

Projekttitle: IN-TEG

ThermoPower – Strom aus Wärme

IN-TEG

03X3555

**BASF – Daimler – Boysen –
DLR – JLU – TUD – MPI CFS**

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**

Innovative Materialien und Generatoren für die thermoelektrische Energiegewinnung der Zukunft

Förderkennzeichen: 03X3555C

Laufzeit: 01.07.2011 – 30.06.2014

Berichtszeitraum: 1.07.2011 – 30.06.2014

Projektleiter: Dr. Florian Finsterwalder

Datum: 24.09.2014

Unterschrift:

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Ziele | 4 |
| 1.1 | Gesamtziel des Vorhabens..... | 4 |
| 1.2 | Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen | 6 |
| 1.3 | Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens | 7 |
| 1.4 | Industrielle und gesellschaftliche Relevanz | 9 |
| 2 | Stand der Wissenschaft und Technik | 9 |
| 2.1 | Problembeschreibung | 9 |
| 2.2 | Stand der Wissenschaft und Technik..... | 11 |
| 3 | Zusammenarbeit und Arbeitsplan..... | 17 |
| 4 | Ergebnisse | 21 |
| 4.1 | Arbeitspaket 4.1 | 21 |
| 4.1.1 | Erstellung Lastenheft..... | 21 |
| 4.1.2 | Begleitende Modellierung und Unterstützung der Generatorauslegung | 21 |
| 4.2 | Ergebnisse aus Arbeitspaket 4.2 | 29 |
| 4.2.1 | Anpassung Modulprüfstand und Vermessung der thermoelektrischen Module | 29 |
| 4.2.2 | Anpassung Heißgasprüfstand und erste Erprobung des Gesamtsystems..... | 36 |
| 4.2.3 | Aufbau des Generators, Bordnetzanbindung und Test am Gesamtsystem | 39 |
| 4.3 | Ergebnisse aus Arbeitspaket 4.3 | 44 |
| 4.3.1 | Konstruktion und Packaging Untersuchungen | 44 |
| 4.3.2 | Fahrzeugaufbau und Messtechnik..... | 45 |
| 4.3.3 | Rollenprüfstandtests, Fahrttests und Auswertung | 45 |
| 4.3.4 | Auslegung und Aufbau des integrierten Generatorkonzeptes sowie Test am Heißgasprüfstand | 46 |
| 4.4 | Handlungsempfehlung für zukünftige Forschungsschwerpunkte..... | 47 |
| 5 | Literaturverzeichnis | 48 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 4.1: Systemkonzept Integration TEG..... | 21 |
| Abbildung 4.2: Simulationsergebnisse: elektrische Leistung..... | 22 |
| Abbildung 4.3: CO ₂ -Reduktion mittels Medienerwärmung im Motor oder Getriebe | 23 |
| Abbildung 4.4: Getriebeöltemperaturverläufe in Abhängigkeit der eingebrachten Abgasenthalpie | 24 |
| Abbildung 4.5: Auslegung Reihenschaltung | 26 |
| Abbildung 4.6 Auslegung Parallelschaltung | 27 |
| Abbildung 4.7: Einzelmodulteststand | 29 |
| Abbildung 4.8: Schematischer Aufbau TE-Modulvermessung..... | 30 |
| Abbildung 4.9: Elektrische Lastwiderstandsanpassung bei Modulvermessung | 31 |
| Abbildung 4.10: Leistungsausbeute im MPPT für verschiedene Temperaturen | 32 |
| Abbildung 4.11: Wirkungsgrad für verschiedene Heiß- und Kaltseitentemperaturen | 32 |
| Abbildung 4.12: Leistungskennfeld BiTe-Modul..... | 33 |
| Abbildung 4.13: Wirkungsgradkennfeld BiTe-Modul..... | 34 |
| Abbildung 4.14: Prüfstands Aufbau zur Vermessung der Round-Robin Module | 34 |
| Abbildung 4.15: Leistungsmessung der Round-Robin Module | 35 |
| Abbildung 4.16: Wärmestrommessung der Round-Robin Material..... | 36 |
| Abbildung 4.17: Auswirkung der Abgasabkühlung auf den Druckverlust | 37 |
| Abbildung 4.18: Aufbau TEG-Systemprüfstand | 38 |
| Abbildung 4.19: Getesteter TEG-Prototyp für Bordnetzintegration | 39 |
| Abbildung 4.20: Messung verschiedener Verschaltungsvarianten der Module | 40 |
| Abbildung 4.21: Änderung der Heißseitentemperatur bei elektrischer Lastanpassung..... | 41 |
| Abbildung 4.22: Einfluss einer direkten Batterieanbindung des TEG | 42 |
| Abbildung 4.23: Wirkungsgrad verschiedener DC/DC-Wandler am Systemprüfstand | 42 |
| Abbildung 4.24: Wirkungsgradkette der in die Batterie eingespeisten Leistung..... | 43 |
| Abbildung 4.25: Aufbau MPP-Tracker am Systemprüfstand | 44 |
| Abbildung 4.26: Packaging Untersuchung Fahrzeugintegration | 45 |
| Abbildung 4.27: Abgastemperaturmessung..... | 46 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Übersicht Ziele im Projekt IN-TEG | 17 |
| Tabelle 2: Arbeitspakete im Projekt IN-TEG | 19 |
| Tabelle 3: Arbeitsplan der Daimler AG im Projekt IN-TEG | 20 |
| Tabelle 4: Wirkungsgradmessung MPP-Tracker | 44 |

1 Ziele

Die allgegenwärtige Debatte über neue und innovative Wege zum Klimaschutz führt tagtäglich vor Augen, wie wichtig die schonende und vor allem nachhaltige Nutzung von Ressourcen, der maßvolle Umgang mit Energie sowie die Reduktion klimaschädlicher Gase für unsere heutige und vor allem zukünftige Generationen sind. Kaum ein Thema ist von solch globaler Bedeutung und entscheidend für die langfristige Entwicklung unserer Lebensbedingungen.

In den letzten Jahren ist daher ein breites gesellschaftliches Bewusstsein für klimafreundliche Technologien entstanden. Vielfältige Ansätze werden verfolgt, so beispielsweise Photovoltaik, Solarthermie, Windkraft, hybride Fahrzeugkonzepte oder Brennstoffzellentechnologie. Die Rückgewinnung und Nutzung von Abwärme durch Thermoelektrik ist dabei noch ein relativ junges Gebiet, das zunehmend an Bedeutung gewinnt.

Die Nutzung des Seebeck-Effektes zur Erzeugung von Strom hat daher in den letzten Jahren große Aufmerksamkeit erlangt, auch über akademische Kreise hinaus, wie einige Publikationen in populären Magazinen zeigen [1-3].

In Forschung und Entwicklung haben die thermoelektrischen Effekte international damit auch zunehmende Bedeutung gewonnen. Insbesondere in den USA gibt es, angetrieben durch die früheren Raumfahrtprogramme, profunde Erfahrung und sehr gut etablierte Netzwerke zwischen akademischer Forschung und Industrie. In Deutschland führte das Arbeitsgebiet bis vor wenigen Jahren eher ein Nischendasein. Ausgelöst durch die weltweit zunehmende Bedeutung der Thermoelektrik nehmen jedoch auch in Deutschland die Aktivitäten massiv zu.

Die am intensivsten diskutierte zukünftige Anwendung für die Thermoelektrik ist die Abwärmenutzung im Automobil, die zu einer Verringerung des Kraftstoffverbrauchs führt. Die europäische Gesetzgebung zur Reduktion des Schadstoffausstoßes begünstigt neue Technologien mit eben dieser Zielsetzung. Neben Kraftfahrzeugen gehören aber auch (stationäre) Kraftwerke, Feuerungs- und Müllverbrennungsanlagen sowie chemische Produktionsanlagen zu den großen Abwärmeproduzenten und bieten damit ebenfalls ein signifikantes Potential zur Rückgewinnung von Energie, verbunden mit einer Schonung von Ressourcen und einer Minderung der Umweltbelastung.

Aktuell wird Thermoelektrik abgesehen von sehr speziellen Anwendungen noch nicht kommerziell zur Stromerzeugung genutzt. Es gibt bislang im für die oben genannten Anwendungen relevanten Temperaturbereich von > 300 °C keine kommerziell nutzbare Modul- und Generortechnologie, und der Wirkungsgrad etablierter thermoelektrischer Wandler ist mit 5 % oder weniger noch erheblich zu niedrig, um wirtschaftlich zu sein.

An diesen beiden Punkten setzt das Konsortium IN-TEG an und möchte durch die integrierte Betrachtung von Anwendung, Generator, Modul und Material die Kernprobleme der Technologie lösen.

1.1 Gesamtziel des Vorhabens

Ziele des Vorhabens sind die Erforschung, Entwicklung und der Aufbau eines thermoelektrischen Generators sowie die Integration in den Abgasstrang eines Automobils

zur Abwärmerückgewinnung. Zur optimalen Ausnutzung der Wärmeenergie wird hierzu eine verlustarme Anbindung des thermoelektrischen Materials an den Wärmetauscher realisiert werden, um Verluste beim Wärmeübergang vom Wärmeträgermedium zum thermoelektrischen Material zu minimieren. Die notwendige Generatortechnologie wird anhand des etablierten Hochtemperaturmaterials Bleitellurid erarbeitet, aber parallel von der Erforschung neuer, ökologisch und ökonomisch günstigerer Materialien auf Basis von Siliciden und Zintl-Phasen begleitet. Deren Potential für eine spätere Integration in die Generatortechnologie aufzuzeigen ist ein weiteres Ziel dieses Projektes.

Zu diesem Zweck hat sich das Konsortium zusammengetan, um gemeinschaftlich die Erforschung neuer Materialien für die Thermoelektrik, die Herstellung von thermoelektrischen Generatoren und die Systemintegration vorwiegend in der Anwendung Automobil, aber mit Blick auch auf andere Anwendungsgebiete, voranzutreiben.

Dabei soll der aktuelle Stand der Technik hinsichtlich Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit deutlich übertroffen werden. Hierbei ist die gesamte Wertschöpfungskette von neuen Materialien, Modulen bis hin zu Systemkomponenten eingeschlossen und umfasst ebenfalls anwendungsspezifische Systeme sowie thermoelektrische Mess- und Prozesstechnik am Beispiel der Systemintegration in das Automobil.

Es gilt zunächst, neue thermoelektrische Materialien mit gegenüber dem Stand der Technik verbessertem Wirkungsgrad, hoher Lebensdauer, guter Umweltverträglichkeit und wirtschaftlicher Ressourcenverfügbarkeit zu identifizieren. Dazu greift das Konsortium innovative Ansätze aus Hochschulen und Instituten sowie der Industrie auf.

Der Einsatz von thermoelektrischen Generatoren in Kraftfahrzeugen sowie bei der Energierückgewinnung aus Abwärme soll in den nächsten Jahren in einzelnen Modellen der Oberklasse verwirklicht werden. Der Aufbau von entsprechenden Modulen und integrierten Systemen erfordert zunächst ein besseres, fundamentales Verständnis sowie die Weiterentwicklung bestehender Modultechnologien im Hinblick auf Skalierbarkeit und Stabilität unter den Anwendungsbedingungen (hohe Temperatur, wechselnde Temperaturzyklen, mechanischer Belastung durch Vibration usw.). Die entsprechenden Komponenten und die jeweiligen Verarbeitungsschritte müssen dabei ganzheitlich erarbeitet und mit der notwendigen Praxisrelevanz untersucht werden.

Die Erarbeitung der Modultechnologie wird zunächst auf Basis von durch BASF entwickelten verbesserten Bleitelluriden erfolgen. Wesentliche grundsätzliche Aspekte, die sich z.B. aus den starken Temperaturwechseln der Anwendung und den mechanischen Belastungen ergeben, werden sich schließlich auf Module aus neuen Materialien übertragen lassen. So kommt einer Bleitellurid-Modultechnologie die Rolle der ersten Generation von thermoelektrischen Modulen im Automobil mit hinreichenden Effizienzen zu.

Ziel ist jedoch, zeitnah eine Folgegeneration zur Verfügung zu stellen, in der auf Blei und Tellur verzichtet werden kann. Die Erkenntnisse, die mit dem etablierten Material Bleitellurid gewonnen werden, wirken sich daher bei der späteren Integration neuer Materialien deutlich beschleunigend aus, da nur so Synergien zwischen den verschiedenen Generationen von Materialien und Technologien erschlossen werden können. Nur durch ein paralleles Vorgehen, nämlich zum einen der Integration von verfügbarem und bereits verbessertem Bleitellurid in eine automobilen Modultechnologie und zum anderen der gleichzeitigen Erforschung

alternativer Materialien, kann die Thermoelektrik als zukunftsweisende Technologie erschlossen werden.

Durch den Zusammenschluss der Partner des Konsortiums IN-TEG wird daher eine erhebliche und nachhaltige Stärkung der deutschen Position im globalen Wettbewerb um die beste Thermoelektrik-Technologie möglich, und der Aufbau einer erfolgreichen Führungsposition auf dem europäischen und internationalen Markt erreicht.

Die verschiedenen Partner aus der Industrie sollen neben der Funktion als Hersteller und Zulieferer auch Anwender der neuen Materialien, Module und integrierten Systeme sein. Hierbei kommt naheliegenderweise der Automobiltechnologie eine besondere Bedeutung und Vorreiterrolle zu. Es wird angestrebt, sich auf den Märkten in Europa, Amerika und Asien anzusiedeln und zu etablieren.

Die beteiligten Universitäten Darmstadt und Gießen sowie das Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe und das Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt sind integraler Bestandteil dieses innovatives Netzwerkes entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Sie erarbeiten die Grundlagen für die Materialien der nächsten Generation und entwickeln wichtige analytische Methoden, die ein tiefgreifendes Verständnis der Gesamttechnologie erst ermöglichen. Darüber hinaus kommt den akademischen Partnern außerdem die Rolle der Rekrutierung und Förderung des in Deutschland so ausdrücklich benötigten naturwissenschaftlich-technischen Nachwuchses zu.

1.2 Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen

Das Ziel des beantragten Vorhabens ist die Erarbeitung einer auf Thermoelektrik basierenden Technologie zur Nutzbarmachung von Abwärme. Dies soll am Beispiel einer automobilen Anwendung geschehen, wofür sich das Konsortium durch die synergetische Bündelung von Kompetenz zu thermoelektrischen Materialien (BASF, MPI, TUDa, JLU), Messtechnik (DLR, JLU), Modulen (BASF, DLR), Abgasstrangtechnologie (Boysen) und Gesamtfahrzeugkonzeption (Daimler) entlang der gesamten Wertschöpfungskette bis hin zur wirtschaftlichen Nutzung der Ergebnisse (Daimler, Boysen, BASF, BFB) bestens aufgestellt sieht.

Von den drei in der Ausschreibung genannten möglichen Schwerpunkten deckt IN-TEG daher die beiden Schwerpunkte (a) Materialforschung und (b) Systementwicklung in vollem Umfang ab.

Das Vorhaben ist klar auf die Anwendung thermoelektrischer Generatoren im Automobil als Schlüsselanwendung ausgerichtet. Die Realisierung eines integrierten Generatorkonzeptes (verlustarme, also z.B. stoffschlüssige Anbindung des Wärmetauschers an das thermoelektrische Modul) kann dabei als beispielhaft betrachtet werden, da die daran erarbeiteten Grundlagen und Konzepte auch zwanglos eine Übertragung auf andere Anwendungsgebiete, zum Beispiel zur Abwärmerückgewinnung in Kraftwerken oder Heizungen, zulassen. Damit kommt dem Vorhaben IN-TEG eine den förderpolitischen Zielen entsprechende Innovationshöhe und Anwendungsbreite zu.

Die ambitionierten Ziele des Vorhabens lassen sich von einem einzelnen Partner nicht alleine erreichen. Dies gelingt erst durch die wirksame Vernetzung verschiedener Disziplinen, Erfahrungen und Kompetenzen entlang der Wertschöpfungskette, um der Komplexität des

Themas und dem damit verbundenen hohen wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Risiko gerecht zu werden.

Die wesentliche Verwertung der Ergebnisse wird natürlich zunächst im Automobilsektor liegen. Da Deutschland ein namhafter Automobilstandort ist, ist auch das Verwertungspotenzial in Deutschland gegeben.

Damit fügt sich das Projekt IN-TEG zwanglos in den ausgeschriebenen Gegenstand der Förderung und die förderpolitischen Ziele.

1.3 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens

Das Vorhaben verfolgt mehrere Ziele, was sich auch in einer teilweise parallelen Ausgestaltung der Arbeitspakete abbildet.

Das vorrangige technische Ziel ist die Erarbeitung eines integrierten Designs zur Nutzung eines thermoelektrischen Generators zur Abwärmerückgewinnung im Automobil und der dazugehörige Proof of Concept. Hierzu gehören zunächst die Modellierung und Simulation entsprechender Konzepte unter Berücksichtigung der gesamten Fahrzeugarchitektur, aber schließlich natürlich der reale Aufbau eines thermoelektrischen Generators als Demonstrator am Abgasstrang eines Kraftfahrzeugs sowie ein Nachweis der Tauglichkeit des integrierten thermoelektrischen Generators am Heißgasprüfstand.

Dieses Ziel kann aus heutiger Sicht innerhalb der Projektlaufzeit nur mit dem etablierten thermoelektrischen Material Bleitellurid erreicht werden. Aus diesem Grund ist ein untergeordnetes Ziel die Bereitstellung von Bleitellurid für den Modulbau in ausreichender Menge. Eine Skalierung der Syntheserouten für Bleitellurid ist notwendig, um ausreichend Material in der benötigten Qualität für einen Markteintritt zur Verfügung stellen zu können. Bleitellurid kann allerdings, auch dies wird ja bereits aus den Förderzielen der Ausschreibung deutlich, nicht langfristig die Ziele einer nachhaltigen und wirtschaftlichen Abwärmerückgewinnung erfüllen. Bleitellurid dient daher vornehmlich als Vehikel, um die Thermoelektrik für reale Anwendungen zugänglich zu machen. Durch die zeitnahe Verfügbarkeit von Bleitellurid und des damit verbundenen Zugangs zu einem zumindest teilweise etablierten Material- und Modulkonzept können fundamentale und grundsätzliche Herausforderungen der Technologie frühzeitig erkannt und adäquate Lösungen erarbeitet werden. Der Aufbau von Modulen auf Basis Bleitellurid (incl. Erarbeitung einer Kontaktierungstechnologie), eine entsprechende Testung der Module und deren Integration in das Generatordesign sind entscheidende Schritte auf dem Weg zum Gesamtziel des Vorhabens.

Auf diese Weise kann entscheidend Zeit gewonnen und die Erforschung und der Aufbau von tragfähigen thermoelektrischen Generatoren beschleunigt werden, bevor neue Materialien das Potenzial erreichen, Bleitellurid zu ersetzen.

Im Rahmen des Vorhabens werden parallel zur konzeptionellen Generatorentwicklung auch neue, alternative Materialien erforscht, die die zweite Säule der Technologieentwicklung bilden. Aus den Vorarbeiten der Konsortialpartner haben sich hierbei die Silicide, siliciumbasierte Clathrate sowie Zintl-Phasen als höchst aussichtsreich erwiesen, sowohl unter wissenschaftlichen als auch unter ökonomischen und ökologischen Aspekten

(thermoelektrische Eigenschaften, Kosten, Toxizität etc.). Das Ziel ist hier die Identifikation der besten Materialien, deren thermoelektrische Charakterisierung sowie eine orientierende Prüfung der Skalierbarkeit in den technischen Maßstab. Hierzu gehört auch die Verarbeitung der Materialien zu homogenen, dichten und mechanisch stabilen Körpern (thermoelektrische Schenkel).

Es ist davon auszugehen, dass sich viele der grundsätzlichen Aspekte, die anhand von Bleitellurid im Rahmen des Vorhabens erforscht werden, auch auf neue Materialien übertragen lassen. Dennoch sind insbesondere bei der Kontaktierungstechnologie im Modul stets materialspezifische Anpassungen vorzunehmen, so dass auch für neue Materialien eine Weiterentwicklung der Technologie erforderlich ist. Eine abschließende Ausarbeitung dieser Herausforderungen übersteigt zwar den Umfang des Vorhabens, allerdings ist ein Ziel unserer Arbeiten, im Rahmen der Bewertung der neuen Materialien gleichzeitig auch deren Modultauglichkeit prinzipiell aufzuzeigen.

An die Anwendung im Automobil werden hohe Anforderungen gestellt. Für eine umfassende Bewertung der Erfolgsaussichten der Thermoelektrik im Automobil sind daher zuverlässige Messungen, Charakterisierungen und Tests der Materialien, Module und Generatoren erforderlich. Neben den reinen thermoelektrischen Eigenschaften, die bei den an der Materialentwicklung beteiligten Konsortialpartnern bis zum praxisrelevanten Temperaturbereich gemessen werden können, ist die Langzeitstabilität der Materialien von entscheidender Bedeutung. Dieser Aspekt ist für die Praxistauglichkeit eines Materials mindestens ebenso wichtig wie dessen thermoelektrische Eigenschaften. Da es für die Langzeitcharakterisierung von thermoelektrischen Materialien kein standardisiertes Verfahren gibt, ist ein weiteres Ziel des Vorhabens, die für den Modulaufbau verwendeten Materialien (Bleitellurid und selektierte neue Materialien) unter Einsatzbedingungen, also in einem Temperatur- und Feldgradienten, zu untersuchen, um Hinweise auf mögliche Degradationsmechanismen und Kinetiken zu erhalten, auch bezüglich möglicher Kontaktmaterialien.

