagen des TE Moduls zu vermeiden.

- **Oxidation:** Je nach TE Material und Temperatur kann eine Oxidation stattfinden, die die Leistung des Moduls beeinträchtigt. Dies ist bei Bedarf durch geeignete Schutzbeschichtungen oder Einhausung zu vermeiden (s. Abschnitt „Oxidationsschutz“)

Diese Anforderungen sind für Bi_2Te_3 -Module bereits für den Einsatz in Peltier-Anwendungen gelöst. Für Generatoranwendungen sind die Stabilitätsbedingungen aufgrund des höheren Temperaurebereichs oft schwieriger zu erfüllen. Der Einsatz von TEG in Raumfahrtanwendungen mit Langzeiteinsätzen über mehrere Dekaden zeigt jedoch, dass wirkungsvolle Lösungen entwickelt werden konnten.



Welche Hochtemperatur-Module gibt es am Markt?

Maximale Temperaturen?

Es gibt weltweit noch wenige Hersteller von TEM für hohe Einsatztemperaturen auf Basis unterschiedlicher Materialklassen. Dabei sind die Modulpreise teilweise noch sehr hoch (100 bis >2000 € pro Modul, bei typischen elektrischen Leistungen von

5–20 W). Zudem sind bei manchen Herstellern die Angaben zu Wirkungsgrad und langzeitlicher Stabilität unzuverlässig. Folgende Auflistung nennt beispielhaft Firmen die im Bereich Hochtemperatur-Thermoelektrik tätig sind.

Hersteller	TE-Material	Max. Temp. ca
TEC TEG MFR (CA)	CMO ¹ oder Bleitellurid/TAGS ²	600 °C
TermoGEN (SE)	Bleitellurid	400 °C
Furukawa (JP)	Skutterudit	550 °C
Kryotherm (RU)	Bleitellurid	570 °C
Thermonamic (CN)	Blei-Zinn-Tellurid	400 °C
Isabellenhütte (D)	Halb-Heusler	550 °C
Yamaha (JP)	Halb-Heusler	550 °C
LG (KR)	Segmentierung Skutterudit + Bi ₂ Te ₃	550 °C

¹ CMO: Calcium Manganese Oxide

² TAGS ist eine Verbindung aus Tellur, Antimon, Germanium und Silber

Segmentierung / Kaskadierung

Die Abhängigkeit der TE-Materialeigenschaften von der Temperatur bewirken, dass TE-Module einer bestimmten Materialklasse ihre höchste Effizienz in einem bestimmten Temperaturbereich aufweisen. Deshalb sollte das TE-Material nach den Anforderungen der jeweiligen Anwendung ausgewählt werden. Bei sehr großen Temperaturunterschieden ist es also kaum zu vermeiden, dass ein Abschnitt der TE-Module in einem geringen Effizienzbereich arbeitet. Um dem zu begegnen wäre entlang des Temperaturunterschiedes der Anwendung (also über die Dicke eines TE-Moduls) die Verwendung unterschiedlicher Materialien wünschenswert, die bei jeweils optimaler Temperatur arbeiten

können. Hierfür können sog. kaskadierte oder segmentierte Module eingesetzt werden.

Kaskadierte Module werden durch eine Stapelung von TE-Modulen aufgebaut, die unterschiedliche Materialien für die verschiedenen Temperaturbereiche beinhalten. Dadurch können die Stromkreise der beiden Module voneinander getrennt und jeweils in ihrem elektrischen Anpassungsfall betrieben werden. Außerdem werden die Module thermomechanisch voneinander entkoppelt.

Bei der Segmentierung werden die TE-Einzelschenkel in einem Modul aus einer Abfolge unterschiedlicher Materialien aufge-

baut. Abbildung 14 zeigt beispielhaft ein 2-fach segmentiertes Modul, in dem je ein Hoch- und ein Niedertemperatur-Material für die n- und p-leitenden Schenkel kombiniert wurden. Prototypen solcher Module wurden u.a. am DLR Köln aufgebaut und mit einem maximalen Wirkungsgrad >10% gemessen.

Sowohl für die Kaskadierung als auch für die Segmentierung müssen die unterschiedlichen Stufen nicht nur hinsichtlich des Temperaturbereichs, sondern auch auf den elektrischen Strom angepasst werden, sodass die Materialien in ihrem jeweiligen Arbeitspunkt der optimalen Stromdichte eingesetzt werden können. Dies gelingt bei der Kaskadierung durch die Wahl der An-

zahl der Einzelschenkel in den Modulen und deren Querschnittsflächen bzw. Schenkellängen. Bei der Segmentierung ist dies nur durch die Anpassung der Querschnittsflächen und Schenkellängen möglich, bietet jedoch den Vorteil eines geringeren Temperaturverlustes zwischen den Materialien. Während in der Kaskade durch die getrennten Module mehrere Temperatursprünge an den Übergängen von TE-Materialien zu Metallbrücken zu Substraten in Kauf genommen werden müssen, tritt bei der Segmentierung hier „nur“ eine Grenzfläche zwischen den Hochtemperatur- und Niedertemperatur TE Materialien auf.

Kaskadiertes Modul	Segmentiertes Modul
+ Getrennte Stromkreise, beide Module arbeiten in ihrem optimalen Leistungspunkt + Getrennte Thermomechanik - Zusätzliche Temperaturdifferenz zwischen den TE-Materialien - Zwei Leistungsanpassungen notwendig	+ keine Temperaturdifferenz in der Schnittstelle der TE-Materialien; höherer Wirkungsgrad + Nur eine Leistungsanpassung notwendig - Thermomechanische Anpassung der TE-Materialien notwendig - TE Materialien arbeiten typisch nicht in ihrem optimalen Leistungspunkt

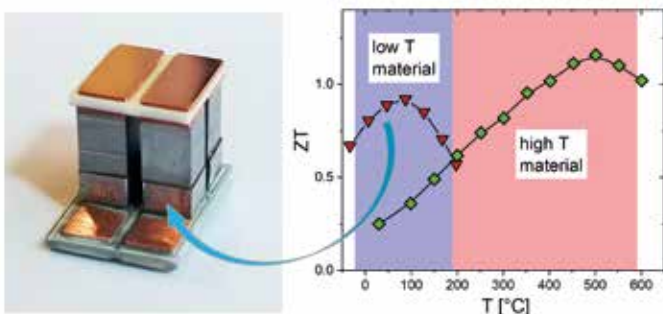


Abbildung 14: Links: Foto eines segmentierten TE-Moduls bestehend aus Skutterudit für den Hochtemperaturbereich und Bi₂Te₃-basiertem Material für niedrige Temperaturen; rechts: ZT-Verläufe der entsprechenden TE-Materialien

Quelle: DLR Köln

Flexible Module

Thermoelektrische Materialien sind meist sehr spröde, sodass entsprechende TE-Module ebenfalls kaum verformbar sind und dadurch sehr ebene Oberflächen für den Kontakt zu Wärmequellen und -senken sicherzustellen sind. Um dennoch eine gewisse

Flexibilität bei der Formgebung von Modulen zu erreichen und auch z. B. gekrümmte Wärmetauscheroberflächen nutzen zu können, arbeiten einige Forscher an der Möglichkeit des 3D-Drucks oder Additive Layer Manufacturing (ALM) von TE-Materialien.

Beim 3D-Druck wird eine Suspension feiner TE-Pulver in einem meist organischen Lösemittel durch eine steuerbare Düse auf Substrate beliebiger Geometrie als p- bzw. n-leitende Schenkel gedruckt und anschließend durch eine Wärmebehandlung getrocknet. Bei diesem Verfahren werden typischerweise geringere Materialdichten als im monolithischen TE-Schenkeln erreicht, wodurch die Leistungsfähigkeit verringert wird. Jedoch kann die hohe Flexibilität bei der Formgebung je nach Anwendung ein entscheidender Vorteil sein.

Mit der ALM-Technik werden Stapel von TE-Pulverlagen lokal z. B. mittels eines Lasers geschmolzen und somit sukzessive die entsprechenden Bauteile aufgebaut. Auch hier sind vielfältige Geometrien herstellbar, jedoch beinhaltet der Prozess des Schmelzens für viele TE Materialien Veränderungen ihrer Eigenschaften (durch Strukturänderung, Verdampfung einer Komponente usw.), was erhebliche Einbußen der Leistungsfähigkeit solcher TE-Module zur Folge haben kann oder eine komplexe Entwicklungsarbeit zwischen Werkstoff und Prozessparametern erfordert.

Industrialisierung von Thermoelektrischen Hochtemperatur Modulen (> 400 °C)

Bei der Industrialisierung der TE-Modul-Fertigung ist insbesondere die Qualitätssicherung von Bedeutung. Produktionsbegleitende Prozesse überwachen die jeweiligen Zwischenschritte während der Herstellung. Um eine kosteneffiziente und effektive Produktion zu gewährleisten, muss die Herstellung flexibel bezüglich der Prozesse und des Designs sein, um den individuellen Bedürfnissen der Kunden gerecht zu werden.

Eine hohe Qualität kann durch die Wahl von robusten und bewährten Prozessen sichergestellt werden. Bei der Designentwicklung von Modulen ist es wichtig, dass eine spätere Automatisierung möglich ist.

Qualitätssicherung:

Eine hohe Produktqualität und Langzeitstabilität ist ein entscheidender Faktor für die Kundenzufriedenheit. Das bedeutet, dass die Zwischenschritte mittels Inline-Prüfungen überwacht werden müssen. Hierbei kommen optische, elektrische und akustische Prüfmethoden zum Einsatz. Die Ergebnisse werden mittels statistischer Prozesskontrollen überwacht, um die Qualität schon während der Produktion sicherzustellen. Darüber hinaus sind die Durchführungen von mechanischen Tests und Simulationen von essenzieller Bedeutung, um sicherzustellen, dass die Produkte den Belastungen in der Fertigung und späteren Anwendung standhalten.

Flexibilität:

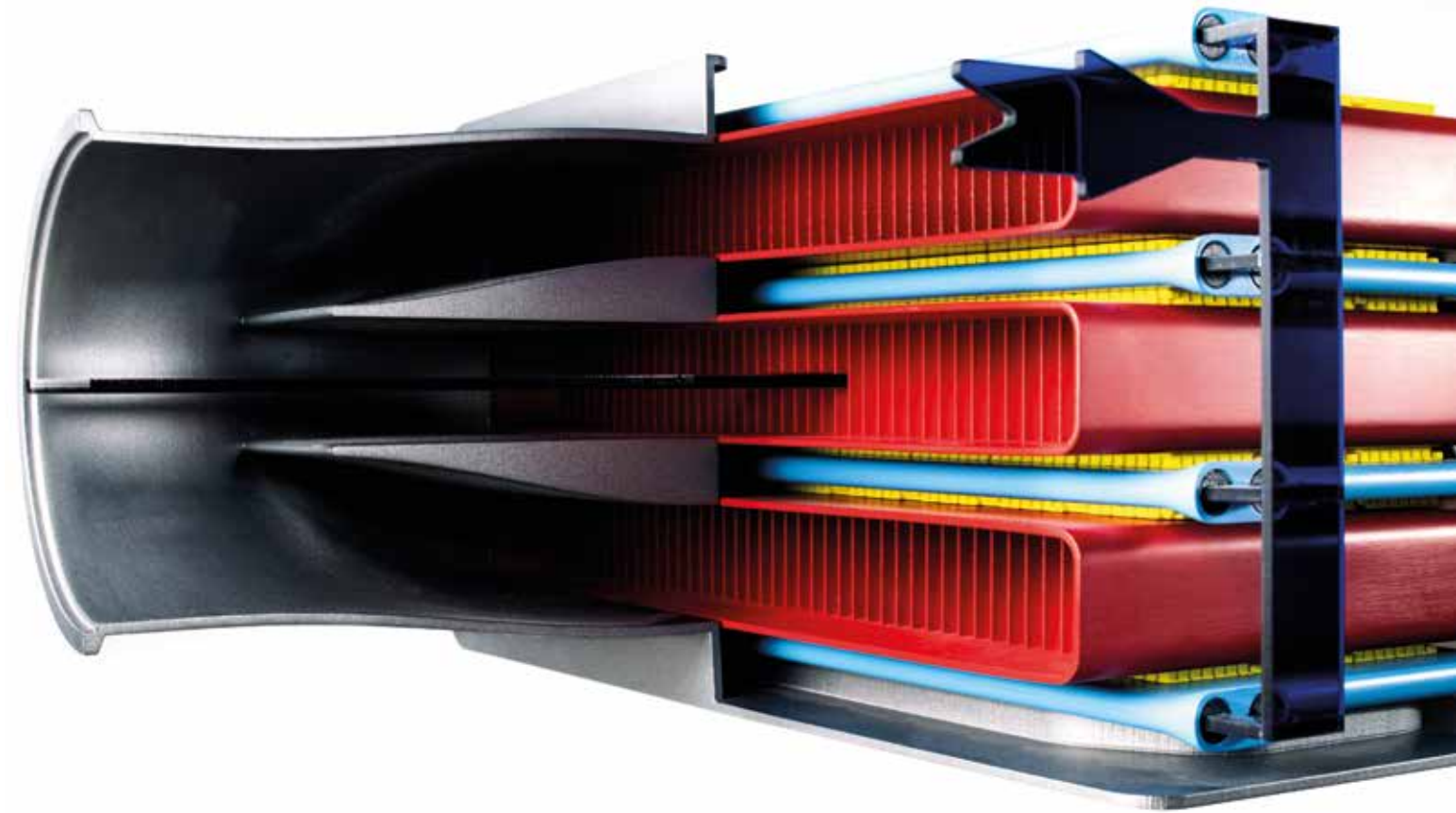
Die Flexibilität in den Prozessen und im Design ermöglicht, Produkte effizient an neue Kundenwünsche oder Applikationen anzupassen. Modulkonzepte, bei denen verschiedene Komponenten flexibel kombiniert werden können, erleichtern diese Anpassungen. So können Produktvarianten günstig und schnell hergestellt werden.

