

Der Thermoelektrische Generator zur Reduktion der CO₂ Emissionen- Rekuperation der Energieverluste im Abgassystem

Dr. Andreas Eder BMW Group
Dr. Johannes Liebl BMW Group

H. Rolf Brück Emitec GmbH
H. Wolfgang Maus Emitec GmbH

1. Einleitung

Mobilität fördert, volkswirtschaftlich betrachtet, die Arbeitsteilung und ist somit aufgrund erzielbarer Produktivitätssteigerung ein Schlüsselfaktor für Wachstum und Beschäftigung und trägt darüber hinaus im hohen Maße zur persönlichen Freiheit und damit zur Lebensqualität der Menschen bei. Unter Berücksichtigung der Bedürfnisse von Mensch und Umwelt muß die Mobilität deshalb auch für die nachfolgenden Generationen erhalten bleiben. Da die fossilen Energieträger begrenzt sind, müssen neue Wege gefunden werden.

In der Fahrzeugentwicklung der BMW Group heißt ein Entwicklungsziel: „Efficient Dynamics,“ [1]. Damit wird der scheinbare Widerspruch zwischen Verbrauchs- und Emissionsreduzierung einerseits und Fahrleistung und Agilität andererseits aufgehoben. Die Anforderungen an Emissionen, Umweltverträglichkeit und Verbrauch dürfen dementsprechend nicht isoliert betrachtet werden, sondern immer im engen Zusammenspiel von Gesetzgebung, gesellschaftlicher Akzeptanz und Kundenbedürfnissen.

Zunehmend gewinnt die Reduktion der CO₂ Emissionen und damit des Kraftstoffverbrauch an Bedeutung. Pläne, anstelle von Verbrennungsmotoren in der Großserie Elektroantriebe einzusetzen, scheitern zurzeit an den noch unzureichenden Leistungen der zur Verfügung stehenden Antriebsbatterien. Aus diesem Grund wird der Verbrennungsmotor für die nächsten 20 Jahre weiterhin das primäre Antriebskonzept für die Masse der Fahrzeuge bleiben, insbesondere im Langstreckenbetrieb.

Auf den Markt kommende Hybridfahrzeuge weisen jedoch den zukünftigen Weg zur stärkeren Elektrifizierung des Antriebsstranges auch zur Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades des Verbrennungsmotors.

Die Abwärmenutzung bzw. Rekuperation wird an Bedeutung gewinnen, da beim Verbrennungsmotor im dynamischen Betrieb nur etwa ein Drittel der Kraftstoffenergie in mechanische Leistung umgesetzt wird. Die restlichen zwei Drittel werden als Verlustwärme über das Abgas oder den Motor, bzw. Kühler an die Umgebung abgegeben.

Zur Wärmerekuperation bieten sich beispielsweise geschlossene Kreisprozesse unter Einsatz von Dampfturbinen (z.B. Rankine Cycle) [2] oder Stirlingmotoren an. Diese Systeme wandeln die Wärme in mechanische Energie und haben derzeit unter allen Technologien zur Wandlung der Restwärme den besten Wirkungsgrad. Jedoch ist die Integration durch die hohe Anzahl an Komponenten komplex und aufwändig. Auf Grund des stetig steigenden Grads der Elektrifizierung von Fahrzeugen ist daher die direkte Wandlung der Wärme in elektrische Energie eine hochattraktive Maßnahme. Eine Möglichkeit dafür stellt der Thermo-Elektrische-Generator unter Ausnutzung des Seebeck Effekts dar.

2. Macht Wärmerekuperation Sinn?

Weltweit rückt neben anderen Umweltschutzthemen das Thema „Global Warming“ in den Vordergrund. Fachleute diskutieren die Einflüsse unterschiedlichster Emissionen und deren Auswirkungen auf das Klima. Neben Ruß, Methan, Stickoxyden, etc. wird in der Öffentlichkeit vor allem der Einfluss von CO₂ thematisiert. Das vom Menschen, vor allem als Produkt jedes Verbrennungsprozesses, erzeugte CO₂ gilt in der Politik als Hauptverursacher der Klimaerwärmung. Entsprechend diskutieren die europäischen Gesetzgeber zulässige CO₂-Maximalemissionen, verbunden mit „Strafsteuern“ bzw. Incentivierungen für gering emittierende Fahrzeuge. Diese möglichen Kosten / Boni müssen bereits in der Entwicklungsphase bei der Auswahl der in Frage kommenden Technologien mit eingerechnet werden.

Ausgehend von der geplanten Flottendurchschnittsemission von 130 g/km CO₂ in 2012 und „Further 10 g/km to be achieved by ancillary measures (Commission to define efficiency requirements)“ wurden folgende „Penalties“ festgelegt:

- von 2012 bis 2018:
 - für das 1. Gramm CO₂/km über Vorgabe je produziertem Auto -> 5€
 - für das 2. Gramm CO₂/km über Vorgabe je produziertem Auto -> 20 €
 - für das 3. Gramm CO₂/km über Vorgabe je produziertem Auto -> 45 €
 - ab dem 4. Gramm CO₂/km über Vorgabe je produziertem Auto -> 95€/g
- ab 2019:
 - ab dem 1. Gramm CO₂/km über Vorgabe je produziertem Auto -> 95 €/g
- Für 2020 wird bereits ein Flottendurchschnitt von 95 g/km diskutiert.

Unterstellt man, dass mittelfristig alle Fahrzeuge die vorgeschlagenen Grenzwerte nicht einhalten können, ergibt sich folgendes Szenario:

Basierend auf diesen „Penalty“ Diskussionen ergibt sich für die Fahrzeuge, je nach Hubraumklassen und heute bekannten durchschnittlichem Verbrauch, ein verringerter CO₂-Malus.

Damit lohnt es sich, neue kraftstoffsparende Technologien in der Serie einzusetzen und den Kundennutzen im Hinblick auf eine Steuervermeidung zu erhöhen.

Allerdings reicht es nicht aus, alleine diese Maßnahmen im Zulassungstest nachzuweisen. Wichtig ist letztendlich die Wirksamkeit bei der Nutzung durch die Kunden. Neben der Fahrstrecke, dem Fahrstil, dem Verkehrsfluss und den realen Umweltbedingungen ist auch der Energiebedarf der elektrischen Zusatzverbraucher entscheidend für den Kraftstoffverbrauch.

Im Durchschnitt beträgt der Stromverbrauch der Kunden eines Fahrzeugs im Betrieb eines BMWs der 1er Reihe 330 Watt, der BMW 5er Reihe 750 Watt und der BMW 7er Reihe sogar 1000 Watt elektrischer Leistung. Dieser Strombedarf belastet die Energiewandlungskette mit bis zu einem Liter Kraftstoffverbrauch im Kundenbetrieb. Mit der von BMW im Efficient Dynamics Paket serienmäßig eingeführte

Bremsenergierückgewinnung kann der Kunde bereits einen Teil davon während Verzögerungsphasen, die häufig im Stop-and-Go Verkehr im Stadtfahrbetrieb vorkommen, rekuperieren [3]. Weitere rekuperative Maßnahmen sind jedoch unumgänglich, um signifikante Gesamtemissionsreduzierungen für eine umweltgerechte Mobilität zu erreichen.

Einige der oben genannte Technologien sind dazu bereits vorhanden. Sie befinden sich jedoch sämtlich in einem frühen Entwicklungsstand. Gleichwohl müssen diese Entwicklungen, wegen ihrer Notwendigkeit und Langfristigkeit, ernsthaft angegangen werden. Daher ist es sinnvoll, frühzeitig in rekuperative Technologien – wie den Thermoelektrischen-Generator – zu investieren, um die Wirkungsgradpotentiale durch gezielte Entwicklungen zu maximieren und die Wirtschaftlichkeit zu steigern. Mit einem derartigen System ist dann auch während der Beschleunigungs- und Konstantfahrphasen die Rekuperation von Verlustenergie möglich.

3. Der Thermoelektrische-Generator (TEG)

Ein Thermoelektrischer-Generator ist ein Wärmetauscher, in dessen Trennwand zwischen den Medien thermoelektrisches Material eingebracht wird (Abbildung 1).