1.4 Industrielle und gesellschaftliche Relevanz

Nur wenige Themen sind von einer solch globalen Relevanz und derart medienpräsent wie die Sicherstellung einer nachhaltigen Energieversorgung. Im Energiemix der Zukunft ist die Rückgewinnung von bisher ungenutzter Abwärme ein entscheidender Beitrag. Bislang wird diese Energiequelle jedoch nur in Nischenapplikationen genutzt, fernab einer breiten Anwendung.

Nach einer Analyse des Lawrence Livermore National Laboratory [4] blieben allein in den USA im Jahr 2008 rund $1.7 \cdot 10^{13}$ kWh Energie ungenutzt, entsprechend 57% der eingesetzten Primärenergie. Das US Department of Energy [5] schätzt ab, dass man rund $1.7 \cdot 10^7$ m³ Kraftstoff jährlich einsparen kann, wenn man alle der 220 Millionen privaten Kraftfahrzeuge in den USA mit einem thermoelektrischen Generator mit einem Wirkungsgrad von 15% ausstatten würde. Dies entspricht einer CO₂-Einsparung von $69.5 \cdot 10^6$ t pro Jahr.

Aber auch bereits bei einer geringeren Wandlungseffizienz als 15% würde ein thermoelektrischer Generator bereits einen bedeutenden Beitrag zur Ressourcenschonung und zum Klimaschutz leisten. Die Entwicklung einer integrierten Generatortechnologie, wie sie im vorliegenden Vorhaben angestrebt wird, kann hierbei wegweisend nicht nur für die Automobilindustrie, sondern auch für eine Vielzahl anderer Anwendungen sein, die sich von einer Abwärmerückgewinnung in der privaten Hausheizung bis hin zu industrieller Abwärmenutzung erstrecken.

Bislang existiert noch keine kommerzialisierbare Technologie, um die Thermoelektrik einer breiten Anwendung zugänglich zu machen. Aufgrund der Komplexität, die eine solche Aufgabe mit sich bringt, erfordert das vorliegende Vorhaben eine Bündelung des Know-hows der verschiedenen Partner, wie es nur in einem interdisziplinären Verbundprojekt entlang der Wertschöpfungskette erreicht werden kann.

Die Realisierung eines tragfähigen thermoelektrischen Generatorkonzeptes kann nur an einem Hightech-Standort wie Deutschland erfolgen, das insbesondere durch die starke Stellung der Automobilindustrie und ihrer Zulieferer exzellente Voraussetzungen zur Verwertung in Deutschland mitbringt. Es handelt sich bei einem thermoelektrischen Generator zudem nicht um ein Produkt, das in kurzer Zeit von Wettbewerbern in Billiglohnländern kopiert werden kann. Somit trägt das vorliegende Vorhaben nachhaltig zur Steigerung der Wettbewerbs- und Leistungsfähigkeit von Unternehmen der Chemie-, Automobil- und Ingenieursbranche in Deutschland bei.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

2.1 Problembeschreibung

Ein thermoelektrisches Material hat die Eigenschaft, in einem Temperaturgradienten eine Potentialdifferenz zwischen der Heißseite und der Kaltseite aufzubauen, die sich als elektrische Spannung abgreifen und nutzbar machen lässt. Die wesentliche Kenngröße, die ein thermoelektrisches Material charakterisiert, ist die thermoelektrische Gütezahl ZT .

Für einen Temperaturbereich, der für die automobilen Anwendung in Betracht kommt (rund 300 °C bis 600 °C), ist Bleitellurid nach wie vor das etablierte Material. Bleitellurid bringt jedoch eine Reihe von Nachteilen mit sich. Zum einen sind die thermoelektrischen Gütezahlen von Bleitellurid mit einem ZT von 0.6 bis 0.8 im Maximum zu gering, um eine wirtschaftliche Effizienz im Modul zu erreichen. Zum anderen stehen einer breiten Anwendung von Bleitellurid noch die hohen Rohstoffkosten (Tellur) sowie ökologische Vorbehalte (Blei) gegenüber, welche die Erteilung einer Sondergenehmigung für die Kommerzialisierung von bleihaltigen Bauteilen erforderlich macht.

Aus ökologischer und ökonomischer Sicht sind daher Materialien gefordert, die neben exzellenten und reproduzierbaren thermoelektrischen Eigenschaften im relevanten Temperaturbereich auch eine kostengünstige Rohstoffbasis und skalierbare Syntheschemie haben, und zudem ökologisch weitgehend unbedenklich sind. Im Rahmen der Vorarbeiten zu diesem Vorhaben wurden bereits Silicide, siliciumbasierte Clathrate sowie die (in der Thermoelektrik) noch sehr jungen Zintl-Phasen als höchst attraktive alternative Materialklassen identifiziert, um die genannten Anforderungen zu erfüllen.

Oft übersehen wird allerdings, dass nicht das Material alleine für einen effizienten thermoelektrischen Wandler verantwortlich ist. Eine ganze Reihe von technologischen Aspekten ist hier von Bedeutung, um die „reinen“ Materialeigenschaften möglichst verlustfrei in die Anwendung zu transportieren. Der Modultechnologie kommt schlussendlich eine ebenso große Bedeutung wie dem Material selbst zu.

Im Hinblick auf die Modultechnologie geht es vor allem um zwei Fragestellungen: Wie gelingt die möglichst verlustfreie elektrische Kontaktierung der Materialien, und wie gewährleistet man einen maximalen Wärmefluss vom Wärmeträgermedium (Abgas) hin zum thermoelektrischen Material.

Bis heute haben Module auf Basis Bleitellurid neben den sehr speziellen Raumfahrtanwendungen (Radioisotopengeneratoren für Satelliten und Sonden) kommerziell lediglich Eingang in Generatoren zum kathodischen Korrosionsschutz für Pipelines gefunden [6]. Bei dieser Anwendung ist die Wandlungseffizienz nicht das entscheidende Kriterium, und die konstanten Betriebsbedingungen sowie ein in der Regel nicht limitierendes Platzangebot lassen einen vergleichsweise einfachen Generatorkonstruktion zu.

Betrachtet man jedoch die Anwendung im Automobil, so sieht man sich höchst ambitionierten Anforderungen an den thermoelektrischen Generator gegenüber. Zum einen begrenzt der zur Verfügung stehende Bauraum am Abgasstrang die Freiheiten im Design des Generators. Hocheffiziente Wärmetauscher auf der Heiß- und der Kaltseite sind erforderlich, um die notwendigen hohen Wärmeflüsse am Material zu realisieren. Da jede Grenzfläche einen signifikanten Wärmeverlust bedeutet, kann nur ein integriertes Generatordesign, in dem das thermoelektrische Modul direkt und daher verlustarm mit dem Wärmetauscher verbunden ist, zum Erfolg führen. Ein solches integriertes Modulkonzept wurde nach unserem Wissen bislang noch nicht erfolgreich realisiert.

Durch den Eingriff in das an sich ausbalancierte Abgassystem des Motors ergeben sich weiterhin Implikationen auf das gesamte Motor- und Abgasmanagement (Strömungsprofile, Druckverlust etc.), die es zunächst über Simulationen und Modellierungen zu erfassen gilt.

Durch die zudem hohen Anwendungstemperaturen und ständig wechselnden Betriebspunkte (Fahrverhalten eines Kraftfahrzeugs) werden schließlich sehr hohe Anforderungen an die verwendeten Kontaktmaterialien und das Design gestellt. Diese müssen (ebenso wie auch die thermoelektrischen Materialien selbst) eine hinreichend lange Lebensdauer für eine kommerzielle Anwendung im Automobil aufweisen, und auch unter extremen Bedingungen (rasch wechselnde Temperaturen und Temperaturgradienten, mechanische Belastungen des Aufbaus und der Materialien durch Vibrationen und Erschütterungen etc.) zuverlässig arbeiten. Das frühzeitige Erkennen einer möglichen Degradation von Materialien und Kontakten sowie ein profundes Verständnis der zugrundeliegenden Mechanismen ist daher ausgesprochen wichtig.

Diesen Herausforderungen will sich das Konsortium IN-TEG stellen, und gemeinsam Lösungsansätze erarbeiten und demonstrieren. Da bei einem thermoelektrischen Generator, wie gerade aufgezeigt wurde, viele Aspekte ineinander greifen, die die gesamte Kette vom Rohstoff bis hin zur Systemintegration umfassen, ist schließlich das konzertierte und vernetzte Zusammenspiel verschiedenster Fachrichtungen, wie sie hier im Konsortium vertreten sind, unabdingbar für einen Projekterfolg.

2.2 Stand der Wissenschaft und Technik

Thermoelektrische Generatoren sind prinzipiell kein neues Konzept - bereits seit rund fünfzig Jahren werden diese Energiewandler beispielsweise in Radioisotopengeneratoren (RTGs) in der Raumfahrt als zuverlässige und wartungsfreie Energiequelle geschätzt. Diese Generatoren lassen sich allerdings nicht ohne weiteres in anderen Anwendungen nutzen, was sowohl an den dort verwendeten thermoelektrischen Materialien als auch an den besonderen (zeitlich konstanten) Betriebsbedingungen liegt.

Nach wie vor sind die in den 60er und 70er Jahren entwickelten Materialien Bismuttellurid (Bi_2Te_3), Bleitellurid (PbTe) und Silicium-Germanium (SiGe) Stand der Technik in thermoelektrischen Modulen und Generatoren wie den RTGs. Eine Übertragung auf eine breite Anwendung wie die Abwärmenutzung im Automobil ist bei diesen Materialien nicht wirtschaftlich, da den hohen Rohstoffkosten (Tellur, Germanium) nur eine mäßige Wandlungseffizienz im Generator (maximal 6 %) gegenüber steht. Auch ökologische Bedenken sind hier vor allem gegenüber Bleitellurid zu nennen. Schließlich ist die vorhandene Modultechnologie, die ja u.a. für die sehr spezielle Anwendung in der Raumfahrt entwickelt wurde, nicht ohne weiteres wirtschaftlich skalierbar, und die Haltbarkeit und Beständigkeit unter starker mechanischer und thermischer Beanspruchung (Zyklisierung) wie im Automobil ist mit den vorhanden Konzepten nicht zu erreichen.

Die thermoelektrischen Materialien und Module der heutigen Generation sind daher nicht in der Lage, den durch eine wirtschaftliche Produktanwendung gesetzten Anforderungen gerecht zu werden. Der aktuelle Stand der Technik verwendet Module mit Schenkeln aus Bismuttellurid. Mit diesem Material erzielt man ZT -Werte von maximal 0.9 bei einer Temperatur von 130 °C für das n -Material und einen ZT -Wert von 0.8 bei einer Temperatur von 100 °C für das p -Material. Daher ist ein Einsatz ausschließlich für Applikationen im Nieder-temperaturbereich (< 250 °C) sinnvoll, was zusätzlich durch die eingeschränkte thermische Stabilität von Bi_2Te_3 vorgegeben ist. Module mit Bleitellurid-Materialien (verschieden dotiertes PbTe) gibt es bislang nur in sehr geringem Umfang für Anwendungen, die im Hinblick auf Zyklisierbarkeit und mechanische Beanspruchung weit weniger anspruchsvoll sind als

Anwendungen im Automobil. *n*-leitendes Bleitellurid erreicht einen *ZT*-Wert von rund 0.8 bei einer Temperatur von 400 °C. Das *p*-leitende Bleitellurid hat ein *ZT* von rund 0.7 bei ungefähr 450 °C. Damit können diese Materialien sehr gut in einem mittleren Temperaturbereich eingesetzt werden, wie er im Kraftfahrzeug mit Verbrennungsmotor auftritt. Jedoch sind diese *ZT*-Werte und damit auch die Wirkungsgrade für eine wirkliche Massenanwendung noch deutlich zu gering (s.o.).

In den letzten Jahren wurden daher verstärkt neue Materialklassen gesucht, die effizienter und kostengünstiger als der Stand der Technik sind. Eine wesentliche Orientierung gab dabei das „Phonon glass, electron crystal“-Konzept von G. Slack, nach dem ein thermoelektrisches bulk-Material zwar ein hervorragender Elektronenleiter sein soll, aber gleichzeitig wirkungsvoll die Phononen streuen muss (gute elektrische Leitfähigkeit, schlechte Wärmeleitfähigkeit).

Nanoskalige und nanostrukturierte Materialien sind ein Ansatz, um dies zu erreichen (dünne Schichten, Multilayer-Systeme, gezielt entmischte Materialien [7-8]). All diese Konzepte haben sich bis heute als technisch nicht tragfähig herausgestellt, im wesentlichen mangels Temperaturstabilität (Kornwachstum bzw. diffusive Homogenisierung bei höheren Temperaturen) und/oder mangels Reproduzierbarkeit, so dass homogene bulk-Materialien nach wie vor die praktisch aussichtsreichsten Kandidaten für bessere, zukunftsweisende Thermoelektrika sind. Übersichten geben [9] und [10].

Bereits sehr gut untersucht sind hier beispielsweise die Skutterudite, abgeleitet von CoSb_3 . In dieser Materialklasse wurden für den mittleren Temperaturbereich hervorragende thermoelektrische Eigenschaften, besser als die von Bleitellurid, entwickelt. Das mechanistische Verständnis der Skutterudite hat in den letzten Jahren deutlich gewonnen [11, 12], und aus Grundlagsicht können die Skutterudite mehr und mehr durch gezielte Implantation von Rattler-Atomen in die Hohlräume des Kristallgitters „maßgeschneidert“ werden. Gute *ZT*-Werte wurden für *n*-Skutterudite wie $(\text{Ba,Yb})_x\text{Co}_4\text{Sb}_{12}$ bzw. $(\text{Ca,Ba})(\text{Co,Ni})_4\text{Sb}_{12}$ berichtet (um 1.2 zwischen 500 °C und 600 °C [11, 13, 14]), die *p*-Skutterudite wie $\text{CeFe}_4\text{Sb}_{12}$ bleiben allerdings bislang dahinter zurück (um 0.8 bis 1 zwischen 500 °C und 600 °C [11-15]). Aufgrund der guten thermoelektrischen Eigenschaften im für die Automobilanwendung relevanten Temperaturbereich dürften die Skutterudite mittelfristig als bedeutendste Konkurrenz für Bleitellurid gelten.

Langjährige Erfahrung mit Skutteruditen besitzt das NASA-JPL [13, 16], im wesentlichen allerdings im Hinblick auf Anwendungen in Radioisotopengeneratoren für die Raumfahrt. Wie bereits im vorangegangenen Kapitel erläutert, sind die dort geltenden Anforderungen durch die konstanten Betriebsbedingungen nicht mit denen einer automobilen Anwendung vergleichbar, und von daher auch nicht direkt übertragbar. Das JPL konnte an Schenkelpaaren aus (segmentierten) Skutteruditen unter optimalen Laborbedingungen Wirkungsgrade von rund 12% demonstrieren. Auf Grund der zahlreichen Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Skutterudite ist es schwer, unabhängige IP zu generieren.

Eine weitere junge Materialklasse bilden die Half-Heusler-Verbindungen, die sich trotz metallischer Eigenschaften durch hohe Seebeck-Koeffizienten auszeichnen. Derzeit stellen die vergleichsweise hohen Wärmeleitfähigkeiten noch eine zu lösende Herausforderung dar, wodurch akzeptable Wirkungsgrade erst bei hohen Temperaturen erreicht werden.

Ebenfalls nur für sehr hohe Temperaturen relevant sind oxidische Materialien. Generell lassen sich zwar Oxide (z.B. Schichtoxide wie Na_xCoO_2 oder Perovskite) sehr flexibel modifizieren, und Oxide sind naturgemäß auch in Luftatmosphäre überwiegend stabil. Bis heute allerdings liegen die thermoelektrischen Eigenschaften weit hinter den für eine wirtschaftliche Anwendung zur Abwärmerückgewinnung im Automobil notwendigen Wirkungsgraden zurück [17].

Mit Zintl-Phasen werden intermetallische Verbindungen aus elektropositiven Alkali- und/oder Erdalkalimetallen und Elementen der 13. bis 16. Gruppe im Periodensystem der Elemente bezeichnet. Diese diamagnetische Halbleiter mit einer relativ kleinen Bandlücke (< 1 eV) wurden in der Vergangenheit hinsichtlich ihrer strukturellen und magnetischen Eigenschaften sehr ausführlich charakterisiert, jedoch wurden die thermoelektrischen Eigenschaften vielfach nur an Einzelbeispielen untersucht. Bei dieser Materialklasse von Verbindungen ist der Slack-Ansatz in nahezu idealer Weise erfüllt, da hier isolierte Kationen oder kationische Cluster, die als Phononenstreuer wirken, einem mehrdimensionalen anionischen Netzwerk gegenüberstehen. In einem kürzlich erschienenen Übersichtsartikel [18] konstatieren Snyder *et al.*: “While the exploration of Zintl compounds for thermoelectrics is in the early stage, the initial successes (e.g. $\text{Ce}_x\text{Co}_{4-y}\text{Fe}_y\text{Sb}_{12}$, $\text{Yb}_{14}\text{MnSb}_{11}$, $\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Ge}_{30}$) demonstrates the potential for these materials.”

Insbesondere $\text{Yb}_{14}\text{MnSb}_{11}$, das 2006 erstmalig von Brown *et al.* [29] als p-leitendes thermoelektrisches Material mit einem ZT -Wert von 1,0 bei 927 °C erwähnt wurde, und seine bezüglich der Ladungsträgerkonzentration optimierten Substitutionsvarianten sind die bis heute am besten für thermoelektrische Anwendungen untersuchten Zintl-Phasen [9, 13, 16, 18-19]. Bemerkenswert bei diesen Verbindungen sind neben hohen thermoelektrischen Gütezahlen die niedrigen Wärmeleitfähigkeiten, die durch entsprechende Dotierungen sehr gut gesteuert werden können. Die Verbindungen wurden an der UC Davis, dem CalTech und dem Jet Propulsion Laboratory entwickelt und werden gegenwärtig für Raumfahrtanwendungen qualifiziert.

Darüber hinaus jedoch ist die große Klasse der Zintl-Phasen noch kaum bezüglich ihrer physikalischen und thermoelektrischen Eigenschaften hinreichend charakterisiert worden, so dass ein dringender Forschungsbedarf besteht. Unter den wenigen, gut charakterisierten Verbindungen ist beispielsweise $\text{YbCd}_{1,6}\text{Zn}_{0,4}\text{Sb}_2$ zu finden, das bei einer Temperatur von 427 °C einen thermoelektrischen Gütefaktor von 1.2 aufweist [30]. Außerdem wird von Snyder *et al.* [31] die Substanz $\text{Ca}_x\text{Yb}_{1-x}\text{Zn}_2\text{Sb}_2$ als effizientes thermoelektrisches Material mit geringer Bandlücke beschrieben, bei der gute Dotierungsmöglichkeiten zur Manipulation der thermoelektrischen Eigenschaften bestehen.

Die Festkörperchemie von Zintl-Phasen ist ausgesprochen vielfältig und variabel, wie gerade die Arbeiten, die am Eduard-Zintl-Institut der TU Darmstadt (Dr. Cordier, Prof. Eisenmann, Prof. Albert) entstanden sind, gezeigt haben. Chemische Substitution (eine Dotierung zu p - und n -Leitern wird angestrebt) und strukturelle Modifizierungen sind möglich, aber wenig erprobt, und prädestinieren Zintl-Phasen für Experimente, in denen eine gezielte chemische Kontrolle der Transporteigenschaften von Stoffen angestrebt wird. Dies ist die wichtigste Voraussetzung, um Materialien mit optimierten thermoelektrischen Wirkungsgraden zu erhalten. Einer initialen Patentrecherche zufolge bestehen keine Schutzrechte Dritter, die derzeit die Anwendbarkeit von Zintl-Phasen in thermoelektrischen Modulen und Generatoren einschränken oder verhindern.

Eine weitere interessante Klasse von Festkörpern sind Silicide [39], von denen einige Materialien wie FeSi_2 oder $\text{Mg}_2(\text{Si},\text{Sn})$ beispielsweise mittels Spark-Plasma-Sintern hergestellt werden können [35, 36] und mit entsprechenden Dotierungen bereits länger für thermoelektrische Anwendungen bekannt sind [34, 38]. Viele Silicide zeichnen sich durch kostengünstige Rohstoffe, hervorragende chemische und thermische Stabilität und aus heutiger Sicht ökologische Unbedenklichkeit aus. Durch Dotieren der binären Silicide kann einerseits die Wärmeleitfähigkeit des Kristallgitters reduziert werden, andererseits nimmt der Powerfaktor durch die Erzeugung entarteter Zustände im Leitungsband mit minimaler Energie zu [32]. So besitzt beispielsweise $\text{Mg}_2\text{Si}_{0,6}\text{Sn}_{0,4}$ bei 507 °C einen ZT-Wert von 1.1 [33]. Eine besondere Herausforderung stellt die Synthese dichter Sinterkörper in größerem Maßstab dar, was bislang für diese sehr attraktive Materialklasse nur im Labormaßstab gelungen ist.