Kosteneffizienz:

Das Konzept soll gleichermaßen kostengünstig, flexibel und leistungsoptimiert sein. Ein wirtschaftliches Design zeigt Flexibilität, indem es mit geringen Modifikationen die meisten Kundenanwendungen bedienen kann. Es ist wichtig, die Prozesse an bestehende Großserienfertigungen anzulehnen, um Synergien zu nutzen.

Auf bewährte Fertigungsprozesse hierbei zu setzen, bietet Vorteile wie geringere Lernkurve, Zuverlässigkeit und kürzere Entwicklungszeiten. Der Verzicht auf den aufwändigen Sondermaschinenbau zugunsten etablierter Technologien steigert die Effizienz und senkt die Gesamtkosten. Die Integration von Automatisierung trägt zur Steigerung der Produktionseffizienz und Reproduzierbarkeit bei.

Anwendungsbeispiele der Thermoelektrik



Anwendungsbeispiele der Thermoelektrik

Die Anwendungen der Thermoelektrik lassen sich in drei Bereiche einteilen:

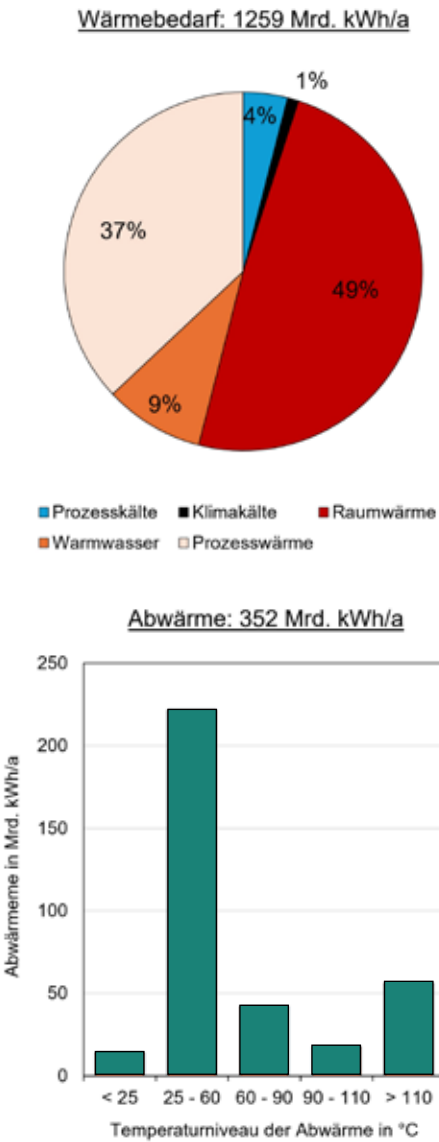
- Die Generatorik (Stromerzeugung),
- die Peltiertechnik (Wärmetransport), und
- die Sensorik (Thermoelektrische Effekte als Messprinzip).

Jeder dieser Bereiche bietet eine Vielzahl an Anwendungsmöglichkeiten, die im Folgenden beispielhaft dargestellt werden.

Thermoelektrische Stromerzeugung – Generatorik

Für die Applikation eines Thermoelektrischen Generators (TEG) ist zunächst die Betrachtung vorhandener Wärmequellen- und -senken elementar, da diese das Temperaturniveau vorgeben und damit die Materialauswahl, den Wirkungsgrad und letztlich die Wirtschaftlichkeit bestimmen. Daher zunächst ein Überblick über den „Rohstoff“ Wärme: Deutschland hat einen Wärmebedarf von ca. 1259 Mrd. kWh/a (Stand 2024). Dieser Wärmebedarf teilt sich auf die drei Sektoren auf: rund 38 % entfallen auf die Industrie, 47 % auf die Haushalte, die übrigen 15 % entfallen auf den Gewerbe-, Handels- und Dienstleistungssektor. Der Großteil der Wärme wird für die Erzeugung von Raumwärme (ca. 617 Mrd. kWh) benötigt, gefolgt von der Prozesswärme (466 Mrd. kWh) (BDEW, 2025). Raumwärme wird vor allem im privaten Sektor erzeugt und benötigt, die Prozesswärme vor allem in der Industrie. Der Anteil der Prozesswärme erzeugt hierbei eine beachtliche Menge an „Abwärme“ auf stark unterschiedlichen Temperaturniveaus. Im Mai 2025 wurde dem Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle eine Abwärmemenge von rund 352 TWh gemeldet.

Abbildung 15: oben: Wärmebedarf in Deutschland nach Anwendung (BDEW; 2025); unten: Temperaturniveau der vorhandenen Abwärme nach BfEE; Stand 05/2025 (https://www.bfee-online.de/SharedDocs/Downloads/BfEE/DE/Effizienzpolitik/pfa_veroeffentlichung_daten.pdf?__blob=publicationFile&v=14)



Abgrenzung zu anderen Abwärmetechnologien

Thermoelektrik bietet das Potential, nahezu alle Temperaturniveaus nutzen zu können, das wichtigste Kriterium ist ein verfügbarer Temperaturgradient. Das Leistungsspektrum der TE-Module reicht von Mikrowatt bis einige Watt pro Modul. Durch die Verschaltung einzelner Module zu größeren Arrays, ähnlich wie bei Photovoltaikanlagen, können Leistungen bis zu einigen Kilowatt erreicht werden. Dies ermöglicht sowohl kleine, mobile als auch große, stationäre Anwendungen. Die Vielfalt möglicher

Geometrien der TE-Module (TEM) und -Generatoren bis hin zu flexiblen Modulen eröffnet die Anpassbarkeit der thermoelektrischen Systeme an fast jede räumliche Anforderung (siehe Kapitel "Aufbau und Herstellung thermoelektrischer Module"). Der ORC-Prozess, Gas-, Dampfturbine und Gasmotor-BHKW weisen zum Teil höhere Wirkungsgrade als TEG auf. Der technische und finanzielle Aufwand für die Integration dieser Technologien in einen Prozess sind enorm, und gerade für kleine bis mittlere Abwärmemengen lassen sich diese Technologien kaum wirtschaftlich nutzen.

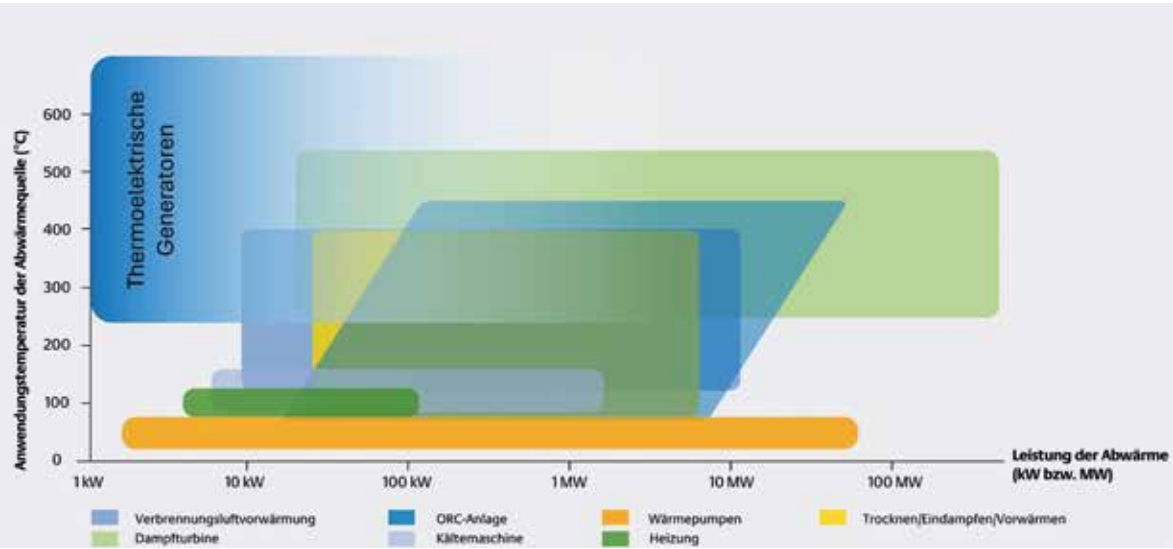


Abbildung 16: Darstellung der Einsatzmöglichkeiten verschiedener Abwärmenutzungstechnologien nach Leistungsbereich und Anwendungstemperatur (Schwab et al. 2024).

Vorteile der Thermoelektrischen Generatoren

Die Thermoelektrik bietet flexible Gestaltungsoptionen hinsichtlich der Temperatur- und Leistungsanforderungen. Ein wesentlicher Vorteil der TEG ist die vergleichsweise einfache Prozessintegration. Niedrige Spannungsniveaus zählen ebenfalls zu den Vorteilen der thermoelektrischen Generatoren. Eine Herausforderung bei der Integration der Systeme besteht oft darin,

sie nachträglich in bestehende Prozesse einzubinden, was die konstruktive Freiheit erheblich einschränkt. TEG erzeugen weder Geräusche noch Emissionen und sind durch die lange Haltbarkeit ressourceneffizient. Der wohl größte Vorteil der TEG ist ihre außergewöhnliche Langlebigkeit und Zuverlässigkeit ohne Wartungsbedarf, insbesondere unter konstanten Betriebsbedingungen. Dies macht sie besonders attraktiv für Anwendungen in der Raumfahrt.

Thermoelektrikanwendungen in der Raumfahrt: Die Welt ist nicht genug

Die 1977 von der NASA gestarteten Raumsonden Voyager 1 und Voyager 2 haben in den 2010ern als erste menschengemachte Objekte das Sonnensystem verlassen und sind gewissermaßen unsere Augen und Ohren im Weltall. Die elektrische Leistungsverorgung für die wissenschaftlichen Instrumente und die Kommunikationseinheit wird durch Radioisotopenthermogeneratoren (RTG) sichergestellt, und dies auch heute noch, nach mehr als 40 Jahren im Einsatz und außerhalb des Sonnensystems! Wie in Abbildung 17 dargestellt, sind die Voyager-Missionen nur ein Beispiel für den Einsatz der RTG. Dank ihrer Robustheit und Unabhängigkeit von der Sonne sind RTG das Mittel der Wahl, wenn die Energieversorgung der Raumsonden oder Landeeinheiten aufgrund enormer Distanzen zur Sonne bzw. Abschattung (Staub, Wolken) nicht über Solarzellen sichergestellt werden kann (Mars Rover Curiosity und Perseverance).

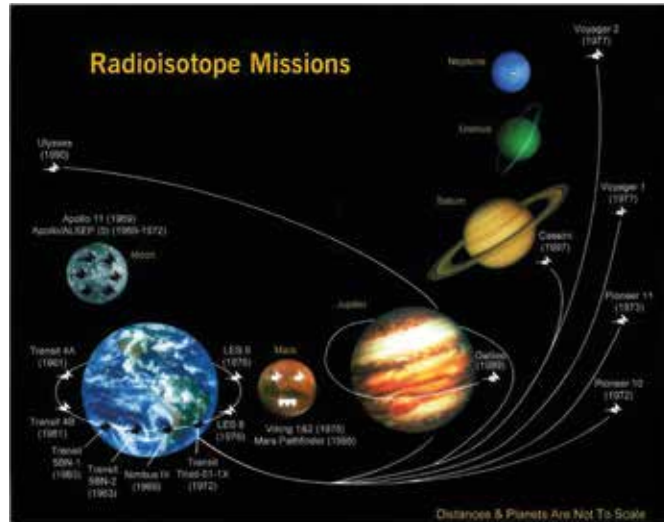


Abbildung 17: Missionsübersicht der NASA bei denen RTG verwendet wurden. Quelle: <http://thermoelectrics.matsci.northwestern.edu>

Quelle: <http://thermoelectrics.matsci.northwestern.edu/thermoelectrics/history.html>.

Wie funktioniert ein Radioisotopenthermogenerator?

Wie in Abbildung 18 dargestellt enthält ein RTG ein gekapseltes, langsam zerfallendes radioaktives Material („General Purpose Heat Source“), welches als Wärmequelle verwendet wird.

Diese Zerfallswärme wird über TEM an die Umgebung abgeführt und dabei mittels des Seebeck-Effektes anteilig in elektrische Energie umgewandelt. Wie man sich leicht vorstellen kann, sind die Anforderungen an die verwendeten thermoelektrischen Materialien/Module erheblich: extreme Zuverlässigkeit (die nächste Reparaturmöglichkeit ist einige Kilometer entfernt) sowie Stabilität gegenüber starken Temperaturveränderung (Start vs. Flugbetrieb), extremen Beschleunigungen sowie kosmischer Strahlung. Die Entwicklungszeiten für RTG sind deshalb lang und nur wenige Materialklassen sind bis jetzt zum Einsatz gekommen, wie SiGe und PbTe/TAGS) (siehe Kapitel "Thermoelektrische Materialien" und "Aufbau und Herstellung thermoelektrischer Module").