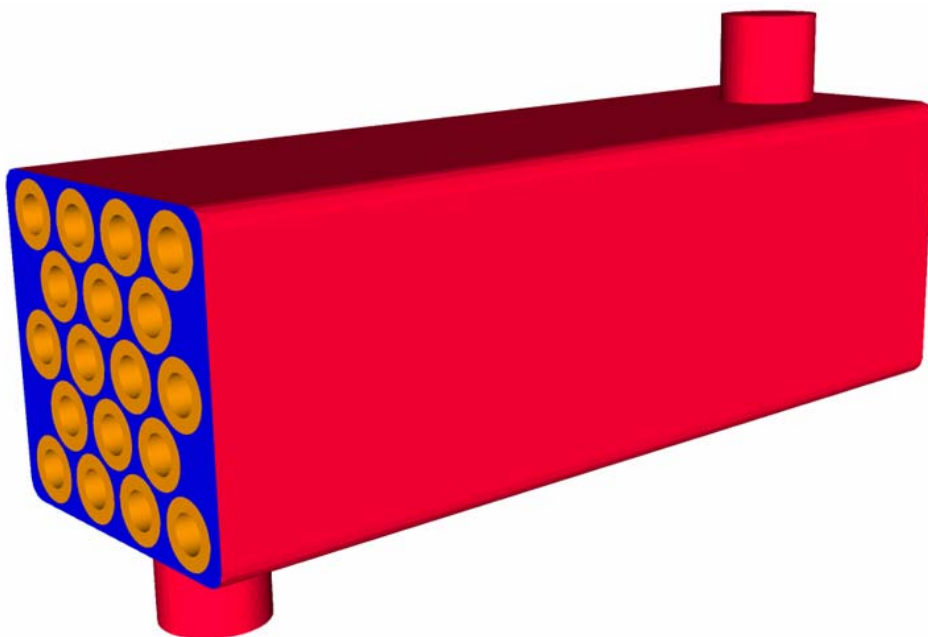


Abbildung 1: Thermoelektrischer Wärmetauscher

Für die Rekuperation der Abgasenergie ist es sinnvoll, Luft/Wasserwärmetauscher einzusetzen. Dabei sollte der Wärmedurchgangswiderstand durch die Wärmetauscherwand so gering wie möglich sein, um einen guten Wirkungsgrad zu garantieren. Die gaseitigen und wasserseitigen Wärmeübergänge an die Wärmetauscherwand sind definierende Randbedingungen des Wärmedurchgangs und damit wichtige Einflussgrößen auf dessen Funktionsweise.

Es besteht ebenfalls die Möglichkeit, den TEG Wärmetauscher als Fluid/Wasser Wärmetauscher aufzubauen. Dieses erfordert einen zusätzlichen Kühlkreislauf mit

einem separaten Wärmeträgerfluid (z.B. ein hochtemperaturfestes Öl), welches die Wärme aus dem Abgas in den Wärmetauscher transportiert [4].

Da neben den CO₂ Emissionen auch die übrigen Emissionsgrenzwerte eingehalten werden müssen, sollte die Wärmeauskopplung hinter dem Katalysator erfolgen. Die Abgastemperatur vor dem Katalysator darf durch den Einbau eines TEG nicht abgesenkt werden. Der Einbau kann ebenfalls in einen zweiten Abgasstrom, z.B. ähnlich wie bei der Abgasrückführung, erfolgen.

3.1 Thermoelektrisches Material

Die Wandlung von Wärme in Strom mit einem thermoelektrischen Generator basiert auf dem von Thomas Seebeck im Jahre 1821 entdeckten Effekt. Dieser Effekt beschreibt die Erzeugung einer elektrischen Spannung U_{therm} zwischen den Kontaktstellen zweier leitenden Materialien, sofern diese einer Temperaturdifferenz $\Delta T = T_{heiss} - T_{kalt}$ ausgesetzt werden. Die Umkehrung des Seebeckeffekts ist als Peltiereffekt bekannt und beschreibt die Ausbildung einer Temperaturdifferenz sofern eine Spannung angelegt wird. Die Höhe der erzeugbaren Spannung pro Kelvin für ein bestimmtes Material wird mit dem Seebeck Koeffizienten α [5] beschrieben (Abbildung 2).

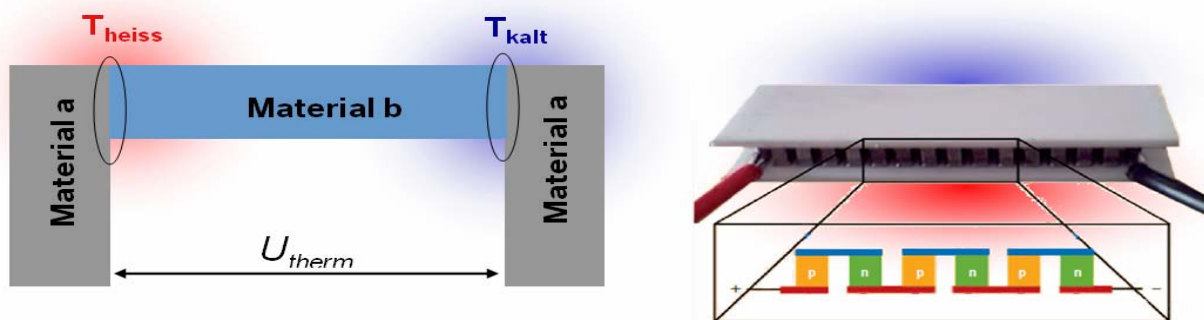


Abbildung 2: Thermoelektrischer Effekt und technische Umsetzung im Modul

Mit Hilfe dieses Seebeck Koeffizienten lässt sich die dimensionslose Kennzahl ZT eines thermoelektrischen Materials in Abhängigkeit von α , der absoluten Temperatur T , des elektrischen Widerstands ρ und der thermischen Leitfähigkeiten κ bestimmen.

$$ZT = \frac{\alpha^2 T}{\rho \kappa} \quad (1)$$

Der ZT -Wert ist eine gängige Größe zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit eines thermoelektrischen Materials bei einer bestimmten Temperatur T und geht direkt in die Berechnung des energetischen Wandlungswirkungsgrads bei der Wandlung von Wärme die von T_{heiss} nach T_{kalt} fließt ein.

Der Wirkungsgrad eines Thermoelektrischen-Generators nähert sich dem Carnot Wirkungsgrad an, wenn der ZT Wert unendlich groß wird. Die Herausforderung zur Entwicklung eines hocheffizienten thermoelektrischen Materials liegt darin, die intrinsischen Eigenschaften einer guten elektrischen Leitfähigkeit gepaart mit einer schlechten thermischen Leitfähigkeit zu vereinen. Das Optimum ergibt sich hierbei

bei Halbleitermaterialien wie z.B. Wismuttelluriden (Bi_2Te_3) für niedrige Temperaturen sowie Bleitelluride (PbTe) oder Siliziumgermanium (SiGe) für die höheren Temperaturen (Abbildung 3), sowie Skutterudite, bei neueren Entwicklungen für den Hochtemperaturbereich.