Aktuell sind zwei Substanzklassen im Brennpunkt der Untersuchungen in verschiedenen Forschungsgruppen, nämlich Materialien auf Basis von Mg_2Si und Mn_4Si_7 ($\text{MnSi}_{1.75}$). In der ersten Klasse werden hauptsächlich chemische Substitutionen auf den Silicium- und Magnesiumplätzen mit Hilfe verschiedener Präparationstechniken (Spark-Plasma-Sintern, Bridgeman-Einkristallzucht etc.) realisiert und der Einfluss solcher Substitutionen auf die thermoelektrisch relevanten Eigenschaften erforscht [40]. Chemische Gleichgewichte in den entsprechenden Mehrstoffsystemen werden sowohl experimentell als auch theoretisch erfasst. Vor allem die elektronische Struktur von Mg_2Si und dessen Abkömmlingen wird theoretisch untersucht.

In der zweiten Gruppe werden die Präparationsbedingungen für Mn_4Si_7 detailliert bestimmt, magnetische und elektronische Transporteigenschaften der hergestellten Materialien werden gemessen und mit Hilfe theoretischer Methoden verifiziert. Es gibt auch erste Versuche, Materialien im ternären System $\text{Mg}_2\text{Si}-\text{Mn}_{1.73}$ herzustellen und deren thermoelektrische Aktivität zu untersuchen.

Silicium- und germaniumbasierte Clathrate, die erst in jüngster Zeit für thermoelektrische Anwendungen erschlossen wurden, vereinen die Vorzüge der Silicide in idealer Weise mit den Forderungen des Slack-Modells. In den Clathraten besetzen Fremdatome als Phononenstreuer die großen Hohlräume eines Wirtsgitters. Bislang waren Clathrate nur basierend auf Gallium und/oder Germanium bekannt [41, 42], bei denen die Rohstoffkosten eine kommerzielle Anwendung verhinderten. Mit den Clathraten, die maßgeblich von Prof. Grin am Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe entwickelt wurden [37], eröffnen sich neue Möglichkeiten für wirtschaftliche und anwendungsfreundliche Thermoelektrika. Während der 29. International Conference on Thermoelectrics (Juni 2010, Shanghai) wurden den Clathraten zwei spezielle Sektionen und ein Plenarvortrag gewidmet. Es wurde hauptsächlich über Ergebnisse der Studien an germanium- und zinnhaltigen Clathraten berichtet, in denen chemische Variationen im Netzwerk mit Hilfe von Übergangsmetallen realisiert wurden. Über Silicium-Clathrate wird bis jetzt jedoch nur sehr wenig berichtet.

Für eine kommerzielle Anwendung thermoelektrischer Materialien ist die Untersuchung der Langzeitstabilität von entscheidender Bedeutung. Thermoelektrische Materialien sind unter Einsatzbedingungen immer einem Temperaturgradienten sowie einem elektrischen Potentialgradienten ausgesetzt und können unter thermodynamischer Entmischung (Soret-Effekt, dem Aufbau von Konzentrationsgradienten in ursprünglich homogenen Materialien im Temperaturgradienten) und Entmischung im elektrischen Feld (Elektromigration) leiden, was in der Diskussion thermoelektrischer Anwendungen meist ignoriert wird. Die Basis für das

Verständnis dieser Phänomene bildet die Transporttheorie zusammen mit der Defektchemie, angewendet auf die untersuchten Materialien. Auch etablierte Materialien wie Bleitellurid, die nach wie vor Schlüsselkomponenten für eine Erschließung thermoelektrischer Modultechnologie sind, wurden unter diesen Aspekten bisher nur unzureichend untersucht. Ein tiefgehendes Verständnis ist jedoch unerlässlich, um sowohl etablierte als auch neue Materialien rasch und zuverlässig bewerten zu können. Auch für eine Beurteilung der Stabilität eines thermoelektrischen Materials gegenüber einem elektrischen Kontakt oder einer Barriere sind Untersuchungen von atomaren Transportprozessen und Reaktionen ein maßgeblicher und bislang stets vernachlässigter Beitrag auf dem Weg zu einer Modultechnologie. Die Arbeitsgruppe von Prof. Janek an der Justus-Liebig-Universität Gießen ist eine der wenigen Gruppen weltweit, die sich sowohl intensiv mit Thermodiffusion, Soret-Effekt und Elektrotransport in Thermoelektrika beschäftigt hat als auch Grenzflächenreaktionen untersucht.

Letztlich ist das thermoelektrische Material immer nur ein Teilschritt auf dem Weg zur Anwendung: Die erfolgreiche Integration eines Materials in ein Modul und schließlich in einen Generator ist eine ebensolche Herausforderung wie die Entwicklung eines neuen Materials. Die bislang am Markt kommerziell verfügbaren Module auf Basis Bi_2Te_3 eignen sich vom Aufbau her grundsätzlich nicht, um den Ansprüchen einer Abwärmerückgewinnung aus dem Abgasstrang im höheren Temperaturbereich gerecht zu werden.

Vor allem in den USA gibt es seit mehreren Jahren weitreichende Aktivitäten des Department of Energy zur Entwicklung thermoelektrischer Generatoren zur Abgasrückgewinnung bei höheren Temperaturen. Eine umfassende Übersicht gibt [5].

Bei diesen Programmen werden nach publiziertem Wissenstand vornehmlich Skutterudite und bleitelluridbasierte, nanostrukturierte Materialien wie LAST eingesetzt.

Ein Modul aus reinem Bleitellurid wurde als Prototyp von Marlow vorgestellt [20], allerdings ohne Informationen zu Leistungsdaten, Stabilität etc. Durch das offene, eigentlich für Bi_2Te_3 -Module typische Design ist ein solches Modul für den Einsatz in einem integrierten Wärmetauscher nicht geeignet. Die offenliegenden Schenkel bergen die Gefahr einer Oxidation der Materialien, und ebenso auch einer Sublimation von Bleitellurid zwischen den Schenkeln bzw. von der heißen zur kalten Seite, wodurch sich die Zusammensetzung der Materialien und damit auch die thermoelektrischen Eigenschaften lokal verändern. Beides führt zu einer raschen Degradation des Moduls. Weiterhin ist auch die Einkopplung der Wärmeströme durch die zur elektrischen Isolation verwendeten Keramikplatten mit unerwünschten thermischen Verlusten verbunden.

Einen Generator auf Basis von Skutteruditen hat ein Konsortium der Michigan State University, Northwestern University, Iowa State University, NASA-JPL und Tellurex an einem Diesel-Abgasstrang aufgebaut, und daran eine Leistung von 100 W demonstriert [21]. Die thermoelektrischen Schenkel ragen bei diesem Aufbau direkt in den Abgasstrang, was insbesondere bei den Skutteruditen aufgrund deren Sublimationsneigung höchst problematisch ist [13]. Auch hier kann es durch einen Antimonverlust aus dem Skutterudit durch die Sublimation zu Stöchiometrierverschiebungen und damit zu einer Degradation des Generators kommen, was sich negativ auf die Langzeitstabilität auswirkt.

Auch General Motors arbeitet an Generatorkonzepten zur Abwärmerückgewinnung in Kraftfahrzeugen, und setzt hierzu auf Skutterudite und (germaniumbasierte) Clathrate [22, 23].

Erwartet wird eine Kraftstoffersparnis von 5%, und eine elektrische Leistung des Generators zwischen 350 W und 600 W, je nach Fahrbedingungen, allerdings wurden bisher keine „realen“ Testzyklen publiziert.

Ebenfalls in den USA arbeitet Gentherm an verschiedenen Designstudien zur Optimierung von Wärmeströmen in thermoelektrischen Generatoren [24]. Auch über den Aufbau von Demonstratoren wurde berichtet, die im Modellversuch (Labormaßstab) getestet wurden, allerdings ohne die verwendeten Materialien sowie Details der Untersuchungen und Resultate zu benennen.

Bereits seit mehreren Jahren im Generatorkaufbau aktiv ist BMW, vornehmlich durch Förderprogramme in den USA [25]. BMW hat bereits einen nicht-integrierten Demonstrator auf Basis von Bi_2Te_3 -Modulen mit einer Leistung von bis zu 200 W aufgebaut und der Öffentlichkeit vorgestellt [26]. Gemeinsam mit BSST arbeitet BMW an einem 500 W-Demonstrator, der im Laufe des Jahres fertig gestellt werden soll [25]. Bauliche Details sowie verwendete Materialien sind nicht bekannt.

Nach gegenwärtigem Kenntnisstand des Konsortiums stehen keine fremden Schutzrechte der späteren Verwertung der Ergebnisse des hier vorgeschlagenen Vorhabens entgegen.

Es existiert damit in einem Temperaturbereich von 300 bis 600 °C und besonders in automobilen Anwendungen, die durch häufige Temperaturwechsel gekennzeichnet sind, bis heute kein kommerzialisierbarer Stand der Technik. Dies gilt sowohl für Bleitellurid im besonderen als auch für eine allgemein anwendbare Modultechnologie für thermoelektrische Generatoren, die *ad hoc* die Einbindung neuer Materialien erlauben würde. Dies betrifft beispielsweise die Entwicklung von Kontakt- und Barrierematerialien, die Optimierung der Wärmeströme, die Minimierung thermischer Verluste oder die Anbindung an Wärmequelle und Wärmesenke. Viele Fragen vornehmlich zur Systemintegration können aber trotzdem bereits heute mit dem hocheffizienten Bleitellurid, das von BASF entwickelt wurde, angegangen und später auf neue Materialien übertragen werden. Eine solche Technologie muss material- und anwendungsspezifisch erarbeitet und entwickelt werden, und Hand in Hand an der grundlegenden Materialentwicklung ausgerichtet sein, so wie im vorliegenden Vorhaben
geplant.

3 Zusammenarbeit und Arbeitsplan

Die nachfolgende Tabelle 1 skizziert grob die wesentlichen Ziele und Teilaspekte des Vorhabens:

| | | | | | | | | | | | |
|--|---------------------------|------------------------------|---|--------------|--------------------|----------------------------|---|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| integriertes Generatordesign zur Abwärmerückgewinnung im Automobil | | | | | | | | | | | |
| Bleitellurid | | | → | Generator | | | ← | neue Materialien | | | |
| (Langzeit)Charakterisierung | Bemusterung und Upscaling | Entwicklung Modultechnologie | | Modellierung | Konzeptentwicklung | Aufbau eines Demonstrators | | Identifikation und Bewertung | (Langzeit)Charakterisierung | orientierende Skalierbarkeit | prinzipielle Modultauglichkeit |

Tabelle 1: Übersicht Ziele im Projekt IN-TEG

BASF ist bereits seit mehreren Jahren im Bereich thermoelektrischer Materialien, Module und System aktiv, was in einer Vielzahl von Patenten dokumentiert ist.

Die Daimler AG ist einer der führenden Anbieter von Premium-PKW und der weltweit größte Hersteller von Nutzfahrzeugen. Bei Daimler werden Simulationen von TEG-Systemen durchgeführt, die für den Einsatzfall im KFZ zeigen, dass das Einsparpotenzial je nach Fahrzyklus bei bis zu 5% liegt. Um dieses Einsparpotenzial zu realisieren, ist neben dem Einsatz kostengünstiger thermoelektrischer Materialien mit ausreichendem Wirkungsgrad und hoher Temperaturbeständigkeit die Entwicklung und Fertigung thermoelektrischer Module und Generatoren auf Basis dieser Werkstoffe erforderlich. Nicht zuletzt kann durch einen Heißgasprüfstand bei Daimler der Wirkungsgrad und die Zuverlässigkeit von thermoelektrischen Modulen und Generatoren unter fahrzeugrelevanten Bedingungen bewertet werden.

Boysen ist ein führender Hersteller von Abgasnachbehandlungssystemen für Fahrzeugantriebe mit Verbrennungsmotoren und verfügt über umfangreiches geschütztes, vertrauliches technisches und wirtschaftliches Know-how und Informationen bezogen auf der Entwicklung und Fertigung von akustisch und werkstofftechnisch sowie anwendungsspezifisch optimierten Abgassystemen.

Das DLR ist das nationale Zentrum für Luft- und Raumfahrt und betreibt umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsprojekte in nationaler und internationaler Kooperation. Das Institut für Werkstoff-Forschung entwickelt Werkstoffe und Werkstofftechnologien für die Luft- und Raumfahrt, die Energie- und Fahrzeugtechnik sowie materialwissenschaftliche Methoden. Die Abteilung „Thermoelektrische Materialien und Systeme“ im DLR arbeitet an der Entwicklung fortschrittlicher thermoelektrischer Materialien, Design und Simulation von TE Systemen, Kontaktierungs- und Verbindungstechniken, Entwicklung von Peltier-Anwendungen sowie von Thermogeneratoren (TEG) und Sensoren für den Hochtemperatur-Einsatz. Aktuelles Ziel ist es, thermoelektrische Generatoren zum effektiven Einsatz in mobilen und Energieanwendungen zu führen.

Am Forschungsbereich Chemische Metallkunde (Prof. Grin) des Max-Planck-Instituts für Chemische Physik fester Stoffe in Dresden wird an der Präparation von neuen thermoelektrisch aktiven Materialien auf Basis intermetallischer Verbindungen gearbeitet. Ziel ist die Entwicklung von neuen Materialien, deren thermoelektrische Eigenschaften zur Anwendung ausreichende ZT -Werte zeigen.

Am Eduard-Zintl-Institut für Anorganische und Physikalische Chemie der TU Darmstadt kann auf eine langjährige Erfahrung mit Zintl-Chemie zurückgegriffen werden. In den letzten Jahrzehnten wurden zahlreiche Zintl-Verbindungen und -phasen synthetisiert und kristallchemisch charakterisiert (> 30 Publikationen, Prof. Eisenmann, Dr. Cordier).

Die Arbeitsgruppe von Prof. Janek an der Justus-Liebig-Universität Gießen ist im Bereich der Physikalischen Festkörperchemie angesiedelt und hat Forschungsschwerpunkte in der Festkörperelektrochemie, der Reaktivität von anorganischen Festkörpern, der Defektchemie, der Plasmachemie und der *in situ*-Festkörperanalytik. Im Zentrum stehen häufig kinetische Phänomene, die zur Degradation von Festkörpern oder deren Grenzflächen führen und die von äußeren Kräften getrieben werden (Elektromigration, Thermodiffusion, Prozesse in chemischen Potentialgradienten, Dünnschichtreaktionen, Elektrodenalterung).

Der Arbeitsplan wurde in insgesamt dreizehn Arbeitspakete unterteilt, die vier Teilbereichen zugeordnet sind. Hinzu kommt ein übergeordnetes Arbeitspaket (Arbeitspaket 0), in dem die Projektorganisation sowie die kontinuierliche Technologie- und Marktbeobachtung und -bewertung abgebildet sind. Nachfolgende Tabelle 2 zeigt die einzelnen Arbeitspakete und die Verantwortlichkeiten:

| Arbeitspaket | Titel | verantwortlich |
|---|---|---------------------------------|
| Organisation, Projektsteuerung, Wirtschaftlichkeit | | |
| 0 | Projektkoordination | DLR |
| 0 | Technologie- und Marktbewertung | BASF |
| Teilbereich 1: Materialentwicklung | | |
| 1.1 | Erarbeitung eines Evaluierungsschemas | BASF, MPI, TUDa |
| 1.2 | Silicide und siliciumbasierte Clathrate | MPI, BASF |
| 1.3 | Zintl-Phasen | TUDa, MPI, BASF |
| 1.4 | Upscaling | BASF, MPI, TUDa, DLR |
| Teilbereich 2: Erweiterte Materialcharakterisierung | | |
| 2.1 | Thermoelektrische Charakterisierung | DLR, BASF, MPI |
| 2.2 | Thermodiffusion und Soret-Effekt in Thermoelektrika | JLU |
| 2.3 | Grenzflächenreaktionen am Elektrodenkontakt | JLU |
| Teilbereich 3: Modulbau | | |
| 3.1 | Modulentwicklung und -aufbau | BASF, Modulproduzent, DLR |
| 3.2 | Modulcharakterisierung | DLR, BASF |
| 3.3 | Modulmodellierung | DLR |
| Teilbereich 4: Generatöraufbau und Systemintegration | | |
| 4.1 | Generator design und -modellierung | Daimler, Boysen |
| 4.2 | Generatöraufbau | Daimler, Boysen |
| 4.3 | Systemintegration, Erprobung im Prototyp und Simulationen | Daimler, Boysen |

Tabelle 2: Arbeitspakete im Projekt IN-TEG

Nachfolgende

Tabelle 3 zeigt eine detaillierte Darstellung mit dem zeitlichen Verlauf der einzelnen Arbeitspakete der Daimler AG:

| Arbeit spaket | Thema / Meilenstein | 2011 | | 2012 | | | | 2013 | | | | 2014 | |
|------------------|--|------|-------|------|----|----|----|-------|----|----|----|-------|-------|
| | | Q3 | Q4 | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 | Q1 | Q2 |
| AP 4.1 | Erstellung Lastenheft | | | | | | | | | | | | |
| | Simulation des thermoelektrischen Generators und Bewertung des Potenzials im Kraftfahrzeug | | M 4.1 | | | | | | | | | | |
| | Begleitende Modellierung und Unterstützung der Generatorauslegung für die AP 4.2 und 4.3. | | | | | | | | | | | | |
| | Modellierung mit Daten zu neuen Materialien | | | | | | | | | | | | M 4.6 |
| AP 4.2 | Anpassung Modulprüfstand und Vermessung der Bleitelluridmodule | | | | | | | | | | | | |
| | Anpassung Heißgasprüfstand und erste Erprobung des Gesamtsystems | | | | | | | M 4.2 | | | | | |
| | Aufbau des Generators, Bordnetzanbindung und Test am Gesamtsystem | | | | | | | | | | | M 4.3 | |
| AP 4.3 | Konstruktion und Packaging-Untersuchungen | | | | | | | | | | | | |
| | Fahrzeugaufbau und Meßtechnik | | | | | | | | | | | | |
| | Rollprüfstandtests, Fahrttests und Auswertung | | | | | | | | | | | | M 4.4 |
| | Auslegung und Aufbau des integrierten Generatorkonzeptes sowie Test am Heißgasprüfstand | | | | | | | | | | | | M 4.5 |

Tabelle 3: Arbeitsplan der Daimler AG im Projekt IN-TEG

4 Ergebnisse

4.1 Arbeitspaket 4.1

4.1.1 Erstellung Lastenheft

Das Lastenheft für die Integration des thermoelektrischen Generators wurde unter Absprache der Projektpartner erstellt. Hierbei wurde unterteilt in Anforderungen an das Gesamtsystem, Anforderungen an den thermoelektrischen Generator und Anforderungen an die thermoelektrischen Module. Größen wie gewünschte elektrische Zielleistungen, Geometrievorgaben, sowie Zielwerte für die Haltbarkeit und Lebensdauer für die Komponenten wurden definiert. Grundlage hierfür waren typische Bedingungen wie sie im Fahrzeug auftreten. Eine Übersichtsdarstellung zum Integrationskonzept des TEG in das Fahrzeug ist in Abbildung 4.1 zu sehen.