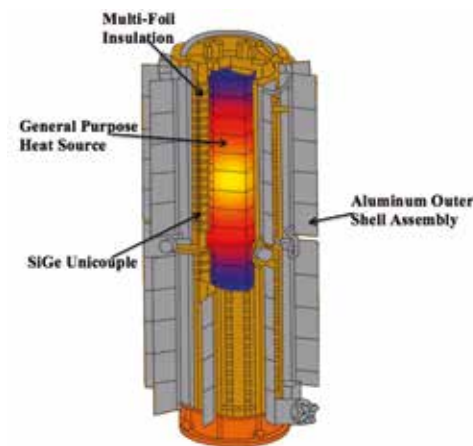


Abbildung 18: Schematischer Aufbau eines Radioisotopengenerators (RTG) auf Basis von SiGe Copyright: Parker Beatty unter CC BY-SA

Copyright: Parker Beatty unter CC BY-SA 4.0
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a1/SiGe_RTG.png

Der Mond als Tor zum Weltall

Angestoßen unter anderem durch das Artemis Programm der NASA – in Kooperation mit der ESA und weiteren Partnern – wurden die RTG Entwicklungsaktivitäten in den letzten Jahren erheblich verstärkt. Ziel des Artemis Programms ist es, erstmals seit den Apollo-Missionen wieder Menschen auf die Mondoberfläche zu bringen und dort eine permanente Mondbasis zu errichten. Im Gegensatz zu früheren Missionen soll der Transfer der Astronauten zwischen dem Orion-Raumschiff und der Mondoberfläche über eine Raumstation in der Umlaufbahn des Mondes erfolgen. In diesem Zusammenhang werden RTG eine wichtige Rolle spielen und vielfältige Verwendung finden, sei es als Backup für die Stromversorgung der Mondbasis oder als autonome Energiequelle für basisferne autarke Sensoren oder lunare Erkundungsmissionen, z. B. mit Rovern. Da die Energieversorgung ein zentrales Thema ist, wird die Entwicklung einer unabhängigen europäischen RTG-Technologie von der ESA vorangetrieben. So wurde 2019 bspw. ein funktionsfähiger Demonstrator auf Bis-muttellurid-Basis vorgestellt, siehe Abbildung 19.

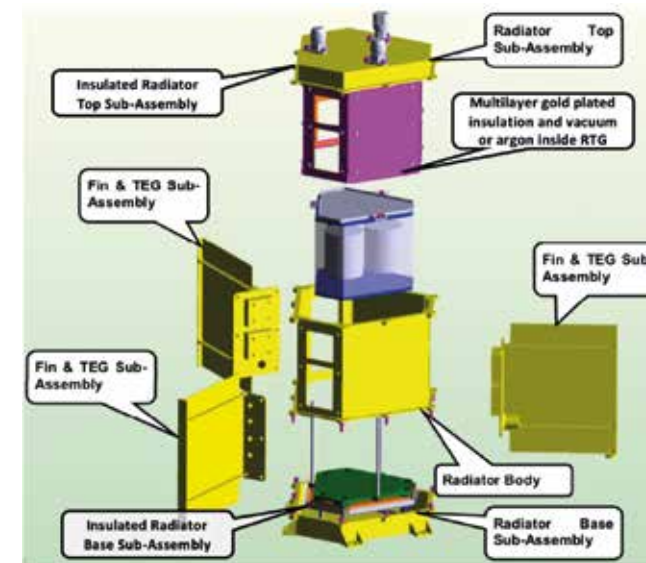


Abbildung 19: Explosionszeichnung des ESA RTG Demonstrators

(Ambrosi et al., 2019).

Der Weg zum Mond führt über Köln

Im Rahmen des Projektes LUNA wurde in Köln eine Anlage zur Vorbereitung künftiger astronautischer und robotischer Mondmissionen errichtet. Dort sollen Astronauten, Wissenschaftlerinnen und industrielle Partner für zukünftige Missionen innerhalb eines lunaren Testfeldes trainieren und den Umgang mit neuen Technologien erproben und bewerten können. Ausgehend von eigenen Material- und Technologieentwicklungen (u.a. kaskadierte Skutteruditmodule mit ~10% Wirkungsgrad) entwickeln Wissenschaftlerinnen und Techniker des DLR im LUNA-Projekt einen Demonstrator für einen RTG. Ziel hierbei sind die Erhöhung der spezifischen Leistungsdichte der europäischen RTG und die Erprobung neuartiger, leistungsfähigerer thermoelektrischer Materialien. Dabei wird auch die veränderte geopolitische Großwetterlage berücksichtigt und thermoelektrische Module auf Basis gut verfügbarer Ausgangsstoffe (Mg, Si, Sn) priorisiert; auch hier kann auf umfangreiche Vorarbeiten zurückgegriffen werden. Ferner entsteht ebenfalls ein RTG Simulator, welcher wie ein RTG gehandhabt wird, eine elektrische Leistung entsprechend des Missionsprofils ausgibt und den Akteuren somit als portable Energiequelle innerhalb des LUNA-Testfeldes dienen wird.

Ein Blick in die Zukunft

Thermoelektrische Module haben als zentrale Komponenten von RTG ihre Robustheit und Zuverlässigkeit auf einer Vielzahl von extraterrestrischen Missionen eindrucksvoll unter Beweis gestellt. Während es für Voyager 1 und 2 langsam dunkel wird (letzter Kontakt vermutlich ~2030) erfährt die Entwicklung leistungsfähigerer RTG in Amerika, in Europa und Asien neuen Schwung. RTG und thermoelektrische Module sind eine Schlüsseltechnologie für die Erforschung des Weltraums und können in Zukunft dafür sorgen, dass beim Mann im Mond das Licht nie wieder ausgeht.

Thermoelektrische Generatoren zur Effizienzsteigerung in Kraftfahrzeugen

Neben der etablierten Anwendung der RTG in der Raumfahrt wird derzeit an der weiteren Etablierung der Thermoelektrik in verschiedenen Anwendungen gearbeitet. Die hohen Abgastemperaturen der Verbrennungsmotoren sind von Vorteil für den effizienten Einsatz der TEG. Die hohen Stückzahlen der Fahrzeugproduktion versprechen eine große Kostendegression der Technologie. Das Ziel der Effizienzsteigerung im Verkehrssektor betrifft alle Bereiche, von PKW über LKW bis hin zu Off-Road-Anwendungen wie bspw. Bagger und Traktoren sowie Bahn- und Schiffsanwendungen. Auch eine Transformation der Energieträger und Antriebsstränge ergibt viele Möglichkeiten für TEG, wie beispielsweise im Bereich der Wasserstoffmobilität.

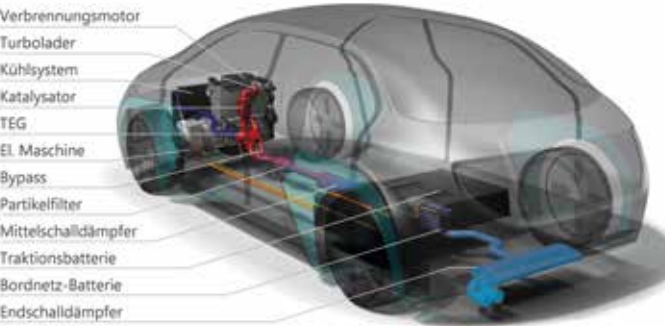


Abbildung 20: Thermoelektrischer Generator im Abgasstrang eines Hybridfahrzeuges. (Kober, 2020)

Ein TEG kann Wärme aus dem Abgas eines Kfz in elektrische Energie wandeln. Diese Energie muss somit nicht durch die Lichtmaschine bereitgestellt werden, was zu einer Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und der damit verbundenen Emissionen führt. Zusätzlich wird durch den TEG Wärme zurückgewonnen. Dies ermöglicht z. B. die effiziente Beheizung des Innenraumes oder die Verkürzung der Kaltstartphase. Gerade bei neuen, effizienten Verbrennungsmotoren, fallen geringere Wärmemengen im Kühlmittel an und die Temperierung des Innenraumes erfolgt

oft zusätzlich durch elektrische Heizsysteme. Diese verursachen einen erhöhten Kraftstoffverbrauch, obwohl der Verbrennungsmotor als Kraft-Wärme-Maschine sehr effizient wäre, wenn man die Abgaswärme nutzen würde.

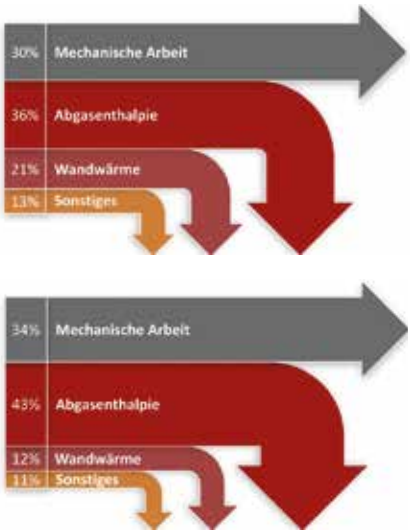


Abbildung 21: Energieflussdiagramm eines PKW der Kompaktklasse im Zyklusmittel (oben: Konventionelles Fahrzeug, unten: Hybridfahrzeug). (Kober 2020)

Betrachtet man das in Abbildung 21 auf der linken Seite dargestellte Energieflussdiagramm eines PKWs der Kompaktklasse (Volkswagen Golf, im Referenzzyklus WLTC) zeigt sich, dass ca. ein Drittel der Kraftstoffenergie als mechanische Energie umgesetzt wird. Jeweils ein weiteres Drittel entfällt ungefähr auf die Abgasenergie und auf die Motorkühlung. Wird der Verbrennungsmotor in effizienteren (höheren) Betriebspunkten betrieben, wie z. B. bei Hybridfahrzeugen, verringern sich die Wandwärmeverluste, die in die Motorkühlung fließen, deutlich, woraus sich eine Effizienzsteigerung ergibt. Die Verluste im Abgas sind jedoch, trotz höherer Motoreffizienz, deutlich höher. Somit kann sich auch bei

effizienten Verbrennungsmotoren ein hohes Potential zur Abwärmenutzung ergeben.

Dieselmotoren haben bedingt durch die Verbrennung mit einem hohen Luftüberschuss geringere Abgastemperaturen. Dennoch kann der Einsatz eines TEG hier lohnend sein, wie im Folgenden anhand von Nutzfahrzeugen beschrieben.



Abbildung 22: Wechselwirkungen eines TEG im Fahrzeugesamtsystem. (Kober, 2020)

	Effizienzsteigerung (Kraftstoffreduktion) [%]	Kosten/ Nutzen Verhältnis [€/gCO ₂ /km]	Amortisationszeit (TCO) [a]	
konventionelle PKW	> 2*	81	-	
Hybrid-PKW	> 3*	55**	-	
Diesel-NFZ	1–3	85	< 2 Jahre	
Erdgas-NFZ	2–4	32	<< 2 Jahre	

* Im WLTP (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure)
** Betrieb im Ladungserhaltungsmodus
TCO Gesamtbetriebskosten

Abbildung 23: Potentiale von TEG hinsichtlich der Anwendung im PKW und NFZ.

(Heber, 2023 und Kober, 2020)

Die notwendige Emissionsreduktion im Verkehrssektor erfordert vielfältige Technologien. Gerade Effizienztechnologien haben durch das „Wunder der Addition“ ein großes Potential. Ob sich eine Effizienzmaßnahme gegenüber einer anderen durchsetzt, hängt dabei vom Kosten-Nutzen-Verhältnis ab. In jüngerer Vergangenheit konnten thermoelektrische Systeme so ausgelegt werden, dass sie nicht nur eine maximale Verbrauchsreduktion erzielen, sondern zusätzlich ein gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis aufweisen. Beispielsweise konnte gezeigt werden, dass sich ein TEG in Nutzfahrzeugen innerhalb von weniger als 2 Jahren amortisiert (Heber, 2023). Die eingesparten Kraftstoffkosten, betrachtet auf der Referenzstrecke Stuttgart-Hamburg-Stuttgart, sind dabei so hoch, dass sie die prognostizierten Herstellkosten innerhalb von 2 Jahren übersteigen. Im Vergleich zu konkurrierenden Technologien zur Abwärmenutzung, wie bspw. Organic-Rankine-Cycle oder Electric-Turbo-Compound, ist der Wirkungsgrad der Thermoelektrik etwas geringer, jedoch das Kosten-Nutzen-Verhältnis deutlich besser. Die Konkurrenzsysteme kommen aufgrund des etwas höheren Wirkungsgrades oft zum Einsatz, wenn hohe Leistungen erforderlich sind und Kosten, Komplexität sowie Wartungsaufwand eine untergeordnete Rolle haben. Im Rennsport werden aus diesem Grund derzeit bspw. Turbo-Compound-Systeme zur Abwärmenutzung eingesetzt und unter dem Namen Heat Energy Recovery System (HERS) geführt. Bei einer überwiegen-

den Anzahl von Anwendungen außerhalb des Rennsports steht jedoch das Kosten-Nutzen-Verhältnis im Vordergrund. Dabei ist u. a. der geringe Wartungsaufwand für TEG ein Vorteil.

Die Frage warum Abwärmenutzung im Fahrzeugbereich, abgesehen von der Formel 1 bislang noch keine Anwendung findet, ist differenziert zu betrachten. Ein Teil der Antwort hängt mit den Regulierungen für PKW und NFZ zusammen. So wurden bislang im PKW-Bereich andere Effizienztechnologien mit noch besseren Kosten-Nutzen-Verhältnissen umgesetzt, um Ziele für die CO₂-Emissionen der Fahrzeugflotte zu erreichen. Wie in Abbildung 23 zu sehen ist, liegt das Kosten-Nutzen-Verhältnis der TEG bei weniger als 81 Euro bezogen auf ein Gramm an eingespartem CO₂ je Kilometer (Kober, 2020). Dies ist geringer als die möglichen Strafen der Europäischen Union mit 95 €/g/km, trotzdem gab es in der Vergangenheit Maßnahmen, um die Flottenziele noch kostengünstiger einzuhalten. Vereinzelt finden sich in Hybridfahrzeugen (bspw. Toyota Prius) Wärmetauscher im Abgas zur reinen Wärmerückgewinnung. Diese werden zur effizienten Temperierung der Fahrzeuge genutzt. Wenn die Zielsetzung der Entwicklung einen Schwerpunkt auf kalte Umgebungstemperaturen legt, kann die reine Abwärmenutzung den engen Kostenrahmen in der Fahrzeugtechnik erfüllen. Wenn sich ein Wärmetauscher im Abgas durchsetzt, so ist der Schritt zum Einsatz eines TEG als „Thermoelektrischer Wärmetauscher“ naheliegend.