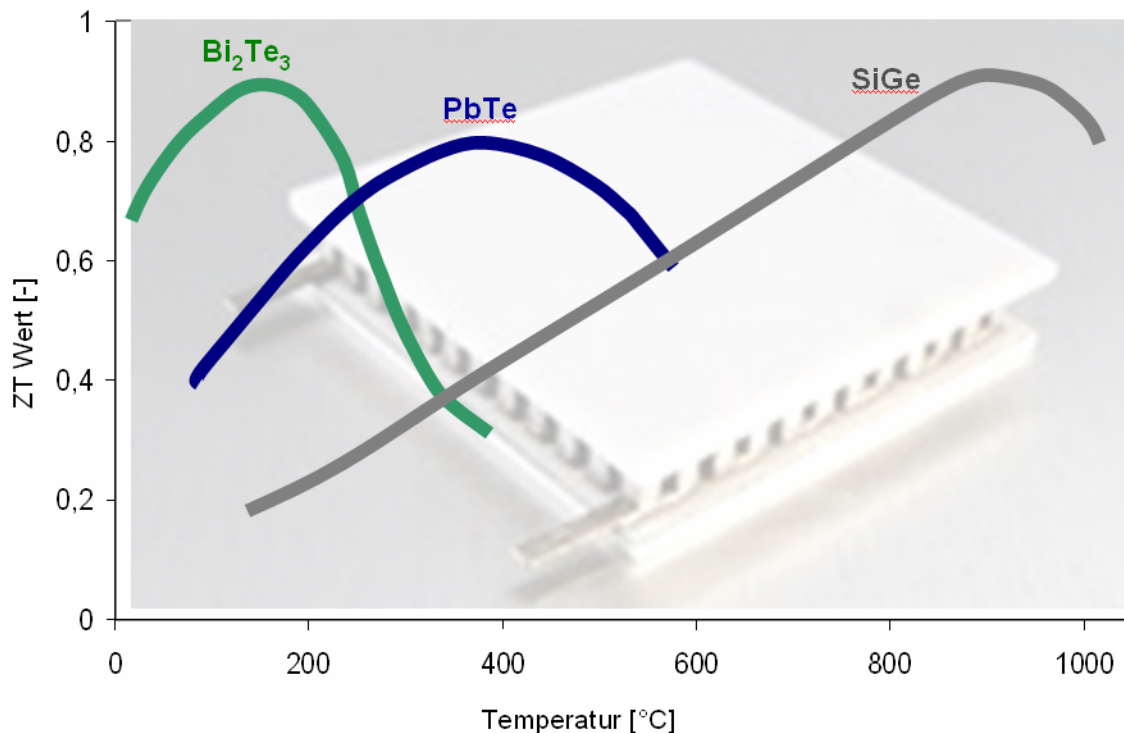


Abbildung 3: ZT- Werte verschiedener thermoelektrischer Materialien

Diese Halbleitermaterialien werden dabei so stark dotiert, dass ihre elektrischen und thermischen Transporteigenschaften denen von Metallen entsprechen. In technischen Anwendungen werden dabei p- und n-dotierte Halbleitermaterialien als ein thermoelektrisches Element verbunden, wobei dann bei Aufprägung einer Temperaturdifferenz die freien Elektronen (bei dem n-dotierten Material) und die freien Löcher (bei dem p-dotierten Material) von der heißen zur kalten Seite fließen und somit eine Spannung erzeugen.

Heute kommerziell verfügbare Materialien mit ZT Werten bis ca. 0,9 limitierten bisher eine kommerzielle Verbreitung dieser Technologie. Durch neue Materialentwicklungen in den letzten Jahren, insbesondere durch Einsatz der Nanotechnologie, konnte jedoch die Leistungsfähigkeit der thermoelektrischen Materialien um über 50% gesteigert werden

So werden bereits heute z.B. für einzelne PbTe basierte Materialien ZT-Werte bis zu 1,7 nachgewiesen [6]. Bei der Materialentwicklung ist es nicht nur wichtig, dass diese Materialien generell einen hohen Wirkungsgrad aufweisen, sondern auch, dass sie bei maximalen Temperaturen von 650°C beim Diesel und 950°C beim Ottomotor und den daraus resultierenden thermischen Belastungen keinen Schaden nehmen. Obwohl es noch keine kommerziell verfügbaren Hochtemperaturmaterialien für den automotiven Einsatz gibt, hat sich die BMW Group entschlossen, Fahrzeuge mit einem thermoelektrischen Generator auszurüsten.

3.2 Der TEG Wärmetauscher

Der Wärmetauscher ist neben dem thermoelektrischen Material das Kernelement des Thermoelektrischen-Generators. Wie bereits beschrieben, sollte der Wärmedurchgang durch die Wärmetauscherwand so gut wie möglich sein, um einen guten Wärmetauscherwirkungsgrad zu garantieren. Allerdings steht das im direkten Widerspruch zur Definition des in die Wand eingebauten thermoelektrischen Materials, da hier eine möglichst geringe Wärmeleitung gefordert wird, um ein möglichst großes Temperaturgefälle zwischen der kalten und der heißen Wand zu gewährleisten. Die Auslegung eines TEG-Wärmetauschers stellt also einen Kompromiss dar, da man bei festgelegten Materialien für einen optimalen TEG Wirkungsgrad sowohl eine große Wärmemenge transportieren muss, als auch ein großes Temperaturgefälle zwischen der Heiß- und Kaltseite garantieren muß (Abbildung 4).

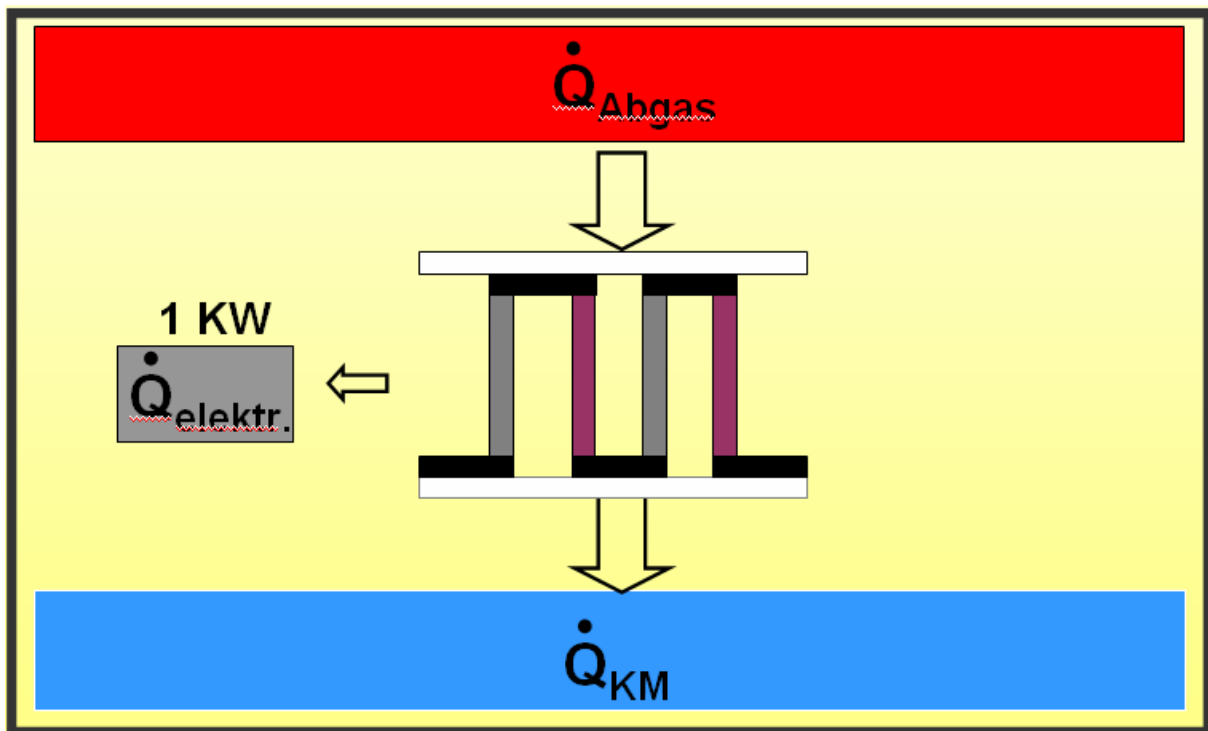


Abbildung 4: Wärmebilanz eines TEG Moduls

3.2.1 Einfluß TEM Elementhöhe

Bei definierter thermischer Leitfähigkeit des TEG Materials und der Verbindungen zur Wärmetauscherwand bleibt als Variable nur die Elementhöhe des TEG Materials (TEM) zwischen der Kalt- und der Heißseite. Abbildung 5 zeigt beispielhaft eine Berechnung der Temperaturdifferenz zwischen Kalt- und Heißseite in Abhängigkeit der TEM Elementhöhe. Die Berechnung wurde mit einer Gastemperatur von 600°C, einer wasserseitigen Temperatur von 100 °C und einem gassseitigen Wärmeübergangskoeffizienten von 200 W/m²K durchgeführt. Weitere hier nicht näher ausgeführte Parameter sind die Geometrie und die Betriebsbedingungen.

