

TEG2020

„Entwicklung modularer leistungsstarker und flexibel einsetzbarer thermoelektrischer Generatoren zur thermischen Rekuperation in Verbrennungskraftmaschinen und -anlagen“

Förderkennzeichen 03X3552A



IAVGmbH – Abschlussbericht

ZE: IAV GmbH
Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr



Förderkennzeichen:
03X3552A

Vorhabensbezeichnung:
TEG2020 - Entwicklung modularer leistungsstarker und flexibel einsetzbarer thermoelektrischer Generatoren zur thermischen Rekuperation in Verbrennungskraftmaschinen und -anlagen;

Teilprojekt:
Projektleitung, Simulation, TEG-Integration

Laufzeit des Vorhabens:
01.05.2011 – 30.12.2014

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren



Impressum:

© 2015 Daniel Jänsch, Jana Topalova-Gura, Michael Aengenheister
IAV GmbH Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr

Inhaltsverzeichnis

I	Kurzdarstellung	1
1	Aufgabenstellung	2
2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	3
2.1	Energiebedarf und Energienutzung	3
2.2	Energie und Verkehr	5
2.3	Abwärmenutzung	6
2.4	Thermoelektrik	7
3	Planung und Ablauf des Vorhabens	9
3.1	Arbeitspakete	9
3.2	Arbeits- und Zeitplan	15
4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	21
4.1	Abwärmenutzung in Fahrzeugen	21
4.2	Thermoelektrische Generatoren für den Fahrzeugeinsatz	25
4.3	Thermoelektrisches Material für den Fahrzeugeinsatz	33
4.4	Thermoelektrische Module (TEM) für den Fahrzeugeinsatz	39
4.5	Thermische und strömungsmechanische Integration, Wärmeübertrager	41
4.6	Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste	44
5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	47
II	Eingehende Darstellung	48
1	Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse im Einzelnen	49
1.1	AP 10 000 Projektmanagement	49
1.2	AP 20 000 Grundlagen	50
1.3	AP 30 000 Simulation	57
1.4	AP 50 000 Innovative TE-Module	78
1.5	AP 60 000 TEG-Systeme	97
1.6	AP 70 000 TEG-Integration	102
1.7	AP 80 000 TEG-Demonstrator	120
2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	174
3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	174
4	Voraussichtlicher Nutzen / Verwertbarkeit der Ergebnisse	174
4.1	Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen, erteilte Schutzrechte, (standortbezogene) Verwertung, weitere Verwertungsmöglichkeiten	174
4.2	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende	175
4.3	Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende	179
4.4	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase	180
5	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordene Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	182
6	Erfolge oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse	182

6.1	Veröffentlichungen	182
6.2	Vorträge	182

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN --	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel Schlussbericht „Entwicklung modularer leistungsstarker und flexibel einsetzbarer thermoelektrischer Generatoren zur thermischen Rekuperation in Verbrennungskraftmaschinen und -anlagen“		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Daniel Jänsch Jana Topalova-Gura Michael Aengenheister	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.12.2014	
	6. Veröffentlichungsdatum 30.06.2015	
	7. Form der Publikation Abschlussbericht	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) IAV GmbH Carnotstr. 1 10587 Berlin	9. Ber. Nr. Durchführende Institution --	
	10. Förderkennzeichen 03X3552A	
	11. Seitenzahl 187	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 34	
	14. Tabellen 13	
	15. Abbildungen 168	
16. Zusätzliche Angaben --		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) --		
18. Kurzfassung <p>Im Projekt TEG2020 wurden hocheffiziente, wirtschaftliche und großserientaugliche, theoretisch und experimentell abgesicherte Konzepte und Systeme für thermoelektrische Generatoren (TEG) zur Rekuperation von Verlustwärme aus Verkehrs-, Antriebs-, Arbeits- und Energiesystemen entwickelt. Im Mittelpunkt steht ein innovatives, modulares und flexibles Baukastenkonzept, das die Möglichkeiten zur Adaption des TEG an unterschiedliche Anwendungen, Zielsysteme und Leistungsklassen bietet.</p> <p>Aufbauend auf den bekannten, auf bismut- und bleitelluridbasierten Materialsystemen wurde durch Entwicklung eines „all-in-one“-Modulkonzepts mit einer geeigneten Aufbau- und Verbindungstechnik ein flexibles Demonstratorsystem aufgebaut. Die einzelnen Komponenten sowie das komplette Demonstratorsystem in unterschiedlichen Baustufen wurden virtuell durch Simulation und real auf einem Labor- und einem Motorprüfstand sowie im Projektfahrzeug betrieben und analysiert.</p> <p>IAV hat im Rahmen des Vorhabens die Konzeptionierung, Auslegung, Entwicklung, Optimierung, Beschaffung/Herstellung, Integration, Inbetriebnahme, Test und Qualifikation aller TEG-Komponenten und Systeme sowie des Demonstrators und der Prüfeinrichtungen durchgeführt.</p> <p>Auch wenn ein Hauptziel, einen TEG mit einer realen elektrischen Nennleistung von 500 W im Projektfahrzeug bei kundenähnlichen Bedingungen zu betreiben, im Projekt nicht zu Ende geführt werden konnte, wurden die wesentlichen Projektziele erreicht:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung einer Simulationsplattform zur Auslegung, Optimierung und Potentialabschätzung des TEG im Gesamtsystemverbund • Konzept, Konstruktion und Umsetzung aller TEG-Komponenten: Baukasten, all-in-one-Module, Wärmetauscher, Steuerungs- und Regelungssysteme • Konzept und Implementierung notwendiger Energie- und Wärmemanagement-Betriebsstrategien • Funktionsnachweis der entwickelten Konzepte und Systeme mit Prototypen auf Prüfständen und im Demonstratorfahrzeug 		
19. Schlagwörter Thermoelektrik, thermoelektrisches Modul, thermoelektrisches System, stoffschlüssig, Wärmeübertrager, Wärmetauscher, Simulation, Abwärmenutzung, Fahrzeug, Kraftstoffeinsparung, Kühlkreislauf, Bordnetz, Abgasklappe, Hardware-in-the-Loop, Energiemanagement, Wärmemanagement		
20. Verlag --	21. Preis --	

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN --	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report	
3. title Final report „Development of powerful, modular thermoelectric generators for waste heat recovery in combustion engines and energy application systems“		
4. author(s) (family name, first name(s)) Daniel Jansch Jana Topalova-Gura Michael Aengenheister	5. end of project 30.12.2014	
	6. publication date 30.06.2015	
	7. form of publication Final Report	
8. performing organization(s) (name, address) IAV GmbH Carnotstr. 1 0587 Berlin	9. originator's report no. --	
	10. reference no. 03X3552A	
	11. no. of pages 187	
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 34	
	14. no. of tables 13	
	15. no. of figures 168	
16. supplementary notes --		
17. presented at (title, place, date) --		
18. abstract In this project IAV developed TEG systems for waste heat recovery for different traffic, propulsion and energy application systems on the basis of an innovative, modular and flexible system design. The TEG system concept is efficient, economic and suitable for mass production as well as scalable for various applications and performance levels. A modular demonstrator system was built on the basis of the well-known bismuth and lead telluride thermoelectric materials with a new "all-in-one" module concept and appropriate mounting and connecting techniques. The single components and the complete TEG demonstrator system were virtually and experimentally tested in laboratory, on engine test bench and in a vehicle. Within the project IAV was responsible for the concept, layout, design, optimization, procurement/manufacturing, integration, test and analysis of all TEG components and systems as well as the demonstrator vehicle and the testing equipment. Even when one of the main project goals - to build and test a TEG with a performance of 500 W in a vehicle under real driving conditions - could not be completely achieved, all other objectives were successfully fulfilled: <ul style="list-style-type: none"> • Develop comprehensive simulation platform to design, optimize and assess TEG within their application environment • Design and develop all TEG components and systems: modular frame, all-in-one modules, heat exchangers, control systems • design and implement energy and thermal management operating strategies • prove and validate prototype components and TEG system on test benches and in a vehicle 		
19. keywords thermoelectrics, thermoelectric module, thermoelectric system, firmly-bonded, heat exchanger, simulation, waste heat recovery, vehicle, fuel efficiency, cooling system, electrical system, exhaust gas valve, hardware-in-the-loop, energy management, thermal management		
20. publisher --	21. price --	



I Kurzdarstellung

1 Aufgabenstellung

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens war, hocheffiziente, wirtschaftliche und großserientaugliche, theoretisch und experimentell abgesicherte Konzepte und Systeme für thermoelektrische Generatoren (TEG) zur Rekuperation von Verlustwärme aus Verkehrs-, Antriebs-, Arbeits- und Energiesystemen zu entwickeln. Ein innovatives, modulares und flexibles Baukastenkonzept sollte die Möglichkeiten zur Adaption des TEG an unterschiedliche Anwendungen, Zielsysteme und Leistungsklassen bieten.

Um hohe Systemeffizienz zu erzielen, wurden neue Aufbau- und Verbindungstechnologien sowie innovative Integrations- und Energiemanagementansätze verfolgt, die für eine große Bandbreite von thermoelektrischem (TE) Material nutzbar sind.

Aufbauend auf den bekannten, auf bismut- und bleitelluridbasierten, Materialsystemen wurde durch Entwicklung einer geeigneten Aufbau- und Verbindungstechnik ein flexibles Demonstratorsystem aufgebaut. Parallel hierzu wurde ein geeignetes Substitutionsmaterial auf der Hochtemperaturseite für Bleitellurid aus dem Bereich der Halb-Heusler Materialien entwickelt. Kernpunkt war eine stoffschlüssige Ankopplung des TE-Materials an die wärmeübertragenden Medien, sowohl auf der Kalt- als auch auf der Warmseite, in unabhängigen Modulgruppen mit optimierten Materialien für den jeweiligen Temperatureinsatzbereich. Hierbei sollte ein möglichst ungehinderter Kontakt des Wärmeträgers mit dem TE-Material gewährleistet werden. Thermomechanische Effekte wurden durch besondere Maßnahmen berücksichtigt.

Die einzelnen Komponenten sowie das komplette Demonstratorsystem in unterschiedlichen Baustufen wurden virtuell durch Simulation und real auf einem Labor- und einem Motorprüfstand sowie im Projektfahrzeug betrieben und analysiert.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

2.1 Energiebedarf und Energienutzung

Der Energiebedarf der Welt nimmt stetig zu, besonders in den Schwellenländern. Bislang wird er mit einem Anteil von ca. 80% vor allem über fossile Energieträger gedeckt. Nach aktuellem Wissensstand muss aber davon ausgegangen werden, dass Ihre Vorräte endlich sind. Aufwand, Kosten und der Verbrauch natürlicher Ressourcen für ihre Erschließung, Förderung und Aufbereitung nehmen zu, die Energiekosten steigen folglich immer weiter an.

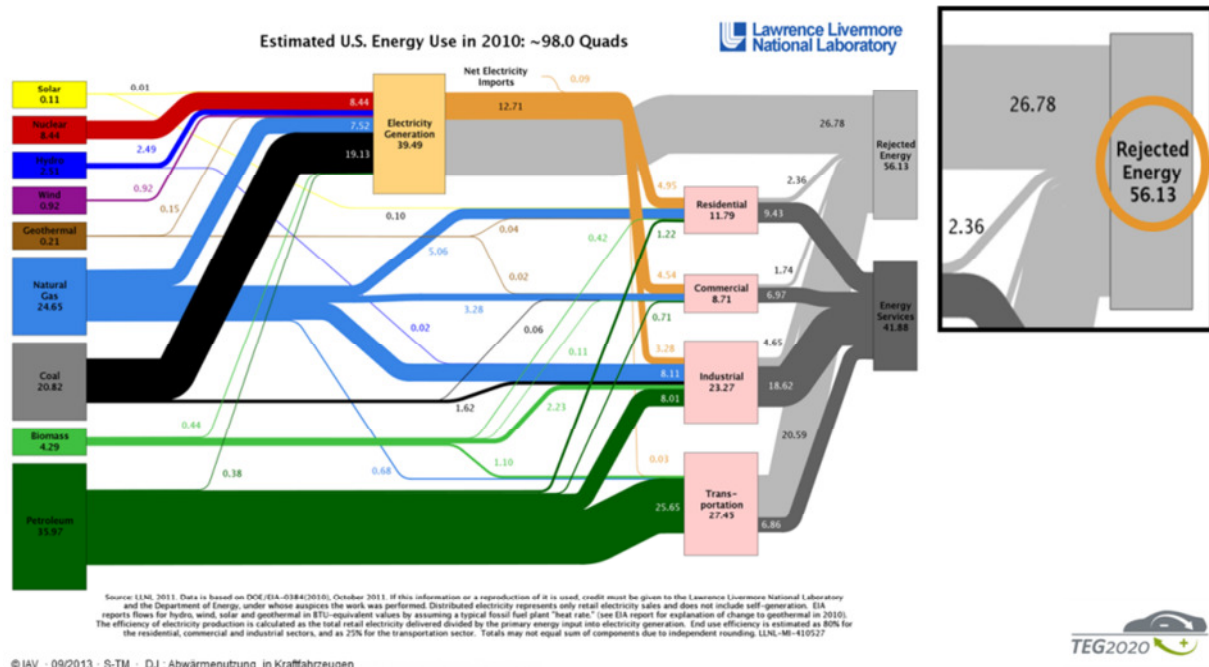


Abbildung 1: Energieerzeugung und-verluste in den USA 2010

Gleichzeitig wird weltweit in technischen Prozessen noch immer ein nur sehr kleiner Anteil der Primärenergie tatsächlich verwendet. Der Rest geht ungenutzt verloren. Dadurch werden unnötig wertvolle und vor allem endliche Ressourcen verschwendet, die Umwelt belastet und das Klima ungünstig beeinflusst.

Für die Zukunftsfähigkeit von Wirtschaft und Gesellschaft gewinnen neue Technologien und Konzepte für einen sparsamen und effizienten Energieeinsatz immer mehr an Bedeutung. Es ist jedoch davon auszugehen, dass zumindest noch in den nächsten Jahrzehnten, in weiten Bereichen fossile Energieträger einen dominanten Anteil beanspruchen und erst langsam durch neue Energieformen ersetzt werden können.

Wir werden also mit den heute bekannten Technologien zur Energiebereitstellung und -nutzung noch lange zurechtkommen müssen. Deshalb ist es dringend erforderlich, auch die aktuellen Verfahren zur Wandlung und Nutzung der fossilen Energieträger weiterzuentwickeln. Dies betrifft neben der Reduzierung des Energiebedarfs und der bedarfsgerechten Energiebereitstellung vor allem die Effizienzsteigerung von energietechnischen Anlagen, also die Reduzierung der Wandlungsverluste (s. Abbildung 1 und Abbildung 2). Da Verluste bei der Umwandlung technologie- und betriebsbedingt aber

nie vollständig vermeidbar sind, kommt insbesondere der Rückgewinnung und Nutzung der Verlustenergien - im Besonderen der enormen Abwärmemengen - eine wachsende Rolle zu. Nicht zuletzt weil Abwärme auch bei der Verwendung neuer Energieträger und Wandler anfällt.

Ziel muss also sein, Energie so sparsam wie möglich zu verwenden, um so den globalen Energiebedarf nachhaltig zu reduzieren und die Energieeffizienz in allen Bereichen zu steigern. Die konsequente Nutzung von Abwärme gehört zu den aussichtsreichsten Lösungsansätzen. Könnte man einen signifikanten Teil der Abwärme wiederverwenden, wäre das eine sehr wirksame Art und Weise, gleichzeitig die unmittelbaren Kosten des ineffizienten Einsatzes von Energie zu senken, die Sicherheit der Energieversorgung zu erhöhen, die Emissionen zu verringern, die Wettbewerbsfähigkeit zu verbessern und die Entwicklung eines großen, zukunftsorientierten Marktes für energieeffiziente Technologien und Produkte zu fördern. Hierfür gibt es in den unterschiedlichen Industrie- und Verkehrsbereichen inzwischen eine große Zahl von Konzepten und Technologien, die sich teilweise bereits für stationäre Anlagen und im großindustriellen Maßstab bewährt haben.

Abwärmerecuperation ist allerdings eine enorme technische und wirtschaftliche Herausforderung. Z. B. auch deshalb, weil es nicht um eine überschaubare, sondern um eine unzählbare Anzahl von Abwärmequellen(typen) geht, die sich stark voneinander unterscheiden. Und die rekuperative Energieumwandlung unterliegt genauso

Theoretical efficiency limits in energy conversion devices (11%)

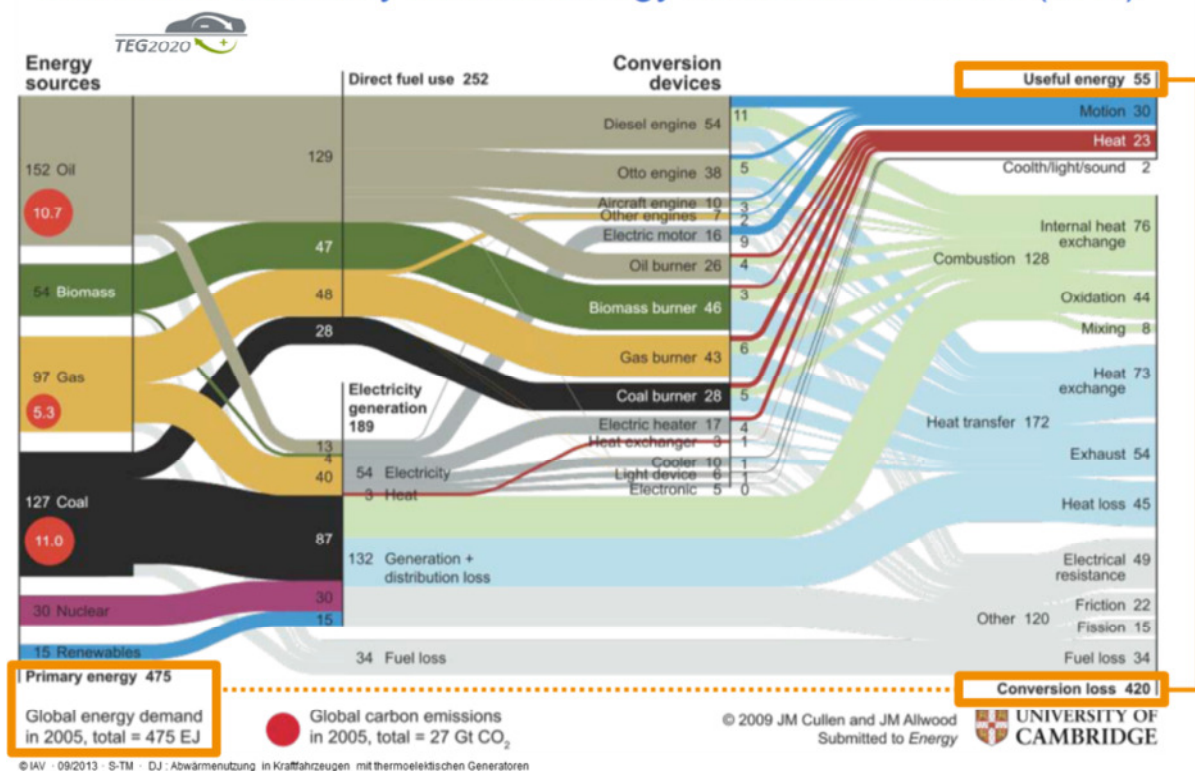


Abbildung 2: globaler Primärenergieeinsatz, theoretische Verluste und –nutzung 2005

wie die primäre Wandlung dem Carnot-Gesetz. Einem breiten Einsatz stehen oft hohe Kosten und niedrige Wirkungsgrade im Wege. Seit Jahrzehnten haben sich Abwärmennutzungssysteme bei Großanlagen für Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude und Überseeschiffe im Multikilo- bis Megawatt-bereich allerdings etabliert. Auch für Nischenanwendungen werden sie erfolgreich eingesetzt, wo es keine Alternativen gibt bzw. Kosten und/oder Wirkungsgrad eine untergeordnete Rolle spielen. Kosten und Wirkungsgrad

von Rekuperationsmaßnahmen hängen von einer Vielzahl von Faktoren ab. Starke Einfluss haben Eigenschaften und Betriebsweisen der Zielsysteme, im Besonderen ihres Wärmeangebots, beschrieben durch zeitliche Verfügbarkeit, Energieinhalt, Dynamik und Temperaturniveau.

2.2 Energie und Verkehr

Der Verkehrssektor nimmt eine Schlüsselrolle ein, unter anderem bezüglich Energieverbrauch, Umweltrelevanz und Innovationskraft. Mobilität ist ein grundlegendes Bedürfnis moderner Gesellschaften. Sie ist unverzichtbar, weil Voraussetzung und Garant für wirtschaftlichen Erfolg, gesellschaftlichen Wohlstand und Lebensqualität. Sie muss für jeden zugänglich und erschwinglich sein. Mobilität verbraucht jedoch viel Energie. Im Verkehrssektor werden in Deutschland knapp 30 Prozent der Endenergie verbraucht. Davon nimmt mit mehr als 80 Prozent der Straßenverkehr den weitaus größten Anteil ein. Der Verkehr verbraucht damit in etwa gleich viel der weltweit knappen Ressource Energie wie Industrie und Haushalte in Deutschland. Rund 90 % der Energie im Verkehr sind flüssige Kraftstoffe auf Rohölbasis. Bisher ist der Anteil der erneuerbaren Energien in Verkehrssektor gering. Damit sich das ändert, müssen Verkehrs- und Energiepolitik die Rahmenbedingungen richtig ausgestalten und dabei konsequent auf erneuerbare Energien setzen.

Der weltweite Transportbedarf für Personen und Güter steigt nach wie vor stark an und damit der Fahrzeugbestand sowie der Energiebedarf für den Verkehr, besonders in den Schwellenländern. Der Transportbereich ist heute schon für ca. ein Fünftel aller von Menschen verursachten CO₂-Emissionen verantwortlich und beansprucht knapp zwei Drittel des gesamten Rohölverbrauches.

In einigen Segmenten des Personentransports kann sich der Bedarf an flüssigem Kraftstoff durch neue Antriebssysteme wie Hybrid- und Elektroantriebe ab dem nächsten Jahrzehnt vielleicht stabilisieren. Wie sich die Elektromobilität entwickelt, kann heute nicht vorhergesagt werden. Ob und vor allem wann Elektroantriebe den Individualverkehr dominieren und den Verbrennungsmotor verdrängen, ist ungewiss. Wann dieser Zeitpunkt erreicht sein wird hängt von vielen Faktoren ab, unter anderem auch stark von der Entwicklung der Kraft- und Rohstoffkosten und von entsprechenden gesetzlichen Rahmenbedingungen in Bezug auf die zukünftigen Verbrauchs- und Abgasziele.

Für andere Fahrzeugsegmente, vor allem für den kommerziellen Bereich, speziell für den Langstreckentransport sowie für Arbeits-, Land- und Baumaschinen aber auch für Schienen und Wasserfahrzeuge, wird es so schnell keine weitgreifende Alternativen zu flüssigen Kraftstoffen geben. Sie haben bekanntlich gegenüber anderen Energieträgern wie Gas und Strom große Vorteile bzgl. Energiedichte, Verfügbarkeit, Handhabung, Lagerung und Transport. Prognosen zur Folge wird in den nächsten Jahrzehnten im Besonderen in den Nicht-OECD-Ländern mit einem sehr starken Anstieg der Gütertransportleistung mit entsprechendem ungebremstem Anstieg der Nachfrage nach Energie gerechnet. Die dominierenden Verbraucher der Zukunft könnten möglicherweise deshalb schwere Nutzfahrzeuge sein. In diesen Bereichen dominiert der Dieselmotor, im Gegensatz zum Personenkraftwagen wo weltweit der Ottomotor dreimal häufiger eingesetzt wird.

Obwohl sich in den nächsten Jahren die Emissionsvorschriften und CO₂-Vorgaben drastisch verschärft werden und mit dem Hybrid- und E-Antrieb theoretisch eine Alternative existiert, werden Verbrennungsmotoren weiterhin die Antriebswelt dominieren. Gründe dafür sind ihre Leistungsfähigkeit, hohe Wirtschaftlichkeit und Vielseitigkeit. Im Mittelstrecken- und

Fernverkehr, dort wo Komfort, Transportleistung und wirtschaftliche Faktoren die Kaufentscheidung dominieren, sind Verbrennungsmotoren bisher konkurrenzlos.

Und Hubkolbenmotoren sind hinter Brennstoffzellen und noch vor Dampfturbinen die Energiewandler mit dem höchsten Wirkungsgrad. Langsam laufende Zweitakt-Schiffsdieselmotoren erreichen Wirkungsgrade von um die 50 %. Schnell laufende Viertakt Dieselmotoren, wie sie z. B. in Nutzfahrzeugen eingesetzt werden, liegen im Bestbereich nur noch eine handvoll Prozentpunkte darunter. Darüber hinaus kann seine Effizienz durch den Einsatz neuer Technologien noch weiter gesteigert werden. Die vor über 100 Jahren begonnene Erfolgsstory des Hubkolbenmotors ist also noch lange nicht zu Ende.

Es lohnt sich deshalb, zukünftige Technologien auch für Nutzfahrzeuge zu entwickeln. Systeme zur Nachnutzung der Restenergie im Abgassystem könnten dabei eine wichtige Rolle spielen. Deren Einsatz ist aus vielen Gründen sinnvoll: Verbrennungsmotoren werden in Nutzfahrzeugen, Arbeits-, Bau- und Landmaschinen sowie Schienenfahrzeugen und Schiffen über lange Zeit im hohen Lastbereich betrieben und haben somit ein hohes Energieangebot im Abgas. Der Betrieb der Motoren ist oft weniger dynamisch als bei Personenkraftwagen, manchmal sogar stationär. Die Abgastemperaturen bei Dieselmotoren sind allerdings für viele Abwärmetechnologien eine Herausforderung. Hier sind kluge Konzepte gefragt, die noch gute Rekuperationsraten ermöglichen. Im Fokus stehen hier im Besonderen leistungsfähige Wärmetauscher und optimale Verbindungstechnologien. Des Weiteren dominieren bei gewerblichen Fahrzeugen die Betriebskosten, wodurch sich zusätzliche Technologieinvestitionen schneller rentieren können.

2.3 Abwärmennutzung

Es gibt viele Möglichkeiten Abwärme zu nutzen. Neben der direkten Verwendung z. B. zum Heizen oder zum Antrieb thermischer Wärmepumpen kann Abwärme in andere, höherwertige Energieformen gewandelt werden, z. B. in chemische, elektrische oder mechanische Energie. Entsprechende Verfahren und Systeme sind lange bekannt und im industriellen Einsatz.

Am verbreitetsten in der Energiewirtschaft und Industrie sind thermodynamische Konverter, die nach dem Clausius-Rankine-Kreisprozess arbeiten. Der Dampfprozess hat im Megawattbereich den Vorteil großer Verbreitung durch sehr gute Wirkungsgrade bei überschaubaren Kosten. Moderne Dampfkraftwerke haben einen theoretischen Wirkungsgrad von über 50% und kommen praktisch in den Bereich von 45%. Die Herausforderung ist, das System bis in den unteren Kilowattbereich herab zu skalieren und dabei Dauerhaltbarkeit, Betriebssicherheit, Wirkungsgrad und die spezifischen Systemkosten (Euro pro Watt) zu erhalten.

Thermoelektrische Konverter konnten sich im breiten industriellen Einsatz zur Stromerzeugung nicht durchsetzen, obwohl deren Grundlagen schon lange bekannt sind und auch seit Jahrzehnten praktische Anwendung finden. Hauptgründe sind die bislang geringen Wirkungsgrade im Vergleich zu anderen Formen der Energiewandlung und die hohen Kosten der Systeme. Zum Einsatz kommen thermoelektrische Generatoren (TEG) bis heute hauptsächlich im Wattbereich in Forschungsprojekten, wie z. B. für die Stromversorgung mobiler medizinischer Systeme aus Körperwärme, für nichtkommerzielle Weltraum- und Militärapplikationen, für industrielle Nischenanwendungen wie Energieerzeugung bei Offshore-Anlagen und für Freizeitprodukte wie Armbanduhren und Campingausrüstungen. Die Herausforderung für diese Technologie ist, Systeme bis hoch in den Multikilowattbereich mit ausreichenden Wirkungsgraden und geringen spezifischen Systemkosten (Euro pro Watt) zu entwickeln.

2.4 Thermoelektrik

Mit ihren herausragenden Eigenschaften gehört Thermoelektrik zu den interessantesten Technologien. Ihre Vorteile sind bezeichnend: Thermoelektrische Konverter und Wärmepumpen greifen weder auf chemische noch mechanische Prozesse zurück und besitzen deshalb keine bewegten Teile und keine Fluide. Insbesondere kann auf den Einsatz von umwelt- und gesundheitsgefährdenden Medien verzichtet werden. Sie arbeiten geräuschlos und emissionsfrei und schon bei kleinen Temperaturdifferenzen. Sie sind flexibel an Einsatzbedingungen adaptierbar und in jeder Hinsicht skalierbar. Die im Vergleich zu anderen Technologien geringe Komplexität macht sie robust, wartungsfrei und langlebig. Und sie haben damit Vorteile bezüglich Raumbedarf, Gewicht, Integrationsaufwand. Diese außergewöhnlichen Eigenschaften zeichnen sie besonders für den Einsatz in Fahrzeugen und anderen mobilen Systemen aus.

Die Industrie ist seit langem wegen ihren herausragenden Eigenschaften an der Thermoelektrik interessiert. Schließlich versorgen thermoelektrische Generatoren seit mehreren Jahrzehnten im Dauereinsatz Raumfahrzeuge zuverlässig mit Strom. Das Interesse stieg weiter an, als Ende des letzten Jahrhundert die thermoelektrische Welt verkündete, dass ZT-Werte größer 1 möglich sind. Auch die Automobilindustrie wandte sich nun der Technologie zu. Dort wird seitdem mit Interesse die Entwicklung beobachtet. Ihre Möglichkeiten und die damit einhergehenden Chancen für die Automobilindustrie sind erkannt. In den letzten Jahren hat die Automobilindustrie vor dem Hintergrund sich ändernder Rahmenbedingungen für Mobilität, steigender Energiekosten und schärferer Verbrauchs- und Abgasgesetze die Möglichkeiten und Potenziale der Abwärmenutzung untersucht. Es wurde erkannt, dass Thermoelektrik mit elektrischem Strom aus Abwärme zur Effizienzsteigerung künftiger Fahrzeuggenerationen beitragen kann. Die Automobilindustrie beteiligt sich aktuell an diversen Forschungsprojekten. Im Fokus der Projekte stehen oft TE-Materialien, TE-Module und die notwendigen Verbindungstechnologien sowie Komponenten und Systeme für Generatoren und deren optimale Integration. Diverse Prototypen wurden von OEM und Systemlieferanten aufgebaut. Es konnte gezeigt werden, dass und wie die Technologie im Fahrzeug grundsätzlich funktioniert. Auch Schwachstellen und Entwicklungsbedarf sind identifiziert. Aktuell werden einige Prozent Kraftstoffeinsparung für möglich gehalten. Abhängig vom Fahrzeug und Antrieb sowie Einsatzart und Fahrweise werden mögliche Zielwerte von bis zu 5% Kraftstoffeinsparung publiziert. Langfristig können mit intelligenten Energiekonzepten und mit TE-Materialien der zweiten und dritten Generation, die es bisher nur in wissenschaftlichen Veröffentlichungen oder bestenfalls in Laborräumen gibt, diese Erwartungen sicher erfüllt werden. Die Automobilindustrie unterstützt auf diese Weise den Weg der Thermoelektrik aus den Forschungslaboren in die industrielle Vorentwicklung.

Dämpfend auf die Bemühungen wirkt sich allerdings noch aus, dass die aktuelle Gesetzgebung Maßnahmen zur CO₂-Reduktion, die nicht oder nur teilweise im Fahrzyklus wirksam sind, bei der Berechnung des CO₂-Ausstoßes nicht adäquat berücksichtigt. Hier gibt es aber Bemühungen das zu ändern. Ein Ansatz waren die sogenannten Eco-Innovationen. Sie sollen CO₂-relevante Technologien berücksichtigen, die überhaupt nicht im Zyklus wirksam sind aber die CO₂-Bilanz im Kundenbetrieb nachweislich verbessern. Der bisherige Regulierungsentwurf gibt scheinbar nur wenig Anreize, solche Systeme schnell einzusetzen. Mit einer sinnvollen Gestaltung kann und muss der Gesetzgeber aber dazu beitragen, dass innovative Maßnahmen zum Klimaschutz entwickelt und in den Markt gebracht werden. Der Verband der Automobilindustrie setzt sich für neue Regelungen ein.

Neue Verfahren und Fahrzyklen (WLTP und RDE: Real-World Driving Emissions) sind in Sicht und könnten bis 2020 eingeführt sein.

Auch die übrigen Fahrzeuge und verbrennungsmotorisch angetriebenen Systeme werden mit strengeren Abgasvorschriften konfrontiert und leiden ebenfalls unter den steigenden Energiepreisen. Durch die Nutzung von Abwärme und Wandlung in elektrischen Strom und die damit mögliche Entlastung des Antriebs kann auch bei ihnen Kraftstoff eingespart werden.

Die Hybridtechnologie verfolgt den gleichen Weg und hat es im gewissen Sinne bereits vorgemacht. Hier wird in vielen Fahrzeugen heute schon durch eine intelligente Generatorsteuerung kinetische „Verlustenergie“ rekuperiert, sofern ein entsprechend dynamischer Betrieb es zulässt. Und der so quasi „umsonst“ gewonnene Strom entlastet den Antrieb, spart Kraftstoff und reduziert damit die Emissionen. Genauso wirken TEGs, nur dass sie nicht auf einen dynamischen Betrieb beschränkt sind. Sie liefern fast im gesamten Betriebsbereich Strom, profitieren aber sehr von einem höherlastigen, eher phlegmatischen Betrieb.

In der Vergangenheit haben Berichte über neue und bedeutende Erfolge bei der Entwicklung von Thermoelektrika stets das Interesse der Industrie wiedererweckt und oft entscheidende Anstöße für unzählige Aktivitäten von Forschung und Industriegeliefert. Der Haupterfolgsweg sind weiterhin die Thermoelektrika. Ein großer und entscheidender Teil der wichtigsten Faktoren und Schlüsselgrößen, die für den erfolgreichen Einsatz thermoelektrischer Konverter für die Abwärmerecuperation – im speziellen in Fahrzeugen - verantwortlich sind, stehen in direktem Zusammenhang mit thermoelektrischen Materialien, deren Herstellung, Verarbeitung und Integration. Die entscheidenden Größen für TE-Material und -Module sind: Wirkungsgrad, Einsatztemperatur, Langzeitstabilität, Toxizität, Umweltverträglichkeit, Verfügbarkeit, Herstellung und Verarbeitung im industriellen Maßstab und Kosten.

Das Thermoelektrische Generatoren in der automobilen Welt bisher nicht über den ersten Prototypenstatus hinausgekommen sind und die noch deutlich spürbare Zurückhaltung bei der Automobilindustrie für thermoelektrische Lösungen ist sicher zum überwiegenden Teil auf den noch deutlichen Abstand der Technologie zur Großserienreife zurückzuführen. Die Situation würde sich schnell verändern, wenn für den Fahrzeugeinsatz geeignete Thermoelektrika, Module und System in ausreichender Qualität und Menge zur Verfügung stehen. Hier helfen bereits die zahlreichen Thermoelektrik-Forschungsprogramme, die von den Regierungen weltweit gestartet wurden: In Europa, Asien und den USA beschäftigen sich Forschergruppen an Universitäten und in der Industrie mit der Entwicklung neuer thermoelektrischer Materialien und Module sowie mit deren Weg aus den Laboren in die Industrialisierung.

Es ist Ziel dieses Projekts den Weg thermoelektrischer Generatoren in die Fabrikhallen der Industrie, im Besonderen der Automobilindustrie, zu ebnen.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

3.1 Arbeitspakete

Am Projektvorhaben beteiligten sich sieben Partner aus Wissenschaft und Industrie, die sich bereits vor dem Projektstart mit dem Thema Abwärmenutzung intensiv beschäftigt haben. Jeder Partner verantwortete entsprechend seinen Kernkompetenzen und technologischem Know-How einen Teilbereich des Entwicklungsumfangs.

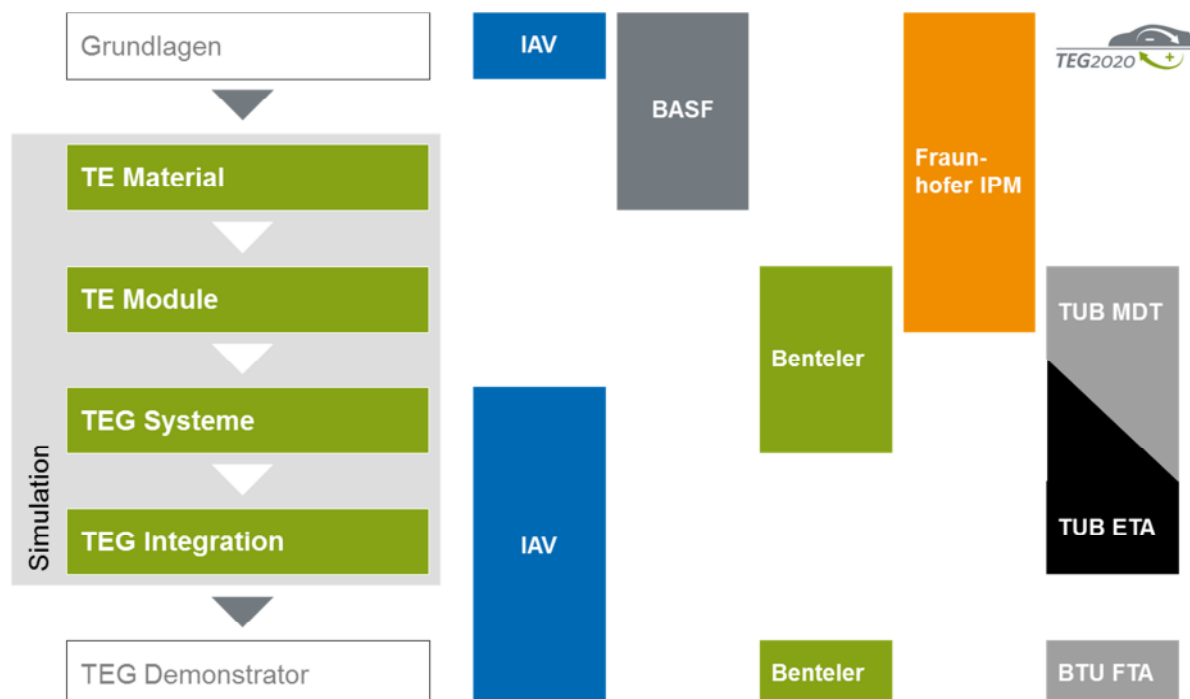


Abbildung 3: Jobsplit zwischen den Projektpartnern

BASF: BASF ist ein führender Chemieunternehmen und arbeitet seit einigen Jahren an der Entwicklung von TE-Materialien mit Schwerpunkt Bleitellurid.

Im Rahmen des Projekts liefert BASF Bleitellurid-TE-Material in ausreichender Menge und Qualität für den Modulbau. Dafür soll die Herstellung des Materials auf Multi-Kilogramm-Maßstab skaliert werden.

Ein weiterer Entwicklungsschwerpunkt ist die Synthese, Charakterisierung und Herstellung von erfolgsversprechenden zukünftigen TE-Materialien aus der Materialklasse der Half-Heusler-Verbindungen.

Fraunhofer IPM: Das Fraunhofer IPM ist eine der bedeutendsten deutschen Forschungsgruppen im Bereich der Thermoelektrik. Im Institut etabliert sind Materialentwicklung, Aufbau- und Verbindungstechnik inklusive der metallischen Kontaktierung zur Modulherstellung, TE-Messtechnik sowie Entwicklung, Simulation und Berechnung, Aufbau und Test von TE-Komponenten und TE-Systemen. Die vom Fraunhofer IPM geplanten Aktivitäten in diesem Projekt zielen im Wesentlichen auf die folgenden Arbeitsumfänge:

- Auslegung TE-Material, -Schenkel und -Module u. a. basierend auf Simulationsrechnungen
- Unterstützung bei der Material-Recherche, -Analyse, -Bewertung, -Auswahl und Beschaffung
- Homogenisierung, Optimierung, Konfektionierung und Charakterisierung der TE-Materialien für den Modulbau
- Entwicklung und Herstellung segmentierter TE-Schenkel für Probekörper und Versuchsmodule
- Entwicklung von Strategien zur Kompensation unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten, Auswahl geeigneter Kontaktmaterialien, Entwicklung geeigneter Verbindungs- und Beschichtungsmethoden
- Entwicklung und Test einer auf die Projektziele abgestimmten durchgehend materialschlüssigen Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) und Entwicklung der elektrischen Kontakte und Isolierungen zu den verschiedenen Materialtypen einschließlich der vollständig stoffschlüssigen Ankopplung an die Warm- und Kaltseitenwärmetauscher
- Entwicklung und Test einer thermischen Isolation zur Vermeidung parasitärer Wärmeverluste zwischen den TE-Schenkeln, Modulen und Wärmeträgern
- Entwicklung und Test einer Kapselung/Dichtung zum Schutz des TE-Materials vor Umwelteinflüssen
- Fertigung von Modulen für Prototypen und Versuch sowie zusammen mit dem Partner Benteler für den Demonstrator
- Test der hergestellten Module zusammen mit den Partnern

Benteler: Benteler Automobiltechnik GmbH ist einer der größten deutschen Automobilzulieferer. Das Unternehmen fertigt u. a. Komponenten für PKW Abgasanlagen und verfügt über ein umfangreiches Know-how im Bereich der Konzeptionierung, Dimensionierung, Simulation und Fertigung von Wärmeübertragern im Abgasstrang. Die von Benteler geplanten Aktivitäten in diesem Projekt zielen im Wesentlichen auf die folgenden Arbeitsumfänge:

- Zusammen mit den Partnern entwickelt, bewertet und wählt Benteler Konzepte aus, die geeignet sind, die Ziele des Projekts zu erreichen. Das beinhaltet u. a. die Lastenhefterstellung und die Vorauslegung erfolgsversprechender Konzepte für die Abgasführung einschließlich Bypass und Abgasklappen, TE-Module sowie der Warm- und Kaltseitenwärmeübertrager. Dazu werden detaillierte numerische Simulationen der Stoff- und Wärmeströme durchgeführt. Des Weiteren werden Konzepte für eine Systemintegration, im Besonderen der thermischen Kopplung und notwendigen Kontaktierungsverfahren, der in dem Verbundprojekt entwickelten TE-Module von Benteler erarbeitet und geprüft.
- Ein weiteres Ziel von Benteler ist die Erarbeitung von Fertigungskonzepten für thermoelektrische Module. Dies beinhaltet die Fertigung aller Module für Versuchszwecke und Demonstratoren für mindestens eine Zielanwendung. Nach Übergabe der AVT und Fertigungstechnologie für die Module seitens des Fraunhofer IPM übernimmt Benteler die Definition, Entwicklung und Erprobung aller zur Modulfertigung notwendigen Fertigungskonzepte und -technologien, um Lösungsansätze für eine spätere Fertigung über den Labormaßstab hinaus zu definieren. Die Fertigungsverfahren

werden im Rahmen einer Herstellbarkeitsstudie auf ihre Großserientauglichkeit geprüft und bewertet. Außerdem werden notwendigen Fertigungstechnologien zur Realisierung der Wärmeübertrager auf der Heiß- und der Kaltseite definiert und erprobt. Dies betrifft in erster Linie die Auswahl geeigneter Fügeverfahren. Zu diesem Zweck werden Machbarkeitsstudien und bei geeigneten Fügeverfahren die qualitätsbestimmenden Fügeparameter optimiert.

- Benteler entwickelt und liefert die Komponenten für den TEG Demonstrator einschließlich notwendiger Versuchsteile. Im Speziellen gehören hierzu alle abgas- und kühlwasserführenden Bauteile, einschließlich Abgas-Bypass und -Klappen, Ventile, Betätigungs- und Verstellrichtungen einschließlich Aktuatoren, Wärmeübertrager sowie Gehäuse und Bauteile für mechanische und thermische Entkopplung, Isolierungen, Dichtungen, Kupplungen, Halter und Befestigungen.

IAV: Seit ihrer Gründung arbeitet IAV an Innovationen der nachhaltigen Mobilität. IAV verfügt über Kompetenzen für das gesamte Fahrzeug: Ihre Mitarbeiter sind Experten auf den Gebieten Antrieb, Elektrik und Elektronik sowie Fahrzeugentwicklung und unterstützen Automobilhersteller bei der Entwicklung neuer Technologien bis in die Serie. Seit mehreren Jahren arbeitet IAV daran, ungenutzte Wärmeenergie aus dem Abgasstrom zu gewinnen, um so den Kraftstoffverbrauch und die CO₂-Emissionen zu reduzieren. Die Aktivitäten von IAV konzentrieren sich vor allem auf die Auslegung automotivtauglicher TEG-Systeme und ihre Integration in aktuelle und künftige Automobile. Die Erfahrungen und Kompetenzen auf diesem Gebiet werden bei der Systemauslegung und -integration, der Gesamtsimulation, beim Demonstratoraufbau und der Durchführung der Tests und Erprobungen eingebracht. Die von IAV im Projekt geplanten Aktivitäten zielen im Wesentlichen auf die folgenden Arbeitsumfänge:

- Grundlagen: In diesem Projekt werden Konzepte und Systeme für thermoelektrische Generatoren zur Rekuperation von Verlustwärme aus Verkehrs-, Antriebs-, Arbeits- und Energiesystemen entwickelt, mindestens ein Demonstrator aufgebaut und in mindestens einem Zielsystem betrieben. Primäres Zielsystem sind Personenkraftwagen. Aufgrund ihrer großen Bedeutung werden aber auch Nutzfahrzeuge und BHKW soweit möglich berücksichtigt. Für die Entwicklung ist es erforderlich, die Eigenschaften und Anforderungen der Zielsysteme zu kennen. Diese werden sich mit großer Wahrscheinlichkeit in den nächsten Jahren ändern. Deshalb werden relevante Technologietreiber und -trends identifiziert und ihr Einfluss auf die für Abwärmenutzung wichtigen Eigenschaften der Zielsysteme abgeschätzt.
- Simulation: Um die breite Zielstellung dieses Vorhabens im vorgegebenen Zeit-, Ressourcen und Budgetrahmen zu realisieren, führte und sicherte IAV in diesem Verbundprojekt einen großen Teil des Entwicklungsprozesses über virtuelle Tools/ Systementwicklung/ Entwicklungsumgebung. Unter anderem wird eine bei IAV entwickelte Simulationsplattform eingesetzt und im Projektverlauf an die projektspezifischen Bedürfnisse und Erfahrungen angepasst sowie durch numerische Modelle und Methoden der Partner ergänzt. Die Plattform und Modelle berücksichtigen neben dem TEG alle relevanten Bereiche der Zielsysteme. Für Fahrzeuge sind das die Verbrennungskraftmaschine, das Kühl- und Abgassystem, das Bordnetz sowie alle relevanten Umgebungs- und Betriebsparameter des Zielsystems. Die Simulationsplattform verfügt über Modelle verschiedener Detaillierungsgüte, um eine bedarfs-, ressourcen- und rechenzeitgerechte Untersuchung zu ermöglichen. Im Rahmen der Gesamtsystemsimulation wird der thermoelektrische Generator (TEG) innerhalb seines Zielsystems zusammen mit allen Subsystemen betrachtet. Folgende Aufgaben wurden durchgeführt:

- Randbedingungen und Grenzwerte bestimmt und überprüft
 - TEG-Grunddimensionierung und TEG-Detailauslegung unterstützt: z. B. Anzahl, Querschnitt und Länge der Abgasfluten, Wärmeübertragerabmessungen und -werkstoffe (Wärmeleitwert), Modulanzahl und -grundfläche, Schenkelzusammensetzung und -geometrie auf der Basis geometrischer, thermischer und strömungstechnischer Randbedingungen ermittelt
 - Betriebsstrategien entworfen und überprüft
 - Elektrische Leistung und Verbrauchsvorteil sowie anderer Zielkriterien für relevante Betriebsprofile (Fahrzyklen) berechnet
 - Einflüsse von Subsystemen und Komponenten auf Zielkriterien im Rahmen von Empfindlichkeits- und Potenzialanalysen bestimmt
 - Systemische Wechselwirkungen untersucht
 - TEG-Analyse und -Optimierung vorgenommen
 - Daten für relevante Zielkriterien zur Bewertung unterschiedlicher Konzepte, Auslegungen und Betriebsstrategien geliefert.
- Innovative TE-Module: In diesem Projekt sollen neue, innovative TE-Module entwickelt, aufgebaut, erprobt und in dem Demonstrator eingesetzt werden. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie alle für den Betrieb notwendigen Komponenten enthalten und nach möglichst einfacher Integration in die thermischen Medien des Zielsystems eine elektrische Energie liefern. Die Module umfassen deshalb neben dem TE-Funktionsmaterial mit Kontakten auch ggf. erforderliche thermische und elektrische Isolierung sowie Kapselung/Träger/Gehäuse, die Kalt- und Warmseitenwärmeübertrager, Schnittstellen zu den thermischen Medien, elektrische Wandler für die Integration ins Stromnetz des Zielsystems sowie notwendige Kontroll- und Kommunikationssysteme. Zusammen mit den Partnern wurden Konzepte für innovative Module entworfen, entwickelt, analysiert, bewertet und diejenigen ausgewählt, die erwarten ließen, dass sie die Projektziele erreichen. Das beinhaltet u. a. intensive Berechnungen mit Hilfe der IAV-Simulationsplattform mit dem Ziel einer detaillierten Auslegung der ausgewählten Konzepte sowie umfangreiche Designarbeit. Es wurden sowohl planare als auch runde Modulkonzepte untersucht. Detaillierte numerische Simulationen der Stoff- und Wärmeströme wurden zusammen mit Benteler durchgeführt, um das Verhalten der Wärmeübertrager zu analysieren und zu optimieren. Des Weiteren wurden Konzepte und Spezifikationen für die thermische Kopplung des thermoelektrischen Materials mit den Wärmeübertragern einschließlich elektrischer Kontaktierung, notwendiger elektrischer und thermischer Isolierung sowie Design und Spezifikationen der Kalt- und Warmseitenwärmeübertrager erarbeitet.
 In Ergänzung zu den geplanten Arbeitsumfängen wurde von IAV ein Konzept für eine zielführende AVT entworfen, verifiziert und prototypenhaft umgesetzt. Sie zeichnet sich durch einen durchgehenden materialschlüssigen Aufbau mit möglichst wenig Bauteilen und Schnittstellen im Wärmepfad aus und beinhaltet spezielle Wärmeübertrager. Um das Konzept zu bestätigen wurden einige Prototypenmodule mit Bi₂Te₃ aufgebaut und analysiert. Dazu notwendige Fertigungstechnologien und -einrichtungen wurden entwickelt und hergestellt bzw. extern beschafft. Zusätzlich mussten für Vergleichsuntersuchungen und die Inbetriebnahme des Demonstrators kommerziell verfügbare TE-Module gekauft und auf IAV-Prüfständen analysiert werden. Für letzteres musste von der ursprünglichen Planung, ein nur stoffschlüssiges Modulkonzept zu entwickeln, abgewichen und um eine Konzepterweiterung für kraftschlüssige Varianten ergänzt werden.

- TEG-System: Thermoelektrische Generatoren können in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt werden, um bisher energetisch nicht genutzte Abwärme für die Stromerzeugung zu verwenden. Das verbessert ihre Energieeffizienz und reduziert die CO₂-Emission. Die Entwicklung eines TEG für ein Zielsystem und die Beschaffung bzw. Herstellung aller notwendigen Komponenten ist aber in der Regel mit einem erheblichen Ressourcen- (Know-how), Budget- und Zeitaufwand verbunden. Das Projekt verfolgt deshalb das Ziel, einen Baukasten mit standardisierten, aufeinander abgestimmten TEG-Komponenten zu entwerfen, dabei möglichst viele Serienteile der Zielsystemwelt zu verwenden und anhand eines Demonstrators zu verwirklichen. Zusammen mit den Partnern erarbeitete IAV Konzepte für sämtliche Komponenten und Subsysteme eines TEG-Baukastens. Die Auslegung, Analyse, Bewertung und Auswahl der Konzepte erfolgte ebenfalls durch Berechnung mit Hilfe der IAV-Simulationsplattform. Die Konzepte wurden parallel in entsprechende dem Zielsystem angepasste, bauraumkompatible Designs umgesetzt und hinsichtlich ihres Beitrags zur Verwirklichung der Projektziele untersucht.
In Ergänzung zu der ursprünglichen Projektplanung wurden von IAV auch hier über die geplanten Arbeitsumfänge hinausgehend Arbeiten jenseits der Konzeptphase übernommen. Für Bauteile der Bereiche Medientransport und -regelung (stofflich), Wärmeübertrager sowie Gehäuse und Befestigung wurden fertigungsgerechte Auslegungen und Konstruktionen der (Baukasten-)Komponenten erstellt, Fertigungsverfahren ausgewählt, Prototypenteile hergestellt bzw. beschafft, getestet und optimiert. Die Notwendigkeit auch kommerzielle TE-Module im Projekt einzusetzen hatte Erweiterungen des Generator-Aufbaukonzepts zur Folge. Deshalb wurden kraftschlussgeeignete Wärmeübertrager, Gehäuse und Befestigungskonzepte entwickelt und für den Aufbau des Demonstrators beschafft.
- TEG-Integration: In diesem Projekt werden TEG-Konzepte für ein großes Spektrum von Zielsystemen aus den verschiedenen Industrie-, Energie- und Transportbereichen (Antriebs-, Arbeits-, Energie-, Verkehrssystemen) entwickelt. Damit die Integration und der Betrieb der entsprechenden TEG-Systeme in den anvisierten Zielsystemen möglich ist, müssen die Systeme auf die Eigenschaften und Anforderungen der Zielsysteme hin abgestimmt sein – was durch den modularen Aufbau möglich wird - und zusätzliche Konzepte, Strategien, Funktionen, Komponenten und Systeme für das Energie-, Thermo-, und Abgasmanagement, sowie für die funktionale, mechanische, hydraulische und elektrische Integration in die Zielsysteme und, sofern erforderlich, ein zusätzliches externes Kühlsystem (Rückkühlung) entwickelt und bereitgestellt werden.
In diesem Projekt wurden als Zielsysteme für den Demonstrator ein PKW der Mittelklasse (Volkswagen Golf mit Ottomotor) und ein Mini BHKW (Lichtblick/Volkswagen, VW EcoBlue) mit Gasmotor festgelegt. Die relevanten Eigenschaften und Anforderungen der Zielsysteme, im Speziellen die betroffenen Bereiche, Subsysteme, Komponenten und Funktionen des Zielsystems sind bereits bekannt, sowie die bei der Integration der TEG zu berücksichtigenden Randbedingungen (z. B. Bauraum, Gewicht, Umgebungssituation, NVH-Grenzen etc.). Darauf aufbauend wurden alle erforderlichen Maßnahmen zur Integration identifiziert, Integrationskonzepte mit den Partnern erarbeitet, Einbauorte bewertet und ausgewählt, Komponenten für die mechanische, hydraulische und elektrische Integration ausgelegt, entwickelt, beschafft, integriert und in Betrieb genommen. Mit Hilfe des IAV-Simulationssystems wurden Entwürfe für das Energie-, Thermo- und Abgasmanagement konkretisiert, überprüft und optimiert. Notwendige Funktionen des TEG-Systems, sowie die erforderlichen Mess-, Kontroll- und Regelungssysteme wurden definiert, entworfen, appliziert und in die Fahrzeugrechner portiert. Anschließend wurde der vollständige Demonstrator mit der IAV-Abgas-Klappe auf dem Laborprüfstand erprobt, analysiert und nachjustiert. Nach erfolgreichem Abschluss der Prüfstandstests konnte das komplette System für den finalen Aufbau

freigegeben werden.

Für den Golf ist ein externes Kühlsystem zwar nicht notwendig, wurde aber ausgelegt und integriert, da es den Versuchsbetrieb erleichtert, erweitert und den Integrationsaufwand reduziert, denn in diesem Fall muss das Fahrzeugkühlsystem nicht neu ausgelegt und überprüft werden. Ein autarkes Kühlsystem wurde ausgelegt, modelliert, durch Simulation abgebildet und für relevante Betriebszustände überprüft und optimiert. Auf der Basis von Fahrzeugserienteilen konnte ein einfaches aber wirkungsvolles autarkes Kühlsystem aufgebaut, ins Fahrzeug integriert, vermessen und die für den Generator eine ausreichende Leistungsfähigkeit nachgewiesen werden.

- TEG-Demonstrator: Der Aufbau mindestens eines voll funktionsfähigen Demonstrators und die experimentellen Arbeiten sind Ziel des Projekts und dienen dem Nachweis, dass die erarbeiteten und umgesetzten Konzepte und Systeme für die ausgewählten Anwendungen und Zielsysteme geeignet sind. Auch ist die Integration in einen Versuchsträger als unabdingbare Voraussetzung für den erfolgreichen Technologietransfer zu betrachten, z. B. in die Automobilindustrie. Da automobile Zielsysteme wegen ihres enormen Marktpotenzials zu den Schlüsselanwendungen zählen, wurde im Projekt vorrangig der Einsatz des entwickelten TEG-Baukastens in einem Personenkraftwagen verfolgt. Auch das zweite Zielsystem, ein Mini BHKW, besteht in den relevanten Bereichen aus Komponenten des Automobilbaus. Alle erforderlichen Spezifikationen für Demonstrationszielsysteme wurden im Verlauf des Projekts zusammen mit den Partnern definiert. Detaillierte Festlegungen erfolgten u. a. auf Basis von Simulationsrechnungen und berücksichtigen die geplanten Eigenschaften und Anforderungen der Zielsysteme (z. B. Motorengröße, Fahrzeuggröße) sowie die möglichen bzw. abzudeckenden Einsatzbedingungen und Betriebszustände. Die für das TEG-System erforderlichen Bauteile wurden von Benteler in enger Abstimmung mit IAV hergestellt oder bei externen Lieferanten beschafft und zur Montage an IAV ausgeliefert. Hierzu erhielt Benteler nach erfolgreichem Prototypentest bei IAV entsprechende Beschaffungsunterlagen und Empfehlungen für geeignete Fertigungsverfahren. Die gelieferten Bauteile wurden in der Regel zu Subsystemen vervollständigt und mit Hilfe eines einfachen Laborgenerators auf dem Heißluftprüfstand der IAV getestet und wenn erforderlich optimiert. Nach erfolgreichen Komponentenprüfung konnten am Ende zwei Generatoren in verschiedenen Varianten und mit unterschiedlichen kommerziellen Modulen aufgebaut, in Betrieb genommen und Funktionstests durchgeführt werden. Ein Generator wurde auf einem Dieselmotorprüfstand mit einem externen, regelbaren Bypass montiert und über mehrere Tage erprobt. Der zweite Generator mit internem Bypass, IAV-Abgasklappen und kommerziellen Hochtemperatur- und Raumtemperaturmodulen wurde im Versuchsfahrzeug verbaut und in Betrieb genommen. Dazu wurde das Versuchsfahrzeug vorher für die Aufnahme des Generators vorbereitet.

TUB-ETA: Das Fachgebiet Maschinen- und Energieanlagentechnik gehört zum Institut für Energietechnik. Sowohl in der Lehre als auch in der Forschung liegt der Schwerpunkt auf dem Gebiet der Wärme- und Stoffübertragung und der Energieumwandlung.

Im Rahmen des Projekts arbeitet TUB-ETA eng mit IAV zusammen und verantwortet die Entwicklung von numerischen Simulationsmodellen der TEG-spezifischen Wärmeübertrager sowie der kompletten TE-Modulen. Die Modelle weisen einen hohen Detaillierungsgrad auf und werden in die IAV-Simulationsplattform integriert. Sie ermöglichen sowohl offline als auch Echtzeit-Simulationsuntersuchungen und stellen die Grundlage für die Hardware-in-the-Loop-Simulationen am Prüfstand und im Fahrzeug dar.

TUB-MDT: Das Fachgebiet Elektronische Mess- und Diagnosetechnik gehört zum Institut der Energie- und Automatisierungstechnik der Technischen Universität Berlin. Seine Forschungsschwerpunkte liegen u. a. in der datenbasierten und physikalisch-orientierten Modellbildung nichtlinearer dynamischer Systeme, Methoden der Entwicklungssystematik in der Antriebsentwicklung und drahtlose Sensornetzwerke.

Im Rahmen des Projekts entwickelt TUB-MDT einen DC/DC-Wandler, der die aus dem TEG erzeugte elektrische Energie an das Fahrzeug-Bordnetz koppelt und für ein intelligentes Energiemanagement sorgt. Dies beinhaltet eine simulative Abbildung und Untersuchung von unterschiedlichen elektrischen Verschaltungsstrategien der TE-Materialien (Schenkel) und TE-Module sowie Erarbeitung von Regel-, Optimierungs- und Betriebsstrategien.

Weiterhin setzt TUB-MDT das entwickelte und virtuell abgeprüfte DC/DC-Wandler-Konzept um und fertigt funktionsfähige Prototypenteile, die speziell für die Zielanwendung (PKW) ausgelegt und dimensioniert werden.

BTU- FTA: Der Lehrstuhl Fahrzeugtechnik und –antriebe ist in das Institut Verkehrstechnik (IVT) der Brandenburgische Technische Universität Cottbus integriert. Er behandelt in Forschung und Lehre die Grundlagen und Anwendungen der Fahrzeug- und Antriebstechnik, der Motorradtechnik sowie Alternativer Antriebe. Die Forschungsschwerpunkte liegen insbesondere auf dem Gebiet des Wärme- und Energiemanagements von Kfz-Antrieben (Motor und Antriebsstrang)einschließlich der Umsetzung und Validierung entsprechender Maßnahmen. Des Weiteren bestehen umfangreiche Erfahrungen in der Simulation von Abwärmenutzungskonzepten und Kühlkreisläufen sowie in der Beurteilung von Verbrauchs- und Emissionspotenzialen in gesetzlichen Zyklen wie auch im realen Kundenbetrieb.

Im Rahmen des Projekts untersucht BTU-FTA den Einfluss des TEG auf den Verbrennungsmotor, seine Peripherie (z. B. Kühlsystem, Bordnetz) und das Gesamtsystemverhalten. Dafür sind diverse reproduzierbare Fahrzeugtests auf einen Rollenprüfstand vorgesehen. Weiterhin werden die Auswirkung des TEG auf Kraftstoffverbrauch und Emissionen in unterschiedlichen Fahrzyklen und Betriebspunkten gemessen und analysiert.