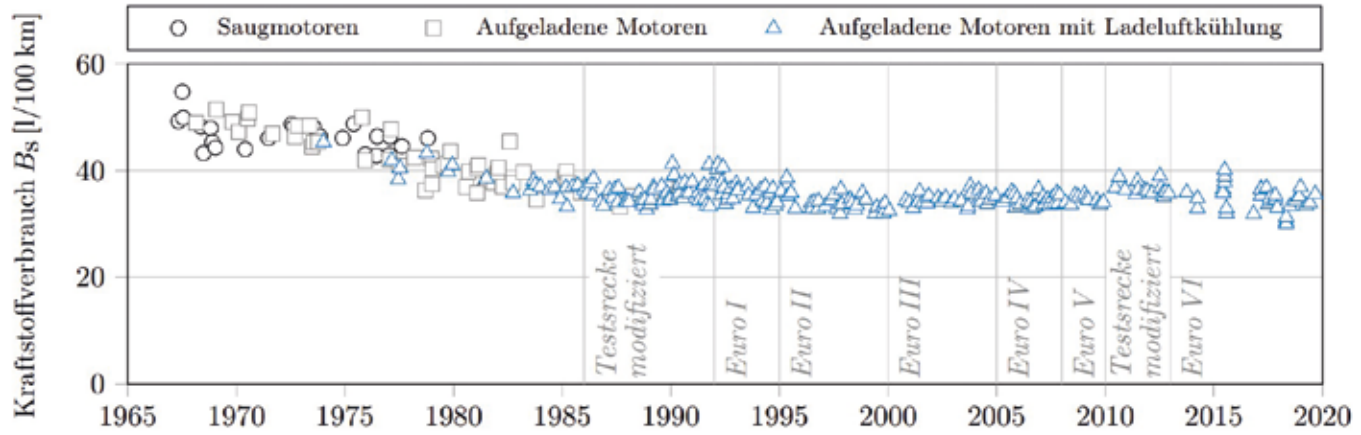


Abbildung 24: Entwicklung des Kraftstoffverbrauchs von schweren Nutzfahrzeugen (Heber, 2023)

Im NFZ-Bereich wurden in den letzten Jahrzehnten viele Regularien hinsichtlich Schadstoffemissionen (Euro 1–7) eingeführt. Durch Effizienzsteigerungen konnte der auch durch die beachtlichen Schadstoffreduktionen bedingte Mehrverbrauch kompensiert werden. Abbildung 24 zeigt, dass der Kraftstoffverbrauch von schweren Nutzfahrzeugen in den letzten 30 Jahren bei runde 35 l/100 km liegt. Erst 2018 erließ die EU Regularien hinsichtlich der Senkung des Kraftstoffverbrauchs für die Zukunft. Jedoch hat der wirtschaftliche Druck und die fehlenden Regularien hinsichtlich Effizienz den Einsatz weiterer Maßnahmen, wie bspw. TEG, noch nicht attraktiv genug gemacht. Betrachtet man die zukünftige Mobilität so ist eine große Transformation innerhalb einer kurzen Zeit erforderlich, um die Pariser Klimaschutzziele zu erreichen. Dies betrifft sowohl die Mobilitätsform als auch die Energieträger und Antriebsstränge. Dabei muss es gelingen weltweit eine große Klimawirkung zu erzielen. Auch wenn in der EU das Aus für Verbrennungsmotoren beschlossen wurde, zählt beispielsweise der Wasserstoff-Verbrennungsmotor als Zero-Emission-Technologie (Verordnung (EU) 2019/1242). Darüber hinaus ist der Einsatz von synthetischen Kraftstoffen vorgesehen. Vergleicht man einen Wasserstoff-Verbrennungsmotor mit einer Brennstoffzelle, so liegt die Gesamtsystemeffizienz der Brennstoffzelle in einigen Anwendungen nur ca. 2 Prozentpunkte höher als beim Wasserstoffmotor. Die Kosten und Marktreife erscheinen beim Wasserstoffmotor teilweise deutlich besser. Wie sich Kosten und Wirkungsgrade entwickeln ist schwer vorherzusagen. Effizienzmaßnahmen wie TEG können jedoch eine entscheidende Rolle dabei spielen die Effizienz zu steigern und dadurch realisierbare Technologien zu ermöglichen.

Auch bei der Verwendung von Brennstoffzellen fallen hohe Abwärmeströme an, je nach Anwendung auf unterschiedlich hohen Temperaturniveaus. Darüber hinaus rückt für mobile Anwendungen der Einsatz flüssigen Wasserstoffs in den Fokus. Die tiefen Temperaturen des flüssigen Wasserstoffs mit bis zu -250 °C bieten ein hohes Potential für den Einsatz thermoelektrischer Generatoren. Gerade bei einer Transformation auf andere Energieträger ergeben sich somit weitere Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung. Da zu erwarten ist, dass die zukünftigen Energieträger teurer sind als die bestehenden, ergeben sich auch höhere Chancen für den Einsatz einer neuen Effizienztechnologie.

TEG-Bauweise und Leistungsdichte

Es wurden in der Vergangenheit verschiedene Bauweisen für TEG untersucht. Dabei basieren viele dieser Bauweisen auf planaren thermoelektrischen Modulen (siehe Kapitel “Aufbau und Herstellung thermoelektrischer Module”) welche als Stapel oder als Hexagon angeordnet wurden. Zudem wurden zylindrische Bauweisen und modulare Bauweisen untersucht. Hinsichtlich der Fahrzeuganwendung hat sich die Stapelbauweise weitgehend etabliert. Dabei wird, wie auf Seite 29 dargestellt, das Heißgas aufgeteilt und strömt durch mehrere Heißgaswärmeübertrager (rot dargestellt). Für die Kaltseite werden mehrere Kühlmittelwärmeübertrager verwendet (blau dargestellt). Die gelb dargestellten TE-Module werden zusammen mit Wärmeleitfolien oder Wärmeleitpaste in dem Stapelaufbau verpresst. Bei der Systemauslegung hat sich gezeigt, dass der Auslegung der Wärmeübertrager in dem Gesamtsystem eine hohe Bedeutung zukommt, da diese eine möglichst hohe Wärmeaus- bzw. einkopplung ermöglichen sollen, zugleich aber in ihrem Wärmewiderstand auf die TE-Module abgestimmt sein müssen, um hohe elektrische Leistungsausbeuten zu gewährleisten.



Abbildung 25: Funktionsmuster eines Thermoelektrischen Generators (TEG) für Nutzfahrzeuge mit rund 3kW elektrische Leistung und einem Gesamtsystem-Wirkungsgrad von 7,1% Quelle: DLR FK Stuttgart

Thermoelektrische Hochtemperaturmodule müssen überwiegend in einer Schutzgasatmosphäre oder unter Vakuum betrieben werden, um z. B. Oxidation zu vermeiden. Hierzu kann das Modul entweder einzeln oder im gesamten Stapel gekapselt

werden. Bei der auf Seite 29 dargestellten Bauweise wurde die Kapselung der Module in hochintegrierter Form mit einem gesamten Gehäuse vorgenommen. Das daraus entstandene Funktionsmuster ist in Abbildung 26 dargestellt und wurde hinsichtlich Kosten-Nutzen für ein Erdgas-Nutzfahrzeug ausgelegt. Als Ergebnis konnte am Heißgasprüfstand eine generierte elektrische Leistung von rund 2700 W gemessen werden (Heber et al., 2021). Für die Auslegungsvariante hinsichtlich maximaler Leistung und nicht Kosten-Nutzen ließen sich im Nutzfahrzeug noch deutlich höhere elektrische Leistungen aus der Abwärme gewinnen.

Betrachtet man die Ergebnisse der letzten Jahre so zeigt sich eine Steigerung der Leistungsdichte auf bis zu 250 W/kg und 500 W/dm³ für fahrzeuggerechte Systeme. Dabei ist jedoch zu beachten, dass der Auslegungsfokus auf dem Kosten-Nutzen-Verhältnis und nicht auf der Leistungsdichte lag. Würde man bspw. für eine Anwendung im Luftfahrtbereich einen noch stärkeren Fokus hinsichtlich der Leistungsdichte setzen, könnte diese weiter gesteigert werden.

Vergleicht man verschiedene mobile Anwendungen von TEG mit alternativen Technologien, so zeigt die Thermoelektrik deutliche Vorteile hinsichtlich der geringeren Systemkomplexität. Die Thermoelektrik als Flächen-Technologie hat Vorteile hinsichtlich der Skalierung. So lassen sich unterschiedlich große Flächen mit entsprechenden Anzahlen von TE-Modulen belegen und somit unterschiedliche Leistungsklassen adressieren. Im Gegensatz dazu haben Volumen-Technologien, die überwiegend auf Dampfprozessen beruhen, höhere Wirkungsgrade bei höherer Komplexität. Auch das Ansprechverhalten bei Lastwechsel ist dabei für



Abbildung 26: TEG für ein Nutzfahrzeug mit rund 2700 W gemessen auf dem Heißgasprüfstand
Quelle: DLR FK Stuttgart

mobile Anwendungen ein herausforderndes Thema. Im Allgemeinen zeichnet sich ein Anwendungsbereich von TEG bei kleinen bis mittleren Anwendungen ab, bei denen die Kosten-Nutzen-Verhältnisse von TEG überwiegen können. Die Grenze ist dabei fließend und stark abhängig vom Gesamtsystem und den Randbedingungen. Im stationären Bereich hat der Organic-Rankine-Cycle seine Stärken bei einer Leistungsklasse ab 1 MW an elektrischer Leistung. Durch die Forschungsarbeiten an PKW und LKW kann man ablesen, dass sich bereits bei geringeren Leistungen ein Feld für TEG öffnet. Inwieweit die Systeme erfolgreich hochskaliert werden können, bleibt weiter zu erforschen.

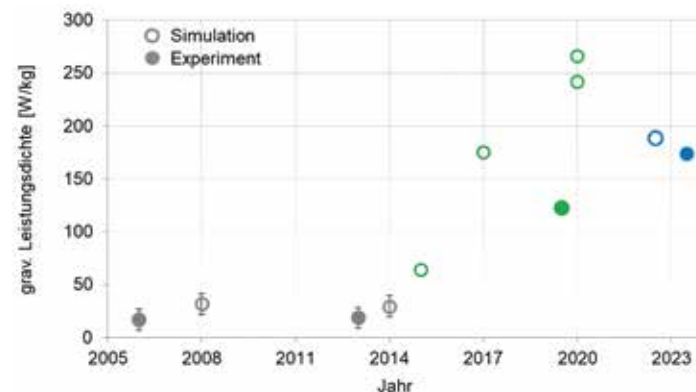


Abbildung 27: Entwicklung der gravimetrischen Leistungsdichte für fahrzeuggerechte TEG.

Heber, 2023 und Kober, 2020

Energiewandlung – (Ab-)wärmenutzung mit Thermoelektrischen Generatoren

Die Notwendigkeit für den effizienten Einsatz der Energie ist nicht nur im Verkehrssektor ein aktuelles Thema, sondern auch für Industrie und Haushalte. Steigende Energiepreise erhöhen den finanziellen Druck, die Energie effizient einzusetzen bzw. neue Energiequellen zu erschließen. Die Thermoelektrik bietet hierbei auch außerhalb der bisher genannten mobilen Anwendungen viel Potential.

Anwendung der Thermoelektrik im privaten Sektor

Der Wärmebedarf eines Wohnhauses (130 m²) in Deutschland liegt bei ca. 16.900 kWh pro Jahr. Die überwiegende Mehrheit (rund 75%) entfällt auf die benötigte Raumwärme mittels Verbrennungsprozess (BDEW, 2025). Das Temperaturgefälle von über 1000 °C zwischen dem Verbrennungsgas und dem warmen Heizungswasser von ca. 50 °C kann z. B. mit TEG genutzt werden.

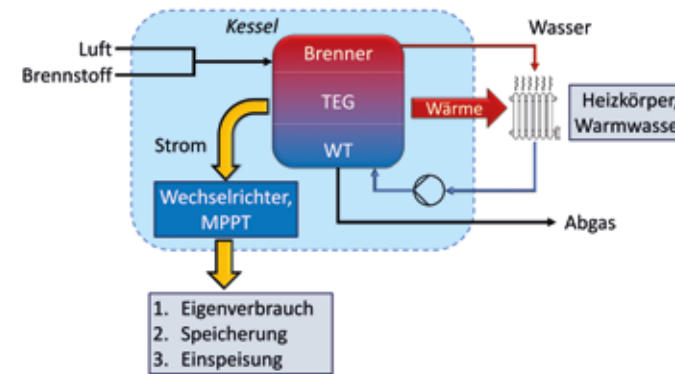


Abbildung 28: Konzeptdarstellung eines Nano-BHKWs mit TEG für Einfamilienhäuser.
Stumpf et al. 2023

Im typischen Einfamilienhaus sind das mit aktuell verfügbaren TEG mit 5 % Wirkungsgrad 845 kWh Strom pro Jahr – das entspricht mit dem aktuellen Strompreis (0,3 €/kWh) 253 € pro Jahr Kostenersparnis. Damit amortisierte sich ein TEG mit einer Investitionssumme von 1.000 € in vier Jahren. Mit einer voraussicht-

lichen Betriebszeit von mehr als 15 Jahren für TEG und Heizung, ergibt sich ein deutliches Plus – insbesondere bei steigenden Strompreisen. Darüber hinaus kann durch die dezentrale Stromerzeugung im Kleinmaßstab das Netz entlastet und in einer synergetischen Kombination mit PV-Anlagen eine zeitweise Netzautarkie kleiner Immobilien auch für sonnenarme Zeiträume, wie sie bspw. im Winter auftreten, erreicht werden. Die Realisierung dieser Idee wird derzeit an verschiedenen Forschungsstätten und durch verschiedene Firmen erprobt und mit unterschiedlichen Heizungsvarianten weiterentwickelt.