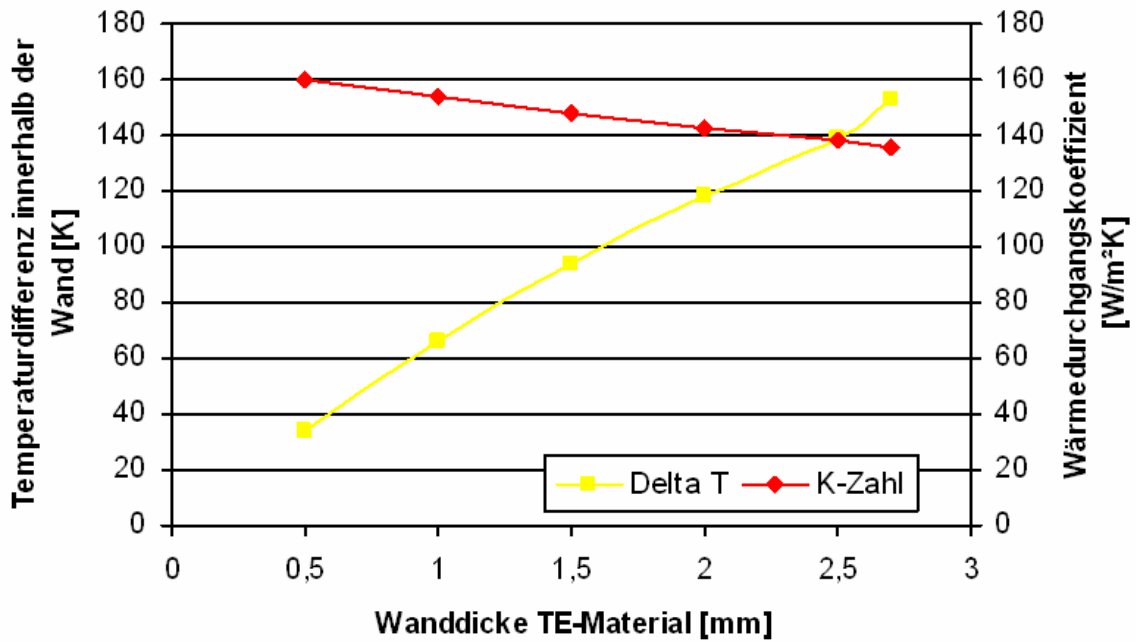


Abbildung 5: Temperaturdifferenz und Wärmedurchgangskoeffizient zwischen Kalt- und Heißseite in Abhängigkeit der TEM Elementhöhe

Bei zunehmender Wandstärke erhöht sich zwar die im TEG wirksame Temperaturdifferenz, allerdings sinkt gleichzeitig der Wärmedurchgangskoeffizient, der den Wärmeübergang linear beeinflusst. Die beispielhafte Auswirkung auf die erzeugte Leistung unter Berücksichtigung der Temperaturdifferenz und des Wärmestroms ist in Abbildung 6 dargestellt. Es handelt sich erneut um eine Rohrgeometrie.

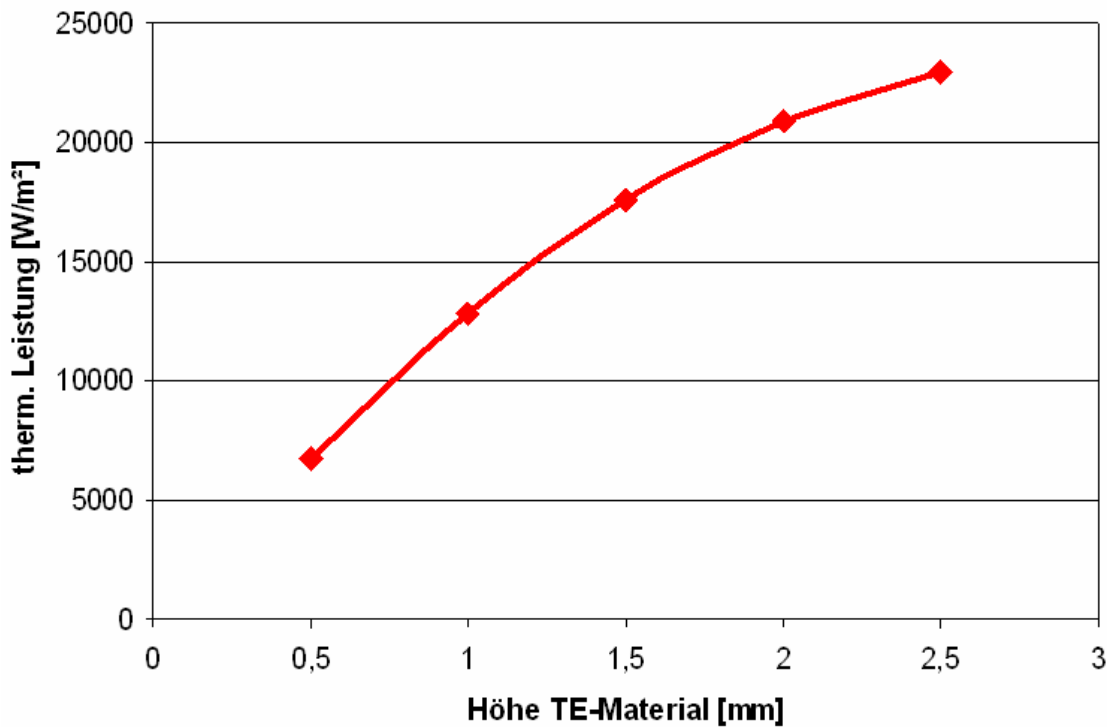


Abbildung 6: Thermische Leistung eines TEG Moduls als Funktion der TEM Elementhöhe bei einer Rohrgeometrie

Es wird deutlich, dass im berechneten Beispiel die thermische und damit auch die elektrische Leistung mit zunehmender Materialdicke zwar noch zunehmen, aber die Steigung der Kurve abflacht. Hier gilt es ein Optimum zu finden, welches je nach Konstruktion und Betriebsweise differiert. Zum Vergleich wurde in Abbildung 7 eine planare Probe berechnet. Hier ist bei gegebener Geometrie ein ähnlicher Verlauf zu erkennen.

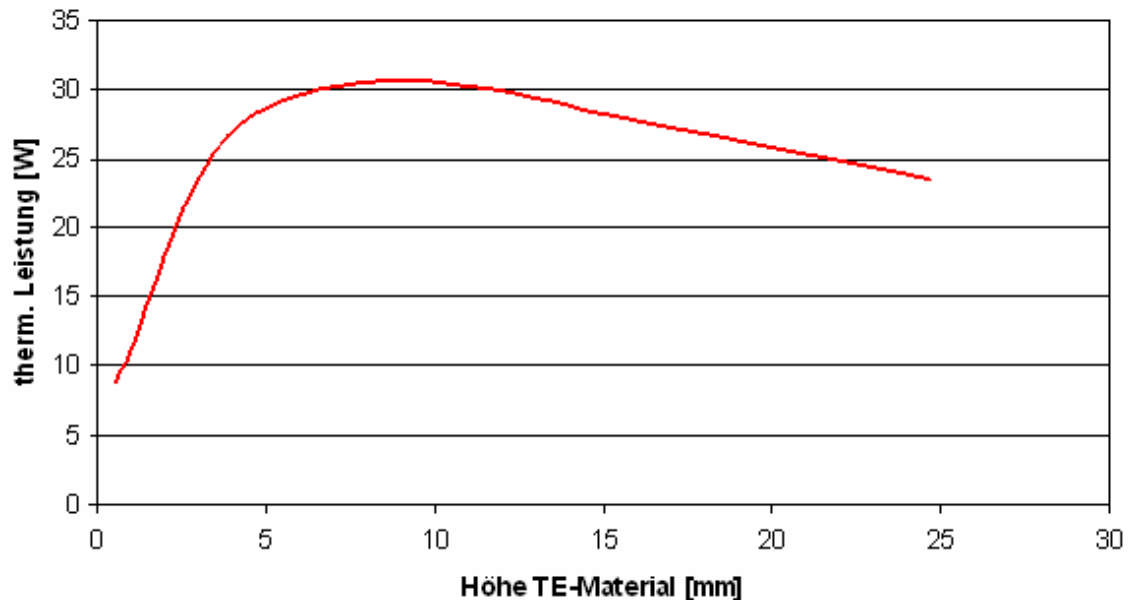


Abbildung 7: Elektrische Leistung eines TEG bei festgelegter planarer Geometrie

3.2.1 Einfluss Wärmeübergang

Einen weiteren Einflussparameter stellt der Wärmeübergang auf der Gas- und der Wasserseite dar. Da der Wärmeübergang auf der Wasserseite sehr viel besser ist als der Übergang auf der Gasseite, liegen die Verbesserungspotentiale zunächst auf der Gasseite.