Die realen Fahrzeugversuche ermöglichen auch die Verifizierung der Ergebnisse aus den Echtzeit-Simulationsrechnungen mit den tatsächlich gemessenen Werten. Dadurch kann die Güte der Simulation überprüft und verbessert werden.

3.2 Arbeits- und Zeitplan

Während der Antragsphase haben die Partner einen detaillierteren Projektstrukturplan mit groben Liefergegenständen ausgearbeitet (s. Abbildung 4). Im Projektverlauf mit der Konkretisierung des Zielkatalogs und der Erarbeitung der Anforderungen und Spezifikationen an den zu entwickelnden Umfängen wurden die Entwicklungsschnittstellen zwischen den Partnern präzisiert sowie die gemeinsam zu erzielenden Projektergebnisse abgestimmt und die Verantwortlichkeiten der einzelnen Partner bestätigt.

Der im Antrag veröffentlichte Projektterminplan musste zum Projektbeginn angepasst werden, um die viermonatige Terminverschiebung, begründet durch die verspätete Projektbewilligung, zu berücksichtigen (s. Abbildung 5).

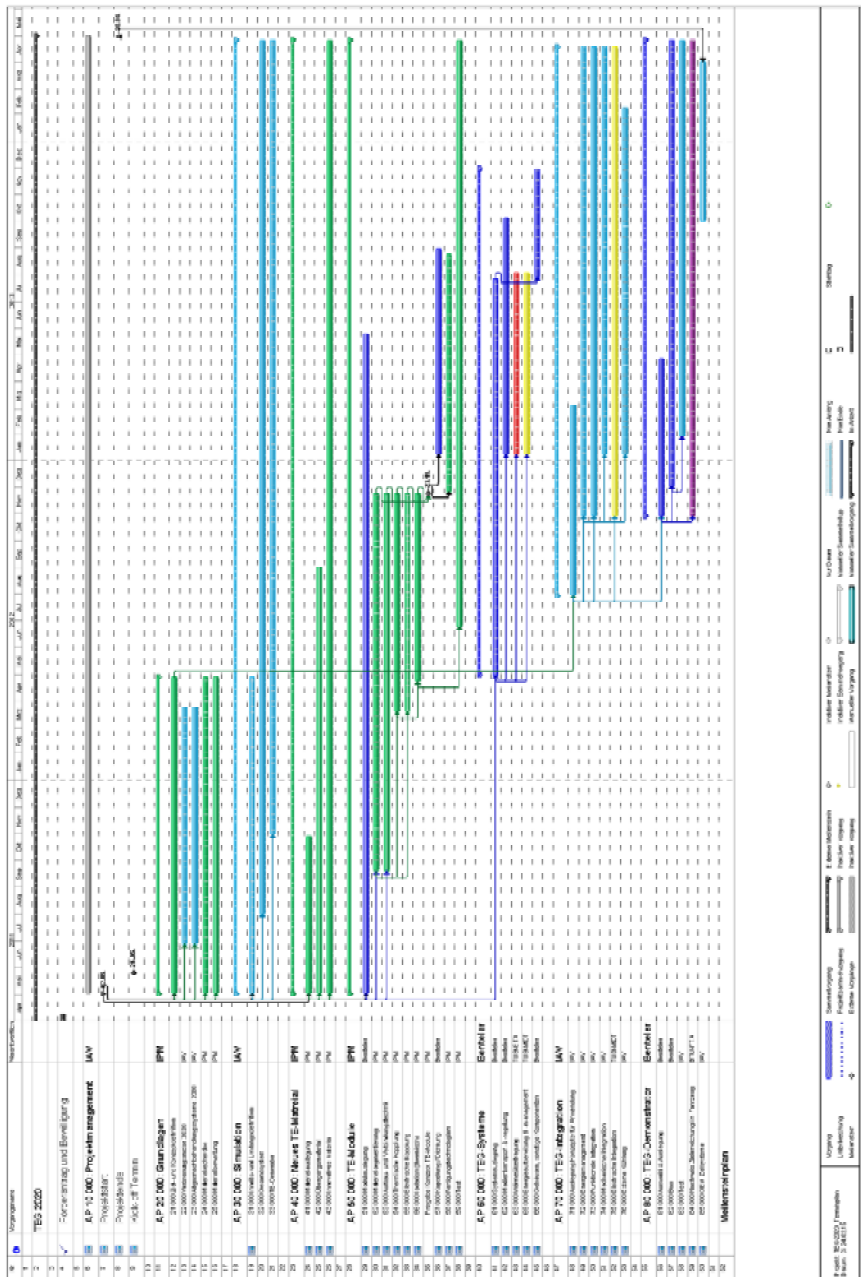


Abbildung 5: Projektterminplan

Das Projektziel - ein funktionsfähiger thermoelektrischer Generator zu entwickeln und als Prototypensystem auf dem Prüfstand und in einem Demonstratorfahrzeug zu integrieren und validieren - erfordert eine besondere Koordination und Synchronisation der Entwicklungsaktivitäten aller Partner. Dafür haben die Partner nach Abschluss der Konzeptentwicklungsphase einen gesonderten Terminplan für den TEG-Demonstrator erstellt (s. Abbildung 6). Rückwärtsgerechnet vom Projektendtermin, unter Berücksichtigung der notwendigen Zeitdauer für Teilefertigung, Systemaufbau und -Montage sowie mehrstufige Tests und Validierung, ergab sich Ende April 2013 (12 Monate vor Projektende) als Deadline für die Verfügbarkeit des TEG-Prototypensystems der zweiten Baustufe.

In der Projektplanung ist von der Realisierung von zwei Baustufen des TEG-Systems ausgegangen. Die ersten Prototypenteile (Baustufe 1) müssen unter Laborversuche die Umsetzbarkeit des Gesamtkonzepts nachweisen sowie ihre Funktion bestätigen. Aus den vom Versuch gewonnen Erkenntnissen leiten sich ggf. Optimierungsmaßnahmen und Lösungsansätze zur Verbesserung von Design, Stabilität, Systemschnittstellen, Funktion, etc. ab, die in die zweite Baustufe einfließen. Daraus werden Bauteile in größerer Stückzahl und mit dem erforderlichen Reifegrad gefertigt, aus denen das TEG-Demonstratorsystem aufgebaut und erprobt wird.

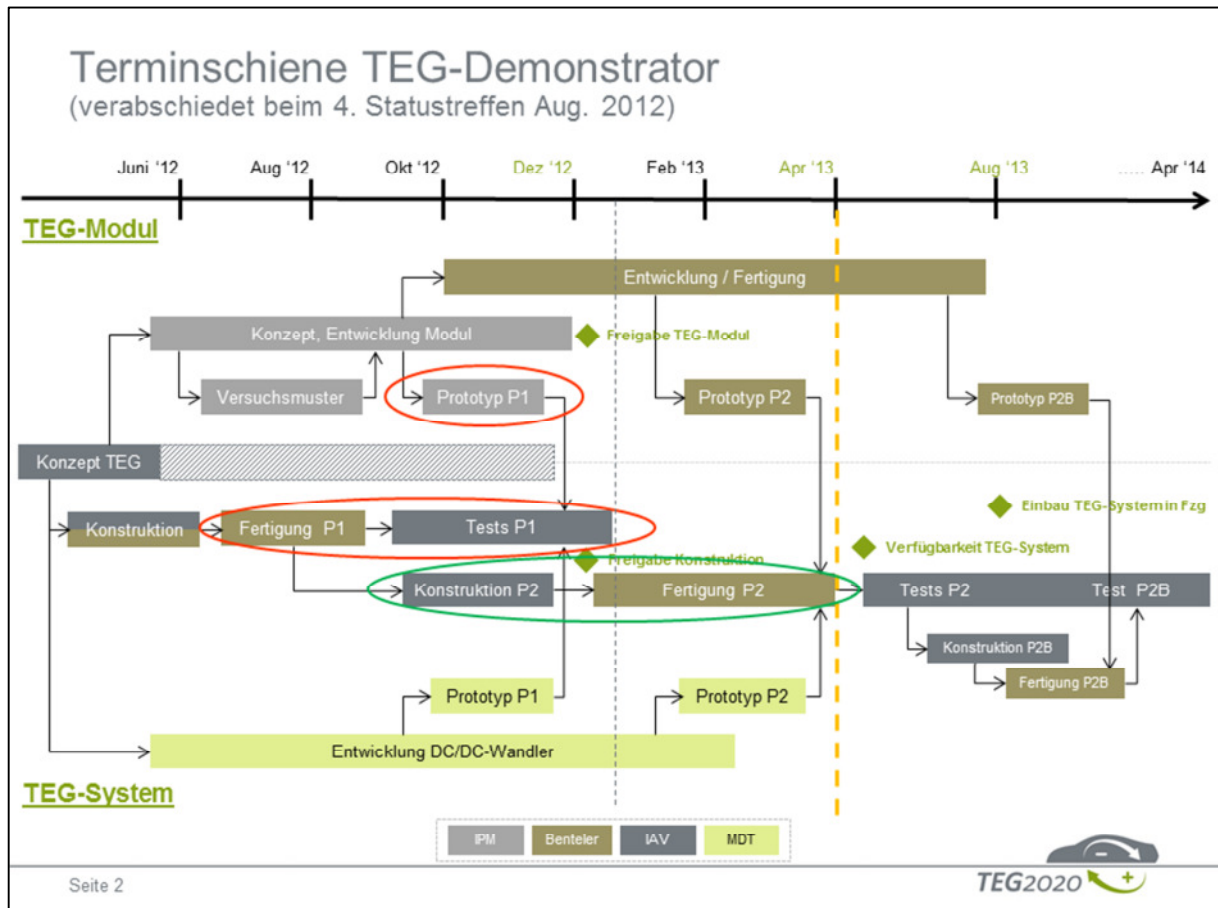


Abbildung 6: Terminplan Entwicklung, Aufbau und Test TEG-Demonstrator

Bereits zur Hälfte der Projektlaufzeit (ca. Ende Dez. 2012) haben sich Verzögerungen bei der Bearbeitung einiger Arbeitspakete angedeutet. Auf Grund von Ressourcenengpässen bei einigen Partnern konnte der Meilenstein Ende April 2013 - Verfügbarkeit des funktionsfähigen TEG-Systems - nicht eingehalten werden.

Verschiedene Maßnahmen zur Zielabsicherung wurden im April 2013 durch alle Partner beschlossen. Einen gesonderten Aktionsplan für die weitere Vorgehensweise bei der Entwicklung der stoffschlüssigen TE-Module wurde ausgearbeitet und mit dem Fördermittelgeber kommuniziert.

Um die Zielerreichung nicht zu gefährden sowie die Entwicklungsaktivitäten in den nachgelagerten Arbeitspaketen zu ermöglichen, wurde der Arbeitsplan angepasst und ein alternatives Versuchsprogramm verabschiedet, das ab Sommer 2013 startete (s. Abbildung 7).

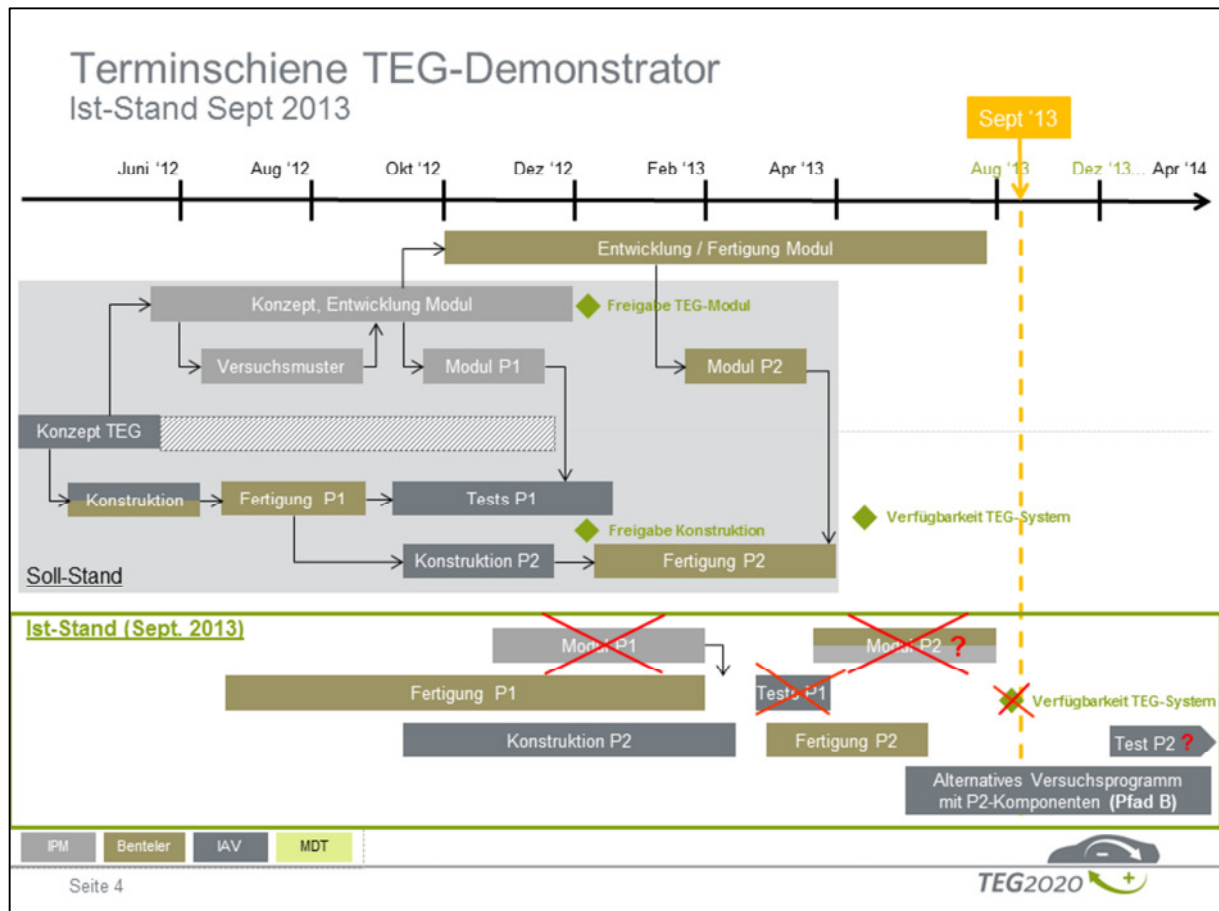


Abbildung 7: angepasster Terminplan TEG-Demonstrator

Das alternative Versuchsprogramm sah vor, mit einem vom Konzept abgewandelten „Ersatz“-TEG-System (Pfad B) die experimentelle Arbeit zu beginnen. Das im Projekt entwickelte TEG-Baukastendesign mit stoffschlüssig angebundenem TE-Material an die Wärmeübertrager wurde wie folgt modifiziert, um kurzfristig Versuchsteile zur Verfügung zu haben:

- Einflutiges TEG-System als Baukasten-Konzept und all-in-one-Module beibehalten
- Bi_2Te_3 -Module von HiZ (HZ-20), Oxid-Module von TES NewEnergy bzw. Dummy-Module aus Macor-Keramik anstatt der segmentierten $\text{PbTe}/\text{Bi}_2\text{Te}_3$ -Module aus dem Projekt
- Blockwärmeübertrager auf der heißen Seite anstatt einzelner Wings; Geometrie und Wärmeübergangsdaten fast identisch
- Wärmeübertrager auf der kalten Seite beibehalten
- Kraftschlüssige anstatt stoffschlüssige Anbindung der Komponenten

Dieser TEG-Aufbau stellte nicht vollständig die verfolgten innovativen Projektziele dar, bat jedoch die Möglichkeit, das TEG-Konzept teilweise zu überprüfen, bestimmte Systembauteile und -Komponenten zu testen und charakterisieren, Simulationsergebnisse mit realen Messdaten zu verifizieren und Erkenntnisse über die bisherigen Entwicklungsarbeiten zu gewinnen.

Um die terminlichen Schwierigkeiten bei der Entwicklung der stoffschlüssigen TE-Module zu entschärfen, stellte der Fördermittelgeber eine kostenneutrale Projektlaufzeitverlängerung in Aussicht. Diese wurde von allen Partnern Anfang 2014 beantragt und genehmigt bekommen. Der Projektplan für die zusätzlich gewonnenen acht Monate Entwicklungszeit (Mai - Dez 2014) sah wie folgt aus (Abbildung 8)

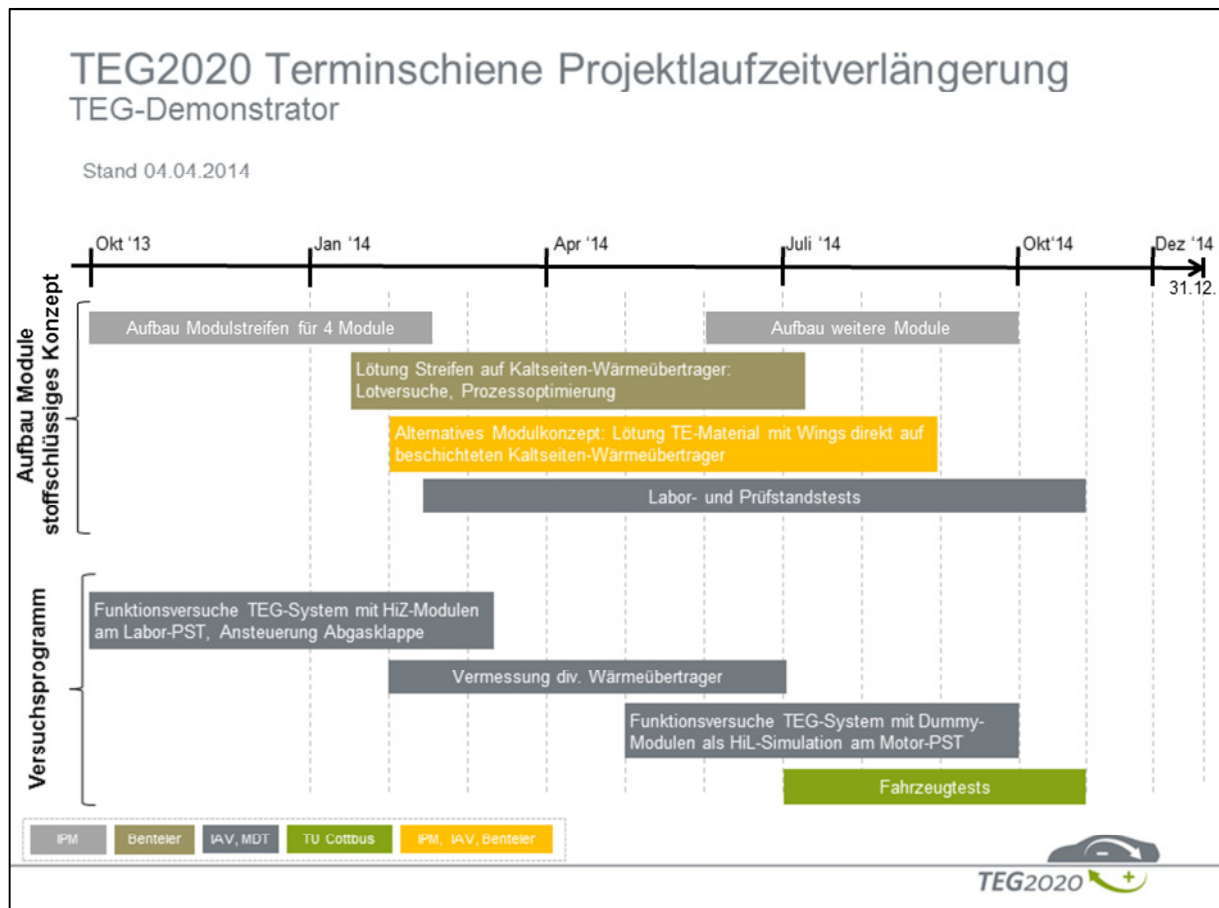


Abbildung 8: Arbeitsplan Projektlaufzeitverlängerung

Da bis zum Projektende keine funktionsfähige stoffschlüssige TE-Module in ausreichender Menge und Qualität zur Verfügung standen, wurden die Motor-Prüfstands- und Fahrzeugversuche mit dem „Ersatz“-TEG-System (Pfad 2) durchgeführt.

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

4.1 Abwärmenutzung in Fahrzeugen

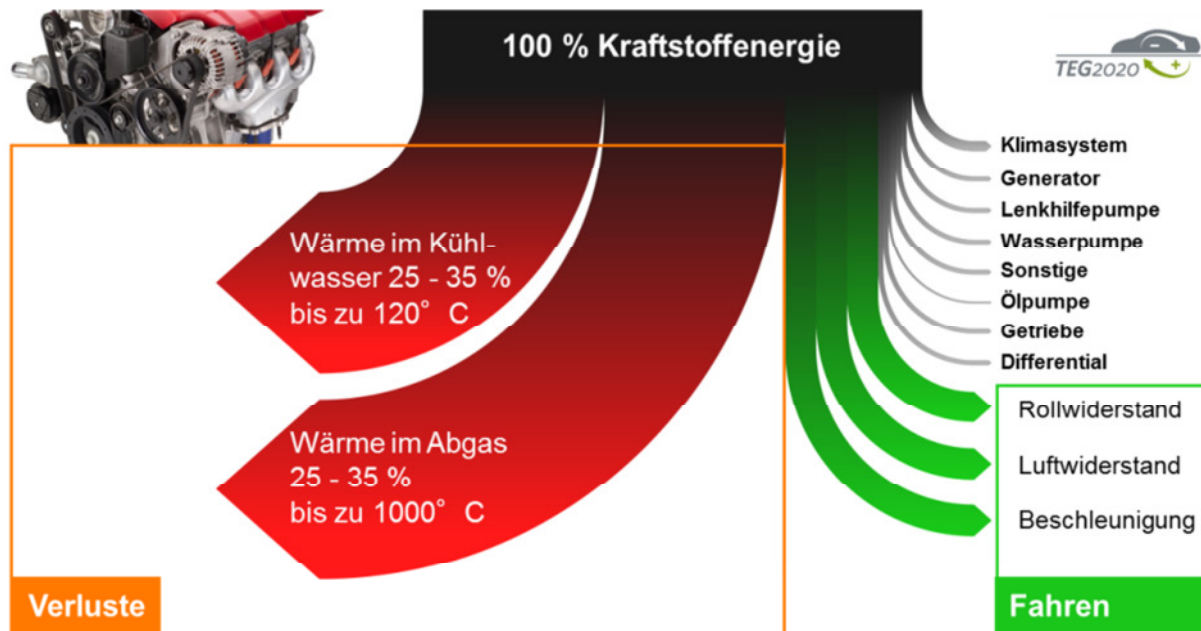


Abbildung 9: Energieausnutzung und Abwärme bei Fahrzeugmotoren

Die Rahmenbedingungen für Mobilität und Verkehr werden sich weiter verschärfen. Wachsender Energiebedarf, begrenzte fossile Energieressourcen, zunehmende Umweltbelastungen sowie wirtschaftliche und politische Krisen könnten die Mobilität empfindlich einschränken. Weitere Anstrengungen der Automobilindustrie sind erforderlich. Fahrzeugentwickler suchen deshalb verstärkt nach neuen, innovativen Technologien und Konzepten, die die Umweltverträglichkeit, Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit kommender Automobilgenerationen weiter verbessern. Langfristig sind neuartige Verkehrs-, Fahrzeug- und Antriebskonzepte erforderlich. Kurz- und mittelfristig jedoch können geeignete Maßnahmen die Effizienz aktueller Antriebe noch stark verbessern. Auch die modernsten Fahrzeuge verwenden nur einen sehr geringen Teil der im Kraftstoff enthaltenen chemischen Energie für die eigentliche Transportarbeit – für die Überwindung von Roll-, Luft-, Steigungs- und Beschleunigungswiderstand. In der Regel sind es im Mischbetrieb deutlich weniger als 30%. Ein kleiner Teil der vom Motor erzeugten mechanischen Energie wird noch für den Betrieb des Fahrzeugs, z. B. des Generators sowie für Sicherheits- und Komfortfunktionen z. B. die Klimaanlage, verwendet. Der größte Teil wird aber ungenutzt an die Umgebung abgegeben, da eine vollständige Umwandlung der im Kraftstoff gebundenen chemischen Energie in mechanische Nutzenergie system- und betriebsbedingt nie möglich ist. (s. Abbildung 9)

Es ist deshalb zu erwarten, dass Maßnahmen, die die bei Verbrennungsmotoren unvermeidlich anfallende Verlustwärme konsequent nutzen und damit ein großes Potenzial zur weiteren Steigerung der Energieeffizienz künftiger Verkehrsfahrzeuge erschließen bzw.

dazu einen signifikanten Beitrag leisten können, in nächster Zeit an Bedeutung stark zunehmen und in den Fokus der Entwicklungsabteilungen rücken werden.

Von vorrangiger Bedeutung für die Effizienzverbesserung im großen Maßstab, also im Multiwatt- bis Kilowattbereich, ist wegen ihres hohen Temperaturniveaus (bis 1000 °C) die Energie im Abgas gefolgt von der des Kühlwassers. Der Energieinhalt ist ähnlich hoch, allerdings auf einem sehr geringen Temperaturniveau (max. 120 °C).

Es gibt viele Möglichkeiten, die Abwärme in modernen Fahrzeugen zu nutzen:

- I. Sie kann gespeichert werden, um sie zu einem späteren Zeitpunkt zu verwenden.
- II. Sie kann direkt verwendet werden, um Aggregate (Motor, Getriebe), Komponenten (Katalysator) und Medien (Kühl-, Schmiermittel) auf eine günstige Betriebstemperatur aufzuheizen.
- III. Sie kann zum Antrieb von Wärmepumpen verwendet werden, um anderen Komponenten oder Medien Wärme zu entziehen (Kühlen) oder zuzuführen (Heizen).
- IV. Sie kann gewandelt werden, um sie in andere höherwertige Energieformen zu überführen.

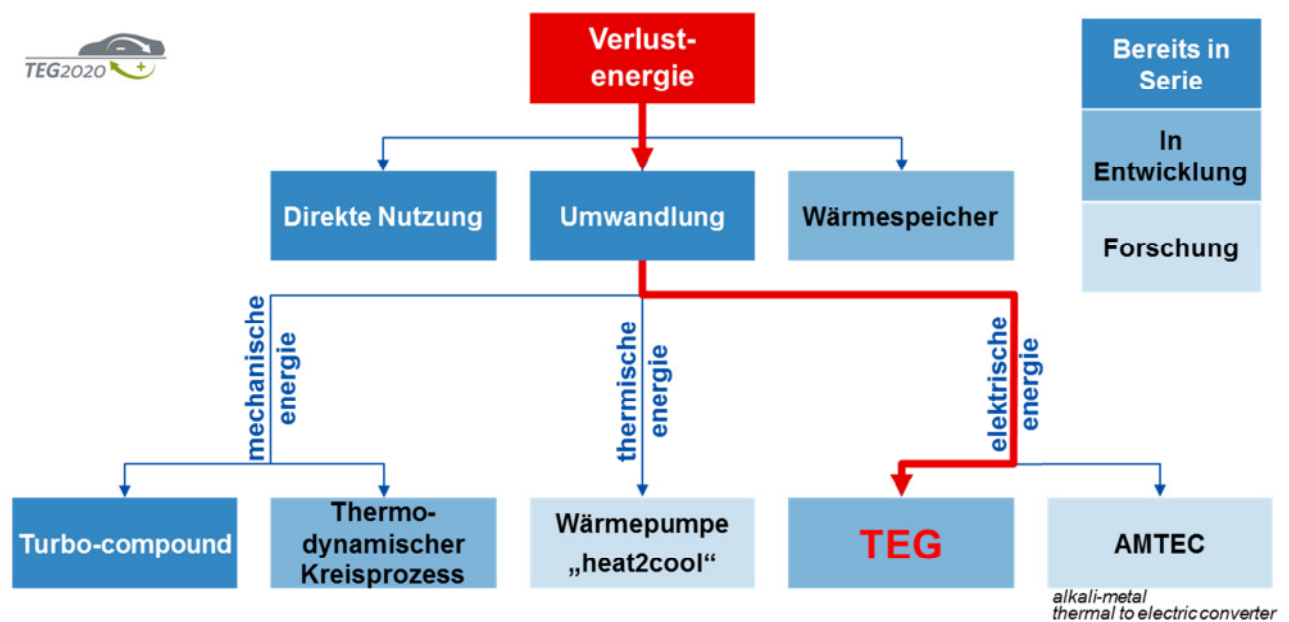


Abbildung 10: Optionen für die Nutzung von Abwärme

- I. **Speichertechnologien** für thermische Energie sind zwar seit langer Zeit bekannt, haben sich jedoch im Automobil, von sehr wenigen Ausnahmen abgesehen, bisher nicht durchgesetzt. Für neue Antriebskonzepte gewinnen sie aber zunehmend an Bedeutung. Der bekannteste Ansatz zielt auf die Verkürzung der Warmlaufphase nach längerem Fahrzeugstillstand (z. B. über Nacht) mit der Option, den Wärmespeicher elektrisch über Netzanschluss aufzuladen (externe Konditionierung). Nachgedacht wird auch über weiterführende Konzepte: Bei zeitweise abgestelltem Verbrennungsmotor (z. B. bei Start-Stopp- Systemen oder in Hybridfahrzeugen, die rein elektrisches Fahren ermöglichen) sollen Wärmespeicher Aggregate und Komponenten (Abgasnachbehandlungssystem) auf Betriebstemperatur halten oder einen ausreichenden Betrieb der Führer-, Fahrgast- und Laderaumheizung sicherstellen. Auch werden sie möglicherweise eine Rolle bei anderen Nutzungskonzepten spielen: Wenn es darum geht, dynamische Wärmeströme zu „glätten“, um nachgeschaltete (Wandlungs-) Prozesse aufrechtzuerhalten, wenn

betriebsbedingt der Abwärmestrom stark reduziert wird bzw. ausbleibt. So können Bauteilen von Temperaturspitzen geschützt werden.

- II. Stand der Technik ist die **direkte Verwendung** der Motorabwärme. Vor allem wird heute bei vielen Motoren Abgasenergie im Rahmen der Abgasturboaufladung genutzt, um eine Gesamtwirkungsgradsteigerung der Verbrennungskraftmaschine zu erzielen. Eine noch wenig in der Serie [i, ii, iii, iv] verbreitete Variante ist die Nutzung der Abgasabwärme zum beschleunigten Aufheizen des Motorkühlwassers oder von Motor- und Getriebeöl. Hierdurch kann die optimale Betriebstemperatur der Antriebsaggregate schneller erreicht sowie die Heizung für Führer-, Fahrgast- und Laderaum früher versorgt werden. Ersteres führt zu einer Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und letzteres zur Erhöhung der Sicherheit und zur Komfortverbesserung.
- III. Thermisch angetriebene **Wärmepumpen** sind technologisch ebenfalls relativ gut erschlossen. Stationäre Aggregate vom dreistelligen kW- bis in den mehrstelligen MW-Bereich sind in der Industrie, der Gebäudetechnik (z. B. am Flughafen München) [v] und Verkehr (Schiffe) [vi] heute Stand der Technik. Auch stationäre Anlagen im unteren kW-Bereich werden bereits von mehreren Herstellern angeboten mit dem Ziel, diese bei niedrigen Arbeitstemperaturen durch Sonnenkollektoren oder Motorabwärme zu betreiben [vii]. Dabei handelt es sich in der Mehrzahl aber um Absorptionsmaschinen. Maschinen, die nach anderen Verfahren arbeiten, z. B. Adsorptionsmaschinen, Wärmepumpen die mit dem Vuilleumier-Prozess arbeiten, Dampfstrahler, thermoelektrische Wärmepumpen, sind zwar bekannt, jedoch bis heute bestenfalls nur in Großanlagen (Dampfstrahlkälteanlagen) oder nur vereinzelt als Prototypen (Vuilleumier) realisiert. Über Systeme für den mobilen Einsatz, z. B. in Fahrzeugen, ist (so gut wie) nichts bekannt, sie werden aber diskutiert [viii]. Grundsätzlich kann jedoch davon ausgegangen werden, dass alle in Frage kommenden Technologien prinzipiell auch für den mobilen Einsatz geeignet sind. Besonders aussichtsreich scheint hier der Betrieb mit Abgas. Wegen des überreichlichen Energieangebots und der hohen Antriebstemperatur ist eine Darstellung kleiner kompakter Systeme mit hoher Leistungsdichte aussichtsreich. Derartige Systeme verbessern die Energieeffizienz von Fahrzeugen und Arbeitsmaschinen, indem sie die Ansaugluft kühlen oder zusätzlich geforderte Energiedienste liefern (Heizen, Kühlen, Trocknen/Entfeuchten) ohne zusätzlichen Kraftstoffaufwand, da sie quasi umsonst durch Verlustwärme angetrieben werden. Die Herausforderung ist allerdings hier, Systeme zu entwickeln und herzustellen, die die Anforderungen für den Fahrzeugeinsatz voll erfüllen. Stationäre Systeme sind in der Regel viel zu groß und zu schwer (z. T. mehrere hundert Kilogramm).
- IV. Für die **Wandlung** der Abwärme in mechanische oder elektrische Energie stehen eine ganze Reihe technischer Optionen zur Verfügung [ix]: Für die direkte Wandlung von Wärme in **mechanische Energie** kommen verschiedene Technologien in Frage: Turbocompounding, Dampfkreis-, Gaskreis- sowie Stirlingprozesse. Sie sind alle bekannt, zumindest in stationären Anlagen hinreichend erprobt und kommen grundsätzlich auch für den mobilen Einsatz in Fahrzeugen in Frage. Die aus Abwärme gewonnene mechanische Energie kann für den Antrieb des Fahrzeugs genutzt, also mit entsprechenden Kennungswandlern in den Antriebsstrang eingekoppelt werden. Alternativ kann sie auch für den Antrieb der Nebenaggregate im Fahrzeug Verwendung finden, z. B. indem sie in einem weiteren Wandlungsprozess im Generator in Elektrizität umgewandelt wird bzw. Pumpen oder Kompressoren antreiben.

Turbocompound-Systeme wurde früher bereits für Flugzeugkolbenmotoren kommerziell eingesetzt [x] und werden heute von verschiedenen Nutzfahrzeugherstellern [xi] (z. B. Scania, Volvo, Daimler) für schwere Nutzfahrzeugmotoren angeboten [xii]. Kraftstoffeinsparungen von 2 % bis 4 % werden angegeben. Ihre Verbreitung ist allerdings gering. Unter anderem weil die

Turbocompound-Technik relativ aufwendig ist. Zum Beispiel müssen sehr hohe Drehzahlen von mehreren zehntausend Umdrehungen mit mechanischen und/oder hydraulischen Getriebe bei Untersetzungen von 20:1 bis 30:1 auf die Kurbelwelle übertragen werden. Ein Verbrauchsvorteil gegenüber üblichen Turboladernmotoren ist zudem nur in einem sehr kleinen Betriebsbereichen des Motors möglich und auch nur dann, wenn die zusätzliche Nutzturbine, die das Druckgefälle für die Turboladerturbine verringert, genügend Luft für die Verbrennung bereitstellt und die Ladungswechselverluste gering bleiben. Haupteinsatzfelder dieser Technologie sind deshalb Fahrzeuge und Maschinen die längere Zeit konstant in hohen Lastbereichen arbeiten: Schiffs-, Flugzeug-oder Zugantriebe. Das Verbrauchsreduktionspotenzial einer stationären Compound-Maschine gegenüber dem konventionellen Turbomotor [xiii] beträgt unter den günstigsten Bedingungen etwa fünf bis sieben Prozent [xiv].

Die anderen Technologien sind Gegenstand von Forschungsprojekten und wurden teilweise in Form von Prototypen in Fahrzeugen vorgestellt und teilweise auch bereits schon in Erprobungsträgern im Betrieb getestet. Abwärmenutzungskonzepte, die nach dem Clausius-Rankine-Prozess arbeiten sind bereits seit Jahrzehnten für stationäre Anwendungen, vor allem im Megawattbereich ausgereift und etabliert. Die Energiewirtschaft setzt schon lange mit Erfolg auf diese Technologie. Auch für mobile Einsätze hat die Technologie viele interessante Eigenschaften. Aktuell finden sie großes Interesse in der Nutzfahrzeugindustrie und bei Herstellern mobiler Arbeitsmaschinen. Die weltweite Emissionsgesetzgebung, die steigenden Kraftstoffpreise und künftige Regelungen bei den CO₂-Emissionen erfordern auch bei Nutzfahrzeugherstellern weitere Bemühungen zur Kraftstoffeinsparung. Dort sieht man in dieser Technologie eine seriennahe Lösung, um angestrebte Effizienzziele zu erreichen. Damit der baldige Einsatz auch in mobilen Anwendungen möglich wird – Experten schätzen schon zum Ende dieses Jahrzehnts [xv], arbeiten seit einigen Jahren Nutzfahrzeughersteller und Zulieferer intensiv an der Technologie, die auch als Alternative zur Thermoelektrik betrachtet wird. Herausforderungen und Entwicklungsschwerpunkte sind Arbeitsfluide (Expansionsmittel), Expander, Verdampfer, Kondensatoren, Einbindung in den Antriebsstrang, Betriebsstrategien und Regelung sowie neben Wirkungsgrad und spezifischen Systemkosten (Euro pro Watt), im Besonderen aber auch Sicherheitsaspekte, wie Betriebsverhalten, Bauteil(dauer)haltbarkeit und Verhalten bei Störungen und Havarie. Immerhin geht es um hohe Drehzahlen und um flüssige bzw. gasförmige Medien mit hohen Temperaturen und Drücken. Inzwischen wurde viele Publikationen unter anderem von BMW, Honda, Voith, BOSCH [xvi], Eberspächer Exhaust Technology GmbH, Behr, AVL, ZF[xvii] SteamDrive gmbH, Amovis GmbH vorgelegt, die den Einsatz in Fahrzeugen aller Art theoretisch und praktisch beleuchten: Wirkungsgrade im typischen Motorbetriebsbereich von 3% bis max. 5% und bei Hochlast bis zu 10%, z. B. durch eine Optimierung des Thermomanagements werden publiziert[xviii] . Behr hat im Verbund mit den Partnern AVL und ZF ein System zur Abgaswärmerückgewinnung entwickelt, das den Kraftstoffverbrauch um etwa 5 % senken kann [xix]. Honda gelang eine Effizienzverbesserung von 3,8 % bei 100 km/h Konstantfahrt [xx][xxi].

Für die direkte Wandlung von Wärme in elektrische Energie gibt es ebenfalls verschiedene Möglichkeiten. Die wichtigsten sind thermoionische, thermophotovoltaische und thermoelektrische Energieumwandlung sowie die elektrochemische Stromerzeugung mit Festelektrolytgeneratoren (alkali metal thermal to electric converter, AMTEC) [xxii - S.327]. Sie sind prinzipiell auch für den Fahrzeugeinsatz geeignet. Die Technologien sind teilweise noch im Forschungs- bzw. im frühen Vorentwicklungsstadium. Einzelne Systeme konnten im Labor

dargestellt und Wirkungsgrade von bis zu 16 % (z. B. AMTEC [xxiii][xxiv]) demonstriert werden, wobei sie in der Regel weit unter den theoretisch möglichen liegen. Während Thermoionik, Thermophotovoltaik und der AMTEC-Konverter insbesondere mit Blick auf den Automobileinsatz einen noch zu geringen Reifegrad aufweisen, verfügt die Thermoelektrik heute über den höchsten Entwicklungsstand, so dass dieser Technologie seitens der Automobilindustrie ein großes Interesse entgegen gebracht wird [xxv].

In einigen wenigen Bereichen sind Systeme aber auch schon seit langem im Einsatz: Beispielsweise in der Raumfahrt oder auch kommerziell für spezielle industrielle Anwendungen (Offshore) [xxvi]. Derzeit scheint unter Verwendung der vorhandenen Technologien, Materialien und Komponenten ein Systemwirkungsgrad von bis zu 10 % erreichbar. Aktuell dargestellte thermoelektrische Systeme liegen (mit weniger als 5%, in der Raumfahrt 6-7%) jedoch noch deutlich darunter.

4.2 Thermoelektrische Generatoren für den Fahrzeugeinsatz

Von der nationalen und internationalen Automobilindustrie wird die Thermoelektrik seit langem mit stark steigendem Interesse beobachtet. Die Möglichkeiten der Technologie werden positiv eingeschätzt und nicht mehr ignoriert – wie noch im letzten Jahrhundert, wo sie kaum Beachtung fand. Vereinzelt gab es aber auch schon im letzten Jahrhundert Forschungsprojekte, die die Möglichkeiten der Thermoelektrik ausloten sollten. Sie konnten zeigen, dass die Technologie grundsätzlich für den Einsatz, z. B. in Personenkraftwagen, geeignet ist. Zwei willkürlich herausgegriffene Beispiele:

1. Prof. Birkholz baute in den achtziger Jahren mit seinem Team einen thermoelektrischen Generator mit FeSi₂-Schenkelpaaren in einen Porsche 944 und bekam 58 Watt elektrische Leistung bei hoher/voller Motorleistung [xxvii][xxviii]
2. In den achtziger und neunziger Jahren baute HI-Z u. a. einen 1kW Generator auf der Basis Ihrer 13 Watt Bi₂Te₃-Module und testet ihn in einem Lkw mit einem 14 Liter 350 hp Cummins Diesel-Motor. Der Generator wurde über mehrere tausend Kilometer betrieben und lieferte bis zu 1068 Watt elektrische Leistung. [xxix, xxx]

Die Erwartungen und Anforderungen der Industrie wurden jedoch offensichtlich nie erfüllt, so dass thermoelektrische Generatoren bisher nicht den Weg in die Serienanwendung geschafft haben, obwohl die thermoelektrischen Effekte lange bekannt sind und schon praktische Anwendungen fanden. Serieneinsätze in der Automobilindustrie gibt es bisher nicht.

Elektrische Systeme (Kleinfahrzeug)	Basiswert Leerlauf	NEFZ 20 °C ohne Verbraucher	NEFZ 35 °C Licht, AC, Radio
Motorsteuerung	2 A	3 A	3 A
Kraftstoffpumpe	6 A	6 A	6 A
Kühlerlüfter	0 A	0 A	10 A
Elektrische Servolenkung	2 A	2,5 A	2,5 A
ABS/ESP	0,5 A	0,5 A	0,5 A
Bordnetzelektronik	0,4 A	0,4 A	0,7 A
Fahrerinformation	0,3 A	0,3 A	0,5 A
Klimasteuerung / Innenraumlüfter	0,1 A	0,1 A	5 A
Radio / Navigation / Telefon	0,8 A	0,8 A	1,3 A
Licht	0 A	0 A	11 A
Summe	12,1 A (~150 W)	13,6 A (~175 W)	40,5 A (~500 W)

Abbildung 11: Strombedarf von Personenkraftwagen bei Zyklusfahrt (NEFZ)

Dabei benötigen Fahrzeuge im zunehmenden Maße elektrische Energie: Mit jeder neuen Fahrzeuggeneration ist der mittlere Strombedarf bisher angestiegen. Ursachen sind die zunehmende Elektrifizierung der Fahrzeuge (Kühlmittelpumpe, Lenkkraftunterstützung, Fahrwerk, Bremse, Klimatisierung) sowie neue Sicherheits- und Komfortsysteme (z. B. Navigation, Assistenzsysteme). Im Kundenbetrieb liegt der Strombedarf aktueller Personenkraftwagen weit über dem Basisbedarf von 100 W bis 200 W [xxx]. Klein- und Kompaktfahrzeuge kommen je nach Ausstattung und Betriebsbedingungen auf 300 W bis 500 W, bei Mittel- und Oberklassefahrzeugen sind es inzwischen 600 W bis 800 W – bei Vollausstattung auch darüber. (s. Abbildung 11) Nutzfahrzeuge erreichen ähnliche Größenordnungen.

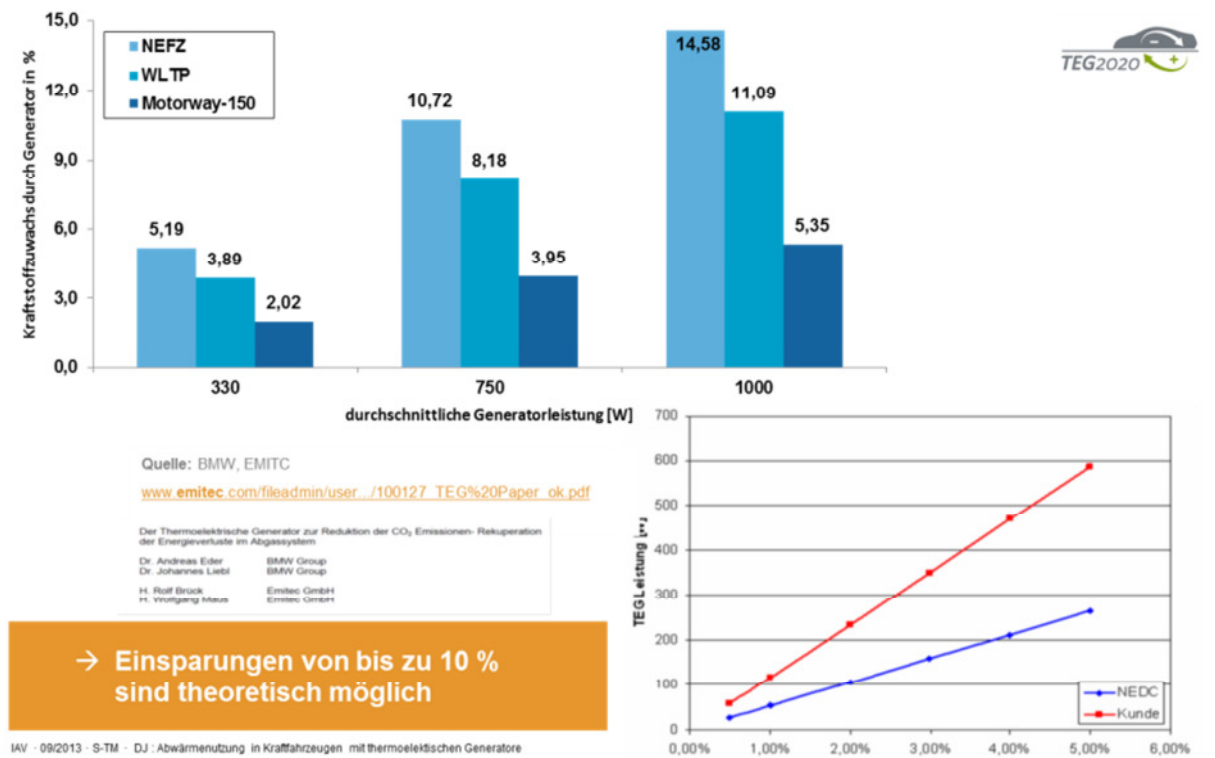
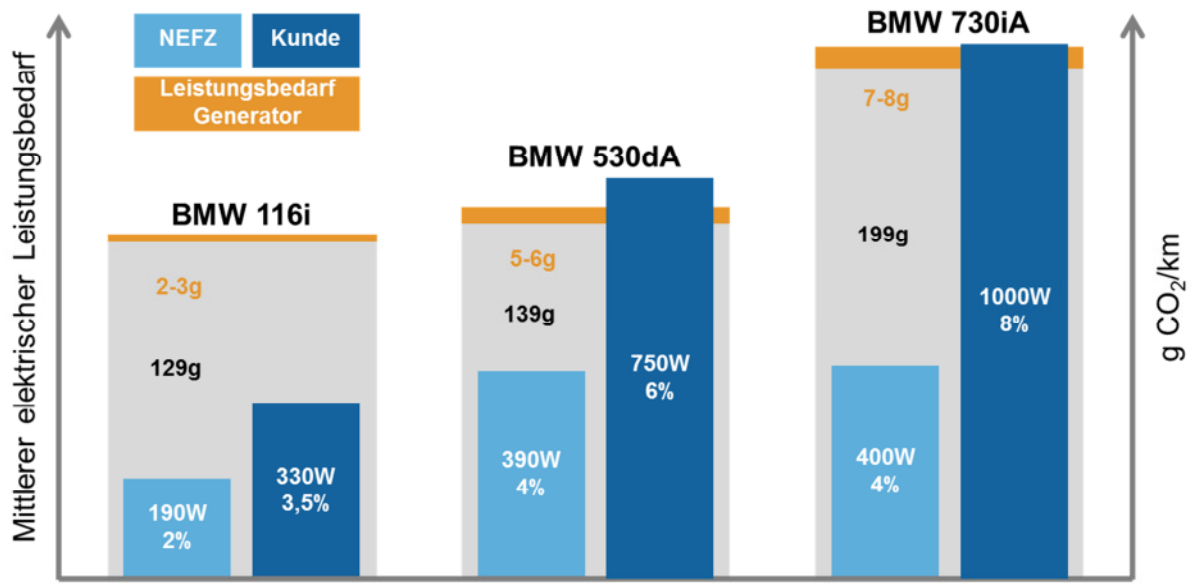


Abbildung 12: Mehrverbrauch durch klassischen Generator in drei verschiedenen Fahrzyklen; rechts unten im Bild: Korrelation zwischen Verbrauchseinsparung und TEG Leistung für ein Mittelklassefahrzeug mit Dieselmotor im NEDC sowie im Kundenfahrbetrieb (Quelle: BMW, EMITEC).

Bisher kommt der Strom dem Fahrer teuer zu stehen: Er wird mit geringem Wirkungsgrad aus teurem Kraftstoff erzeugt und kostet ein Vielfaches der Elektrizität im Haushalt – je nach Fahrzeug und Betriebsweise kann die Stromerzeugung über zehn Prozent des Kraftstoffverbrauchs ausmachen [xxxii]. 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 12 unten rechts dargestellt, sind hierbei Leistungen von mehreren hundert Watt möglich und somit liegt auch die Verbrauchseinsparung deutlich über der des NEDC, nämlich im Bereich von bis zu 5%. Grundsätzlich hängt die mit der in das Bordnetz zurückgespeisten elektrischen Leistung verbundene Verbrauchersparnis von vielen Faktoren ab (Fahrprofil, Wirkungsgrad Motor, Wirkungsgrad Generator, etc.).



Quelle: „Chancen der Thermoelektrik im Automobil“, Liebl, Symposium der Thermoelektrik, 17./18.04.13, Dresden

© IAV - 09/2013 - S-TM - DJ : Abwärmenutzung in Kraftfahrzeugen mit thermoelektrischen Generatoren



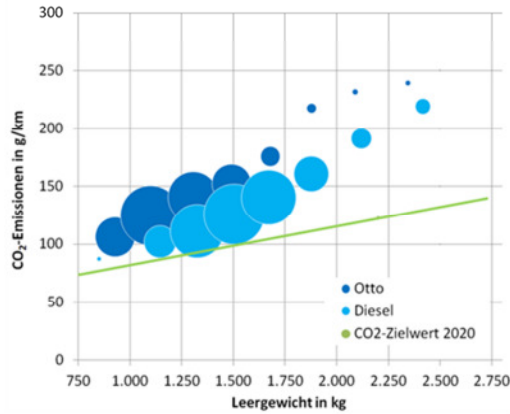
Abbildung 13: Strombedarf, Leistungsbedarf und Anteil am Gesamtkraftstoffverbrauch des Generators und zusätzliche CO₂-Emissionen

Die Bereitstellung der angeforderten elektrischen Leistung, die wegen der zunehmenden Elektrifizierung der Fahrzeuge stetig zugenommen hat, erhöht nicht nur die CO₂-Emissionen sondern damit einhergehend auch die Gefahr von Strafzahlungen! Europa regelt die CO₂-Reduzierung stufenweise (s. Abbildung 14).

Die Grenzwerte sind für die Fahrzeugindustrie Herausforderung und gleichzeitig Chance.

CO₂-Emissionen der europäischen Pkw-Neuzulassungen

(Stand 2012, nach Gewichtsklassen, Kreisfläche entspricht der Anzahl der Fahrzeuge)



- 1) **Ziel für den Hersteller**
 $CO_2\text{-Vorgabe} = 95 + 0.0333 \times (M - M_0)$
 mit M = durchschnittliche Masse der relevanten Neuzulassungen, und $M_0 = 1392,4$ kg für 2016 bis 2018.
 Eine Anpassung von M_0 erfolgt ab 2016 alle drei Jahre.
- 2) **Anteil der Neuzulassungen, der für das CO₂-Ziel und die Strafen relevant ist (sog. „Phase in“)**
 - 95 % der Neuzulassungen des Herstellers im Jahr 2020
 - 100 % der Neuzulassungen des Herstellers ab Ende 2020.
- 3) **Fahrzeuge mit <50 gCO₂/km**
 - 2-fach gezählt im Jahr 2020,
 - 1,67-fach gezählt im Jahr 2021,
 - 1,33-fach gezählt im Jahr 2022,
 - 1-fach gezählt ab dem Jahr 2023
 Die jährliche Obergrenze beträgt: 7,5 gCO₂/km
- 4) **innovative Technologien**
 Können bis zu 7 gCO₂/km pro Hersteller beantragt werden.
- 5) **Fahrzyklus**
 - Bis auf weiteres NEFZ
 - Wenn der WLTC verabschiedet wird, wird die Formel für die CO₂-Zielvorgabe angepasst.
- 6) **Abgabe pro Fahrzeug bei Überschreitung der Zielvorgabe**
 Bereits ab 2019: 95,- €/g
 Beispiel:
 Für eine Überschreitung im Flottenmittel von 2,3 g sind
 $95,- \times 2,3 = 218,50$ € zu entrichten.

Quelle: www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP/TEXT+TA+P7-TA-2014-0117+0+DOC+XML+V0/DE&language=DE

Abbildung 14: CO₂- Grenzwerte EU sowie Abgaben bei Überschreitung

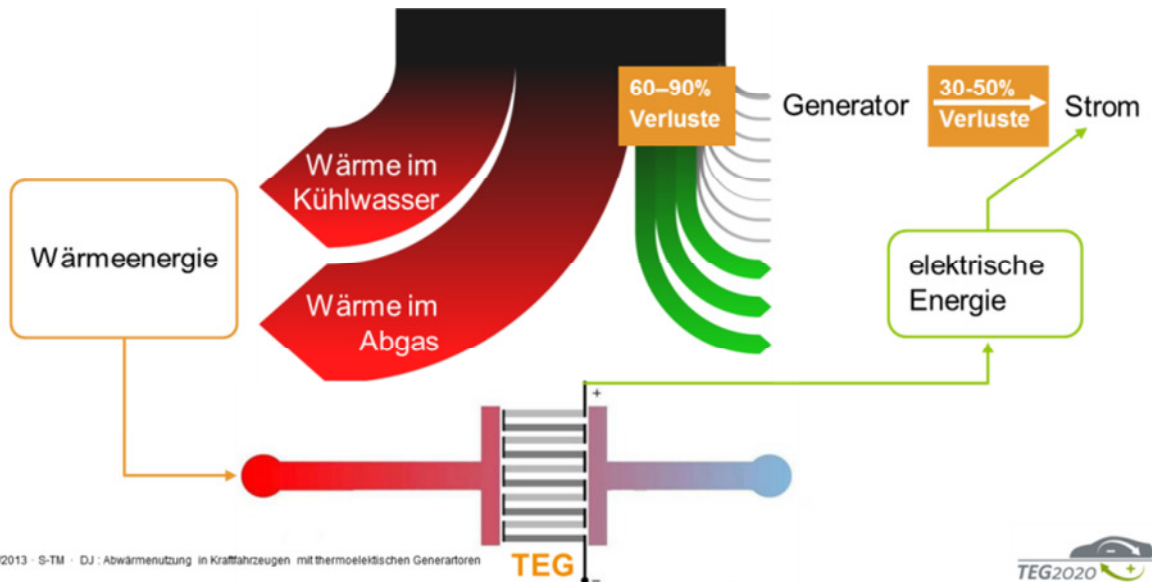


Abbildung 15: TEG liefert Strom aus Abwärme in das Fahrzeugbordnetz

Hier können thermoelektrische Energiewandler helfen. Da sie Verlustwärmeenergie statt mechanische Energie vom Verbrennungsmotor nutzen, erzeugen sie quasi kostenlos Strom, den sie ins Fahrzeugbordnetz einspeisen können. Dadurch wird der Stromanteil reduziert, den der Generator liefern muss. Dieser wird vom Verbrennungsmotor angetrieben, der für seinen Antrieb Kraftstoff verbraucht. Die Stromerzeugung durch die Verbrennungskraftmaschine und den Generator ist doppelt nachteilig, da sie eine zweifache Wandlung mit mäßigem Wirkungsgrad erfordert (s. Abbildung 15). Dadurch wird Strom im Fahrzeug teuer! Das kann der Thermogenerator besser, quasi umsonst. Bei günstigen Betriebsbedingungen könnten thermoelektrische Generatoren sogar vollständig die Bordnetzversorgung übernehmen. Die Folgen wären weniger Kraftstoffverbrauch, weniger CO₂-Ausstoß und weniger Schadstoffemissionen. Damit verbessern thermoelektrische Wandler signifikant Energieeffizienz und Umweltverträglichkeit kommender Automobilgenerationen.

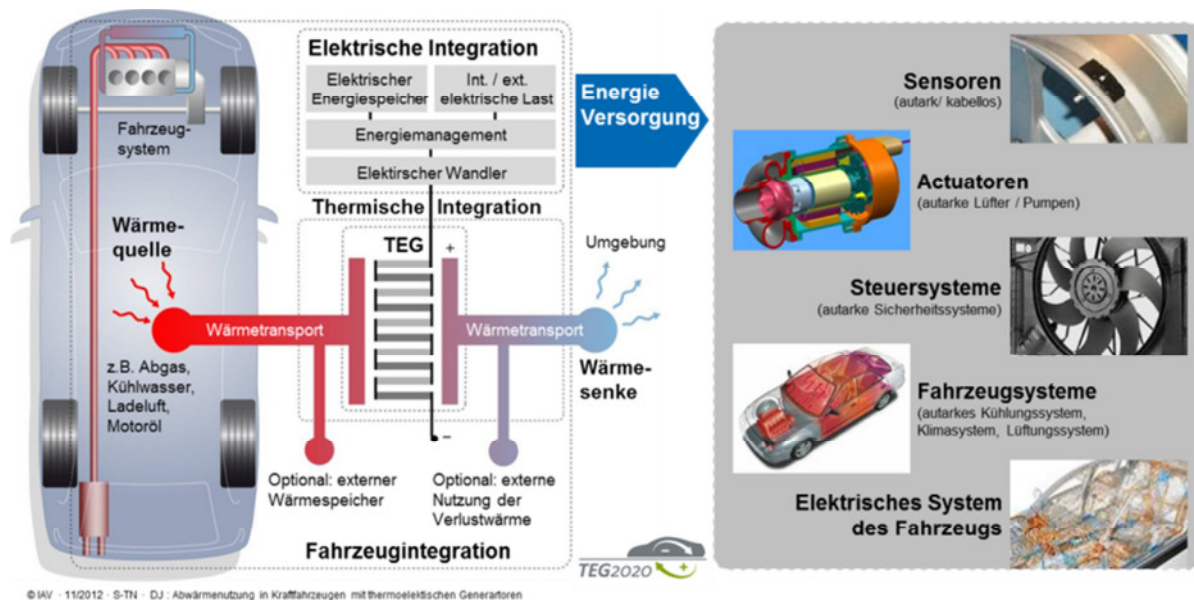


Abbildung 16: TEG im Fahrzeug: Funtkionsgruppen und Nutzung der elektrischen Energie (Zielsysteme)

Ein TEG besteht neben den thermoelektrischen Modulen aus weiteren Komponenten zur Ein- und Auskoppelung der thermischen Energie sowie zur Integration ins Zielsystem (s. Abbildung 16). Diese Komponenten und Subsysteme haben einen ebenso großen Einfluss auf Kosten und Nutzen der TEG wie das Thermoelektrika. Die optimale Integration ins Zielsystem ist eine große Herausforderung. Negative Rückwirkungen auf das Zielsystem sind zu vermeiden.

Verwendet werden TEG z. B. zur Energieversorgung für Sensoren, Aktuatoren, kleine und größere Subsysteme sowie für das Fahrzeugbordnetz.(s. Abbildung 16 rechts) Ein interessantes Subsystem könnte z. B. die Motorkühlung sein. Nach einem Kaltstart und bei langsamer Stadtfahrt benötigen moderne Fahrzeuge keine Motorkühlung. Erst nach längerer Fahrt bei höheren Leistungsanforderungen wird das Kühlsystem aktiv. Dann wird aber auch viel Abwärme über die Abgasanlage für die TEG zur Verfügung gestellt, die dann die Kühlmittelpumpe und ggf. auch einen elektrischen Kühlerlüfter versorgen. Ein autarkes Kühlsystem!

Besonders aussichtsreich ist der Einsatz der Technologie, wenn viel thermische Energie bei hohen (Abgas-)Temperaturen über lange Zeiträume zur Verfügung steht. Derartige Betriebszustände treten häufig bei Nutzfahrzeugen im Langstreckenverkehr (Fernlastzüge,

Reisebusse) aber auch bei Transportern, Kleinbussen oder großen, schweren Limousinen und SUVs auf. Arbeits- und Landmaschinen arbeiten bei ähnlichen Betriebszuständen, ebenso stationäre Anlagen wie Blockheizkraftwerke (BHKW) oder Stromaggregate. Die Technologie kann besonders effektiv zur Verbrauchsreduzierung durch Entlastung des konventionellen Generators beitragen, wenn der Strombedarf im Betrieb durch viele Abnehmer groß ist, z. B. bei Reisebussen. Mit entsprechenden Speichern kann der Strom auch für Motor- und Fahrzeugstillstandszeiten gespeichert werden, um Komfort sicherzustellen (z. B. Standklimatisierung) und Auxiliary Power Units (APU) zu entlasten.

Weniger effektiv ist die Technologie, wenn nur geringe Exergieströme zur Verfügung stehen, wie z. B. bei Stadtfahrten, insbesondere von Kleinfahrzeugen. Dort werden thermoelektrische Systeme nur wenig Strom liefern und dementsprechend auch nur wenig zur Kraftstoffeinsparung beitragen. Deshalb werden sie in den genormten Zyklen (NEFZ, Japan 10-15mode, FTP-75) kaum auffallen und damit die CO₂-Bilanz auch nur minimal positiv beeinflussen können. Um dennoch die Entwicklung solcher „versteckter“ CO₂-Einspartechnologien zu fördern, hat die EU die „Eco Innovations“-Regelung erlassen [xxxiii].