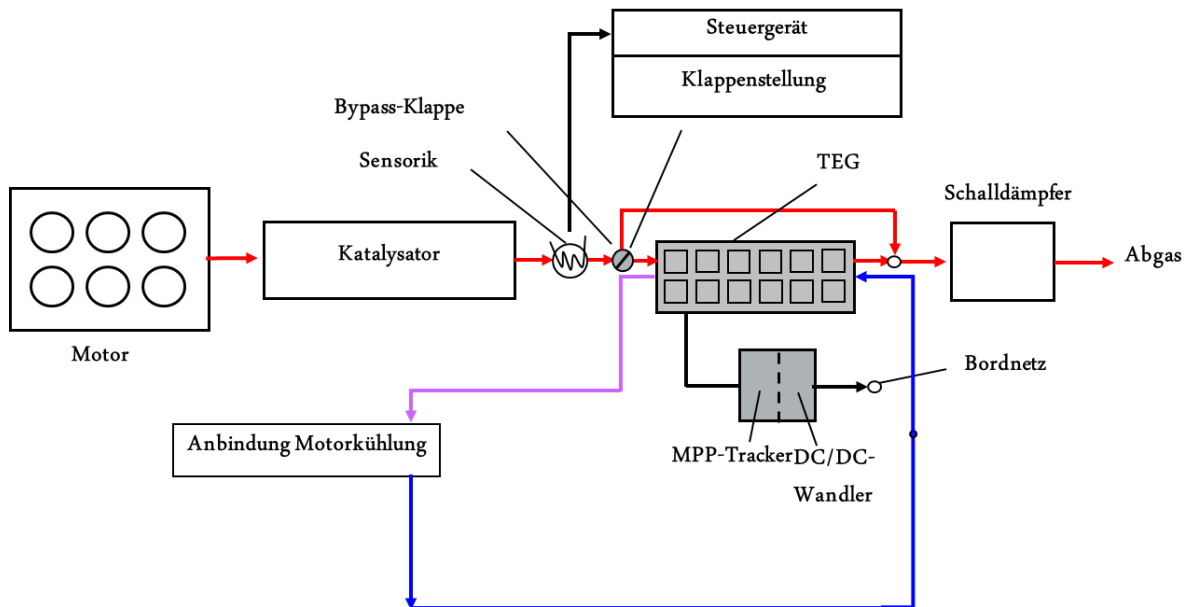


Abbildung 4.1: Systemkonzept Integration TEG

4.1.2 Begleitende Modellierung und Unterstützung der Generatorauslegung

Der Nutzen von elektrisch eingespeister Energie wurde mithilfe eines Motor- und Generatorkennfeldes für verschiedene Fahrsituationen bestimmt und bewertet. Hierbei stellte sich heraus, dass die Einspeisung einer konstanten elektrischen Leistung für unterschiedliche Fahrgeschwindigkeiten und damit unterschiedlichen Motorbetriebspunkten nahezu die gleiche Kraftstoffersparnis bezogen auf die Fahrzeit ermöglicht. Ein konstanter Wert an eingespeister elektrischer Energie hat also zu jedem betrachteten Fahrpunkt nahezu die gleiche Wertigkeit. Die Ergebnisse zum Nutzen der elektrisch eingespeisten konstanten Leistung bei einer unterschiedlichen konstanten Fahrgeschwindigkeiten haben gezeigt, dass

ein TEG nicht punktuell für einen hohen oder tiefen Lastpunkt ausgelegt werden sollte, sondern am besten so ausgelegt wird, dass über die Dauer der Fahrt die maximale elektrische Energiemenge erzeugt wird.

Um eine erste Grobabschätzung der Leistungsfähigkeit eines thermoelektrischen Generators wurde die elektrische Leistung im Fahrzyklus auf Basis der thermoelektrischen Materialdaten simuliert.

Abbildung 4.2 zeigt eine simulierte TEG Leistung im Mercedes Benz Kundenzyklus (MBVT) auf Basis reinen thermoelektrischen Materialdaten von Bleitellurid. Die Simulation weist ein Potenzial von 400 Watt Durchschnittsleistung im Kundenzyklus auf.

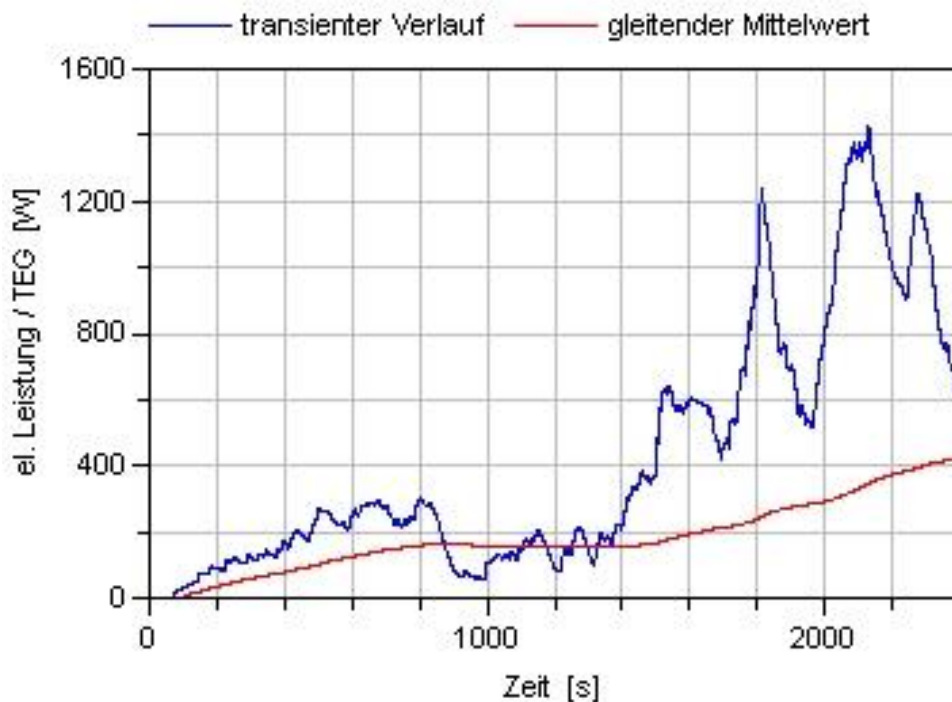


Abbildung 4.2: Simulationsergebnisse: elektrische Leistung

Die Aussage zum Potenzial der Wärmerecuperation durch Bleitellurid muss zunächst als erste Abschätzung gesehen werden, da die tatsächliche Leistung erst im Rahmen des Projektes nachgewiesen werden soll. Die erste simulative Potenzialbewertung zeigt, dass die Nutzung der Abgasenergie durch thermoelektrische Materialien eine interessante Möglichkeit zur Verbrauchsreduktion in Fahrzeugen ist. Allerdings werden noch Leistungseinbußen durch den Modul- und Generatorkaufbau erwartet.

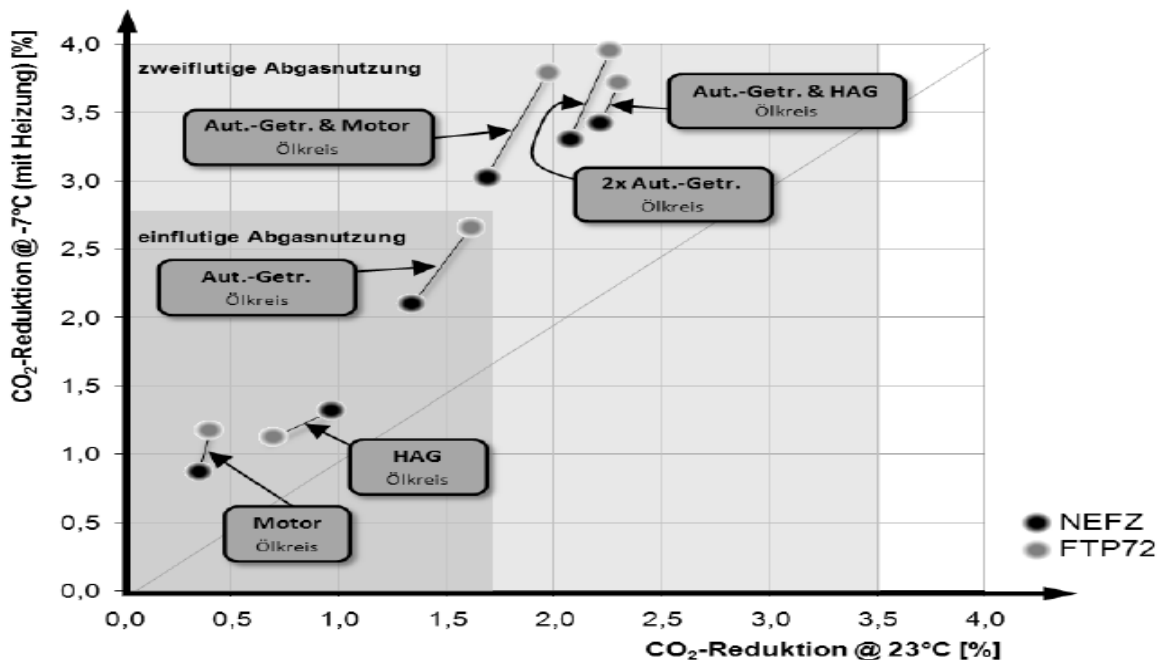
Die Modulvermessung des Moduls aus Blei- und Bismuttellurid kann als Grundlage und für die Verfeinerung der Simulation dienen. Die gemessenen Werte für den Leistungsoutput und Wirkungsgrad sind jedoch deutlich niedriger als eine Abschätzungen aus den Materialdaten ergeben hat. Die Zielleistung des thermoelektrischen Generators wird auf Basis dieser Daten nicht erreicht.

Mit den gemessenen Kennwerten ist die Wirtschaftlichkeit von thermoelektrischen Generatoren in Fahrzeugen (€/W) kritisch zu sehen. Zur Verbesserung des Kosten/Nutzen-Verhältnisses wurden deshalb Recherchen zur Nutzung von positiven Sekundäreffekten durchgeführt, wie z.B. die Verbesserung des Thermomanagements durch Einbeziehung der Wärme, welcher der TEG in das ,Kühlsystem einträgt.

Recherchen zu weiteren Abwärmenutzungsmöglichkeiten wie z.B. zur Warmlaufverkürzung durch Reibungsreduktion haben eine CO₂-Einsparung von bis zu 3 % im neuen europäischen Fahrzyklus ergeben [44] [45]. Die Verbrauchseinsparungen durch Warmlaufverkürzung reduzieren sich jedoch bei langen Fahrten, da diese Maßnahmen nur nach einem Kaltstart bis zum Erreichen der Betriebstemperatur einen Verbrauchsvorteil erzielen können.

Abschätzungen zur Nutzung von Abgaswärme zum Betreiben eines Rankine-Prozesses weisen ein höheres elektrisches Potential auf. Die Integration eines Rankine-Prozesses in ein Fahrzeug wird jedoch als problematisch angesehen, da das Abgaswärmeangebot stark transiente Zustände aufweist. Des Weiteren würden für einen solchen Kreisprozess zusätzliche Komponenten benötigt, die der Belastungen in einem Fahrzeug standhalten müssen.

Die Abbildung 4.3 zeigt ein zusätzliches Kraftstoffverbrauchseinsparpotenzial bei Erwärmung von weiteren Medien im Fahrzeug. Der thermoelektrische Generator sollte also so in den Fahrzeugkühlkreislauf eingebunden werden, dass eine Anwärmung weiterer Betriebsmedien möglich ist.



Quelle: Hepke, G. „Direkte Nutzung von Abgasenthalpie zur Effizienzsteigerung von Kraftfahrzeugen“ Technische Universität München 2010 [45].

Abbildung 4.3: CO₂-Reduktion mittels Medienerwärmung im Motor oder Getriebe

Bewertung des Zusatznutzens des TEGs

Für die Bewertung des Nutzens der durch den TEG in das Fahrzeug eingebrachten Wärme wurden verschiedene Betriebsmedien betrachtet. Als das Medium mit dem größten Verbrauchsbefit hat sich das Getriebeöl für ein Automatikgetriebe herausgestellt. Durch das schnellere Erreichen der Betriebstemperatur des Getriebeöls aufgrund des Einbringens von Abgaswärme reduziert sich die Viskosität des Öls. Dadurch verringern sich die Reibungsverluste des Getriebes. Für die Bewertung der Reibungsreduktion in einem Fahrzyklus wurde ein Simulationsmodell für ein Automatikgetriebe erstellt, welches aus dem temperaturabhängigen Reibungsverlustkennfeld des Getriebes sowie einem thermischen Modell des Getriebes besteht. Anhand dieses Modells lässt abhängig von der vom TEG eingebrachten Wärme der Kraftstoffverbrauchsvorteil durch die Warmlaufverkürzung bestimmen

Aus den Simulationsrechnungen für das Getriebe im Verbund mit dem Fahrzeug geht hervor, dass sich aufgrund der beschleunigten Ölerwärmung die Drehmomentenanforderung an den Motor reduziert. Daraus resultiert wiederum eine verringerte Einspritzmenge. Der Verbrauchsvorteil ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

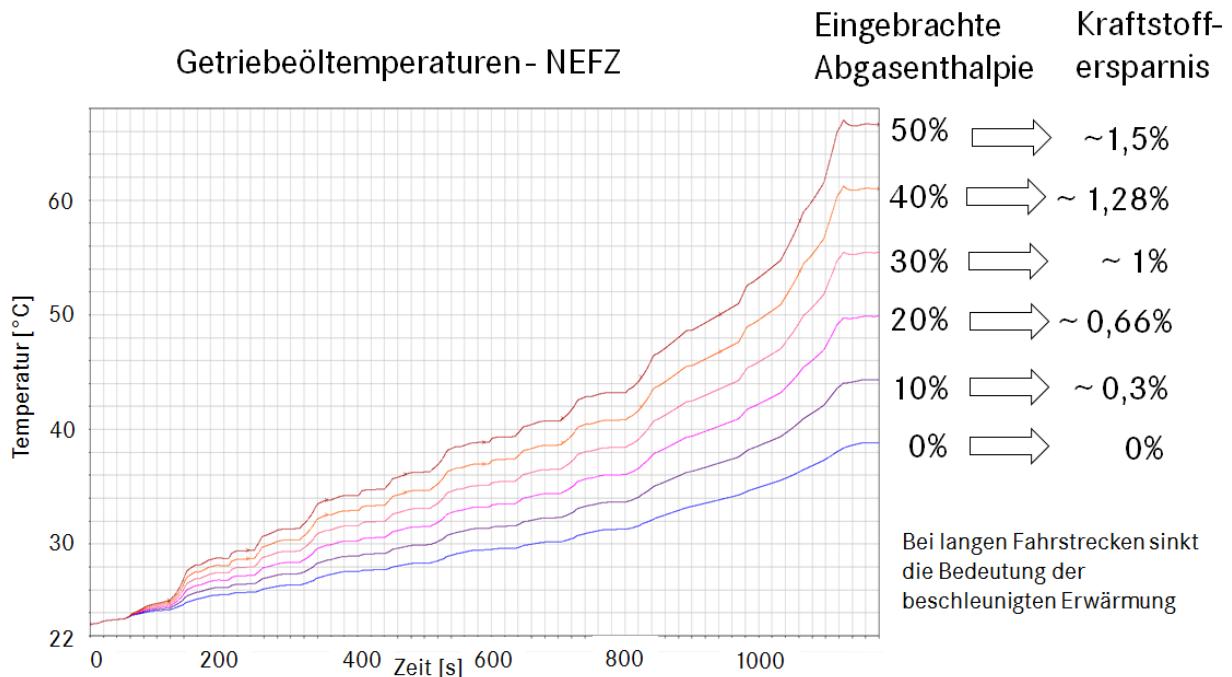


Abbildung 4.4: Getriebeöltemperaturverläufe in Abhängigkeit der eingebrachten Abgasenthalpie

Welcher Anteil der im Abgas enthaltenen Enthalpie tatsächlich durch einen TEG in das Getriebeöl übertragen werden kann, müssen Versuche am Heißgasprüfstand zeigen. Es wird von einer Größenordnung von ca. 10 % ausgegangen.

Die Nutzung der Abwärme eines thermoelektrischen Generators zur beschleunigten Getriebeölanwärmung während der Startphase kann die Kraftstoffeinsparung und damit die Kostensituation des Systems verbessern. Die Auslegung des TEGs muss jedoch zusätzlichen Randbedingungen genügen, wenn neben der maximalen elektrischen Leistung nun der Wärmestrom in der Startphase maximiert werden soll. Die Freiheitsgrade in der Auslegung des TEG reduzieren sich dadurch weiter – möglicherweise soweit, dass eine gleichzeitige Erfüllung der Ziele nicht möglich ist. In diesem Fall müssen die Bestrebungen maximale elektrische Leistung im Betrieb und maximaler Wärmeübertrag in der Startphase gegeneinander abgewogen werden.

Bewertung für die elektrische Anbindung der thermoelektrischen Module an das Fahrzeugbordnetz

Ein weiterer Aspekt im Arbeitspaket 4.1 war die simulative Bewertung der elektrischen Anbindung und Verschaltung der thermoelektrischen Module sowie die Bordnetzanbindung als Vorarbeiten für die spätere praktische Umsetzung im Prototyp.

Für die elektrische Verschaltung der einzelnen Module im thermoelektrischen Generator wurde ein Simulationsmodell erstellt, welches die Kenngrößen temperaturabhängige Leerlaufspannung und temperaturabhängigen Innenwiderstand beinhaltet. Mithilfe dieses Modells wurden unterschiedliche Verschaltungen für die thermoelektrischen Module simuliert, mit dem Ziel, die elektrische Verschaltung bezüglich ihrer Effizienz zu optimieren.

Abbildung 4.5 zeigt die Auswirkungen einer elektrischen Reihen- und Parallelschaltung der einzelnen Module innerhalb des TEGs. Eine elektrische Reihenschaltung bewirkt eine gleichbleibende Stromstärke über alle Module, sodass die Module zu Beginn und am Ende des TEGs deutlich abseits ihres individuellen MPPs betrieben werden. Ein vergleichbares Bild ergibt die Betrachtung der Parallelschaltung. Hierbei liegt an jedem Modul des TEGs die gleiche Spannung an, sodass es auch hier zu Leistungseinbußen gegenüber einer individuellen Leistungsanpassung für jedes einzelne Modul kommt.

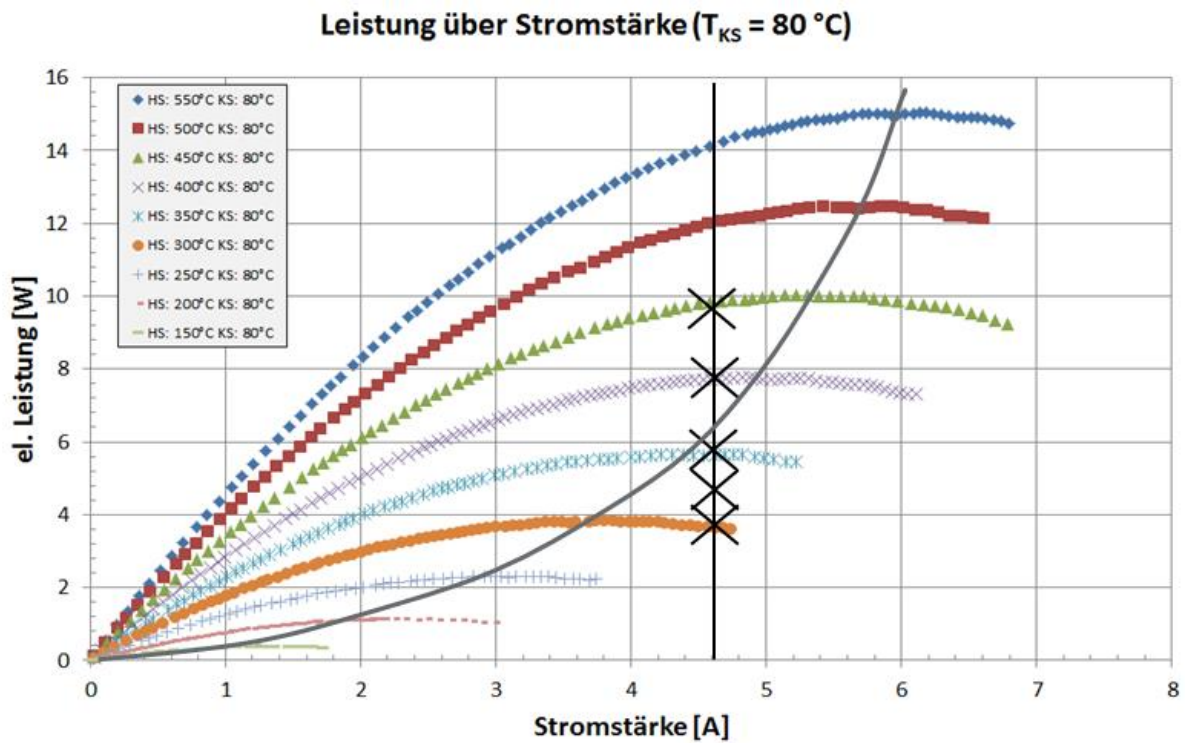


Abbildung 4.5: Auslegung Reihenschaltung

| Modulposition | Spannung | Stromstärke [A] | Leistung im Mpp [W] | Leistung Reihenschaltung [W] |
|---------------|----------|-----------------|---------------------|------------------------------|
| 1 | 2,13 | 4,59 | 10 | 9,77 |
| 2 | 1,69 | 4,59 | 7,85 | 7,72 |
| 3 | 1,31 | 4,59 | 6,05 | 6,01 |
| 4 | 0,99 | 4,59 | 4,81 | 4,54 |
| 5 | 0,8 | 4,59 | 3,9 | 3,70 |
| | | | 32,61 | 31,74 |

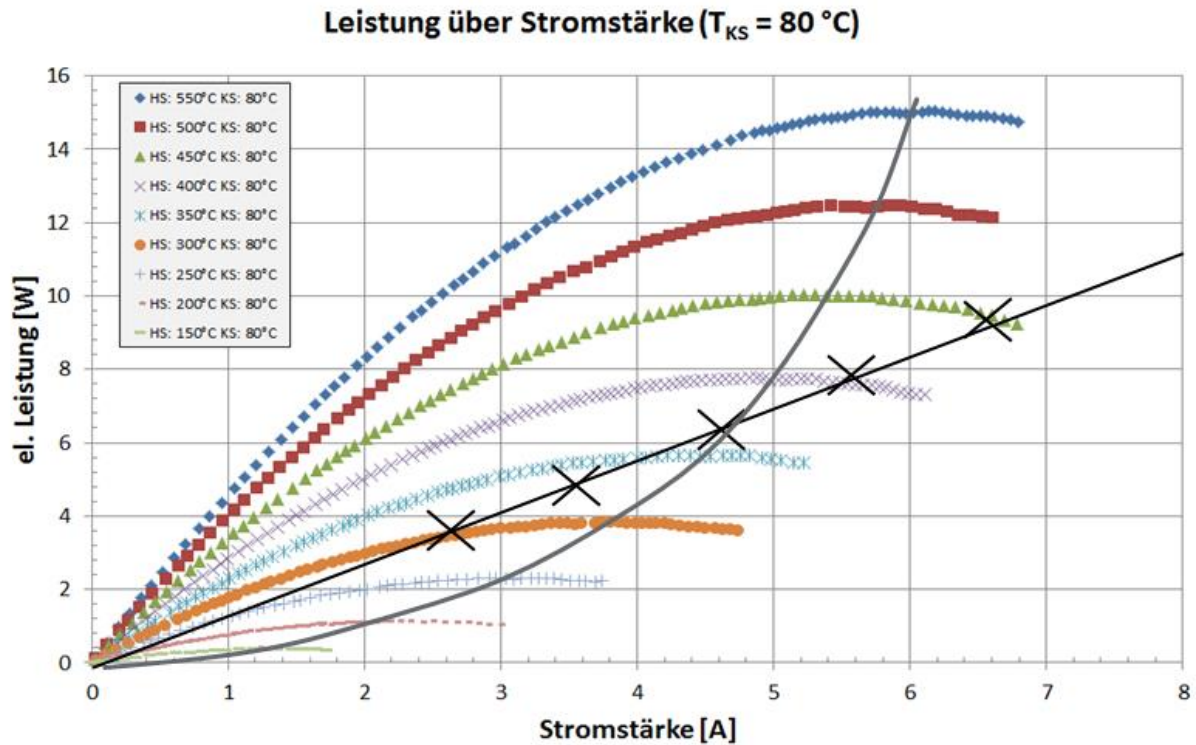


Abbildung 4.6 Auslegung Parallelschaltung

| Modulposition | Spannung | Stromstärke [A] | Leistung Mpp [W] | im | Leistung Parallel-schaltung [W] |
|---------------|----------|-----------------|------------------|----|---------------------------------|
| 1 | 1,36 | 6,38 | 10 | | 9,25 |
| 2 | 1,36 | 5,74 | 7,85 | | 7,54 |
| 3 | 1,36 | 4,58 | 6,05 | | 6,05 |
| 4 | 1,36 | 3,58 | 4,8 | | 4,49 |
| 5 | 1,36 | 2,65 | 3,9 | | 3,43 |
| | | | 32,61 | | 30,76 |

Die Ergebnisse zur Verschaltung der einzelnen Module lässt eine Leistungseinbuße bei den Modulen erkennen.