Dort kann der Wärmeübergang durch den Kanalquerschnitt, die Kanalform, die Wandform oder durch Turbulenzerzeuger verbessert werden. Wichtig ist auch hier, neben der Verbesserung des Wärmeübergangs auch die möglichen Nachteile wie Erhöhung des Druckverlusts oder auch eine stärkere Neigung zur Verschmutzung im Betrieb mit zu bewerten. Abbildung 8 zeigt beispielhaft den Einfluß des Wärmeübergangs auf der Gasseite bei einem festgelegten Wärmeübergang auf der Wasserseite von $1000 \text{ W/m}^2\text{K}$ auf die Temperaturdifferenz.

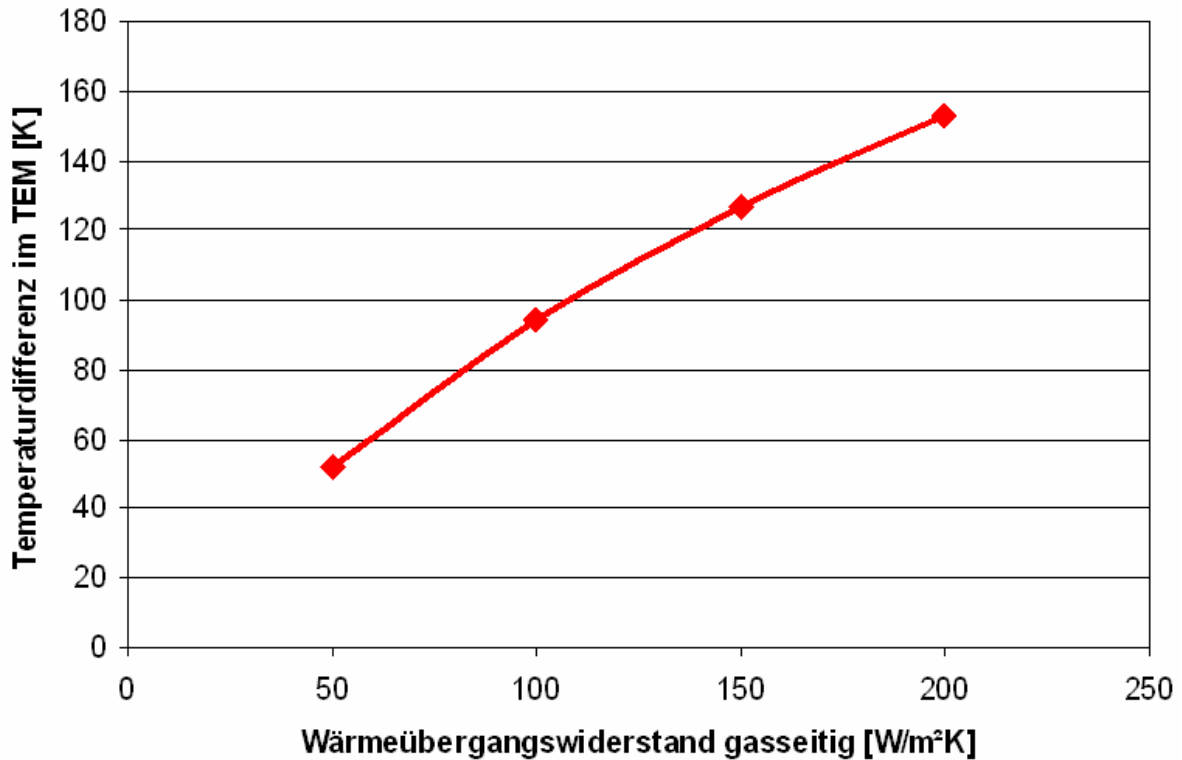


Abbildung 8: Einfluß des Wärmeübergangs auf der Gasseite auf die Temperaturdifferenz im TEM

Die entsprechende thermische Leistung, welche sich proportional zur elektrischen Leistung des TEGs verhält, ist in Abbildung 9 dargestellt. Die Angaben der Abbildung 8 und 9 gelten für eine Rohrgeometrie mit den Betriebsbedingungen von kaltseitig 100°C und warmseitig 600°C.

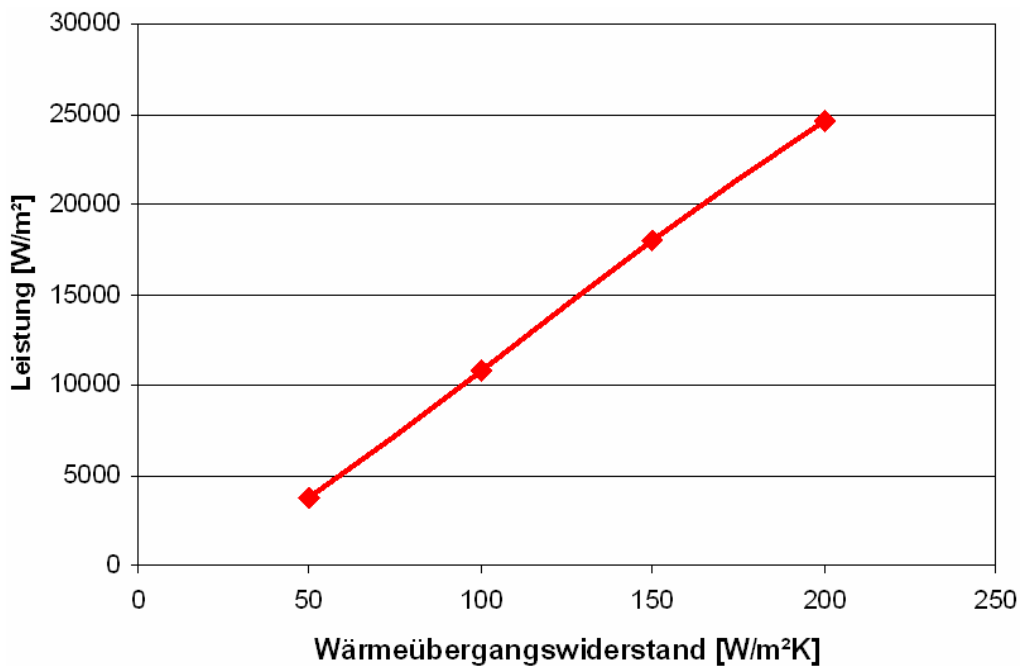


Abbildung 9: Thermische Leistung eines TEG-Kühlers als Funktion des Wärmeübergangs auf der Gasseite

3.2.3 Einfluß der Kühlerverschmutzung

Im Betrieb treten im Kühler Verschmutzungen primär auf der Gasseite auf. Diese Verschmutzungen führen zu einer Verschlechterung des Kühlerwirkungsgrads und werden durch den sogenannten Foulingfaktor [7] definiert.

Aufgrund des mehrschichtigen Aufbaus der TEG-Kühlerwand stellen sich an der gasführenden Wand im Vergleich zu einem normalen Kühler höhere Temperaturen ein, die den Foulingfaktor beeinflussen können.

Um erste Hinweise bezüglich der Verschlechterung des Wärmetauscherwirkungsgrades bei Verschmutzung bzw. über die damit verbundene Verringerung der thermoelektrischen Leistung zu erhalten, wurde ein TEG-Kühler im Vergleich zu einem normalen AGR Kühler in einem speziellen Versottungs- und Verußungstest gefahren. Abbildung 10 zeigt die Gasaustrittstemperaturen der beiden Wärmetauscher über die Testzeit.