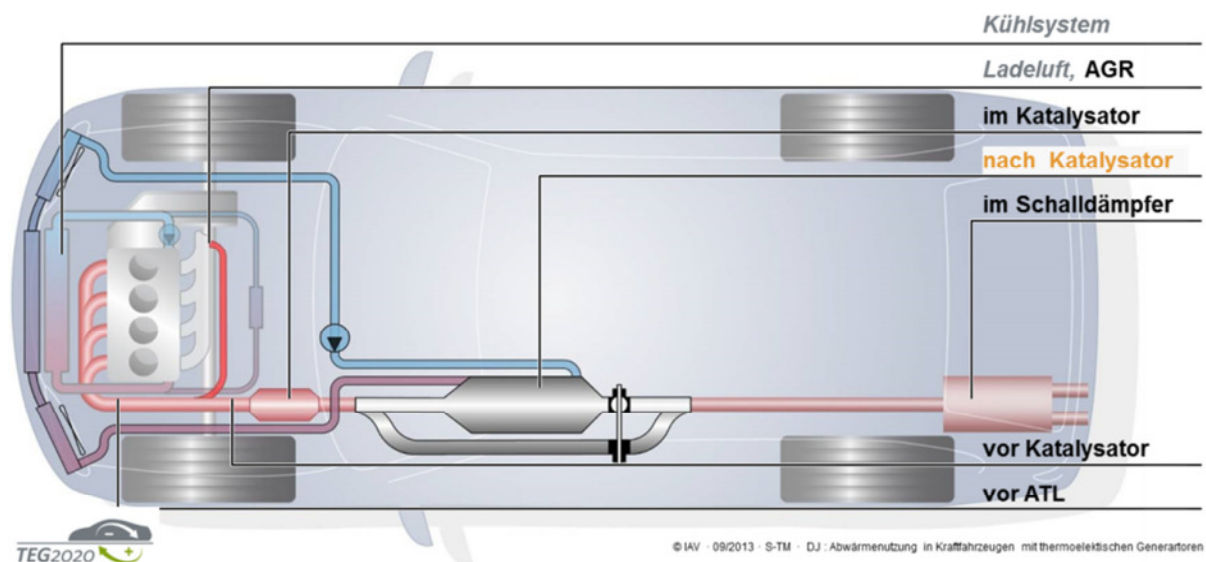
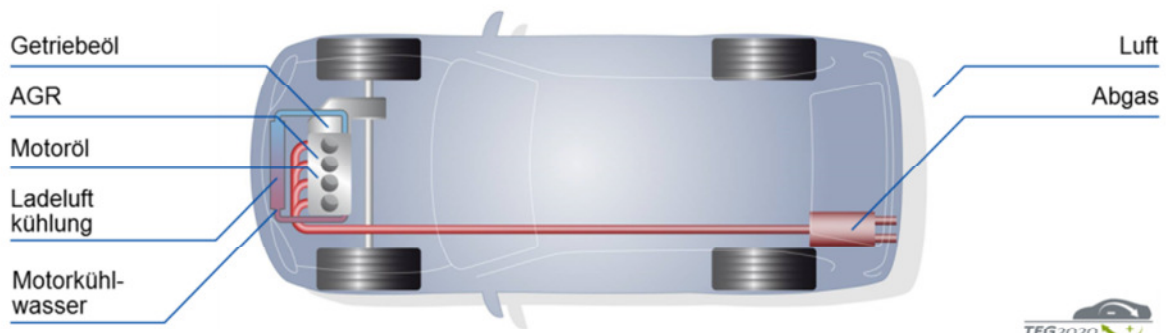


Abbildung 17: mögliche Einbauorte für TEGs im Fahrzeug

Im Fahrzeug gibt es viele Möglichkeiten TEG zu integrieren (s. Abbildung 17). Die Abgasanlage ist wegen des hohen Temperaturniveaus besonders geeignet. Aktuell werden TEG hinter der Abgasnachbehandlung positioniert. Hier wird zwar Potenzial vergeben, aber unzulässige Beeinträchtigung der Abgasnachbehandlung weitestgehend vermieden. Es gibt Ideen und Konzepte, die den TEG dichter am Motor positionieren. Eine interessante Variante ist den TEG direkt in die ANB zu integrieren. Ein Konsortium/Projekt im Thermopower verfolgt diesen Ansatz bereits. In zwei Projekten wird die Möglichkeit untersucht, den TEG direkt hinter den Zylinderkopf zu positionieren




	Abgas / AGR Kühlwasser		Ladeluft / Kühlwasser		Motoröl / Kühlwasser		Motor- u. Getriebeöl / Luft		Kühlwasser / Luft	
	Bi ₂ Te ₃	PbTe	Bi ₂ Te ₃	PbTe	Bi ₂ Te ₃	PbTe	Bi ₂ Te ₃	PbTe	Bi ₂ Te ₃	PbTe
T_{kalt} in °C	90	90	90	90	90	90	30	30	30	30
T_{heiss} in °C	250	600	220	220	150	150	150	150	90	90
η_{Carnot} in %	30,59	58,41	26,37	26,37	14,18	14,18	28,36	28,36	16,52	16,52
η_{ZT} in % (0,9 Bi ₂ Te ₃ ; 0,8 PbTe)	5,49	6,99	4,69	2,63	2,40	1,33	5,02	2,11	2,65	1,16
η_{ZT} in % (1,2 Bi ₂ Te ₃ ; 1,1 PbTe)	6,69	13,92	5,72	4,23	2,93	1,97	6,11	3,89	3,25	1,96

Abbildung 18: Abschätzung möglicher Wirkungsgrade für Bismut- und Bleitellurid und verschiedene Energiequelle im Fahrzeug. Neben der Abgasanlage gibt es weitere interessante Wärmequellen in Fahrzeugen. Da das Temperaturniveau dort (s. Abbildung 18) deutlich unter dem des Abgases liegt, werden schlechte Wirkungsgrade erreicht.

4.3 Thermoelektrisches Material für den Fahrzeugeinsatz

Schon kurz nach der Entdeckung der Thermoelektrik 1821 durch den deutschen Physiker Thomas Johann Seebeck wurden die erste Thermosäule 1823 von Hans Christian Ørsted und Joseph Fourier aus Antimon und Bismut und 1826 von Macedoni Melloni und Leopoldo Nobili eine verbesserte Version entwickelt. Prominentester Nutzer dürfte damals Georg Simon Ohm gewesen sein. Er nutzte sie als Spannungsquelle für seine Experimente. Die damals erreichten „Wirkungsgrade“ dürften etwa in der Größenordnung der ersten Dampfmaschinen gelegen haben, die bekanntlich ca. 100 Jahre zuvor von dem englischer Erfinder Thomas Newcomer gebaut wurde.

1909



Edmund **Altenkirch**, dt. Physiker „Über den Nutzeffekt der Thermosäule“

„ ... wie effizient Wärmeenergie in elektrische Energie umwandelt wird ...“

Z = Materialgüte (Figure of Merit)
 $Z = \alpha^2 \cdot \sigma / \lambda$

S = Seebeck – Koeffizient t (entspricht α)

σ = elektrische Leitfähigkeit

κ_{el} = thermische Leitfähigkeit Elektron

κ_{ph} = thermische Leitfähigkeit Phonon

\bar{T} = mittlere arithmetische Temperatur

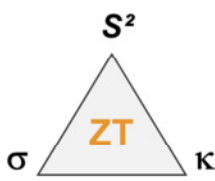
$$S = \frac{U}{\Delta T}$$

➤ Seebeck-Koeffizient **S**: Maß für die thermoelektrischen Eigenschaften eines Materials

➤ Gütegrad **ZT**: beschreibt, wie effizient Wärme in elektrische Energie gewandelt wird

➤ Der **ZT**-Wert hängt vom:

- Seebeck-Koeffizient **S**,
- der elektrischen σ und
- der thermischen κ Leitfähigkeit des Materials ab.



$$Z\bar{T} = \frac{S^2 \sigma}{\kappa_{el} + \kappa_{ph}} \cdot \bar{T}$$

➔ Der ZT-Wert beeinflusst den Wirkungsgrad von thermoelektrischen Generatoren (TEG)

IAV · 09/2013 · S-TM · DJ · Abwärmenutzung in Kraftfahrzeugen mit thermoelektrischen Generatoren

Abbildung 19: Definition des ZT-Wertes (thermoelektrische Gütezahl)

Erst 1909 konnte dann Edmund Altenkirch in seiner Arbeit über den Nutzeffekt der Thermosäule erklären „ ... wie effizient Wärmeenergie in elektrische Energie umwandelt wird ...“. Er definierte die Materialgüte Z (Figure of Merit) (s. Abbildung 19). Da ihm damals nur Metalle zur Verfügung standen, die keine brauchbare Leistung lieferten, beschäftigte er sich nicht weiter mit der Technologie.

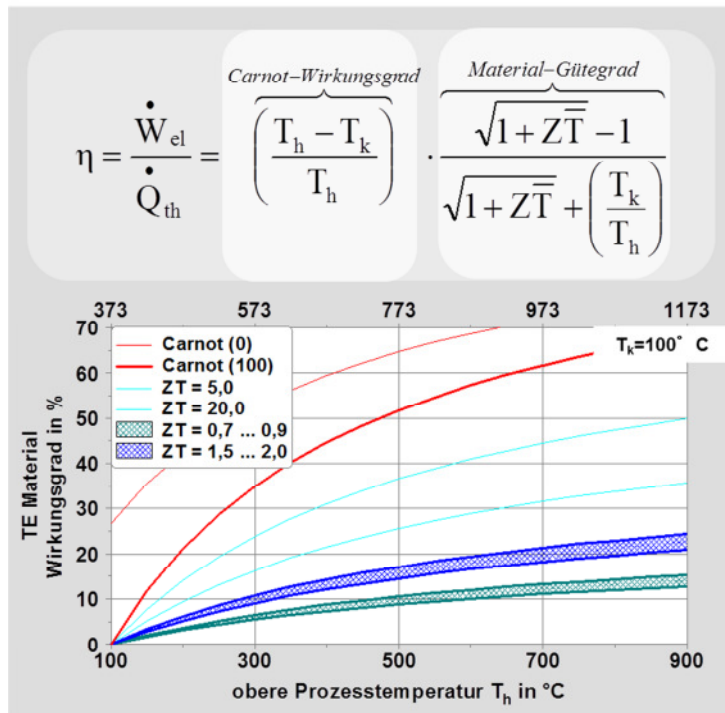


Abbildung 20:Wirkungsgrad thermoelektrische Generatoren

- **Aktuelles TE Material** (TE 2010)
 - **ZT** ~ 0,7 bis 0,9
 - η_{TE} bis 12 %
 - η_{TE} ~ 15 % von η_{Carnot} möglich
- **Zukünftiges TE Material** (TE 2020)
 - **ZT** ~ 1,5 bis 2,0
 - η_{TE} bis 20 %
 - η_{TE} ~ 30 % von η_{Carnot} möglich
- **Aktuelle TE Systeme** (TEG 2010)
 - η_{sys} << 10 %
- **Zukünftige TE Systeme** (TEG 2020)
 - η_{sys} ~ 10 % mit innovativen Konzepten, TE Modulen, AVT's und Wärmeübertragern

→ **Der Materialwirkungsgrad η_{TE} wird bestimmt durch**

- a) Carnot-Wirkungsgrad und
- b) temperaturabhängigen Material-Gütegrad

Die wesentliche Eigenschaft von thermoelektrischen Materialien, -Modulen und Systemen ist neben dem Preis der Wirkungsgrad. Er wird von zwei Faktoren beeinflusst: dem Carnotwirkungsgrad, also der Güte der Wärmequelle und der temperaturabhängigen Materialgüte. Die Grafik in der Abbildung 20/links zeigt den Materialwirkungsgrad über der oberen Prozesstemperatur von aktuellem Material (2010) mit ZT-Werten zw. 0,7 und 0,9 (grüne Kurve). Sie erreichen nur Wirkungsgrade von um die 10% - zu wenig für automobiler Anwendungen. Benötigt werden Thermoelektrika mit ZT-Werten ab 1,5 über einen möglichst weiten Temperaturbereich. Für sie wären dann Materialwirkungsgrade von bis zu 20% möglich (blaue Kurve) - ausreichend für die Automobilindustrie!

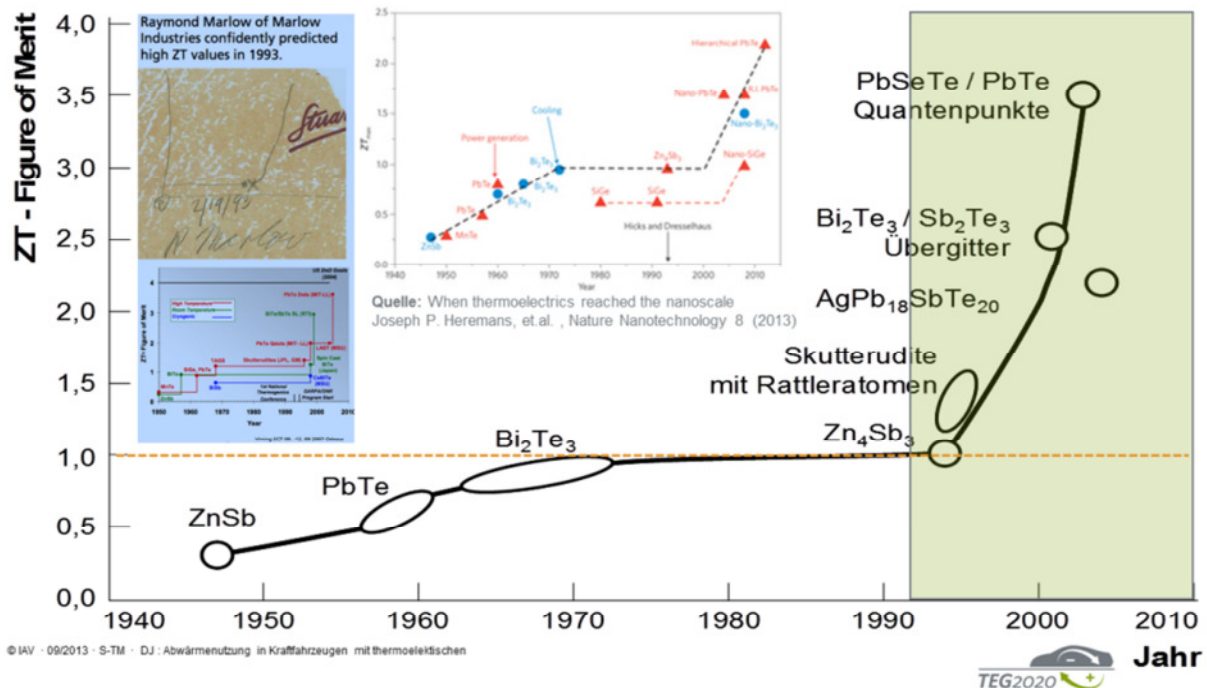
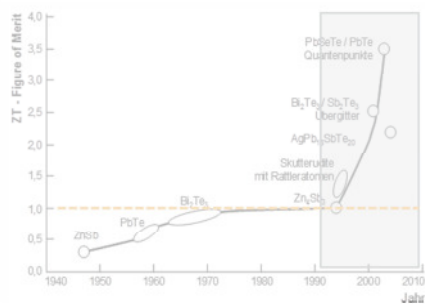


Abbildung 21: ZT-Wertentwicklung der letzten 50 Jahre

Erst Mitte des letzten Jahrhunderts gelang es schließlich mit Hilfe von Verbindungshalbleitern thermoelektrische Wärmepumpen und Generatoren zu entwickeln, die interessante Leistungen lieferten. Ihr prominentester Anwender war die Raumfahrt. Dort werden TEG vor allem wegen ihrer Langlebigkeit und Zuverlässigkeit eingesetzt.

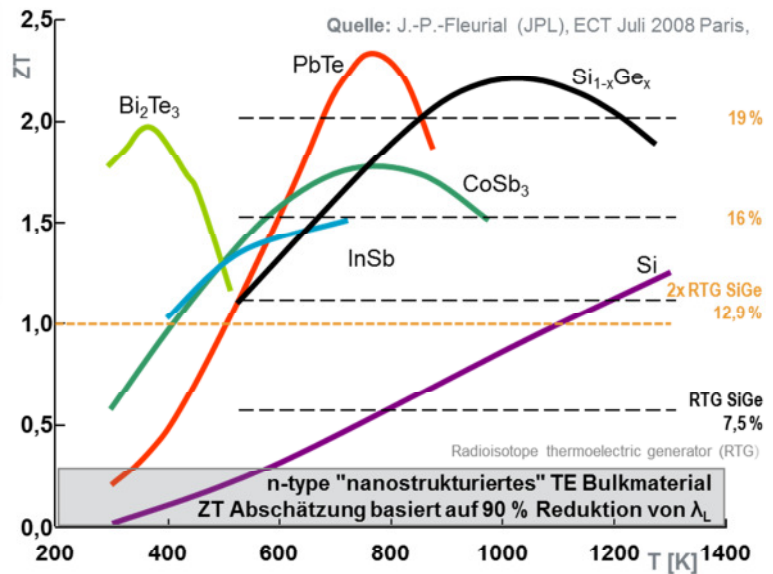
Abbildung 21 zeigt auf der Basis verschiedene Quellen und Veröffentlichungen die ZT-Entwicklung seit den fünfziger Jahren des letzten Jahrhunderts. Man erkennt gut, dass es nochmals mehrere Jahrzehnte brauchte bis man Ende des letzten Jahrhunderts schließlich in der Lage war, die Thermoelektrik ausreichend gut zu verstehen. Das Potenzial der Technologie wurde nun vollends erkannt und Möglichkeiten verstanden, den ZT-Wert zu verbessern.

Die seit der Jahrhundertwende weltweit zunehmenden Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten haben viele Materialgruppen und Verbindungen hervorgebracht, die auch für die Automobilindustrie geeignet sind (s. Abbildung 23 links).



$$Z = \frac{S^2 \sigma}{\lambda}$$

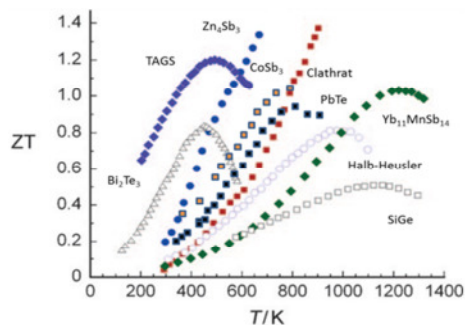
**Materialgüte – figure of Merit
(Edmund Altenkirch, 1909)**



IAV - 09/2013 - S-TM - DJ : Abwärmennutzung in Kraftfahrzeugen mit thermoelektrischen Generatoren

Abbildung 22: ZT-Wert durch Reduzierung der thermischen Leitfähigkeit

Einen großen Entwicklungshebel haben z. B. Maßnahmen, die die thermische Leitfähigkeit reduzieren, ohne die anderen Materialeigenschaft negativ zu beeinflussen. Diese neuen Materialien stehen aber kommerziell und im notwendigen Umfang und Qualität noch nicht zur Verfügung, von sehr wenigen Ausnahmen abgesehen. Damit ist erst in den nächsten Jahren zu rechnen.



Telluride: PbTe, Bi₂Te₃, Sb₂Te₃, La_{3-x}Te₄, CsBi₄Te₆
Selenide: PbSe, Bi₂Se₃, K₂Bi₆Se₁₃, ...
Antimonide: Zn₄Sb₃, Sb₂Te₃, FeSb₂, ...
Oxide: NaCo₂O₄, Ca₃Co₄O₉, ...
Boride, Carbide: B₄C, CaB₆, ...
Silicide: FeSi₂, Mg₂Si, Mn₁₅Si₂₆, ...
Skutterudite: CoSb₃, La@Fe₃CoSb₁₂, Ce@CoSb₃
Clathrate: Sr₈Ga₁₆Ge₃₀, Ba₈Au₅₃Ge₄₀₇, ...
Half-Heusler: TiNiSn, HfPdSn, ...
Ag-Te-Verbindungen: AgPb₃SbTe_{2+x} (LAST), (TAGS)
Tl-Verbindungen: Tl₃BiTe₆, Tl₂SnTe₅, ...
Si/Ge-Verbindungen: Si_{0,86}Ge_{0,20}
Zintl Phasen: Yb₁₄MnSb₁₁, CaZn₂Sb₂, BaGa₂Sb₂

		2010	2020
TE-Materialkosten	€/kg	100 ... 1000	<< 100
	€/W	0,25...10,00	<< 0,25
TE Materialgüte (ZT-Wert)	-	< 1,0	~ 1,5 ... 2,0
TE Materialwirkungsgrad	%	< 12,5	> 20,0
Spez. TE Materialeistung	W/Kg	<< 200	>> 400
Verfügbar- und Herstellbarkeit		stark eingeschränkt	uneingeschränkt
Stabilität, Haltbarkeit	Jahre	? (RTGs 30!)	> 10
Toxizität		teilw. toxisch	unbedenklich
Umweltverträglichkeit		problematisch	
Systemkosten	€/W	?	< 1,0
Systemgewicht, -volumen	kg/kW l/kW	? (Prototypen)	<< 50 << 50

→ Es gibt viele Materialgruppen/Verbindungen, die die Anforderungen der Automobilindustrie erfüllen
 → Sie werden aber erst in den nächsten Jahren zur Verfügung stehen

© IAV - 09/2013 - S-TM - DJ - Abwärmenutzung in Kraftfahrzeugen mit thermoelektrischen Generatoren



Abbildung 23: Eigenschaften aktueller und zukünftiger TE-Materialien

Wo die Reise hingehet bzw. gehen muss, zeigt die Tabelle in der Abbildung 23: Eigenschaften aktueller und zukünftiger TE-Materialien. Im Vordergrund stehen Kosten und Nutzen. Eine hochinteressante Eigenschaft ist die spezifische Materialeistung. Sie wird nicht nur durch die Eigenschaften des Thermoelektrikums sondern auch entscheidend durch die Güte der Materialintegration bestimmt. Weitere wichtige Eigenschaften wie Verfügbarkeit, Herstellbarkeit, Langzeitstabilität und Umweltverträglichkeit sowie Gewicht und Volumen aber auch Rückwirkungen auf das Zielsystem schließen die Liste ab.

Es gibt eine Vielzahl an TE-Materialien mit guten TE-Eigenschaften. In Abbildung 23 links [xxxiv] wird eine Auswahl der besten Materialien nach Stand der Wissenschaft und Technik gezeigt. Generell ist in jeder der angesprochenen Materialklassen nach dem neuesten Kenntnisstand noch signifikantes Potenzial vorhanden und damit umfangreicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf zur Materialentwicklung in Bezug auf eine breite Anwendung mit hoher Langlebigkeit (dauerhafte Funktionsstabilität und Bauteilintegrität).

Stand der Technik sind die Werkstoffklasse der Chalkogenide mit Bismutellurid (Bi₂Te₃) und Bleitellurid (PbTe) sowie die Silizium-Germanium (SiGe). Kommerziell sind Module für die Energiegewinnung nur auf Basis von Bismutellurid erhältlich. Diese Module werden in Stückzahlen von ca. 20 Mio/a produziert. Sie sind nicht auf die Anforderungen des Automobils ausgelegt. Die übrigen Werkstoffklassen sind Stand der Wissenschaft. Alle aufgeführten Materialklassen besitzen Potenzial für Werkstoffe mit einem ZT > 1. Für die Gruppen – Skutterudite, Halb-Heusler, Zn₄Sb₃, Clathrate, komplexe Chalkogenide – zielt der Forschungs- und Entwicklungsbedarf primär auf die Verringerung der thermischen Leitfähigkeit bei Erhalt ihres hohen Leistungsfaktors.

Am bekanntesten sind die Chalkogenide mit den „Weltraummaterialien“ auf der Basis von PbTe und SnTe. Vorteil dieser Gruppe ist in Bezug auf die Standard n- und p-Materialien die nun fast 40-jährige Erprobung gerade unter den scharfen Sicherheitsaspekten der Weltraumfahrt sowie ihr (akademisches) Potenzial zu hohen ZT-Werten von ~2 bei Temperaturen um 400 °C, wie für das PbTe-basierte LAST veröffentlicht. Nachteilig ist die Verwendung des unter massive Spekulationen geratenen Tellurs. Ursachen sind hier die

sprunghaft wachsenden PV-Installationen auf der Basis von CdTe und der steigende Verbrauch der Stahlindustrie. Die steigende Nachfrage nach Tellur insbesondere durch die Solarindustrie führte von 2004 bis 2008 zu einem Preisanstieg von 10\$/kg auf ca. 220\$/kg. Wenn tellurhaltige Thermoelektrika in einem TEG für eine Massenanwendung verwendet werden, wird ein weiterer starker Preisanstieg für Tellur erwartet. Bereits heute sind die Kosten für Tellur so hoch, dass eine Anwendung im Automobil wirtschaftlich kaum noch sinnvoll ist.

Unter dem Gesichtspunkt kostengünstiger Rohstoffe scheiden weiterhin die Rohstoffe aus, die bereits heute so knapp sind, dass sie zu teuer für die Herstellung von Thermoelektrika im industriellen Maßstab sind. Solche Elemente sind Gallium (Ga), Germanium (Ge), Europium (Eu) und Ytterbium (Yb).

Das TE-Material auf der Basis von SiGe stellt den Stand der Technik für Anwendungen bei hohen Temperaturen dar. Der Masseanteil an Germanium beträgt bei Siliziumgermanid 30–60%. Dieser hohe Anteil an Germanium führt zu sehr hohen Kosten für Siliziumgermanid, da die Kosten für Germanium ca. 1600-1800€/kg betragen (Tendenz steigend). Der Einsatz von Siliziumgermanid in einer thermoelektrischen Großserienanwendung ist daher momentan wirtschaftlich extrem unattraktiv. Die hohe Nachfrage nach Germanium stammt zum einen aus der Beschichtung für Lichtleitfasern in der Telekommunikation und dem Einsatz als Polymerisationskatalysator für Polyesterfasern, zum anderen zur Herstellung von Fenstern und Linsen-Systemen für Infraroptik (Nachtsichtgeräte sowie Thermografiekameras) oder Anwendungen der Hochfrequenztechnik (z. B. als SiGe-Verbindungshalbleiter) und der Detektortechnologie (z. B. als Röntgendetektor). Für diese Anwendungen wird auch für die nächsten Jahre signifikantes Wachstum erwartet. Der Preis für Germanium wird daher weiterhin auf hohem Niveau bleiben.

Werden die Kriterien auf Materialien, die den Stand der Wissenschaft darstellen, angewandt, ergibt sich folgendes Bild. Wegen hoher Rohstoffkosten scheiden Clathrate aus. Der fehlende n-Typ bzw. p-Typ für Zinkantimonid (Zn_4Sb_3), Oxide, Zintl-Phasen und $La_{3-x}Te_4$ führt zur Deselektion. Die Silizide besitzen eine starke Differenz im Wärmeausdehnungskoeffizienten zwischen n- und p-Typ und sind daher technologisch schwieriger zu beherrschen. Die durchgeführte Selektion entsprechend der Kriterien für eine industrielle Massenfertigung zeigt, dass Thermoelektrika auf Basis von Skutteruditen und sogenannter Halb-Heusler Legierungen die Anforderungen der Kriterienliste erfüllen und ein hohes Potenzial für die weitere Steigerung des ZT-Wertes besitzen.

Skutterudite: Optimierte Skutteruditverbindungen weisen ausgezeichnete TE-Eigenschaften auf, wobei die hohe Ladungsträgermobilität (p-Typ) und effektive Ladungsträgermasse (n-Typ) besonders nennenswert sind. Die hohe thermische Leitfähigkeit der binären Verbindungen kann durch die Addition von Gastatomen verringert werden. Dadurch werden in gefüllten Skutteruditen ZT-Werte von 1,4 bis 1,6 erreicht. Der optimale Einsatzbereich von Skutteruditen liegt im gewünschten Temperaturbereich von ca. 300–700 °C. Durch die Abdampfung von Sb darf das Material bei Temperaturen von mehr als 700 °C nur mit einer entsprechenden Kapselung verwendet werden. Die Herstellung ist mit einfachen Verfahren möglich. Die Ladungsträgerkonzentration ist von verschiedenen Effekten abhängig, eine gezielte Einstellung ist aber grundsätzlich möglich. Durch den Aufbau von Modulen und deren erfolgreichen Langzeittest wurde gezeigt, dass Skutterudite sowohl den elektrischen als auch den mechanischen Ansprüchen für eine Verwendung als TEG genügen. Dabei wurden Wirkungsgrade von mehr als 10% erzielt ($T_h=892K$, $T_c=316K$). Durch die enormen Variationsmöglichkeiten der chemischen Zusammensetzung besteht auch das Potenzial für eine weitere Verbesserung der TE-Eigenschaften.

Halb-Heusler Legierungen: Halb-Heusler Verbindungen sind thermoelektrisch hauptsächlich aufgrund der einfachen Herstellung und der ausgezeichneten elektrischen und mechanischen Eigenschaften interessant. Besonders der hohe Seebeck-Koeffizient, gepaart

mit einer guten elektrischen Leitfähigkeit und moderaten Ladungsträgerbeweglichkeiten, haben zu ausführlicheren Untersuchungen dieser Materialklasse geführt. Die initial hohe thermische Leitfähigkeit der Materialien kann durch Legierung auf den verschiedenen Gitterplätzen erheblich gesenkt werden, was eine Nutzung in thermoelektrischen Modulen möglich macht. Die möglichen Materialkombinationen sind nahezu unbegrenzt, und es wurden bisher bestätigte ZT-Werte von 0,5 (p) und 0,8 (n) bei Temperaturen von ca. 700 °C erreicht. Die Materialherstellung sowie die Einstellung der Ladungsträgerkonzentration sind mit Standardmethoden leicht möglich. Der Temperatureinsatzbereich der Materialien liegt prinzipiell im gewünschten Bereich, allerdings sind Modultests bisher nur bei einer Heißeittemperatur von 500 °C durchgeführt worden. Materialmessungen wurden allerdings routinemäßig bis 800 °C durchgeführt, ohne eine Veränderung der Eigenschaften aufzuzeigen. Es wurde gezeigt, dass es möglich ist, stabile Module aufzubauen und bei einem Temperaturunterschied von 450 °C zu betreiben ($T_h=500\text{ °C}$). Aufgrund der vielen möglichen Materialvariationen und die aus anderen Materialsystemen bekannten Möglichkeiten zur Reduzierung der thermischen Leitfähigkeit, ist zu erwarten, dass die Halb-Heusler Materialien erheblich verbessert werden können.

Da diese beiden Materialgruppen ähnlich hohes Potenzial für eine Fertigung von Hochtemperaturmodulen besitzen, sollen sie im Projekt vergleichend untersucht werden. Beide Materialien können im Umfang von Labormaterialien aus Forschungslaboren oder entsprechenden Spin-Off-Unternehmen bezogen werden und stehen für vergleichende Tests zur Verfügung. Während der Entwicklungsstand für die Halb-Heusler Legierungen in Bezug auf die Anwendung in Hochtemperaturmodulen noch relativ offen ist und damit der Entwicklungsweg zum serientauglichen Modul länger erscheint, gibt es für die Skutterudite bereits erste Erfahrungen in Anwendungen. Auch besteht bereits Interesse seitens der Industrie. Besonders General Motors und Marlow Industries betreiben auf dem Gebiet der Skutterudite intensive Forschung. Außerdem ist das Jet Propulsion Laboratory zu erwähnen. Hier wurden die weltweit ersten Module für Weltraumanwendungen hergestellt und getestet.

4.4 Thermoelektrische Module (TEM) für den Fahrzeugeinsatz

Die Entwicklung und Bereitstellung einiger kostengünstiger, umweltverträglicher und ressourcenschonender thermoelektrischer Volumenmaterialien im industriellen Maßstab würde erstmalig die Perspektive erschließen, TEG in Großserie herzustellen und einzusetzen. Voraussetzung ist, dass für die aussichtsreichsten TE-Materialien kommerziell verfügbare standardisierte TE-Module, die für einen geplanten Einsatz z. B. in Kraftfahrzeugen geeignet sind, in ausreichender Menge und Qualität zur Verfügung gestellt werden können.

Während die Peltier-Technik bereits mit wachsenden Umsatzzahlen kommerziell etabliert ist, besteht für eine breite Einführung von TEG zur Energiekonversion noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf, insbesondere für die Anwendung bei Temperaturen oberhalb von 250 °C. Die aktuell verfügbaren Peltier-Module auf der Basis der BiTe-Technologie sind auf Dauer-Arbeitstemperaturen am Modul von < 250 °C limitiert (<350 °C für das Material, <250 °C für die dabei verwendeten Lote) und damit auf Wirkungsgrade <4–5%, was nur in wenigen Fällen eine attraktive Lösung ermöglicht. Deutlich aussichtsreichere Verwertungsprognosen ergeben sich, wenn Modulwirkungsgrade >10% erreicht werden. Bereits bei Materialgütwerten ZT von 1,2–1,5 kommt man in die Region von Materialwirkungsgraden deutlich oberhalb 10% bis an 15%. Ab hier wird die Thermogeneratoren attraktiv für automobiler Anwendungen. Dazu sind neben sehr guten Materialeigenschaften vor allem auch wesentlich höhere Arbeitstemperaturen bis in den

Bereich von 600-800 °C notwendig, denn aus physikalischen Gründen ist die thermoelektrische Energieerzeugung bei sehr hohen Temperaturen ($T \gg 250\text{ °C}$) begünstigt. Derartige ZT-Werte werden, wie bereits ausgeführt, schon seit geraumer Zeit im akademischen Bereich für verschiedene Materialentwicklungen erreicht (PbTe, TAGS, gefüllte Skutterudite, Zinkantimonid, Clathrate, Silicide etc.), seit 2014 in Europa auch im industriellen Maßstab Skutterudite (Fa. Treibacher Industrie AG) und Halb-Heusler Material (Fa. Isabellenhüte Heusler GmbH & Co. KG und Fa. Vaccumschmelz & Co. KG). Eine breite technische Einführung von TEG sollte von der Materialseite damit mittelfristig realisierbar sein.

Der vordringlichste Forschungs- und Entwicklungsbedarf für die Realisierung thermoelektrischer Mittel- und Hochtemperatur-Anwendungen im Temperaturbereich von ca. 250 °C bis 800 °C und darüber liegt in der Bereitstellung geeigneter TE-Materialien und TE-Module. Die Zielvorgaben sind die Funktionsstabilität bei hohen Temperaturen mit gleichzeitig „flachen“ Eigenschaftsänderungen als Funktion der Temperatur. Bedingung für den praktischen Einsatz ist dabei, dass prinzipgebunden in jedem Temperaturbereich sowohl p- als auch n-leitende Materialien zur Verfügung gestellt werden können. Zusätzlich ist über eine gezielte Variation der Eigenschaften die Kompatibilität der Materialien (thermoelektrisch, thermomechanisch, chemisch) zu sichern.

Hieraus ergeben sich eine Vielzahl von Herausforderungen in der Modul- und Systemintegration, die mit heutigen Generator-Designs und Herstellverfahren noch nicht befriedigend gelöst werden können:

- Mechanische, thermische und thermoelektrische Langzeitstabilität bei hohen Temperaturen, Schock, Vibration und thermischer Zyklusbelastung $> 10^3$ Betriebsstunden (wartungsfrei)
- Verfügbarkeit von extrem zuverlässigen, kostengünstigen elektrischen Kontaktierungslösungen für hohe Temperaturen
- Kostengünstige, skalierbare und massenproduktionstaugliche Fertigungsverfahren
- Optimale, großserientaugliche und kostengünstige thermische und elektrische Ankopplung von TE-Materialien, TE-Modulen, Wärmetauschern und Medien

Eine zuverlässige Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) für Einsatztemperaturen über 400 °C und Betriebsdauern von mehreren tausend Stunden ist sehr anspruchsvoll und geht weit über die aktuell in der Thermoelektrik eingesetzten Technologien hinaus, die derzeit bis maximal 350 °C eingesetzt werden. Sie bestimmt wesentlich über Funktion, Zuverlässigkeit und vor allem Kosten eines Moduls bzw. Generators. Selbstverständlich muss die AVT im Einzelfall an die jeweilige Betriebsbedingung und -umgebung sowie an die jeweiligen konkreten Materialpaarungen und thermoelektrischen Funktionswerkstoffe abgestimmt sein.

Im Fahrzeugeinsatz, im Besonderen in der Fahrzeugabgasanlage werden extreme Anforderungen an thermoelektrische Module (TEM) und Thermogeneratoren (TEG) gestellt, die weit über dem aktuellen Stand der Technik liegen: Betrieb bei extremen Einsatztemperaturen bis 800 °C teilweise auch darüber, hohen thermischen Wechselbelastungen zwischen Umgebungs- und Abgastemperatur sowie extremen mechanischen Belastungen, mit aggressiven Medien (Abgas) und in feuchter und staubiger Betriebsumgebung. Außerdem wird eine lange Lebensdauer von mindestens 6000 Stunden bzw. 10 Jahre bei wartungsfreiem Betrieb, geringes Gewicht, kleiner Bauraum, keine Rückwirkungen auf das Zielsystem, hohe Leistung und Wirkungsgrad bei niedrigen Kosten erwartet. Derartige Module sind aktuell am Markt nicht verfügbar. Bei den hohen Einsatztemperaturen auf der Heißseite ist von einer massiven Überlastung vieler Materialien, die als Konstruktions- und Funktionswerkstoffe für TEM und TEG in Frage kommen, auszugehen. Die Gründe liegen in chemischer Degradation, vor allem Oxidation, und thermomechanischen Spannungszuständen, die bei Temperaturen deutlich oberhalb von 400 °C massiv zum Tragen kommen und Materialien, Fügestellen und Strukturen zerstören.

Mit einer geeigneten AVT können solche Probleme adressiert werden, indem man z.B. keramische Schutzschichten auf Funktions- und Konstruktionswerkstoffe aufbringt oder gasdichte Packages entwickelt. Es ist deshalb sinnvoll, etablierte Technologien aus anderen Bereichen der Energie- und Fahrzeugtechnik sowie Materialwissenschaft zu übernehmen und zu adaptieren, wie der Hochtemperatur-Brennstoffzelle, der Abgassensorik und Abgasnachbehandlung sowie der Hochleistungselektronik. Zu nennen sind diverse Löttechniken, z. B. Reaktivlottechnik, Glaslote, Dünn- und Dickschichttechnologien und Vielschichtkeramik. Mit einer ausgefeilten AVT können unter Umständen auch sehr widersprüchliche Anforderungen elegant gelöst werden.

Trotz weltweiter Anstrengungen zahlreicher renommierter Institute und Firmen ist es nach Kenntnis der Autoren bis zum Ende des Projekts TEG 2020 nicht gelungen, Module mit innovativem TE-Material (TE-Material der 2ten Generation) in geeigneter Menge und Qualität in den Markt zu bringen. Bekannt sind zahlreiche Prototypenentwicklungen, die nur sehr begrenzt geeignet und in der Regel auch nur einem sehr limitierten Nutzerkreis (z. B. Projektpartner) zugänglich sind. In 2014 hat sich die Situation verbessert. Erste kommerziell verfügbare Module wurden angeboten. Es ist sehr wahrscheinlich, dass sich dieser Trend verstärkend fortsetzen wird.

4.5 Thermische und strömungsmechanische Integration, Wärmeübertrager

Eine möglichst effiziente Wandlung thermischer in elektrische Energie mit der Seebeck-Technologie setzt das Einstellen möglichst hoher Temperaturdifferenzen zwischen kalter und heißer Seite am thermoelektrischen Wandler voraus. Im thermoelektrischen Generator (TEG) induziert die treibende Temperaturdifferenz zwischen warmer und kalter Seite des "wärmeübertragenden" Moduls aufgrund des thermoelektrischen (TE) Effekts eine elektrische Spannung. Zum Abgreifen von elektrischer Leistung ist zusätzlicher Stromfluss über einen Widerstand (Verbraucher) nötig und dieser Stromfluss bedingt wiederum die Aufnahme eines Wärmestromes (Peltier-Effekt). Die zusätzlich durch Wärmeleitung übertragene Wärmeleistung wird durch das Fouriersche Gesetz beschrieben, das für den vereinfachten Fall eines festen Körpers mit zwei parallelen Wandflächen, proportional zu Fläche, Wärmeleitfähigkeit und Temperaturdifferenz und umgekehrt proportional zur Materialdicke ist.

Um die zur Wandlung zur Verfügung stehende thermische Energie in den TEG ein- und auszukoppeln sind Hochleistungswärmeübertrager notwendig, die eine möglichst verlustfreie Übertragung (= möglichst kleine treibende Temperaturdifferenz) der Wärme ermöglichen. Wärmeübertrager für TEG haben im Gegensatz zu konventionellen Wärmeübertragern nicht die Maximierung des übertragenen Wärmestromes, sondern im Verbund mit dem thermoelektrischen (TE) Wandler eine Wandlung des Wärmestroms in einen elektrischen Strom zum Ziel. Ihre Aufgabe ist die Angleichung der heißen Seite des TE Wandlers an die Temperatur des Wärme abgebenden Mediums und auf der kalten Seite des Wandlers an die Temperatur des Wärme aufnehmenden Mediums.

Um eine möglichst hohe Spannung und damit einen möglichst hohen Wirkungsgrad zu erzielen, muss die Temperaturdifferenz zwischen warmer und kalter Seite des Wandlers möglichst groß sein. Die wärmeübertragenden TE Wandler benötigen auch deshalb einen möglichst hohen thermischen Widerstand. Zudem muss berücksichtigt werden, dass die Effizienz der TE Elektrizitätserzeugung bekanntlich vom Seebeck-Koeffizienten, der Wärmeleitfähigkeit und vom elektrischen Widerstand des den Strom leitenden Halbleiters abhängt. Ein hoher Seebeck-Koeffizient erzeugt für einen gegebenen Temperaturunterschied eine entsprechend große Thermospannung durch Thermomodiffusion der Ladungsträger. Der geringe elektrische Widerstand reduziert die Erzeugung von joulescher Wärme. Eine geringe thermische Leitfähigkeit hilft schließlich, den Ausgleich der

Temperaturgradienten über den TE Wandler bzw. TE Material zu verhindern. Die Wärmeübertrageroptimierung beinhaltet deshalb zusätzliche Parameter im Vergleich zu konventionellen Wärmeübertragern. In diesen trennt die meist mit möglichst geringem thermischem Widerstand behaftete Übertragerfläche das kalte vom warmen Fluid derart, dass der maximal mögliche Wärmestrom vom warmen auf das kalte Fluid übertragen wird. Idealerweise ist die treibende Temperaturdifferenz zwischen warmer und kalter Seite im Gegenstromwärmeübertrager an jeder Stelle gleich Null.

Je nach Charakteristik des Wärmeangebots der Wärmequelle muss zusätzlich ein weites Spektrum an Betriebsbedingungen (d. h. zeitlicher Verlauf der Medien-Temperaturen und der -Massenströme) berücksichtigt werden, bei denen diese nicht konventionellen Wärmeübertragerverbunde entsprechend ihrer Zielstellung möglichst nahe am Optimum arbeiten sollten. Außerdem sind je nach genauer Anwendung auch mit sich ändernden Zielkriterien für das System (d. h. Druckverluste, Gewicht, thermische und chemische Beständigkeit, Wirtschaftlichkeit etc.) zu rechnen. Die zu optimierende Wärmeübertragerkonfiguration muss zusätzlich beim TEG um Parameter der Materialien, Fertigung und Integration der Halbleiter- und der Elektrotechnik erweitert werden, wodurch die interdisziplinäre Herausforderung der Aufgabenstellung deutlich wird. Die Optimierung von TE-Wärmeübertragern ist somit viel komplexer als bei konventionellen Wärmeübertragern. Im Vergleich zu einem konventionellen Wärmeübertrager bleibt aber unverändert, dass die Wärmeübergangskoeffizienten auf warmer und kalter Seite möglichst hoch bei kleinen Druckverlusten sein sollen.

Die Leistung eines Wärmetauschers hängt im Wesentlichen für gegebene Betriebsbedingungen von den Dimensionen des Übertragers, von seinem Design und Material ab.

- Die Dimension der Übertrager ist durchaus ein dankbarer weil effektiver Optimierungshebel, wird aber vom zur Verfügung stehenden Raum (Package), vom Gewicht, von fertigungstechnischen Aspekten und auch den Kosten bestimmt. Oft beeinflusst auch die Größe (Übertragerfläche) den vom Wärmeübertrager erzeugten Gegendruck nachteilig, was zur Begrenzung führt.
- Ähnliches gilt auch für das Design. Hier stehen im Besonderen fertigungstechnische und wirtschaftliche Kriterien im Vordergrund zusammen mit hydraulischen Aspekten, die bei falscher Auslegung den Gegendruck nach oben treiben. Die Geometrie der Übertragerfläche muss wie bei jeder Wärmeübertrageroptimierung unter thermodynamischen Aspekten an die Stoffeigenschaften der Fluide und die Strömung angepasst werden.
- Das Material wird in erster Linie nach den Betriebsbedingungen, Temperatur, Medien und wirtschaftlichen Kriterien bestimmt. In der Regel sind Abgasanlagen aus Stahl unterschiedlicher Legierungen gefertigt. Deshalb werden Stähle auch für Wärmetauscher in Abgasanlagen bevorzugt. Ihnen allen gemein sind schlechte Wärmeleitwerte von weniger als $50 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$, in Einzelfällen sogar bis herunter auf $15 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$, teils auch weniger. Damit liegen sie bestenfalls um den Faktor 10 über den Werten üblicher TE-Module. Besser sind Materialien, die um das Hundertfache darüber liegen, also Aluminiumlegierungen $\sim 150 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$ oder Kupfer mit bis zu $400 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$. Auch von Interesse sind bestimmte keramische Werkstoffe oder Graphit mit bis zu $200 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$. Bei gegebener Quellen (Abgas)- und Senken (Kühlwasser)-Temperatur und vorgegebenem Wärmestrom, verringern große treibende Temperaturdifferenzen über den Wärmetauschern die Temperaturdifferenz am Wandler. Damit sinkt die thermoelektrische Spannung. Gleichzeitig erhöhen Reibungs- und damit Druckverluste abgasseitig den Abgasgegendruck. Kühlmittelseitig ist dadurch eine erhöhte Pumpleistung erforderlich.

- Ein bei der Auslegung des Wärmetauscher und des Gesamtsystems wichtiger Punkt ist der nicht wandelbare Teil der thermischen Abgasenergie, der z. B. in das Kühlmittelsystem abgegeben und von dort meist an die Umgebung befördert werden muss. Das geschieht oft unter der Aufwendung zusätzlicher (elektrischer) Energie.
- Die im Kühlsystem eingekoppelte Wärme wird einerseits durch den Wirkungsgrad der Wandler bestimmt, andererseits bei schlechtem Design der Systeme zusätzlich durch ungewünschte Wärmeströme erhöht, die am Wandler vorbeigehen ohne Nutzleistung zu induzieren. Hier sind dann Maßnahmen der thermischen Isolation notwendig, die einer nachteiligen thermischen Kopplung entgegenwirken. Neben Aspekten analog zur thermischen Kopplung interessiert bei der thermischen Isolation vor allem die Kaltseite des Wärmeübertragers. Sie liegt dicht an dem vom heißen Abgas durchströmten Teile des Gesamtsystems bzw. ist oft sogar vollkommen von diesen eingeschlossen. Neben der Wärmeleitung durch das Modul selbst kommt es in nicht unerheblichem Umfang zur Verlustwärmeleitung aus den mit dem Abgas in Kontakt stehenden Strukturkomponenten des Systems in die fluidführenden Kanäle der Kaltseite. Diese Leitungsverluste müssen durch geeignete isolierende Maßnahmen in der Auslegung auf das technisch mögliche Maß minimiert werden. Bereits auf der Modul-Ebene muss deshalb, insbesondere aufgrund des geplanten modularen Aufbaus, in Betracht, gezogen werden, inwieweit eine thermische Kopplung bzw. die thermische Trennung, d.h. Isolation aus einzelnen Modulteilern Systemvorteile birgt.

In der allgemeinen Technik sind Wärmetauscher ein bereits sehr gut erschlossenes Bauteil. Für thermoelektrische Wandler gibt es aber offensichtlich noch Bedarf. Im Besonderen für extreme Varianten, wie die im Projekt angedachten „Einzelwärmetauscher“ (Wings), die auf der heißen Seite nur ein Schenkelpaar bedienen. Im Projekt wird der Entwicklung leistungsfähiger Wärmetauscher deshalb von den Partnern große Bedeutung beigemessen und auch entsprechende Aktivitäten und Ressourcen eingeplant. Auf der Basis des Stands der Technik bzgl. Material und Design werden Konzepte entworfen die geeignet sind, das „Wing“-Konzept zu unterstützen, die Systemleistung zu maximieren und das Potenzial der Wandler vollends auszuschöpfen. Aussichtsreiche Material- und Design-Konzepte müssen identifiziert, verfolgt, entsprechende Berechnung und Simulationen durchgeführt sowie Versuchsmuster für verschiedene Wärmetauscher Modelle zur Vermessung/Charakterisierung angefertigt werden, um die Simulationsergebnisse teils vor dem Bau des endgültigen Demonstrators zu überprüfen und zu validieren.

4.6 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

[i] NASA - Stirling Converter Technology
<http://solarsystem.nasa.gov/rps/asrg.cfm>

[ii] PEUGEOT, Partner Tepee – The MPV that lets you enjoy the freedom of the open road, Press Info, 2008, Seite 13
http://www.peugeot.com/media/317188/partnertepee_0801infopresse_en.pdf

[iii] LEXUS, Lexus Stages World Debt of All New RX 350 and RX 450h at Los Angeles Auto Show, Press Release, 2008,
http://www.lexus.com/fcv/RXandRXh/RXandRXh_popup.html?s_ocid=FCV_RX/RXh_RelatedLinks

[iv] LE FRIEC, O. / WRIGHT, T., Faurecia und die 62. Internationale Automobil-Ausstellung in Frankfurt, Pressemappe, 2007,
http://www.faurecia.com/data/de/download/press_kit/faurecia_press_kit_frankfurt_2007_de.pdf

[v] SCHWEIGLER, C. / FLAMENSBECK, M. / DEMMEL, S. / ZIEGLER, F., Optimierte Kraft-Wärme-Kopplung am Flughafen München – Einsatz des SE/DL-Absorptionskaltwassersatzes, 1997

[vi] AIDA – moderne Technologie spart Energie
<http://www.aida.de/aida-cruises/unternehmen/aktuelles/news.23978/article/aidamar-moderne-technologie-spart-energie.html>

[vii] KÜHN, A. / ZIEGLER, F., Betrieb einer 10 kW Absorptionskälteanlage als Wärmepumpe, In: KI – Kälte Luft Klimatechnik, März 2009, S. 30

[viii] TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN FACHGEBIET ENERGIEANLAGENTECHNIK, Heat2Cool, Forschungsgebiete,
<http://www.eta.tu-berlin.de/heat2cool.html>

[ix] FEULNER, P., Zusätzliche Energiewandler in zukünftigen Antrieben, In: MTZ 09/2008 Jahrgang 69, S. 714-721

[x] Super Constellation Flyer Association, Curtiss Wright R-3350 Engine,
<http://www.superconstellation.org/TechnicalInformation/motor/motor-de.html>

[xi] VOITH TURBO, Effiziente Antriebstechnik mit Voith TurboCompound-Systemen für schwere Nutzfahrzeuge, 2008,

http://www.voithturbo.com/applications/documents/document_files/1565_d_g_2098_d_turbocompound_2008-09.pdf

[xii] SCANIA, Turbocompound, 2008,
<http://www.scania.de/lkw/technology/turbocompound/>

[xiii] Wikipedia Turbolader
<http://de.wikipedia.org/wiki/Turbolader>

[xiv] Wikipedia Turbo-Compound-Motor
<http://de.wikipedia.org/wiki/Turbo-Compound-Motor>

[xv] Thomas Rosenberger - Effizientere Dieselantriebe - Blick in die Glaskugel
<http://www.eurotransport.de/news/effizientere-dieselantriebe-blick-in-die-glaskugel-6529949.html>

[xvi] BOSCH – P1A7 - WHR
http://www.bosch-mobility-solutions.de/media/de/iaa_2014/antrieb_2/DS-Datenbl_P1A7_WHR_DE_low.pdf

[xvii] ATZ – Nutzung der Abgasenergie von Nutzfahrzeugen mit dem Rankine Prozess
<http://vortraege.atzlive.de/Artikel/3/15331/Nutzung-der-Abgasenergie-von-Nutzfahrzeugen-mit-dem-Rankine-Prozess.html>

[xviii] Heise online Autos - BMW nutzt die Abwärme von Motoren
<http://www.heise.de/autos/artikel/BMW-nutzt-die-Abwaerme-von-Motoren-1333619.html>

[xix] Nutzfahrzeuge – Motor der Zukunft
http://archiv.iaa.de/2012/fileadmin/user_upload/2012/deutsch/downloads/presse/Nutzfahrzeugzulieferer_IAA_2012.pdf

[xx] ROSEBRO, J., Honda Researching Advanced Hybrid Drive with Rankine Cycle Co-Generation, 2008,
<http://www.greencarcongress.com/2008/02/honda-researchi.html>

[xxi] FREYMANN, R. / STROBL, W. / OBIEGLO, A., Der Turbosteamer: Ein System zur Kraft-Wärme-Kopplung im Automobil, In: MTZ 05/2008 Jahrgang 69, S. 404-412

[xxii] DIEKMANN, B. / HEINLOTH, K., Energie – Physikalische Grundlagen ihrer Erzeugung, Umwandlung und Nutzung, 2. Auflage, Stuttgart 1997

[xxiii] RYAN, M. A. / FLEURIAL, J.-P., Direct Thermal-to-Electric Energy Conversion for Outer Planet Spacecraft, 2002, <http://www.electrochem.org/dl/ma/201/pdfs/0834.pdf>

- [xxiv] Wikipedia – Radionuklidbatterie
http://de.wikipedia.org/wiki/Radionuklidbatterie#cite_note-30
- [xxv] DONNER, S., Strom aus dem Auspuff, In: Handelsblatt 15.05.2009,
http://www.handelsblatt.com/technologie/energie_technik/strom-aus-dem-auspuff;2276223
- [xxvi] GLOBAL THERMOELECTRIC, Global Power Solutions, 2006,
<http://www.globalte.com/index.php?pageld=2&sld=12>
- [xxvii] Ulrich Birkholz, Erwin Gro_, Ulrich Stöhrer, and Karsten Voss. Conversion of Waste Exhaust Heat in Automobiles Using FeSi₂ Thermoelements. Proc. 7th International Conference on Thermoelectric Energy Conversion. Arlington, USA. 1988
- [xxviii] Jorge Vazquez, Miguel A. Sanz-bobi, Rafael Palacios, Anteneo Arenas, 'State of the Art of Thermoelectric Generators Based on Heat Recovered From The Exhaust Gases of Automobiles', Universidad Pontificia Comillas, Spain (2008)
- [xxix] John C. Bass, Norbert B. Elsner, and Ralph Slone. Design Study and Experience with Thermoelectric Generators for Diesel Engines. Proc. Automotive Technology Development Contractors Coordination Meeting. Dearborn, USA. 1990
- [xxx] J. C. Bass, N. B. Elsner, and F. A. Leavitt. Performance of the 1kW Thermoelectric Generator. Proc. American Institute of Physics Conference, 1995
- [xxxi] REIMANN, W. / MÄNNEL, R., Verbrauchseinfluss der elektrischen Energie im Fahrzeug, In: ATZelektronik, 01/2008, S. 6-11
- [xxxii] JÄNSCH, D., Thermoelektrik in Kraftfahrzeugen, Präsentation Innovationsforum „Neue thermoelektrische Werkstoff, Technologien und Bauelemente“, Halle 2008
- [xxxiii] EUROPÄISCHES PARLAMENT, Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen, Legislative Entschließung – Angenommene Texte, P6_TA-PROV(2008)0614, 17.12.2008, Straßburg,
<http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//TEXT+TA+P6-TA-2008-0614+0+DOC+XML+V0//DE>
- [xxxiv] Harald Böttner, Jan D. König; „Stand und Entwicklungsbedarf für thermoelektrische Werkstoffe und Module“ Haus der Technik, 1. Fachtagung Thermische Rekuperation im Kraftfahrzeug, München, 05. - 06. November 2009

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Projekts sind keine Kooperationen zur gemeinsamen Bearbeitung von Entwicklungsthemen entstanden. Es wurden lediglich externen Unternehmen beauftragt, Systeme, Bauteile und Komponenten für die Zwecke des Projekts anzufertigen.

II Eingehende Darstellung

1 Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse im Einzelnen

1.1 AP 10 000 Projektmanagement

Der Innovationsgrad und die Produktkomplexität sowie die notwendige Entwicklungsbreite und -intensität stellten alle Beteiligten sowohl auf der technischen als auch auf der organisatorischen Ebene vor hohe Anforderungen. Dies erforderte ein aktives Projektmanagement sowie eine schlanke und leistungsfähige Projektorganisation. Das Projektmanagement war für Initiierung, Planung, Ausführung, Überwachung, Steuerung und Abschluss des Projekts unter Beteiligung aller Partner verantwortlich. Es orientierte sich an international anerkannten Projektmanagementstandards, die projektspezifisch angewendet und auf die Bedürfnisse der beteiligten Partner abgestimmt waren.

Ziel des Projektmanagements in der Initialphase war, klare Anforderungen zu definieren, sowie mit allen Partnern gemeinsam abgestimmte Ziele zu formulieren. Bei der Durchführung des Projektes stellte das Projektmanagement die Erreichung der Projektergebnisse innerhalb der vorgegebenen Randbedingungen wie Inhalt und Umfang, Kosten, Termine und Qualität sicher. Dabei wurde eine schlanke und leistungsfähige Projektorganisation aufgestellt sowie ein Projektprozess eingeführt, der die Projektbearbeitung unterstützend begleitete.

Zur Erreichung der Projektziele wurden folgenden Aktivitäten im Rahmen des Projektmanagements durchgeführt:

- Initiierung des Projekts durch Zusammenstellung des Inhalts, Termin- und Kostenrahmens, Definition des Jobsplits zwischen den Projektpartnern und Identifikation der Stakeholder
- Begleitung des Prozesses der Projektbewilligung durch den Fördermittelgeber
- detaillierte Projektplanung zur Gestaltung des gesamten Projektumfangs, Definition der Projektziele, Festlegung des Projektablaufs und Erarbeitung des Projektmanagementplans
- Anleitung und Management der Projektausführung durch Koordination der Projektressourcen, effektiven Informationsaustausch und kontinuierliche Dokumentation
- Überwachung und Steuerung der Projektarbeit durch:
 - Statusberichterstattung, Bewertung des Projektfortschritts und Vorausschau
 - kontinuierlichen Abgleich zwischen dem aktuellen Projektverlauf und dem Projektplan; Identifikation und Bewertung der Abweichungen, Initiierung von Abstell- und Gegenmaßnahmen
- Änderungsmanagement: Bewertung, Genehmigung und Dokumentation der Änderungsanträge
- regelmäßiges Update des Projektmanagementplans entsprechend der beschlossenen Änderungen im Projekt
- geregelter Projektabschluss durch Abgabe/ Abnahme der Projektergebnisse und -dokumentation
- Öffentlichkeitsarbeit zur Verbreitung und Verwertung der Projektergebnisse: Projektpräsentation, wissenschaftliche Präsentationen, Vorträge und Publikationen, Website, Projektfilm

1.2 AP 20 000 Grundlagen

1.2.1 AP 21 000 Ziel- und Konzeptdefinition

Ziel: Ziel dieses Arbeitspakets war, in der Anfangsphase des Projekts einen Zielkatalog und eine Definition der wichtigsten Produkthanforderungen und -merkmale zu erarbeiten sowie sich einen Überblick über Know-how, Technologien, Ressourcen der Projektpartner zur verschaffen.

Maßnahmen: Dazu wurden in bestmöglicher Abstimmung unter den Projektpartnern die im Antrag aufgeführten Projekt- und Produkthauptziele auf der Basis des geplanten Projekthinhalts und -umfangs für die Projektprodukte unter Berücksichtigung von Randbedingungen, Einschränkungen und Annahmen analysiert, Subziele erarbeitet und in einem Zielkatalog aufgenommen. Auf der Basis des Zielkatalogs wurden Konzepte für verschiedene Zielsysteme entworfen, skizziert, diskutiert und ausgewählt, welche auf einfache Weise die Zielstellung des Projektes sicher realisieren. Für die ausgewählten Konzepte wurden dann alle erforderlichen Maßnahmen zur Zielerreichung sowie die detaillierten Produkthanforderungen und -merkmale abgeleitet und zusammengestellt.

Ergebnisse: Entsprechend der Ziele dieses Arbeitspakets konnten ein Ziel- und Maßnahmenkatalog, Konzeptskizzen für verschiedener Zielsysteme und Leistungsklassen, Entwürfe für Produkthanforderungen, -design, -spezifikationen sowie Empfehlungen zur Materialrecherche und Bewertung, Vorgaben für Simulation und Versuch, Kenntnis über vorhandene Verfahren der AVT und notwendige Neuentwicklungen sowie erste Parameterfelder für die Teilentwicklungen des Systemaufbaus bereitgestellt werden.

Die detaillierte Ausarbeitung, Entwicklung, Berechnung und Simulation sowie für die Herstellung oder Beschaffung der entsprechenden Designs und Spezifikationen für alle relevanten TE-Materialien und Module, Komponenten und Subsysteme (Hard- sowie Software) sowie TEG-Systeme, wurden auf der Basis der Ergebnisse dieses Arbeitspakets in den folgenden Arbeitspaketen durchgeführt.