Für die elektrische Verschaltung der Module in einen konstanten Betriebspunkt (wobei die Oberflächentemperaturen mangels TEG nur geschätzt wurden – die Ergebnisse können verifiziert werden, sobald der TEG-Prototyp vorliegt) hat sich ergeben, dass eine elektrische Reihenschaltung der Bleitelluridmodule zu einer Leistungseinbuße von 2,7% im Maximalleistungspunkt führt gegenüber einem Leistungsabgriff an jedem einzelnen Modul. Bei einer Parallelschaltung belaufen sich die Verluste bei den angenommenen Oberflächentemperaturen auf 5,7%. Aus Effizienz-sicht ist also eine elektrische Reihenschaltung der Module zu bevorzugen. Eine Untersuchung einer Kombination aus

Reihen und Parallelverschaltungen ergibt erst Sinn, wenn die Moduloberflächentemperaturen des TEG gemessen wurden.

4.2 Ergebnisse aus Arbeitspaket 4.2

4.2.1 Anpassung Modulprüfstand und Vermessung der thermoelektrischen Module

Der Prüfstand wurde so weiter entwickelt, dass nun auch Hochtemperaturmodule vermessen werden können. Zur genauen Bestimmung des Wärmestroms durch das Modul wurden Kupfer, Stahl und Aluminiumblöcke gefertigt und in den Modulprüfstand integriert. Die Anlagensteuerung sowie die Datenaufzeichnung wurden angepasst. Weiterhin wurde eine Einhausung konzipiert, welche die Vermessung thermoelektrischer Module unter Inertgas Bedingungen zulässt.

Abbildung 4.7 zeigt den Einzelmodulprüfstand, die Prüfstandssteuerung und die Messdatenerfassung.



Abbildung 4.7: Einzelmodulteststand

Im Laufe des Projektes wurden mehrere thermoelektrische Module vermessen und charakterisiert. Zunächst wurde ein vom Projektpartner bereitgestelltes Modul aus Blei- und Bismuttellurid am Modulprüfstand vermessen. Der Messaufbau wurde für die Zeit der Messung mit Argon gespült um eine Degradierung des Moduls aufgrund von Luftsauerstoff zu verhindern.

Der schematische Versuchsaufbau ist in Abbildung 4.8 zu sehen. Zur Messung des Wärmestroms durch das Modul wurden Metallblöcke eingesetzt, welche mit Thermoelementen versehen sind, um aus der gemessenen Temperaturdifferenz den Wärmestrom durch das Modul zu bestimmen.

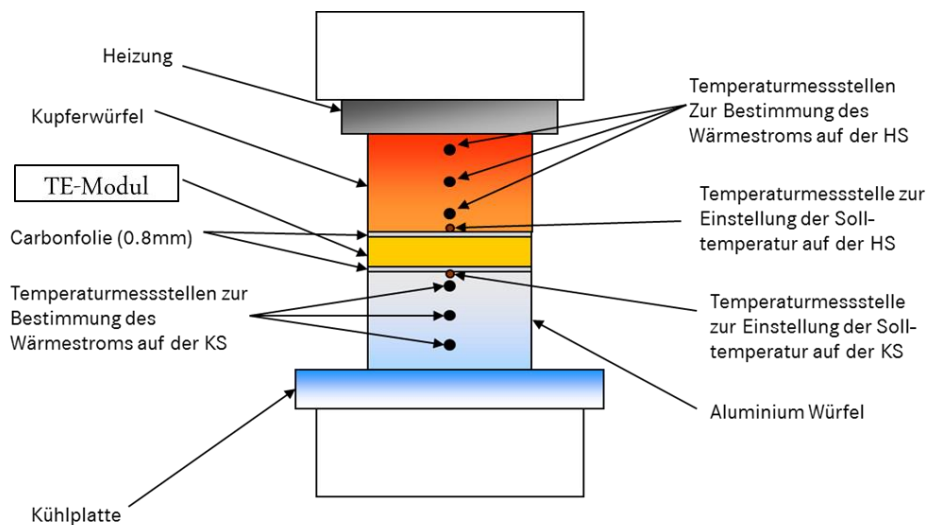


Abbildung 4.8: Schematischer Aufbau TE-Modulvermessung

Für die Charakterisierung des Moduls wurden die Oberflächentemperaturen am Modul durch die elektrische Heizung und die Kühlplatte eingestellt und nachgeregelt. Die elektrische Leistung bei optimaler elektrischer Lastanpassung wurde für verschiedene Heiß- und Kaltseitentemperaturen gemessen. Zusätzlich wurde der Wirkungsgrad über die Messung des Wärmestroms und der elektrischen Leistung bestimmt. Diese Kennfelder sollen als Leistungsnachweis für die Module, sowie als Grundlage für spätere Simulationen dienen.

Abbildung 4.9 zeigt die elektrische Leistung des Moduls für eine Kaltseitentemperatur von 80°C und verschiedenen Heißseitentemperaturen in Abhängigkeit der Stromstärke. Hierbei wird die Stromstärke über die Variation des Lastwiderstands angepasst, bis die maximale Leistung des Moduls (MPP) im jeweiligen Betriebspunkt erreicht wird.

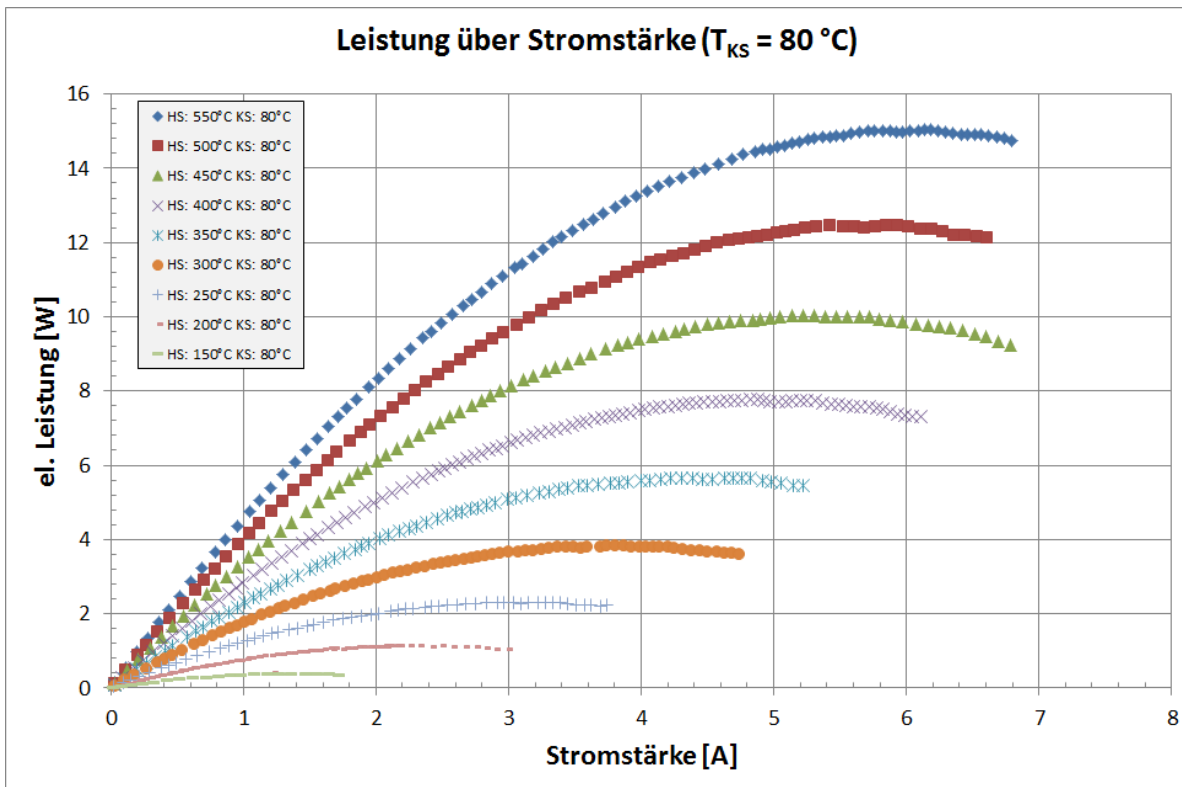


Abbildung 4.9: Elektrische Lastwiderstandsanpassung bei Modulvermessung

In Abbildung 4.10 ist das gesamte vermessene Leistungskennfeld des Moduls zu sehen. Hierfür wurden in 45 Messdurchläufen fünf verschiedene Kaltseitentemperaturen und 9 Heiseitentemperaturen am Prüfstand eingestellt und der jeweilige MPP ermittelt. Wie zu erwarten steigt die Leistung für niedrige Kaltseitentemperaturen und höhere Heiseitentemperaturen an.

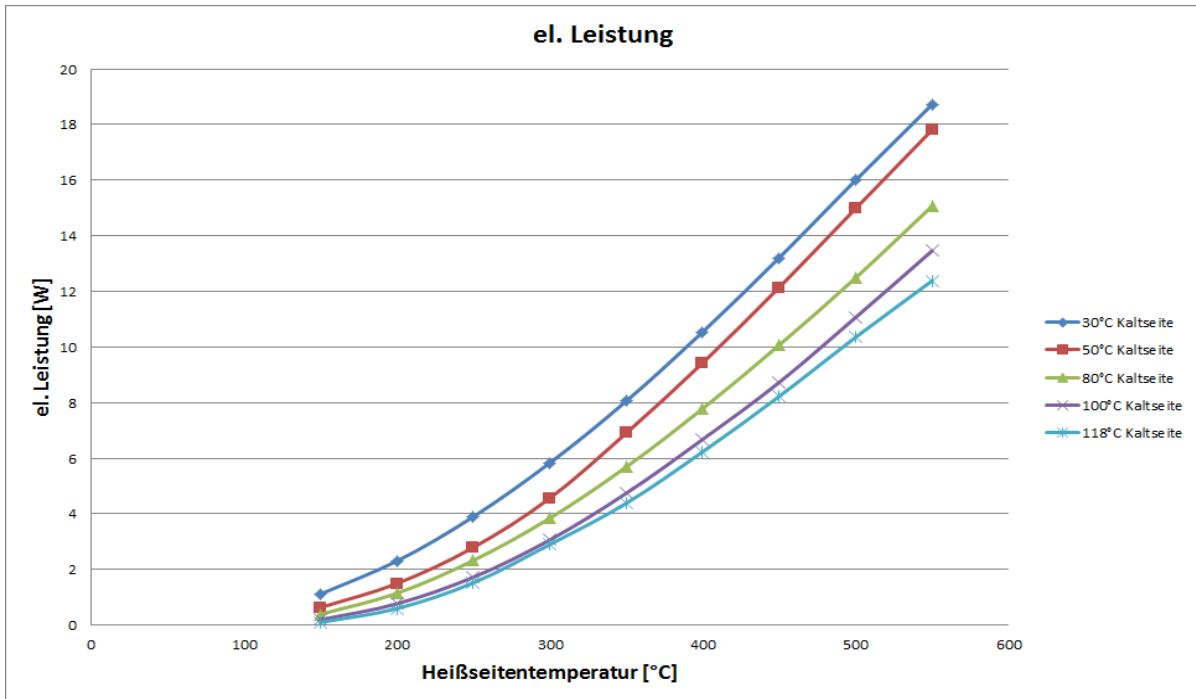


Abbildung 4.10: Leistungsausbeute im MPPT für verschiedene Temperaturen

Abbildung 4.11 zeigt für die vermessenen Randbedingungen den entsprechenden Wirkungsgrad des Moduls. Aufgrund von Messfehlern bei der Temperaturbestimmung in den Metallblcken sind hier leichte Schwankungen in den Kurvenverläufen zu sehen.

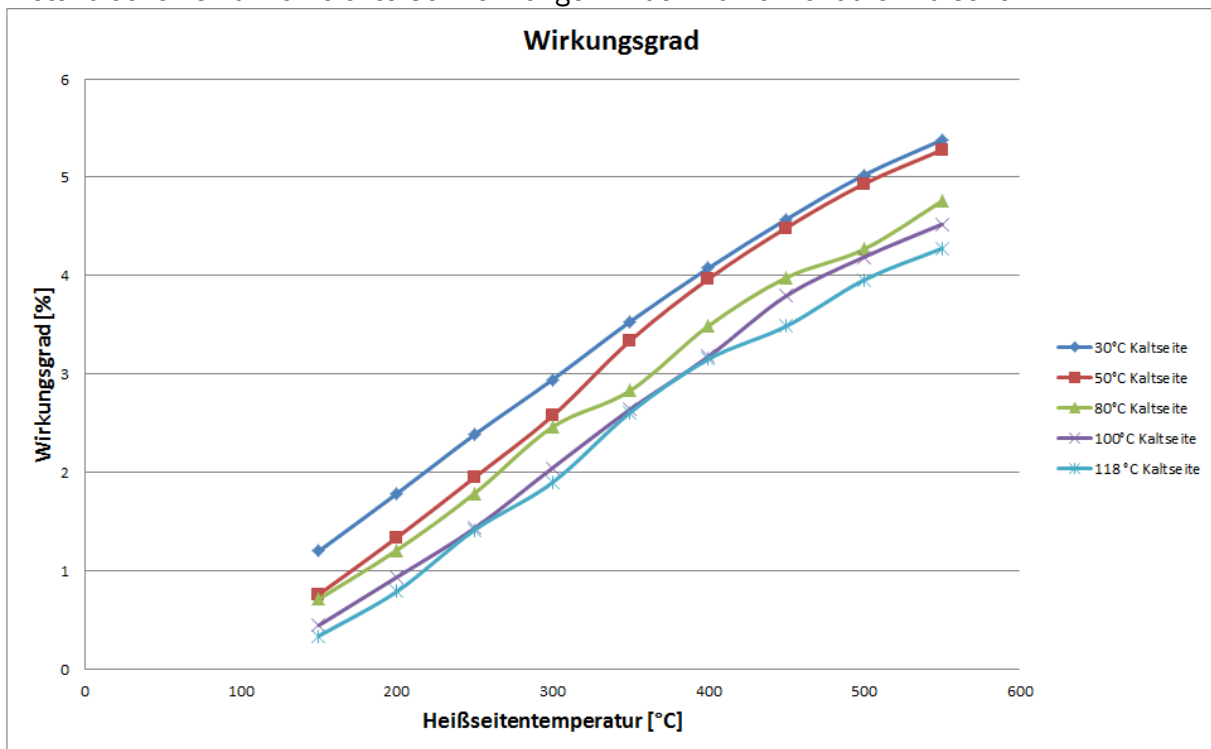


Abbildung 4.11: Wirkungsgrad für verschiedene Heiß- und Kaltseitentemperaturen

Die Leistungsdaten des ersten vermessenen Moduls konnten durch die Messung eines weiteren Moduls im Wesentlichen bestätigt werden. Die Abweichungen der elektrischen Leistung lagen bei 1,3% bis 6,4%.

Neben den segmentierten Bleitelluridmodulen wurden ebenfalls vom Projektpartner bereitgestellte Bismuttelluridmodule am Prüfstand vermessen. Aufgrund der Materialdegradation bei höheren Temperaturen wurde hierbei allerdings nur bis zu einer maximalen Heißseite-temperatur von 250°C gemessen. Die vermessenen Leistungs- und Wirkungsgradkennfelder des Bismuttelluridmoduls sind in Abbildung 4.12 und Abbildung 4.13 zu sehen.