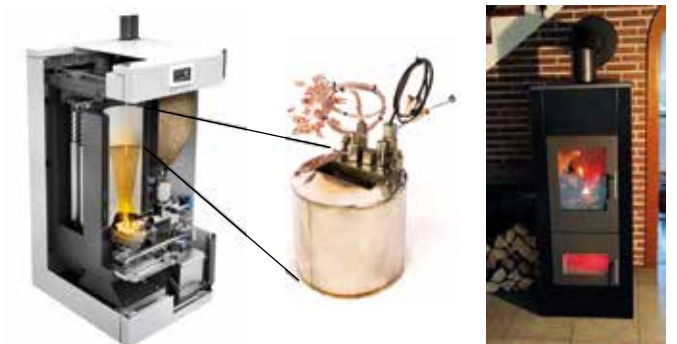


Abbildung 29: links: TEG in einem Pelletofen der Firma Ritter Energie aus dem Projekt "PellTEG" (Schwab et al.); rechts: Scheitholzofen mit TEG der Firma Seebeck Holzöfen
Quelle: <http://he-energy.com/>

Durch die Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung werden Systemwirkungsgrade von über 90% für das jeweilige Gesamtsystem realisiert. Die Systeme können 300 W bis 600 W in Abhängigkeit der TEG-Wirkungsgrade bereitstellen und somit die Grundlast eines typischen Vierpersonenhaushaltes in einem Einfamilienhaus abdecken. Ein teurer Batteriespeicher wird hierdurch nicht notwendig, kann aber in Kombination mit einer PV-Anlage die zeitweilige Netzunabhängigkeit absichern. Bei einer flächendeckenden Nutzung solcher Anlagen könnten in Deutschland ca. 4,4 Mio. t CO₂ (ca. 7 % der Heizungsemissionen) eingespart werden.

Eine etwas andere Anwendung hierzu ist der Einsatz in einfachen Holzöfen in Schwellenländern für die Verbesserung der Verbrennung, indem ein TEG-betriebener Ventilator als Gebläse für die Feuerung eingesetzt wird (Gao et al., 2016). Dieses Konzept zielt darauf ab, durch den Ventilator den Verbrennungsprozess zu verbessern. Es werden damit gesundheits- und klimaschädliche Emissionen vermindert und zusätzlich ergeben sich weitere Vorteile durch den reduzierten Brennstoffbedarf. Die CO₂-Bilanz eines TEG-Systems zu bewerten ist komplex und erfordert viele oft nicht verfügbare Daten. Hier ist im individuellen Fall zu vergleichen, welche Wärmequelle bzw. welcher Brennstoff verwendet wird und wie der regional verfügbare Strom erzeugt wird.

Stationäre Anwendung in der Industrie

In der Industrie können TEG insbesondere bei Prozessen mit großem Temperaturgefälle effektiv eingesetzt werden. Beispielsweise bei Kühltürmen oder großen Wärmeübertragern, können thermoelektrische Energiewandlungsprozesse effizient genutzt werden. Ein beträchtlicher Anteil der benötigten Prozesswärme in Deutschland geht bisher ungenutzt als Abwärme verloren (BMWK, 2023; UBA, 2019; und Reitze et al., 2021). Durch den Einbau der Thermoelektrik ändern sich die Prozessparameter nur minimal, da der TEG die durch ihn geleitete Wärme überwiegend weiterleitet und nur einen kleinen Teil (ca. 5–10 %) in Strom umwandelt. Insbesondere metallurgische Prozesse generieren große Mengen an Wärmeenergie. Im Projekt „RecoveryPlus“ wurde ein TEG in Baden-Württemberg in einem Zinkschmelzofen in einem realen Industrieprozess getestet. Die Stromausbeute eines solchen TEG-Systems ist mit einer 60 m² großen Photovoltaikanlage vergleichbar, zusätzlich wird Heizwärme bereitgestellt. Die Amortisationszeit des Systems beläuft sich auf drei Jahren. Dies zeigt, dass TEG-Systeme im Bereich der industriellen Abwärmennutzung mit einer hohen Wirtschaftlichkeit eingesetzt werden können. Die Erprobung im betrieblichen Umfeld ergab praxisnahe Erkenntnisse zur Langzeitstabilität. Durch die industrielle Abwärmennutzung mit TEG ergibt sich je nach Marktdurchdringung ein Einsparpotenzial von 7,21 TWh oder bis zu 5 Mio. t CO₂ pro Jahr in Deutschland (Schwab et al., 2024).

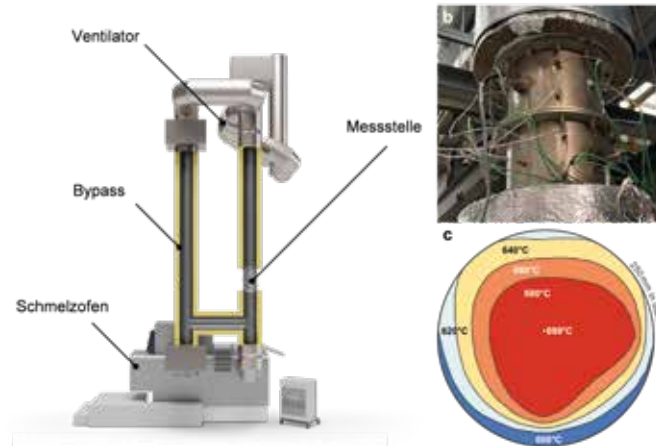


Abbildung 30: TEG in einem Zinkschmelzofen.

Schwab et al., 2024

In den mittelständischen Holzverarbeitenden Industrie- und Handwerksbetrieben gibt es Bedarf an Wärme und Strom. Der Bedarf an Wärme wird häufig durch die Nutzung von dort anfallenden Biomasserest- und Abfallstoffen gedeckt. Aufgrund der ganzjährigen Produktion ist oft ein viel höheres Brennmaterialaufkommen vorhanden und muss entsprechend aufwendig abtransportiert werden. Diese Überkapazität wird im Forschungsprojekt „BiomassTEG“ dazu genutzt mittels Implementierung eines TEGs in einem Biomassekessel zusätzlich Strom zu erzeugen.

Energie-Harvesting, autarke Sensoren und autarke Systeme

Für viele Sensoren oder moderne elektronische Geräte werden häufig nur kleine Strommengen benötigt. TEG können wartungsfrei, netzunabhängig und über lange Zeiträume eine einfache Lösung für solche Aufgaben sein, wenn Temperaturgradienten nutzbar sind. Insbesondere Batterien können so in zahlreichen Anwendungen vorteilhaft ersetzt werden. Body Energy Harvesting beschreibt die Nutzung der Körperwärme zur Erzeugung von elektrischer Energie. Der menschliche Körper kann je nach Aktivität bis ca. 100 W Wärmeenergie bereitstellen. Verfügbare TEG erreichen einen Wirkungsgrad von 5 %, womit mittels TEG maximal 5 W elektrische Energie generiert werden können. Allerdings

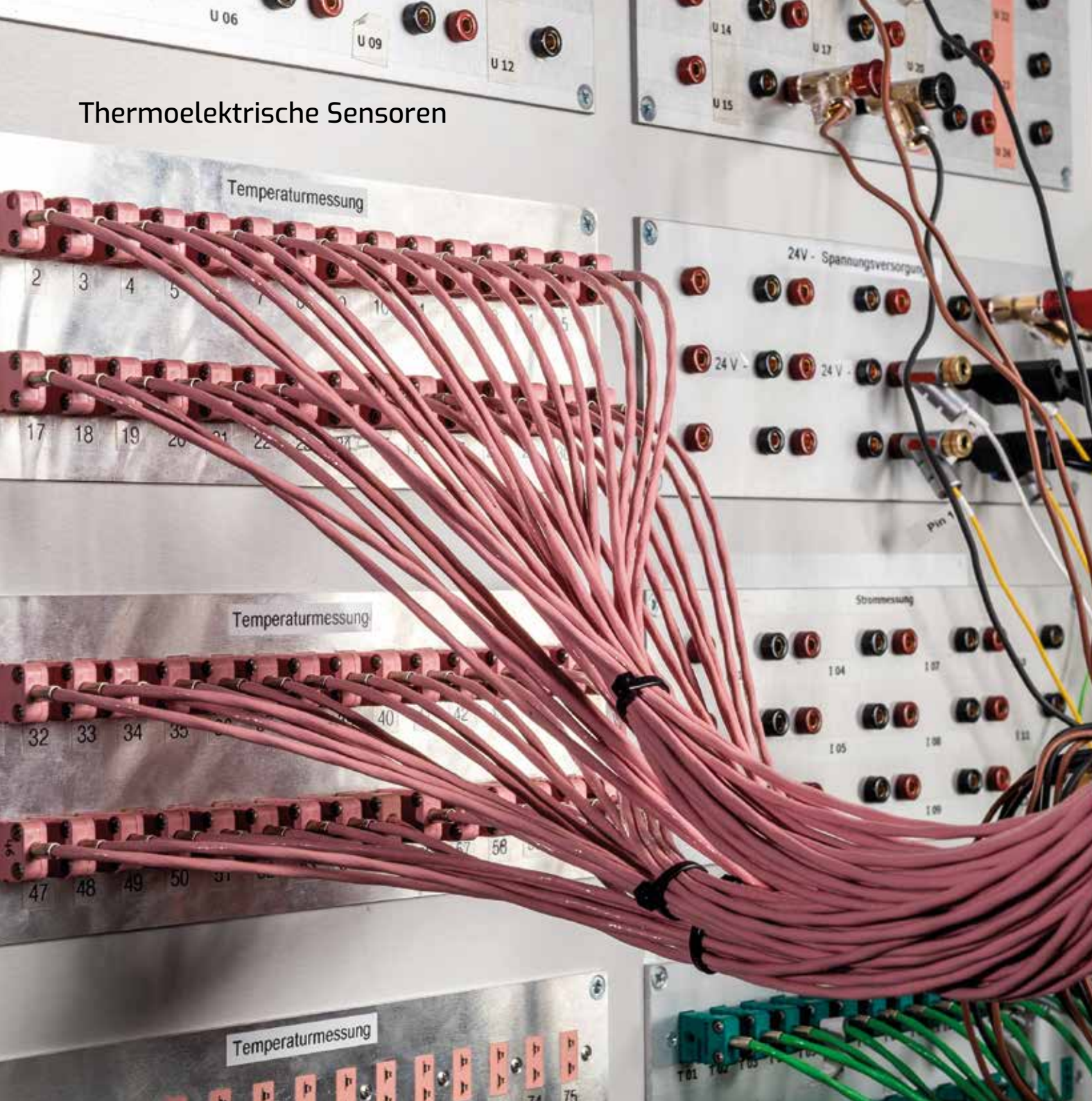
wird bei der Rechnung vorausgesetzt, dass die komplette Körperwärme nutzbar ist, was praktisch nur für einen Bruchteil zutrifft. Einfach umsetzbar sollte die Nutzung von 0,1 % der Körperwärme sein, die dann für 5 mW elektrischer Leistung ausreicht. Für medizinische Sensoren, oder Smartwatches sind häufig μ W bis mW oder wenige Watt ausreichend. Die Integration der TEM bedeutet in diesem Kontext die optimale Anpassung an die jeweilige Körperstelle und die Sicherung der Wärmeabgabe nach außen. Weiterhin sind gerade bei diesen TEM Gewicht, Flexibilität, Robustheit und die Verwendung unbedenklicher/ungiftiger Werkstoffe wichtige Faktoren für die Produktentwicklung. Als Beispiel dienen hier Uhren, oder medizinische Sensoren z.B. für die Überwachung der Körpertemperatur. Aber auch Sensor-Netzwerke in T-Shirts für Pulsüberwachung, Fitnessfunktionen oder Kopfhörer und Hörgeräte sind möglich (Siddique et al., 2017).

An schwer zugänglichen oder gefährlichen Stellen bzw. Anlagenabschnitten bieten autarke Sensoren große Vorteile. Wartungen, Batteriewechsel und Verkabelung entfallen und eröffnen so die Platzierung an Stellen, die bislang nicht bzw. nur unter erheblichem Aufwand zugänglich sind. So werden TEG beispielsweise zum Aufbau eines firmenweiten internen WLAN verwendet. Hierbei werden über das Firmengelände WLAN Repeater mit TEG verteilt, die den benötigten Strom aus der jeweiligen Abwärmequelle generieren (AEInnova). In Flugzeugen können TEG Sensoren mit Strom versorgen, die Informationen über den Zustand des Flugzeugrumpfes melden. Hier wird die Temperaturdifferenz zwischen Flugzeuginnenraum und Umgebung genutzt, um die TEG zu betreiben (Bartolome et al., 2010). In beiden Fällen ist die TEG-Nutzung durch die Minimierung des Verkabelungsaufwandes

des interessant. Im Bereich der Geologie bieten TEG den Vorteil, dass sie langlebig und sehr robust sind: Bei der Überwachung vulkanischer Aktivitäten wird der Boden als Wärmequelle genutzt und mit dem erzeugten Strom die Überwachungssensorik vor Ort versorgt. Dies erspart aufwändige und gefährliche Expeditionen in vulkanisch aktives Gebiet, um Batterietausch und Wartungen vorzunehmen oder das Verlegen der Kabel in diesem Gebiet. Der erzeugte Strom reicht aus, um die Überwachungssensorik, die Datenspeicherung und einen Sender zu betreiben (Alegria et al., 2022; und Catalan et al., 2020).