Ziel	Zielwert	Motivation
Zielsysteme	1. Personenwagen	Schlüsselzielsysteme
	2. BHKW	optimale Betriebsbedingungen
	3. Fernlastzüge	gute Betriebsbedingungen, Herausforderung Abgastemperatur
	4. Reisebusse	gute Betriebsbedingungen, hoher Stromverbrauch
	5. Brenner	optimale Betriebsbedingungen, u. U. auch Schlüsselmarkt
Demonstrator	1. Pkw, C-Segment	dominante Zulassungszahlen, Projektfahrzeug
	2. Micro-BHKW	optimale Betriebsbedingungen, Verfügbarkeit
Systemaufbau	1. Baukasten	Vielzahl Anwendungen u. Zielsysteme adressierbar
	2. skalierbar	weites Leistungsspektrum adressierbar
Modulkonzept	1. "all-in-one" Modul	Leistung, Kosten, hoher Innovationgrad
	2. materialschlüssig	hohe Leistung
	3. optional kraftschlüssig	für kommerzielle Module
Modulform	1. Planar (auch in Linie)	großes Anwendungsfeld
	2. gewölbt/rund (Ringe)	Benchmark
Bypass	1. intern	Bauteilschutz, Gegendruck, Kühllast, Bauraum
	2. extern	Kosten, Serienteile
Wärmequelle	1. Abgas	hohe Leistung wegen hohem Temperaturniveau
	2. Kühlwasser	interessante Spezialkonzepte
Wärmesenke	1. Kühlwasser	hohe Leistung, im Zielsystem vorhanden
	2. Umgebungsluft	interessante Spezialkonzepte
Systemwirkungsgrad	min: 6 % angestrebt: 10%	Darstellung des aktuellen Potenzials der Technologie
Kraftstoffeinsparung	3-5 %	Beitrag zum Gesamtziel des Projekts
elektrische Nennleistung	500 W im Auslegungspunkt/-bereich	mittlere Kraftstoffeinsparung in einem großen Betriebsbereich
elektrische Maximalleistung	1000 W im Maximalbereich	Kraftstoffeinsparung im Hochlastbereich /Grenztemperatur TE-Material
Abgasgegendruck	typisch: < 25 mbar maximal: 50 mbar	geringstmögliche Ladungswechselerluste = Kraftstoffmehrverbrauch
Max. Kühlleistung	25 KW	Belastung Kühlsystem Auslegung autarkes Kühlsystem
Absenkung Abgastemperatur	offen	je nach Zielsetzung
Verlustleistung (thermisch)	< 1 % im Bypassbetrieb	geringe TEG-Erwärmung
	< 10 % im Generatorbetrieb	Leistung, geringstmögliche Kühllast

TE-Materialien	Baustufe 1: 1te Generation (PbTe)	schnelle Realisierung
	Baustufe 2: 2te Generation	hoher Wirkungsgrad
	Materialwirkungsgrad > 10%	hoher Systemwirkungsgrad
	niedrige TE-Materialkosten	Akzeptanz
	hohe Verfügbarkeit	Akzeptanz
	ungiftig/unbedenklich	Akzeptanz
neue TE-Module	hoher Modulwirkungsgrad, angestrebt > 10%	Hoher Gesamtwirkungsgrad, geringer Wärmeeintrag in Kühlsystem
	innovative/materialschlüssige AVT	geringe Übergangs-/ Durchgangsverluste
	innovative Materialkapselung	geringe Degradierung hohe Lebensdauer
	angepasste Langzeit-/ Zyklusstabilität	hohe Standzeiten hohe Lebensdauer
	fahrzeugtauglich	mechanische, thermische, thermomechanische Wechselfestigkeit/Standzeit
TEG-Aufbautechnologie	materialschlüssige Anbindung der Wärmetauscher	geringstmögliche thermische Verluste
Gewicht	< 25 kg (50kg/kW Nennleistung)	geringstmögliche Fahrwiderstände
Volumen	< 35 ltr. (70 ltr./kW Nennleistung)	Bauraumbedarf, Integrationsaufwand, Wahl des Einbauorts
für Fahrzeugeinsatz		Stau- und Feuchtigkeitsunempfindlich/-dicht
Kosten	geringstmöglich	Kosten-Nutzen-Verhältnis schnelle Amortisation
fett: höchste Priorität; kursiv: im Verlauf des Projekts aufgenommen		

Tabelle 1: Zielkatalog, Projektproduktanforderungen

1.2.2 AP 22 000 Verbrennungsmotor 2020

1.2.2.1 AP 22 100 Entwicklungsszenarien 2020

Ziel: Das Ziel des Projekts war, Konzepte und Systeme für thermoelektrische Generatoren (TEG) zur Rekuperation von Verlustwärme u. a. in Kraftfahrzeugen zu entwickeln. Mit einer Serienreife solcher TEG-Systeme wird in ca. 10 Jahren gerechnet. Deswegen war es wichtig, die zukünftige Entwicklung des Automobilmarktes im Hinblick auf das Jahr 2020 zu analysieren sowie die Technologietrends bei der Antriebstechnik zu ermitteln. Die Erkenntnisse aus den zu erwartenden wirtschaftlichen und technologischen Entwicklungen am Fahrzeugmarkt dienen als Grundlage zur Definition, Auswahl und Modellierung von Antriebs- und Fahrzeugsystemen, die unserer Meinung nach im Jahr 2020 repräsentativ sein werden. Auf Basis dieser ausgewählten „Fahrzeug-Zukunftsszenarien“ wurden die Potentialanalysen für die TEG-Systeme durchgeführt.

Maßnahmen: Umfangreiche Rechercharbeit wurde durchgeführt und diverse externe Studien und Datenbanken wurden über die zukünftige Entwicklung des Automobilmarktes analysiert. Im Fokus standen folgende Fragestellungen:

- Globale Megatrends, welche die zukünftige Entwicklung des Fahrzeugmarkts maßgeblich beeinflussen: geopolitische und demographische Veränderungen, Nachhaltigkeit und Klimawandel, Wandel in der Mobilität, neue Technologien
- Denkbare globale Entwicklungsszenarien für den Automobilmarkt
- Betrachtung der EU Abgas- und CO₂-Gesetzgebung und die sich daraus ableitenden Folgen für die Fahrzeugentwicklung
- Auswertung von statistischen Daten und Ableitung von Trends bezüglich der zukünftigen Fahrzeugentwicklung:
- Veränderungen bei der Fahrzeugproduktion und –vertrieb auf den globalen Märkten
- Untersuchung der Entwicklung der Fahrzeugsegmente, Antriebsartenarten, Kraftstoffarten mit Fokus auf Europa und Nordamerika

Ergebnis: Die Entwicklung auf dem europäischen Fahrzeugmarkt kann wie folgt zusammengefasst werden (aus der Perspektive der Recherchen zum Projektbeginn im Jahr 2011):

- moderates Wachstum der Fahrzeugverkäufe bei anspruchsvollen Anforderungen an Effizienzsteigerung und Einhaltung der CO₂-Grenzwerte
- steigende Nachfrage nach Kleinwagen, wobei Hauptfahrzeugsegmente B-/C-Segmentbleiben
- Verbreitung der Elektrifizierung des Antriebsstrangs, wobei 70-75% der Fahrzeuge in 2020 über eine VKM verfügen werden
- Verkleinerung des Dieselmärkts
- Einführung von neuen Mobilitätskonzepten in den Großstädten

Die Entwicklungen auf dem Fahrzeugmarkt (PKW) im Hinblick auf das Jahr 2020 stellen keine revolutionären Umbrüche dar. Der Anteil an Antrieben mit VKM bleibt hoch, so dass der Einsatz eines TEG zur Rekuperation von Verlustwärme eine Frage der Technologieverfügbarkeit mit einem entsprechend positiven Beitrag zur Effizienzsteigerung des Fahrzeugs bleibt.

1.2.2.2 AP 22 200 Ottomotoren 2020

Global betrachtet werden auch in den nächsten 10 Jahren Ottomotoren den Antrieb des Individualverkehrs dominieren. Der Anteil dieselgetriebener PKW ist zwar in Europa vergleichsweise hoch, jedoch wird in anderen Regionen der Erde, wie z. B. in Nordamerika oder in den Industrienationen und aufstrebenden Volkswirtschaften Asiens, der Ottomotor auf absehbare Zeit absolut marktbeherrschend sein. Auch bei der fortschreitenden Hybridisierung der Fahrzeugantriebe kommen bis auf wenige Ausnahmen fast ausschließlich Ottomotoren zum Einsatz.

Die strenge Abgas- und CO₂-Gesetzgebungen in Europa und in anderen industrialisierten Regionen der Welt verlangen von der Antriebsentwicklung große Anstrengungen in Richtung Wirkungsgradverbesserung und Effizienzsteigerung. Viele technologische Ansätze werden parallel verfolgt, um dieses Ziel näher zu kommen, z.B.

- Ventiltriebe mit variablem Ventilhub zur Reduzierung der Drosselverluste
- Downsizing zur Reduktion der Drosselverluste und Reibleistung
- Abgasrückführung zur Reduktion der Drosselverluste und Reduktion der Wandwärmeverluste

- Magerbetrieb zur Reduktion der Drosselverluste und chemischen Verluste
- Homogene Selbstzündung mit Magerbetrieb zur Reduktion der chemischen Verluste, Drosselverluste und Wandwärmeverluste

Jede der genannten Maßnahmen weist nun spezifische Vorteile aber auch Nachteile auf, die sich positiv aber auch negativ auf die Leistungsausbeute eines TEG im Vergleich zu den konventionellen Technologien auswirken kann.

Das Downsizing z. B. kann aufgrund der Verkleinerung des Motors und bei Leistungsgleichheit durch die notwendige Verlagerung der Betriebspunkte zu höheren Motorlasten mit höheren Abgastemperaturen einen positiven Einfluss auf die Leistungserbringung eines TEG aufweisen. Wird ein Motor im verdünnten Betrieb, mit Luft oder Abgas, also bei deutlich geringeren Prozesstemperaturen betrieben, so wirkt sich das auf das Abgastemperaturniveau - es sinkt - was auf den TEG Betrieb eher negative Auswirkungen hat

Zur Abschätzung des verfügbaren Energieangebots im Abgas wurden für verschiedene Ottomotoren eine Vielzahl von Simulationsrechnungen durchgeführt, bei denen für die weltweit am häufigsten angewandten und gesetzlich vorgeschriebenen Fahrzyklen der zeitliche Verlauf des Abgasmassenstroms und dessen Temperaturniveau ermittelt wurden. Dabei wurden auch für die Zukunft relevante Technologien, wie beispielsweise Hochaufladung oder in den Zylinderkopf integrierte Abgaskrümmen, berücksichtigt.

Es wurden drei Motorvarianten ausgewählt, für die auch zukünftig weltweit ein höherer Marktanteil zu erwarten ist:

- 1,0-l-Zweizylinder Turbomotor, hochaufgeladen, Reihenanordnung
- 2,0-l-Vierzylinder Turbomotor, hochaufgeladen, Reihenanordnung
- 3,0-l-Sechszylinder Saugmotor, V-Anordnung

Für die Basismodellierung konnte auf Prüfstandmessungen vergleichbarer Motoren zurückgegriffen werden, mit denen eine Verifizierung der Simulationsmodelle erfolgte. Die Basismodelle wurden in ihrem Betriebsbereich hinsichtlich zukünftiger Entwicklungen (höherer Aufladegrad, integrierte Abgaskrümmen, verbesserte Kraftstoffaufbereitung, etc.) erweitert und plausibilisiert.

Besonderes Augenmerk bei der Modellierung wurde auf eine gute Abbildung des Abgastemperaturniveaus und der thermischen Trägheiten von Motor und Abgasstrang gelegt, um ein realitätsnahes Verhalten zu erzielen.

Für die Simulation kam die Motor- und 1D-Strömungs-Simulations-Software GT-Power von Gamma Technologies zum Einsatz, die heute für die Motorenentwicklung als Standardsoftware gilt.

Für jede Motorvariante wurde ein geeignetes Fahrzeug definiert und aus der Motor-Fahrzeug-Kombination ein Drehzahl- und Lastprofil für die in AP 22400 ausgewählten 12 Fahrzyklen generiert.

Mit diesen Fahrzyklen werden die typischen Einsatzszenarien des Fahrzeugbetriebs (Stadt-, Überland- oder Autobahnfahrt) weitestgehend abgedeckt.

Die aus der Simulation ermittelten Verläufe für Abgasmassenstrom und -temperatur der jeweiligen Fahrzyklen dienen im weiteren Verlauf als Grundlage für die Berechnung des Potenzials der thermoelektrischen Generatoren zur Abgasenergieerückgewinnung.

1.2.2.3 AP 22 300 Dieselmotoren 2020

TEG-Systeme die in 5-10 Jahren in Serie gehen, müssen die Anforderungen an die Integration von TE-Systemen in zukünftige Motor- und Fahrzeugkonzepten berücksichtigen. Um zukünftige Szenarien beschreiben zu können, wurde eine Marktanalyse des aktuellen Standes durchgeführt. Diese beinhaltete die systematische Analyse des Europäischen

Marktes. West-Europa wurde als primärer dominierender Zielmarkt für TE-Systeme identifiziert. Auf Basis der ersten Ergebnisse erfolgte die Identifizierung und Beschreibung der Markttrends mit einem Zeithorizont von 5 – 10 Jahren. Die technologische Entwicklung des Dieselmotors für den Einsatz im Personenindividualverkehr wurde untersucht mit dem Ziel, zukünftige Technologietrends zu beschreiben, um sie als Eingangsbedingung in die Potenzialstudie mittels Modellierung von repräsentativen Motor-Fahrzeugkombinationen bereitzustellen.

Der Dieselmotor wird in Europa in den kommenden 5 – 10 Jahren als wichtiges Antriebsaggregat für Kraftfahrzeuge dienen. Entsprechend der Entwicklung der weltweiten Treiber, werden weitere Entwicklungsschritte notwendig sein, um den Dieselmotor als geeignetes Antriebsaggregat für die Zukunft zu optimieren. Haupttreiber sind dabei in Europa der Kraftstoffverbrauch und die Abgasemissionen. Charakteristisch sind unter anderem die steigende mechanische Effizienz durch reduzierte Reibleistung des Basistriebwerks und reduzierte mechanische Verluste der Nebenabtriebe. Möglich wird dies durch aktives, elektronisch geregeltes Thermo- und Nebenabtriebsmanagement. Ergänzt wird dies durch einen deutlich erkennbaren Haupttrend zur Entwicklung von kleinen, sehr kompakten Aggregaten mit stetig steigender spezifischer Leistung („Downsizing“). Eine Alternative hierzu sind „Derating-Konzepte“, wo eher von einer Konsolidierung der spezifischen Leistung ausgegangen wird, um die mechanischen Verluste im Motor zu minimieren.

Um den Anforderungen an die gesetzlich limitierten Abgasemissionen gerecht zu werden, wird das Brennverfahren insbesondere in Richtung minimaler Stickoxidemissionen bei gleichzeitiger Steigerung des effektiven Wirkungsgrades optimiert. Das sich dieser thermodynamische Zielkonflikt aufgrund des effizienten mageren Brennverfahrens nicht auf Basis aktueller Kraftstoffe aufheben lässt, ist mittels aktiver Entstickung des Abgases, ein weiterer Haupttrend erkennbar. Dazu erfolgt eine Kombination des Dieselmotors mit geeigneten Komponenten der aktiven Abgasnachbehandlung. Damit werden im geeigneten Abgastemperaturfenster signifikant hohe NO_x-Reduktionsraten erzielt. Bei optimaler Betriebsstrategie ggf. in Kombination mit der ausreichenden Verfügbarkeit eines Reduktionsmittels, sind eine weitere Steigerung des thermodynamischen Wirkungsgrades und damit eine weitere Senkung des Kraftstoffverbrauches möglich. Dies wiederum hat jedoch Auswirkungen auf den Energieinhalt des Abgases. Ein sinkender Trend auf niedrigerem Niveau als beim Ottomotor ist erkennbar und bei der Auslegung von TE-Systemen zu beachten.

Zunehmend konkurrieren Otto-Hybridfahrzeuge mit konventionellen Diesel-Fahrzeugen. Im betrachteten Zeithorizont wird die Hybridtechnologie in Europa jedoch eher in Nischenanwendungen erwartet, so dass entsprechendes Marktpotenzial für konventionelle Dieselantriebe gesehen wird.

Die Ergebnisse beinhalten den Auswahlprozess von aktuellen repräsentativen Dieselmotoren für PKW-Anwendungen und die Prognose für den betrachteten Zeithorizont. Es wurde jeweils ein typischer 3- sowie 4-Zylinder Reihenmotor charakterisiert und in GT-Power modelliert.

Damit wurden die Grundlagen für weiterführende Analysen auf virtueller Basis geschaffen, um insbesondere die, für die TE-Systeme wichtigen Kenngrößen Abgasmassenstrom und Abgastemperatur in den ausgewählten repräsentativen Fahrzeugklassen zu prädictieren.

1.2.2.4 AP 22 400 Fahrzeuge 2020

Ziel des Arbeitspakets war, durch eine quasistationäre Simulation von verschiedenen Fahrzeug-Motor-Zyklus-Kombinationen, die Betriebsbereiche für den TEG zu lokalisieren und daraus geeignete Einsatzstrategie zu erarbeiten.

Bei der quasistationären Simulation wird ausgehend von einem Geschwindigkeitsverlauf eines Fahrzyklus bei gegebenem Fahrzeug die erforderliche Radleistung bzw. über

entsprechende Koppelstellen die Motorleistung bestimmt. Der Abgleich des berechneten Wertes mit dem Motorenkennfeld ergibt dann für einen Punkt die Abgastemperatur und den Abgasmassenstrom im Zeitbereich. Zur Kontrolle wird zudem der Kraftstoffverbrauch laut Kennfeld ausgegeben. Um das Fahrverhalten des Kunden besser abbilden zu können, ermöglicht die Simulation eine Anpassung des Fahrverhaltens durch verschiedene Schaltstrategien (ECO, Normal, Sport) und eine Stop-Start-Funktion.

Damit der quasistationären Berechnung keine Effekte wie thermisches und/oder hydraulisches Verhalten berücksichtigt werden können, wurden zudem für ausgewählte Kombinationen dynamische Berechnungen durchgeführt.

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus AP 22 200 und AP 22 300 in denen aktuelle und zukünftige Verbrennungsmotoren (Otto, Diesel) identifiziert wurden, wurden für die Simulation Verbrennungsmotoren mit verschiedenen Leistungs- und Hubraumklassen definiert.

Bei der Fahrzeugauswahl galt es primär, die Fahrzeugsegmente B bis E abzudecken. Dazu wurden aus jedem Segment mehrere Fahrzeuge ausgewählt. Die Auswahl orientierte sich an den aktuellen Verkaufszahlen, vornehmlich für Deutschland und Europa. Sofern die Daten vorhanden waren, wurden zudem die jährlichen Fahrleistungen berücksichtigt.

Um neben der Fahrzeug- und Motorauswahl eine möglichst realitätsnahe Anwendungsumgebung für den TEG-Einsatz zu finden, wurden mehrere Fahrzyklen aus den Bereichen Stadt, Überland und Autobahn definiert und zum Teil kombiniert (Zyklen-Mix). Insgesamt wurden dafür 50 Fahrzyklen nach verschiedenen Kriterien analysiert. Die Auswahl ergab 12 Zyklen, die anhand der Zyklusdynamik und dem Geschwindigkeitsprofil ausgewählt wurden. Neben den gesetzlichen Fahrzyklen NEFZ und WLTP wurden auch kundennahe Fahrzyklen berücksichtigt.

Durch die breite Basis an Eingabeparametern konnte eine fundierte Abschätzung für den Einsatzbereich des TEG in einer Fahrzeugklasse erfolgen.

Als Ergebnis der einzelnen Berechnungen erhält man für eine Fahrzeug-Motoren-Kombination die Häufigkeitsverteilung der Betriebsbereiche für einen gefahrenen Zyklus. Diese Häufigkeitsverteilung wird über der Abgastemperatur und dem Abgasmassenstrom aufgetragen, wodurch sich eine dreidimensionale Darstellung ergibt. Beispielhaft ist dies für ein Fahrzeug aus dem C-Segment in Abbildung 24: Energieinhalt aufgetragen über Abgastemperatur und Abgasmassenstrom dargestellt.

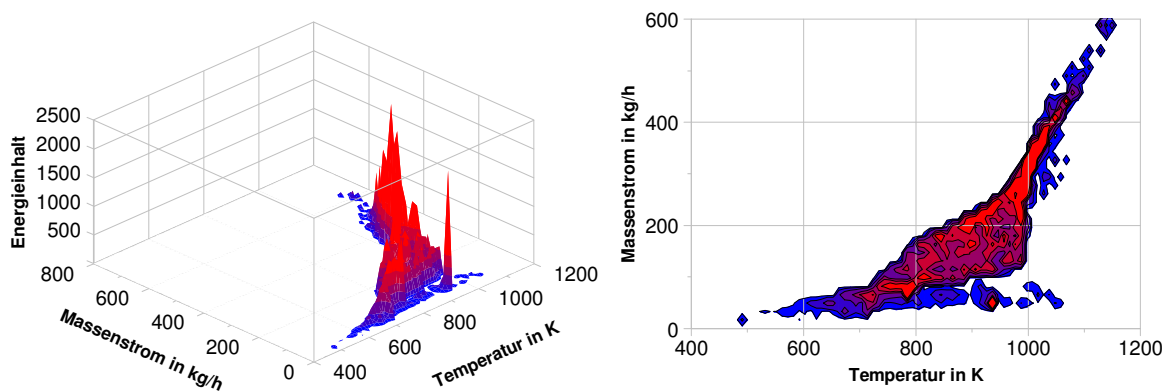


Abbildung 24: Energieinhalt aufgetragen über Abgastemperatur und Abgasmassenstrom

Da die Häufigkeit eines Betriebsbereichs in einem Zyklus noch nicht ausreichend für die Betriebsbereichsauslegung ist, wird die Häufigkeitsverteilung mit dem (Abgas)Energieangebot der Betriebsbereiche gewichtet. Man erhält so eine aussagefähige

Bewertung über Energieinhalt und –verteilung und kann eine Betriebsbereichsabschätzung durchführen. Anhand der berechneten Ergebnisse konnten die Betriebsbereiche für die Abgastemperatur- und Abgasmassenstromspreizung des TEG für eine Fahrzeug-Motoren-Kombination abgeleitet werden.

1.3 AP 30 000 Simulation

Um die breite Zielstellung dieses Vorhabens zu realisieren, war es erforderlich einen großen Teil des Entwicklungsprozesses virtuell zu gestalten. Eine umfangreiche Simulationsumgebung mit Modellbibliothek wurde geschaffen, die es ermöglicht, von der Grundlagenentwicklung des thermoelektrischen Systems, über die Integration im Fahrzeug bis zur energetischen Verknüpfung mit peripheren Fahrzeugkomponenten, Aussagen zum optimalen Systemzustand zu treffen. Die Simulationsplattform ermöglicht u.a.:

- Analyse von TEG-, Ziel- und Teilsystemen und systemischer Wechselwirkungen
- Untersuchung des Einflusses relevanter Betriebs- und Systemparameter
- Optimierung der TEG-, Ziel- und Teilsysteme und Entwurf von Betriebsstrategien
- Berechnung potentieller TEG-Leistungserbringung
- TEG-Grunddimensionierung, Optimierung, Bewertung und Vergleich
- Empfindlichkeits-, Potenzial- und Nutzwertanalysen
- Bewertung, Vergleich und Auswahl vielversprechender Konzepte und Systeme
- Analyse kritischer TEG-Bereiche mit CAD und FEM

Zur Erreichung der umfangreichen Ziele wurden folgende Entwicklungstätigkeiten durchgeführt:

- Entwicklung eines Simulationsplattform zur Auslegung von thermoelektrischen Generatoren im Fahrzeug in drei verschiedenen Detaillierungsebenen
- Validierung der Simulationsergebnisse mit Prototypen am Heißgasprüfstand
- Integration des TEG-Modells in die virtuelle Fahrzeugumgebung
- Definition eines geeigneten Energiemanagements für klassische und Hybridfahrzeuge
- Ermittlung der Verbrauchseinsparung durch den Einsatz eines TEG am Beispiel eines Hybridfahrzeugs
- Aufbau einer “Hardware-in-the-Loop“ Simulation

1.3.1 Simulationsplattform zur Auslegung von thermoelektrischen Generatoren im Fahrzeug in drei verschiedenen Ebenen

Die Dimensionierung des thermoelektrischen Generators wird mit Hilfe einer spezifisch ausgerichteten Simulationsumgebung durchgeführt. Um der Dimensionierung des thermoelektrischen Systems in vollem Umfang gerecht zu werden, ist eine Simulation in verschiedenen Detaillierungsstufen sinnvoll. Die Simulationsumgebung erlaubt von der Simulation des Gesamtsystems bis hin zur detaillierten Analyse ausgewählter Zonen in der thermoelektrischen Konfiguration eine ganzheitliche Dimensionierung des Thermogenerators. Die virtuelle Modellumgebung des Thermogenerators enthält drei Detaillierungsstufen.

- Stationäres kontinuierliches Modell
- Dynamisches quasi-zweidimensionales Modell
- CFD (Computational Fluid Dynamic) und FEM (Finite Elemente Methode)

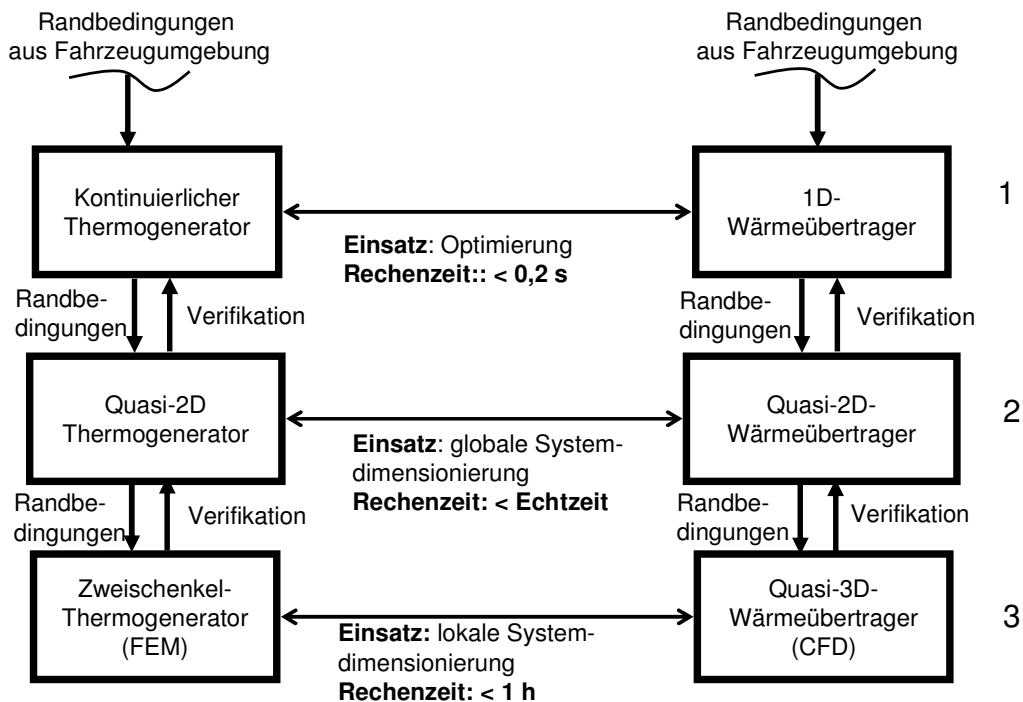


Abbildung 25: Simulationsumgebung zur Beurteilung und Optimierung thermoelektrischer Generatoren

Die Modellebenen werden aufgrund ihrer Spezifikation und Rechenzeit bedarfsorientiert eingesetzt (Abbildung 25). Nach Ableitung der Randbedingungen aus der Fahrzeugumgebung erfolgt mit Hilfe der Ebene 1 die Beurteilung des Zusammenhangs zwischen der thermoelektrischen Konfiguration und dem Wärmeübertragerkonzept. Die Wechselbeziehung zwischen dem Rippen- und thermoelektrischen Schenkelpaar design wird hier untersucht. Die Rechenzeit von weniger als 20 ms erlaubt die Untersuchung einer hohen Variantenanzahl. Weiterhin werden die Randbedingungen für die quasi-zweidimensionale Berechnung ermittelt. Dazu gehört unter anderem die optimale thermoelektrische Schenkelhöhe als Funktion der Rippenstruktur. Ausgewählte Ergebnisse aus Ebene 1 werden mit den Ergebnissen aus Ebene 2 verifiziert. Mit Hilfe der in Ebene 1 ermittelten Konfigurationsparameter erfolgt die Systemauslegung des Thermogenerators in Ebene 2. Das in Ebene 1 und 2 ermittelte Temperaturverhalten (z. B. Gasstromtemperatur) wird mit Ebene 3 in ausgewählten Betriebspunkten verglichen. Anschließend werden in Ebene 3 kritische Zonen des Wärmeübertragers detailliert untersucht (z. B. gasseitiges Ein- und Ausströmverhalten). Der Zweischenkelthermogenerator der Ebene 3 erlaubt Untersuchungen zum Auslegen der Kontaktbrücken, des Substrates oder zur thermoelektrischen Schenkelpaararchitektur.

1.3.2 TE-Grundkonzepte

Um eine für das optimale thermoelektrische System geeignete Geometrie zu definieren, erfolgt im ersten Schritt eine Aufstellung aller möglichen Kombinationen bestehend aus Wärmequelle, Wärmeträger, thermoelektrisches Schenkelpaar und Wärmesenke. Im Rahmen trivialer Gedankenexperimente und logischem Ausschlussverfahren konnte ein Großteil der Varianten eliminiert werden. Das Residuum bestehend aus 13 Varianten wurde einer rechnerischen Bewertung unterzogen. Die innerhalb der Systemstruktur auftretenden

Verlustgrößen wurden hierbei nicht berücksichtigt. Darüber hinaus wurden weitere Randbedingungen definiert.

- Heißeitentemperatur: 300 °C (Randbedingung Diesel)
- Kaltseitentemperatur: 90 °C
- Material → Bismutellurid
- Ideale Querwärmeleitung in den elektrischen Kontakten
- Keine thermischen und elektrischen Zwischenkontaktwiderstände

Die Untersuchung wurde am Beispiel von Bismutellurid durchgeführt. Aufgrund des optimalen Temperaturniveaus wird eine thermische Randbedingung von 300 °C für die Heißeite und 90 °C für die Kaltseite (Temperatur Motorkühlkreislauf) formuliert.

Es erfolgte die Erörterung des thermoelektrischen Systemverhaltens in Abhängigkeit der thermisch umgebenden Widerstände. Die zu betrachtenden Zielgrößen sind hierbei die an das Material herangetragene spezifische thermische Leistung und die vom thermoelektrischen Gerät generierte spezifische elektrische Leistung.

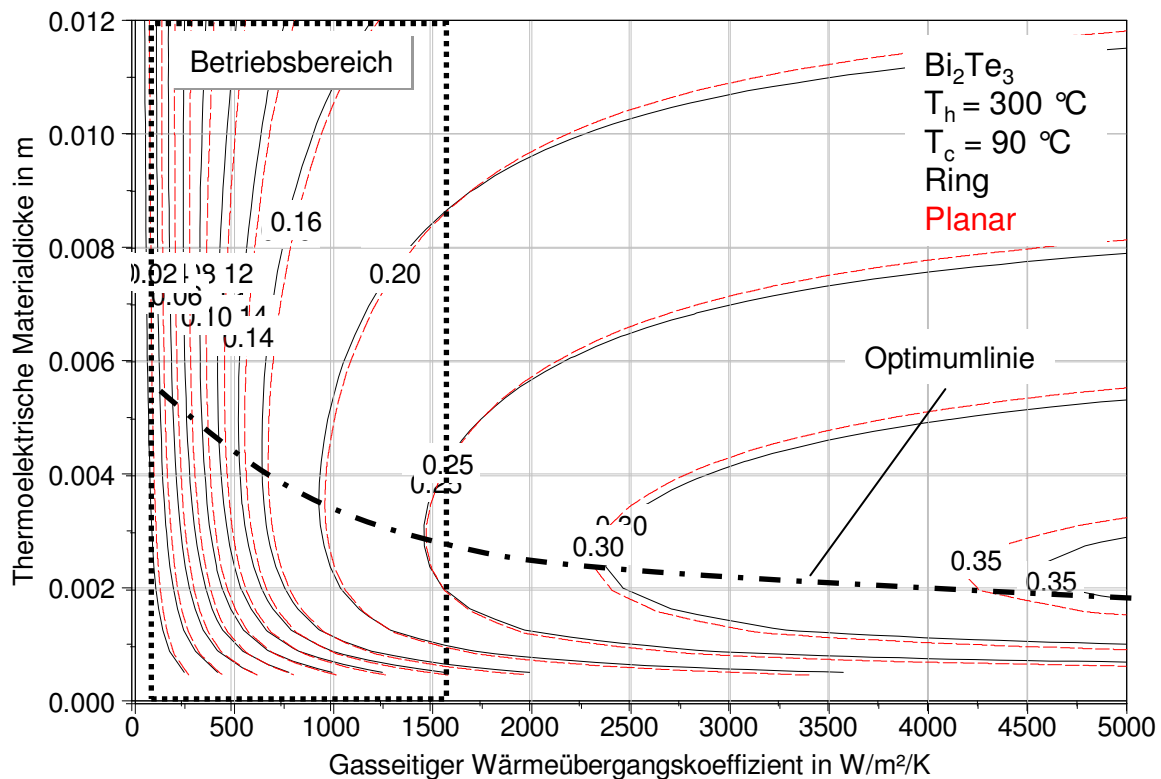


Abbildung 26: Fundamentales Verhalten eines TE-Geräts bei thermischer Einbettung (Ring- und Planarform)

Für hohe gasseitige Wärmeübergangskoeffizienten ist eine deutliche Zunahme der Leistungsdifferenz zwischen der planaren und ringförmigen Struktur erkennbar. Die unsymmetrische Wirkflächenverteilung zwischen Innen- und Außenkontakt des Ringes führt bei hohen Wärmeübergangskoeffizienten zu einer Vergrößerung des Einflusses auf die Temperaturdifferenz und damit auf das thermoelektrische Leistungsverhalten.

Bei einer Reduktion der Wärmeübergangszahl sinkt der Einfluss der geometrischen Struktur. Die spezifische elektrische Leistung des ringförmigen Moduls nähert sich die Leistung der planaren Struktur an. Weiterhin zeigt sich eine optimale Leistungskurve als Funktion der thermoelektrischen Materialhöhe und des gasseitigen Wärmeübergangskoeffizienten, deren Sensitivität für kleine Beträge des Wärmeübergangskoeffizienten signifikant abnimmt.

Aufgrund der hohen Variation der Betriebspunkte und damit der Wärmeübergangszahlen für eine ausgelegte Systemkonfiguration sind damit geringe Abweichungen von der für den jeweiligen Betriebspunkt optimalen Schenkelhöhe zu erwarten, da die Betriebspunktvariation innerhalb des in Abbildung 26 gekennzeichneten Arbeitsbereiches liegt. Der Arbeitsbereich der gaseitigen Wärmeübergangszahl leitet sich aus dem für das System maximal zulässigen Druckverlust ab.

Die hydraulischen und pneumatischen Randbedingungen sind im Rahmen der Einbettung des thermoelektrischen Moduls in die Wärmequelle und -senke als maßgebend zu definieren. Das Ziel hierbei ist die Maximierung des gas- und fluidseitigen Wärmeübergangskoeffizienten unter Berücksichtigung eines betriebspunktspezifischen maximalen Druckverlustes. In der Gesamtsystemsimulation wird im Rahmen der systemischen Wechselwirkungen ein maximal zulässiger Mehrverbrauch als Funktion des gas- und fluidseitigen Druckverlustes betriebspunktspezifisch ermittelt und als Randbedingung für die Maximierung des gaseitigen Wärmeübergangs zu Grunde gelegt. Innerhalb des definierten Betriebspunktspektrums ist ein maximal zulässiger Druckverlust von 50 mbar/m festgelegt worden. Des Weiteren wurde die Analyse sowohl mit Bismutellurid als auch mit Bleitellurid durchgeführt. Die Randbedingungen für den Bleitellurid haben sich hinsichtlich der Temperatur der Wärmequelle geändert.

- Heißeitentemperatur: 600 °C (Randbedingung Otto)
- Kaltseitentemperatur: 90 °C
- Material → Bleitellurid BASF
- Ideale Querwärmeleitung in den elektrischen Kontakten
- Keine thermischen und elektrischen Zwischenkontaktwiderstände

Nach der Analyse des Einflussverhaltens der thermisch umgebenden Widerstände auf das thermoelektrische Systemverhalten erfolgt die geometrische Spezifikation der Wärmeübertragergeometrie in der Schnittebene. Ziel ist hierbei die Maximierung des Wärmetransportes zu und weg vom aktiven Material unter der Berücksichtigung eines definierten Druckverlustes.

Die aus dem morphologischen Spektrum ausgewählten Varianten werden hierbei durch die in Tabelle 2 aufgeführten thermischen und thermoelektrischen Kriterien beurteilt.

$P_{sp_el_proj ez}$	Spezifische elektrische Leistung bezogen auf die Durchdringungs-fläche	W/cm ²
$P_{sp_el_ges}$	Spezifische elektrische Leistung bezogen auf die Gesamtschnitt-fläche	W/cm ²
$P_{sp_el_legCouple}$	Spezifische elektrische Leistung bezogen auf die Schenkelpaarfläche	W/cm ²
$P_{sp_th_legCouple}$	Spezifische thermische Leistung bezogen auf die Schenkelpaarfläche	W/cm ²
$\Delta p_{sp \ l}$	Druckverlust bezogen auf die Rohrlänge	mbar/m

Tabelle 2: thermischen und thermoelektrischen Kriterien

Alle dargestellten Größen sind hierbei entdimensioniert, d. h. sie sind auf entsprechend geeignete Flächen bzw. Längen reduziert. Die spezifische elektrische Leistung $P_{sp_el_proj ez}$ bezieht sich auf Flächenbereiche, die den Gesamtschnitt durchdringen. Sie ist wesentlich für die Beurteilung der den Wärmeübertrager betreffenden Gesamtmasse. Darüber hinaus ist die spezifische elektrische Leistung $P_{sp_el_ges}$ für die Bewertung des Flächennutzungsgrades maßgebend. Die Variationsparameter für die Berechnung der in Tabelle 2 aufgeführten Größen sind die Rippendichte x und die Kanalhöhe h_j bzw. Kanalbreite w_j für rechteckige

Konzepte und der Innendurchmesser d_i für ringförmige Systeme. Als fest definierte Größen sind hierbei die Rippendicke zu nennen.

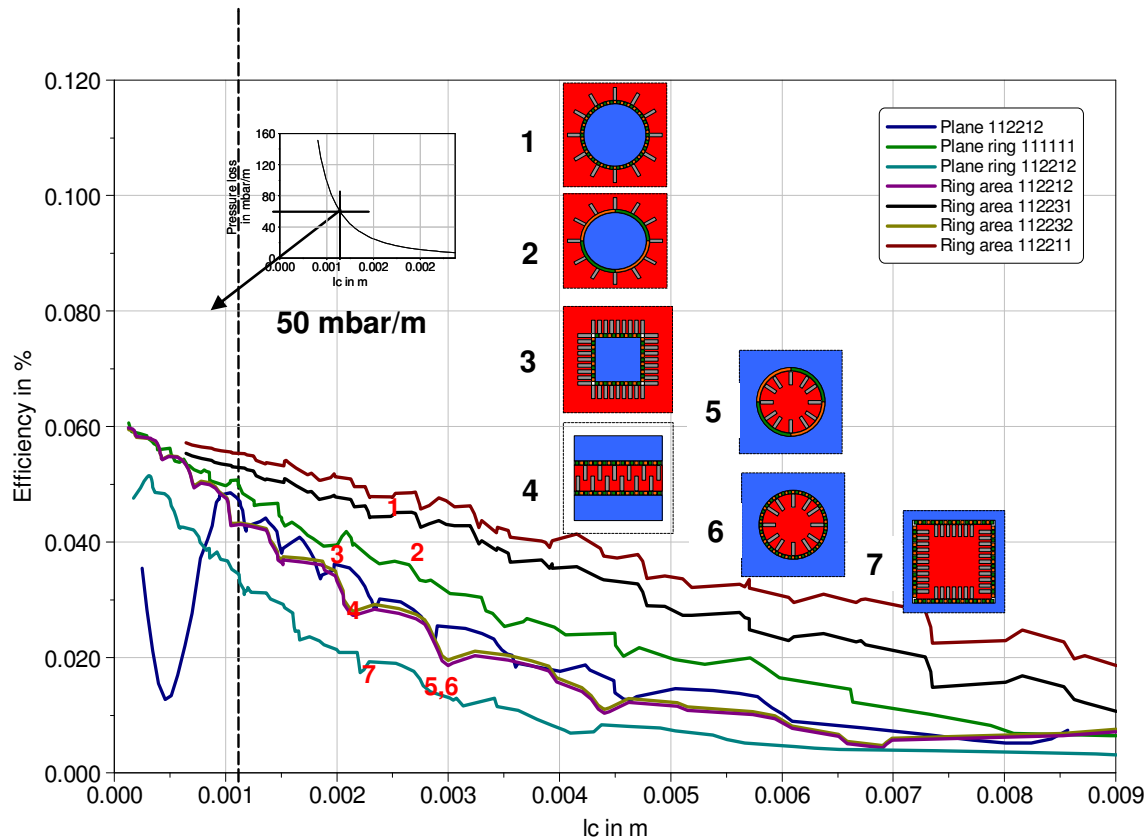


Abbildung 27: Wirkungsgradverhalten als Funktion der charakteristischen Länge

Am Beispiel des in Abbildung 27 dargestellten Wirkungsgradverhaltens zeigt sich die höchste thermoelektrische Systemeffektivität für die außenliegenden Rundkonzepte (Nr. 1 und 2 in der oberen Abbildung). Das Ziel eines wärmeübertragenden Systems mit integriertem thermoelektrischen Material differiert zum klassischen Wärmeübertrager.

Folgend Erkenntnisse wurden aus den Ergebnissen abgeleitet:

Das Verhältnis zwischen Gasvolumen und thermoelektrisch benetzter Fläche sollte möglichst groß sein, dies führt zu großen Temperaturdifferenzen über dem TE-Material („Flaschenhals + Trichterprinzip“).

Das Verhältnis zwischen Kühlmediumvolumen und thermoelektrisch benetzter Fläche sollte ebenfalls möglichst groß sein. Da jedoch der thermische Kontakt zwischen der Kühlflüssigkeit und der WÜ-Wand deutlich günstiger ist im Vergleich zum Gas/Wand-Kontakt, kann hier auf deutlich kleineres Volumen (z.B. innenliegende Fläche) zurückgegriffen werden.

Unberippte Ringkonzepte mit äußerer Gasströmung sind aufgrund des hohen Volumen/Oberflächenverhältnisses als thermoelektrische Konzepte ungeeignet, da hier die Ausnutzung des außenliegenden großen Gasvolumens durch Rippen fehlt.

Geschachtelte Konzepte mit innenliegender Gasstromführung sind deutlich ungünstiger aufgrund der großen benetzten TE-Fläche im Vergleich zum Gasvolumen. Dies führt zu kleinen Temperaturdifferenzen und damit zu einem vergleichsweise schlechten TE-Wirkungsgrad.

Ringkonzepte mit außenführender Gasströmung sind für thermoelektrische Anwendungen, mit dem Ziel sehr hohe Wirkungsgrade darzustellen, prädestiniert.

Klassische planare Systeme zeigen jedoch einen höheren volumetrischen Ausnutzungsgrad bei kleineren thermoelektrischen Wirkungsgraden.

Querangeströmte Systeme könnten jedoch ähnliche Packungsdichten im Vergleich zum planaren System erreichen.

Alternativ zur Ringstruktur kann eine Form der n-Eckstruktur, die einen möglichen Kompromiss zwischen hohem Wirkungsgrad und Beibehaltung einer planaren Schenkelstruktur darstellt, realisiert werden.

1.3.3 Auslegung und Dimensionierung des planaren TE-Generators

Die entwickelte Simulationsumgebung erlaubt die detaillierte Dimensionierung eines planaren TE-Systems. Die Untersuchungen konzentrieren sich hierbei auf folgende Kriterien:

- Maximale generierbare Leistung
- Leistungsdichte bez. auf das TE-Material und Gesamtmasse
- Systemeffizienz
- Leistungsspreizung für verschiedene Betriebspunkte
- Einfluss der Optimierung
- Fertigungstechnische Aufwendungen
- Systemische Wechselwirkungen
- Sensitivität
- Skalierbarkeit

Für die Simulationsuntersuchung wurden folgende Randbedingungen festgelegt:

- Fahrzeug: Golf
- Integrationsort: nach Hauptkatalysator
- Volumen / Bauraum: Länge: 920 mm; Breite: 150 mm; Höhe: 165 mm
- Thermische Randbedingungen: Häufigkeitsverteilung über alle wesentlichen Fahrzyklen:
50 % Punkt, $T_{\text{gas}} = 607 \text{ °C}$, Massenstrom = 110 kg/h
20% - 80% Betriebsbereich $T_{\text{gas}} = 477 \text{ °C} - 777 \text{ °C}$
- Massenstrom: 50 – 200 kg/h
- Hydraulische Randbedingungen: Maximal 50 mbar im definierten Betriebsbereich
- Wunscheistung im Auslegungspunkt: 500 W

Nach Auswahl einer geeigneten Basisarchitektur (rund oder planar), Topologie und Anordnung erfolgt die verfeinerte Dimensionierung und Optimierung des TE-Wärmeübertragungssystems. Die Dimensionierung orientiert sich an dem „Top-Down“-Prinzip. Die für die Auslegung notwendigen Randbedingungen werden einbezogen (Abbildung 28).

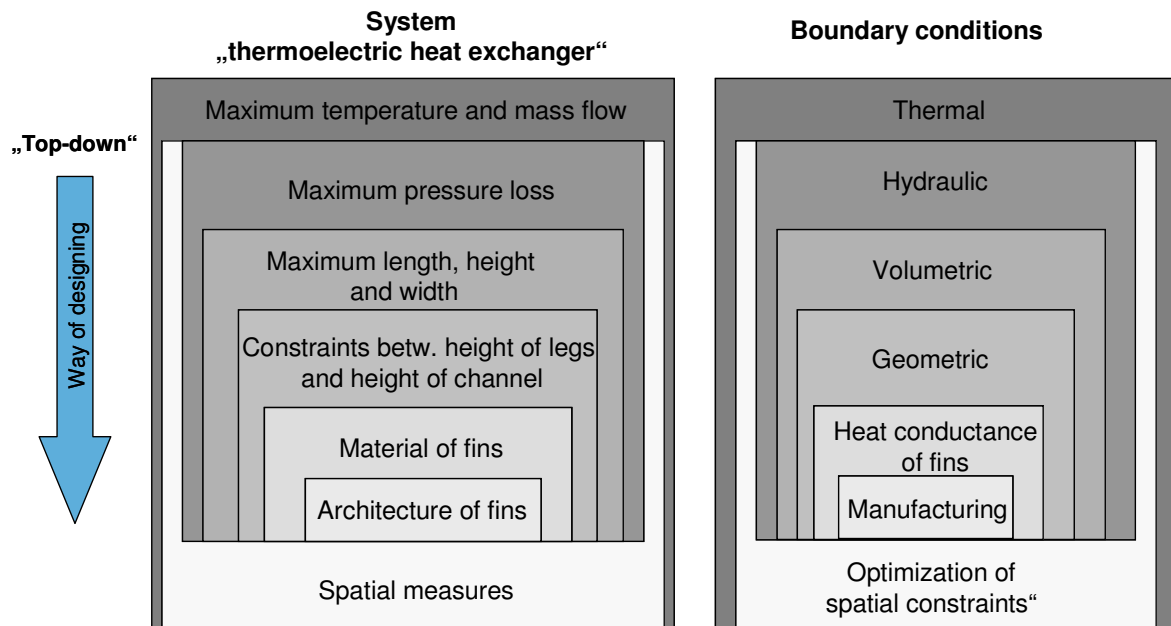


Abbildung 28: Analyse des Thermogenerators

Das ausgewählte planare Wärmeübertragerkonzept weist eine mehrflutige Architektur auf. Der Abgasmassenstrom eines Mittelklassefahrzeugs bildet die Wärmequelle. Das Temperaturniveau der Wärmesenke, die als flüssiges Arbeitsmedium ausgeführt ist, liegt im Bereich zwischen 90 °C und 50 °C.

Die signifikant differierenden temperaturabhängigen Eigenschaften zwischen Blei- und Bismuttellurid erweisen sich für Untersuchungen in einem Betriebspunktbereich als vorteilhaft. Die beiden Materialien wurden daher für die detaillierten Analysen zur Optimierung gewählt.

Die Parameter des Grundsystems werden unter anderem durch folgende Größen repräsentiert:

- Schenkelkantenlänge
- Schenkelpaarzwischenraum
- Schenkelgrundhöhe
- Modulgröße
- Finnendimensionierung (Abstand, Dicke, Höhe)
- Finnenmaterial
- Kanaldimensionierung

Die thermischen Randbedingungen konzentrieren sich auf einen Betriebsbereich, der eine typische Stadt-, Überland- und Autobahnfahrt beinhaltet. Für das ausgewählte Mittelklassefahrzeug sind hier Temperaturen zwischen 450 °C und 800 °C und Massenströme zwischen 50 kg/h und ca. 200 kg/h zu erwarten. Die Finnenarchitektur weist eine durch den Finnenabstand, der Finnendicke und der Finnenhöhe charakterisierte Konfiguration auf, die einen maximal zulässigen Druckverlust nicht überschreitet.

Die Systemdimensionierung wird im Rahmen der definierten Randbedingungen (Abbildung 28) durchgeführt. Beginnend bei den thermischen Randbedingungen erfolgt die Untersuchung der maximal zu generierenden elektrischen Leistung. Im weiteren Verlauf sind die hydraulischen und die volumetrischen Randbedingungen spezifiziert worden. Die geometrischen und die fertigungstechnischen Zwangsgrößen folgen danach. Sie stellen die Randbedingungen mit der höchsten Priorität dar.

Die fertigungstechnischen Randbedingungen setzen Grenzen bei der Rippendicke und Rippendichte. Unter dem Gesichtspunkt der materialschlüssigen Verbindung zwischen Finnen und thermoelektrischen Material sind die Grenzen zwischen hoher Finnendichte und geringer Finnendicke schnell erreicht.

Eine Rippendicke von 0,1 mm mit einer Dichte von 50 % ist in diesem Zusammenhang fertigungstechnisch nicht realisierbar. In Abbildung 29 sind die beiden Varianten, die innerhalb des Projekts für umsetzbar gelten und damit favorisiert werden, dargestellt.


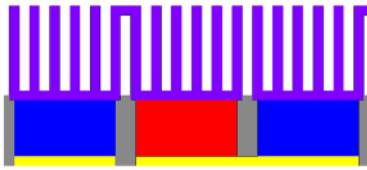
	<p>Blechrippe: Dicke: 0,2 mm Abstand: 2 mm Rippendichte: 9,1%</p>
	<p>Gefräste Rippe: Dicke: 1 mm Abstand: 1 mm Rippendichte: 50 %</p>

Abbildung 29: Realisierbare Finnenstrukturen (Schnittbild)

Die gebogene Blechrippenstruktur weist hierbei eine Dichte von ca. 10% auf. Die gefräste Rippe hat eine Dicke von 1mm und eine Dichte von 50%. Beide Rippenstrukturen sind durch geeignete Löt- oder Schweißverfahren direkt mit dem thermoelektrischen Medium materialschlüssig zu verbinden.

Abbildung 30 zeigt zusammengefasst sukzessive die elektrisch erzeugte Leistung als Funktion der Kanalanzahl auf. Der rote Verlauf repräsentiert das ideale System unter Berücksichtigung der thermischen Randbedingungen.

Die schwarze Kurve beinhaltet das Systemverhalten unter Berücksichtigung der thermischen und elektrischen Einbettung des TE-Materials. Der Wärmeübertrager ist ideal.

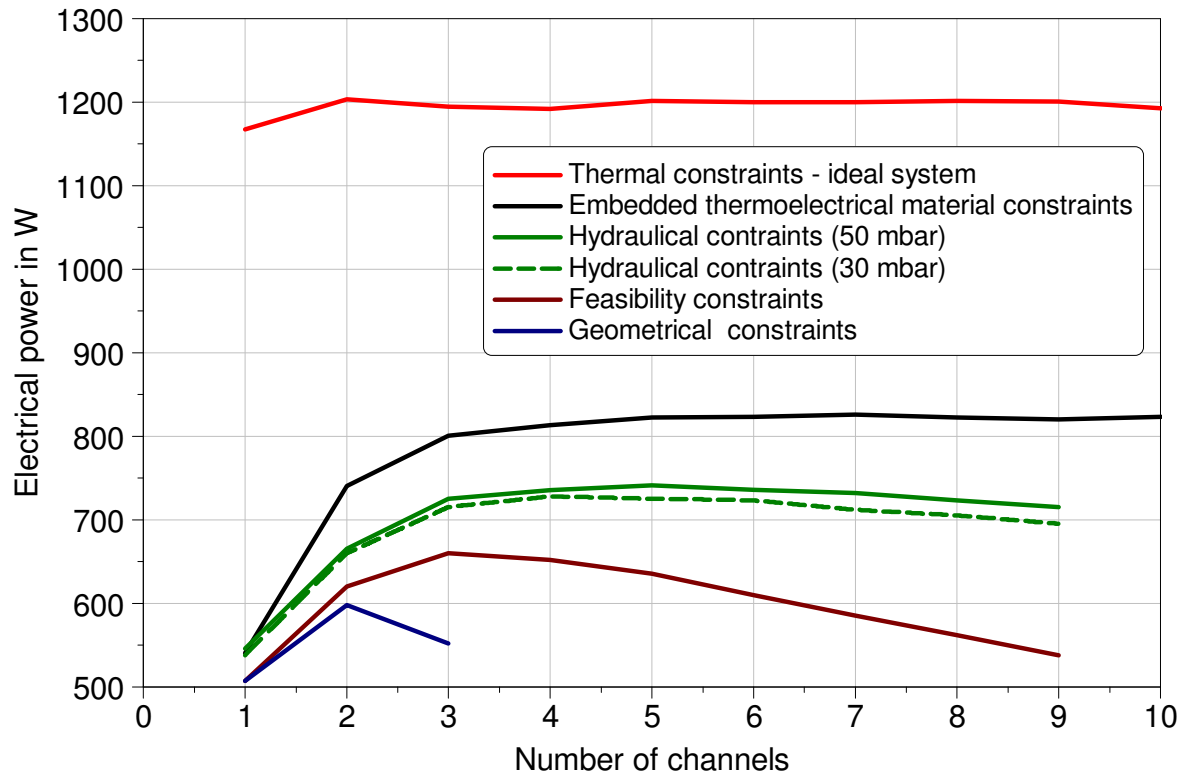


Abbildung 30: Leistungsverlauf für einen n-flutigen Thermogenerator unter Berücksichtigung aller bisherigen Randbedingungen

Unter Berücksichtigung aller erörterten Randbedingungen weist der zweiflutige Thermogenerator das Maximum an elektrisch generierbarer Leistung auf. Da neben der absoluten Leistung weitere Kriterien für die Bewertung wesentlich sind, werden in den folgenden Untersuchungen der ein-, der zwei- und der dreiflutige Thermogenerator detailliert analysiert (Abbildung 31).

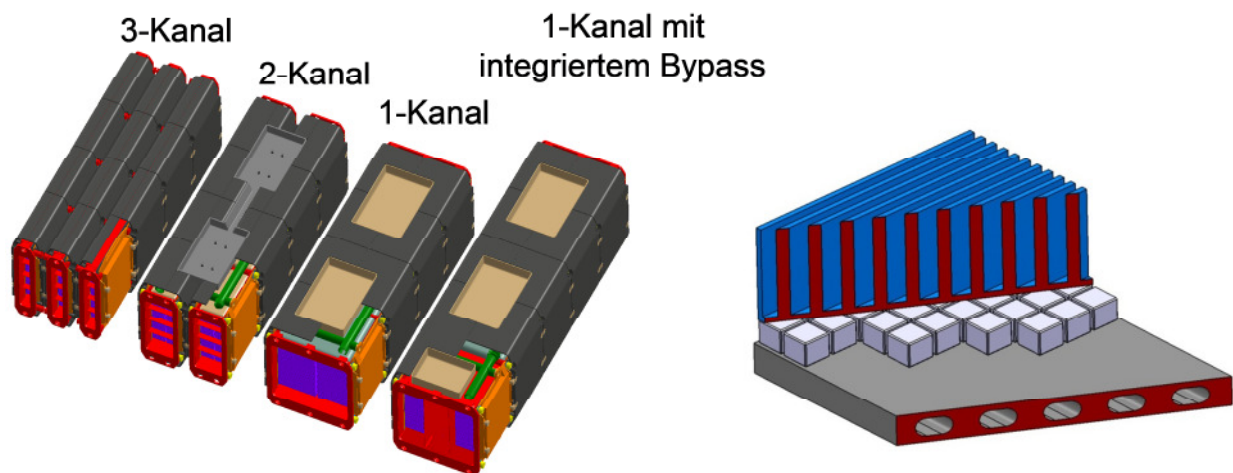


Abbildung 31: Untersuchte TEG-Varianten

Neben der Dimensionierung der Grundkanal- und Finnengeometrie wurden Untersuchungen zur Dimensionierung der Schenkelpaare und des Moduls durchgeführt.

Das Basiskonzept des einflutigen Thermogenerators zeigt innerhalb des definierten Betriebsbereiches den höchsten Ausnutzungsgrad des thermoelektrischen Materials (Abbildung 32).

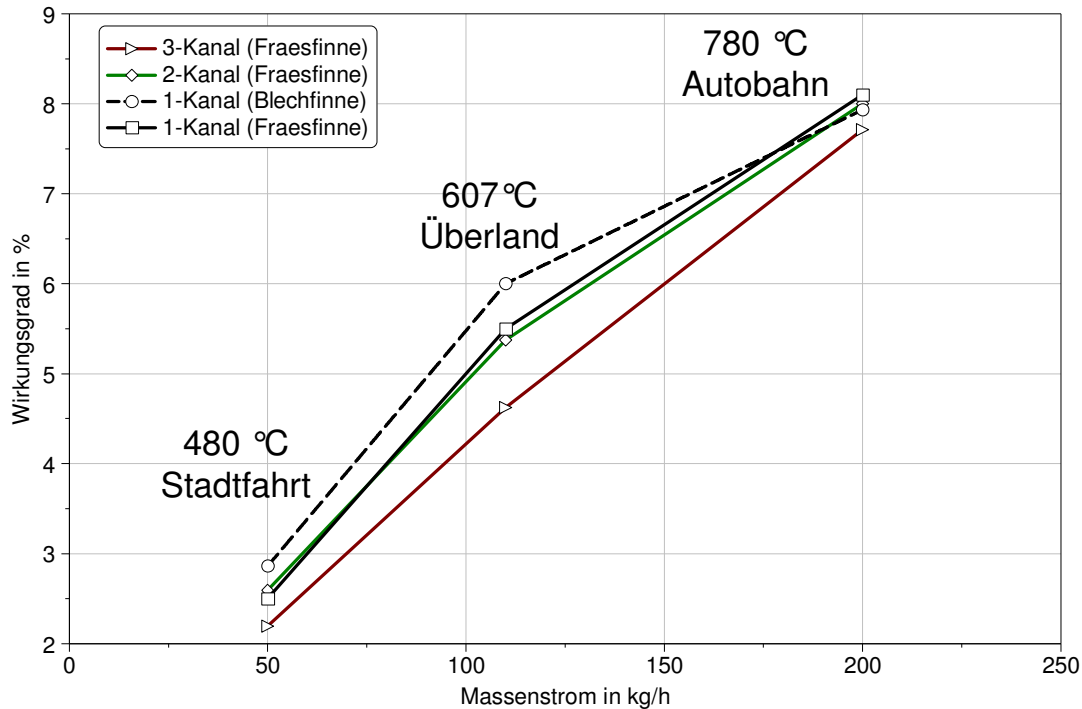


Abbildung 32: Systemwirkungsgradverhalten für 1-, 2- und 3-Kanal Thermogenerator – Basismodell

Der Wärmeübertrager des einflutigen TEG weist aufgrund der längsten Finnen die höchste Effizienz im Vergleich zum zwei- und dreiflutigen TEG auf. Je höher die Effizienz des Wärmeübertragers, desto kleiner ist die thermoelektrische Materialhöhe auszuführen. Der einflutige Thermogenerator zeigt damit auch die höchste Leistungs-dichte bezogen auf das thermoelektrische Material auf. Die TE-Materialkosten werden damit entscheidend beeinflusst. Der Thermogenerator ist mit einem integrierten Bypass ausgestattet, der eine bedarfsgerechte Steuerung des Massenstroms in kritischen Betriebsbereichen erlaubt.

Die Leistung im Auslegungspunkt beträgt 472 W. Um jedoch das Ziel von 500 W zu realisieren sind weitere Maßnahmen notwendig.

In Tabelle 3 ist die Basisdimensionierung für den einflutigen Thermogenerator aufgeführt.


	1-flutiges System mit DC/DC-Wandler
Blechrippe 	0,2 mm Dicke 2 mm Abstand, Kupfer
Schenkelzwischenraum	0,5 mm
Schenkelkantenlänge	5 mm
optimale Schenkelhöhe	4,3 mm PbTe
Segmentierung	nein
gemischter Schenkelquerschnitt	$A_n=A_p$ ($A_n=1,36*A_p$)
Motorkühlkreislauf	90 °C
Aktuelle Länge	500 mm
Elektrische Leistung	473 W (506 W)

Tabelle 3: Konfiguration Basismodell mit Material Bleitellurid von BASF

1.3.4 Validierung mit Prototypen am Heißgasprüfstand

Das quasi-2D Modell wurde mit stationären Messungen am Prüfstand verglichen. Die Prüfstandskonfiguration war ein einflutiger Wärmeübertrager mit integriertem Bypass. Der Vergleich erfolgte mit HZ-Modulen, basierend auf Bismuttellurid. Die Messung wurde für drei verschiedene Gasmassenströme und drei verschiedenen Gastemperaturen sowie fünf verschiedenen Kühlmediumtemperaturen durchgeführt.

Bild 2 zeigt den Rechnungs-Messungsvergleich. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung. Bei niedrigen Kühlwassertemperaturen nimmt die Abweichung jedoch zu.