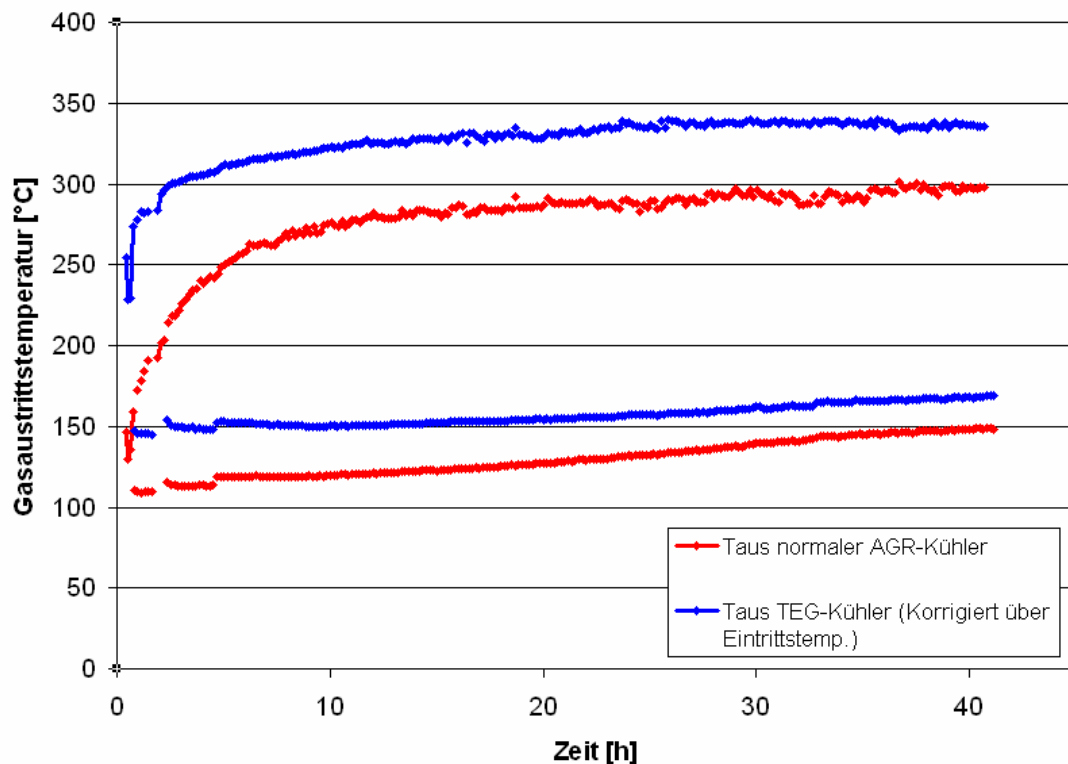


Abbildung 10: Gasaustrittstemperaturen des TEG-Kühlers im Vergleich zu einem normalen AGR-Kühler.

Der schlechtere Wärmedurchgang durch die TEG Kühlerrohrwand verringert zwar grundsätzlich den Kühlerwirkungsgrad, hat jedoch aufgrund der höheren Wandtemperatur den Vorteil, dass sich weniger Ruß und langkettige Kohlenwasserstoffe ablagern und sich dadurch der Wirkungsgrad des TEG-Kühlers über der Zeit im Vergleich zum normalen Kühler weniger stark verschlechtert. So betrug z. B. die Erhöhung (Verschlechterung) der Gasaustrittstemperatur im Verrußungstest beim TEG Kühler 110 K und beim normalen Kühler 170 K.

4. Der TEG im AGR Kühler

4.1 Die Abgasrückführung (AGR)

Die Einbindung eines thermoelektrischen Generators in den Abgasstrang ist generell möglich. Aus thermoelektrischer Sicht ist ein Einbau möglichst nahe am Motor am günstigsten, da hier das größte Energieangebot vorliegt. Aus diesem Grund würde sich z.B. eine Integration in den Katalysator anbieten, jedoch hat diese Anwendung den Nachteil, dass eine Bypass-Lösung zum Schutz des verfügbaren TEG Materials bei hohen Temperaturen aus Emissionsgründen nicht möglich ist. Für die Reduzierung des Wärmestroms in das Kühlwasser muss die „kalte Seite“ des TEGs bzgl. des Wärmestroms schaltbar gestaltet werden, wofür heute noch keine serienreife Lösungen bekannt sind. Außerdem dürfen die katalytischen Eigenschaften des Katalysators nicht beeinflusst werden.

Die thermoelektrischen Materialien für eine zeitnahe Serienintegration in den Abgasstrang eines Automobils – wie bereits einleitend erwähnt – basieren derzeit mit Ausnahme von SiGe fast ausschließlich auf bleihaltigen Materialien (PbTe oder AgPbmSbTe_{2+m} , sog. LAST Materialien). Aufgrund der EU-Verordnung zur Altautorichtlinie ist der Einsatz von bleihaltigen Materialien nur in Ausnahmefällen erlaubt, jedoch besteht heute bereits Klarheit, dass für einen langfristigen Einsatz der TEG Technologie ein großer Weiterentwicklungsbedarf an umweltfreundlichen, nicht-bleihaltigen Materialien besteht. Eine mögliche Materialgruppe könnten die sogenannten Skutterudite (CoSb_3) darstellen, die generell ein vergleichbares thermoelektrisches Potential wie Blei-Tellurid haben. Jedoch besteht im Gegensatz zum Blei-Tellurid für diese Materialien derzeit keine kommerzielle Verfügbarkeit, sie befinden sich noch im Laborstadium.

Um trotz dieser Herausforderungen eine erste Seriedarstellung eines thermoelektrischen Generators zu entwickeln, bietet sich die Integration in den Kühler der Abgasrückführung (AGR) von Dieselmotoren an.

Die Abgasrückführung dient in erster Linie dazu, die Temperatur während der Verbrennung im Motor niedrig zu halten und dadurch die Entstehung von Stickoxiden zu minimieren. Dafür wird ein Teil bereits verbrannten Abgases zurück geleitet und der „frischen“ Ansaugluft beigemischt. So verbrennt im Zylinder ein Gemisch aus Frischluft, Restgas und Kraftstoff. Die zusätzliche Wärmekapazität des Restgases senkt die Spitztemperatur bei der Verbrennung und somit die Stickoxidentstehung. Um das Restgas zu kühlen und bei Bedarf rückführen zu können, verfügt die AGR über eine Wasserkühlung (durch das Motorkühlmittel) und eine Regelklappe. Damit bietet der AGR Kühler ideale Voraussetzungen, denn neben einer Wasserkühlung für die Kaltseite und einer Klappe zur Regelung des Abgasstroms benötigt der „AGR-TEG“ lediglich zusätzlich das thermoelektrische Material.

Aufgrund des im Vergleich zum Hauptabgassystem geringeren Abgasmassenstroms und damit Energieangebotes muß die Entwicklung eines TEG für die Abgasrückführung als Vorläufer für ein später universell einsetzbares Design angesehen werden.

4.2. Die thermischen Randbedingungen

Die Abgasrückführung greift das heiße Abgas direkt nach dem Abgaskrümmer ab – also noch vor der Turbine des Abgasturboladers – wo deutlich höhere Temperaturen zur Verfügung stehen und der Strom im TEG effizienter erzeugt werden kann.

Abbildung 11 zeigt den ZT-Wert von PbTe über die Temperaturverteilungskurven eines Mittelklasse Dieselfahrzeugs in der AGR Leitung dargestellt.

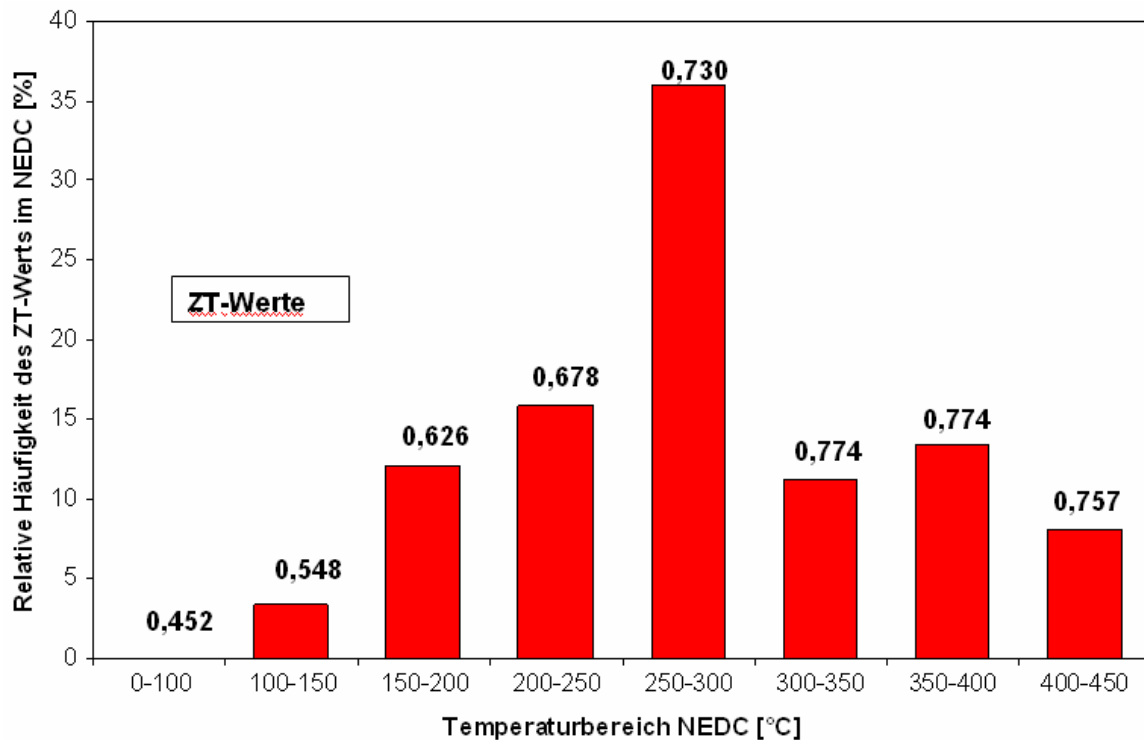


Abbildung 11: ZT-Wert von PbTe über die Temperaturverteilungskurven eines Mittelklasse Dieselfahrzeugs in der AGR Leitung

4.3 Der TEG Kühler

Um die bestehenden Erfahrungen aus dem automobilen Kühlerbau nutzen zu können, wurde ein Konzept entwickelt, bei dem thermoelektrische Elemente in die Wärmetauscherrohre als Doppelwandkonzept eingebaut werden. Abbildung 12 zeigt einen AGR-Kühler.