Weitere Anwendungsgebiete bei denen Thermoelektrischen Generatoren mit teilweise hoher Stückzahl im Markt vertreten sind, sind autarke Systeme. Ähnlich zu den Anwendungen in der Raumfahrt gibt es auch viele terrestrische Anwendungen bei denen eine zuverlässige Wärmequelle zur Verfügung steht und die Wartungsfreiheit eine der wichtigsten Anforderungen ist. So beispielsweise Systeme die zum Korrosionsschutz von Pipelines eingesetzt werden. Korrosion entsteht durch eine elektrochemische Reaktion zwischen zwei Elektroden: Anoden und Kathoden. Der kathodische Korrosionsschutz ist eine wirksame Methode, um kostspielige Korrosionsprobleme zu bekämpfen. Rohrleitungen sind normalerweise anodisch, doch wenn elektrischer Strom zugeführt wird, wird die Rohrleitung kathodisch. Für den Korrosionsschutz in verschiedenen Bereichen werden üblicherweise Thermoelektrische Generatoren mit einer elektrischen Leistung von 50 W bis zu 6 kW eingesetzt (Global Power Technologies, 2026). Solche autarken Systeme mit TEG werden schon seit Jahrzehnten in hohen Stückzahlen eingesetzt.

Thermoelektrische Sensoren



Thermoelektrische Sensoren

In diesem Abschnitt wollen wir uns mit dem Einsatz thermoelektrischer Materialien in der Messtechnik als Messfühler (Sensoren) beschäftigen. Die Messgröße ist dabei grundsätzlich die Temperatur, die unter Ausnutzung des Seebeck Effekts in eine elektrische Spannung umgewandelt wird. In diesem Zusammenhang sei erwähnt, daß die Temperatur die am häufigsten in der Forschung und Industrie erfasste physikalische (nicht elektrische) Messgröße ist. Hinsichtlich Kontaktierung des Messfühlers mit dem Messobjekt sind folgende zwei Arten zu unterscheiden: berührend (konduktiv) und berührungslos (radiativ). In den nachfolgenden Ausführungen werden nachstehende Anwendungsfälle besprochen:

- Thermoelemente (konduktiv),
- Berührungssensoren (konduktiv), und
- Infrarot (IR) Detektoren (radiativ).
- Wie funktioniert ein Thermoelement?

Aus Kostengründen sowie aus Gründen der Robustheit werden zur Temperaturmessung in der Regel Thermoelemente aus Metallen bzw. Metalllegierungen und nicht aus Halbleitermaterialien eingesetzt.

Abbildung 31 zeigt eine vereinfachte Darstellung einer berührenden Temperaturmessung mit einem Thermoelement. Das Thermoelement besteht aus zwei unterschiedlichen Metallen, die an einer Seite miteinander verbunden sind (Messstelle, auch

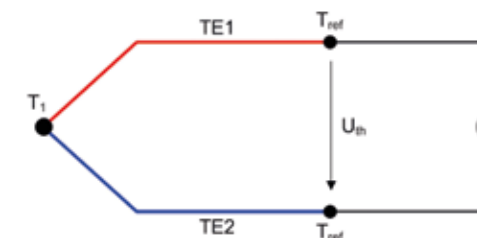


Abbildung 31: Vereinfachte Darstellung einer Temperaturmessung mit einem Thermoelement. TE1 und TE2 sind die beiden Thermoelementmaterialien; T_1 ist die Temperatur an der Meßstelle (Lötstelle) und T_{ref} ist die Temperatur an der Vergleichsstelle.

THERMOELEKTRISCHE SENSOREN

als Lötstelle bezeichnet). Wenn die Messstelle erwärmt wird, fließt elektrischer Strom. Wird dieser Stromkreis unterbrochen, ist die entstehende thermoelektrische Spannung (Thermospannung) eine Funktion der Temperatur an der Messstelle.

Für den praktischen Gebrauch werden die verschiedenen Thermoelement-Typen mit Buchstaben bezeichnet. Am weitesten verbreitet sind die Thermoelement-Typen J, K, N, T und E die aus unedlen Metallen bestehen. Des weiteren gibt es auch Thermoelement-Typen für besonders hohe Temperaturen, die meist aus Edelmetallen bestehen und mit den Buchstaben R, S, B, C und G bezeichnet werden. Abbildung 32 zeigt für gebräuchliche Thermoelemente die – gemäß IEC 751 bzw. EN 60751 – genormte Thermospannung in Abhängigkeit von der Temperatur.

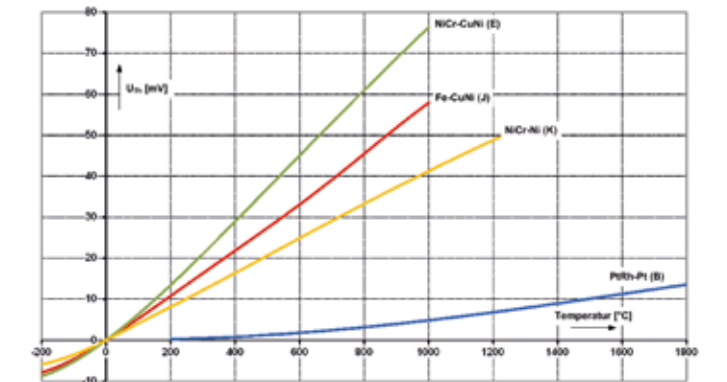


Abbildung 32: Thermospannungen $U_{th}(T)$ einiger gebräuchlicher Thermopaare (Typ E, J, K und B) gemäß IEC 751 bzw. EN 60751.

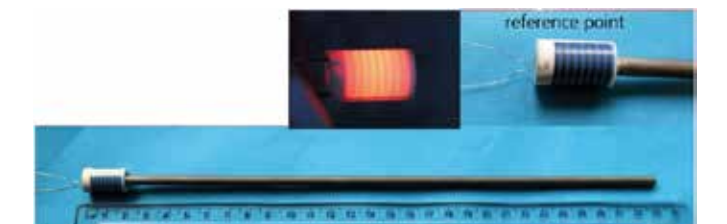


Abbildung 33: Prototypentwicklung eines vollkeramischen Thermoelements mit Messbereich bis $>2300\text{ }^{\circ}\text{C}$ und hoher Signalstärke ab Raumtemperatur. Thermoelementschenkel aus hochtemperaturstabilen B4C Varianten und kontrolliert temperierbarer Referenzstelle.

Quelle: Fraunhofer IKTS

Thermoelemente haben gegenüber herkömmlichen Temperatursensoren wie z. B. Widerstandsthermometern viele Vorteile:

- Sie zeichnen sich durch einen einfachen Aufbau aus und sind aktive Bauelemente. D. h. die nicht-elektrische Messgröße Temperatur wird direkt als elektrische Spannung ausgegeben, sodaß damit keine gesonderte Messwertaufbereitung mehr notwendig ist (ausgenommen eine Verstärkung der Thermospannung).
- Sie sind in einem weiten Temperaturbereich einsetzbar (von tiefen Temperaturen in der Kryotechnik $>0\text{ K}$ bis ca. 2.000 K) (siehe Abbildung 32).
- Thermoelemente haben eine relativ geringe Ansprechzeit. Sie liegt je nach Ausführungsform im Millisekunden bis Sekundenbereich; d. h. sie reagieren sehr schnell auf Temperaturänderungen.
- Sie können aufgrund ihrer platzsparenden Bauweise auch an schwerzugänglichen Stellen problemlos eingebaut werden.
- Durch die punktförmige Ausbildung der Lötstelle können Thermoelemente Temperaturen von sehr kleinen Gegenständen messen bzw. kann die Temperatur eines Messobjekts sehr gut orts aufgelöst gemessen werden.
- Aufgrund des Messprinzips können Thermoelemente auch als Strömungssensoren sowie zur Wärmeflussmessung eingesetzt werden.

Wie funktioniert ein thermoelektrischer Berührungssensor?

Das Grundprinzip eines thermoelektrischen Berührungssensors ist in Abbildung 33 dargestellt (Choi et al., 2014). Er besteht im wesentlichen aus einer oberen Elektrode aus Metall (30), einer unteren Elektrode ebenfalls aus Metall (10) und dem dazwischen liegenden thermoelektrischen Material (20). Durch Berührung der oberen Elektrode mit dem Finger entsteht ein Wärmefluss zur unteren Elektrode, wodurch durch das thermoelektrische Material eine elektrische Spannung erzeugt wird. Diese elektrische Spannung wird dann an die Messwertverarbeitung weitergegeben.

Weiterführende Arbeiten zum Einsatz als Berührungssensor finden sich unter Figueira et al. (2023).

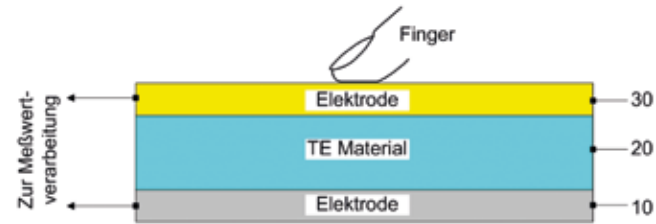


Abbildung 34: Vereinfachte Darstellung eines thermoelektrischen Berührungssensors (Choi et al., 2014). (30) obere Elektrode aus Metall; (20) thermoelektrisches Material; (10) untere Elektrode aus Metall.

Wie funktioniert die radiative Temperaturmessung?

Für die berührungslose (radiative) Temperaturmessung werden Thermoelemente zu einer sogenannten Thermosäule (im englischen mit Thermopile bezeichnet) verschaltet, wodurch die kleinen Spannungen der einzelnen Thermoelemente zu einer messbaren Gesamtspannung addiert werden. Die einzelnen Thermoelemente werden dazu thermisch parallel und elektrisch in Reihe geschaltet. Abbildung 34 zeigt das Prinzipschaltbild und die Ausführung einer Thermosäule. Das elektrische Signal ist dann ein Maß für die empfangene Wärmestrahlung. Thermosäulen detektieren breitbandig die einfallende IR-Strahlung und können auch für die nicht-dispersive Infrarot-Spektroskopie (NDIR Spektroskopie) für die Gasanalyse eingesetzt werden.

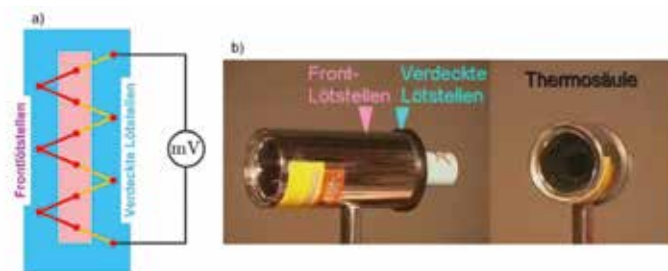
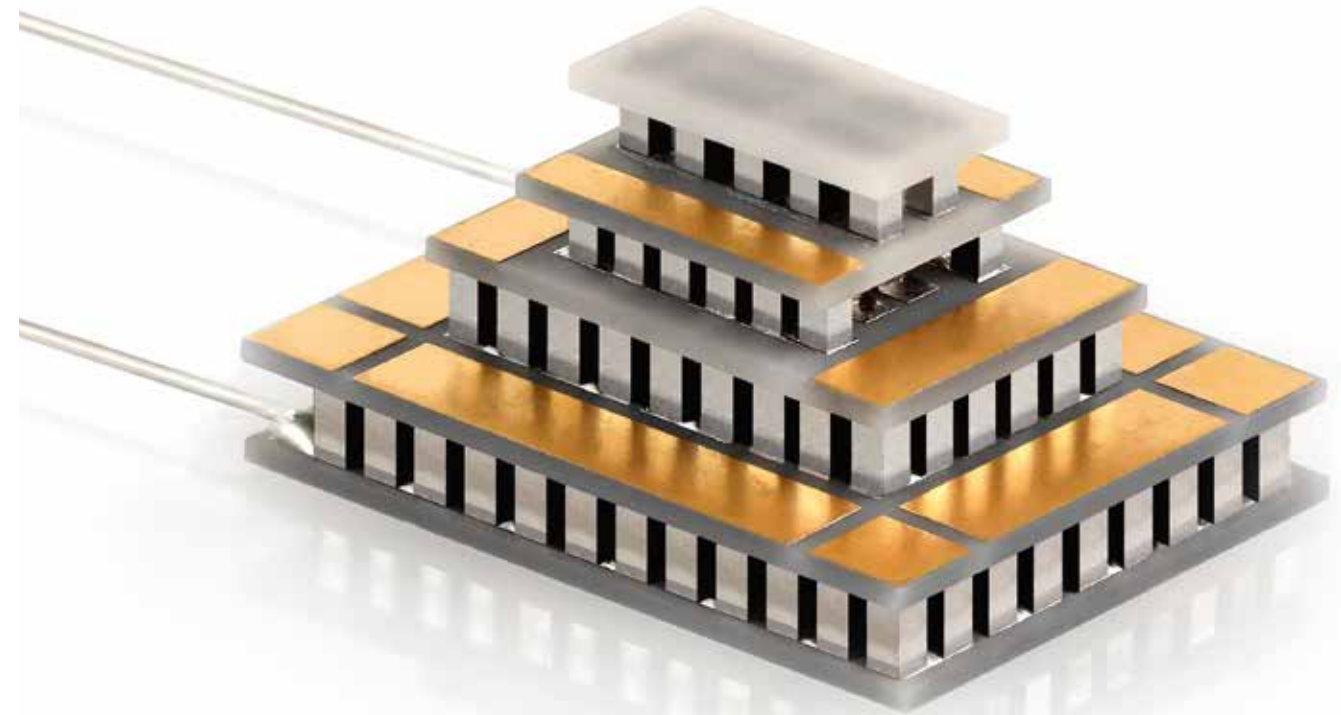


Abbildung 35: Thermosäule. a) Prinzipschaltbild, b) Ausführungsform

Quelle: <https://www.leifiphysik.de/waermelehre/temperatur-und-teilchenmodell/versuche/thermoelement-und-elektrische-thermometer>

Thermoelektrische Kühler (TEC) / Temperierung / Peltier-Module



Thermoelektrische Kühler (TEC) / Temperierung / Peltier-Module

Am weitesten in der kommerziellen Nutzung vorangeschritten sind thermoelektrische Materialien im Bereich der Peltier-Anwendungen. Peltiermodule werden als Einzelmodule und auch als Teil thermoelektrischer Baugruppen angeboten.