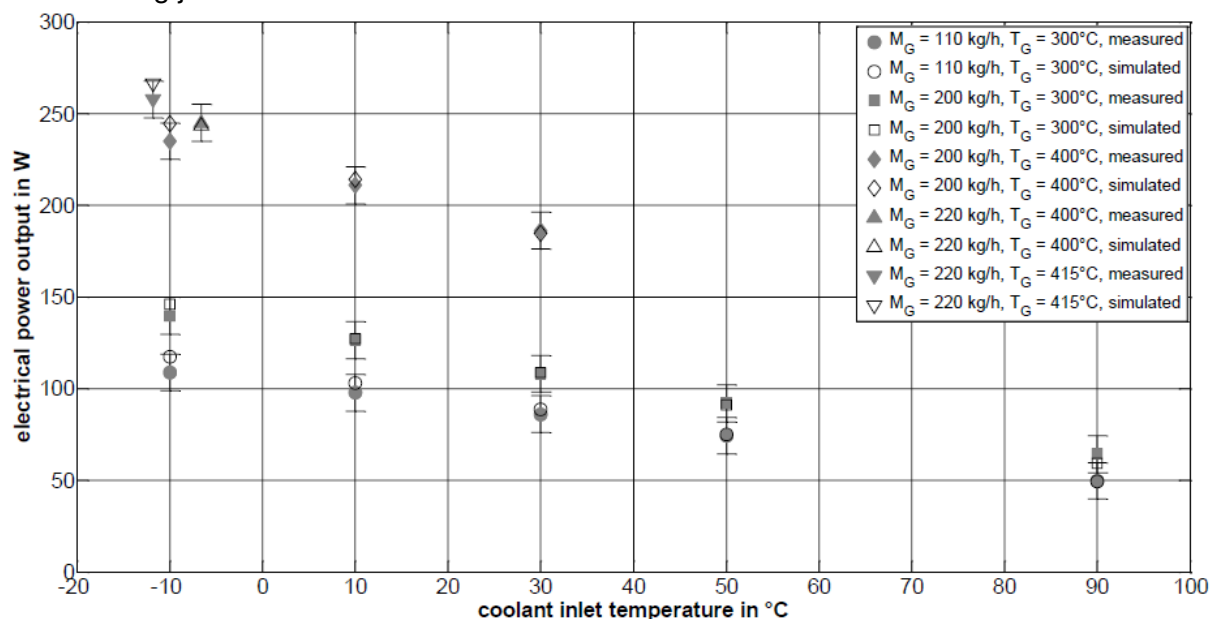


Abbildung 33: Rechnungs-Messungsvergleich für den 1-Kanal TEG

1.3.5 Integration in die virtuelle Fahrzeugumgebung

Die Simulation auf der Gesamtsystemebene erfolgt auf Basis des „Top-Down“-Entwurfs. Die Applikationsumgebung „Fahrzeug“ ist bekannt. Die Aufgaben der Gesamtsystemsimulation können in folgende Punkte gegliedert werden:

- I. Ableitung von thermischen, fluidmechanischen und elektrischen Randbedingungen
- II. Untersuchung systemischer Wechselwirkungen
- III. Ermittlung von Verbrauchseinsparpotentialen
- IV. Erarbeitung von thermischen, fluidmechanischen und elektrischen Betriebsstrategien zur Einhaltung
 - der Materialgrenztemperatur
 - Des Grenzdruckverlusts
 - Der Grenzspannung
 - Der Kühlmittelgrenztemperatur

Die Rechenzeit der Gesamtsimulation sollte der Echtzeit entsprechen. Für das Auslegen des thermoelektrischen Systems sind die Randbedingungen zu definieren.

Die Gesamtsimulation ermittelt hierbei den maximal zulässigen Druckverlust, die maximal verwertbare elektrische Leistung und die zur Verfügung stehende thermische Leistung.

Das implementierte TEG-System beeinflusst den Verbrennungsmotor, die Wärmesenke (sofern dies nicht der Umgebungsluft entspricht), das gesamte Fahrzeug infolge des Massenzuwachses und das Bordnetz. Die Untersuchung der Wechselwirkungen ist damit Bestandteil der Gesamtsimulation.

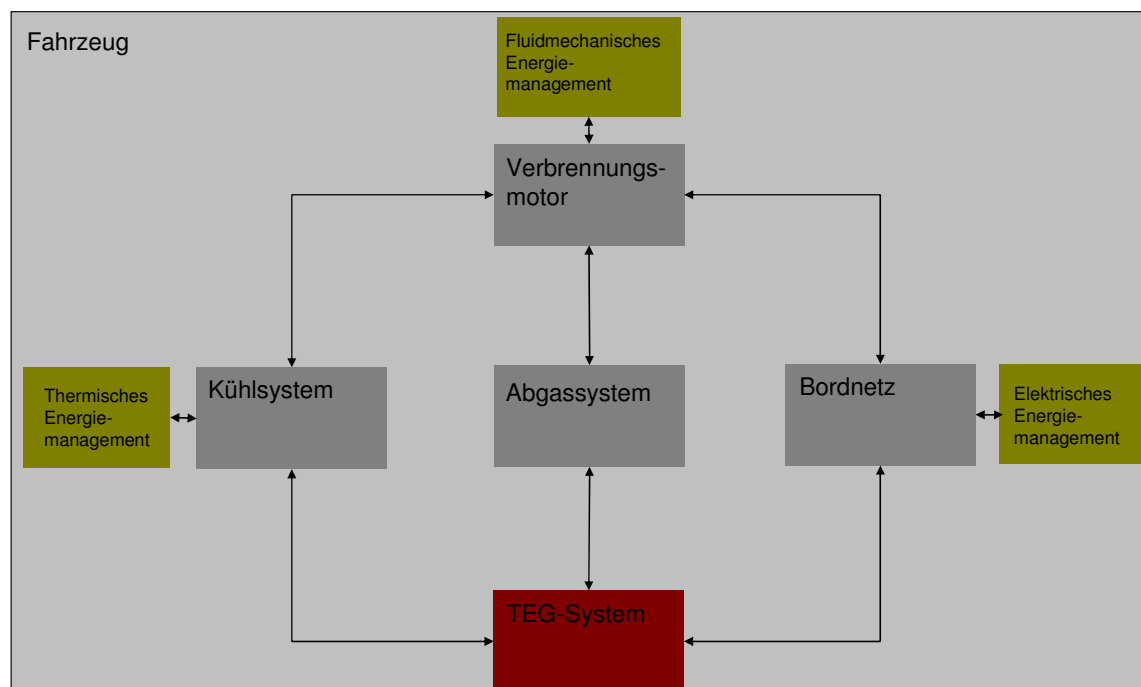


Abbildung 34: Systemschaubild - Gesamtmodell

Das Fahrzeugmodell ist in fünf Baugruppen unterteilt (Abbildung 34):

- Verbrennungsmotor

- Abgassystem
- Kühlsystem
- Bordnetz
- TEG-System

Im Vorfeld wurde die Detailtiefe der Baugruppen mit Hilfe eines Lastenhefts definiert. Dies gewährleistet eine geeignete Abstimmung zwischen Rechenzeit und Modellqualität. Die Gesamtsystemumgebung ist echtzeitfähig und berücksichtigt gleichzeitig die gewünschten Wechselwirkungen zwischen den Systemen.

1.3.6 Definition eines geeigneten Energiemanagements für klassische Fahrzeuge und Hybridfahrzeuge

Drei Fahrzyklen wurden für die Untersuchungen ausgewählt. Diese sind in Abbildung 35 dargestellt. Der Neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ) repräsentiert den aktuell verwendeten Homologationszyklus für PKW in Europa. Er enthält einen Stadt-, einen Überland und einen Autobahnteil. Weiterhin wird der WLTP Zyklus verwendet, der ebenfalls eine Stadt-, Überland- und Autobahnfahrt enthält. Dieser ist jedoch deutlich dynamischer als der NEFZ. Das dritte Fahrprofil ist eine Autobahnfahrt mit einer Maximalgeschwindigkeit von 150km/h (Motorway 150).

Das Fahrzeug weist ein "downspeeding"-Konzept auf. Die Betriebspunkte sind hin zu hohen Lastpunkten und kleinen Drehzahlen verschoben. Es sind folgende Fahrzeugrandbedingungen definiert:

- Masse: 1800 kg (obere Mittelklasse)
- I T - Ottomotor
- 8-Gang Automatikgetriebe
-

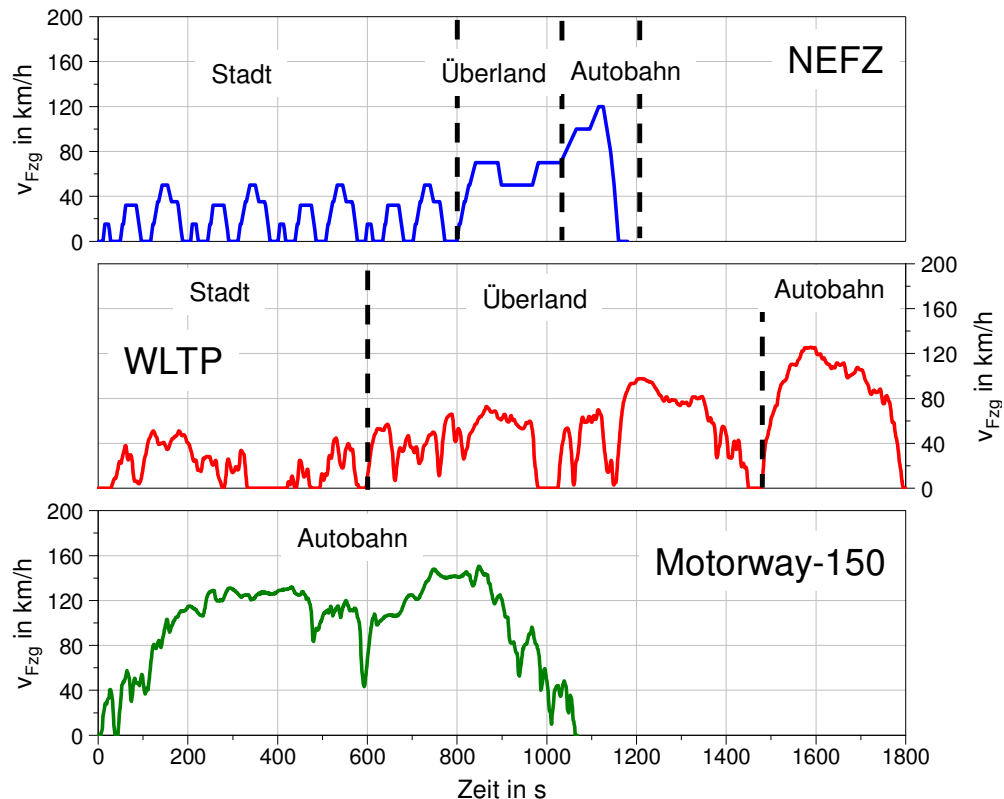


Abbildung 35: Betrachtete Fahrzyklen

Nach Auslegung und Optimierung der Grundkomponenten und deren Implementierung in das Fahrzeug sind Steuerungs- und Kontrollfunktionen zu entwerfen, die eine energetisch günstige Interaktion zwischen dem TEG-System und den betroffenen Fahrzeugkomponenten gewährleisten.

- Kontrolle der TE-Materialgrenzflächentemperatur
- Kontrolle des Druckverlusts im Abgasmassenstrom
- Kontrolle der Arbeitsspannung der Module
- Verwertung der elektrischen Energie (Speicherung oder direkter Verbrauch)

Die Kontrolle und Regelung aller Größen macht einen Bypass zur Abstimmung des Abgasmassenstroms notwendig. Der einflutige Thermogenerator verfügt über einen integrierten Bypass mit regelbarer Klappe. Der thermoelektrische Generator hat anders als die Abwärmenutzungskonzepte mit mechanischem Antrieb keine rotierenden Bauelemente. Die Regelstrecken enthalten ausschließlich fluidmechanische, thermische und elektrische Subkomponenten. Folgende Größen sind innerhalb des Betriebsbereichs maximal zulässig:

- Druckverlust: 60mbar
- Materialgrenzflächentemperatur: 600 °C
- Kühlmittelintrittstemperatur in den Thermogenerator 70 °C
- Leerlaufspannung vor DC/DC-Wandler: 60V

Das Regelverhalten wird neben dem Maximalwert durch einen Sollwert bestimmt. Dieser liegt unterhalb des Maximalwerts. Das mechanische und fluidmechanische Verhalten der Klappe wird als ideal angenommen. Der Bypasskanal ist reibungsfrei und adiabat. Die Geschwindigkeit der Öffnung oder Schließung der Klappe wird ausschließlich durch den Regler bestimmt. Die Klappe ist demnach masselos, die Druck- und Impulskräfte bleiben unberücksichtigt. Es sind folgende Bedingungen an die Reglerstruktur geknüpft:

- Stabilität in jedem Betriebspunkt
- Bauteilschutz des TEG hat die höchste Priorität
- Bypass erlaubt das Umleiten des gesamten Gasmassenstroms
- Regler für Kontakttemperatur, Gesamtspannung am TEG, Wärmeeintrag in das Kühlwasser
- Gasdruckdifferenz über dem TEG und SOC der Batterie

Ein Optimierungsverfahren nach Nelder-Mead identifiziert automatisiert das Übertragungsverhalten des Systems. Hierbei wird die Reaktion der zu regelnden TEG-Variablen auf einen Sprung am Eingang des Thermogenerators untersucht.

Bild 4 zeigt beispielhaft die Regelung der Moduloberflächentemperatur der ersten Modulreihe auf. In Abbildung 36 ist die Regelung der Kontakttemperatur des ersten Moduls beispielhaft dargestellt. Der Maximalwert beträgt 870 K. Der Sollwert liegt bei 810 K. Die Bypassregelung zeigt eine Abweichung in der Temperatur von annähernd 10 K. Das PT1-Verhalten mit einer kleinen Zeitkonstante erlaubt eine einfache Regelung.

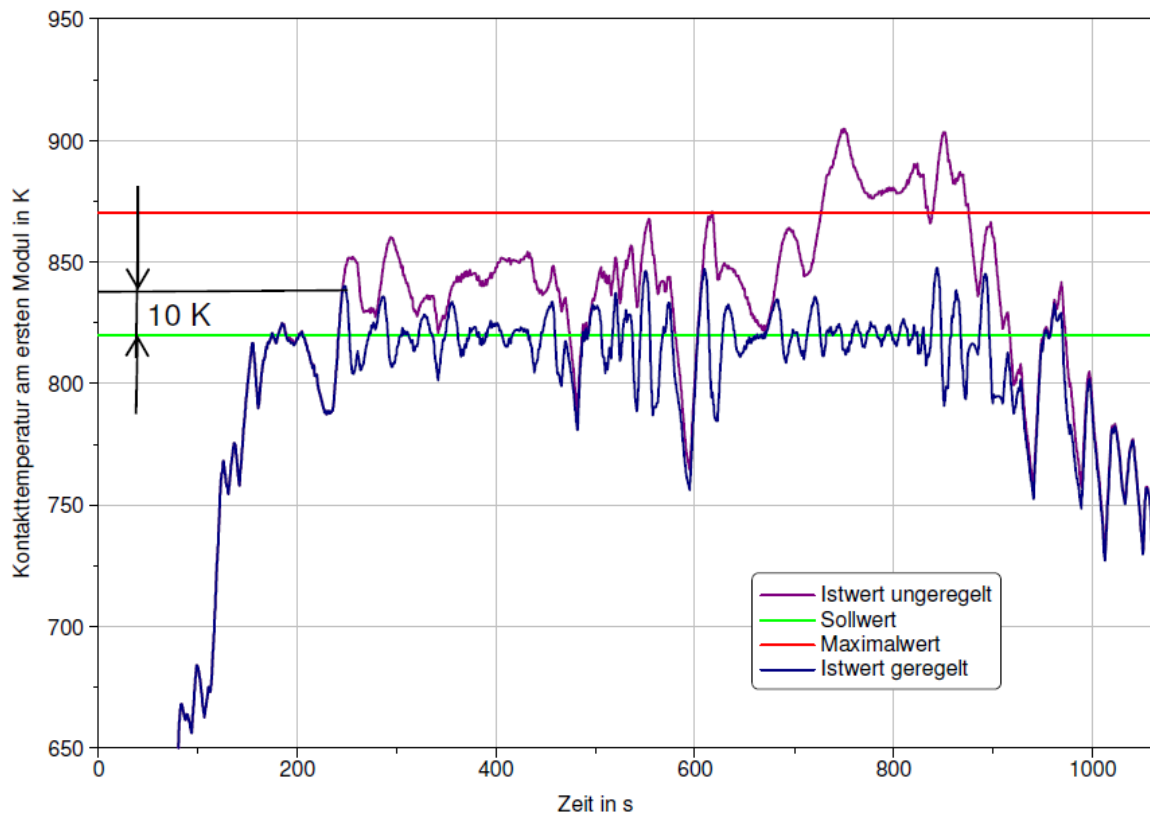


Abbildung 36: Regelung der Kontakttemperatur im Motorway150

1.3.7 Elektrifizierung des Antriebsstrangs

In zukünftigen Fahrzeuggenerationen wird der Antriebsstrang stärker elektrifiziert sein. Der Mild-Hybrid und der Thermogenerator sind als komplementäre Maßnahmen zu sehen. Die Verbrauchseinsparungen des Fahrzeugs mit Mild-Hybrid und TEG wird untersucht und dem konventionellen Fahrzeug gegenübergestellt. Das Modell des Basisfahrzeugs wurde um folgende Mild-Hybrid Komponenten und Funktionen erweitert:

- Start/Stop-Funktion
- Rückgewinnung von Bremsenergie (Rekuperation)
- Elektrische Unterstützung des Verbrennungsmotors
- Generatorischer Betrieb der E-Maschine bei Konstantfahrten

1.3.8 Ermittlung der Verbrauchseinsparung am Beispiel des Hybridfahrzeugs

Die Verbrauchseinsparung des einflutigen Thermogenerators ist für alle drei Fahrzyklen untersucht worden. Abbildung 37 zeigt den Zyklenvergleich. Der Hybrid mit TEG-System ohne Regelung erzielt eine maximale Verbrauchsminderung von 2.7%. Wird die Regelung aktiviert, sinkt die Einsparung auf knapp 2% ab. Der Bypass wird geöffnet, um die Kontakttemperatur unterhalb der Grenze von 550°C zu halten.

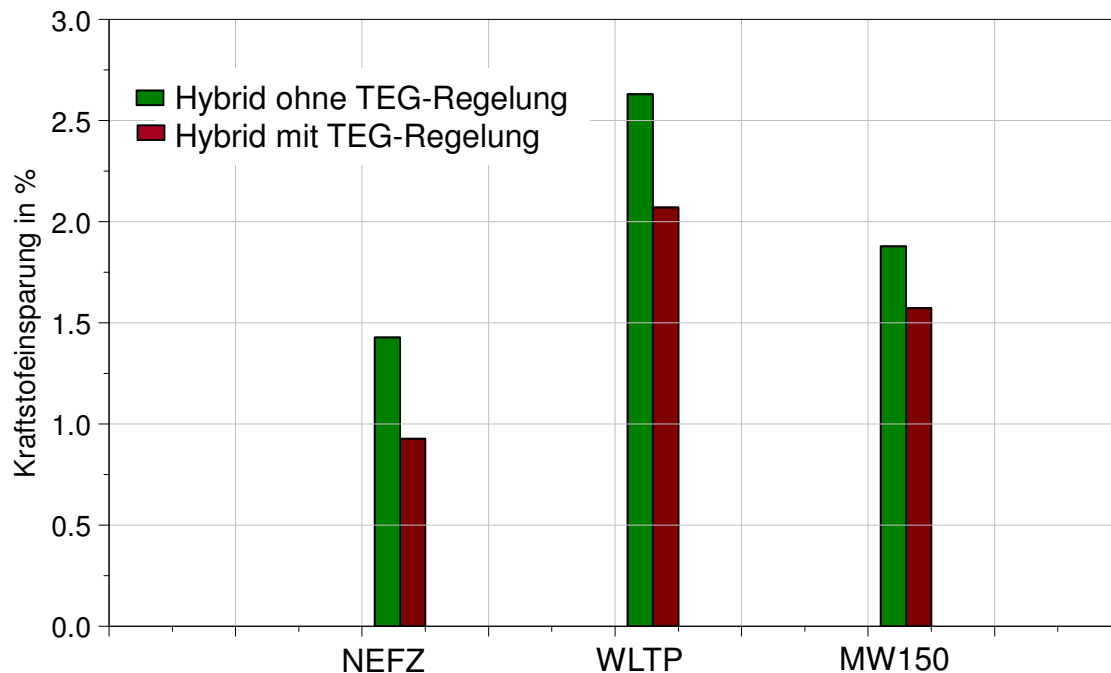


Abbildung 37: Verbrauchseinsparung im Zyklus

Im WLTP lässt sich für alle Varianten die höchste Reduktion zu erzielen. Im Motorway 150 sinkt das Einsparpotential. Die höher lastigen Betriebspunkte der Autobahn verringern maßgeblich den Anteil der elektrischen Last am Gesamtenergieverbrauch. Im NEFZ ist mit dem geregelten System eine Einsparung von 0.9% zu erzielen. Abbildung 38 zeigt den Leistungsverlauf der Batterie mit mechanischer und thermischer Energierückgewinnung. Die Ladezustandsdifferenz (SOC) zwischen Start und Ende erreicht Null. Die Entladung der Batterie (negative Leistung) entspricht der "Torque-Assist" (elektrische Unterstützung der VKM) Phase. Die Batterie wird im generatorischen Betrieb der E-Maschine während des Bremsens oder Konstantfahrten sowie im Betrieb des Thermogenerators aufgeladen.

Das obere Diagramm zeigt beispielhaft zwei Phasen, in denen größtenteils Wärmeleistung zurück gewonnen wird. Die thermische Energie wird über einen großen Zeitraum mit geringer Leistungsausbeute (ca. 500W, roter Bereich) zurückgewonnen. Die mechanische Energie wird über einen kurzen Zeitraum (grüner Bereich) mit hoher Leistungsausbeute (ca. 4kW) rekuperiert. Das Be- oder Entladen von elektrochemischen Speichern mit geringen Leistungen über einen langen Zeitraum erhöht die Lebensdauer und führt zu hohen Wirkungsgraden. Das Laden der Batterie mittels thermischer Energie ist damit im Vergleich zur mechanischen Energie vorteilhafter.

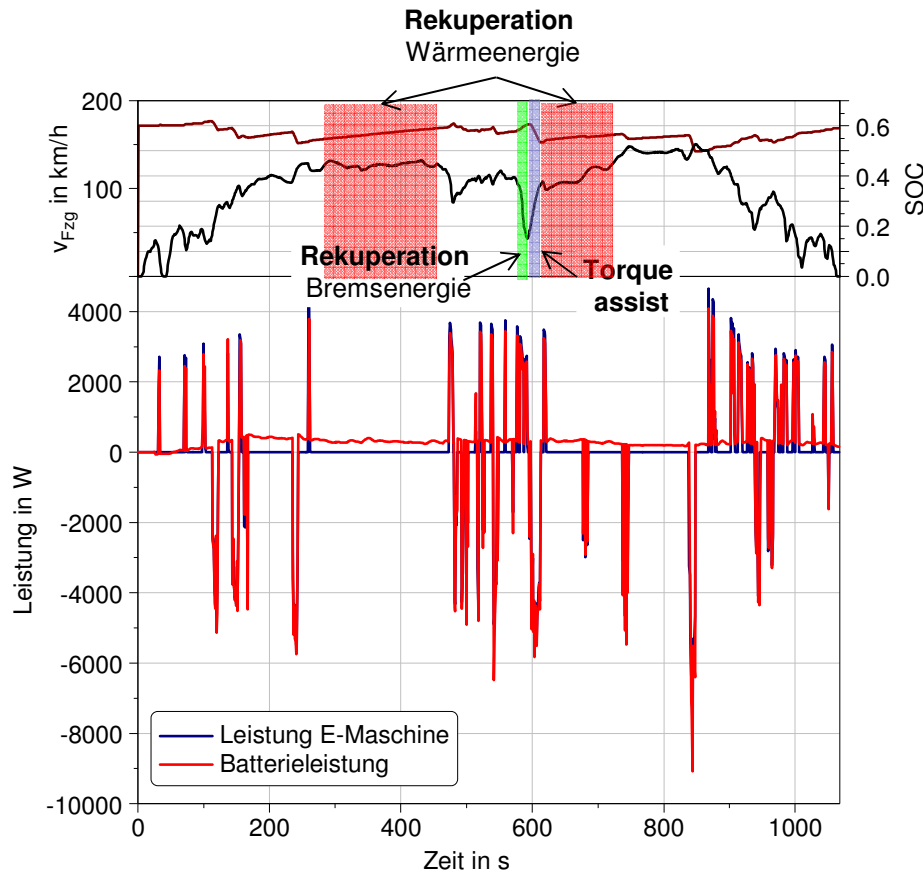


Abbildung 38: Leistungsverlauf im Motorway 150 mit 1-Kanal TEG

Der blaue Bereich in Abbildung 38: Leistungsverlauf im Motorway 150 mit 1-Kanal TEG ist der "Torque-Assist"-Betrieb. Der Motor wird hier über einen Zeitraum von 10s mit ca. 6kW Leistung unterstützt. Das Diagramm zeigt ebenfalls die Leistungskurve der E-Maschine. Im Generatorbetrieb sind die Spitzen höher als die Ladeleistung der Batterie. Dies ist auf den Wirkungsgrad der Leistungselektronik und der Batterie zurückzuführen.

Abbildung 39 zeigt die Energieverteilung im Motorway 150. Die integrierte Leistung des Thermogenerators beträgt für den gesamten Zyklus 372 kJ. Die integrierte Leistung des generatorischen Betriebs erreicht 0.5kJ. Das Hybridmodell ohne TEG hat hier einen Betrag von 123kJ. Der TEG ersetzt damit nahezu den Generatorbetrieb des E-Motors, der notwendig ist um einen ausgeglichen SOC zwischen Beginn und Ende des Zyklus zu erzielen. Die Bremsenergie, die in die Batterie fließt beträgt 245kJ. Darüber hinaus werden 274kJ Energie in der Batterie und in der Leistungselektronik während des Ladens und Entladens dissipiert. Die Verluste treten vor allem in der Bremsrekuperationsphase und im "Torque Assist"-Betrieb aufgrund der hohen Leistungen auf.

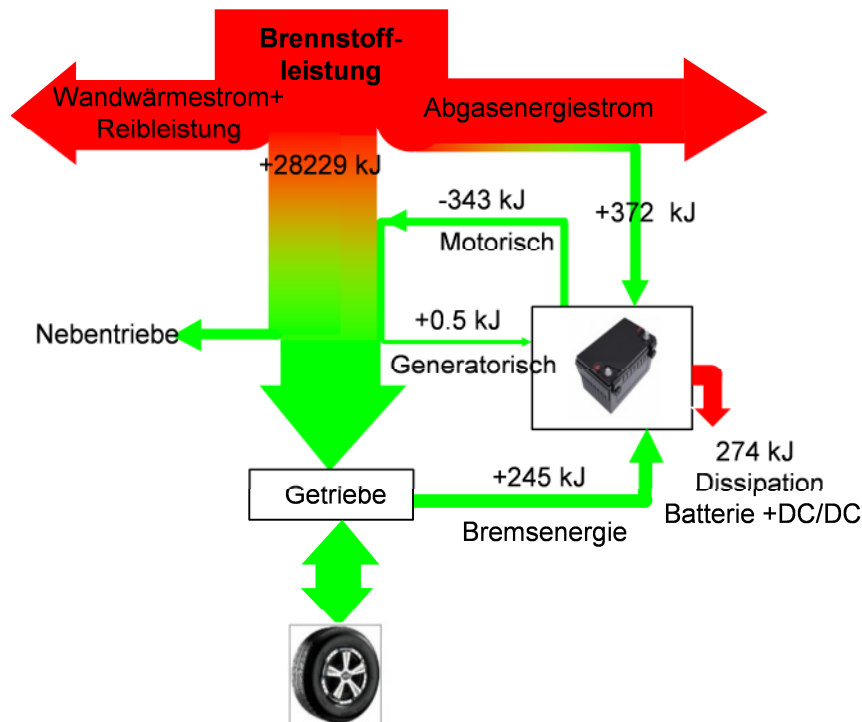


Abbildung 39: Energieverteilung im Motorway 150 mit 1-Kanal TEG

1.3.9 Hardware-in-the-Loop (HiL) Simulation

Ausgehend von der „Model-in-the-Loop“-Simulation (MiL), die ein vollständig virtuelles Gesamtmodell enthält, wird in der HiL-Simulation das Wärmetauscher- und das Fahrzeugmodell durch ein reales System ersetzt. Die Aufgabe der HiL-Simulation ist die Untersuchung verschiedener thermoelektrischer Materialien ohne den Wechsel der TE-Module durchführen zu müssen. Das HiL-Modell enthält einen realen Wärmeüberträger, virtuelle TE-Module einen DC/DC-Wandler pro Modul sowie eine Bypassklappe zur Regelung spezifischer Größen wie beispielsweise die Moduloberflächentemperatur. Das MiL-Modell erlaubte eine Vorbedatung der Systemregler für die Bypassklappe durchzuführen. Damit konnte eine schnelle Optimierung der Regler im realen System durchgeführt werden. In Abbildung 40 ist das Systemschaubild dargestellt. Das Fahrzeug und der Wärmeübertrager repräsentieren die reale Systemumgebung. Innerhalb des Wärmeübertragers sind reale Module eingebettet, deren Wärmeleitwert näherungsweise den virtuellen thermoelektrischen Modulen entspricht. Temperatursensoren erfassen die Temperaturen an den Modulgrenzflächen. Diese fließen als Eingangsgrößen in das virtuelle thermoelektrische Modul ein.

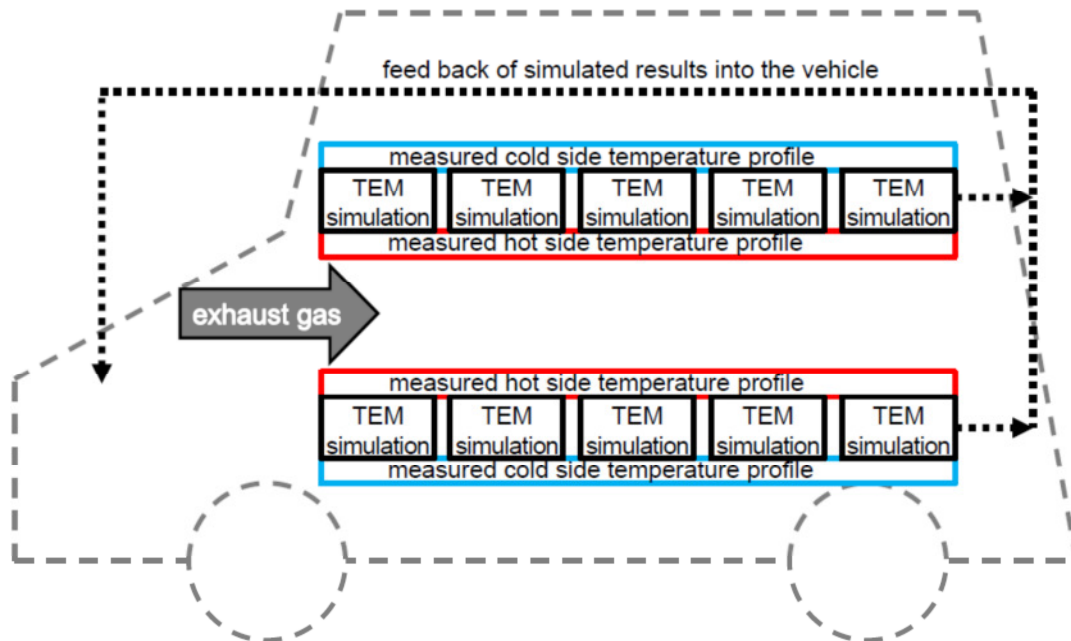


Abbildung 40: Schema des „HiL-Modells“

Die virtuellen TE-Module enthalten Bleitellurid. Abbildung 41 zeigt das Testfahrzeug, ein VW Golf GTI mit einer Motorleistung von 140 kW. Der Wärmeübertrager ist nach dem Hauptkatalysator integriert.



Abbildung 41: Testfahrzeug

Der Wärmeübertrager enthält darüber hinaus reale TE-Module. Die Struktur ist in Abbildung 42 dargestellt. In den ersten drei Reihen sind Oxid-Module und in den letzten beiden Reihen HZ-20 Module integriert.

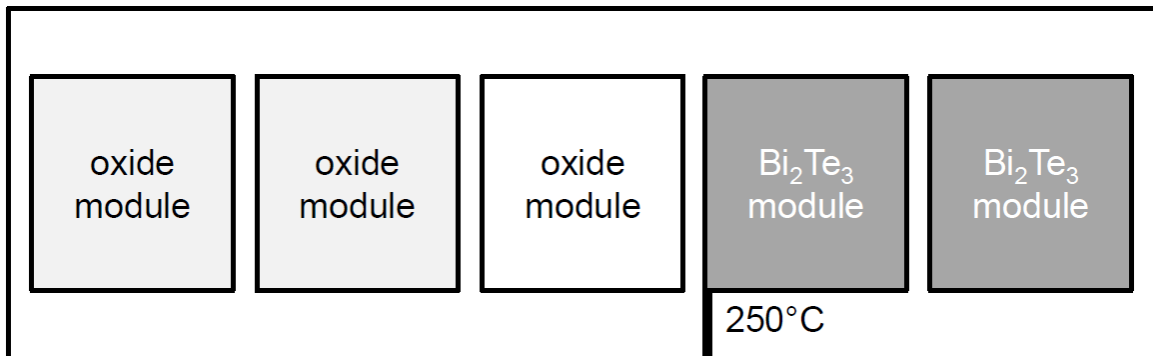


Abbildung 42: Wärmetauschermodell

Das Material Bismutellurid lässt nur eine dauerhafte Temperaturbeauschlagung von 250 °C zu. Die Oberflächenmodultemperatur der ersten HZ-20 Reihe wird daher durch eine Butterfly-Bypassklappe auf 250°C geregelt.

In Abbildung 43 ist der Leistungsverlauf der virtuellen TE-Module im Motorway 150 dargestellt.

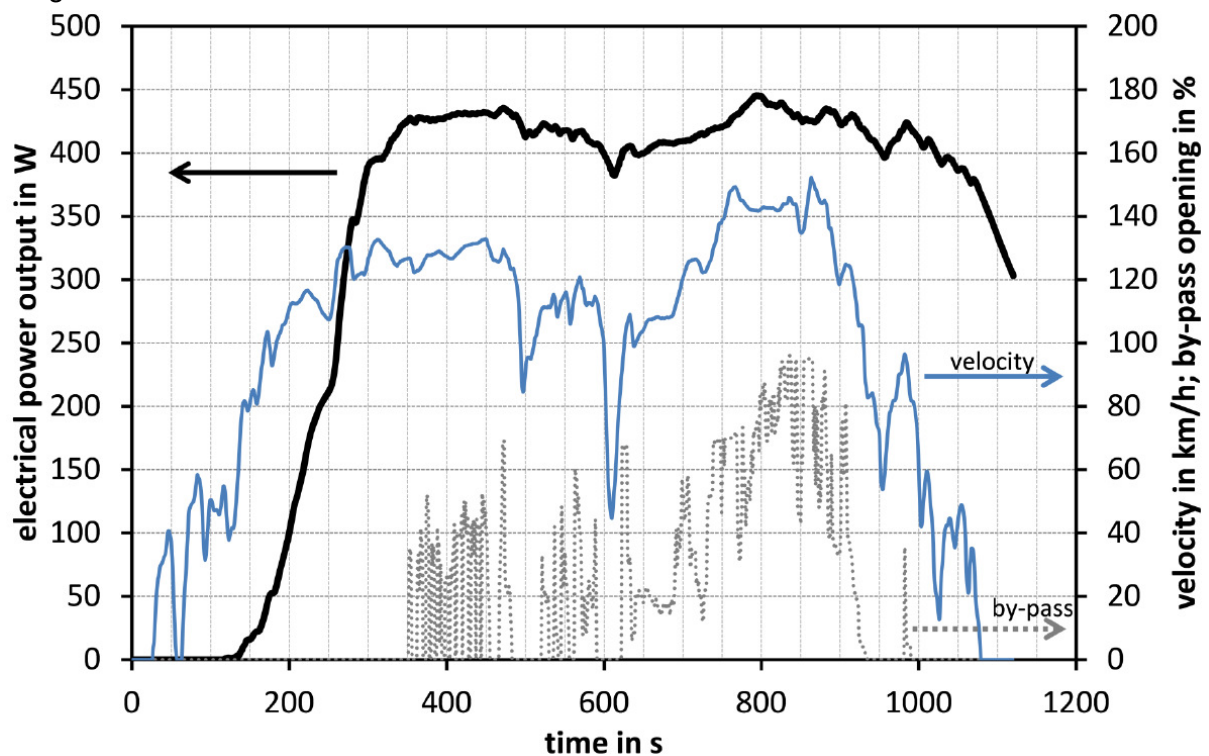


Abbildung 43: Leistung des TEG im „Motorway 150“

Um die HZ-20 Module zu schützen, ist der Bypass im Motorway 150 für einen Großteil der Zeit geöffnet. Die maximal erzielte Leistung für die virtuellen Module liegt bei ca. 450 W. Das Potential wird jedoch durch die Schutzfunktion des Bypassklappenreglers reduziert.

1.4 AP 50 000 Innovative TE-Module

1.4.1 Motivation

Am Markt erhältliche TE-Module lassen sich nur kraftschlüssig in TEG-Systeme integrieren. Hierbei ist die wesentliche Herausforderung, eine optimale Kontaktierung der Moduloberflächen mit den Wärmetauschern. Dazu sind sehr hohe Anforderungen an die Oberflächengenauigkeit der verbauten Einzelteile zu erfüllen. Weiterhin besteht die Notwendigkeit einer möglichst gleichmäßigen Verpressung der Module. Diese Herausforderungen lassen sich in der Praxis nur mit sehr großen Fertigungs- und Kostenaufwand bewerkstelligen.

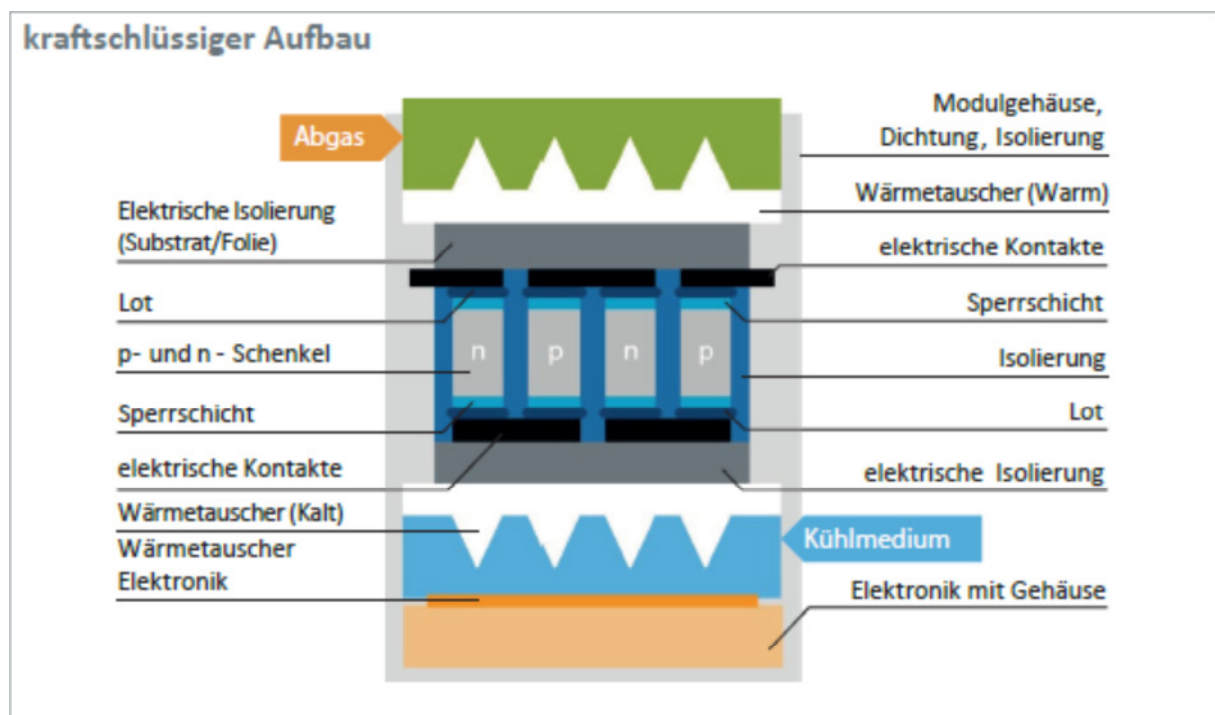


Abbildung 44: Kraftschlüssiges Aufbaukonzept mit Standardmodulen

Eine stoffschlüssige Anbindung würde diesen Problemen entgegenwirken. Stoffschlüssige Verbindungen zwischen Wärmetauschern, elektrischer Isolierung, Kontaktbrücken und TE-Schenkeln

haben bei korrekter Ausführung einen geringeren thermischen und elektrischen Widerstand, was einen wesentlich besseren Wärme- und Stromdurchgang erwarten lässt

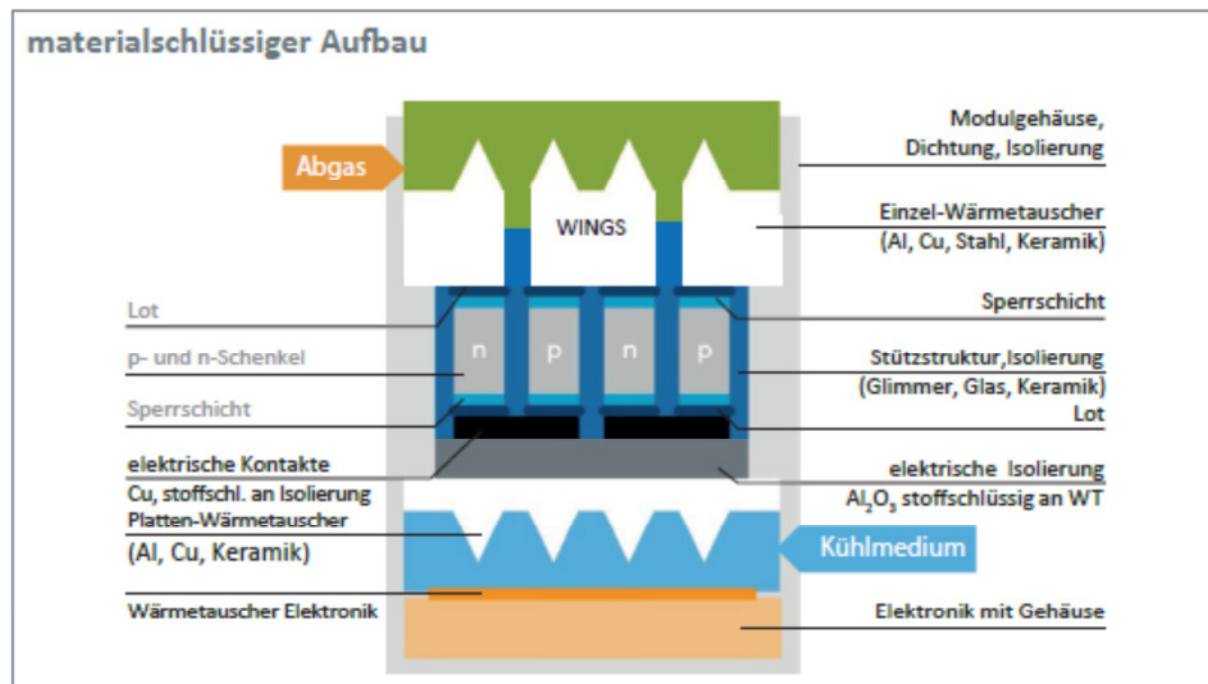
- erfordern keine Anpresskräfte, was weniger steife Strukturen erfordert und Gewichtsvorteile liefert
- benötigen für einen optimaleren Wärme- und Stromdurchgang eine geringe Oberflächenqualität, was einen geringeren Fertigungs- und damit Kostenaufwand zur Folge hat.



1.4.2 Ziele

In diesem Projekt werden neue innovative TE-Module entworfen, die sich dadurch auszeichnen, dass sie

- alle für den Betrieb des Moduls notwendigen Komponenten enthalten
- die Wärmetauscher mit den TE-Schenkeln materialschlüssig verbinden
- für je ein Schenkelpaar ein Heiseitenwrmetauscher (WINGS) zuständig ist
- die WINGS den elektrischen Heiseitenkontakt der Schenkelpaare übernehmen
- optional elektrische Wandler für die Integration ins Stromnetz des Zielsystems und
- ebenfalls optional Kontroll- und Kommunikationssysteme besitzen.



1.4.3 Maßnahmen

Zusammen mit den Partnern konnten im Verlauf der frühen Projektphase eine Vielzahl von Konzepten für innovative Module entsprechend der Zielstellung entworfen, spezifiziert, analysiert und bewertet werden. Dabei wurden sowohl planare als auch runde Modulkonzepte berücksichtigt. Da im betrachteten Eigenschafts- bzw. Spezifikationsrahmen für keine der beiden Varianten signifikante Vorteile ermittelt wurden, fiel vor dem Hintergrund der verfügbaren Ressourcen die Wahl auf planare Module. Ausschlaggebend war auch, die als günstiger eingeschätzte Herstellbarkeit entsprechender Module mit den bei den Partnern aktuell vorhandenen Möglichkeiten.

Da runde Konzepte sehr interessante Möglichkeiten bieten/Perspektiven erwarten lassen, wurde eine mögliche Bearbeitung zu Ende des Projekts geplant.

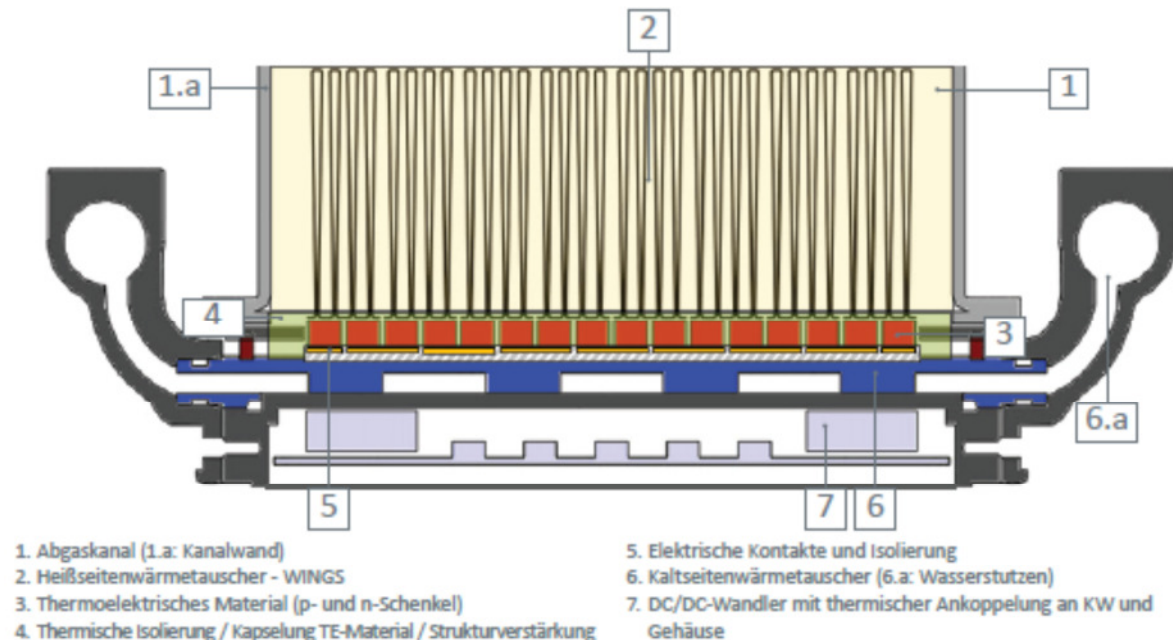


Abbildung 46: Planares „all-in-one“-Moduldesign

Die Wahl fiel auf ein sehr einfaches und flexibles Design entsprechend Abbildung 46: Planares „all-in-one“-Moduldesign.

Es basiert auf einem Platten-Kaltseitenwärmetauscher (6 - blau). Dieser besteht aus den folgenden Komponenten bzw. Funktionsgruppen:

- Modulträger mit variablem Befestigungskonzept
- Schnittstelle zum wrmezufhrenden Medium Abgas
- thermisch isolierte Dichtungskonzepte
- Schnittstelle zum wärmeabführenden Medium Kühlwasser (6.a - weiß) ,
 ber ein Wasserstutzenkonzept, das variabel an das Generator- und den Khlmittelbedarf anpassbar ist (z. B. mittels Drosseln)
- optionales Elektronik- und DC/DC-Wandler-Gehäuse (7 - hellblau),
 thermisch an den Kühlwasserkreislauf angekoppelt
- elektrische Isolierschicht (5 – grau schrggestreift) mit eingebetteten Kaltseiten-Kontaktbrücken (5 - Ocker) für Schenkelpaare

Die TE-Schenkelpaare (3) werden kaltseitig auf die Kontaktbrücken gelötet und von einer Matrix (4 – Hellgrün) umschlossen. Die Matrix sorgt für die

- thermische Isolierung zwischen Warm- und Kaltseite,
 um ungünstige parasitäre Wrmeestrme an den Schenkelpaaren vorbei sowie thermische Abstrahlung der TE-Schenkel zu reduzieren
- Kapselung des TE-Materials vor Umgebungseinflüssen
- Strukturverstärkung des Verbunds TE-Schenkel/WINGS

Auf der Warmseite der TE-Schenkelpaare werden Einzelwärmetauscher (WINGS) (2) aufgelötet bzw. -geschweißt, die in das wrmezufhrende Medium Abgas ragen. Sie dienen zusätzlich zur Wrmeeinkoppelung auch als Kontaktbrücken zwischen den TE-Schenkeln.

Die thermoelektrische (elektrische und thermische) Leistung der „all-in-one“-Module wird an das thermische Energieangebot, an den elektrischen Energiebedarf und den Bauraum des Zielsystems durch die folgenden Spezifikationen angepasst:

- Wahl des TE-Materials

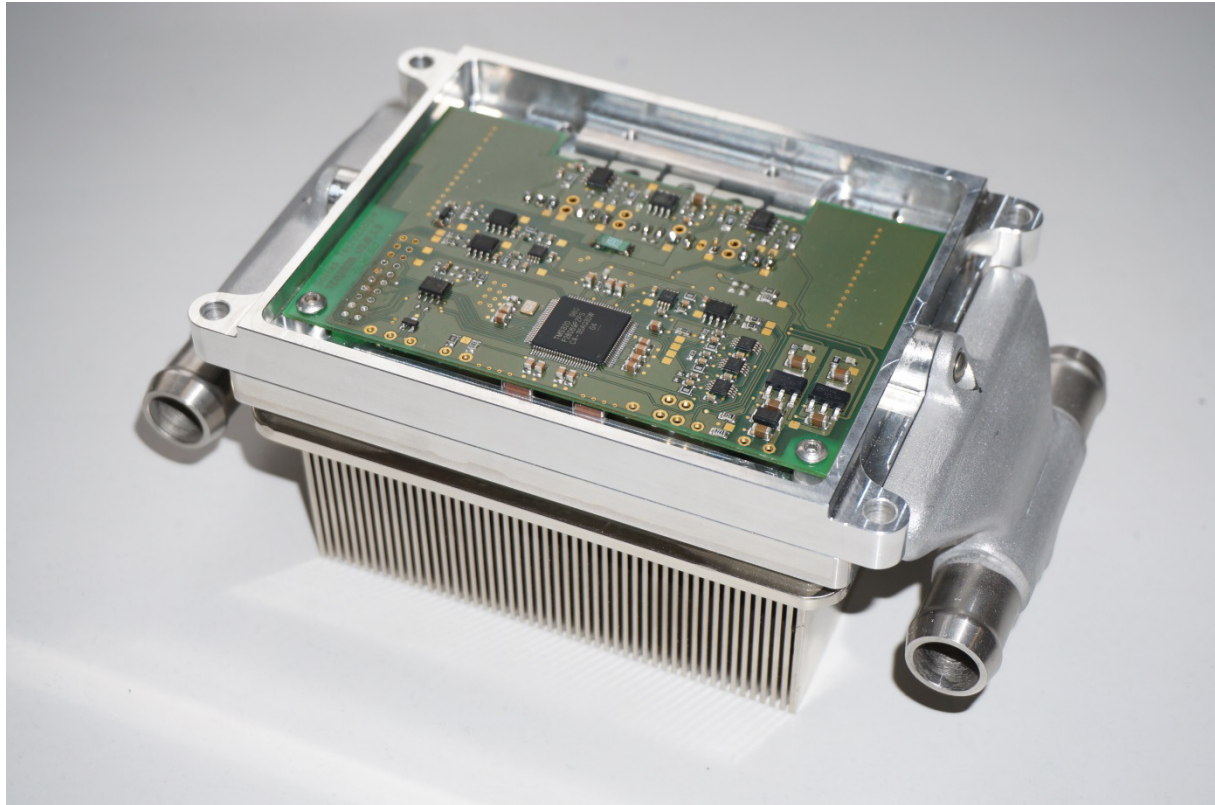


Abbildung 47: „all-in-one“-Modul für kraftschlüssigen Aufbau mit Blockwärmetauscher

- Struktur des TE-Materials (einfach, segmentiert oder kaskadiert)
- Abmessungen der TE-Schenkel (Grundfläche und Höhe)
- Anzahl der TE-Schenkel (pro Flächeneinheit)
- Verschaltung der TE-Schenkel (Verhältnis seriell zu parallel, Submodule)
- Grundfläche des Moduls
- Material, Abmessungen und Design des Plattenwärmetauschers
- Material, Abmessungen und Design des WINGS
- Anzahl, Abmessungen und Design der Kühlwasserkanäle
- Anzahl, Abmessungen und Design der Abgaskanäle
- Zusammensetzung, Massenstrom, Temperatur des Kühlmediums
- Spezifikationen des elektrischer Wandler (DC/DC-Wandler)

In Ergänzung der ursprünglichen Zielstellung des Projekts wurden alle betroffenen materialschlüssigen Konzepte und Komponenten dahingehend erweitert, dass auch kommerzielle Module in kraftschlüssiger Aufbautechnik verwendet werden können. Dies betraf vor allem die Wärmetauscher und das Befestigungskonzept.

Abgaskanäle

Im Rahmen der Konzeptentwicklung und der Gesamtsystemsimulation wurden verschiedene Varianten von Abgaskanälen mit unterschiedlicher Kanalanzahl, -anordnung und -größe erarbeitet, analysiert und bewertet. Die Wahl fiel schließlich auf eine „Einkanal-Variante“ mit integriertem Bypass (Abbildung 48, rechts). Vorteil dieser Variante ist u. a., dass wegen des Wegfalls externer Bypasskomponenten, die Modulfläche bei gleichem Bauraum um ca. 20% größer ausfällt, was der elektrischen Gesamtleistung und dem Systemgewicht zugutekommt.

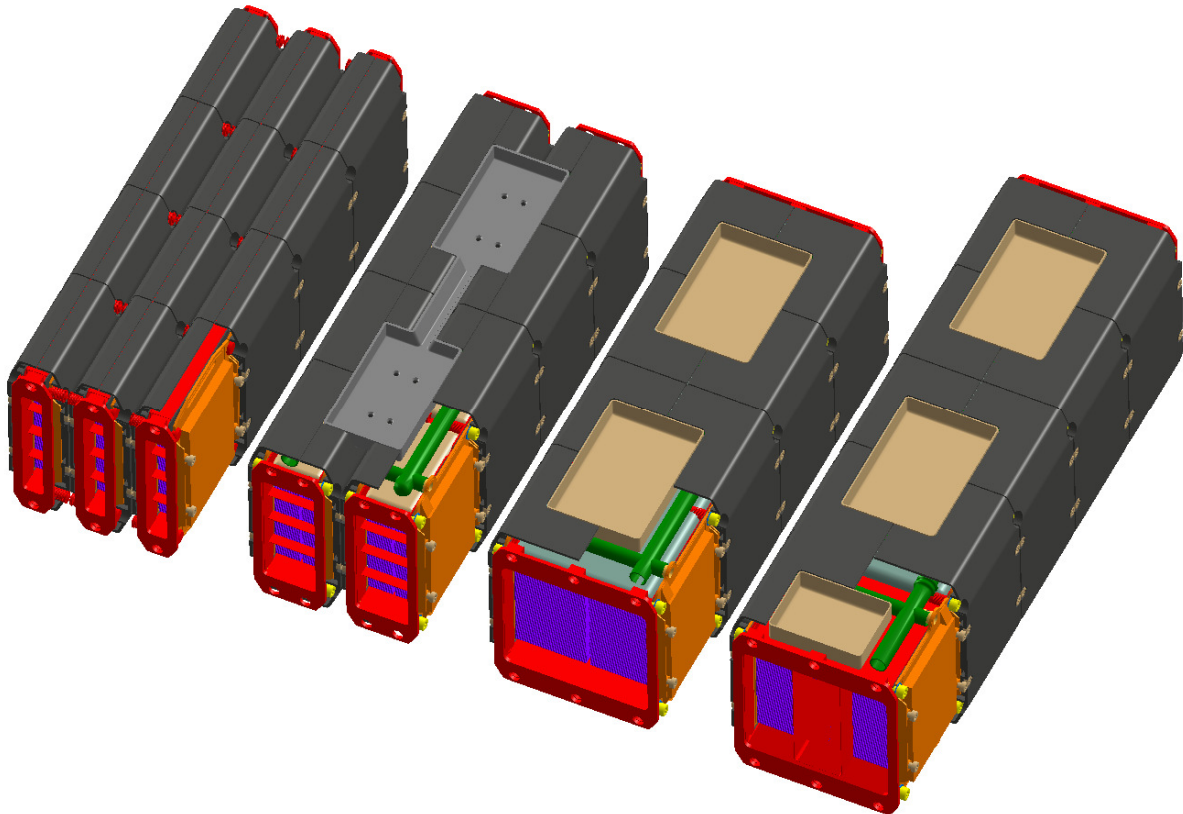
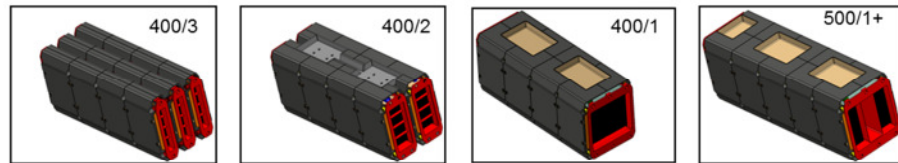


Abbildung 48: 3-2-1-Kanal-Varianten; 1-Kanal-Variante mit internem Bypass (ganz rechts)



	400/3	400/2	400/1	500/1+
TE-Material *) H [mm]	7	5	3	3
Bauraum für TE-Material L [mm]	71 (x24)	71 (x16)	71 (x8)	71 (x10)
Bauraum für TE-Material B [mm]	106	106	106	106
Grundfläche für TE-Material [mm²]	180.624 (=100%)	120.416 (=66%)	60.208 (=33%)	75.260 (=42%)
Klötzchenanzahl bei Klötzchen 5x5	19 x 13 (x24) = 5928	19 x 13 (x16) = 3952	19 x 13 (x8) = 1976	19 x 13 (x10) = 2470
Kanalhöhe [mm]	18	43	120	80 (+40 Bypass)
Kanalbreite [mm]	110	110	110	110
Kanallänge [mm]	400	400	400	500
Kanalanzahl / Medienschnittstellen	3 / ≈80	2 / ≈50	1 / ≈25	1 / ≈30
Rippenhöhe [mm]	8	20,5	59	39 (bei Bypasshöhe =39)
Rippendichte Fräsrippe 1/1 [%]	45	45	45	45
Rippendichte Blechrippe 0,2/2 [%]	10	10	10	10
Anzahl DC/DC-Wandler	nicht integrierbar	4	4	4
Volumen pro DC/DC-Wandler [mm]	-	106 x 61 x 16	115 x 75 x 16	115 x 75 x 16
Bypass	nur extern möglich	nur extern möglich	nur extern möglich	intern (max. 109 x 39)
Gewicht TE-Material *) [kg]	0,352 x 24 = 8,5	0,252 x 16 = 4	0,151 x 8 = 1,2	0,151 x 10 = 1,5
Gewicht Cu-Rippen, Fräsrippe [kg]	0,256 x 24 = 6,2	0,654 x 16 = 10,4	1,8 x 8 = 14,4	1,2 x 10 = 12
Gewicht Cu-Rippen, Blechrippe [kg]	1,4	2,3	3,2	2,7
Gewicht Peripherie [kg]	8,6 (+3 Trichter, Flexelement usw.)	6,6 (+3 Trichter, Flexelement usw.)	4 (+2 Trichter, Flexelement usw.)	5,4 (+3 Trichter, Flexelement usw.)
Gesamtgewicht [kg]	22 ... 27 (+2,7 Wasser + Bypass)	16 ... 24 (+1,8 Wasser + Bypass)	11 ... 22 (+1,0 Wasser + Bypass)	12 ... 22 (+1,2 Wasser)

Abbildung 49: Spezifikationen der betrachteten Varianten (Auszug)

Ebenso wurden diverse Befestigungskonzepte für die „all-in-one“-Module entworfen, teilweise realisiert und erprobt. Das schließlich ausgewählte Konzept hatte zusätzlich die Option, auch sehr hohe Anpresskräfte zu ermöglichen, wie sie für kommerzielle Module teilweise notwendig sind. Die Konstruktion zeichnet sich zudem durch ein sehr einfaches Design, das leicht und kostengünstig hergestellt werden kann, aus.

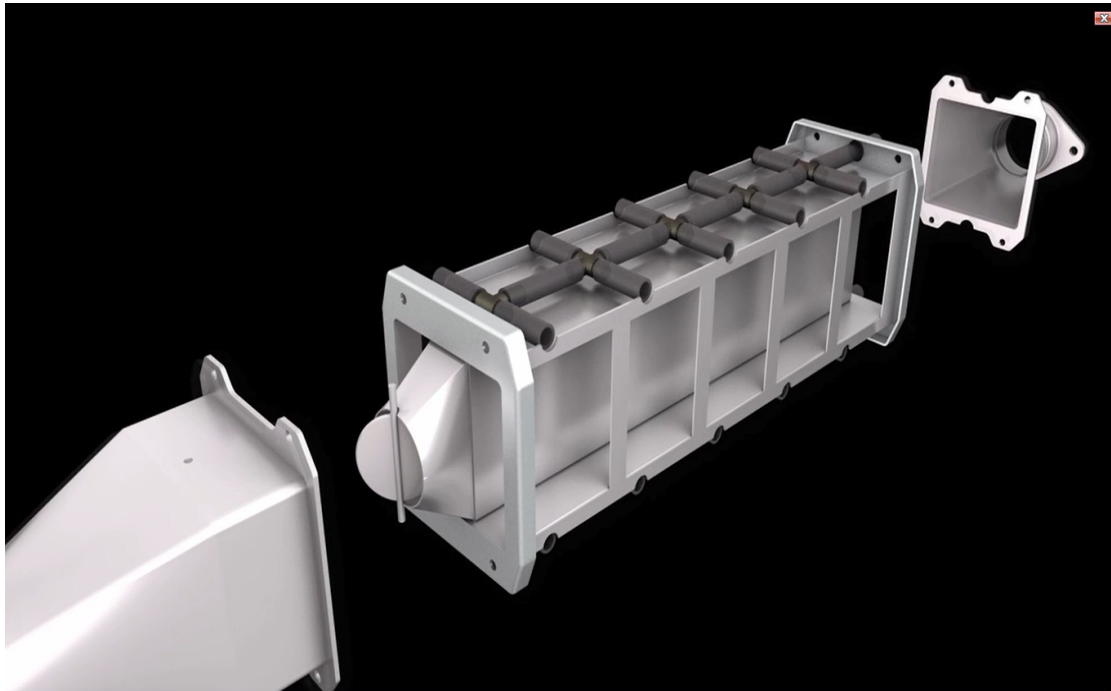


Abbildung 50: Abgaskanal TEG-System

Heißseitenwärmetauscher WINGS

Zusätzlich zur Konzeptfindung für Einzelwärmetauscher zusammen mit den Partnern wurde im Laufe des Projekts das Tätigkeitsfeld für IAV bis zur Auswahl geeigneter Fertigungsverfahren und Herstellung bzw. Beschaffung von Prototypen erweitert.