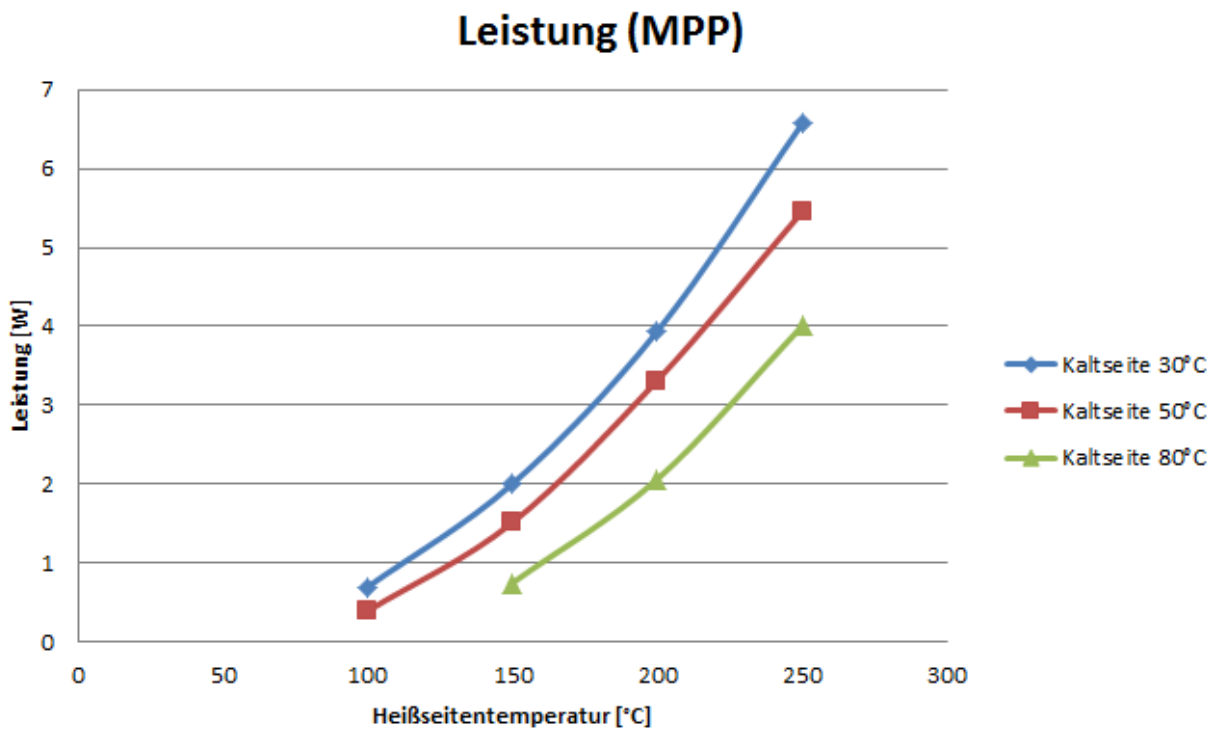


Abbildung 4.12: Leistungskennfeld BiTe-Modul

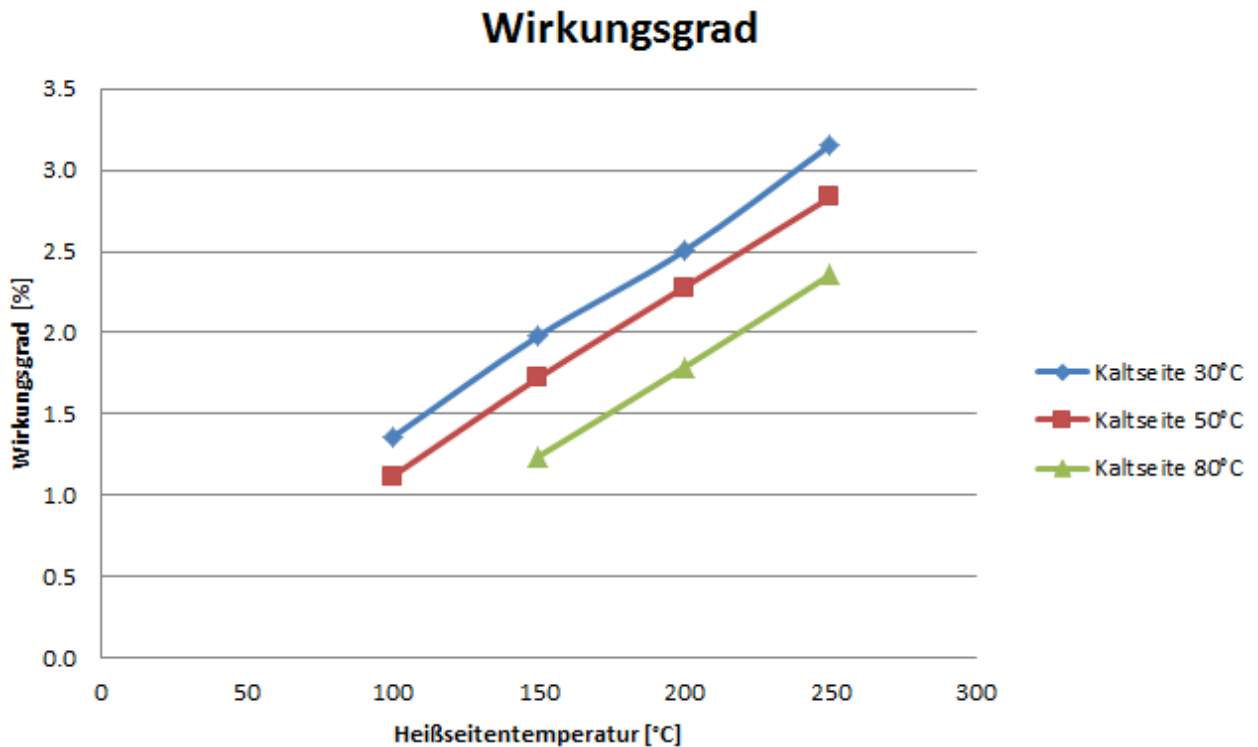


Abbildung 4.13: Wirkungsgradkennfeld BiTe-Modul

Vermessung der Round-Robin Module aus dem BMBF-Projekt „TEST“:

Neben den Messungen der Module des Projektpartners wurden weiterhin Messungen am Modulprüfstand mit Modulen aus dem Projekt „TEST“ zur Vergleichbarkeit unterschiedlicher Messeinrichtungen durchgeführt. Hierfür wurden die Betriebspunkte für die Messung jeweils doppelt angefahren, um einen Messfehler auszuschließen.

Abbildung 4.14 zeigt den Prüfstands Aufbau und Betrieb.

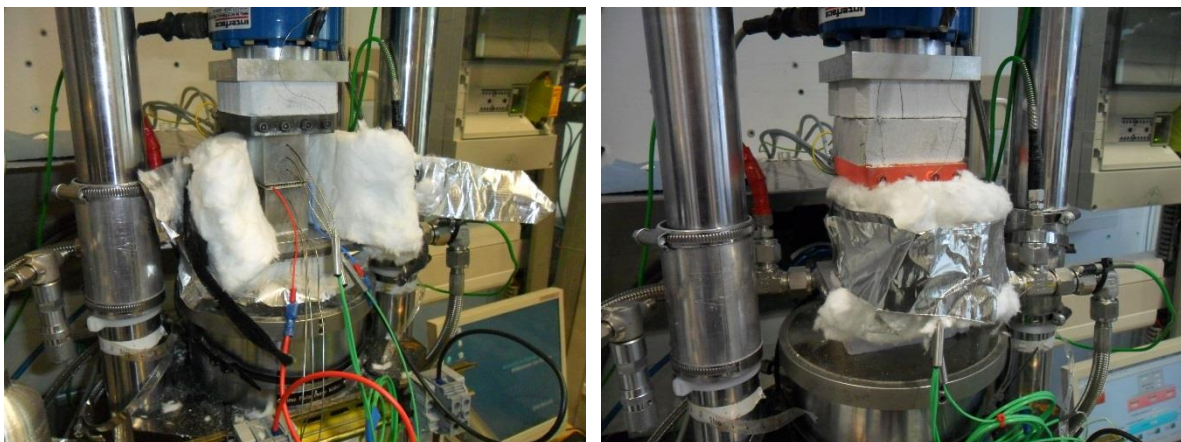


Abbildung 4.14: Prüfstands Aufbau zur Vermessung der Round-Robin Module

Die Leistungsmessergebnisse des Niedertemperaturmoduls sind in Abbildung 4.15 dargestellt. Wie klar zu erkennen ist, kommt es hierbei nur zu geringen Leistungsabweichungen im Rahmen der Wiederholungsmessungen.

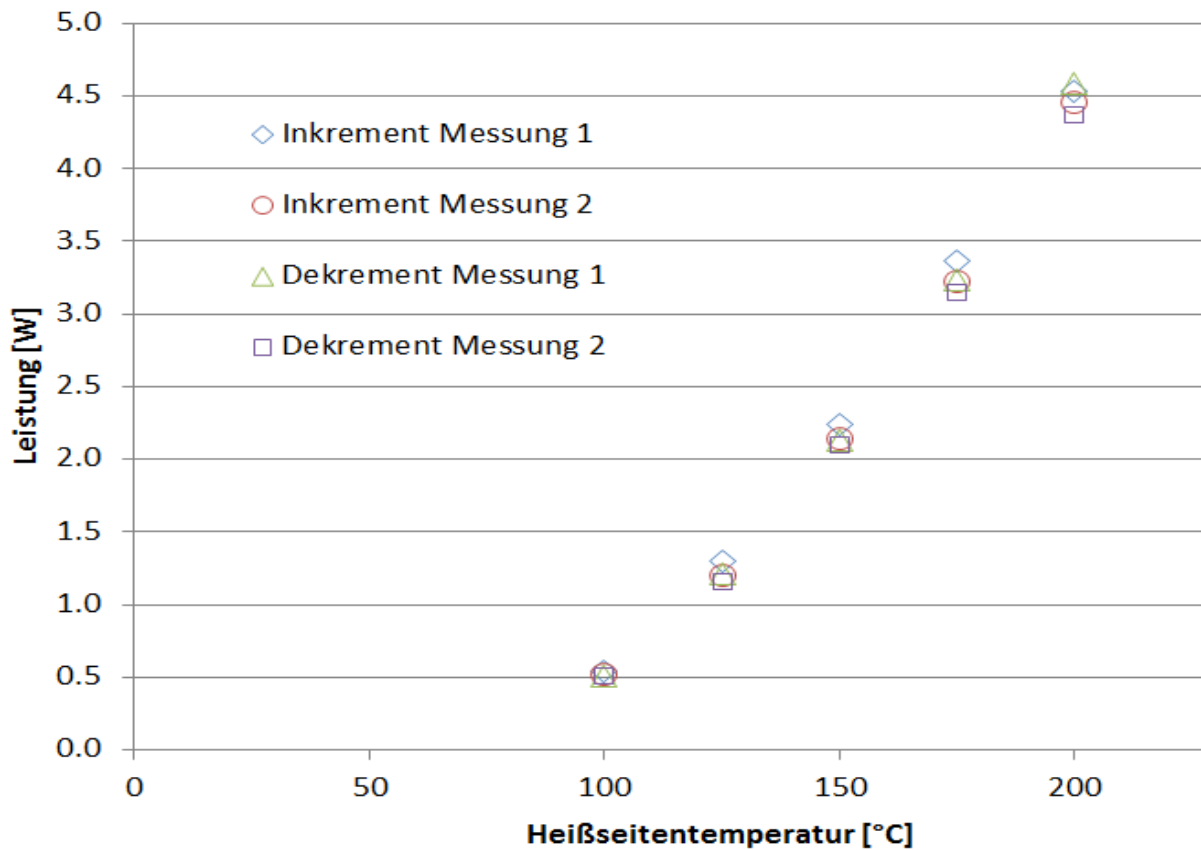


Abbildung 4.15: Leistungsmessung der Round-Robin Module

Eine weitere Messung im Rahmen des BMBF-Projektes „TESt“ war die Wärmestrombestimmung durch einen Metallblock bei vorgegebener Temperaturdifferenz. Die Ergebnisse der Wärmestrommessung ist in Abbildung 4.16 zu sehen. Auch hier herrscht eine gute Übereinstimmung der Messergebnisse aus den verschiedenen Messreihen.

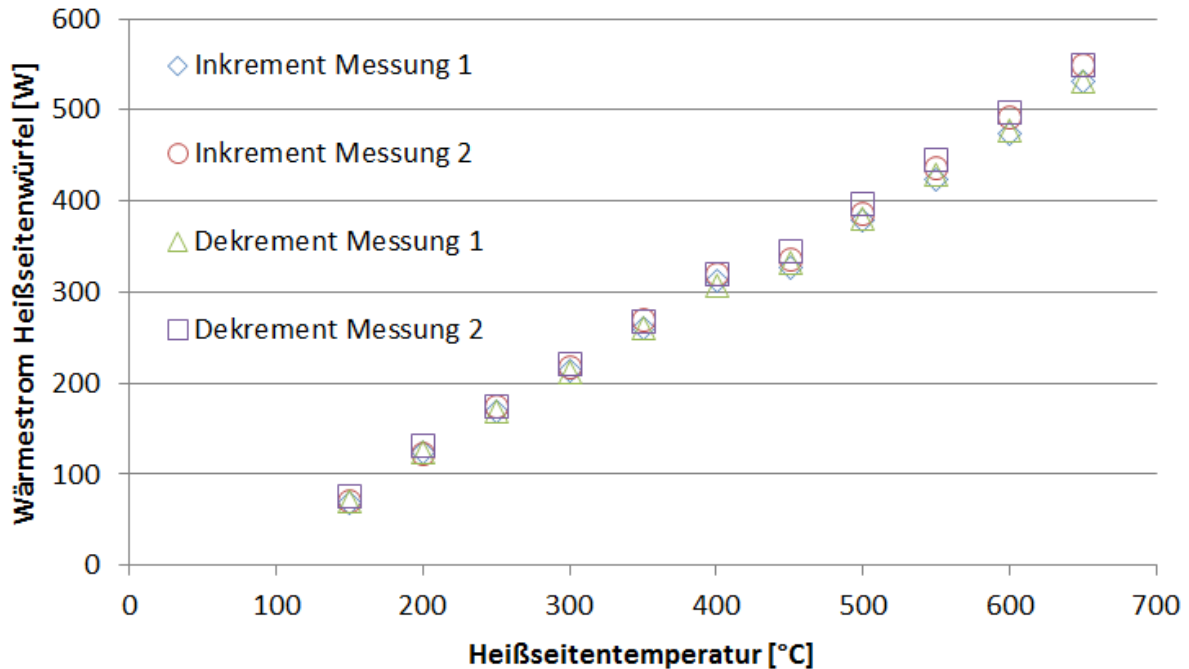


Abbildung 4.16: Wärmestrommessung der Round-Robin Material

4.2.2 Anpassung Heißgasprüfstand und erste Erprobung des Gesamtsystems

Am Heißgasprüfstand wurden zunächst Untersuchungen zu in Großserie verbauten Abgaswärmetauschern durchgeführt, um Erkenntnisse zum Druckverlustverhalten von Wrmebertragerstrukturen im Abgasstrang zu erhalten. Hierfür wurde ein Wärmetauscher mit einer konstanten Gasmenge und konstanter Gastemperatur durchströmt, ohne dass die andere Seite des Wärmetauschers durch Kühlmedium durchströmt wurde. Im Vergleich dazu wurde der Wärmetauscher bei gleichen Gasbedingungen mit 40°C warmen Kühlmittel durchströmt, um das Gas zu Kühlen.

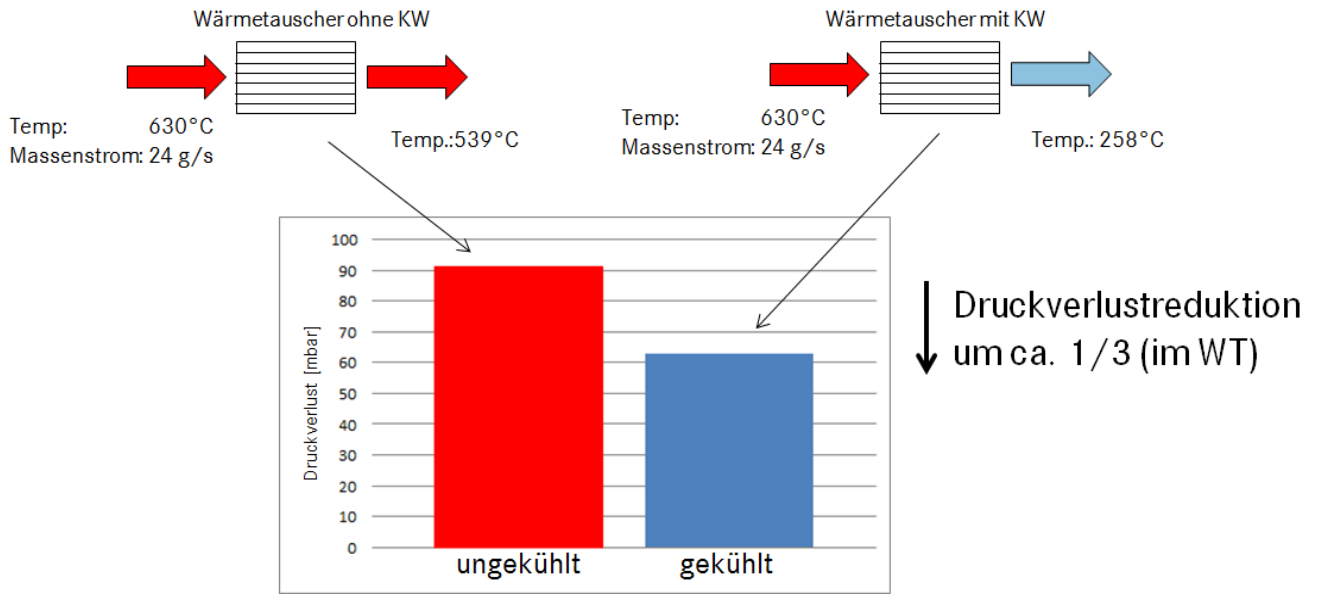


Abbildung 4.17: Auswirkung der Abgasabkühlung auf den Druckverlust

Durch die Kühlung des Gases konnte der Druckverlust im Wärmetauscher um ca. 30% reduziert werden, da die Dichte des Gases durch die Abkühlung zunimmt und die Strömungsgeschwindigkeit dadurch reduziert wird. Durch das kältere Gas ist auch ein reduzierter Druckverlust in der nachfolgenden Abgasanlage zu erwarten. Bei dem Einsatz eines TEGs ist mit einem ähnlichen Effekt zu rechnen, wenn auch im geringeren Maße, da der TEG aufgrund der eingesetzten Module einen schlechteren Wärmedurchgangskoeffizient besitzt als ein reiner Abgaswärmetauscher.

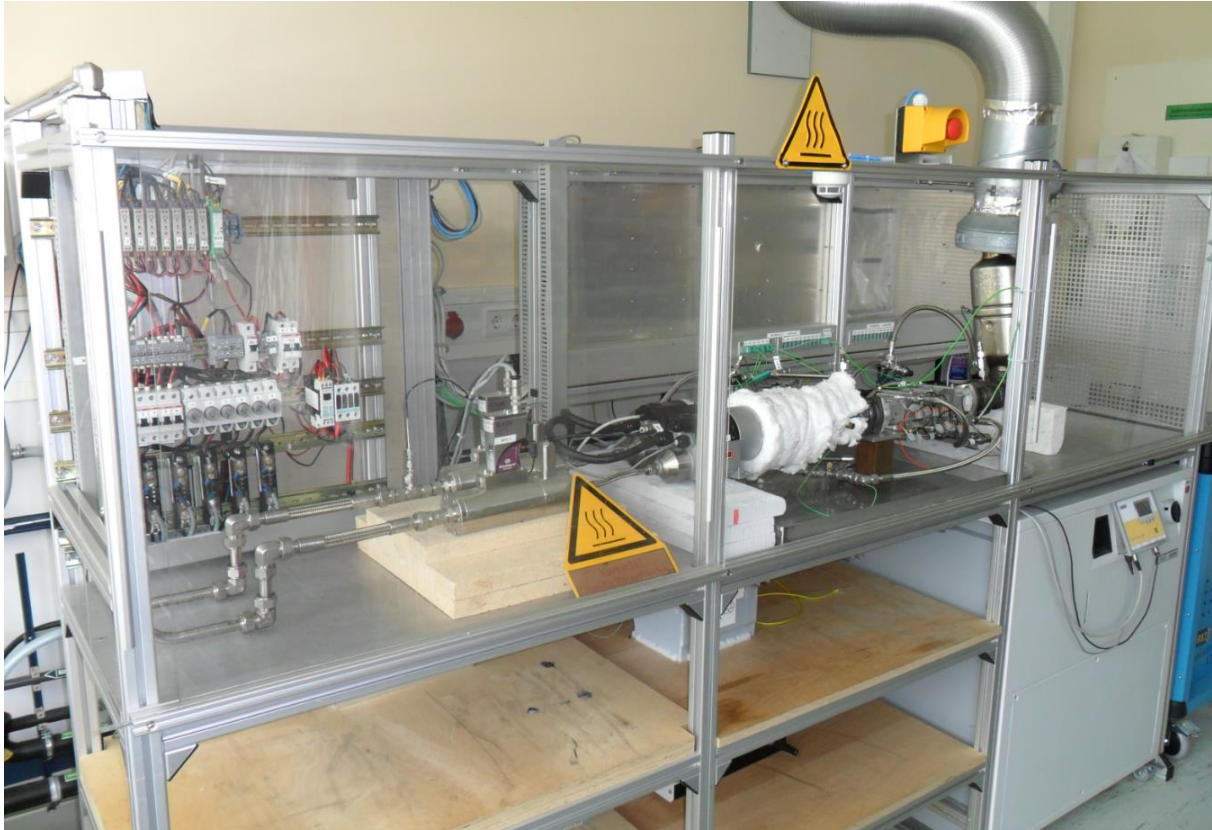


Abbildung 4.18: Aufbau TEG-Systemprüfstand

In

Abbildung 4.18: Aufbau TEG-Systemprüfstand ist der aufgebaute TEG-Systemprüfstand zu sehen. Dieser beinhaltet zwei Luftmassenflussregler zur Vorgabe des Luftmassenstroms, sowie zwei elektrische Heizer zur Aufheizung des Luftstroms. Weiterhin steht ein Kühlaggregat zur Abbildung des Fahrzeugkühlsystems zur Verfügung. Für die elektrische Integration des TEG kann sowohl eine elektrische variable Last oder eine Batterie sowie Zusatzverbraucher verwendet werden.

4.2.3 Aufbau des Generators, Bordnetzanbindung und Test am Gesamtsystem

Am Systemprüfstand wurde ein von Daimler aufgebauten Prototypen-TEG mit BiTe-Modulen integriert. Ziel hierbei war nicht eine Leistungsmaximierung, sondern Erkenntnisse zur elektrischen Interaktion der Module zu bekommen. Die Abbildung 4.19 zeigt den Versuchsaufbau.