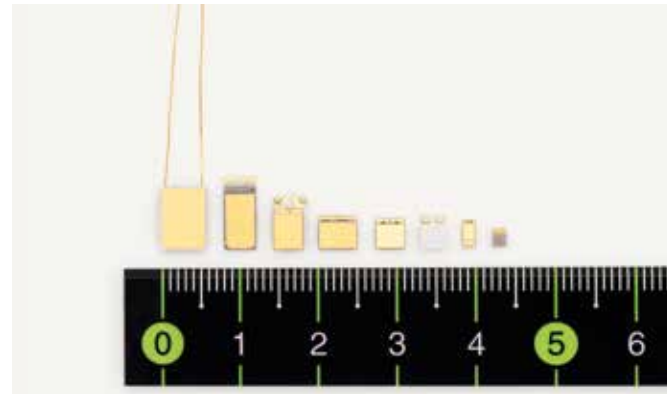


Abbildung 36: Auswahl verschiedener Mikro-TECs

Quelle: FerroTec Europe GmbH

Neben Massenmärkten wie Campingkühlboxen und Kleinkühlschränken spielen Peltiermodule ihre Vorteile der genauen Temperaturkontrolle und der schnellen Temperaturwechsel vor allem in Spezialanwendungen in verschiedenen Anwendungszweigen aus. Während in den niedrigpreisigen Anwendungen standardisierte Module genutzt werden, sind Anpassung der Geometrie sowie der thermischen und elektrischen Eigenschaften an die vom Nutzer vorgegebenen Randbedingungen im hochtechnologischen Bereich für die führenden Hersteller an der Tagesordnung. Die sogenannten Thermoelektrischen Cooler, kurz TEC, werden beispielsweise im PKW sowohl für die aktive Klimatisierung der Sitze in Oberklassemodellen und zur Temperaturkontrolle von Oberflächen im Fahrzeug als auch für die Verminderung von Temperatureinflüssen auf das Verhalten von elektronischen Sensoren, Kameras und Lichtquellen genutzt. Gerade in der Sensorik

undameratechnik wird hierbei auf mehrstufig kaskadierte TEC zurückgegriffen, auf die das Sensorelement direkt aufgebracht ist und durch die hohen Temperaturdifferenzen zwischen Heiss- und Kaltseite der Module besonders stark gekühlt werden kann. Dies erlaubt eine Optimierung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses des Sensors.

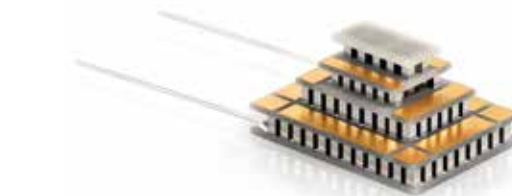


Abbildung 37: Beispiel eines Multistage-TEC

Quelle: FerroTec Europe GmbH

In medizinischen Anwendungen erlauben TEC ein schnelles, thermisches Zyklieren biologischer Proben. Dies findet zum Beispiel in Untersuchungsgeräten für Polymerase Chain Reaction (PCR)-Analysen Verwendung, in denen Temperaturrampen von 5–10 K/s kurze Diagnosezeiten in der Virusidentifikation ermöglichen, wobei mehrere Tausend Temperaturwechsel vollzogen werden. In diesem Bereich werden speziell angepasste Peltier-elemente verwendet, die trotz der starken thermomechanischen Beanspruchung hohe Zyklenzahlen und somit eine lange Lebensdauer gestatten.

Auch Analysegeräte zur Flüssigkeitschromatographie und Rheometrie nutzen thermoelektrische Module, die eine besonders hohe Temperaturhomogenität in der Fläche oder in flüssigkeitsführenden Kapillaren gewährleisten.

Telekommunikationsanwendungen benötigen Peltiermodule mit sehr kleinen Abmessungen, die zur Kühlung und Temperaturstabilisierung von Laserquellen und Sensoren in der optischen Signalübertragung zum Beispiel auch zusammen mit diesen direkt in metallische, evakuierbare Gehäuse, wie TO-header oder But-

terfly-Packages integriert werden.³ Hierbei kommen sogenannte Mikro-TEC zur Anwendung, die nur wenige Millimeter Fläche bedecken, dabei aber auch mehrstufig sein können. Die hohe Lebensdauer in Verbindung mit langen Wartungsintervallen erlauben für diesen Technologiebereich auch den Einsatz in optischen Unterseeleitungen.

Angepasst an die jeweiligen Einsatzbedingungen werden sowohl die elektrische Kontaktierung über Drähte oder Pads als auch Versiegelungen der Module zum Schutz vor Feuchtigkeit, chemisch aggressiven Atmosphären oder Staub gewählt. Strukturierte Metallisierungen der für den Bau verwendeten keramischen Substrate erlauben Lotverbindungen zu anderen Komponenten und Wire-Bond-Kontaktierungen. Zur Gewährleistung niedriger thermischer Kontaktwiderstände zwischen thermoelektrischem Modul und Wärmequellen und -senken kann das Keramikmaterial angepasst werden. Auch ein mechanisch flexibles Modul, das zum Beispiel an Rohre angepresst werden kann, ist im Markt verfügbar.

Als thermoelektrisches Material haben sich in den vergangenen Jahrzehnten die Bismuth-Tellurid-Legierungen durchgesetzt und als sehr effektiv erwiesen. Sowohl aus Sicht der physikalischen als auch der mechanischen Parameter zur Verarbeitung und Fügetechnik sind thermoelektrische Kühlmodule technologisch sehr gut kommerzialisiert.

Die Systemauslegung und Dimensionierung ist, wie auch bei TEG-Anwendungen der größte leistungsbestimmende Faktor. Anwender thermoelektrischer Peltiertechnik beziehen auch komplette thermische Baugruppen. Diese für die jeweilige Anwendung optimierten Systeme erlauben die Temperaturkontrolle von Oberflächen, Flüssigkeiten und Gasen mit hoher Genauigkeit bei gleichzeitig geringen Vibrationen, da lediglich Lüfter und Flüssigkeitspumpen als bewegliche Komponenten verbaut werden. Die dem Anwendersystem durch die Peltiermodule entzogene Wärme wird entweder durch erzwungene oder freie Konvektion oder auch an Flüssigkühlkreisläufe abgegeben. Die Schwingungsarmut solcher thermoelektrischer Kühlsysteme wird vor allem im Einsatz in sensiblen Laseranwendungen von den Nutzern benötigt.

³TO-header (Transistor-Outline) beschreibt eine speziell für Transistoren angepasste Bauart der TEC bzw. dessen Gehäuse; "Butterfly-Package" beschreibt ein spezielles Gehäuse für die Verwendung in elektronischen Bauteilen mit Pins.



Abbildung 38: Peltier-Air to Air Unit

Quelle: FerroTec Europe GmbH

Auch stand-alone Flüssigkühler, sogenannte Chiller, mit thermoelektrischen Baugruppen als aktive Komponenten werden in verschiedensten Anwendungsbereichen, vom Einsatz im universitären oder industriellen Labor bis hin zu produktionstechnischen Anlagen für die Fertigung integrierter Schaltkreise, genutzt. Vor dem Hintergrund immer strikterer europäischer Regulierung von kompressionsbasierten Kühlsystemen hinsichtlich des darin verwendeten Kühlmittels rückt auch zunehmend der Vorteil der Kühlmittelfreiheit thermoelektrischer Chiller in den Fokus der Endanwender.

Thermoelektrische Kühlsysteme werden also derzeit in einer Vielzahl von technischen Gebieten bereits eingesetzt, obwohl die Technologie trotz ihrer langen Historie und der mit ihr verbundenen Vorteile in der breiten Öffentlichkeit immer noch wenig bekannt ist. Gemeinsame technologische Entwicklungen von Endanwendern und den führenden Herstellern der Peltiersysteme bieten über den jetzigen Stand der Technik hinaus ein breites Optimierungspotential in verschiedensten Bereichen.

Marktpotential

Die zuvor beschriebenen Anwendungen geben einen Eindruck zu den Möglichkeiten und der Vielfalt der aktuellen und zukünftiger Thermoelektrikprodukte.

Betrachtet man die Marktpotentiale von Thermoelektrikprodukten, so können aktuell zu den etablierten Bereichen Kühlung (Peltiertechnik), Sensorik (Thermoelemente) und ansatzweise Generatorik (TEG) Aussagen gefunden werden. Diese Aussagen sind in den Marktprognosen dynamisch veränderlich und unsicher. Da es sich um technische Produkte handelt, die in vielen Schlüsseltechnologien eine Rolle spielen, kann davon ausgegangen werden, dass der Bedarf und die Nachfrage weiter wachsen werden.

Die Relevanz der Technologie lässt sich auch darin erkennen, dass IDTechEx regelmäßig einen Bericht und Prognosen zu Marktvolumina von TEG herausgibt (Das, 2020). Darin werden verschiedenste Produkte und Akteure am Markt aufgeführt, sowie auf weltweite Marktpotentiale eingegangen. Eine Prognose für die kommenden Jahre zeigt, daß die thermoelektrische Energiegewinnung und Sensorik ein Milliarden Dollar schweres Geschäftsfeld darstellt. Dazu wird in *Freer et al. (2020)* ausgeführt, dass ein anhaltendes Wachstum erwartet wird, bei einem Marktwert zwischen 875 und 1500 Millionen US-Dollar.

Wie in den vorgehenden Kapiteln erkennbar bietet das physikalische Phänomen Thermoelektrik neben den bereits bekannten Anwendungen Entwicklungschancen für neue Produkte und technischen Weiterentwicklungen. Thermoelektrische Produkte werden sehr stark von den genutzten Werkstoffen definiert, so dass die zahlreichen Aktivitäten im Bereich der Werkstoffentwicklung viele Chancen für die Zukunft bieten. Ebenso entscheidend ist die Weiterentwicklung von ‚peripheren‘ Komponenten wie elektrische Kontakte, thermische Einbindung und Systemintegration von thermoelektrischen Komponenten.

In der Zukunft kann erwartet werden, dass wie in allen anderen Hochtechnologiefeldern auch die Thermoelektrikprodukte signifikante Beiträge für Schlüsseltechnologien liefern können. Damit ergeben sich Chancen für neue Marktsegmente, neue Marktteilnehmer und neue Produkte.

Literatur

AEInnova, Alternative Energy Innovations. <https://aeinnova.com/en/this-is-aeinnova/>.

Alegria, P., Catalan, L., Araiz, M., Rodriguez, A. und Astrain, D., 2022. Experimental development of a novel thermoelectric generator without moving parts to harness shallow hot dry rock fields. *Appl. Therm. Eng.* 200. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117619>.

Altenkirch, E., 1909. Über den Nutzeffekt der Thermosäulen. *Phys. Z.*, 10, 560–580.

Altmanninger, T., 2002. Thermoelektrizität im Physikunterricht der AHS-Oberstufe. Diplomarbeit an der Johannes Kepler Universität Linz. Verfügbar unter: <https://epub.jku.at/obvulihs/download/pdf/7969488>.

Ambrosi, R. M., Williams, H., Watkinson, E. J., Barco, A., Mesalam, R., Crawford, T., Bicknell, C., Samara-Ratna, P., Vernon, D., Bannister, N., Ross, D., Sykes, J., Perkinson, MC., Burgess, C., Stroud, C., Gibson, S., Godfrey, A., Slater, R. G., Reece, M. J., Chen, K., Simpson, K., Tuley, R., Sarsfield, M., Tinsley, T. P., Stephenson, K., Freis, D., Vigier, JF., Konings, R. J. M., Fongarland, C., Libessart, M., Merrifield, J., Kramer, D. P., Byrne, J. und Foxcroft, B., 2019. European Radioisotope Thermoelectric Generators (RTGs) and Radioisotope Heater Units (RHUs) for Space Science and Exploration. *Space Sci Rev* 215:55. Verfügbar unter: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11214-019-0623-9#citeas>.

Backhaus-Ricoult, M., Rustard, J., Moore, I., Smith, C. und Brown, J., 2014. Semiconducting large bandgap oxides as potential thermoelectric materials for high-temperature power generation?. *Appl. Phys. A Material Science & Processing*, 116. Verfügbar unter: DOI:10.1007/s00339-014-8515-z.