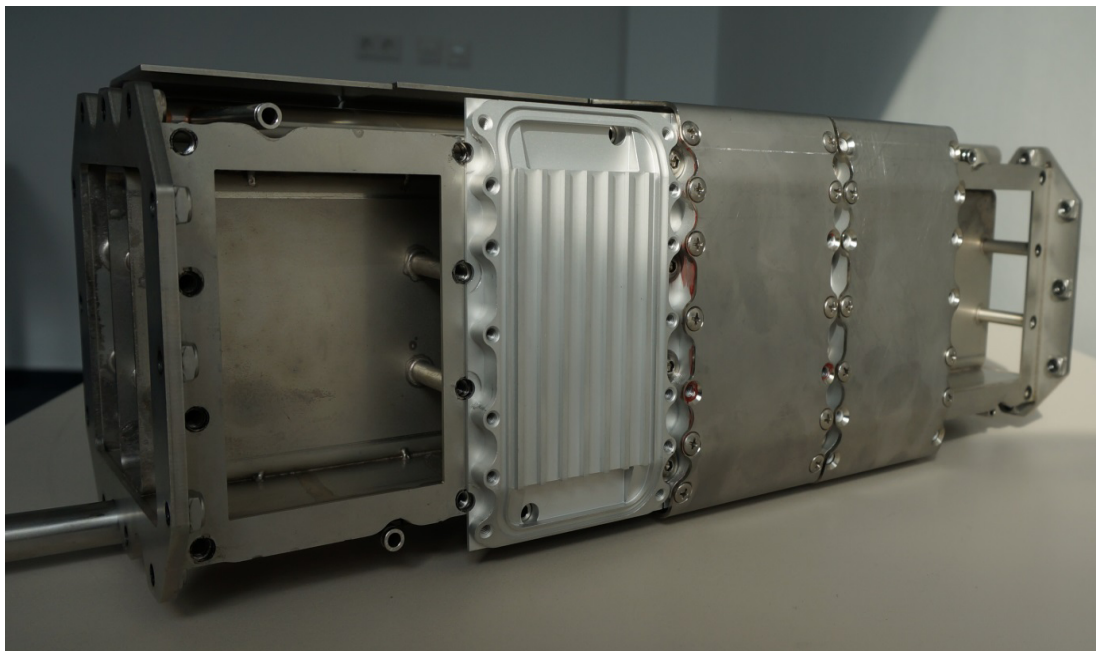


Abbildung 51: Abgaskanal teilweise bestückt mit Kaltseiten-Wärmeübertragern


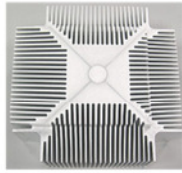
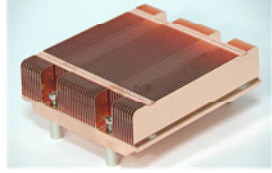


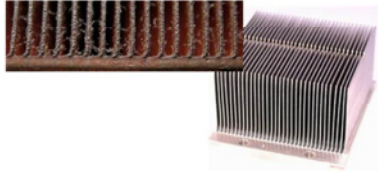
Die Casting (Druckguss)	Extrusion	Stacked Fin (gestapelte Rippen)
		
Folded Fin (gefaltete Rippen)	Crimped Fin (verpresste Rippen)	Skived Fin (geschälte Rippen)
		

Abbildung 52: gängige Herstellverfahren für Gaswärmetauscher

Erster Schritt war nach kommerziell verfügbaren Wärmetauscher zu recherchieren. Für eine weitere Bearbeitung zu WINGS eigneten sich besonders Wärmetauscher aus Kupfer mit geschälten Rippen (Abbildung 53), da diese nach dem zerschneiden nicht zerfallen.

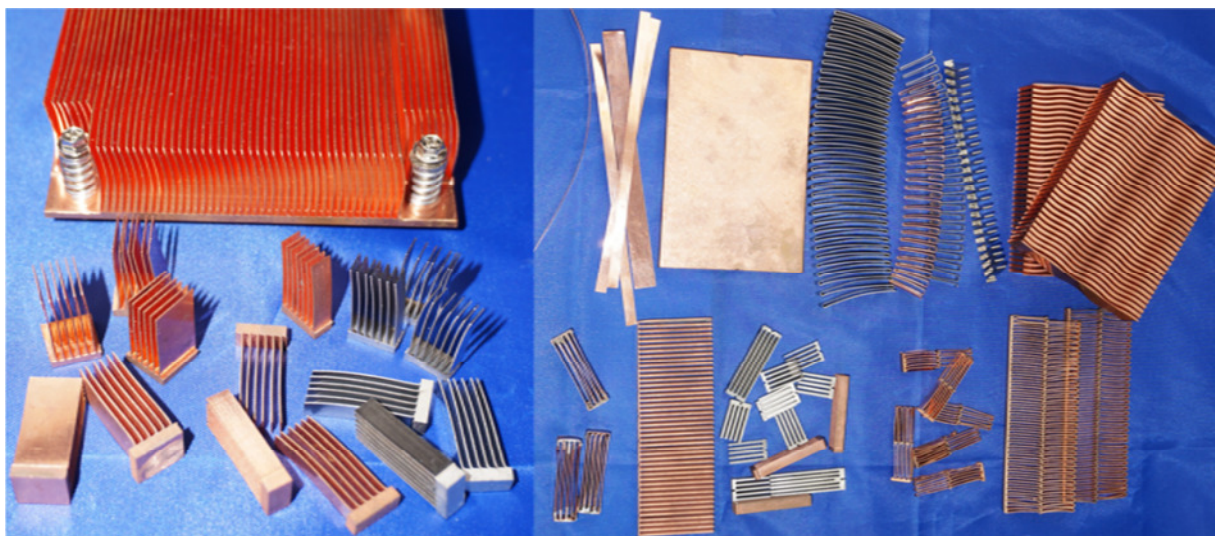


Abbildung 53: Kupfer-Halbzeuge und WINGS, teilweise vernickelt

Material und Struktur waren für eine weitere Verarbeitung allerdings wenig geeignet. Deshalb wurden im Verlauf des Projekts weitere Verfahren zur Herstellung von WING mit verschiedenen Materialien und Blechstärken erarbeitet. Dabei standen Maßhaltigkeit und die Eignung zur Weiterverarbeitung im Vordergrund.



Abbildung 54: Verschiedene WINGS (teilweise vernickelt)

Für die weitere Verarbeitung zu Modulen und Block-Wärmetauschern wurden WINGS entsprechend Abbildung 44 verwendet, die aus 5 mm starken, schwachlegiertem und warmfesten Kupferblech gefertigt und vernickelt wurden.

Im Verlauf der zweiten Projekthälfte musste allerdings die ursprüngliche Planung, ausschließlich Einzelwärmetauscher für die Einkoppelung der thermischen Energie aus dem Abgas in das thermoelektrische Funktionsmaterial zu entwickeln, aufgegeben werden. Die Entwicklung und Beschaffung von Blockwärmetauschern, die für die Verwendung von kommerziellen Modulen geeignet sind, war notwendig geworden.

Abbildung 55 zeigt einige der im Projekt hergestellten bzw. beschafften, vermessenen und im Demonstrator eingesetzten Blockwärmetauscher.

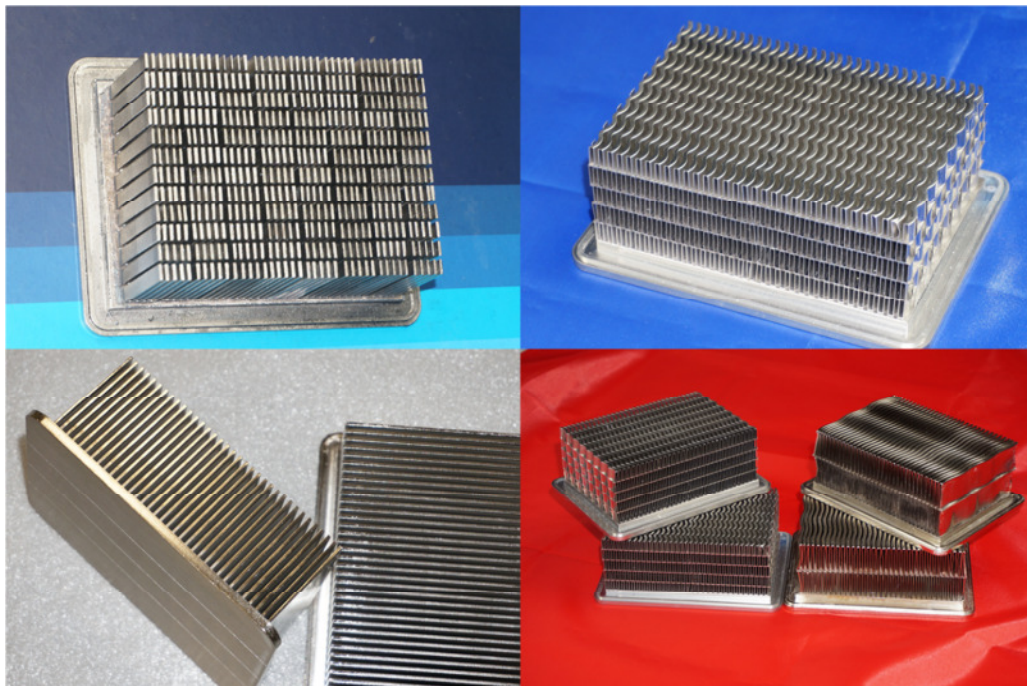


Abbildung 55: Blockwärmetauscher mit massiven und Blechrippen sowie WINGS

TE-Material und Schenkelpaare

Die Verantwortung für Materialauswahl, -beschaffung, -konfektionierung und -charakterisierung sowie die Erarbeitung einer geeigneten AVT und die Herstellung der Schenkelpaare ohne und mit WINGS lag in der Verantwortung von BASF und dem Fraunhofer IPM. Die Definition der Struktur (segmentiert) und Abmessungen der Schenken wurden im Rahmen der Konzeptentwicklung und Simulation von IAV übernommen.



Abbildung 56: Schenkelpaare mit Kontaktbrücken (links) und WING

Thermische Isolierung/Kapselung/Strukturverstärkung

Die Verantwortung für die Konzept- und Materialauswahl sowie für Beschaffung und Tests lag in der Verantwortung der Partner. IAV hat unterstützt, eigene Idee entwickelt und realisiert sowie sich an den Tests beteiligt.

Ein befriedigendes Konzept für eine Füllung,

- die zuverlässig die Räume zwischen den TE-Schenkel ausfüllt
- die sowohl kapselt, thermisch isoliert und mechanisch stützt
- dabei thermisch stabil und ausreichen duktil ist

gehörte ebenso wie

- die Entwicklung von Strategien zur Kompensation unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten
- die Auswahl geeigneter Kontaktmaterialien
- die Entwicklung geeigneter Verbindungs- und Beschichtungsmethoden für die TE-Schenkel

zu den anspruchsvollsten Aufgaben im Projekt.

Es wurden viele Ansätze und Materialien, vor allem auf keramischer Basis, verfolgt und getestet. Eine vollständige Lösung war aber im Zeit- und Budgetrahmen dieses Projekts

nicht befriedigend möglich. Im Besonderen war die Entwicklung und Herstellung einer vorgefertigten Matrix (in Abbildung 57 weiß) aus temperaturbeständigem Material, z. B. wie geplant aus Aerogel und ähnlich wie bei den H-Z-Modulen verwendet, im Projektrahmen nicht darstellbar.

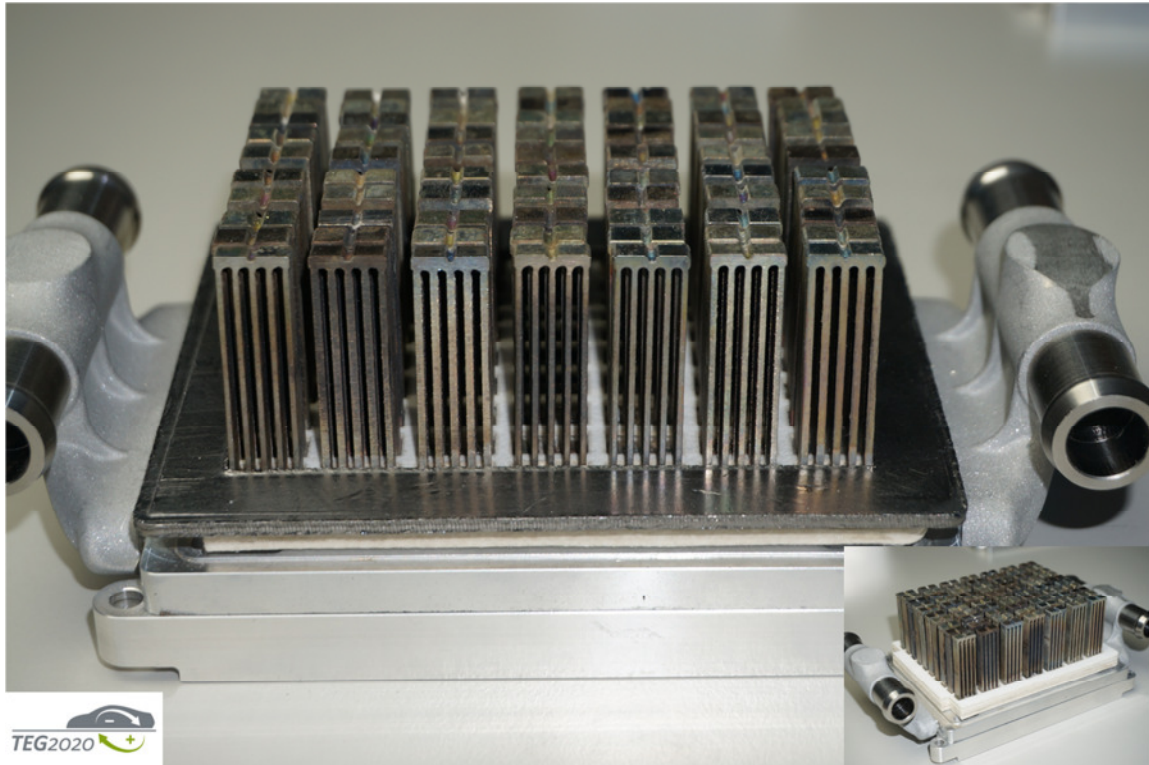


Abbildung 57: „all-in-one“-Modul mit Matrix (weiß) und aufgesetzter Dichtung (grau)

Elektrische Kontakte und Isolierung

Im Projekt wurde zwei Varianten für die Kaltseitenkontaktierung verfolgt. Zunächst die Variante a) mit konventionellen Substratplatten (Abbildung 58, Abbildung 59, Abbildung 60) und im letzten Projektdrittel seitens IAV eine Variante b) mit beschichteten Kaltseitenwärmetauschern.

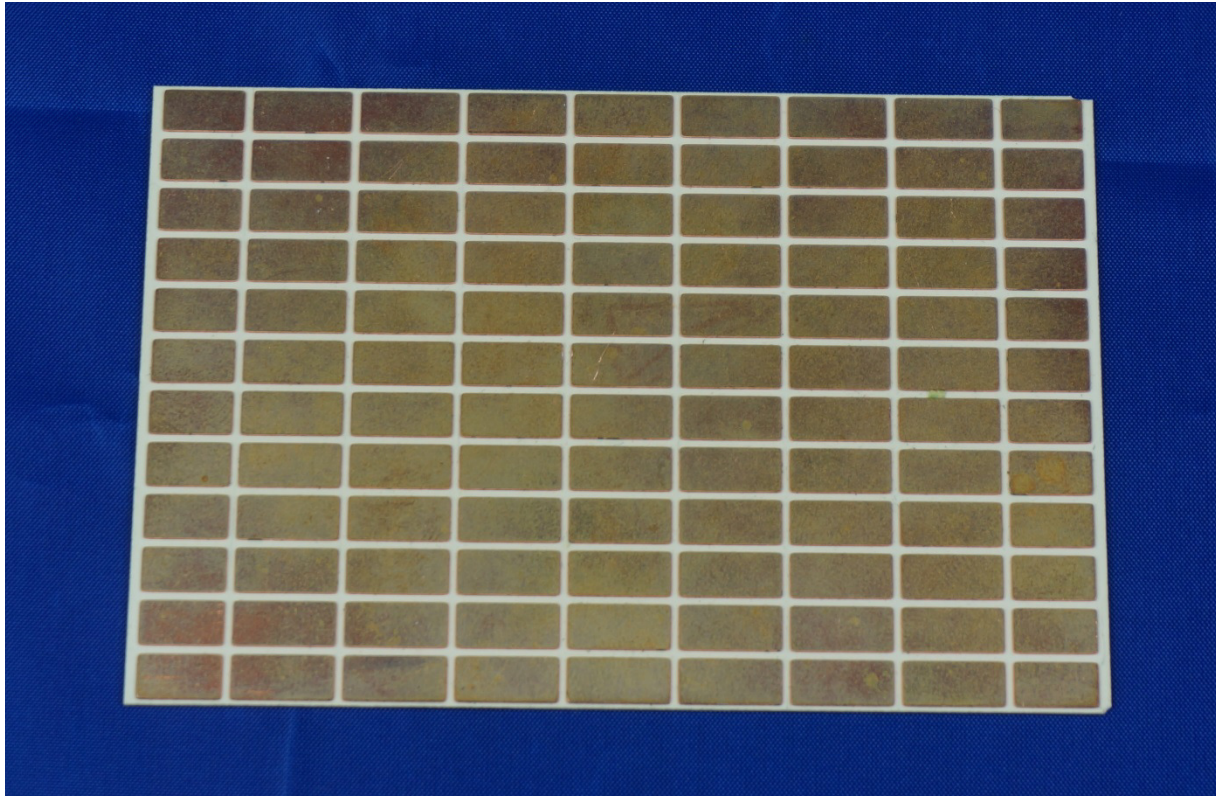


Abbildung 58: konventionelle Substratplatte für Variante a)

Die konventionellen Substratplatten wurden für Variante a) zunächst in Streifen geschnitten und anschließend mit unsegmentierten oder auch segmentierten TE-Schenkel, die mit Kontaktbrücken (Abbildung 59) oder WINGS (Abbildung 60) versehen waren, bestückt.



Abbildung 59: segmentierte Schenkelpaare auf Substratstreifen für Variante a)

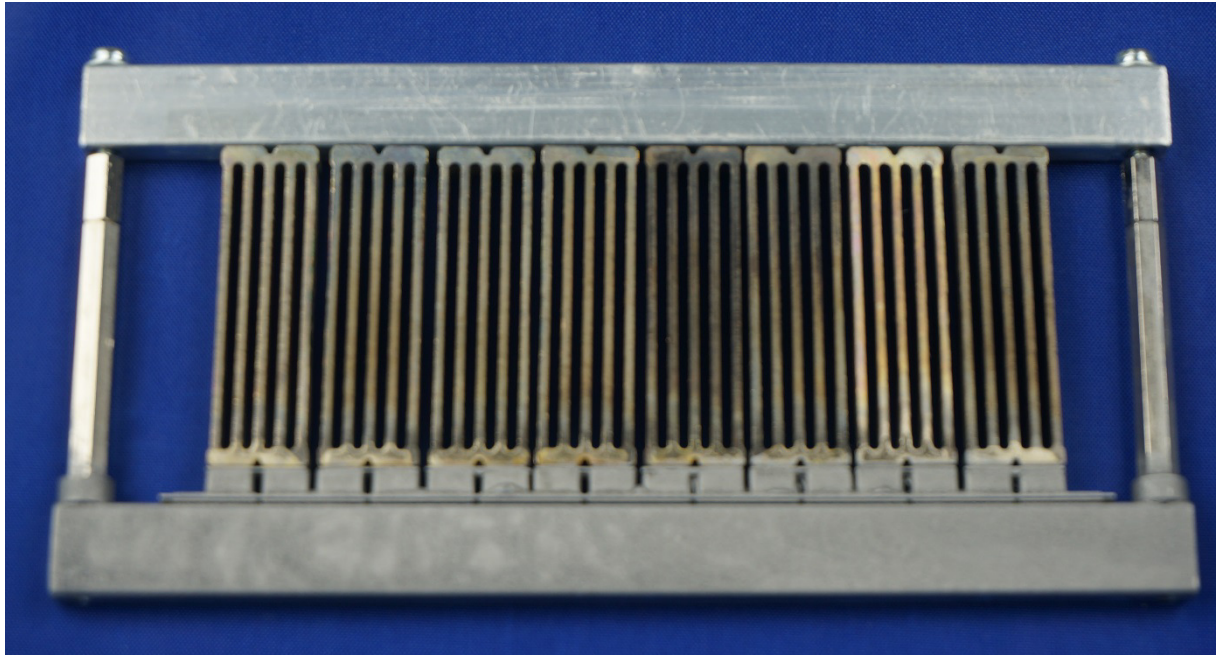


Abbildung 60: Schenkelpaare mit WINGS auf Substratstreifen für Variante a)

Mehrere Streifen wurden zu einem Block zusammengefügt, auf einen Plattenwärmetauscher aufgelötet und untereinander kontaktiert (Abbildung 61). Mit diesem Aufbaukonzept konnten erste „vollständige „all-in-one“-Module gezeigt und getestet werden. Das Zusammenfügen der Schenkelpaare bzw. Streifen eliminierte allerdings das zentrale Konzeptmerkmal der „Einzelwärmetauscher“ pro Schenkelpaar und hatte schließlich Kontaktbrüche im Betrieb zur Folge.

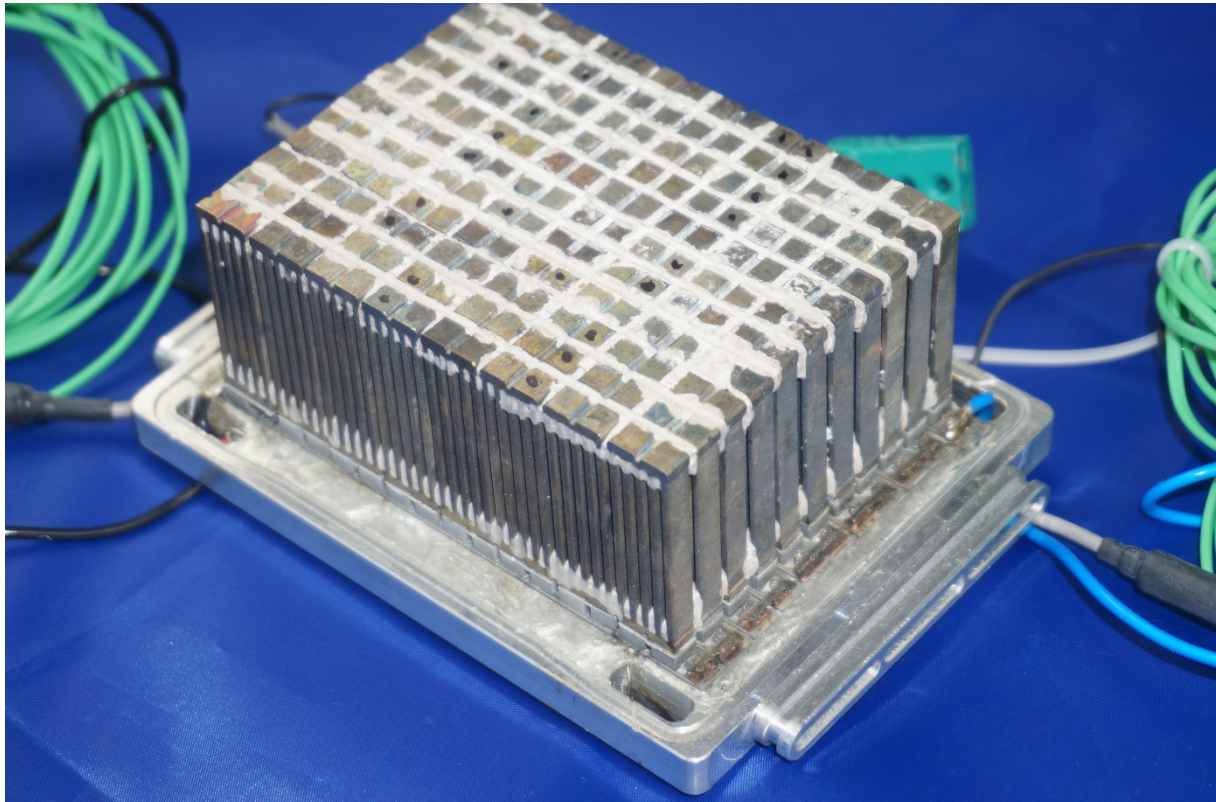


Abbildung 61: „All-in-one“- Modul der Variante a)

Auch Ausführungen der Variante a) mit sektionsweisen Freischnitten führten zu keiner nennenswerten Verbesserung der Lebensdauer, so dass dieses Konzept für den Aufbau des Demonstrator nicht weiter verfolgt wurde.

Für Konzept b) wurden Plattenwärmetauscher mit einer keramischen Isolierschicht überzogen und anschließend mit Kupfer beschichtet. Da erste Probelötungen mit Bi_2Te_3 -Schenkeln erfolgsversprechende Ergebnisse lieferten, wurde das Konzept weiter verfolgt (Abbildung 62, unten)

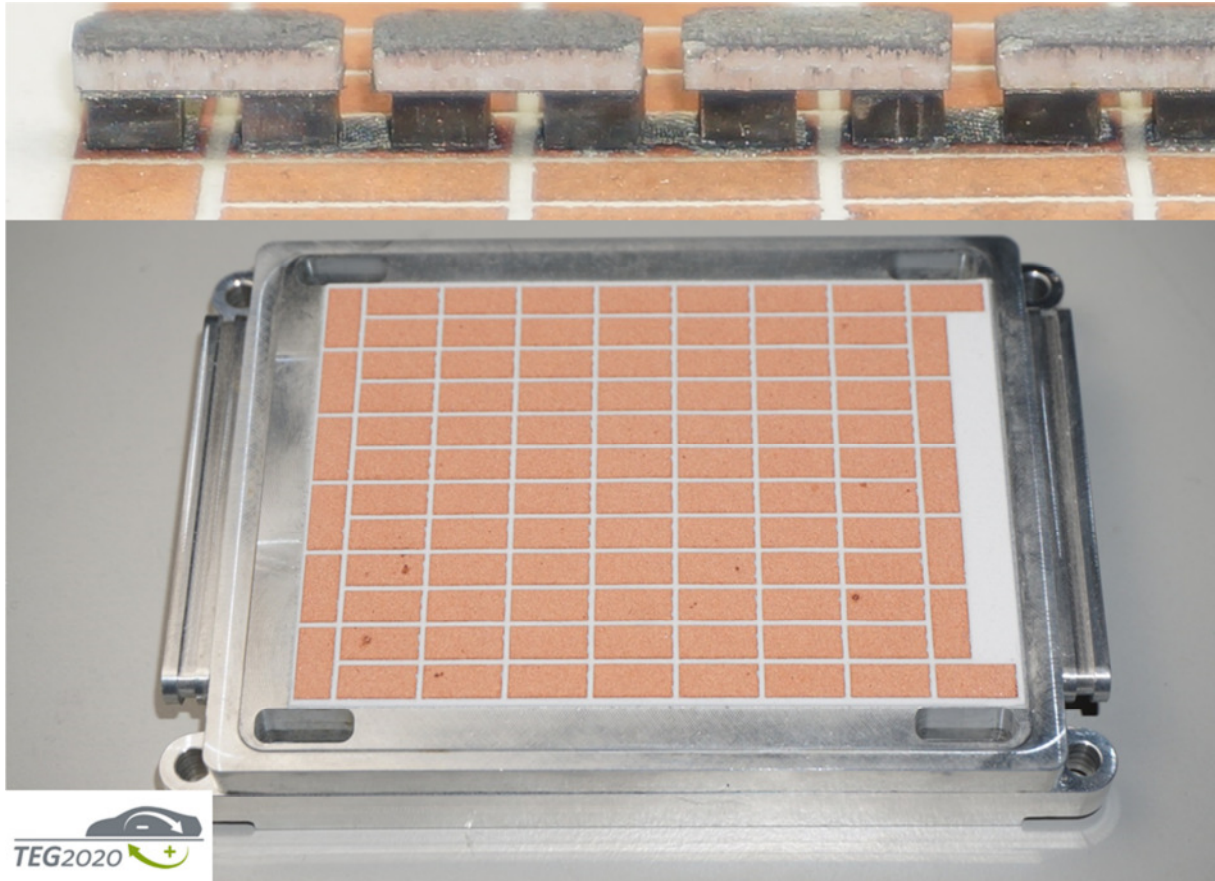


Abbildung 62: Mit Kupferkontakten beschichteter Wärmetauscher und Lötproben (oben)

Mit Hilfe einer einfachen Lötvorrichtung konnte ein erstes vollständiges Prototypmodul mit Bi_2Te_3 ohne WINGS, wie in Abbildung 63 gezeigt, aufgebaut werden.

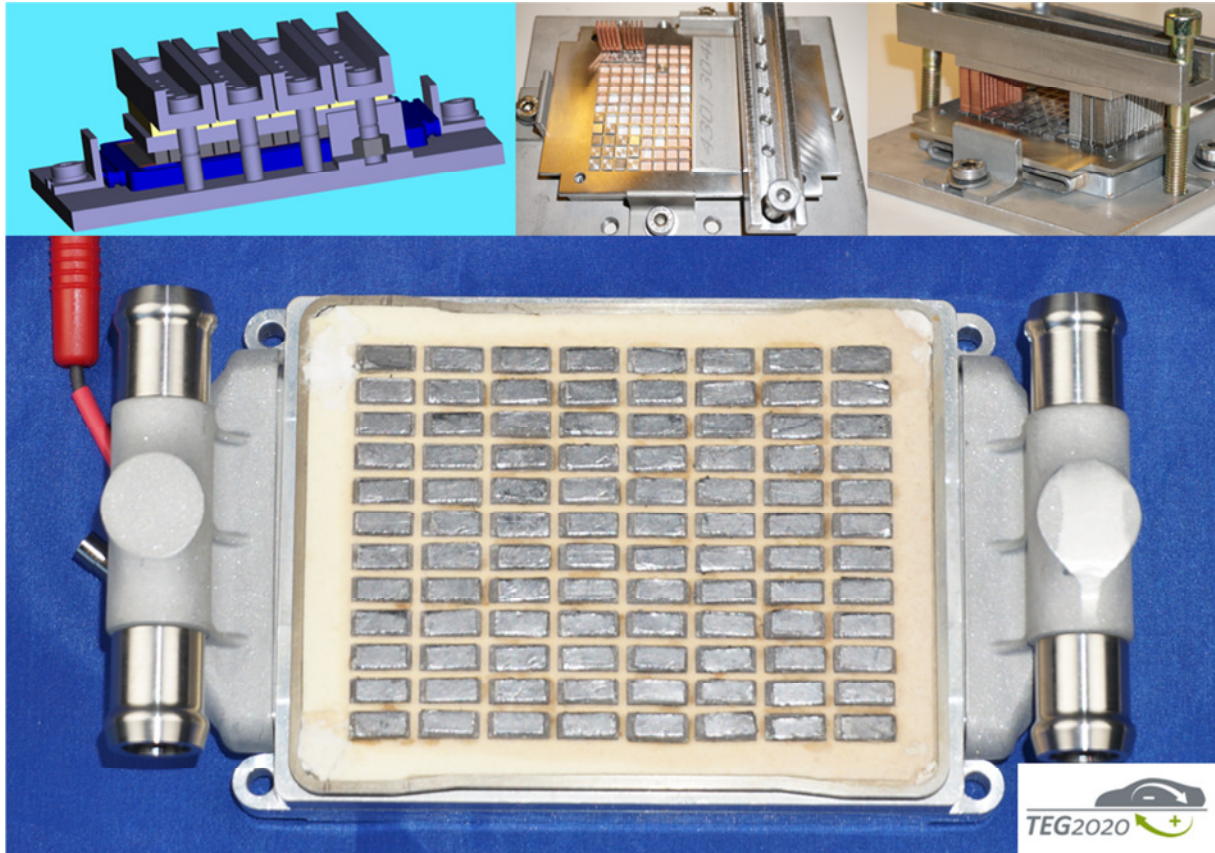


Abbildung 63: : Lötvorrichtung (Bilder oben) und erstes Bi_2TE_3 „all-in-one“-Modul ohne WINGS

Die Partner stellten mit unterschiedlichen Lötverfahren weitere Prototypen der „all-in-one“-Module her. (s. Abbildung 64 und Abbildung 65)

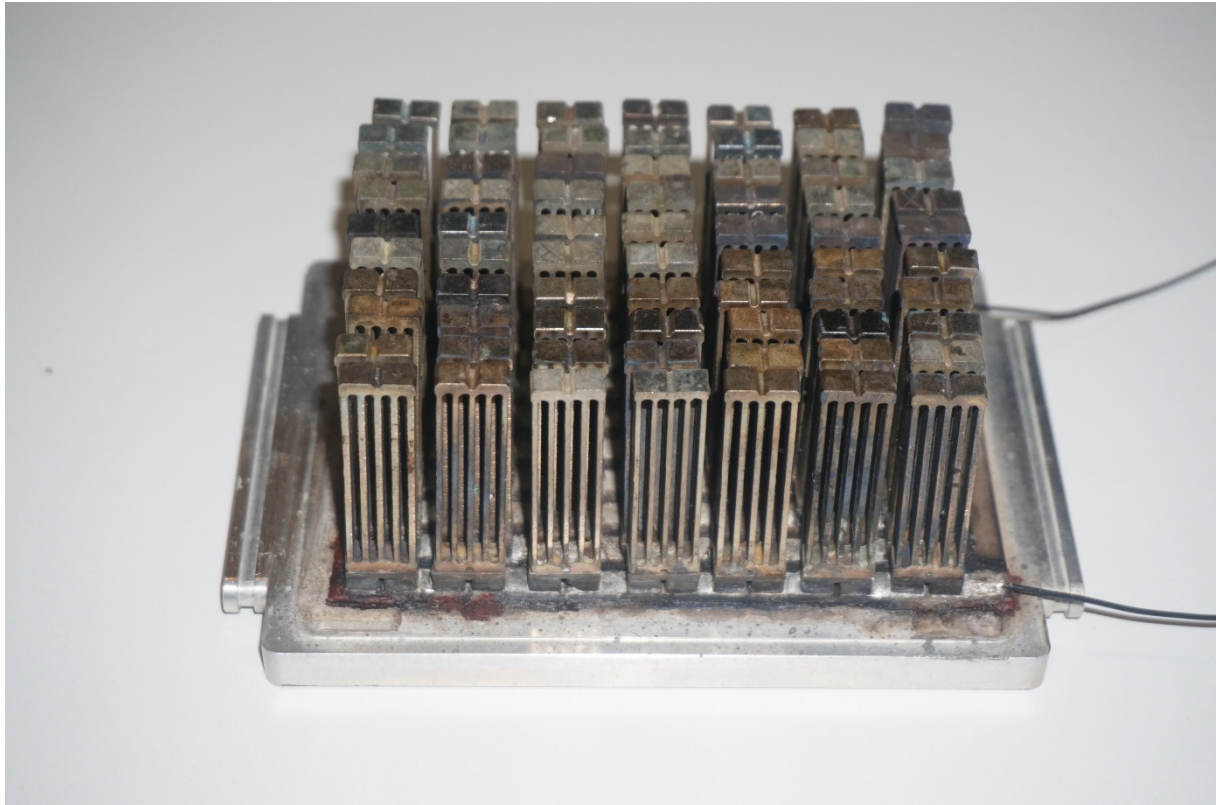


Abbildung 64: handgelötetes „all-in-one“-Modul

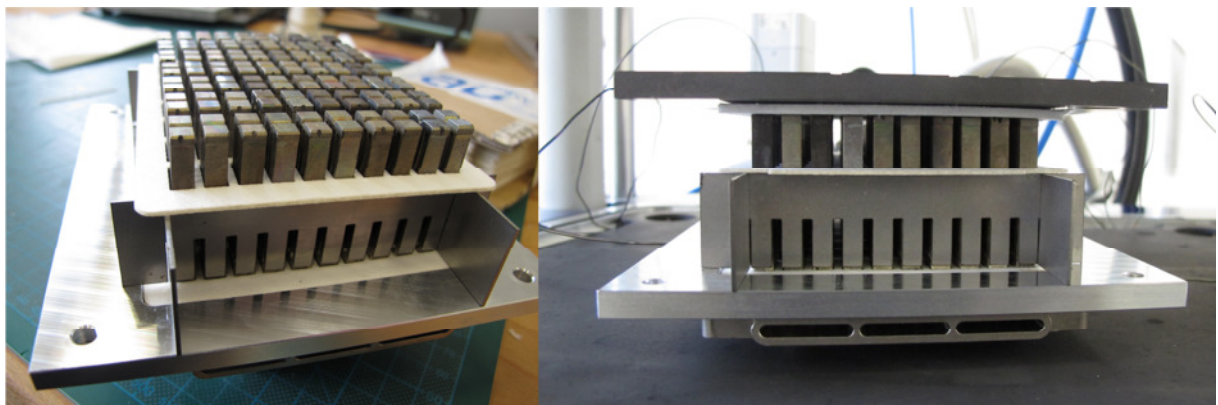


Abbildung 65: Lötvorrichtung für „all-in-one“-Modulfertigung

Kaltseitenwärmetauscher

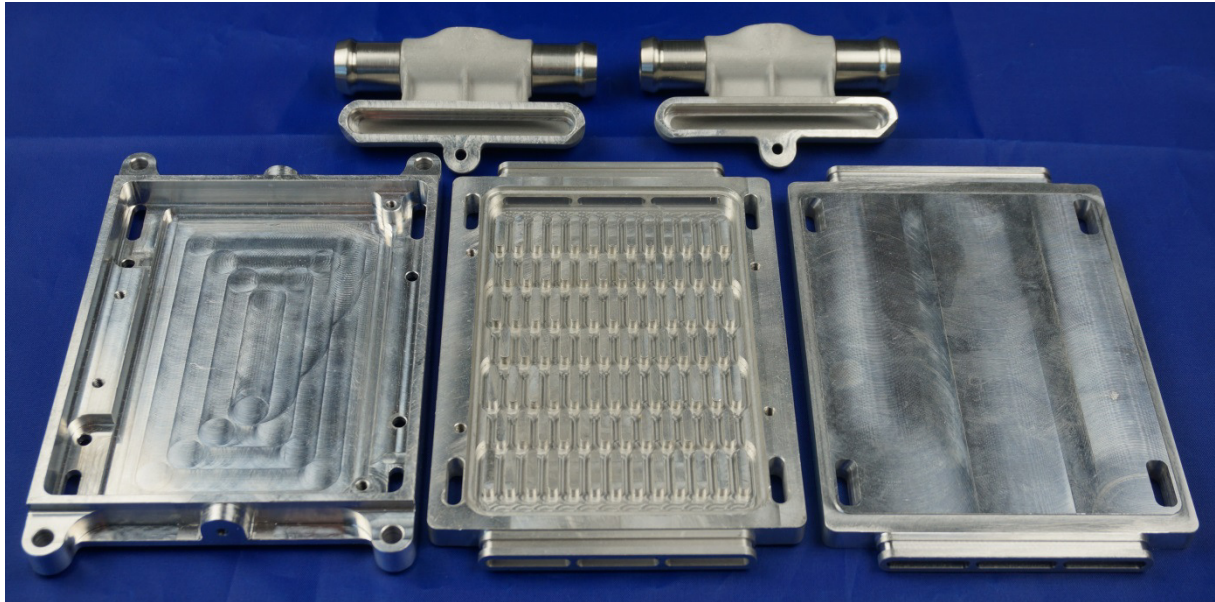


Abbildung 66: Plattenwärmetauscher (mitte u. rechts) mit Elektronikgehäuse (links)

Aus einer großen Auswahl mit unterschiedlichen Designmerkmalen wurde für das Projekt nach umfangreichen Studien, Berechnungen und Versuchen mit Prototypen die in Abbildung 66 dargestellte Variante ausgewählt, zusammen mit dem Elektronikgehäuse (links) und Wasserstutzen (2 Stutzen Durchgangsvariante, oben) Um das Verhalten der Wärmübertrager im Vorfeld zu analysieren und zu optimieren, hat Benteler zusammen mit IAV umfangreiche und detaillierte numerische Simulationen der Stoff- und Wärmeströme durchgeführt.

Je nach Anforderungen und Stückzahl kann die ausgewählte Variante mit unterschiedlichen Fertigungsverfahren hergestellt werden. Sie hat sich im Verlauf des Projekts in allen Belangen bewährt und die vorhergesagte Leistung wurde bestätigt. Entsprechend ertüchtigt wird sie auch für kraftschlüssige Aufbauten mit kommerziellen Modulen eingesetzt.

Diese Variante hat die folgenden Eigenschaften und Vorteile:

- Kompakte Bauform mit hohem Nutzflächenverhältnis
- Ausreichende Steifigkeit für materialschlüssige Aufbaukonzepte, mit Zusatzmaßnahmen auch für kraftschlüssige Konzepte
- Ausreichend Potenzial für thermische Isolierung zwischen der Warm- und Kaltseite
- Ausreichende Kühlleistung mit großem Steigerungspotenzial
- Gleichmäßige Durchströmung des Kühlers
- Variable Wasserstutzen mit großem Querschnitt, ein bis drei Anschlussflansche und Integrationsmöglichkeit für Drosseln
- Leicht adaptierbares Elektronikgehäuse mit Anbindung an Wasserkühlung
- Leicht skalierbar (Material, Abmessungen, Design)
- Einfach und kostengünstig herstellbare Prototypen
- Potenzial für große Stückzahlen durch Auswahl entsprechender Herstellverfahren

DC/DC-Wandler

Die Entwicklung, Herstellung, Charakterisierung und Erprobung der elektronischen Komponenten, im Besonderen der DC/DC-Wandler lag in der Verantwortung des Institut für Energie und Automatisierungstechnik, Fachgebiet für Elektronische Mess- und Diagnosetechnik, der Technischen Universität Berlin (**TUB-MDT**).

Im Rahmen der Konzeptentwicklung und der Gesamtsystemsimulation hat IAV bei der Definition der , Spezifikationen, Funktionen und der Festlegung der Abmessungen der elektronischen Einheit unterstützt sowie ein integriertes und ein separates Gehäuse entworfen und beschafft.

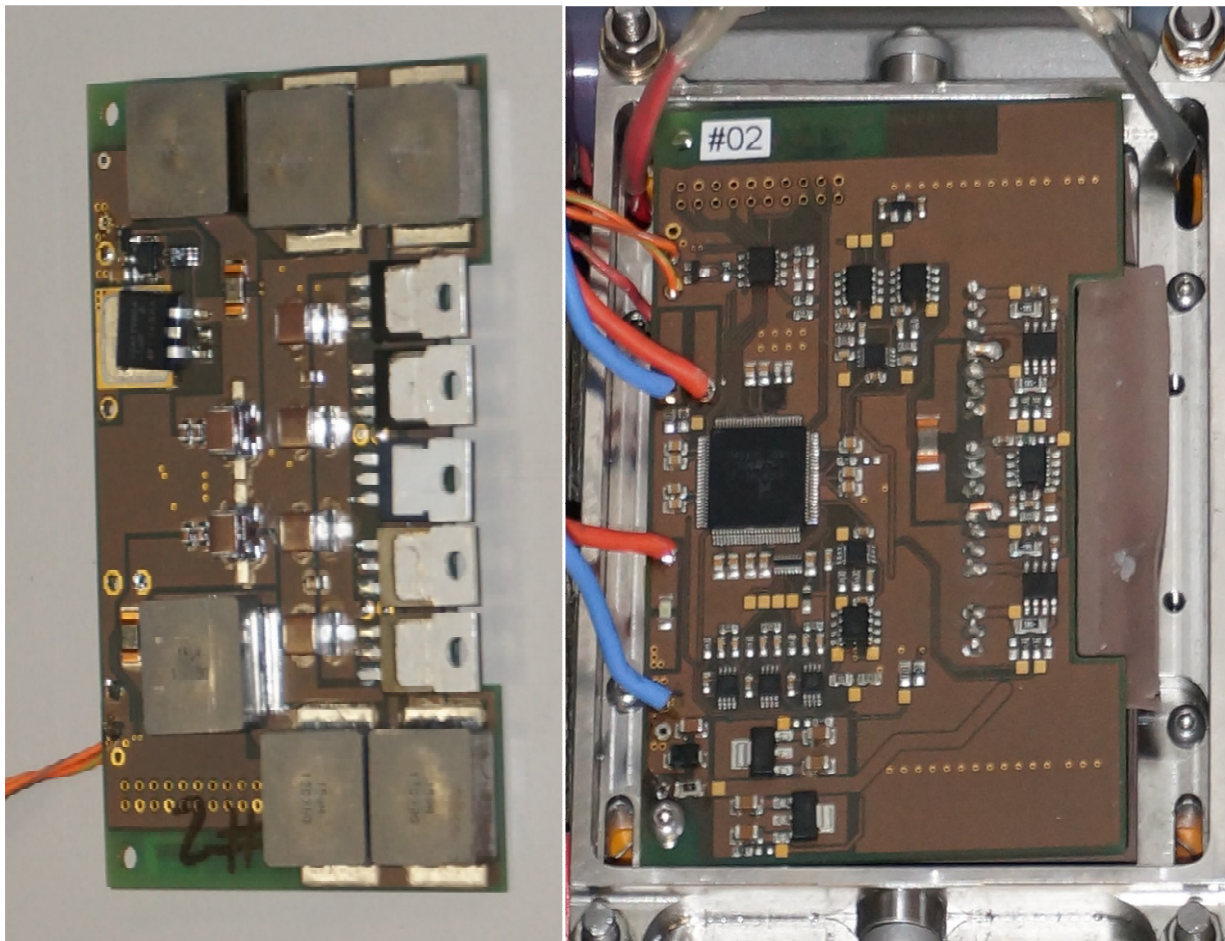


Abbildung 67: DC/DC Wandler

1.4.4 Ergebnisse und Zusammenfassung

In dem Arbeitspaket AP 50 000 „Innovative TE-Module“ wurden seitens IAV die folgenden „all-in-one“-Modulkomponenten mit unterschiedlichen Designs und Abmessungen entwickelt sowie Prototypen aus verschiedenen Materialien und mit unterschiedlichen Herstellungsverfahren beschafft bzw. gebaut:

- Block-Heiseitenwrmetauscher aus Kupfer, Aluminium und Stahl mit verschiedenen Designs (Rippenform und Dichte, massiv und Blech) und Abmessungen
- Einzel-Heiseitenwrmetauscher (WINGS) aus Kupfer mit verschiedenen Designs und Abmessungen (massiv und Blech)
- Kaltseitenwärmetauscher als Plattenwärmetauscher aus Kupfer, Aluminium und Stahl mit verschiedenen Designs und Abmessungen als Frästeil und geschraubt (Konzepte auch als Ltkonstruktion)
- Andruckplatten undverstrkte Befestigung (Federn) für kraftschlüssigen Einbau von Standardmodulen mit Blockwrmetauschern
- Wassergekhltes Ghuse aus Aluminium für DC/DC-Wandler
- Konzepte für thermische Isolierung der Schenkelpaare
- Dichtungen für Module und Gaskasten
- Kaltseitenwärmetauscher als Plattenwärmetauscher mit materialschlssiger elektrischer Isolierung und Kupferkontakten
- Div. Ltvorrichtungen für Blockwärmetauscher und „all-in-one“-Module mit WINGS
- Funktionsmuster „all-in-one“-Modul mit Bi_2TE_3 für Blockwärmetauscher

Alle Komponenten für das „all-in-one“-Modul für kraft- und materialschlüssige Aufbaukonzepte, verschiedene Wärmetauscher, verschiedene TE-Materialien und kommerzielle Module sowie optional mit DC/DC-Wandlern, wurden auf Komponenten-, Heißluft- und Motorprüfständen sowie im Fahrzeug getestet, vermessen und teilweise für mehrere hundert Stunden betrieben. Die Prototypen und die Ergebnisse der Versuche haben gezeigt, dass das im Projekt erarbeitete Konzept für ein innovatives TE-Modul („all-in-one“-Modul) trag- und ausbaufähig ist.

1.4.5 Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf auf dem Gebiet der TEG-Module besteht für:

- Heiseitenwrmetauscher / WING: Optimierung Material, Gewicht, Kosten, Großserienfertigung und Wärmedurchgang sowie Abgasresistenz, Korrosion, Kühlleistung, Isolierung, Schutz vor Umwelteinflüssen und mechanischen Belastungen, Lebensdauer
- Aufbau und Verbindungstechnik (AVT): Entwicklung geeigneter Lote und Flussmittel für TE-Materialien, Sperrschichten und Kontakte, geeigneter Schichten als Diffusionsbarriere, Oxidation-, Reduktion-, Abdampfschutz sowie Isolierung gegen Wärme konvektions- und Strahlungsverluste
- Lttechnologie/-prozess/-vorrichtung
- Thermische Isolierung: Optimierung hinsichtlich parasitärer Wärme strme zw. Schenkelpaar, Modulen und Wärmetauschern
- Materialschlüssige Isolierung und Kontaktierung der Kaltseite: Beschichtungstechnologie, -verfahren und -parameter, Material (elektrische Isolierung Al_2O_3 , Spinelle, AlN, etc. und Kontakte Kupfer, Nickel, Eisen, etc.), mechanischer und thermischer Belastbarkeit, Porosität, Flussmittelresistenz
- Mechanische Belastbarkeit Wärmetauscher: Optimierung hinsichtlich mechanischer Festigkeit des Verbunds TE-Schenkel/WINGS

1.5 AP 60 000 TEG-Systeme

Motivation

Einen TEG für ein Zielsystem zu entwickeln sowie alle notwendigen Komponenten zu beschaffen bzw. herzustellen ist in der Regel mit einem erheblichen Ressourcen- (Know-how), Budget- und Zeitaufwand verbunden.

Der Aufwand kann erheblich reduziert werden, wenn auf einen Baukasten mit standardisierten, aufeinander abgestimmte TEG-Komponenten zurückgegriffen werden kann, für

- Medienführung und -steuerung (Abgas-/Kühlwasserrohre, -bypass,-sammler, -klappen,-ventile)
- Wärmeein- und -auskoppelung (Warm- und Kaltseitenwärmetauscher)
- Wandler (TE-Module)
- Energieaufbereitung und -management (DC/DC-Wandler, Controller, Sensorik, Aktorik) sowie einige
- Strukturbauteile (Gehäuse, Halter, Entkoppelungen)

Hilfreich ist dabei, dass im automobilen Umfeld bereits viele Komponenten verfügbar sind, auf die zurückgegriffen werden kann.

Ziele

Es sollte ein modulares, skalierbares Baukastensystem entwickelt werden, welches mit kleineren Änderungen an den Parametern für viele Einsatzzwecke genutzt werden kann. Die Tragfähigkeit des Konzepts sollte mit mindestens einem Prototypen-TEG im Betrieb nachgewiesen werden.

Das Konzept zeichnet sich durch die folgenden Eigenschaften aus:

- Alle für den Betrieb von TEG notwendigen Komponenten sind enthalten und aufeinander abgestimmt
- Neben der Skalierbarkeit berücksichtigt das Baukastendesign in einem weiten Bereich die einsatzspezifischen geometrischen, mechanischen und thermischen Eigenschaften und Betriebsbedingungen von Verkehrs-, Antriebs-, Arbeits- und Energiesystemen.
- Um der großen Bandbreite von Zielsystemen gerecht zu werden, stehen alle Baugruppen für unterschiedliche Leistungsklassen bereit.
- Werkstoffauswahl, Design und Dimensionierung der Bauteile sowie eine an das Zielsystem angepasste Integration und eine anwendungsspezifische Betriebsstrategie (Medien- und Energiemanagement)
 - Adressieren eine große Zahl von Zielsystemen aus den Bereichen Verkehrs-, Industrie- und Energiewirtschaft
 - ermöglichen eine große Leistungsbreite und Spannweite von Energieangeboten
 - minimieren bzw. vermeiden negative Rückwirkungen auf die jeweiligen Zielsysteme (z. B. Abgasgegendruck, Energiebedarf, Mehrgewicht, Raumbedarf etc.) soweit möglich
- Leistungsklassen können im Besonderen durch eine entsprechende Zusammenstellung (Hoch-, Mittel- oder Niedertemperatur-Thermoelektrika) und Anordnung (seriell und/ oder parallel) der Baugruppen appliziert/ optimal feinabgestimmt werden.
- Berücksichtigt material- und kraftschlüssigen Aufbau und Verbindungskonzepte für Wärmetauscher/TE-Material
- Kostengünstige Großserienkomponenten werden verwendet wo möglich

- Zentrales Element des Baukastens sind die „all-in-one“-Module
- Für (zwei) ausgewählte Anwendungen (Pkw, BHKW) steht ein (zwei) Demonstrator(en) für Motorprüfstands- und Fahrzeugversuche zur Verfügung

Maßnahmen

Die folgenden Komponenten wurden in verschiedenen Varianten konzeptioniert, entworfen, berechnet und konstruiert und im Rahmen der Gesamtfahrzeug-Simulation hinsichtlich ihrer Zielerreichung untersucht:

- Medienführung und -steuerung
 - Abgasführungen, ein- und mehrflutig, mit unterschiedlichen Kanalabmessungen und mit unterschiedlicher Modulbestückung längs und quer zum Abgasstrom sowie ohne und mit internen oder externen Bypass nebst Klappen
 - Wasserführung mit diversen Elektropumpen, unterschiedlichen Kühler mit Lüfter
- Wärmeein- und -auskoppelung (= Wärmetauscher)
 - Blockwärmetauscher (heiße Seite) aus verschiedenen Materialien und mit unterschiedlichem Rippendesign, massiv und aus Blech
 - Einzelwärmetauscher (heiße Seite) aus verschiedenen Materialien und mit unterschiedlichem Design, massiv und aus Blech
 - Kaltseitenplattenwärmetauscher aus verschiedenen Materialien, mit unterschiedlichem Design und Rippen, geschraubt und gelötet als Einzel- und Sammelwärmetauscher
 - kraft- und materialschlüssige Aufbaukonzepte
- TE-Module (= Energiewandler)
 - Runde und planare TE-Module bzw. „all-in-one“-Module unterschiedlicher Größe
 - Planare TE-Module mit unterschiedlichen TE-Materialien (Bi_2Te_3 , PbTe, HH, Skutterudite, Oxide) segmentiert, kaskadiert, mit kraft- und materialschlüssigen Aufbaukonzepten
 - Runde TE-Module mit unterschiedlichen TE-Materialien und Aufbaukonzepten
- Energieaufbereitung und -management (DC/DC-Wandler, Controller, Sensorik, Aktorik)
- Strukturbauteile (Gehäuse, Halter, Entkoppelungen)

Die Auswahl der umzusetzenden Variante fand auf der Basis einer Bewertung der berechneten/simulierten Zielerträge bezogen auf vorgegebene Zielwerte für gewichtete Zielkriterien (Modul-Wirkungsgrad, absolute und spezifische elektrische Leistung, TE-Materialausnutzung, Gewicht (TEG-, TE-Material, Wärmetauscher), Fertigungsaspekte) statt. Hierbei wurden eine Vielzahl von Varianten berücksichtigt: 1- bis 3-flutige Systeme mit innen und außen Bypass, planare Module ohne und mit segmentierten Übergangsmaterial, verschiedene Wärmeübertragerdesigns mit Blech- und Massiv-Rippen aus unterschiedlichen Werkstoffen (s. Abbildung 68: Bewertungskriterien Rippenblech und Fräsrippen). Zielwerte und Wichtung wurden im Projekt definiert. Für den Demonstrator im Projektfahrzeug (VW Golf GTi mit Ottomotor) wurde die Variante mit der höchsten Zielerreichung in den drei relevanten Auslegungspunkten ausgewählt: eine einflutige, beidseitig mit Modulen besetzte Variante mit internem Bypass und 10 „all-in-one“-Modulen. In abgewandelter Bestückung kann diese Variante auch für Versuche auf dem Motorprüfstand mit einem Dieselmotor und am BHKW mit einem Gasmotor verwendet werden.

Bewertungskriterien [Gewichtsfaktor]

Gewicht [1]			Leistung [1]			Fahrzeugintegration [0,5]		
Parameter	Zielwert	Faktor	Parameter	Zielwert	Faktor	Parameter	Zielwert	Faktor
Gesamtgewicht [kg]	10	0,5	Gesamtleistung el. [W]	500	0,4	Bypass-Konstruktion	1 ... 5	0,17
Gewicht TE-Material [kg]	1	0,25	Spezifische th. Leistung [W/cm ²]	15 ... 5	0,1	Fahrzeugschnittstellen	1 ... 5	0,17
Gewicht Rippen [kg]	1	0,25	Spezifische el. Leistung [W/cm ²]	1 ... 0,25	0,1	Integration DC/DC-Wandler	1 ... 5	0,17
			TE-Modul Wirkungsgrad [%]	7,5 ... 2,5	0,4			

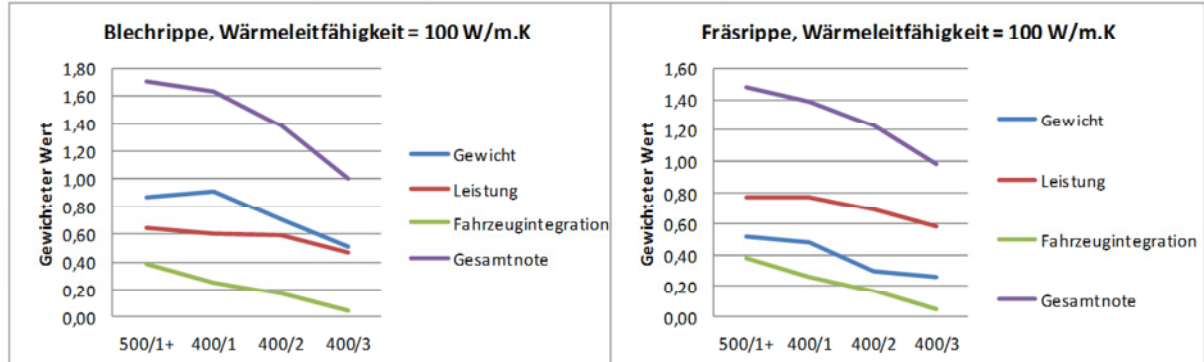


Abbildung 68: Bewertungskriterien Rippenblech und Fräsrippen

Ergebnisse

Das entwickelte Konzept mit „all-in-one“-Modulen zeigte sich als tragfähig für TEG unterschiedlichster Leistungsklassen und Geometrie.

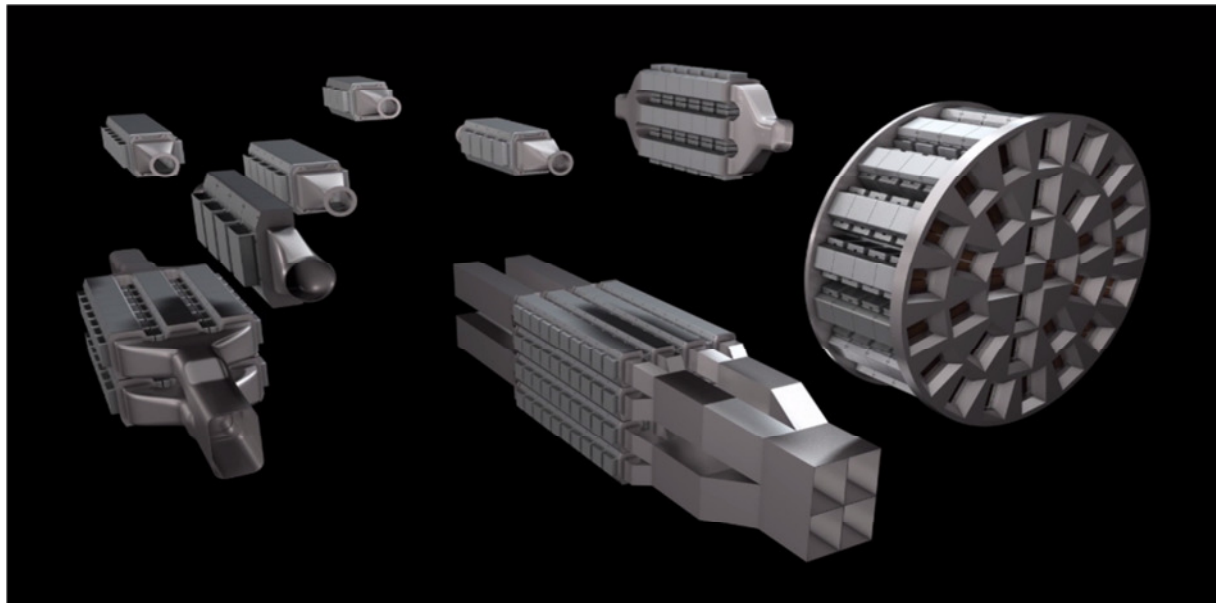


Abbildung 69: Baukasten-TEG unterschiedlicher Geometrie und Leistungsklassen

Der Aufbau der Gaskästen für ein- und mehrflutige TEG ist einfach und sie sind leicht herzustellen. Interne als auch externe Bypässe mit Klappen könne integriert werden.