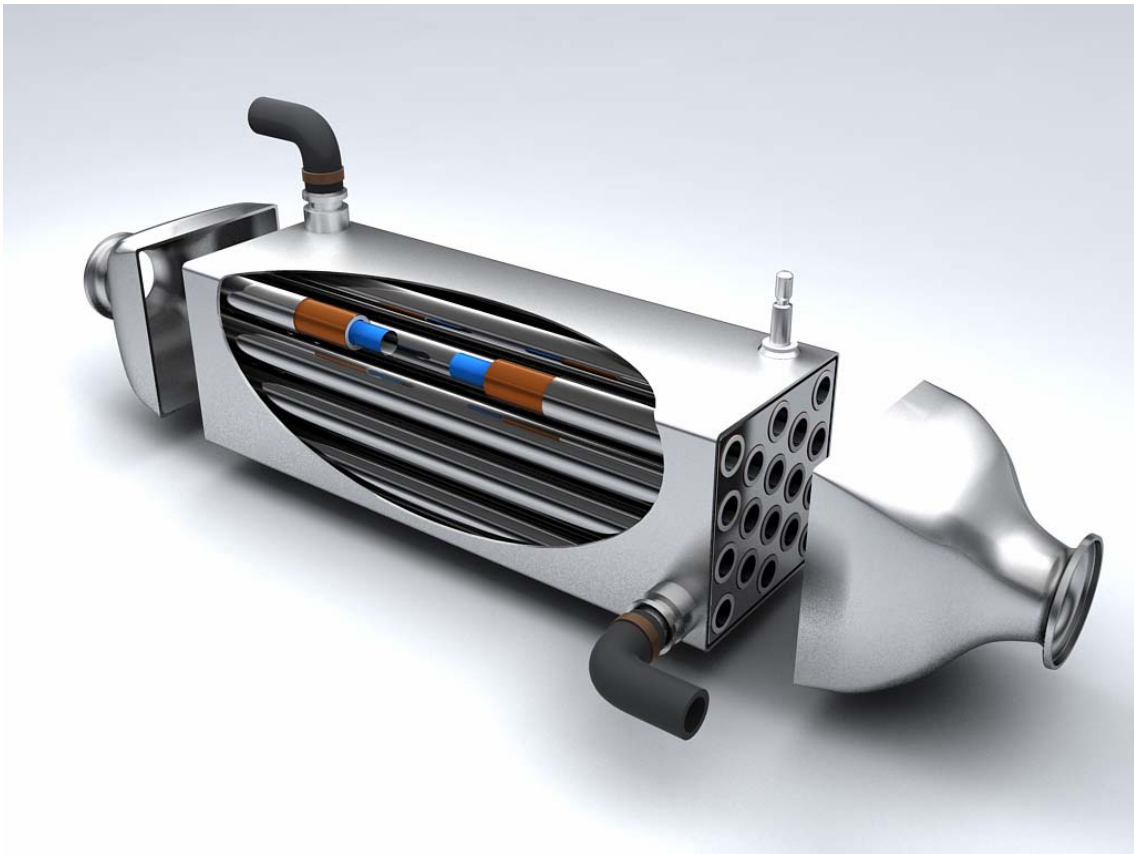


Abbildung 12: AGR-Kühler mit TEG-Wärmetauscherrohren

Die Konstruktion wurde so ausgeführt, dass die Enden des Wärmetauscherrohres den Plus und den Minuspol darstellen. Im Wärmetauscher selber sind alle Rohre elektrisch parallel verschaltet. Somit war es möglich, die bestehende Grundkonstruktion des AGR Wärmetauschers zu verwenden. Der Anschluss des Minuspols erfolgt über eine der „normalen“ Bodenplatten. Der Anschluss des Pluspol erfolgt über eine zusätzliche, elektrisch isolierte Bodenplatte mit elektrischer Durchführung nach außen (Abbildung 13).



Abbildung 13: AGR Wärmetauscher am Motor angebaut mit elektrischer Durchführung

5. Energiegewinn im TEG AGR Kühler

Auf Basis von Temperatur und AGR Massenstromdaten wurde die im TEG erzeugte elektrische Leistung bei verschiedenen Lastprofilen ermittelt (Abbildung 14).

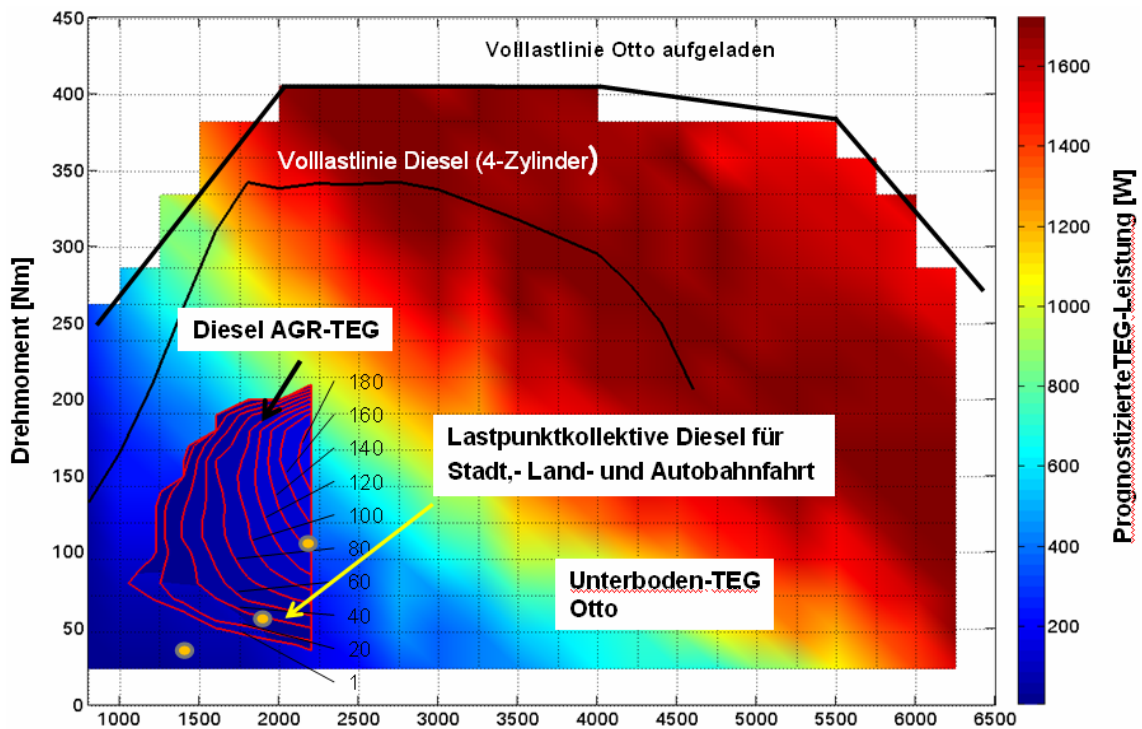


Abbildung 14: Im TEG erzeugte elektrische Energie in Abhängigkeit des Lastprofils für eine diesel- bzw. ottomotorische Anwendung.