Baitinger, M., Nguyen, H. D., Gandolfi, C., Antonyshyn, I., Meier-Kirchner, K., Veremchuk, I., Raznikov, V., Havryluk, M., Cardoso-Gil, R., Burkhardt, U., Böhme, B., Anatychuk, L. und Grin, Y., 2021. Thermoelectric characterization of the clathrate-I solid solution Ba8-dAuxGe46-x. *Appl. Phys. Lett* 119, Verfügbar unter: DOI: 10.1063/5.0059166.

Bartholomé, K., Jägle, M., Ebling, D., König, J., Jacqot, A. und Böttner, H., 2010. Energieautarke Sensorik im Flugzeug. In *Technisches Messen: TM 77*, Nr. 9. Verfügbar unter: DOI: 10.1524/teme.2010.0038.

BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V, 2025. Statusreport: Wärme. Verfügbar unter: https://www.bdew.de/media/documents/2025_09_24_Statusreport_Waerme_final.pdf.

Beretta, D., Neophytou, N., Hodges, J. M., Kanatzidis, M. G., Narducci, D., Martin- Gonzalez, M., Beekman, M., Balke, B., Cerretti, G., Tremel, W., Zevalkink, A., Hofmann, A. I., Müller, C., Dorling, B., Campoy-Quiles, M. und Caironi, M., 2019. Thermoelectrics: From History, a Window to the Future. *Materials Science & Engineering R: Reports*, Vol. 138. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2018.09.001>.

Birkholz, U., 1984. Thermoelektrische Bauelemente. In W. Heywang W., und Müller, R. (Ed.), *Amorphe und polykristalline Halbleiter*, Band 18, Springer-Verlag. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1063/1.1721551>.

Bouchacourt, M. und Thevenot, F., 1985. The correlation between the thermoelectric properties and stoichiometry in the boron carbide phase B4C-B10,5C. *J. Mater. Sci.* 20 (4). Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/BF01026319>.

BMWK (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz), 2023. Bundesbericht Energieforschung 2023: Forschungsförderung für die Energiewende. Verfügbar unter: https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/bundesbericht-energieforschung-2023.pdf?__blob=publicationFile&v=11.

Catalan, L., Garacochea, A., Casi, A., Araiz, M., Aranguren, P. und Astrain, D., 2020. Experimental Evidence of the Viability of Thermoelectric Generators to Power Volcanic Monitoring Stations. *Sensors* (20). Verfügbar unter: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/17/4839>.

Choi, D. H., Choi, J. Y., Kim, E. S. und Rhyee, J. S., 2014. Thermoelectric Touch Sensor. US 8,704,112 B2. United States Patent. Verfügbar unter: <https://patents.google.com/patent/US8704112>.

D'Angelo, M., Galassi, C. und Lecis, N., 2023. Thermoelectric Materials and Applications: A Review. *Energies* 16. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.3390/en16176409>

Das, R., (2020). Thermoelektrische Energiegewinnung und -messung 2020-2030 – Neue Prinzipien, neue Anwendungen, Prognosen. Verfügbar unter: <https://www.idtechex.com/de/research-report/thermoelectric-energy-harvesting-and-sensing-2020-2030/699>.

Dolezal, R., 1983. Energetische Verfahrenstechnik. B. G. Teubner, Stuttgart.

Domenicali, C. A., 1954. Stationary temperature distribution in an electrically heated conductor. J. Appl. Phys., 25 (10), 1310–1311.

Drude, P., 1900. Zur Elektronentheorie der Metalle. Ann. Phys., 306 (3), 566–613.

Freer R. und Powell, A. V., 2020. Realising the potential of thermoelectric technology: a Roadmap. Mater. Chem. C 8 (2). Verfügbar unter: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/tc/c9tc05710b>.

Funahasi, R. (Editor in Chief), 2021. Thermoelectric Energy Conversion – Theories and Mechanisms, Materials, Devices, and Applications. 1st edition, Woodhead Publishing.

Gao, H. B., Huang, G. H., Li, H. J., Qu, Z. G. und Zhang, Y. J., 2016. Development of stove-powered thermoelectric generators: A review. Appl. Therm. Eng. 96. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/285618523_Development_of_stove-powered_thermoelectric_generators_A_review.

Goldsmid, H.J. und Douglas, R.W., 1954. The use of semiconductors in thermoelectric refrigeration. Br. J. Appl. Phys., 5 (11), 386–390. Verfügbar unter: DOI:10.1088/0508-3443/5/11/303

Goldsmid, H.J., 1960. Applications of Thermoelectricity. Butler & Tanner Ltd.: London.

Goupil, C. (ed.), 2016. Continuum Theory and Modeling of Thermoelectric Elements. Wiley-VCH.

Global Power Technologies, 2026. POWER OPTIONS FOR OFF-GRID CATHODIC PROTECTION. Canada. Verfügbar unter: <https://www.globalte.com/hubfs/Cathodic%20Protection%20Fact%20Sheet.pdf?hsLang=en>

Harman, T.C. und Honig, J.M., 1967. Thermoelectric and Thermomagnetic Effects and Applications. McGraw-Hill Book Company, New York.

He, J. und Tritt, T. M., 2017. Advances in Thermoelectric Materials Research: Looking back and moving forward. Science 357. Verfügbar unter: DOI: 10.1126/science.aak9997.

Heber, L., Schwab, J., Knobelspies, T., Hyunwoo, Ch. und Cheol-Hee, P., 2021. Thermoelectric Generators with High Potential for Waste Heat Recovery in Heavy-Duty Vehicle Applications: Validation by a Functional Prototype with up to 2.7 kW. Virtual Conference on Thermoelectrics 2021. Verfügbar unter: <https://elib.dlr.de/143264/>

Heber, L., 2023. Effizienzsteigerung von Nutzfahrzeugen durch den Einsatz von Thermoelektrischen Generatoren - Konzeption, Optimierung und Validierung. Dissertation. Universität Stuttgart. DLR-Forschungsbericht. DLR-FB-2023-6.

Innocent, J.-L., Portehault, D., Guilaume, G., Mauyama, S., Ohkubo, I. und Mori, T., 2017. Thermoelectric properties of Boron carbide/HfB2 composites, Mat. Renew. Sustain Energy 6 (2). Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/315922637_Thermoelectric_properties_of_boron_carbideHfB2_composites.

Ioffe, A., 1957. Semiconductor Thermoelements and Thermoelectric Cooling. Infosearch, Ltd.: London.

Junior, C., 2010. Analyse Thermoelektrischer Module und Gesamtsysteme. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Josef Eul Verlag GmbH.

Kittel, C., 1983. Einführung in die Festkörperphysik. 6. Auflage, Oldenbourg, München.

Kober, M., Heber, L., Heuer, J., Rinderknecht, F., König, J. und Friedrich, H., 2015. RExTEG – Neuartiger Thermoelektrischer Generator zur Steigerung der Effizienz von Hybrid- und Range Extender Fahrzeugen. Projektbericht. DLR Institut für Fahrzeugkonzepte und Fraunhofer Institut für Physikalische Messtechnik. Verfügbar unter: <https://elib.dlr.de/98080/>

Kober, M., 2020. Thermoelektrische Generatoren zur Effizienzsteigerung von Kraftfahrzeugen – Methode zur ganzheitlichen Entwicklung und Bewertung. Dissertation. Universität Stuttgart, DLR-Forschungsbericht, DLR-FB-2020-35.

Kurosaki, K., Takagiwa, Y. und Shi, X. (Eds.), 2020. Thermoelectric Materials – Principles and Concepts for Enhanced Properties. De Gruyter, Berlin.

Li, P., Qiu, P., Xu, Q., Luo, J., Xiong, Y., Xiao, J., Aryal, N., Li, Q., Chen, Li. und Shi, X., 2022. Colossal Nernst power factor in topological semimetal NbSb2. Nat. Commun. 13, 7612. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-35289-z>.

Peltier, J. C. A., 1834. Nouvelles expériences sur la calorité des courants électrique. Ann. Chim. Phys., 56, 371–386.

Reitze, F., Lösch, O., Jochem, E. und Toro, F., 2021. Bewertung von thermoelektrischen Generatoren als eine Option der industriellen Abwärmenutzung. Statusbericht, Förderkennzeichen: 03ET1630A. Verfügbar unter: https://www.ee4ing.de/wp-content/uploads/2020/06/AW-IREES_EDUARD-Bewertung-TEG_final.pdf.

Rowe, D. M. (ed.), 2006. Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano. Taylor & Francis Group.

Schwab, J., Knobelspies, T., Fritscher, Ch., Helmich, M., Stumpf, A., Fey, A., Rink, N., Zuckermann, D., Kraft, M., Wendker, K., Kober, M., Rinderknecht, F. und Siefkes, T., 2023. Demonstration of the Economic Viability and Energy Savings Potential of Thermoelectric Generators for Pellet Boilers. European Thermoelectric Confrence in Prag. Verfügbar unter: <https://elib.dlr.de/198697/>

Schwab, J., Knobelspies, T., Fritscher, Ch., Helmich, M., Stumpf, A., Junge, J., Bihlmair, B., Gollnick, R., Eigner, A. und Schwab, U., 2024. RecoveryPlus: Industrielle Abwärmenutzung erweitert durch thermoelektrische Generatoren, Projektbericht. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.34657/24144>

Seebeck, T. J., 1821. Über den Magnetismus der galvanischen Kette. Technischer Bericht für die Königlich-Preußische Akademie der Wissenschaften, Berlin.

Siddique, A. R. M., Mahmud, S. und van Heyst, B., 2017. A review of the state of the science on wearable thermoelectric power generators (TEGs) and their existing challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 73. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.177>.

Skipidarov, S. und Nikitin, M. (Eds.), 2019. Novel Thermoelectric Materials and Device Design Concepts. Springer Nature Switzerland AG.

Snyder, G. J. und Toberer, E. S., 2008. Complex Thermoelectric Materials. Nat. Mater. 7 (2), 105–114. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/5633071_Complex_Thermoelectric_Materials.

Sommerfeld, A. und Frank, N.H., 1931. The statistical theory of thermoelectric, galvano- and thermomagnetic phenomena in metals. Rev. Mod. Phys., 3 (1), 1–42.

Stumpf, A. und Metz, Th., 2023. Development of Nano-CHP Based on middle and Low Temperature Thermoelectric Modules arranged as a Cascade. European Thermoelectric Confrence in Prag. Verfügbar unter: <https://elib.dlr.de/202154/>

Thomson, W., 1851. On the Mechanical Theory of Thermo-electric Currents. Proc. R. Soc. Edinb., 91–98.

Tiwari, A. und Park, C. R. (Eds.), 2019. Advanced Thermoelectric Materials, Scrivener Publishing & Wiley.

UBA (Umweltbundesamt Berlin), 2019: Abwärmenutzungspotenziale in Anlagen integrierter Hüttenwerke der Stahlindustrie. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz

und nukleare Sicherheit Projektnummer 74338 UBA-FB 002775. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-01-21_texte_07-2019_abwaermenutzungspotenziale-huettenwerke.pdf.

Verordnung (EU) 2019/1242 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2019 zur Festlegung von CO₂-Emissionsnormen für neue schwere Nutzfahrzeuge und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 595/2009 und (EU) 2018/956 des Europäischen Parlaments und des Rates sowie der Richtlinie 96/53/EG des Rates. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1242>.

Weißgärber, Th., Pacheco, V., Recknagel, C., Pöhle, G., Martin, H.-P., Schilm, J., Pönicke, A., Feng, B., Kieback, B. und Michaelis, A., 2015. Thermoelektrische Werkstoffe und Generatoren - aktueller Entwicklungsstand und zukünftige Potenziale für die Abwärmenutzung, in: Kolaska, H. (Ed.), Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis, Band 31, Pulvermetallurgie: Effiziente Prozesse – besondere Eigenschaften.

Woerner, D. F., 2023. The Technology of Discovery – Radioisotope Thermoelectric Generators and Thermoelectric Technologies for Space Exploration. Wiley.

Zhou, C., Lee, Y. K., Yu, Y., Byun, S., Luo, Z. Z., Lee, H., Ge, B., Lee, Y. L., Chen, X., Lee, J. Y., Cojocaru-Mirédin ,O., Chang, H., Im, J., Cho, S. P., Wuttig, M., Dravid, V. P., Kanatzidis, M. G. und Chung, I., 2021. Polycrystalline SnSe with a thermoelectric figure of merit greater than the single crystal. Nat. Mat. 20. Verfügbar unter: DOI: 10.1038/s41563-021-01064-6.

Ziman, J. M., 1972. Prinzipien der Festkörpertheorie. Akademie-Verlag, Berlin.

Bildquellen

Titel/Rücken: DLR FK Stuttgart | Bildmotiv: Isabellenhütte Heusler GmbH Co. KG

Seite 4: pixabay

Seite 6: pixabay, KI-generiert

Seite 12: istockphoto. Norbert Dr-Lange

Seite 21: DLR FM Köln

Seite 25: DLR FM Köln

Seite 29: DLR FK Stuttgart

Seite 42: DLR FK Stuttgart

Seite 45: FerroTec Europe GmbH

Seite 48: istockphoto, cemagraphics



Impressum

Copyright 2026

DTG Deutsche
Thermoelektrik-
Gesellschaft e.V.

Deutsche Thermoelektrik Gesellschaft e. V.
www.thermoelektrik.info
info@thermoelektrik.info

Alle Rechte vorbehalten.
Die Vervielfältigung – auch auszugsweise – bedarf der vorherigen
schriftlichen Abstimmung. Sprechen Sie uns an.

Layout: Lena Abdi | www.lenaabdigrafik.de