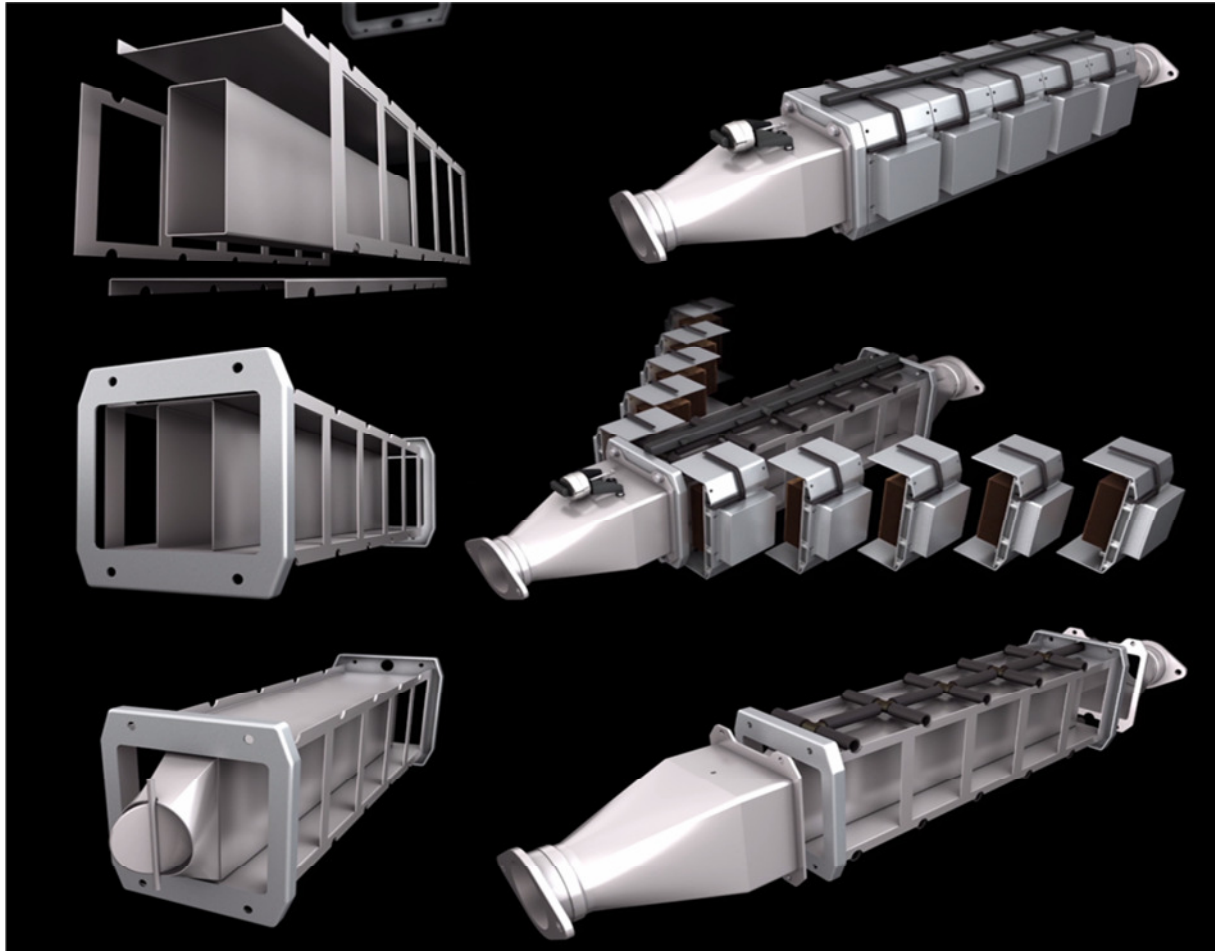


Abbildung 70: Einflutiger TEG mit internen Bypass und 10 „all-in-one“-Modulen

Im Projekt wurden zwei komplette TEG(s. Abbildung 70 und Abbildung 72) mit je 10 Modulplätzen und ein kleiner Versuchs-TEG (Abbildung 71) für zwei Module aufgebaut. Die TEG wurden unterschiedlich mit kommerziellen Modulen aus Bi_2Te_3 von Hi-Z und teilweise mit Oxid-Modulen von TES New Energy Co. bestückt. Der Zusammenbau war kraftschlüssig. Die TEG wurden auf einem Heißgas-Laborprüfstand, auf einem Motorprüfstand und im Fahrzeug betrieben. Die Tests verliefen erfolgreich. Die Funktion der TEG und der Komponenten konnte über mehrere hundert Betriebsstunden nachgewiesen werden.

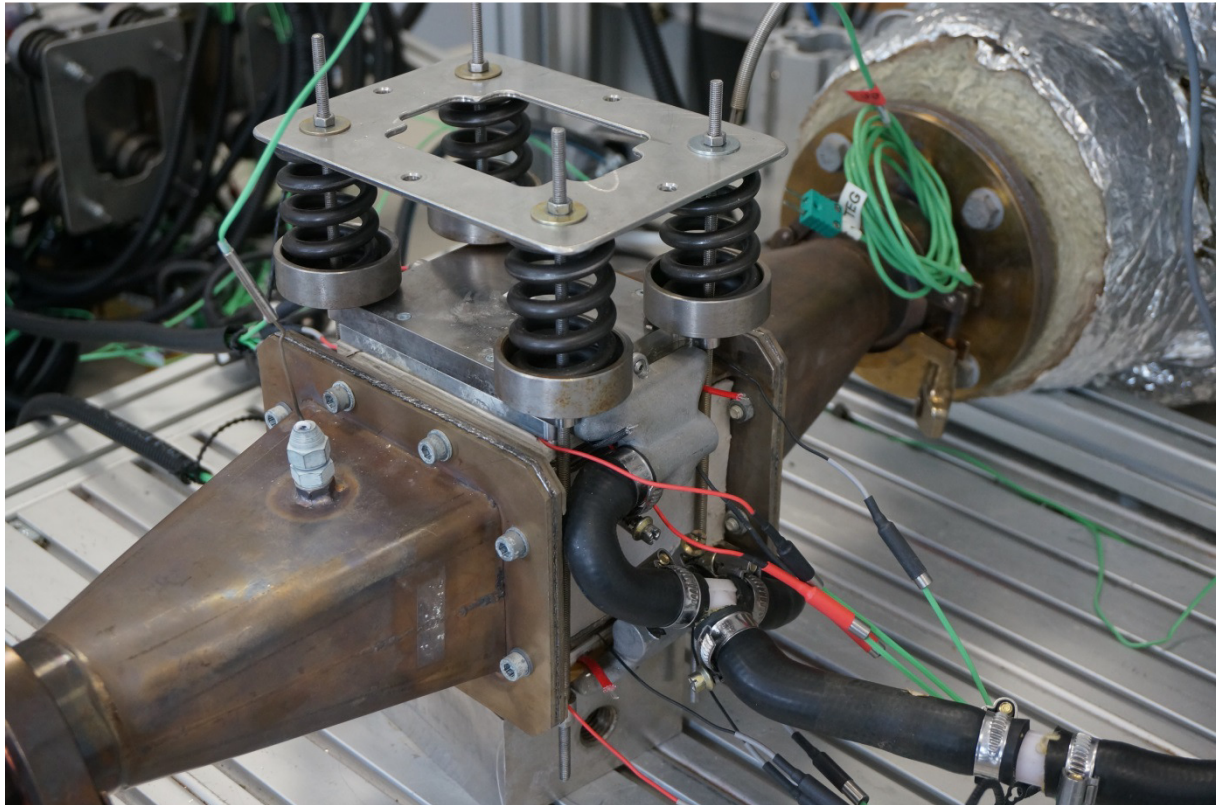


Abbildung 71: Einflutiger Versuchs-TEG für zwei Module mit definiertem Kraftschluss über Federn



1.5.1

Abbildung 72: TEG-Prototyp mit internem Bypass, Abgasklappe und 10 „all-in-one“-Modulen

1.6 AP 70 000 TEG-Integration

1.6.1 AP 71 000 Fahrzeugintegration

Ziel

Das entwickelte TEG-Baukastensystem soll durch nur geringe Modifikationen an der Peripherie in unterschiedlichsten Fahrzeugen verbaut und verwendet werden kann. Die Anpassung an das jeweilige Fahrzeug soll durch Skalierung des „All-In-One“-Moduls erfolgen. Der Aufbau soll so ausgelegt werden, dass auch die Anzahl der Module leicht an das jeweilige Fahrzeug (oder anders verbaute VKM) angepasst werden kann.

Maßnahmen

Für die Integration eines Prototyps in ein Fahrzeug wurde festgelegt, dass das System hinter der Abgasnachbehandlung im Fahrzeug integriert werden soll. Dadurch wird eine Beeinflussung des gesamten Motormanagements weitgehend ausgeschlossen.

Der Bauraum in den verschiedenen Fahrzeugsegmenten (Kleinwagen, Kompaktklasse, Oberklasse usw.) wurde für die Integration eines TEG-Systems analysiert. Diese Bauraumanalyse und -bewertung erfolgte in ständiger Abstimmung mit der Systemauslegung. Nur dadurch konnte sichergestellt werden, dass ein skalierbares „All-In-One“-Modul über alle Fahrzeugsegmente hinweg entwickelt werden kann.

Außerdem wurde untersucht, welche Art des Systems (rechteckig oder rund, Anströmung quer oder längs, diverse Medientransportrichtungen) den Bauraum effektiv nutzt und einen skalierbaren Baukasten zulässt.

Ergebnis

Für die Integration eines Prototyps stand ein VW Golf 5 GTI 2,0l 147kW TFSI zur Verfügung. Bei der Bauraum- und Systemanalyse hat sich ergeben, dass ein rechteckiges System mit innen liegendem Bypasskanal und ebenfalls innen liegenden Abgaskanälen den Bauraum am effektivsten nutzt (s. AP 60 000 TEG-Systeme). Die Kühlung des TE-Materials wird innerhalb der Module realisiert. Die Rückkühlung des Kühlmittels erfolgt in einem NT-Kreislauf mit einem zusätzlichen NT-Kühler vor dem Klimakondensator (s. AP 76 000 Externe Kühlung). Es wurden mehrere Prototypen eines TEG-Systems aufgebaut und auf dem Prüfstand getestet und vermessen. Der letzte Prototyp mit getrennt regelbaren Abgasklappen wurde dann auch im Fahrzeug verbaut (s. AP 83 000 Test).

Für den Verbau im Fahrzeug musste die Lagerung der Abgasanlage modifiziert (verstärkt) werden, um das zusätzliche Gewicht des TEG-Systems in der Abgasanlage aufnehmen zu können.

1.6.2 AP 72 000 Energiemanagement

Siehe Kapitel 1.3. AP Simulation, Abschnitt „Definition eines geeigneten Energiemanagements für klassische und Hybridfahrzeuge“.

1.6.3 AP 73 000 Funktionale Integration

Ziel

Der einwickelte TEG soll in dem Demonstrator-Fahrzeug eingebaut und betrieben werden. Dies erfordert neben der geometrischen auch eine funktionale Integration des TEG im Fahrzeug. Betriebsstrategien, Steuer- und Regelungsfunktionen, Medien- und Energiemanagementfunktionen müssen entwickelt werden sowie ein funktionales Sicherheitskonzept, das sowohl das TEG-System als auch das Fahrzeug von gegenseitigen negativen Einflüssen/Gefahren schützt.

Maßnahmen

Das Demonstrator-Fahrzeug verfügte über ein Steuerungssystem (Abbildung 73), das auf die neuen Anforderungen aus dem TEG2020-Projekt erweitert und angepasst werden musste. Dazu wurde eine Bestandsaufnahme der vorhandenen Komponenten und der genutzten Software durchgeführt.

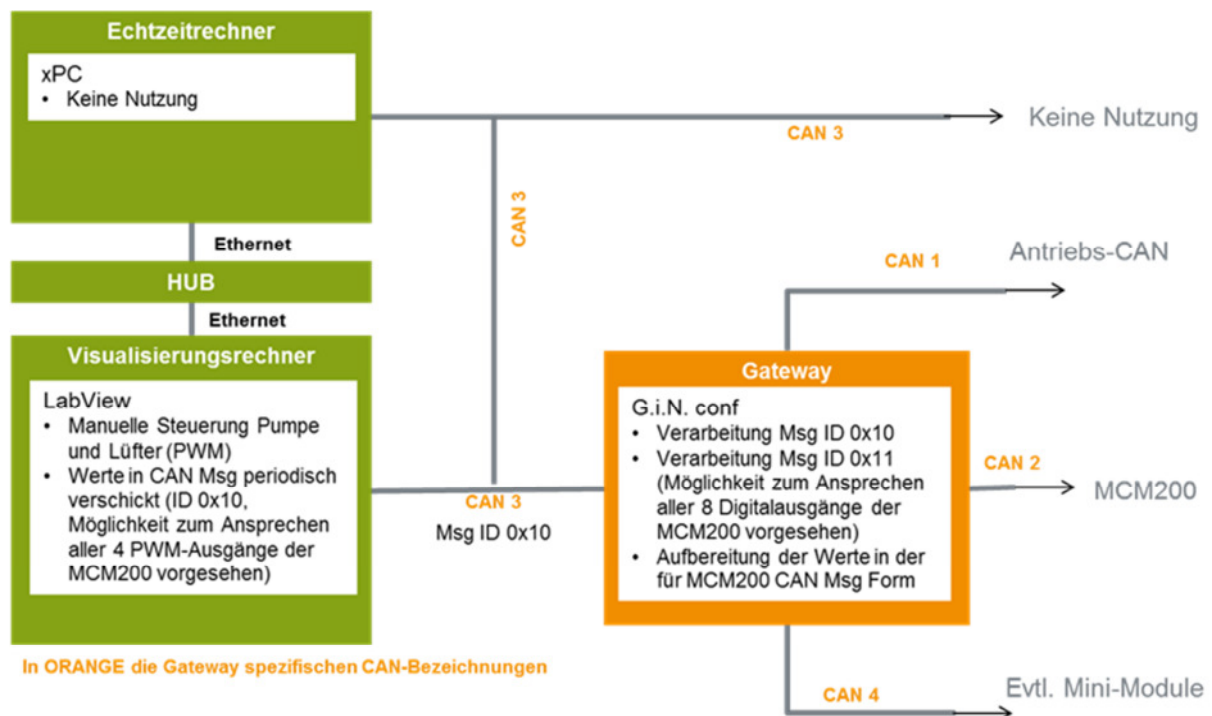


Abbildung 73: TEG-Steuerungssystem - Ausgangszustand

Entsprechend den Projektanforderungen wurde ein Konzept zur Umsetzung des TEG-Steuerungssystems entworfen sowie die neuen/anzupassenden Hardwarekomponenten, Softwaremodule und Funktionen definiert. Das erweiterte Steuerungssystem ist in Abbildung 74 zu sehen.

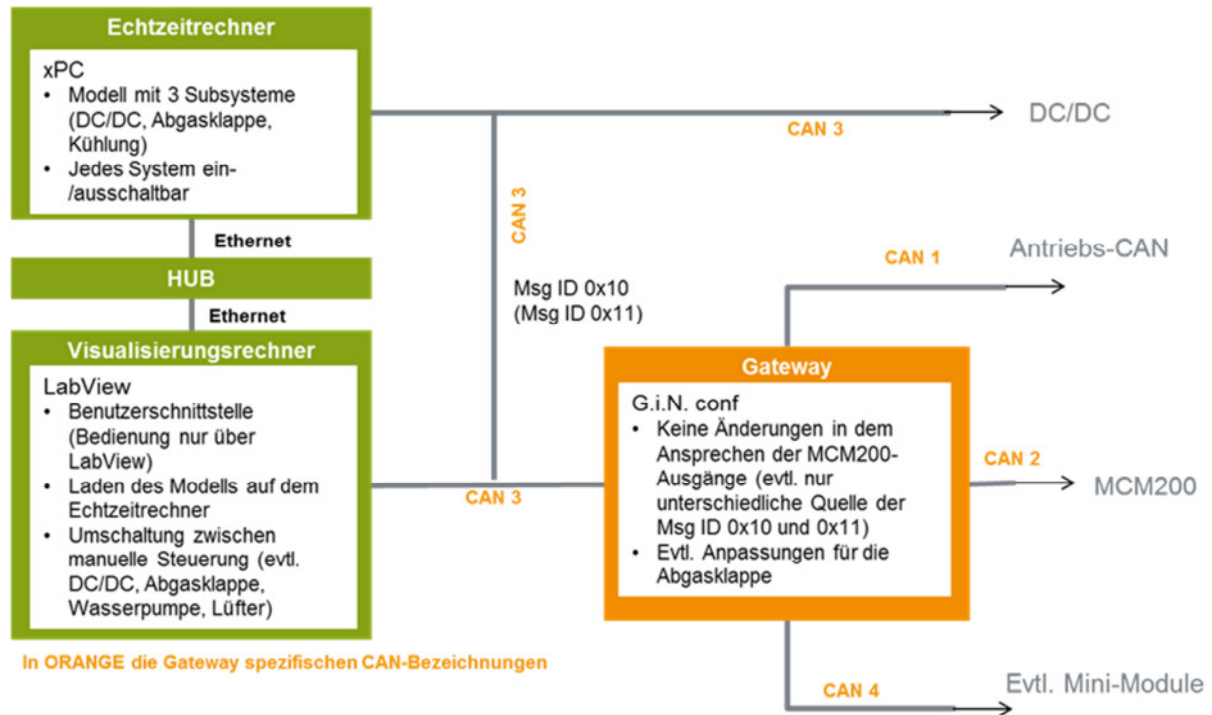


Abbildung 74: TEG-Steuerungssystem - erweitert und angepasst

Der Hardwareaufbau wurde erweitert und besteht aus den folgenden Komponenten:

- Bypassklappen: PWM angesteuert
- Kühlwasserpumpe, Kühlerlüfter: PWM angesteuert
- MCM 200: generiert PWM Signale (Pumpe, Lüfter, Bypassklappe)
- Gateway: übersetzt CAN-Botschaften und leitet diese zwischen den diversen CAN weiter
- Echtzeit-PC (xPC-target) = Steuer- und Regelsystem: Echtzeitbetriebssystem für die Regelung der Hardware (ausführen von Regler- und Simulationsmodellen)
- Visualisierungs-PC: dient der Visualisierung und der Bedienung der restlichen Hardware
- Mini-Module: nehmen die analogen Messsignale (Temperatur und Drücke) auf und wandeln diese in CAN-Botschaften um

- Schnittstellen:
 - Netzwerk
 - Serielle Schnittstelle
 - USB
 - VGA
 - CAN

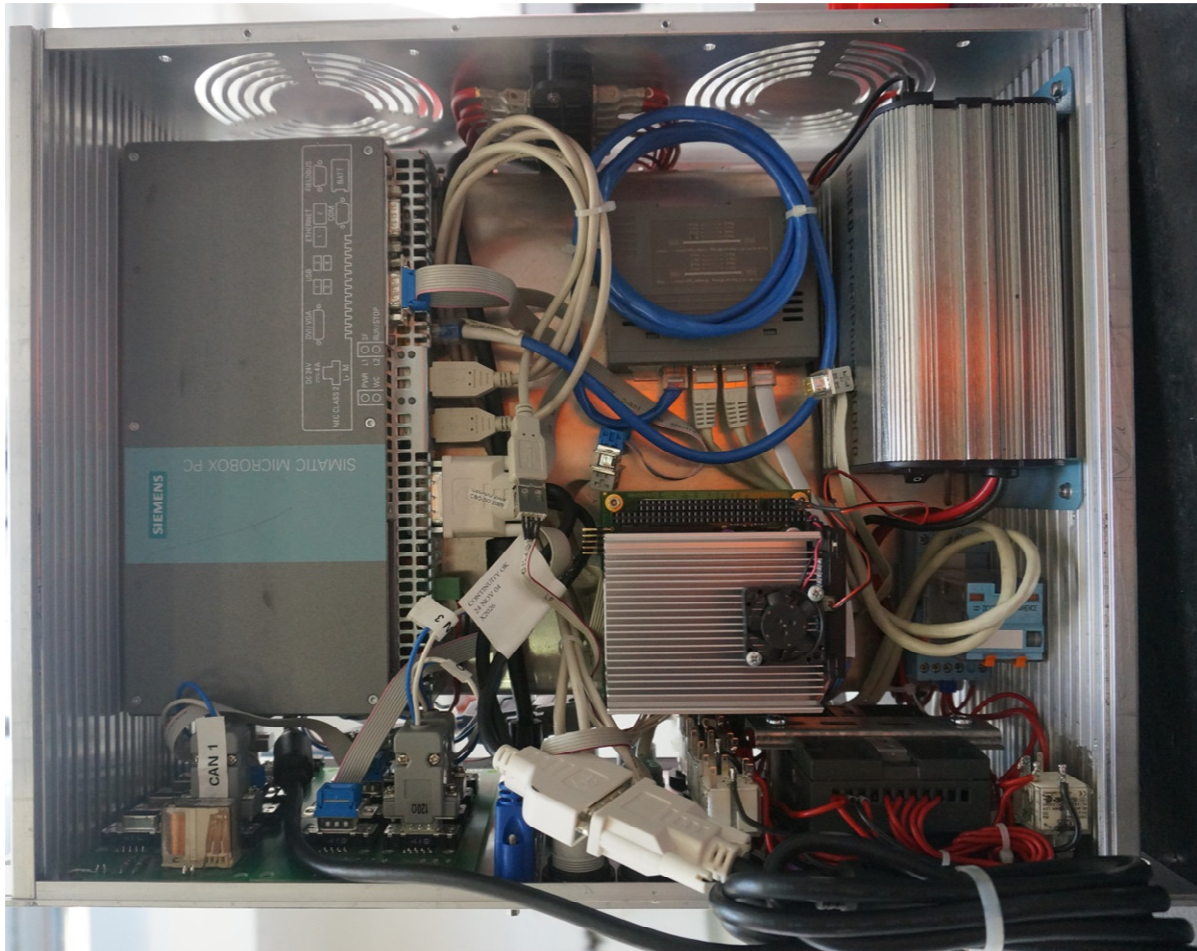


Abbildung 75: Hardwareaufbau TEG-Steuerungssystem

Die Softwaremodule wurden wie folgt modifiziert:

- Das LabView Steuerungsprogramm wurde um die Ansteuerung der Bypassklappen sowie der DC/DC-Wandler erweitert.
- In der Regelungseinheit (xPC-System) wurden die Erweiterungen bzgl. der Simulation der TEG Module, der Wärmetauscher sowie der Systemregelung umgesetzt und implementiert.
- Das Gateway wurde an die Systemerweiterung um die Bypassklappen angepasst. Hier geht es besonders um die Ansteuerung der MCM200, die das PWM Signal für die Abgasklappe generiert. Das MCM200-Modul bekommt von der Regelungseinheit (xPC-System) ein CAN Signal. Dieses definiert mit welchem Duty Cycle der Elektro-Motor der Abgasklappe angesteuert werden soll.

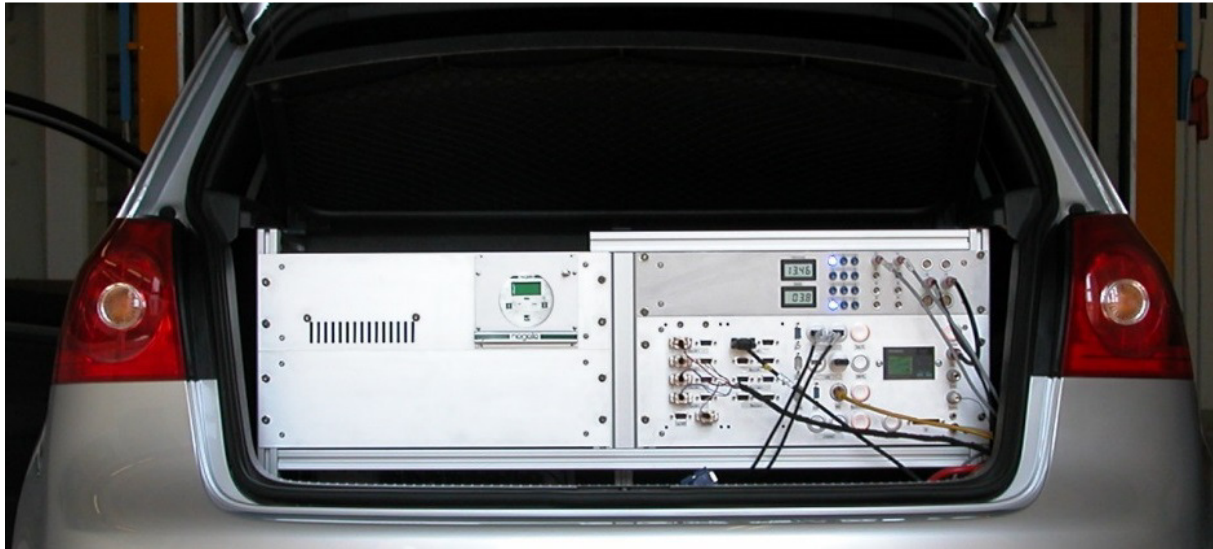


Abbildung 76: TEG-Steuerungssystem im Fahrzeug

Ergebnis

Das TEG-Steuerungssystem übernimmt die notwendigen Steuer- und Regelfunktionen, um den TEG im Fahrzeug betreiben zu können. Im Einzelnen wurden folgende Software-Module entwickelt und implementiert:

- Ansteuerung und Regelung der Abgasklappen
- Ansteuerung des autarken TEG-Kühlkreislaufs
- Ansteuerung der DC/DC-Wandler
- Messwertaufnahme von Temperatur- und Drucksensoren sowie Volumenstrommesser
- Datenübernahme aus dem Fahrzeugkommunikationsnetz (CAN)
- Datenaufnahme von Prüfstandsversuchen und Messfahrten
- Echtzeit Berechnung von Simulationsmodellen und deren Integration in das reale dynamische Fahrzeugbetrieb (Hardware-in-the-Loop)
- Überwachung und Sicherheitsfunktionen
- Bedienoberfläche
- Visualisierung von Messdaten, Messfahrten, Statusmeldungen, Sicherheitsinformationen

Das System ist grundlegend auf zwei verschiedene Arten zu betreiben: **manuell/gesteuert** über ein Industrie-PC (Siemens SIMATIC Microbox PC 427B)) und die Software LabView und **automatisiert/geregelt** über einen Echtzeitrechner (Siemens xPC Target) und die Software Matlab.

Manueller gesteuerter Betrieb - Software-Umfänge LabView

Die Grundansteuerung des Systems findet aus einem Master-Software-Programm statt, welches in LabView umgesetzt wurde. Dieses dient dazu, die einzelnen Schnittstellen und Hardwarekomponenten zu steuern sowie eine rudimentäre Systemüberwachung bezüglich absoluter Grenzwerte zu realisieren.

Die Bedienoberfläche und das Visualisierungssystem sind auch in LabView implementiert. Im LabView erfolgt die Ansteuerung von Bypassklappen, Wasserpumpe und Kühlerlüfter manuell (Abbildung 77).

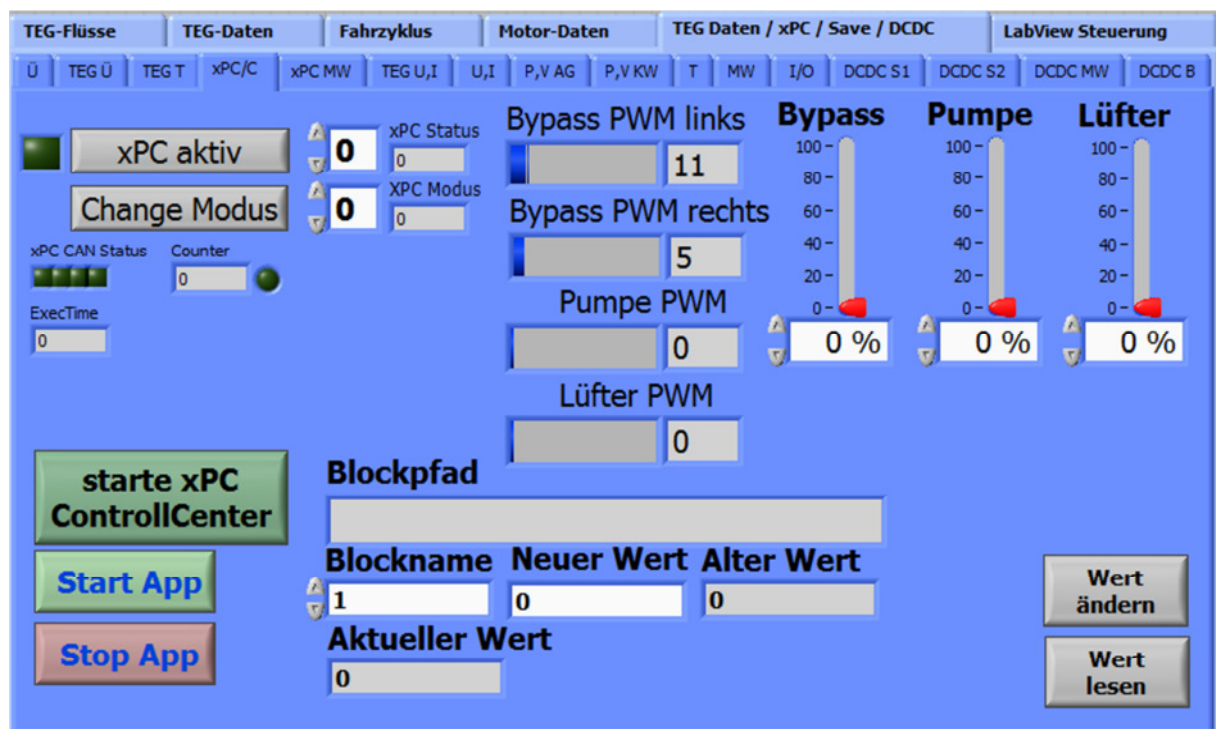


Abbildung 77: Systemansteuerung über LabView

Wird eine automatisierte Steuerung/Regelung des TEG-Systems gewünscht bzw. benötigt, kann über das LabView Programm (Abbildung 77) auf den xPC (Regelsystemrechner) umgeschaltet werden. Dabei behält LabView immer noch den Master bezüglich Systemverhalten und notwendigen Sicherheitsmaßnahmen.

Das Laden der Regelprogramme auf den xPC sowie den Verbindungsaufbau wird über das in Abbildung 78 dargestellte Userinterface durchgeführt.

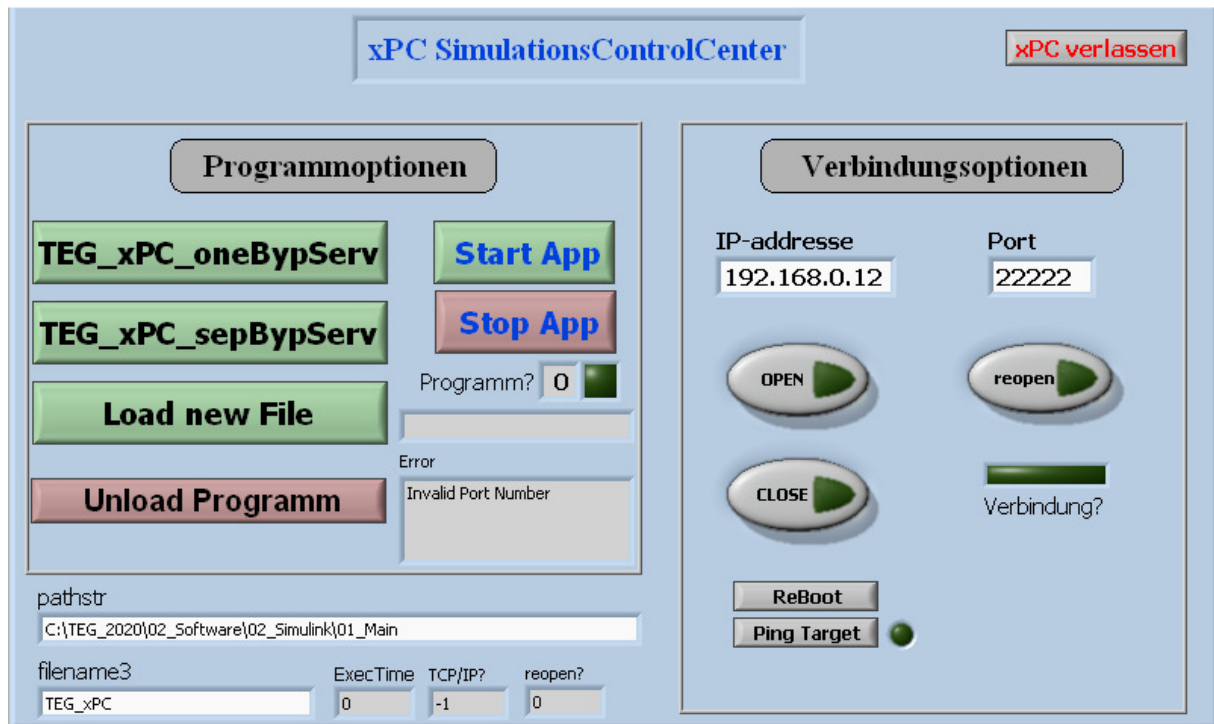


Abbildung 78 xPC Controlcenter

Die Bedieneroberfläche ist unterteilt in 3 Bereiche - Verbindungsoption, Programmoption und den Eingabebereich für das zu ladende Programm. Im Bereich Programmoption kann der Software-Code auf den xPC geladen bzw. wieder gelöscht werden, sowie das geladene Programm gestartet bzw. gestoppt werden.

Im Bereich Verbindungsoption sind alle relevanten Funktionen hinterlegt, um das xPC System anzusprechen bzw. die Kommunikation auf- oder abzubauen.

Implementierung der CAN Kommunikation mit den DC/DC-Wandlern sowie deren Ansteuerung und Überwachung

Die Ansteuerung der DC/DC-Wandler wurde in das Steuerungssystem (LabView) und das Regelungssystem (xPC) implementiert. Das Visualisierungssystem wurde um eine Bedien-, Status- und Messwertoberfläche für den DC/DC-Wandler ergänzt (s. Abbildung 79 und Abbildung 80).

Die Software-Module mit den Regelalgorithmen für die DC/DC-Wandlern wurden von der TUB MDT entwickelt und IAV zur Integration im TEG-Steuerungssystem zur Verfügung gestellt.

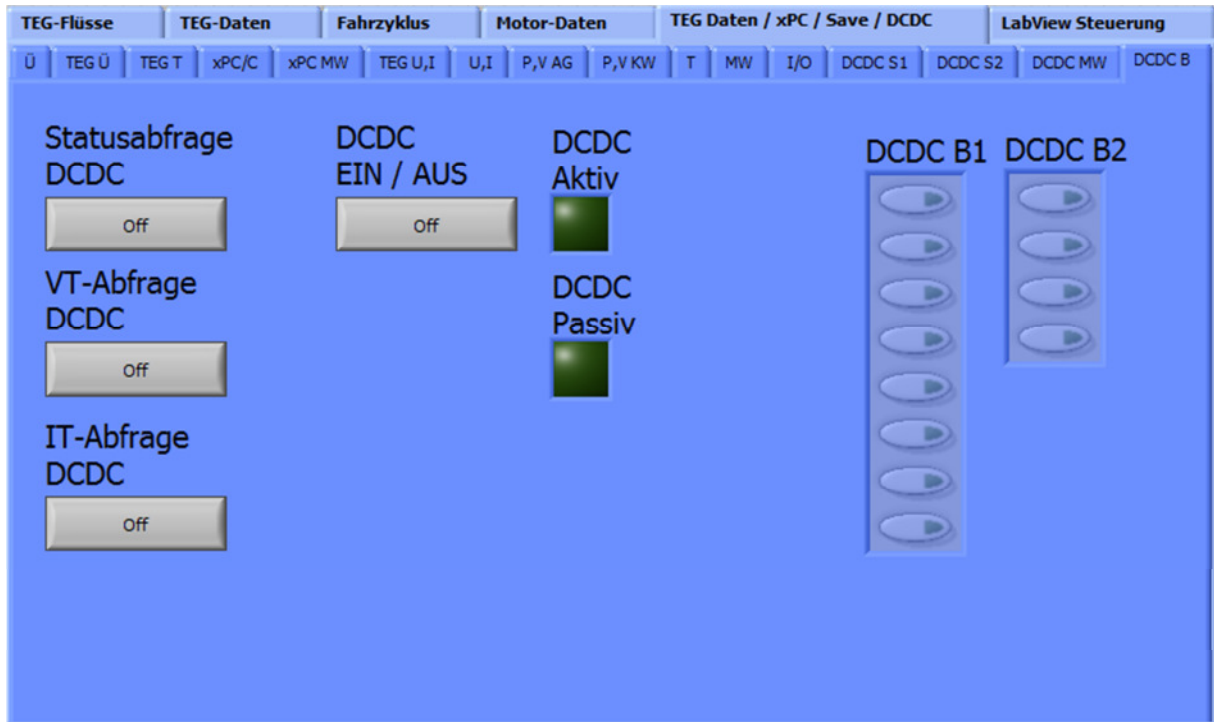


Abbildung 79 Bedieneroberfläche DC/DC-Wandler

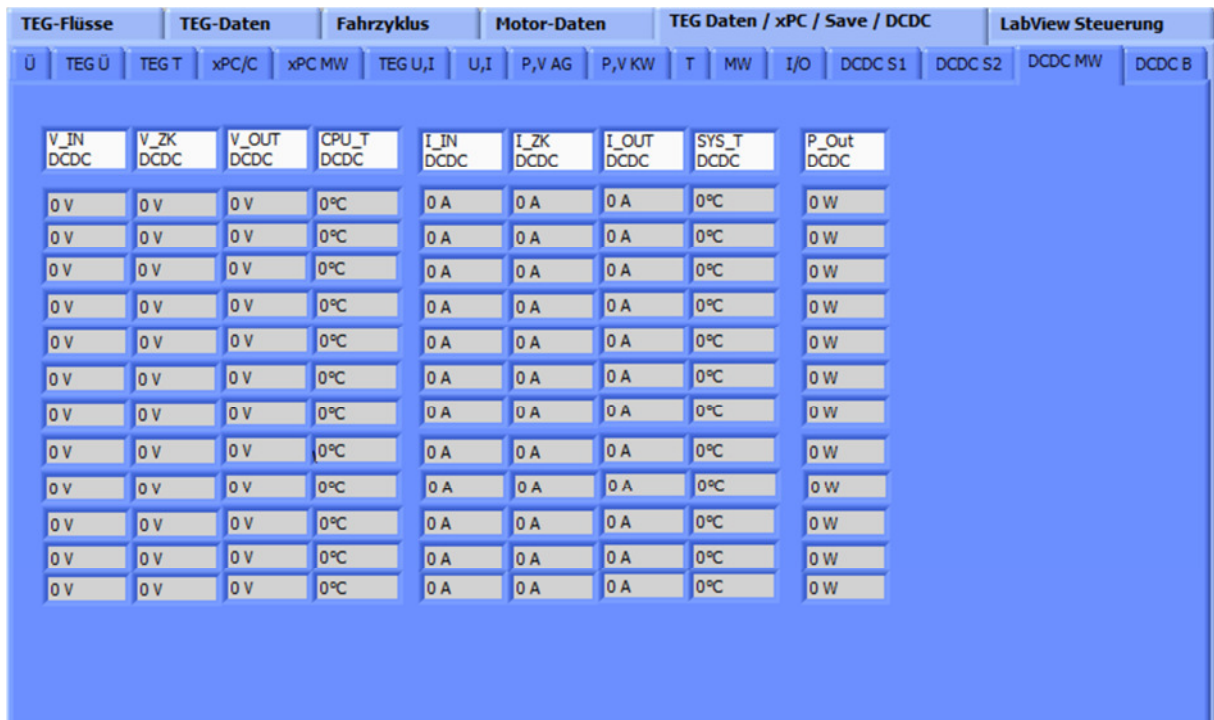


Abbildung 80 Messwertoberfläche für DCDC Wandler

Implementierung der Messsysteme

Um die Temperaturen, Drücke, Volumenströme etc. des TEG-Systems anzeigen zu können, mussten diese in das Steuerungsprogramm und zur Verarbeitung in das xPC-Programm eingebunden werden. Die Meesswertaufnahme findet über MiniModule der Firma CMS statt. Die Übertragung der Messerte an die einzelnen verarbeitenden und anzeigenden Komponenten ist über CAN realisiert. Die Einleseroutinen wurden jeweils in das Steuerungsprogramm (LabView) und das Regelungsprogramm (xPC) implementiert und mit den verarbeitenden Programteilen verknüpft. Die Darstellung der Temperaturmesswerte des TEG ist beispielhaft in Abbildung 81 abgebildet.

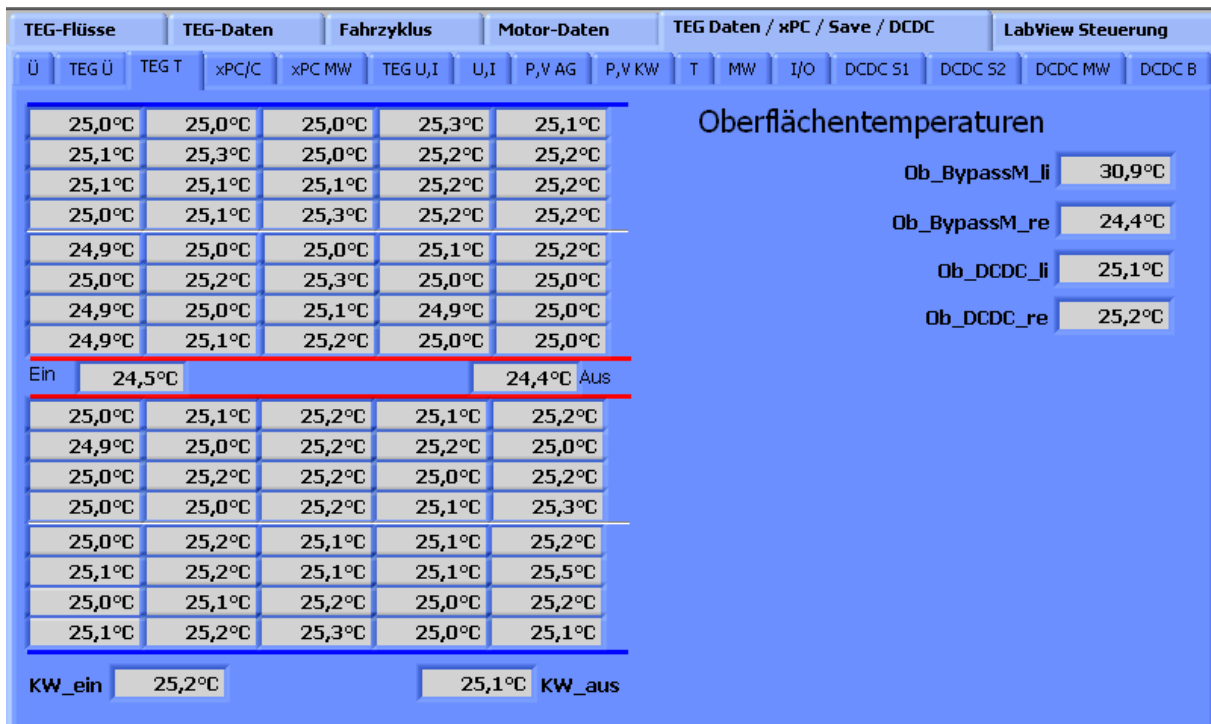


Abbildung 81 Temperaturübersicht TEG

Daten Input/Output

Ein weiterer zentraler Punkt ist das Aufzeichnen der Mess-, Simulations- und Systemdaten. Die Messreihen werden in einer für Microsoft Excel kompatiblen Form auf der Festplatte des Visualisierungsrechners gespeichert, um eine einfache Weiterverarbeitung der Daten zu ermöglichen.

Das Aufzeichnen der Messdaten wird über die Benutzeroberfläche des Visualisierungsprogramms konfiguriert (Abbildung 82). Das Aufzeichnungsintervall, die Anzahl der Messungen sowie die Abtastrate kann vom Nutzen vorgegeben werden.



Abbildung 82: Daten I/O

Automatisierter/geregelter Betrieb - Software-Umfänge Matlab

Ein automatisierter geregelter Betrieb des TEG-Steuerungssystems sowie eine Hardware-in-the-Loop-Umgebung wurde als Matlab-Simulink-Modell auf dem Echtzeitrechner xPC umgesetzt (s. Abbildung 83).

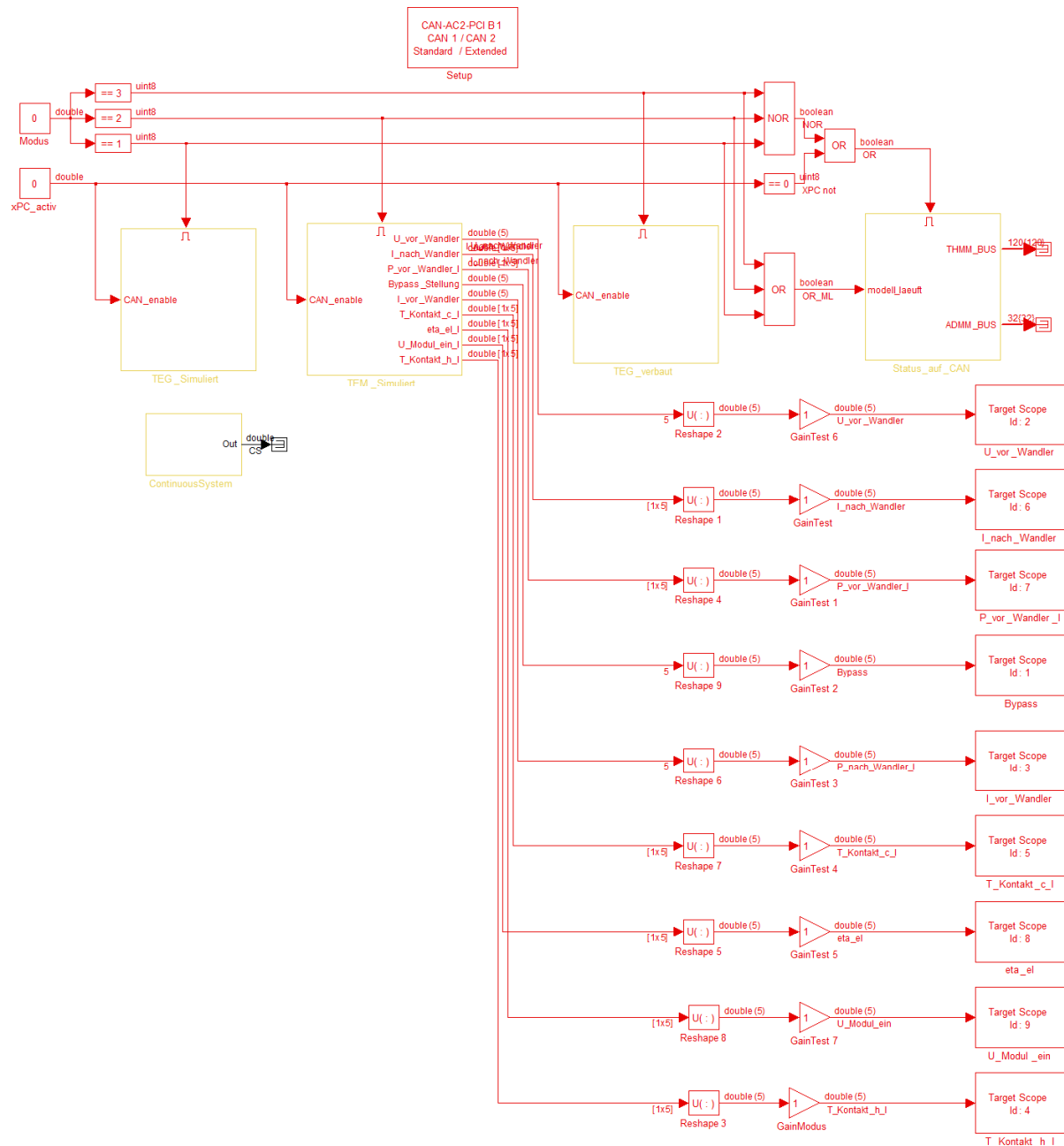


Abbildung 83: xPC Regel- und Simulationssoftware

Auf der obersten Ebene befinden sich zwei Konstanten, welche von LabView zum Ein- und Ausschalten des xPC verwendet werden und drei Subsysteme, die wiederum die verschiedenen Einbauvarianten des TEG widerspiegeln.

- „funktionsfähiger TEG“: vollständig aufgebauter und funktionsfähiger TEG
- „simulierte TEM“: TEG mit Wärmeübertragern aber ohne TE-Module (Dummies als Ersatz) --> HiL-Simulation
- „virtueller TEG“: kein verbauter TEG (leeres Abgasrohr)

Die Software-Module für die drei TEG-Subsysteme sind gleich aufgebaut und bestehen aus CAN-in, CAN-out, TEG und Regler.

Das Subsystem „funktionsfähiger TEG“ beinhaltet zusätzlich das DC/DC-Wandler Software-Modul. In diesem Subsystem sind alle Regel- und Steuerkreise implementiert, so dass der TEG im Fahrzeug oder am Prüfstand betrieben werden kann.

Beim Subsystem „simulierte TEM“ ist die Regelung für Bypassklappe, Wasserpumpe und Lüfter aktiv. Die Funktion der Energiewandlung übernimmt das in Echtzeit eingebundene Simulationsmodell der TEM (entwickelt durch den Projektpartner TUB-ETA). Dadurch kann der TEG unter realen Betriebsbedingungen getestet und sein Leistungspotential rechnerisch ermittelt werden.

Das Subsystem „virtueller TEG“ stellt eine vollständige Simulation des TEG dar. Dies umfasst die Bypassklappe, das Kühlsystem, die thermoelektrischen Module, die Wärmetauscher. In diesem Betriebsmodus ist es möglich, verschiedene TEG-Systemkonfigurationen im Fahrzeug unter realen Betriebsbedingungen simulativ zu untersuchen ohne dass eine Hardware verbaut ist.

Über die CAN Kommunikationsblöcke - CAN-in, CAN-out- findet die Kommunikation mit den anderen Systemen statt. Dazu zählen der Visualisierungsrechner mit dem LabView-Steuerungssoftware, die MCM200, die DC/DC-Wandler, das Fahrzeug/der Motor und die Messhardware.

Der Regler ist in drei Bereiche aufgeteilt - Bypassklappe, Kühlwasserpumpe und Kühlerlüfter. Er regelt die Bypassklappe und nachgeschaltet steuert die Kühlwasserpumpe und den Kühlerlüfter. Grundlegend wird nur die Bypassklappe geregelt mit dem Ziel, eine maximal mögliche Leistung aus dem TEG zu erzielen. Die Kühlwasserpumpe wird für den Minimalbetrieb angesteuert. Der Kühlerlüfter ist abgeschaltet. Die Kühlwasserpumpe wird ab einer bestimmten Temperatur hochgefahren, um eine Überhitzung bzw. lokales Sieden des Kühlwassers zu vermeiden. Wenn die Leistung der Kühlwasserpumpe nicht ausreicht, um die Abwärme aus dem TEG abzuführen, wird der Kühlerlüfter eingeschaltet.

Das TEG-Steuerungssystem ist abgesichert zum einen über Vorgaben an den Benutzern und zum anderen über in der Software (Regel- und Steuersystem) implementierten Überwachungen bezüglich Temperaturen und Systemabfragen. Die Überwachung der TEG-Temperaturen greift auf die Ansteuerung der Kühlwasserpumpe, des Kühlerlüfters und der Bypassklappen ein. Sie fährt die Leistung der Kühlkomponenten im Bedarfsfall hoch. Die Systemüberwachung schaltet sich ein, wenn ein System Fehler meldet und diesen ausgibt. Die Überwachung bezüglich des Regelsystems bedingt eines Frage-Antwort-Spiels über CAN Botschaften. So kann eingegriffen werden, wenn das Regelsystem nicht einwandfrei funktioniert. Die restlichen Komponenten haben Eigenüberwachungen, die in das Sicherheitsmodul des übergeordneten LabView-Programms integriert sind.

1.6.4 AP 76 000 Externe Kühlung

Ziel

Die dem Primärsystem (z. B. Abgas) zur Energierückgewinnung entnommene Wärme muss nach der thermoelektrischen Umwandlung wieder ausgekoppelt werden, entweder an einen weiteren Prozess oder an die Umgebung.

Ziel der durchgeführten Untersuchungen war es, die technisch sinnvollste Anschlussmöglichkeit des TEG-Kühlkreislafs an den im Fahrzeug vorhandenen Kühlkreislauf herauszufinden. Dabei sollte der im bisherigen Konzept permanente Einsatz der zusätzlichen elektrischen Wasserpumpe möglichst verhindert werden, um nicht gleich einen Teil der im TEG-Modul erzeugten elektrischen Energie wieder zu verbrauchen.

Maßnahmen

Für die Einbindung des TEG-Kreislaufs waren also ausschließlich die Anschlussstellen mit dem höchsten Druckunterschied zu betrachten. Auf der Hochdruckseite kam dafür aus konstruktiven Gründen nur eine Anschlussmöglichkeit außerhalb des Motors infrage, z.B. im Kühllervorlauf. Da beim Kaltstart des Motors das Thermostat noch zu ist, steigt der Druck im Kühllervorlauf proportional zur Drehzahl des Motors an. Auf der Niederdruckseite musste ein Anschluss gefunden werden, der eine permanente Durchströmung des TEG-Moduls zulässt. Der Heizungsrücklauf ist z.B. direkt mit der Saugseite der Wasserpumpe verbunden, an der das niedrigste Druckniveau im System anliegt. Deswegen erschien es sinnvoll, den TEG-Kreislauf zwischen den Kühllervorlauf und den Heizungsrücklauf einzubinden.

Diese Verschaltung führt zu einer schnelleren Aufheizung des Motors nach dem Kaltstart. Die Wärme wird dann aus dem Abgas durch das TEG-Modul abgeführt und über den Heizungsrücklauf wieder dem Motor zugeführt. Dadurch sinken die Reibungsverluste im Motorblock und es können z.B. ineffiziente kaltstartoptimierende Maßnahmen früher beendet werden. Zusätzlich kann durch die nun im Kühlkreislauf vorhandene höhere Energie mehr Wärme für die Innenraumklimatisierung bereitgestellt werden.

Allerdings sollte die Vorlauftemperatur des TEG die Grenze von 60 °C nicht überschreiten, um einen guten Wirkungsgrad der TE-Module zu gewährleisten. Oberhalb von 60 °C sollte das Kühlwasser im TEG-Kreislauf also gekühlt werden. Dies erfolgt nun durch die Trennung des TEG-Kreislaufs vom Motorkühlkreislauf durch ein 3/2-Wegeventil. Zusätzlich soll der Volumenstrom pro TE-Modul 0,8 l/min nicht unterschreiten, weil sonst die Gefahr des lokalen Siedens besteht.

Die verschiedenen Fahrzeugmessungen haben beim Kaltstart gezeigt, dass der Relativdruck am Hauptwasserkühler immer höher ist, als der Druck am Heizungswärmetauscherrücklauf. Das Thermostat ist beim Kaltstart immer geschlossen und das Kühlwasser fließt über den Bypass durch den Kurzschlusskreislauf des Motors. Deswegen ist es theoretisch möglich, das TE-Modul zwischen diesen beiden Stellen anzubinden (s. Abb. 84). Somit wird das Kühlmittel vom Kühllervorlauf durch die beiden TEG-Module in den Heizungswärmetauscherrücklauf fließen. Die elektrische Unterstützungspumpe (im folgenden TEG-Pumpe genannt) ist währenddessen ausgeschaltet. Ein Rückschlagventil im NT-Kühlkreis verhindert während der Warmlaufphase die Rückströmung über die beiden NT-Kühler. Sobald die Kühlmitteltemperatur nach dem TE-Modul 60 °C erreicht, schaltet das 3/2-Wegeventil um und die TEG-Pumpe wird zeitgleich angesteuert. Die Kühlung des TE-Moduls ist ab diesem Zeitpunkt autark und vom Hochtemperatur-Kreis des Motors komplett unabhängig.

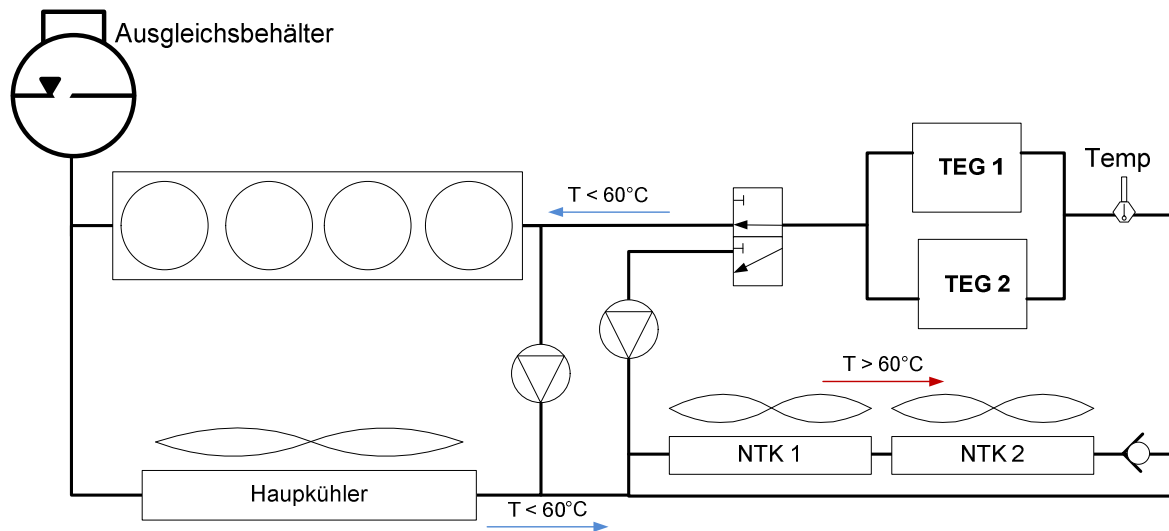


Abb. 84: Integration des TEG-Kreislaufs in den Gesamtkühlkreislauf des Fahrzeugs

Ergebnis

Die Untersuchungen wurden simulativ durchgeführt. Die Bedatung des Simulationsmodells basierte auf Messdaten aus dem Versuchsfahrzeug. Bei den Simulationen wurde jeweils eine Umgebungstemperatur von 25 °C vorausgesetzt. Folgende Lastpunkte wurden betrachtet:

- Leerlauf (780 1/min Motordrehzahl): Ein wichtiger Betriebspunkt nach dem Kaltstart ist der Leerlauf, weil dabei der Mindestvolumenstrom von 0,8 l/min pro TE-Modul nicht unterschritten werden darf. Die TEG-Pumpe ist dabei ausgeschaltet, und das 3/2-Wegeventil nicht bestromt. Die erzeugte Leistung durch die TE-Module wird also bei jedem Kaltstart zu 100 % in die Batterie eingespeist, weil die TEG-Pumpe zu dieser Zeit ausgeschaltet ist.

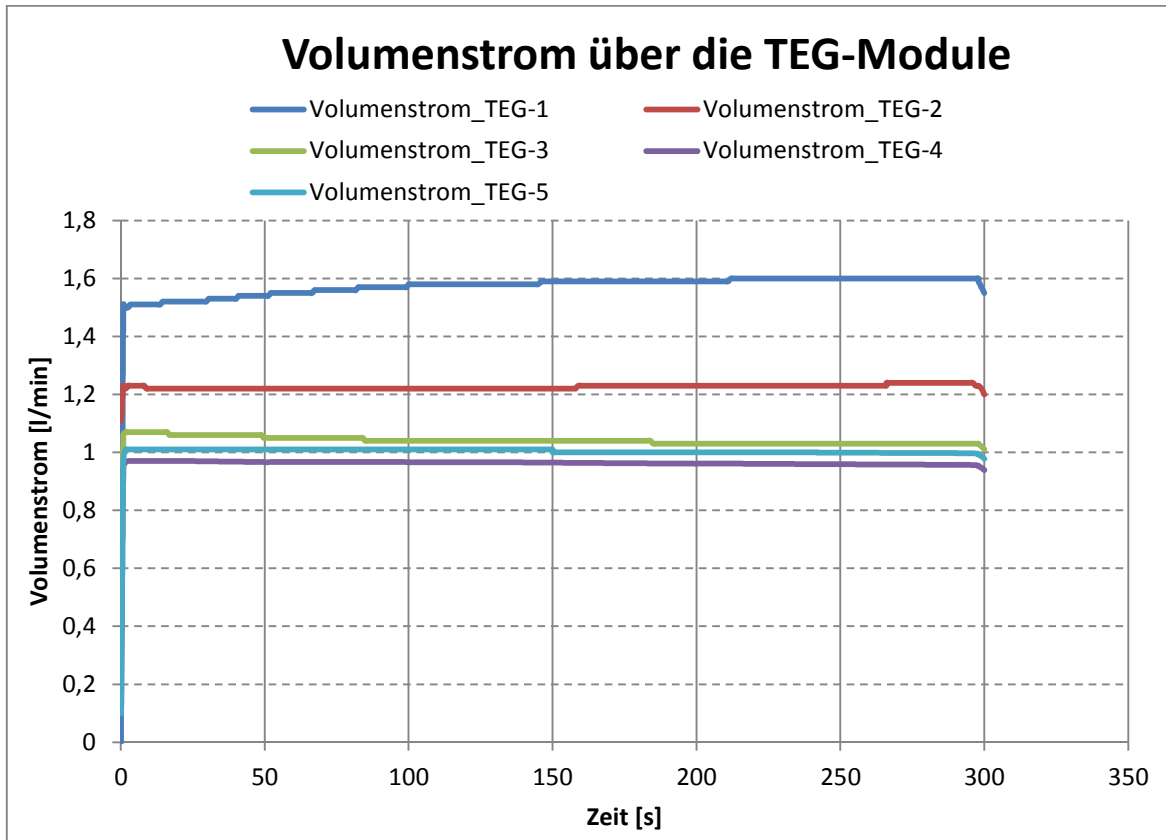


Abb.85: Volumenstrom über die TEG-Module 1 bis 5 im Leerlauf (780 1/min), Starttemperatur 25°C

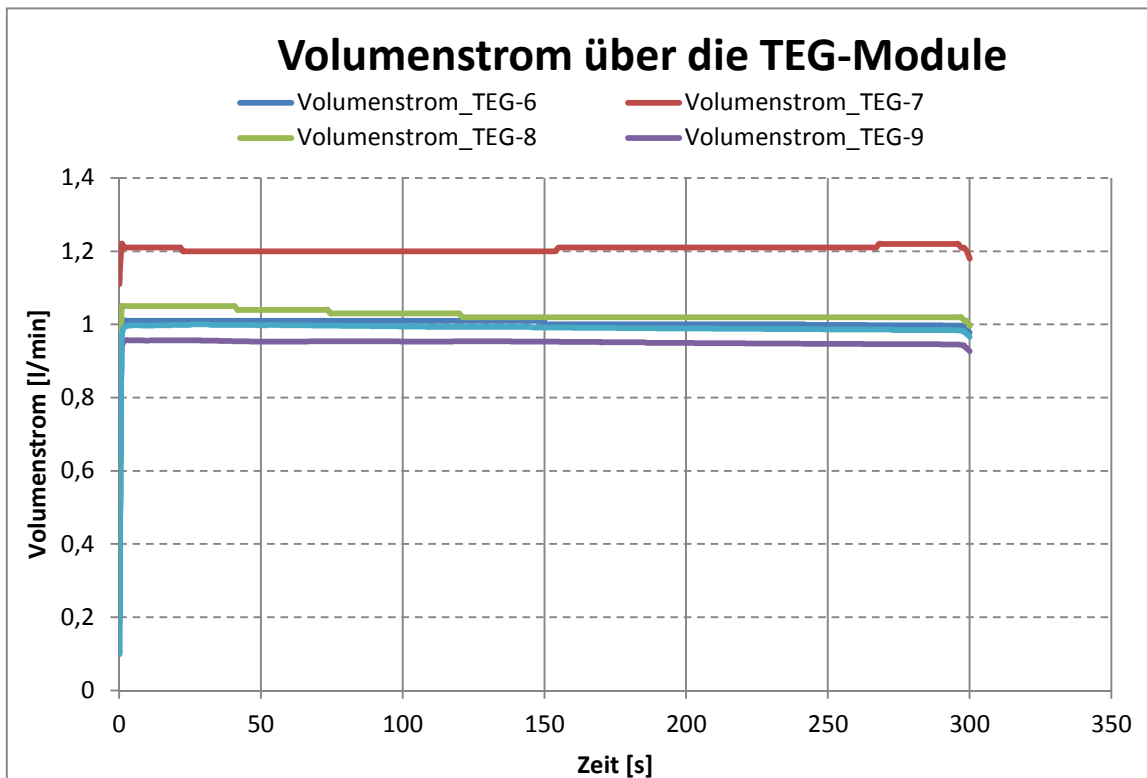


Abb.86: Volumenstrom über die TEG-Module 6 bis 10 im Leerlauf (780 1/min), Starttemperatur 25°C

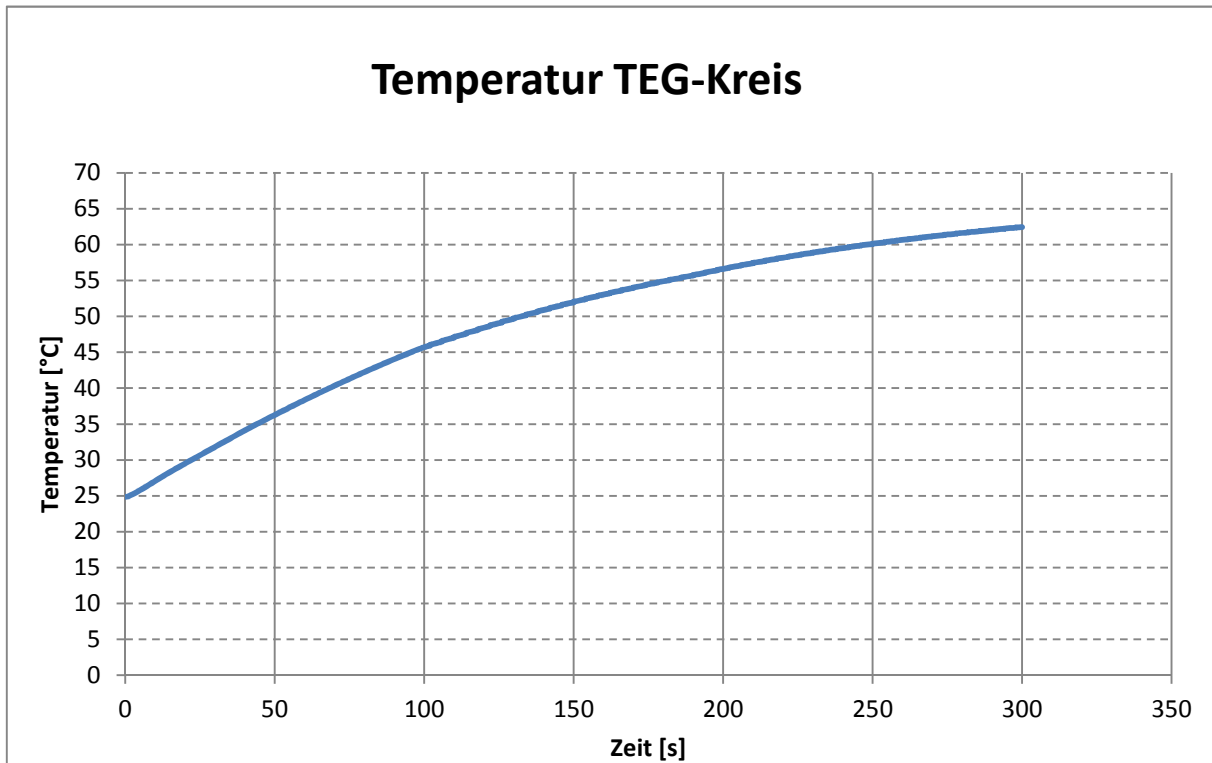


Abb.87: Temperatur TEG-Rücklauf im Leerlauf (780 1/min), Starttemperatur 25°C

- 50km/h (2000 1/min Motordrehzahl): In diesem Betriebspunkt erwärmt sich der Motor schneller. Wenn die 60 °C im TEG-Kreislauf erreicht sind, schaltet das 3/2-Wegeventil um und die TEG-Pumpe wird gleichzeitig angesteuert.