Wie bereits beschrieben, kann im AGR-TEG nur ein Bruchteil der maximal möglichen Leistung eines TEGs im Hauptabgasstrang dargestellt werden, da trotz hoher Abgastemperaturen der Massenstrom deutlich niedriger ist. Wie in Abbildung 14 erkennbar ist, liefert der AGR TEG im reinen Stadtfahrlastkollektiv keinen Strombeitrag, da gerade auch für niedrige Lasten und in der Warmlaufphase der AGR-Kühler oft im Bypass-Modus betrieben wird. Im Autobahnfahrbetrieb sind dagegen Leistungen von bis zu 200W möglich. Bei noch höheren Lasten wird der AGR nicht mehr durchströmt und daher kann auch keine TEG Leistung mehr abgegriffen werden.

Bei einem Ottomotor hingegen bietet sich an, den TEG langfristig in dem Hauptabgasstrang zu positionieren. Aufgrund der dort höheren Massenströme sowie des deutlich größeren Wirkbereichs sind dabei Leistungen von bis über 1kW möglich. Dabei ist aber zu beachten, dass für die Maximalleistungen an der Vollastlinie gegenläufige Verbrauchseffekte durch den erhöhten Abgasgegendruck bzw. den erhöhten Kühlaufwand zu erwarten sind. Im praxisnahen Fahrbetrieb auf der Autobahn ist daher vielmehr mit einer rekuperierbaren Leistung von ca. 700W zu rechnen.

Die mit der in das Bordnetz zurückgespeisten elektrischen Leistung verbundene Verbrauchersparnis hängt von vielen Faktoren (Fahrprofil, Wirkungsgrad Motor, Wirkungsgrad Generator, etc.) ab.

In Abbildung 15 ist exemplarisch für ein Mittelklassefahrzeug mit Dieselmotor eine Korrelation zwischen Verbrauchseinsparung und mittlerer TEG Leistung dargestellt.

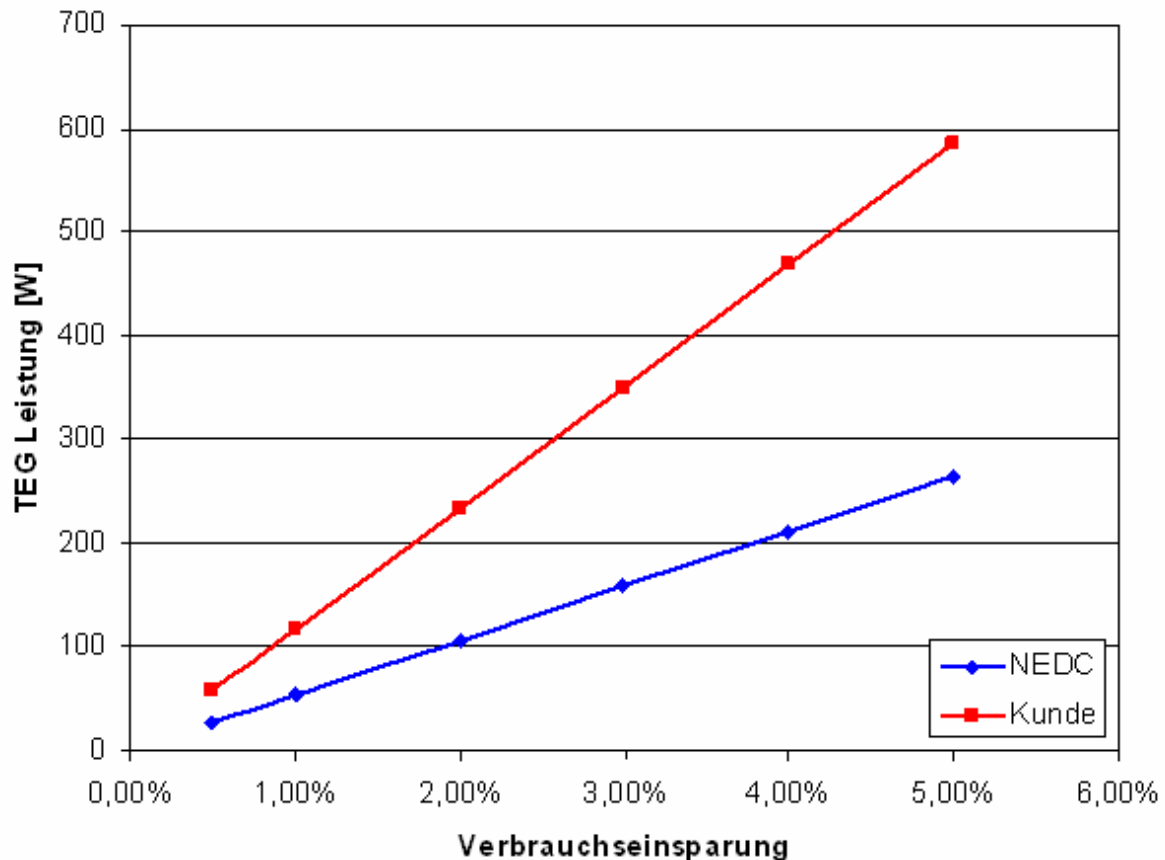


Abbildung 15: Korrelation zwischen Verbrauchseinsparung und TEG Leistung für ein Mittelklassefahrzeug mit Dieselmotor im NEDC sowie im Kundenfahrbetrieb.

Da im NEDC Fahrprofil die Motorlasten sehr gering sind, hat die rekuperierte elektrische Leistung im Vergleich zum realen Kundenbetrieb einen deutlich höheren Verbrauchseinfluss. Nachdem aber die erzielbaren elektrischen Leistungen bei den entsprechenden NEDC Motorlasten sehr gering sind, liegt der Fokus primär auf den Verbrauchseinsparungen im realen Kundenbetrieb. Wie in Abbildung 14 dargestellt, sind hierbei Leistungen von mehreren hundert Watt möglich und somit liegt auch die Verbrauchseinsparung deutlich über der des NEDC im Bereich von bis zu 5%.

6. Zusammenfassung

Die Nutzung der Abwärme durch den Einsatz von Thermoelektrischen Generatoren im Automobil steht sicherlich noch am Anfang der Entwicklung. Der Charme dieser Technologie beruht jedoch gerade auf dieser Tatsache. Die Entwicklung eines TEG-Kühlers mit heute kommerziell verfügbaren Materialien ist die Basis für die zukünftige, hocheffektive Nutzung von Abwärme. Neue Materialentwicklungen können in das bestehende Konzept integriert werden, womit Kosten sinken und der Wirkungsgrad gesteigert werden kann.

Das innovative BMW-Konzept der Integration eines Thermoelektrischen Generators in den AGR-Kühler und seine frühe Serieneinführung stellen einen Meilenstein in der Entwicklung einer kommerziell attraktiven Wandlung von Abwärme in Strom dar.

Die Einbindung des TEG in das Bordnetz und die Erfahrungen im Feld werden in absehbarer Zeit zu einer deutlichen Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades und damit der Attraktivität des Konzeptes führen.

Die erzielbare CO₂-Einsparung senkt den Flottendurchschnittsverbrauch und erbringt deshalb einen realen Kundennutzen.

7. Literatur

- [1] J. Liebl: BMW EfficientDynamics – Emissionsreduzierung kann auch faszinieren. 4. Tagung Emission Control, Dresden, 2008
- [2] R. Freymann; W. Strobl; A. Obieglo- Der Turbosteamer: Ein System zur Kraft-Wärme-Kopplung im Automobil, MTZ - Motortechnische Zeitschrift Ausgabe Nr.: 2008-05, 2008
- [3] J. Liebl et al. - Intelligente Generatorregelung - Ein Weg zur effizienten Dynamik, ATZelextronik Ausgabe Nr.: 2006-04, 2006
- [4] A. Eder, J. LaGrandeur, D. Crane, "Vehicle Fuel Economy Improvement through Thermoelectric Waste Heat Recovery," Proceedings of the 11th Diesel Engine Emissions Reduction (DEER) Conference, Chicago, Illinois, August 2005.
- [5] J. Nolas, J. Sharp, J. Goldsmid: Thermoelectrics - Basic Principles and New Material Development, Springer Publications Heidelberg, 2001
- [6] G. Degen, F. Haaß: Halbleiterentwicklung für thermoelektrische Materialien; 1. IAV-Tagung „Thermoelektrik - eine Chance für die Automobilindustrie?“, Berlin 2008
- [7] P. Geskes et al.; Der integrierte Metallkatalysator im Abgaswärmetauscher – Eine innovative Lösung für zukünftige Abgas-Rückführ-Systeme; Ostfildern 2006