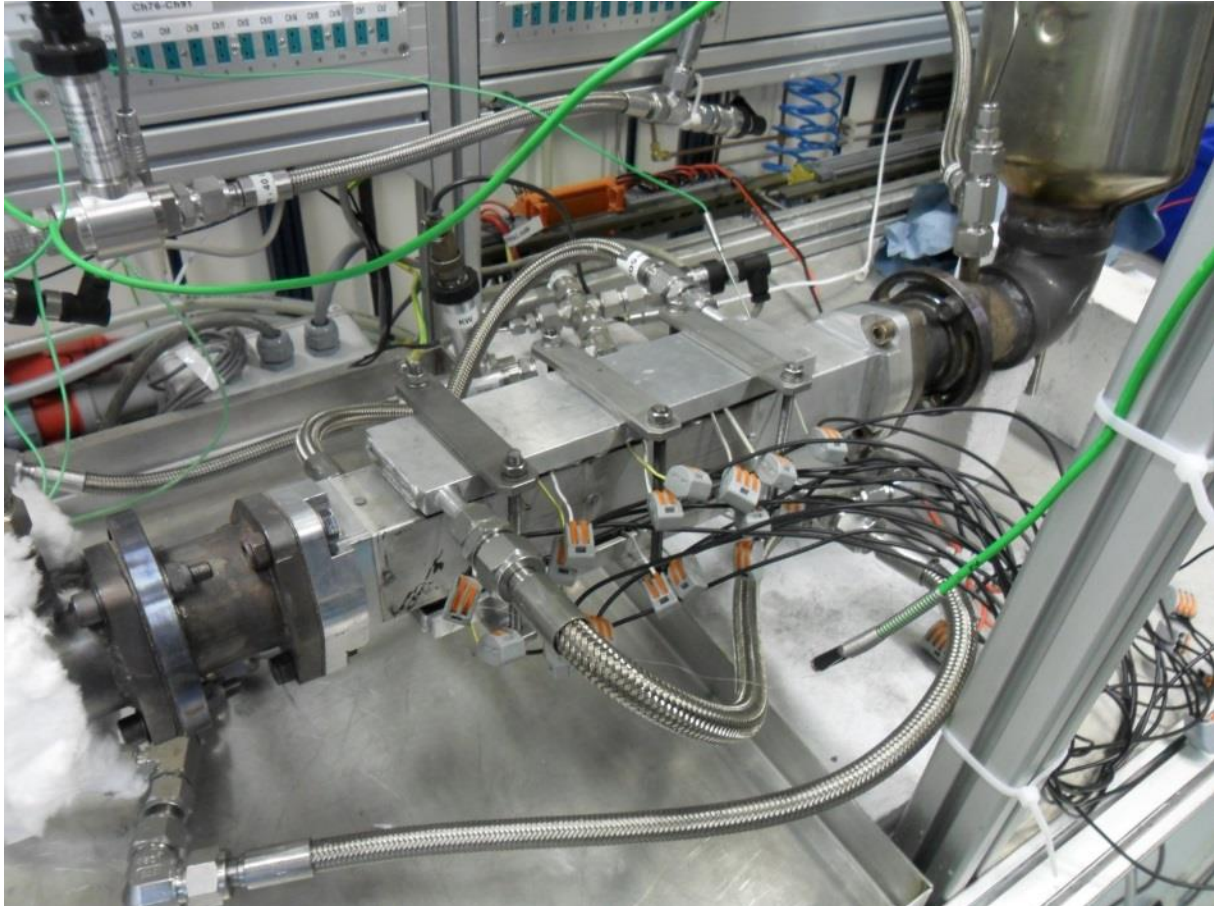


Abbildung 4.19: Getesteter TEG-Prototyp für Bordnetzintegration

Dazu wurde ein Betriebspunkt, welcher den halben Massenstrom des Designpunkts widerspiegelt, gewählt. Die Gaseintrittstemperatur wurde von 630 °C im Designpunkt auf 325 °C reduziert, um die verwendeten BiTe-Module nicht zu überhitzen. Zur Leistungsvermessung wurden fünf verschiedene elektrische Verschaltungsvarianten ausgewählt und vermessen. Jede Verschaltungsvariante hatte eine unterschiedliche Strom-Spannungscharakteristik und einen unterschiedlichen elektrischen Leistungs-output.

Die Abbildung 4.20 zeigt den Verschaltungseinfluss verschiedener elektrischer Verschaltungsvarianten auf die elektrische Leistungsausbeute bei gleichbleibenden thermischen Randbedingungen.

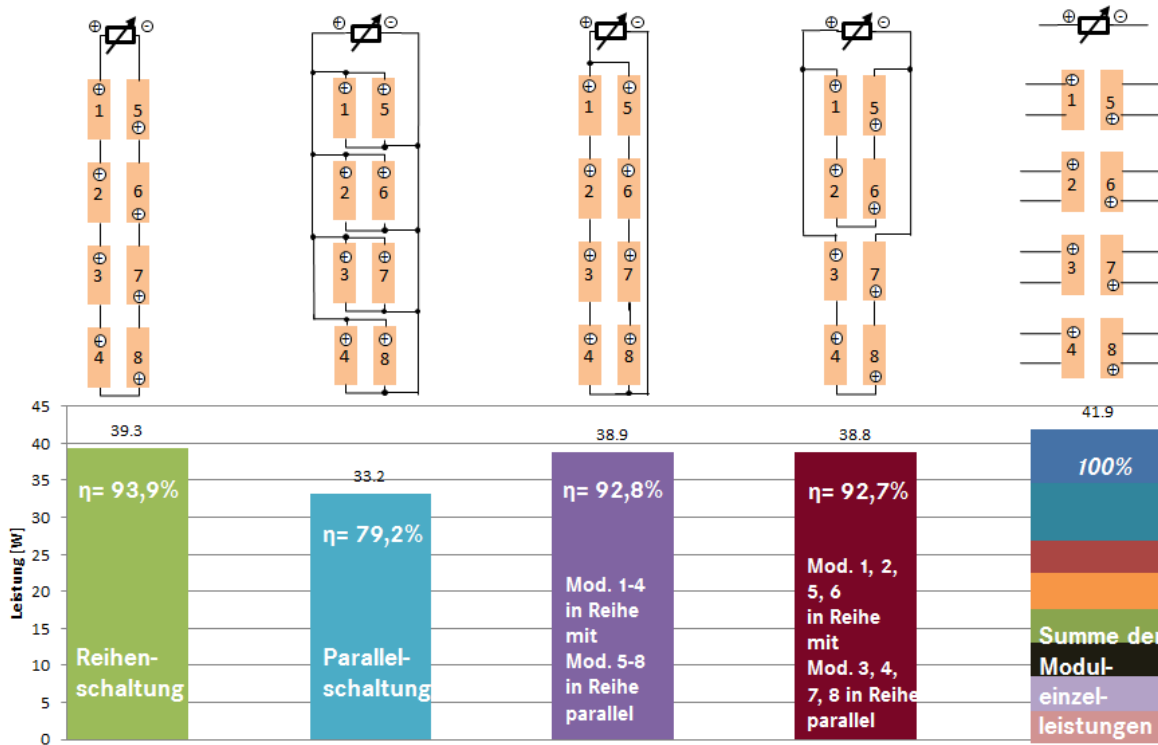


Abbildung 4.20: Messung verschiedener Verschaltungsvarianten der Module

Die elektrische Verschaltungen der im TEG unterschiedlich positionierten Module führen zu einer deutlichen Gesamtleistungsreduktion. Die Verluste sind dabei deutlich höher als in der Abschätzung für die Bleitelluridmodule. Was unter anderem an den unterschiedlichen thermischen Randbedingungen und dem Moduleigenschaften liegt. Im betrachteten Betriebspunkt kommt es zu Verlusten von 6,1% bis 20,8% gegenüber einer individuellen elektrisch optimalen Modulanbindung. Mögliche Ursachen für die hohen Verluste sind auch Unterschiede in der Leistungsfähigkeit der einzelnen Module sowie deren ungleichmäßige thermische Anbindung. Wie auch in der vorhergehenden Betrachtung ist eine elektrische Reihenschaltung der Module zu bevorzugen.

Beim Durchlaufen der elektrischen Lastanpassung lässt sich die Änderung der Oberflächentemperatur an den einzelnen Modulen aufgrund des verringerten Wärmewiderstands durch den Seebeck-Effekt messtechnisch erfassen. In Abbildung 4.21 ist die Oberflächentemperaturänderung bei konstanter Gaseintrittstemperatur gut zu erkennen. Vom elektrischen Leerlaufbetrieb bis zum Kurzschlussstrom des TEGs, kommt es an der Heißeitenoberfläche des vermessenen Moduls zu einer Abkühlung von 218 °C auf 188 °C. Gleichzeitig kommt es zu einem Temperaturanstieg auf der Kaltseitenoberfläche von 6 K.

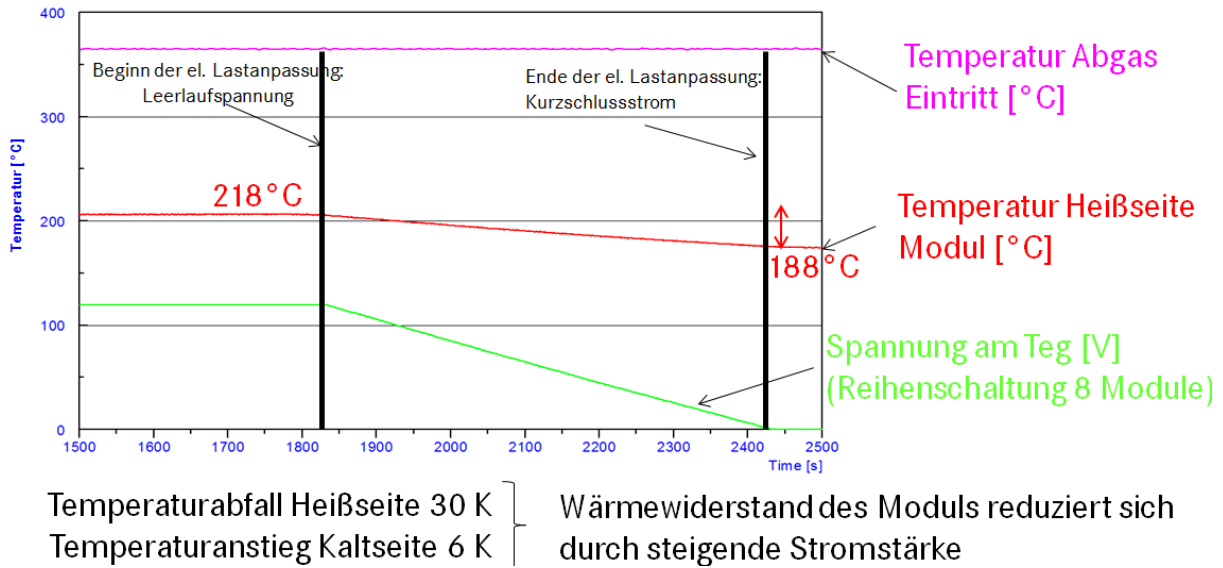


Abbildung 4.21: Änderung der Heißseitentemperatur bei elektrischer Lastanpassung

Neben der elektrischen Modulverschaltung wurde am Systemprüfstand auch die Bordnetzanbindung des TEG untersucht. Dazu wurde der Labor-TEG an eine herkömmliche Fahrzeugbatterie angeschlossen und bei unterschiedlichen Betriebspunkten untersucht. Hierbei stellt sich die Batterie als dominante Komponente gegenüber dem TEG heraus, sodass dieser nahezu auf dem Spannungsniveau der Batterie gezogen wird. Je nach Betriebspunkt liegt jedoch das Spannungsniveau des TEG für eine optimale Leistungsabgabe (MPP) bei von der Batteriespannung abweichenden Werten, wie in Abbildung 4.22 dargestellt ist. Dadurch kommt es zu Leistungseinbußen des TEG. In Situationen bei denen die Leerlaufspannung des TEG unterhalb der Batteriespannung ist, kommt es zum Entladen der Batterie. Dies kann zum Beispiel durch den Einsatz einer Diode verhindert werden.

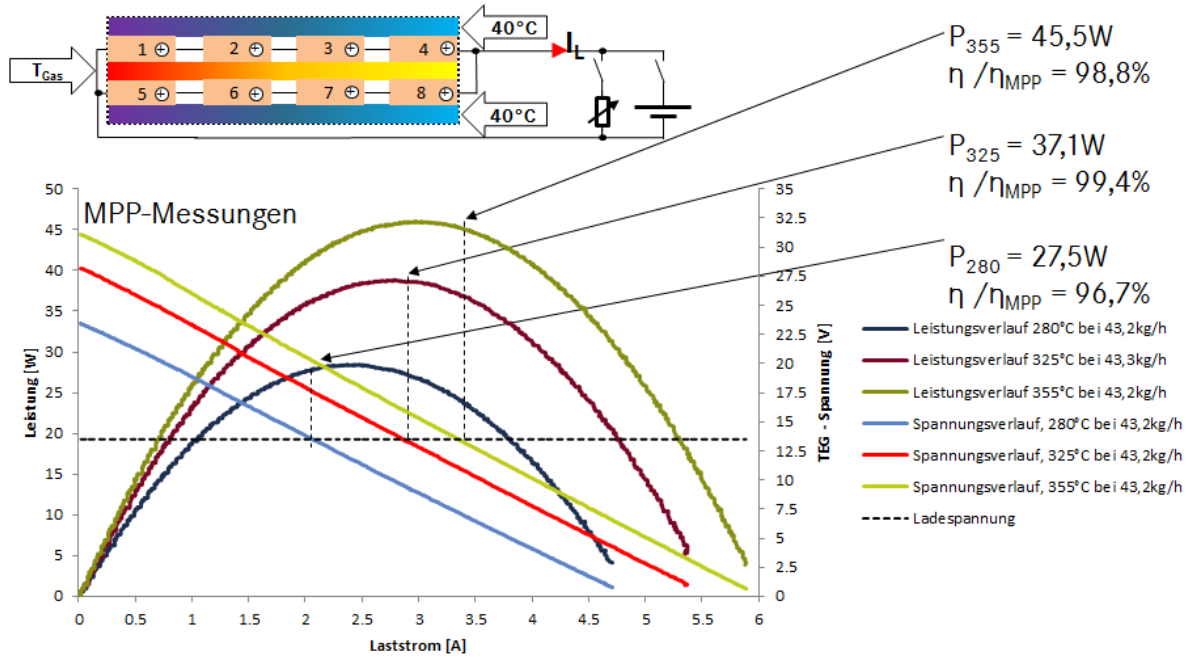


Abbildung 4.22: Einfluss einer direkten Batterieanbindung des TEG

Neben der direkten elektrische Einspeisung in die Batterie wurde weiterhin die Einspeisung über Spannungswandler untersucht.

Um die Verluste einer Spannungswandlung der TEG-Spannung auf Bordnetzspannung bewerten zu können, wurden mehrere DC/DC-Wandler am Systemprüfstand eingebaut und mit dem Prototypen-TEG getestet.

Die Ergebnisse der Wirkungsgradmessung der unterschiedlichen Produkte mit TEG und einer elektrischen Last ist in Abbildung 4.23 zu sehen.

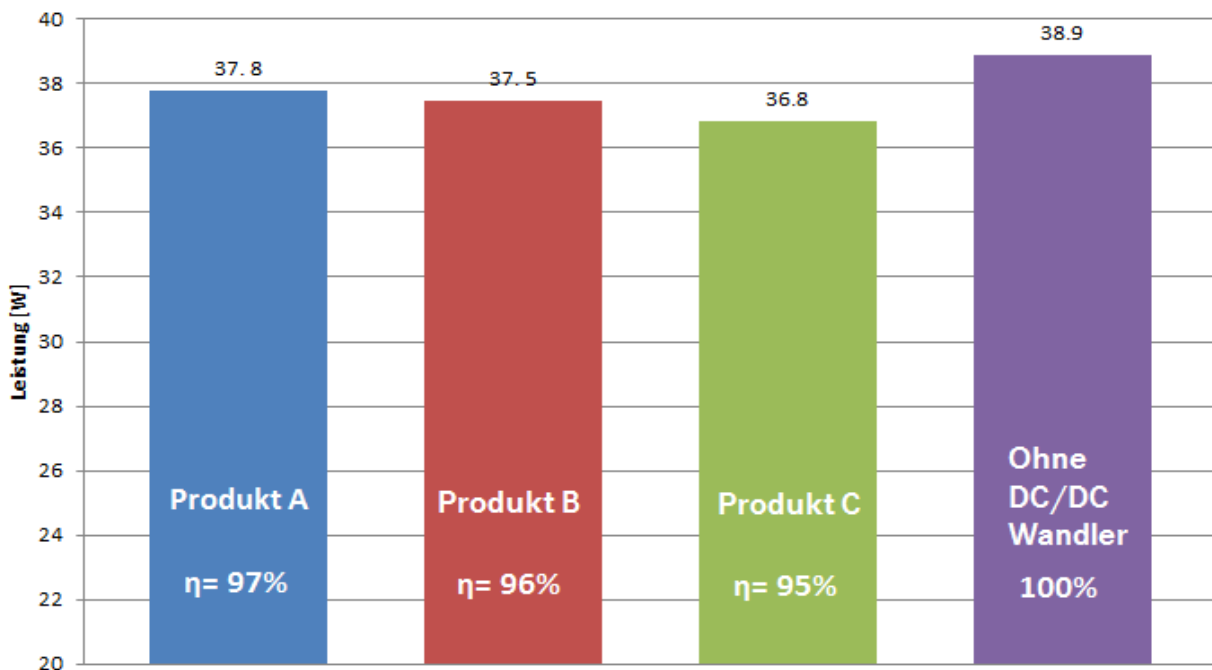


Abbildung 4.23: Wirkungsgrad verschiedener DC/DC-Wandler am Systemprüfstand

Die hinzugewonnen Erkenntnisse zur elektrischen Bordnetzanschluss zeigen, dass an dieser Stelle Herausforderungen für die verlustarme, kostengünstige Integration eines TEGs in ein Fahrzeug bestehen. Abbildung 4.24 zeigt hierzu exemplarisch für einen einzelnen Betriebspunkt die Verlustkette, wie Sie bei der Versuchskonfiguration am Systemprüfstand für den verwendeten TEG aufgetreten ist.

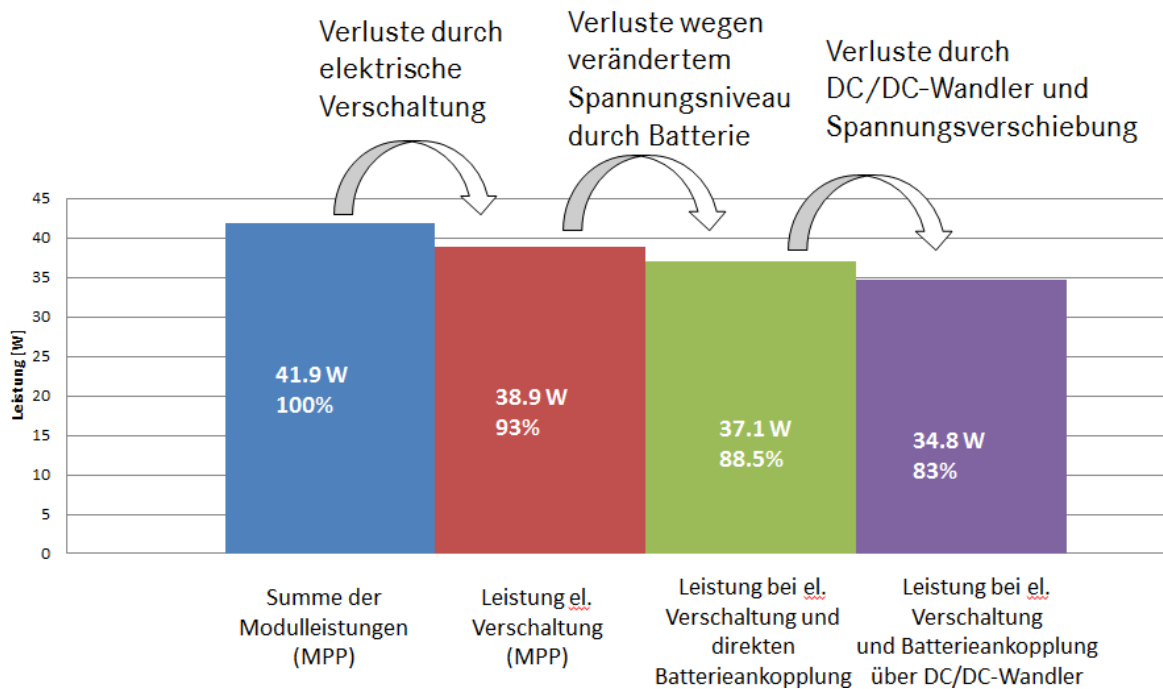


Abbildung 4.24: Wirkungsgradkette der in die Batterie eingespeisten Leistung

Es muss hier jedoch darauf hingewiesen werden, dass diese Verlustkette in verschiedenen Betriebspunkten bezogen auf das gasseitige Wärmeangebot jeweils unterschiedlich aussehen kann. In dem hier betrachteten Beispiel ist das optimale Spannungsniveau des TEGs in etwa auf Höhe der Batteriespannung, was wiederum eine vorteilhafte Konfiguration bedeutet. Zudem ist die Verlustkette abhängig vom Design des TEG, den verwendeten thermoelektrischen Materialien und dem Modulaufbau. Die Verlustkette kann also für andere TEG-Aufbauten anders aussehen und muss neu bewertet werden. Die Verlustmechanismen sind jedoch dieselben. Es zeigt sich deutlich, dass ohne zusätzliche Komponenten wie zum Beispiel eines Maximumpowerpointtrackers (MPP) oder einer variablen elektrischen Verschaltungen der Module weitere Verluste bei der Einspeisung der elektrischen Energie ins Bordnetz auftreten.

Zusätzlich zur direkten Batterieanpassung und der Ankopplung über einen Spannungswandler wurde am Systemprüfstand noch der Einsatz eines MPP-Trackers untersucht. Dieser ist aus elektrischen Standardkomponenten wie Spulen, Kondensatoren und Transistoren aufgebaut und wird durch ein externes PWM-Signal angesteuert.

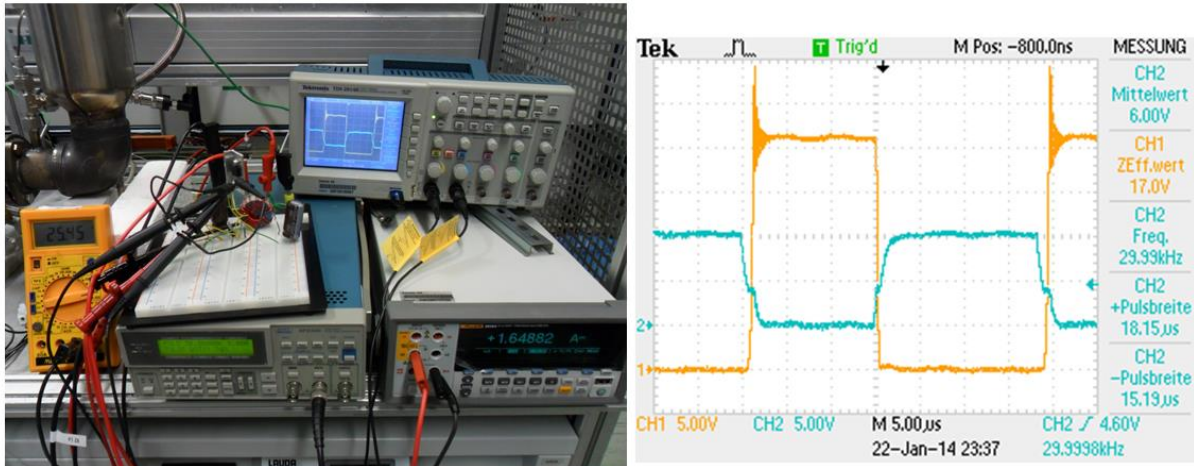


Abbildung 4.25: Aufbau MPP-Tracker am Systemprüfstand

Tabelle 4: Wirkungsgradmessung MPP-Tracker

| Betriebspunkt (Temp. an Modul 1; KS 40°C) | TEG mit Schaltung | | | TEG direkt |
|---|-------------------|---------------|------------|------------|
| | P_{IN} [W] | P_{OUT} [W] | η [%] | P [W] |
| (1) 175°C/43,2kg/h | 18,94 | 17,66 | 93,2 | 17,5 |
| (2) 200°C/43,2kg/h | 25,98 | 23,86 | 91,8 | 21,8 |
| (3) 225°C/43,2kg/h | 37,00 | 33,13 | 89,5 | 27,34 |
| (4) 250°C/43,2kg/h | 42,30 | 37,72 | 89,2 | 30,49 |

Tabelle 4 zeigt die Eingangs- und Ausgangsleistungen sowie den Wirkungsgrad am eingesetzten MPP-Tracker bei verschiedenen Betriebspunkten des TEG. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Einsatz eines MPP-Trackers zur Bordnetzanbindungen Vorteile gegenüber einer elektrischen Direktanbindung aufweist. Allerdings kommt es auch in diesem Bauteil zu Verlustleistungen durch das Bauteil.

Bei Verwendung eines MPP ist mit Verlusten durch die unterschiedlichen Spannungsniveaus der Module und Wandlungsverlusten im MPP und dem DC/DC- Wandler zu rechnen.

Versuche zur elektrischen Integration des TEG haben gezeigt, dass es auf jeden Fall einer betriebspunkt-optimierten Verschaltung bzw. einer Lastanpassung mit Spannungswandler bedarf, um die Verlustleistung möglichst niedrig zu halten.

4.3 Ergebnisse aus Arbeitspaket 4.3

4.3.1 Konstruktion und Packaging Untersuchungen

Für die Integration des TEG in ein Fahrzeug wurden Konstruktions- und Packaging-Untersuchungen durchgeführt. Der TEG wurde hierfür zunächst an die Position des Mittelschalldämpfers gesetzt, da in der derzeitigen Fahrzeugarchitektur dies die einzige Position ist in der das Platzangebot ausreichend ist. Für spätere Anwendungen ist Motor nähere Position zu bevorzugen, da hier höhere Abgastemperaturen vorherrschen.

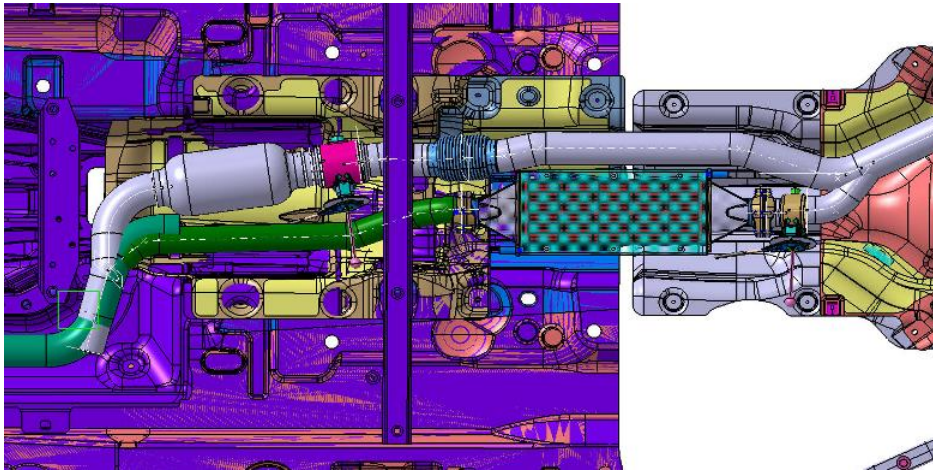


Abbildung 4.26: Packaging Untersuchung Fahrzeugintegration

4.3.2 Fahrzeugaufbau und Messtechnik

Der geplante Fahrzeugaufbau wurde nicht durchgeführt. Grund ist das im Gegensatz zur anfangs erwarteten Leistungsfähigkeit des TEGs deutlich reduzierte Potenzial sowie der mangelnde Reifegrad und Dauerhaltbarkeit der Komponente. Des Weiteren kam es zu Verzögerung im Projekt bei der Bereitstellung der Prototypeinheit.

4.3.3 Rollenprüfstandtests, Fahrttests und Auswertung

Aufgrund des nicht durchgeführten Fahrzeugaufbaus entfällt dieses Arbeitspaket. Es konnten jedoch Temperaturmessstellen an einem anderen Fahrzeug angebracht werden und so Daten über die Abgastemperatur entlang der Abgasanlage gewonnen werden. Dadurch lassen sich Annahmen zur Temperaturabsenkungen entlang der Abgasanlage für verschiedene Fahrsituationen im Hinblick auf die Simulation verifizieren.

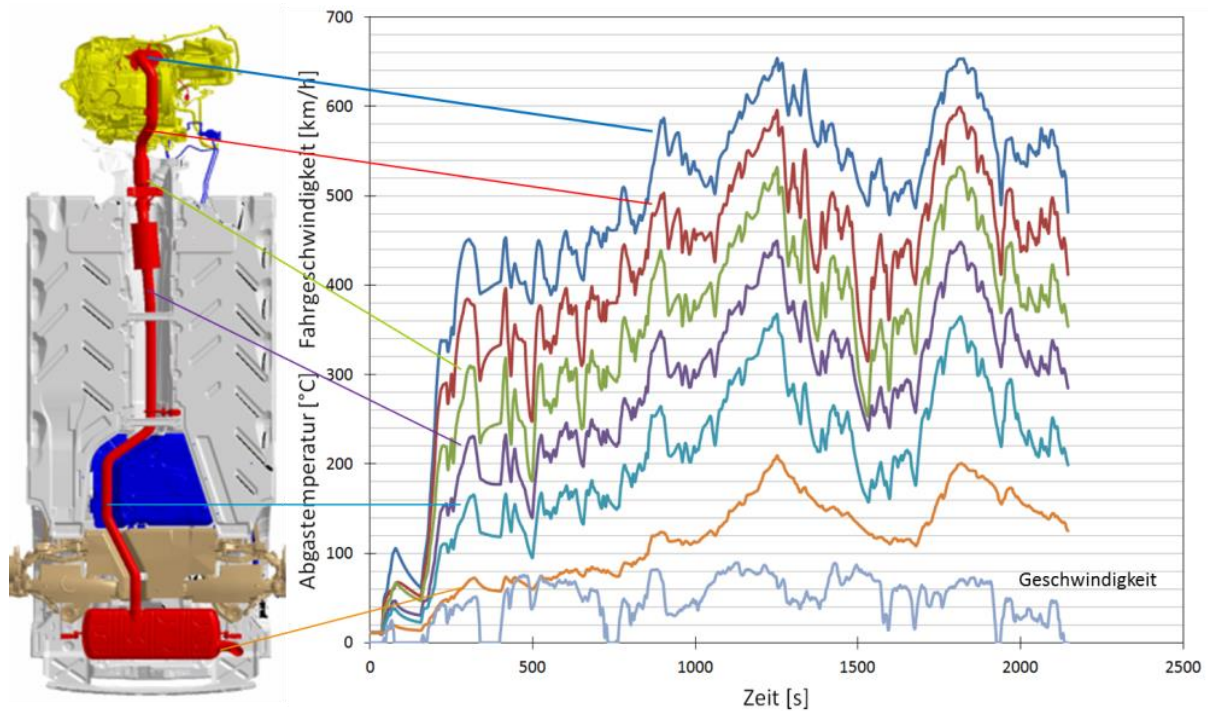


Abbildung 4.27: Abgastemperaturmessung

4.3.4 Auslegung und Aufbau des integrierten Generatorkonzeptes sowie Test am Heißgasprüfstand

Die Auslegung und Aufbau des integrierten Generatorkonzeptes konnte nicht durchgeführt werden, da der Prototyp im Projekt nicht zum ursprünglich geplanten Zeitplan vorlag. Grundlegende Untersuchungen mittels bei Daimler aufgebauten Prototypen wurden im Rahmen von Arbeitspaket 4.2 durchgeführt.

4.4 Handlungsempfehlung für zukünftige Forschungsschwerpunkte

Gemeinsam mit den anderen Projektpartnern wurden folgende Handlungsempfehlungen für zukünftige Forschungsschwerpunkte im Bereich thermoelektrischer Abgaswärmenutzung erarbeitet:

- Materialentwicklung für moderate Temperaturen (ZT_{\max} @~ 400 °C, T-Stabilität bis 650 °C)
- Erhöhung Materialwirkungsgrad (ZT) und Leistungsdichte
- Einsatz kritischer / seltener Rohstoffe vermeiden
- Scale Up von Herstellungsverfahren mit Potential für > 1000 Tonnen
- Anbindungstechnik verbessern und damit die thermomechanischen Spannungen minimieren, sowie eine Reduktion thermischer Widerstände zur Leistungserhöhung
- Direkte Integration der TE-Materialien in den Wärmetauscher mit Kapselung gegen Umgebungsluft
- Langzeituntersuchung zur Dauerhaltbarkeit der TE-Materialien sowie deren Kontaktierung und Anbindung an den Wärmetauscher
- Gewichtsminimierung des Generators (Peripherie – Wärmetauscher)
- Eignung kostengünstiger Fügeverfahren für einen Abgaswärmetauscher
- Allgemein Kosten senken (Material – Fertigung – Integration)
- Betriebsstrategie eines TEG im Fahrzeug erarbeiten (Öffnung des Bypasses, Energiemanagement)

5 Literaturverzeichnis

- [1] J. Liebl, S. Neugebauer, A. Eder, M. Linde, B. Mazar, W. Stütz, *Motortechn. Z.* 2009, 4, 272.
- [2] B. Priemer, *Auto Motor Sport* 2009, 4, 12.
- [3] G. Honsel, *Spiegel Online*, 04.02.2008.
- [4] <https://publicaffairs.llnl.gov/news/energy/energy.html>.
- [5] J. W. Fairbanks, Präsentation zum DoE-Workshop on Thermoelectrics, San Diego, 2009.
- [6] <http://www.globalte.com>.
- [7] G. S. Nolas, J. Poon, M. Kanatzidis, *MRS Bull.* 2006, 31, 199.
- [8] H. Böttner, G. Chen, R. Venkatasubramanian, *MRS Bull.* 2006, 31, 211.
- [9] G. J. Snyder, E. S. Toberer, *Nature Mat.* 2008, 7, 105.
- [10] T. M. Tritt, M. A. Subramanian, *MRS Bull.* 2006, 31, 188.
- [11] C. Uher, Präsentation zum DoE-Workshop on Thermoelectrics, San Diego, 2009.
- [12] H. Kleinke, *Chem. Mater.* 2010, 22, 604.
- [13] T. Caillat, S. Firdosy, B. Li, S. Chi, J.-A. Paik, C.-K. Huang, J. Cheng, J.-P. Fleurial, V. Ravi, E. J. Brandon, Präsentation zum DoE-Workshop on Thermoelectrics, San Diego, 2009.
- [14] G. Rogl, A. Grytsiv, E. Bauer, P. Rogl, M. Zehetbauer, *Intermet.* 2010, 18, 394.
- [15] G. Rogl, A. Grytsiv, E. Bauer, P. Rogl, M. Zehetbauer, *Intermet.* 2010, 18, 57.
- [16] J.-P. Fleurial, P. Gogna, B. C.-Y. Li, S. Firdosy, B. J. Chen, C.-K. Huang, V. Ravi, T. Caillat, K. Star, Präsentation zum DoE-Workshop on Thermoelectrics, San Diego, 2009.
- [17] K. Koumoto, I. Terasaki, R. Funahashi, *MRS Bull.* 2006, 31, 206.
- [18] E. S. Toberer, A. F. May, G. J. Snyder, *Chem. Mater.* 2010, 22, 624.
- [19] E. S. Toberer, S. R. Brown, T. Ikeda, S. M. Kauzlarich, G. J. Snyder, *Appl. Phys. Lett.* 2008, 93, 062110.
- [20] J. Bierschenk, Präsentation zum DoE-Workshop on Thermoelectrics, San Diego 2009.
- [21] H. Schock, E. Case, T. Caillat, C. Chauchy, J.-P. Fleurial, T. Hogan, M. Kanatzidis, R. Maloney, C. Nelson, J. Ni, J. Novak, F. Peng, T. Ruckle, J. Sakamoto, R. Schmidt, T. Shih, Ed. Timm, J. Winkelman, Präsentation zum DoE-Workshop on Thermoelectrics, San Diego, 2009.
- [22] J. Yang, Präsentation zum DoE-Workshop on Thermoelectrics, San Diego, 2009.
- [23] F. Stabler, Präsentation zum DoE-Workshop on Thermoelectrics, San Diego, 2009.
- [24] J. LaGrandeur, Präsentation zum DoE-Workshop on Thermoelectrics, San Diego, 2009.
- [25] A. Eder, Präsentation zum DoE-Workshop on Thermoelectrics, San Diego, 2009.
- [26] H. Friedrich, M. Schier, C. Häfele, T. Weiler, *ATZ* 2010, 4, 292.
- [27] US 6444894, EP 1754266, EP 1797598, WO 2007/104601, WO 2009/092421, WO 2009/098248, EP 2010/052194, EP 2010/054268 (Auswahl).

-
- [28] T. Ikeda, L. A. Collins, V. A. Ravi, F. S. Gascoin, S. M. Haile, G. J. Snyder, Chem. Mater. 2007, 19, 763.
- [29] S. R. Brown, S. M. Kauzlarich, F. Gascoin, G. J. Snyder, Chem. Mater. 2006, 18, 1873.
- [30] X.-J. Wang, M.-B. Tang, H.-H. Chen, X.-X. Yang, J.-T. Zhao, U. Burkhard, Yu. Grin, Appl. Phys. Lett. 2009, 94, 092106/1.
- [31] F. Gascoin, S. Ottensmann, D. Stark, S. M. Haile, J. G. Snyder, Adv. Funct. Mat. 2005, 15, 1860.
- [32] V. K. Zaitsev, M. I. Federov, M. V. Vedernikov, 25th International Conference on Thermoelectrics 2006, 111.
- [33] V. K. Zaitsev, M. I. Federov, E. A. Gurieva, I. S. Eremin, P.P. Konstantinov, A. Y. Samunin, M. V. Vedernikov, Phys. Rev. B 2006, 744, 045207.
- [34] WO 2005104156, JP 08306963, JP 3463396, JP 3248985, EP 413324 (Auswahl).
- [35] J. X. Jiang, T. Sasakawa, K. Matsugi, G. Sasake, O. Yanagisawa, J. Alloys Compd. 2005, 391, 115.
- [36] C.-H. Lee, S.-H. Lee, S.-Y. Chun, S.-J. Lee, J. Nanosci. Nanotechnol. 2006, 6, 3429.
- [37] M. Beekman, M. Baitinger, H. Borrmann, W. Schnelle, K. Meier, G. S. Nolas, Yu. Grin, J. Amer. Chem. Soc. 2009, 131, 9642.
- [38] U. Stoeher, R. Voggesberger, G. Wagner, U. Birkholz, Energy Conversion and Management 1990, 30, 143.
- [39] D. M. Rowe, CRC Handbook of Thermoelectrics 1995, 277.
- [40] JP 2009094497, JP 2008254976, CN 101224501, CN 101197420, JP 3772206
- [41] G. S. Nolas, J. L. Cohn, G. A. Slack, S. B. Schujman, Appl. Phys. Lett. 1998, 73, 178.
- [42] CN 101393959, JP2009040649, JP 2008288267, JP 2008047806, JP 2008047625
- [43] Statusseminar Thermopower, Frankfurt 16.-17. Dezember 2012
- [44] P. Geskes, T. Strauss: Das Abgaswärmemanagement, MTZ November 2006
- [45] G. Hepke: Direkte Nutzung von Abgasenthalpie zur Effizienzsteigerung von Kraftfahrzeugen, Doktorarbeit TU München 2010
- [46] M. Rauscher, „Thermoelektrik als Möglichkeit der Rekuperation von Abgaswärme“, 5. Wissenschaftsforum Mobilität, Duisburg, 18. Juni 2013
- [47] M. Rauscher, “Challenges in Dimensioning of an optimized thermoelectric Generator for Waste Heat Recovery in Cars”, Nordwijk, 18.-20. November 2013
- [48] M. Rauscher „Abgaswärmenutzung im Automobil: Konzepte und Herausforderungen“, 6. Wissenschaftsforum Mobilität, Duisburg, 08. Mai 2014
- [49] M. Rauscher Dissertation
„Bewertung und Vergleich von Abgaswärmenutzungstechnologien in Kraftfahrzeugen unter Berücksichtigung realer Anwendungsbedingungen“ 2015

Berichtsblatt

| | |
|---|---|
| 1. ISBN oder ISSN geplant | 2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht |
| 3. Titel Innovative Materialien und Generatoren für die thermoelektrische Energiegewinnung der Zukunft | |
| 4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Finsternerwalder, Florian Maué, Jürgen Rauscher, Matthias Richter, Thomas Stengel, Thomas | 5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.6.2014 |
| | 6. Veröffentlichungsdatum Geplant |
| | 7. Form der Publikation |
| 8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Daimler AG Wilhelm-Runge-Straße 11 89081 Ulm | 9. Ber. Nr. Durchführende Institution |
| | 10. Förderkennzeichen 03X3551C |
| | 11. Seitenzahl xx |
| 12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Projektträger Jülich Wilhelm-Johnen-Straße 52428 Jülich | 13. Literaturangaben xx |
| | 14. Tabellen xx |
| | 15. Abbildungen xx |
| 16. Zusätzliche Angaben | |
| 17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) | |
| 18. Kurzfassung Ziel des Projektes war die Erstellung eines thermoelektrischen Generators auf Basis eines hochtemperaturbeständigen thermoelektrischen Materials zur Abgaswärmenutzung in Fahrzeugen. Dazu wurde ein Simulationsmodell auf Gesamtfahrzeugebene erstellt und umfangreiche Simulationen durchgeführt. Es wurde ein Lastenheft erstellt und eine Betriebsstrategie erarbeitet. Im Projekt wurden die im Labor gewonnen Erkenntnisse auf industriell anwendbare Verfahren umgesetzt und aufbauend auf marktverfügbaren thermoelektrischen Materialien eine erste TEG Einheit aufgebaut und an einen Gesamtsystemteststand mit Heißgas erprobt. | |
| 19. Schlagwörter Thermoelektrik, thermoelektrischer Generator, Abgaswärmenutzung, Bordnetzanbindung | |
| 20. Verlag | 21. Preis |