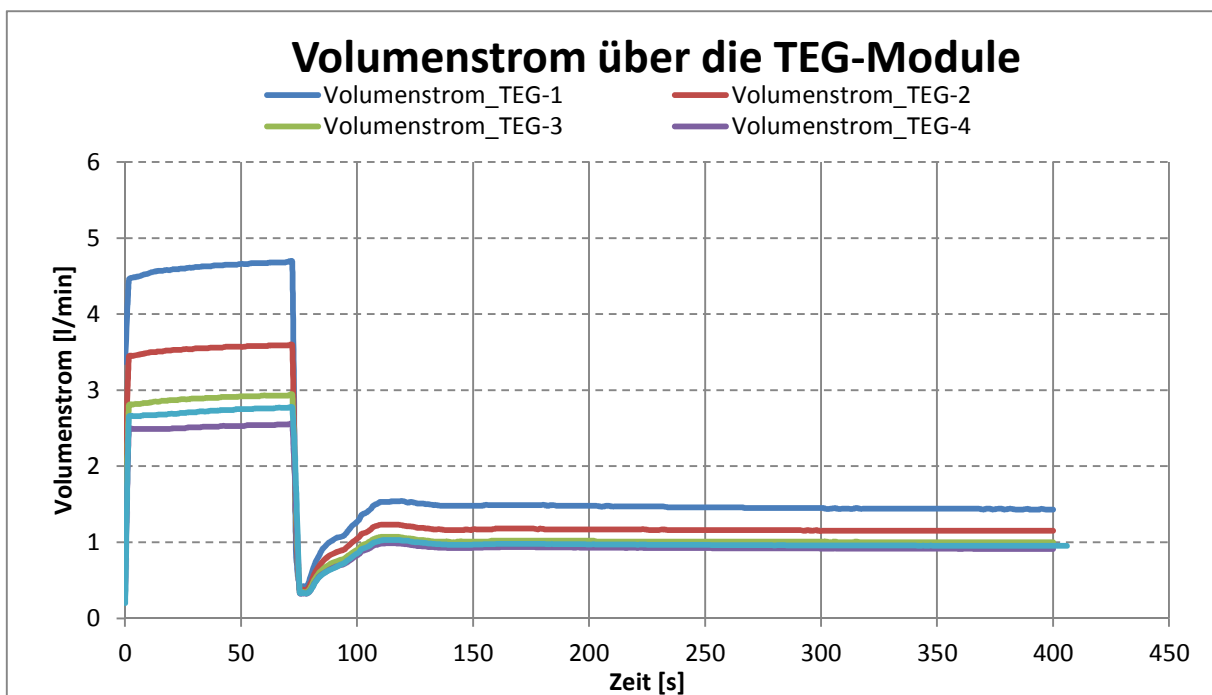


Abb.88: Volumenstrom über die TEG-Module 1 bis 5 bei 50km/h, Motordrehzahl 2000 1/min

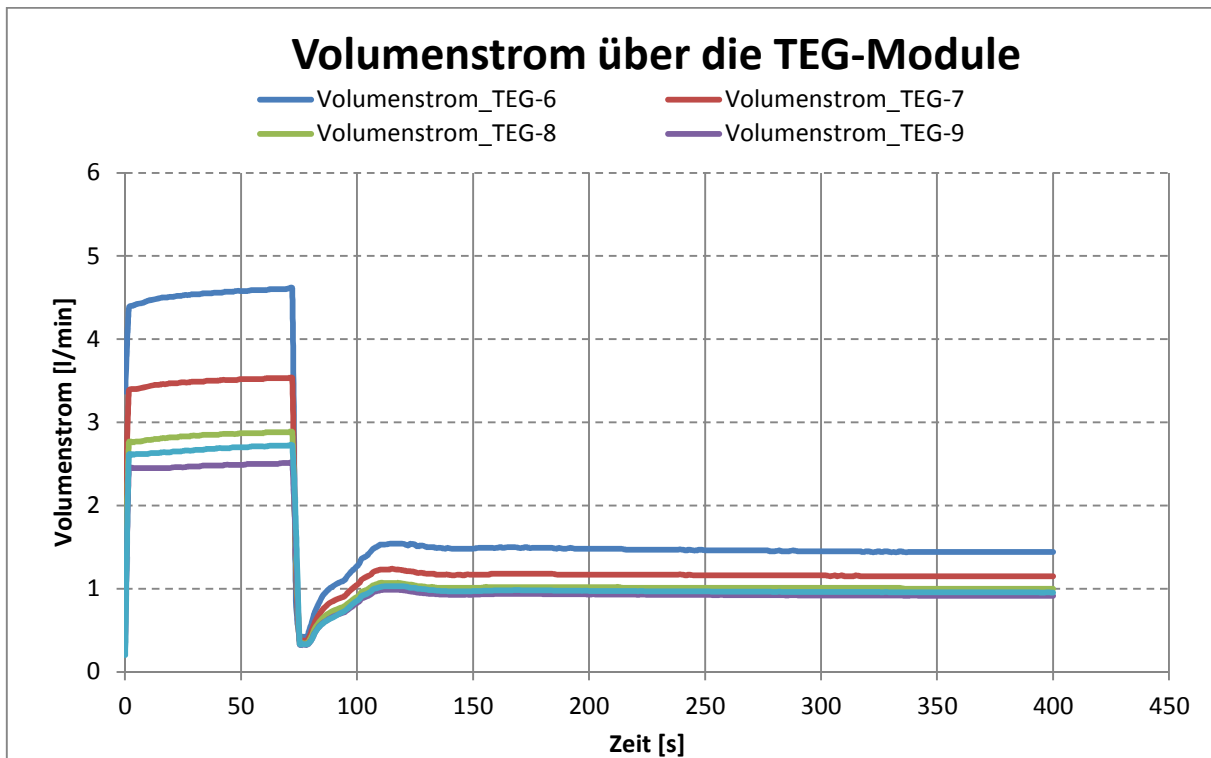


Abb. 89: Volumenstrom über die TEG-Module 6 bis 10 bei 50km/h, Motordrehzahl 2000 1/min

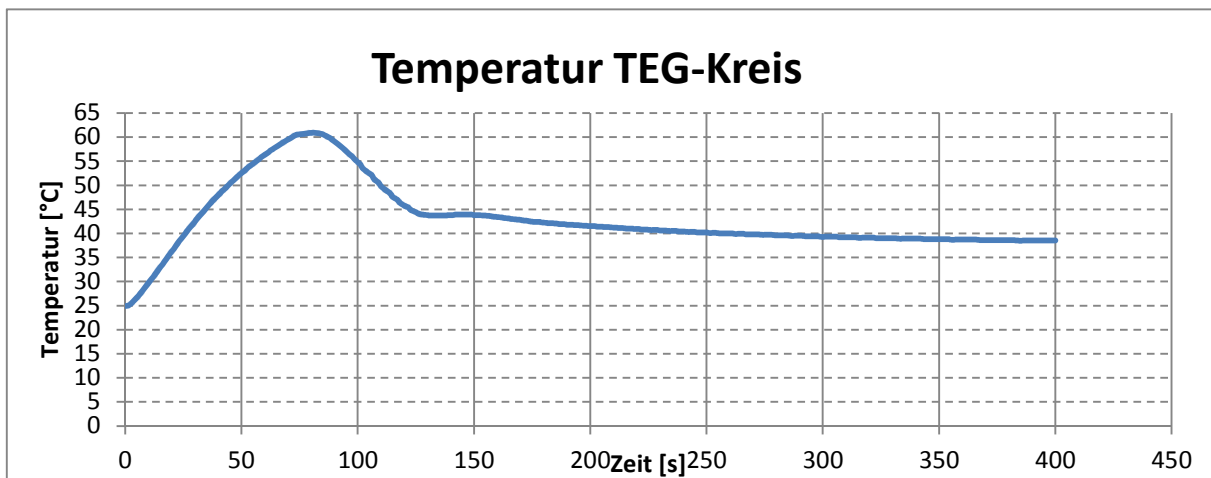


Abb.90: Temperatur TEG-Rücklauf bei 50km/h, Motordrehzahl 2000 1/min

- 120km/h (3000 1/min Motordrehzahl): Die Luftgeschwindigkeit und die Abgastemperatur sind in diesem Betriebspunkt höher als in den vorherigen Betriebspunkten. Durch die höhere Temperaturdifferenz zwischen Abgas und Kühlwasser wird eine relativ höhere Leistung durch den TEG erbracht.

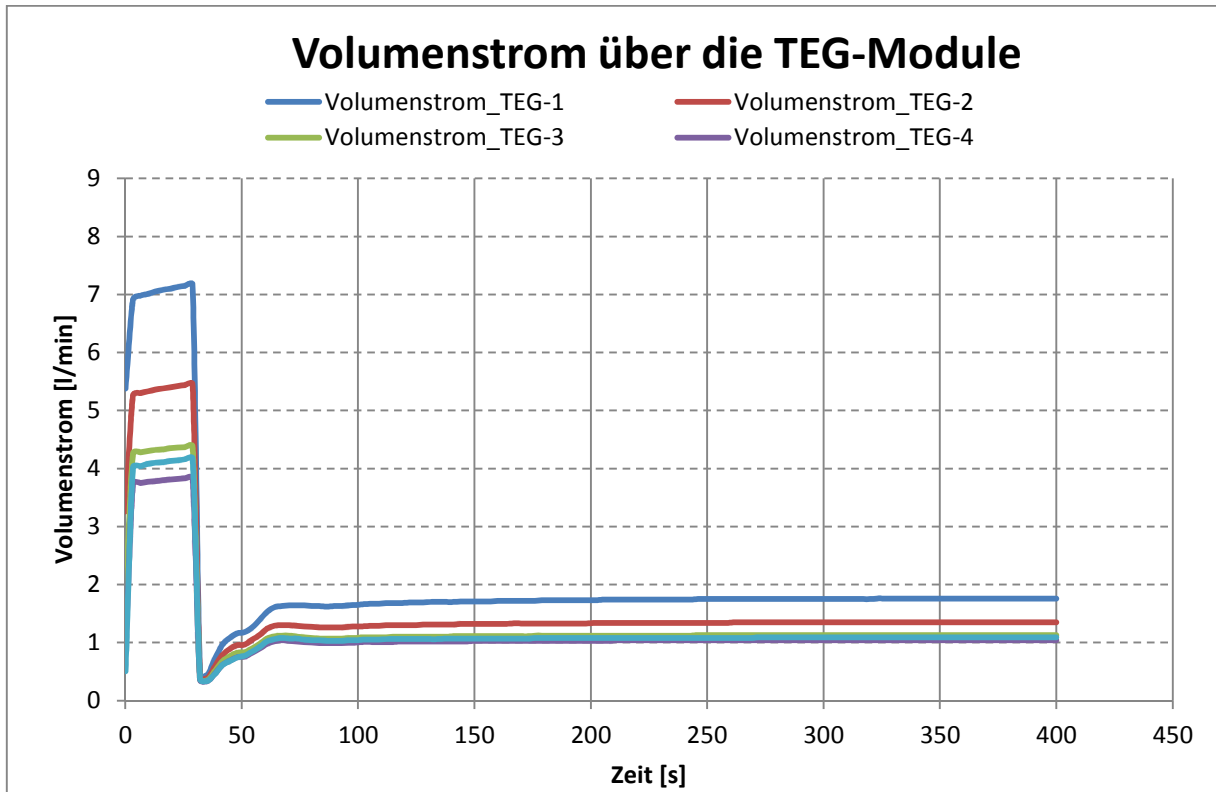


Abb.91: Volumenstrom über die TEG-Module 1 bis 5 bei 120km/h, Motordrehzahl 3000 1/min

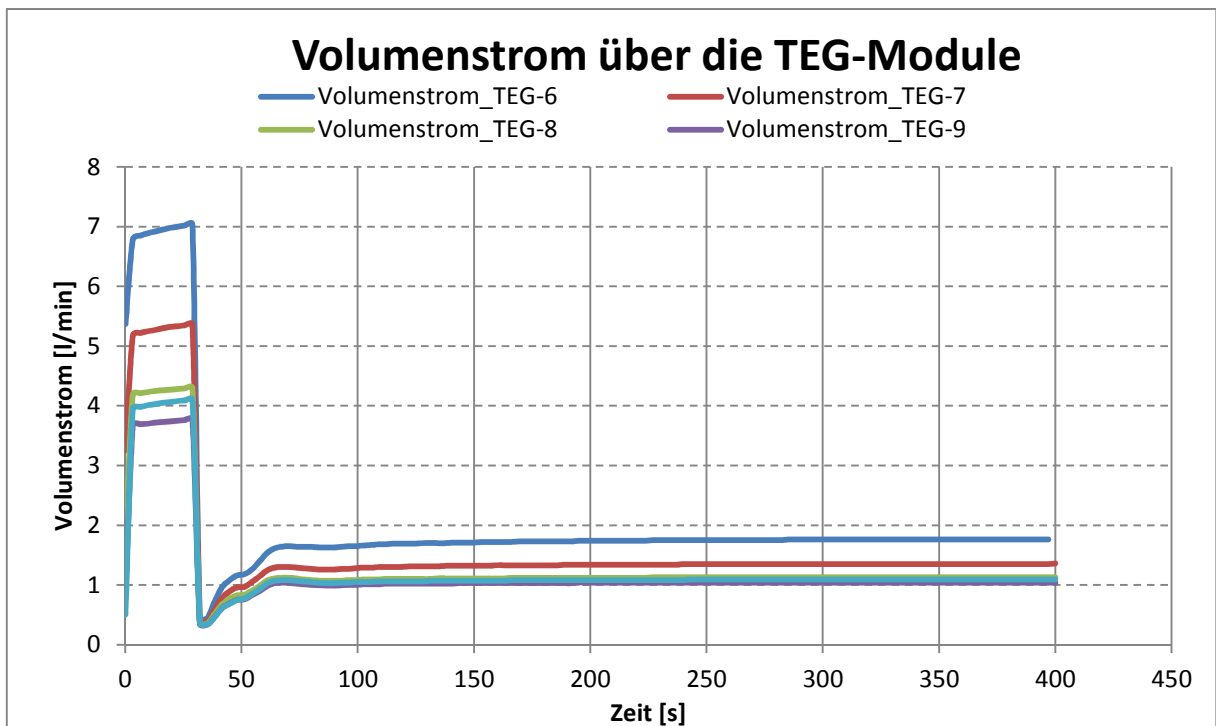


Abb.92: Volumenstrom über die TEG-Module 6 bis 10 bei 120km/h, Motordrehzahl 3000 1/min

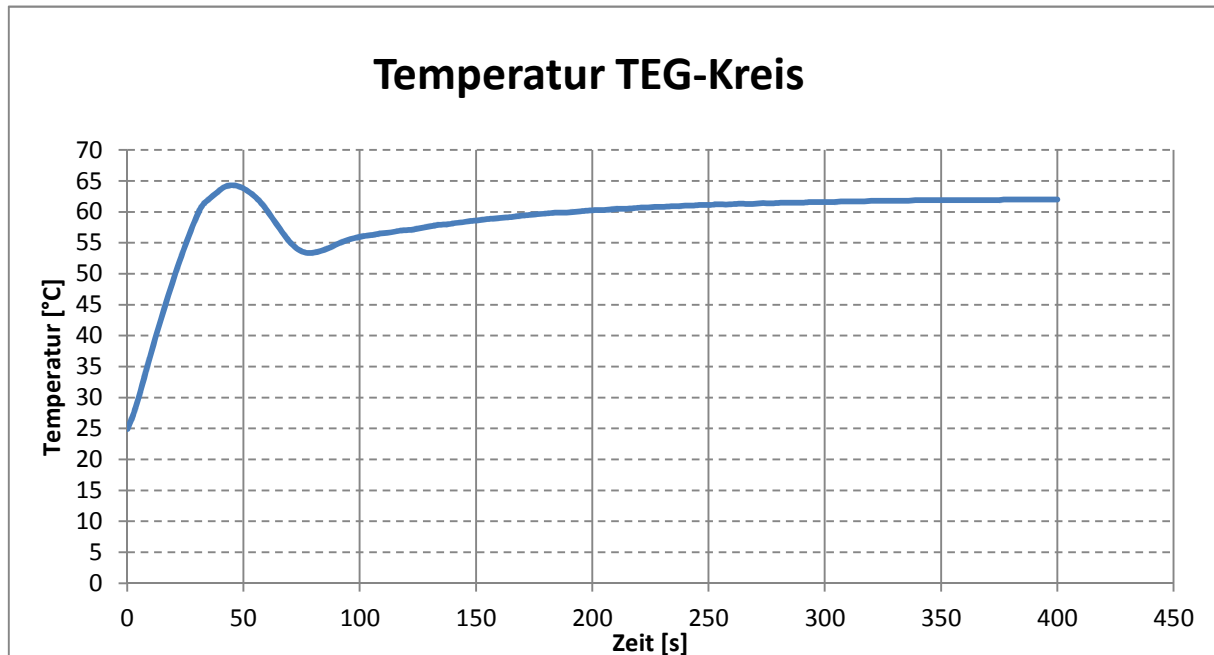


Abb.93: Temperatur TEG-Rücklauf bei 120 km/h, Motordrehzahl 3000 1/min

Die angenommene Verschaltung des TEG-Kreislaufs mit dem Kühlkreislauf des Motors sorgt für eine schnellere Erwärmung des Gesamtkreislaufs. Die Wärme wird durch den TEG aus dem Abgas abgeführt und über den Heizungsrücklauf in den Motor zurückgeführt. Dadurch sinken die Reibungsverluste im Motorblock und die ineffizienten kaltstartoptimierenden Maßnahmen können früher beendet werden. Zusätzlich wird durch die höhere Energie im Kühlkreislauf mehr Wärme für die Innenraumklimatisierung bereitgestellt. Auf der anderen Seite hat die Simulation gezeigt, dass ein Verzicht auf die TEG-Pumpe bei jedem Kaltstart bis zu einer Wassertemperatur von 60 °C möglich ist, weil der durch die Hauptwasserpumpe des Motors für die Kühlung des TEG zur Verfügung gestellte Volumenstrom ausreichend ist. Das erarbeitete Konzept konnte im Fahrzeug nicht überprüft und validiert werden. Der TEG wurde im Fahrzeug mit einem autarken Niedertemperatur-Kühlkreislauf betrieben.

1.7 AP 80 000 TEG-Demonstrator

1.7.1 AP 81 000 Auswahl und Auslegung

In AP 60 000 und 70 000 wurden bereits die Randbedingungen und Auslegungsmerkmale für den Demonstrator vorgestellt. Der Demonstrator sollte derart an das Versuchsfahrzeug angepasst werden, dass geometrisch und leistungsbezogen das Optimum dargestellt wird. Zudem wurde großes Augenmerk auf die Skalierbarkeit und die Verwendung in unterschiedlichen Zielsystemen gelegt. Neben dem Einsatz der aus dem Projekt entwickelten stoffschlüssigen TE-Module sollte der Demonstrator auch weitere (kommerzielle) TE-Module aufnehmen können.

Der finale Demonstrator ist ein einflutiges, rechteckiges System mit innen liegendem Bypasskanal. Der Grundkörper ist das tragende Hauptbauteil, das den innen liegenden Bypass mittig hat und die Möglichkeit bietet, bis zu zehn TE-Module aufzunehmen. Es sind jeweils zwei TE-Module gegenüberliegend in insgesamt fünf Reihen hintereinander verbaut. Die Verschraubung von zwei Modulen erfolgt immer paarweise. Abgedichtet werden die TE-Module auf dem Grundkörper über eine Glimmerdichtung, die die parasitäre Wärme möglichst gering halten soll.

In Abbildung 94 ist eine schematische Zeichnung des TEG-Systems dargestellt.

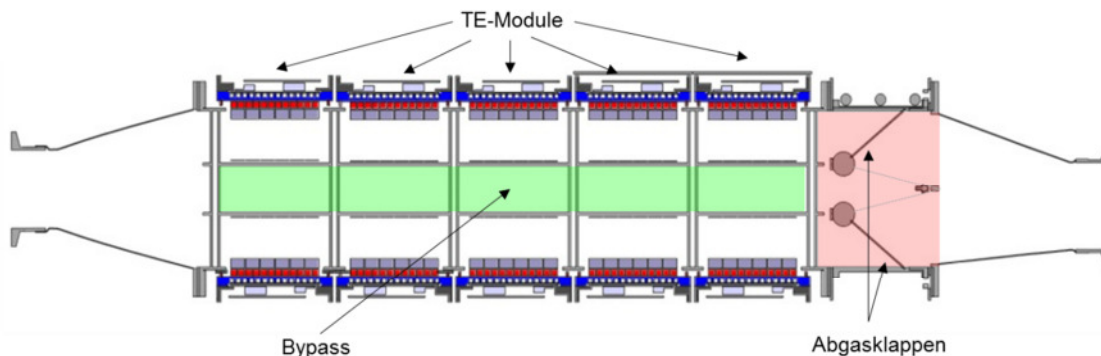


Abbildung 94: Schematisches TEG-System

An den Grundkörper sind sowohl die Anschlüsse für die Abgasführung als auch die Abgasklappe verschraubt. Die Abgasklappe besteht aus zwei rechteckigen Klappen, die separat angesteuert und geregelt werden können. Der Abgas- und Kühlwasserstrom fließen im Kreuz- / Gegenstromverfahren.

Ein TE-Modul besteht jeweils aus einem heiss- und kaltseiten Wärmeübertrager, dem TE-Material, Wasserflanschen und einem Deckel für die Aufnahme eines DC/DC-Wandlers. Der Verbau des DC/DC-Wandler ist je nach Anwendung optional.

1.7.2 AP 82 000 Bau

Aufbau TEG-Systeme

Es wurden mehrere TEG-Systeme ausgelegt, aufgebaut und sowohl an den Prüfständen als auch im Fahrzeug getestet. Jedes dieser Systeme hatte das Ziel einer bedarfsgerechten Erprobung der einzelnen Komponenten unter realistischen Bedingungen. Dadurch konnte eine schnelle und optimale Versuchsdurchführung gewährleistet werden.

Zum einen wurde ein 2-Modul-System entwickelt, in dem jeweils ein TE-Modul pro Modulplatz eingelassen werden kann (Abbildung 95). Beide Module werden über vier Federn gegeneinander verspannt. Dieser vereinfachte Aufbau hat den Vorteil, dass konkrete Untersuchungen von einzelnen Komponenten (Wärmetauscher, Wärmeleit- /Isolierfolien, TE-Material, ...) aufschlussreicher sind, als wenn der komplette 10-Modul-TEG zum Einsatz kommt.

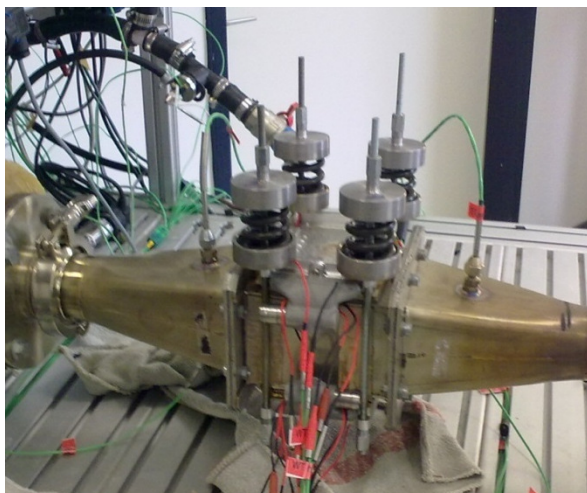
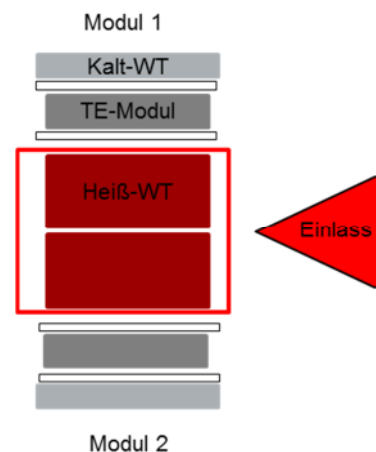


Abbildung 95: Systemaufbau des 2-Modul-Systems



Zum anderen wurde ein 10-Modul-TEG aufgebaut, das von der eigentlichen Anordnung und der Verspannung dem 2-Modul-TEG entspricht. Mit diesem Aufbau konnten Auswirkungen wie z.B. das Schalten der Abgasklappen, oder die Reihenschaltung verschiedener Wärmetauscher unter realistischen Bedingungen sehr gut getestet werden.

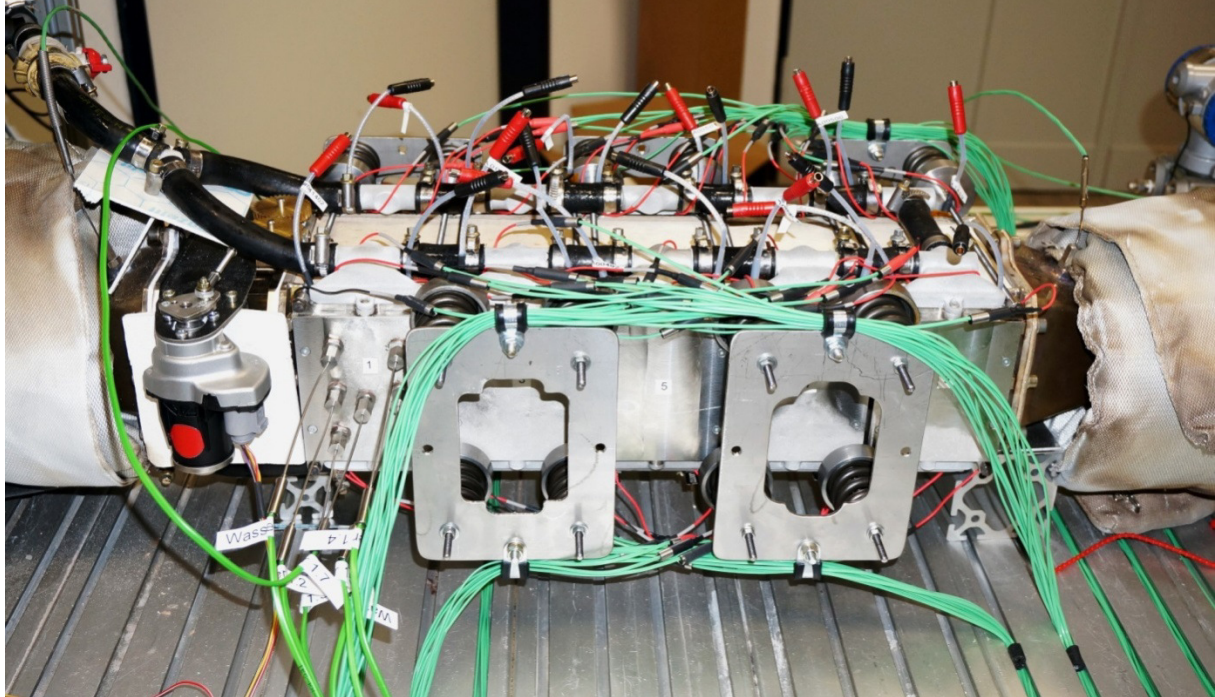


Abbildung 96: einflutiges TEG-System mit Messtechnik am Heißluftprüfstand

Umbau Demonstrator-Fahrzeug

Grundsätzlich stand mit dem Projektfahrzeug bereits ein teilweise ausgestattetes Messfahrzeug zur Verfügung. An den relevanten Stellen in der Abgasanlage, dem Kühlsystem und den motornahen Komponenten waren Druck-, Volumenstrom- und Temperturaufnehmer verbaut. In Abbildung 97 ist die Abgasanlage mit der verbauten Messtechnik dargestellt.

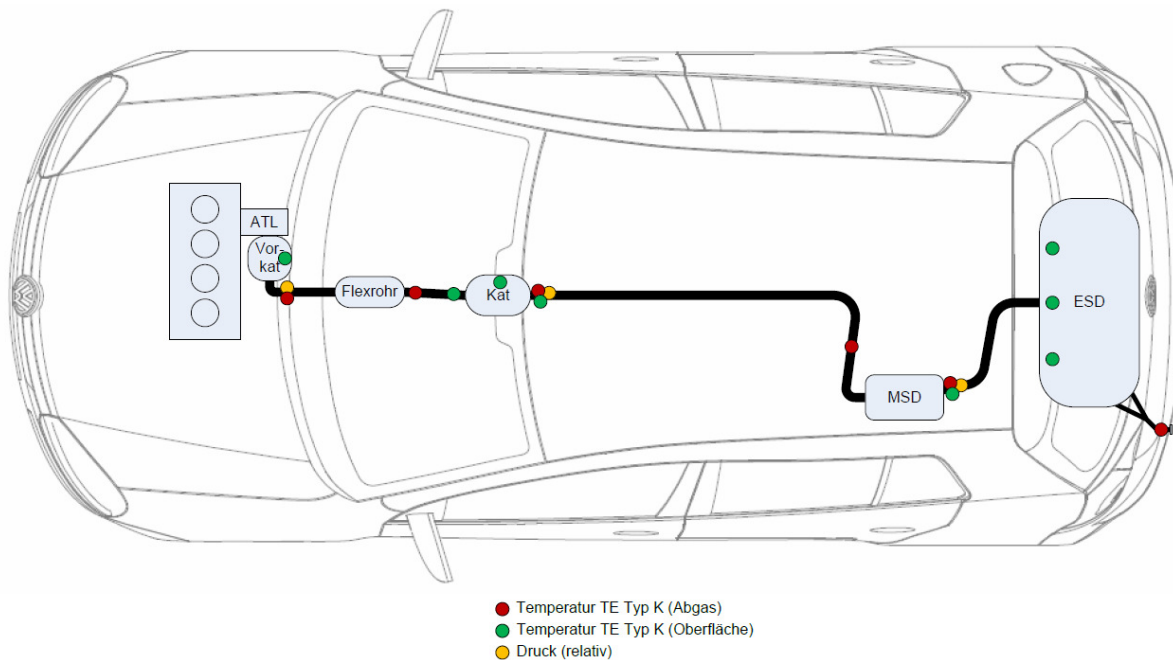


Abbildung 97: Abgasanlage mit verbauten Sensoren

Um das entwickelte TEG-System in das Projektfahrzeug einbauen zu können, mussten zudem weitere Umbau- und Anpassarbeiten vorgenommen werden.

Zum einen wurde die Hardware zur Messwertaufnahme und -verarbeitung angepasst. Hier wurde ein zusätzlicher Rechner im Kofferraum des Fahrzeugs verbaut. Die softwareseitige Anpassung dazu ist in AP 73 000 beschrieben.

Das separate Kühlsystem für das TEG-System wurde ertüchtigt und mit einem Volumenstrommesser ausgestattet.

Für die Integration des TEG-System wurde die Abgasanlage so modifiziert, dass das TEG-System hinter dem Hauptkatalysator eingebaut werden konnte. Um dies möglichst einfach und flexibel zu halten, wurden das TEG-System und die Abgasanlage mit standartmäßigen Schnellverschlüssen ausgestattet. Somit bleibt die Möglichkeit eines schnellen Umbaus auf andere TEG-Systeme gewährleistet. Unter Berücksichtigung des zusätzlichen Gewichts des TEG-Systems wurden die Halter für die Aufhängung konstruktiv modifiziert, gefertigt und eingebaut. (Abbildung 98 &Abbildung 99)

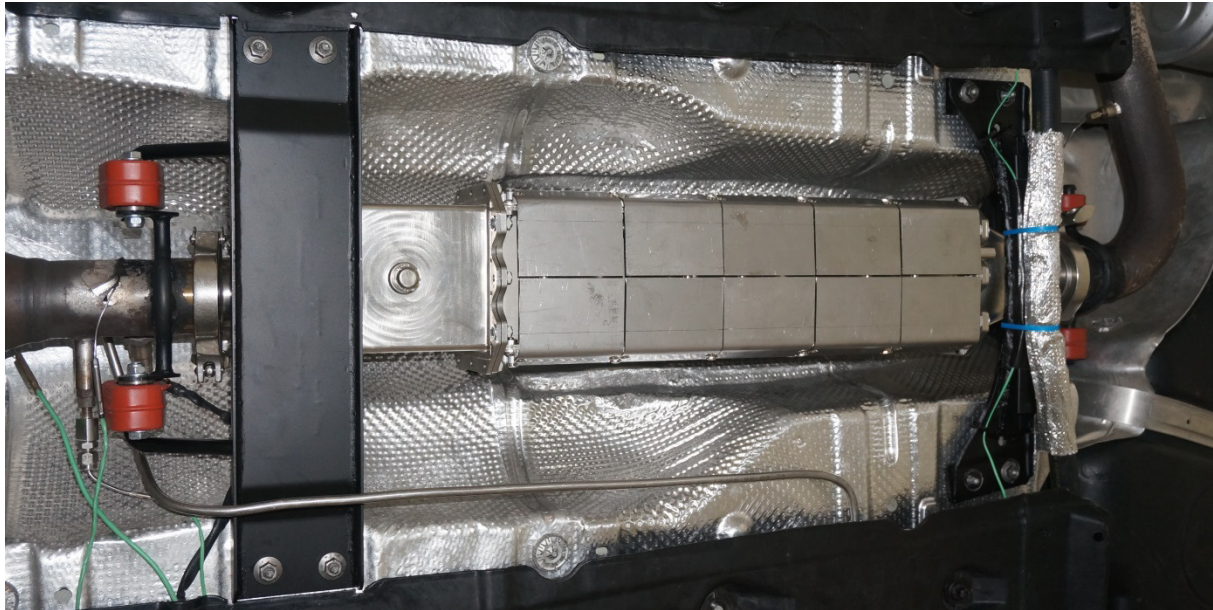


Abbildung 98: Eingebautes TEG-System Baustand P1 in der Abgasanlage vom Projektfahrzeug VW Golf



Abbildung 99: Umgebaute Abgasanlage ohne TEG-System

Für die Ansteuerung und Kommunikation des TEG-Systems mussten mehrere Kabel neu verlegt werden und in die Bordnetzinfrastruktur eingebunden werden.

1.7.3 AP 83 000 Test

In diesem Arbeitspaket wurden die einzelnen TEG-Komponenten sowie das komplette System unter idealen Bedingungen (stationär) und realen Abgas- und Motorkennfeldbedingungen (stationär/ transient) an Labor- und Motorprüfständen untersucht und getestet. Dazu wurden die Prüfstände konstruktiv, mechanisch, hydraulisch und elektrisch angepasst bzw. erweitert. Als Ergebnis aus den Labor- und Motorprüfstandsversuchen entstand ein auf den Auslegungspunkt hin optimiertes und validiertes einflutiges TEG-System.

Die neu entwickelten Systemkomponenten (TE-Module, Wärmeübertrager, etc.) wurden am TEG-Laborprüfstand charakterisiert, um grundsätzliche Aussagen über deren Eigenschaften, Funktionen und Belastungsgrenzen zu erlangen. Dadurch konnte die Umsetzbarkeit des entworfenen TEG-Systemkonzepts überprüft und Optimierungsmaßnahmen abgeleitet werden. Auch dienten diese Messungen der Überprüfung der Simulationen und zum Abgleich der Modelle.

Konkret wurden folgende Punkte untersucht:

- Leistungsfähigkeit von selbstentwickelten und kommerziell erhältlichen TE-Modulen
- Abgas- und Kühlmittelführung und deren Einfluss auf TEG-Systemleistung
- Abgas- und kühlmittelseitige Abdichtung der TE-Module
- Güte der Wärmetauscher bei verschiedenen Geometrien und Materialien
- Isolationsmaterial zur Wärmedämmung, um parasitäre Wärmeverluste zu minimieren
- Abgasklappenaktorik
- Verspannung/ Verschraubung der TE-Module
- Aussage über elektrische Verschaltung der TE-Module und Verhalten der DC/DC-Wandler am realen TEG-System

Als weiterer Schritt wurden die deutlich aufwendigeren Motorprüfstands- und Fahrzeugtests durchgeführt. Hier konnte das TEG-System unter realen Einsatzbedingungen charakterisiert und die Wechselwirkungen des TEG-Systems zum Verbrennungsmotor untersucht werden. Zudem konnten Aussagen über die Verschmutzung, Korrosion und Versottung der abgasführenden Bauteile gemacht werden. Auch wurde der Regelalgorithmus für die Abgasklappen für stationäres und transientes Verhalten verifiziert. Die Untersuchung zur Minderung des Kraftstoffverbrauchs und dessen Abhängigkeit vom gesteigerten Abgasgegendruck wurde durch den Projektpartner BTU Cottbus durchgeführt. Erläuterungen sind diesem Bericht zu entnehmen.

1.7.3.1 Laborprüfstandtests (IAV)

Es wurde drei Laborprüfständen teils neu aufgebaut bzw. umgebaut, um die jeweiligen Test durchführen zu können.

Heißluftprüfstand

Der Heißluftprüfstand war bereits vor dem Projekt vorhanden und wurde für die jeweilige Messaufgabe umgebaut. Er dient zur (quasi) realen Vermessung des kompletten bzw. teilaufgebauten TEG-Systems bis 600 °C Heißseitentemperatur. Die Kaltseite kann mittels einer Kompressorkühlung auf -20 °C abgekühlt werden. Hierbei könnten die Wechselwirkungen der Einzelkomponenten im Gesamtsystem untersucht werden. Da bei diesem Prüfstand die Variation der Energieströme nur sehr träge durchgeführt werden kann, sind nur stationäre Vermessungen möglich. Der grün „Würfel“ stellt den maximalen Bauraum für einen Probanden dar.

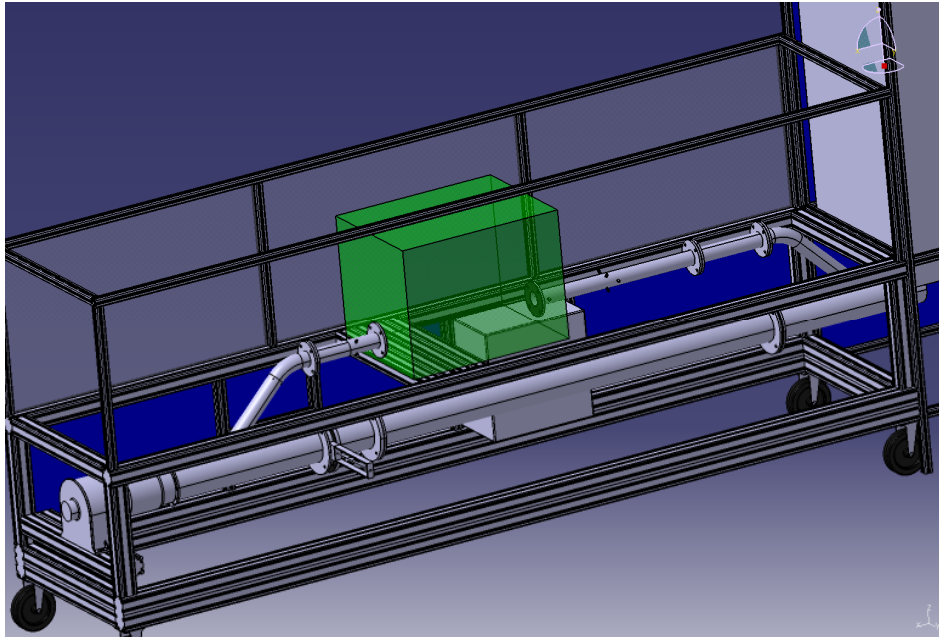


Abbildung 100: Heißluftprüfstand

Blockprüfstand

Der Blockprüfstand wurde neu aufgebaut und dient zur präzisen Vermessung von Einzelkomponenten. Hierzu gehören wasserseitige Wärmetauscher, TE-Module, Wärmeleitmittel, etc. Der Blockprüfstand besteht aus zwei massiven Kupfer die zur Wärmestrombestimmung mit einer großen Anzahl an Thermoelementen bestückt sind. Zwischen den Stahlblöcken befinden sich sechs Keramikheizer mit einer Gesamtleistung von max. 5400 W. Die Wärme wird durch die Keramikheizer zu beiden Seiten gleichmäßig eingebracht (Abbildung 101).

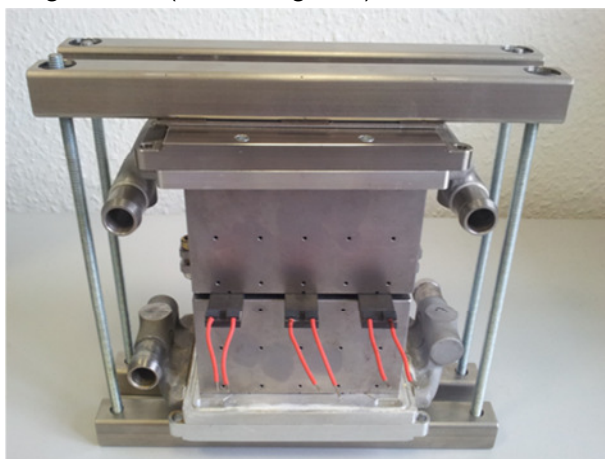


Abbildung 101: Aufbau Blockprüfstand

Vorteil dieses doppelten Aufbaus ist die redundante Vermessung von zwei Probanden. Messabweichungen können unmittelbar festgestellt und analysiert werden. Auch eine einfache Vermessung ist möglich, wenn keine zwei gleichen Bauteile zur Verfügung stehen. Für die Energiebilanz können sowohl eingebrachte als auch abgenommene Energie gemessen werden.

Wärmetauscherprüfstand (gasseitig)

Zur Charakterisierung diverser Heißeiten-Wärmeübertrager (verschiedene Materialien, Rippendichten, Herstellungsvarianten) wurde ein weiterer Prüfstand konzipiert und gefertigt. Er stellt eine Erweiterung des Heißluftprüfstandes dar, da hier auf viele Komponenten zurückgegriffen wird. Ziel war es, ein thermisch geschlossenes System zu erhalten, bei dem die Wärmeströme durch die Wärmeübertrager gemessen werden konnten. Dabei sollten die Verluste, also Wärmeströme in die Umgebung, auf ein absolutes Minimum begrenzt werden. Der Prüfstand beinhaltet lange An- und Abströmtrichter zur Beruhigung der Luftströme, um Verwirbelungen zu vermeiden und die Wärmeübertrager gleichmäßig und reproduzierbar anzuströmen. Zwischen den Trichtern befindet sich die Kammer zur Aufnahme der Wärmeübertrager (s. Abbildung 102).

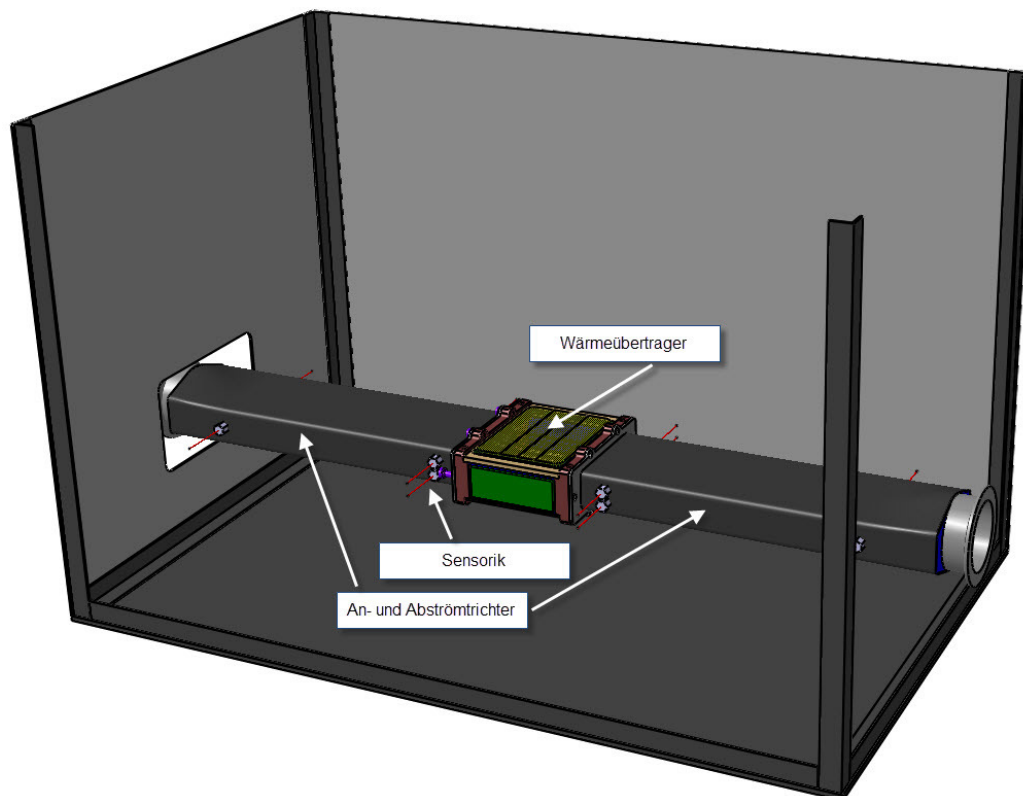


Abbildung 102: An- und Abströmtrichter mit Wärmeübertrager-Kammer-Platz

Diese werden durch Metallblöcke mit dazwischen eingebauten Keramikheizern beheizt. Das gesamte System ist rundum thermisch isoliert, so dass auf der Oberfläche des Gehäuses Umgebungstemperatur herrscht (s. Abbildung 103).

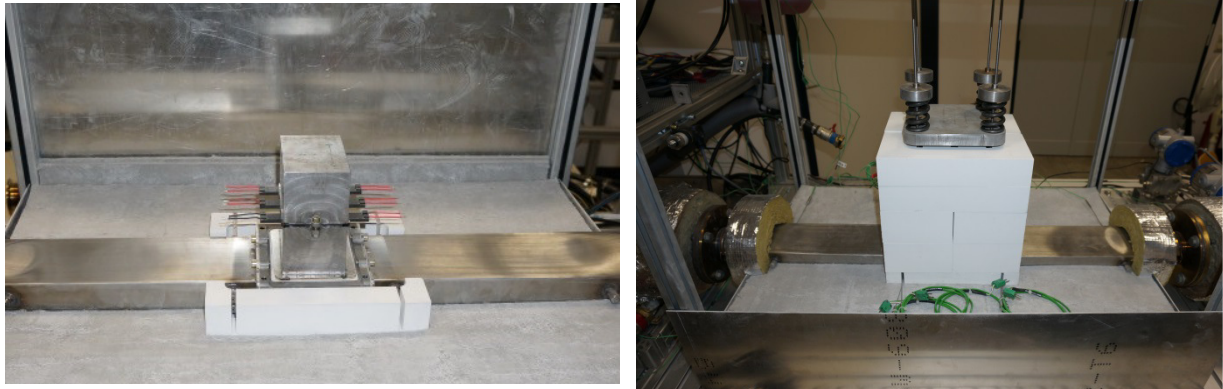


Abbildung 103: Stahlblöcke mit Keramikheizer und Isolierung mit Keramikblöcken

Die Wärmequelle sind die beheizten Stahlblöcke. Die Wärmesenke ist der Heißluftprüfstand. Der Wärmeübertrager wird mit temperierter (kalter) Luft durchströmt und kann somit seine Wärme abgeben. Bei den Versuchen wird u. a. der Wärmestrom in Abhängigkeit der Temperatur gemessen. Diese Größe liefert dann Aussagen über die Leistungsfähigkeit der eingesetzten Wärmeübertrager. Da der Wärmestrom richtungsunabhängig ist, können diese Ergebnisse auch auf das TEG-System angewendet werden, obwohl hier der Wärmestrom in umgekehrter Richtung stattfindet.

Für den modifizierten Block-Prüfstand wurde die bestehende Prüfstandsteuerung an die erhöhte elektrische Leistung der Heizer angepasst.

1.7.3.2 Charakterisierung von Wärmeübertragern

Um weitere konstruktive und simulative Konzepte besser charakterisieren und bewerten zu können, hat IAV im Rahmen von einfachen Aufbauten verschiedene geometrische Variationen und Materialien der heißen und kalten Wärmeübertrager getestet. Dabei werden folgende Ziele verfolgt:

- Charakterisierung der heißen und kalten Seite
- Rechnungs-/Messvergleich
- Auswirkungen von thermischen Brücken
- Auswirkungen von verschiedenen Folien auf den Wärmestrom
- Aussagen über tatsächlich entstehenden Druckverlust auf heißer und kalter Seite
- Identifikation von Hot Spots auf kalter Seite

Heißseiten-Wärmeübertragern

Durch das verbesserte Verständnis der Arbeitsweise und Arbeitsbedingungen der Wärmeübertrager konnte das TEG-System besser ausgelegt und für den jeweiligen Einsatzfall optimal angepasst werden. Zudem wurden durch die Variation der Geometrien und Materialien die Abhängigkeiten besser ausgearbeitet und eine Beurteilung der Effizienzspannung der Wärmetauscher wurde möglich. In Tabelle 4 ist die Variation der Wärmetauscher dargestellt:

Größe	Werte
Material	Kupfer, Stahl
Rippendichte (Kupfer)	Massiv - WT 0%, 20%, 25%, 33%, 50%

	Blech - WT	unbestimmt
	Wings	unbestimmt
Rippendichte (Stahl)	Massiv - WT	50%
	Blech - WT	unbestimmt
	Wings	-

Tabelle 4: Gemessene Variation der Wärmeübertrager

Gemessen wurden alle Wärme- bzw. Leistungsströme, sowie die elektrischen Leistungsströme der Keramikheizer. Um die jeweilige Leistungsfähigkeit eines Wärmeübertragers zu ermitteln, wurden Kennfelder aufgenommen, die den Wärmestrom als Funktion der Temperaturvariation der heißen Seite und der Massenstromvariation der kalten Seite darstellt. In Abbildung 104 ist ein Teil der vermessenen Wärmeübertrager dargestellt.

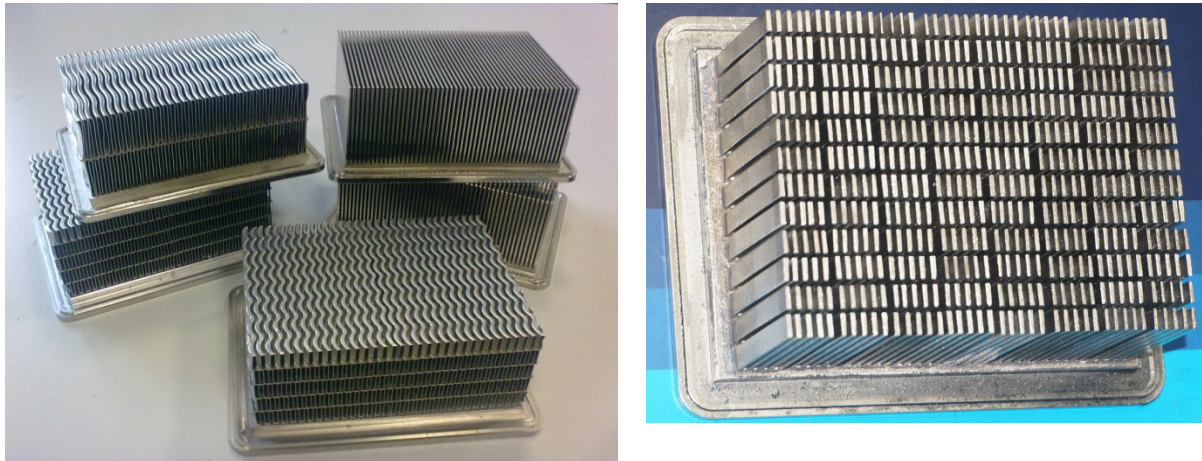


Abbildung 104: Übersicht der verschiedenen Wärmeübertrager

In Abbildung 105 ist für das Material Kupfer die Abhängigkeit der Geometrie (20% bis 50% Rippendichte) auf den Wärmestrom dargestellt. Man erkennt wie mit zunehmender Rippendichte der übertragbare Wärmestrom bei gleichbleibender Temperaturdifferenz steigt. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die Temperaturdifferenz gesenkt werden kann, um einen gleichen Wärmestrom zu übertragen. Dies ist von Bedeutung für TEG-Anwendungen mit geringem Temperaturgradienten.

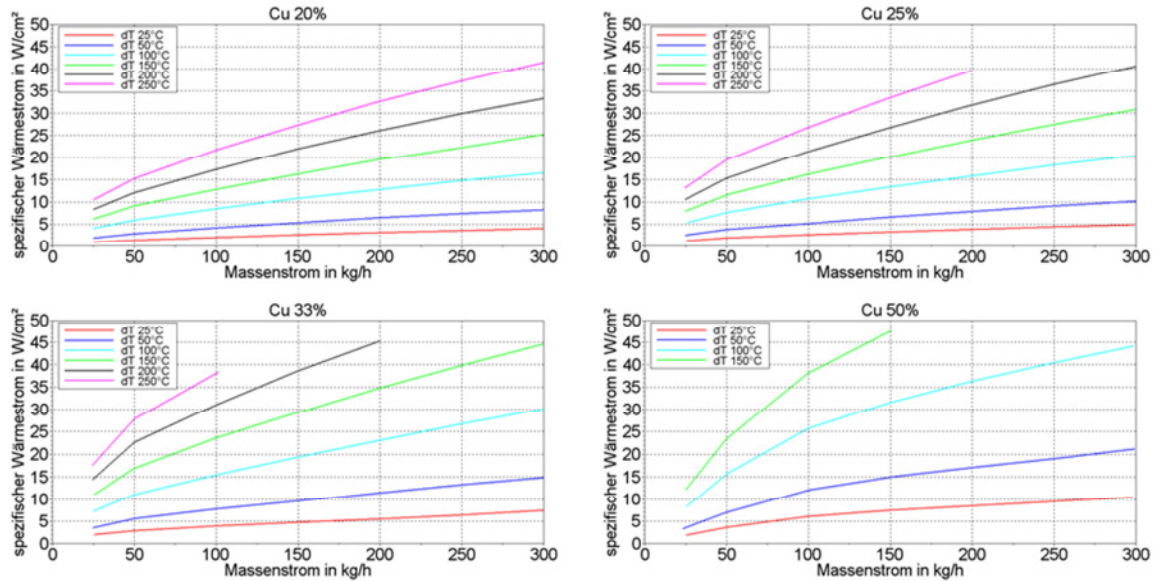


Abbildung 105: Vergleich des spezifischen Wärmestroms zwischen geometrisch unterschiedlichen Kupfer Wärmeübertragern

In Abbildung 106 ist ebenfalls der Wärmestrom dargestellt. Hier allerdings wird der Einfluss des Materials (Kupfer, Stahl) bei gleicher Geometrie untersucht. Die oberen beiden Abbildungen zeigen die massiven 50%-Wärmeübertrager. Die unteren beiden die Blech-Wärmeübertrager. Man erkennt deutlichen den Unterschied im übertragbaren Wärmestrom. Der 50%-Cu-Wärmeübertrager ist teilweise um mehr als das 4-fach besser als der aus Stahl. Der Unterschied bei dem Blech-Wärmeübertrager fällt mit dem Faktor 6 an übertragbarem Wärmestrom sogar noch größer aus. Bei diesem Vergleich sieht man den großen Einfluss der Materialeigenschaften.

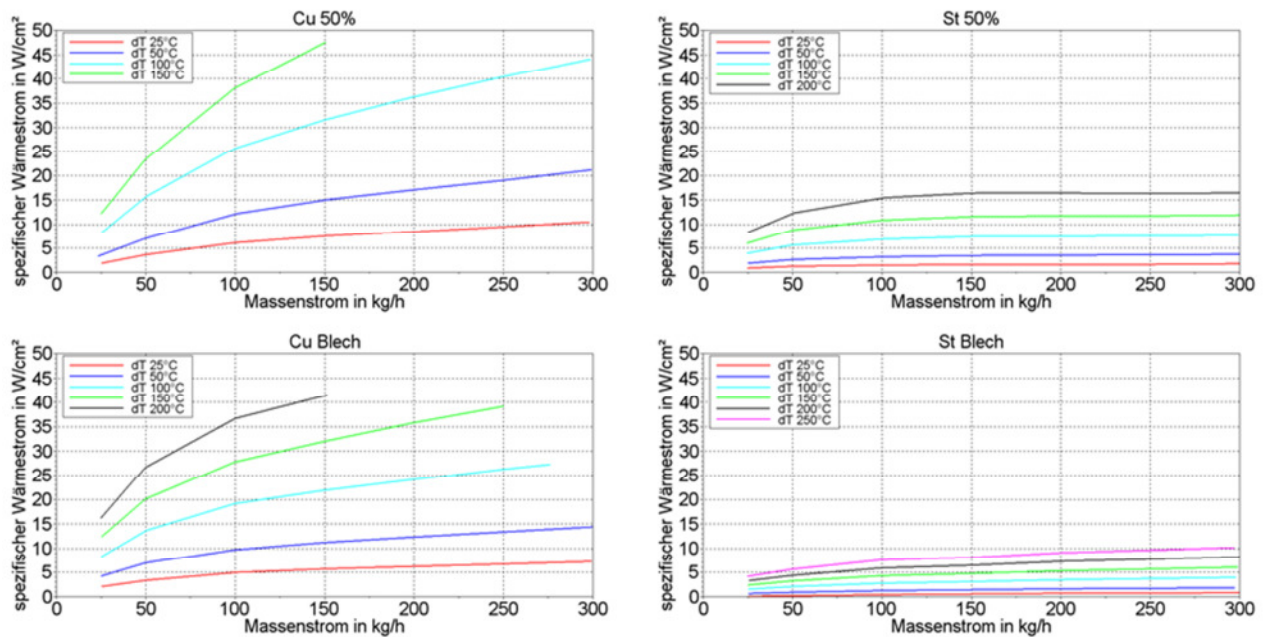


Abbildung 106: Vergleich des spezifischen Wärmestroms zwischen Kupfer und Stahl-Wärmeübertragern

In Abbildung 107 ist der Wärmestrom in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen der Oberflächentemperatur (Heißseite) und der Kühlluft (Eingang) dargestellt. Für die einzelnen Temperaturdifferenzen kann man den Einfluss der Geometrie und des Materials erkennen.

Die Ergebnisse zeigen, dass speziell bei niedrigen Temperaturdifferenzen der Blech-St-Wärmeübertrager sehr schlechte Ergebnisse bringt und sogar auf dem Niveau der Cu-Bodenplatte ohne Rippen liegt. Erst bei höheren Temperaturen relativiert sich das Ergebnis. Es ist deutlich zu sehen, dass der Blech-Cu-Wärmeübertrager annähernd auf dem Niveau der 33%-Cu-Wärmeübertrager liegt. Da der Blech-Wärmeübertrager ca. 25 % weniger wiegt im Vergleich, wäre dieser für einen möglichen Fahrzeugeinsatz vorzuziehen.

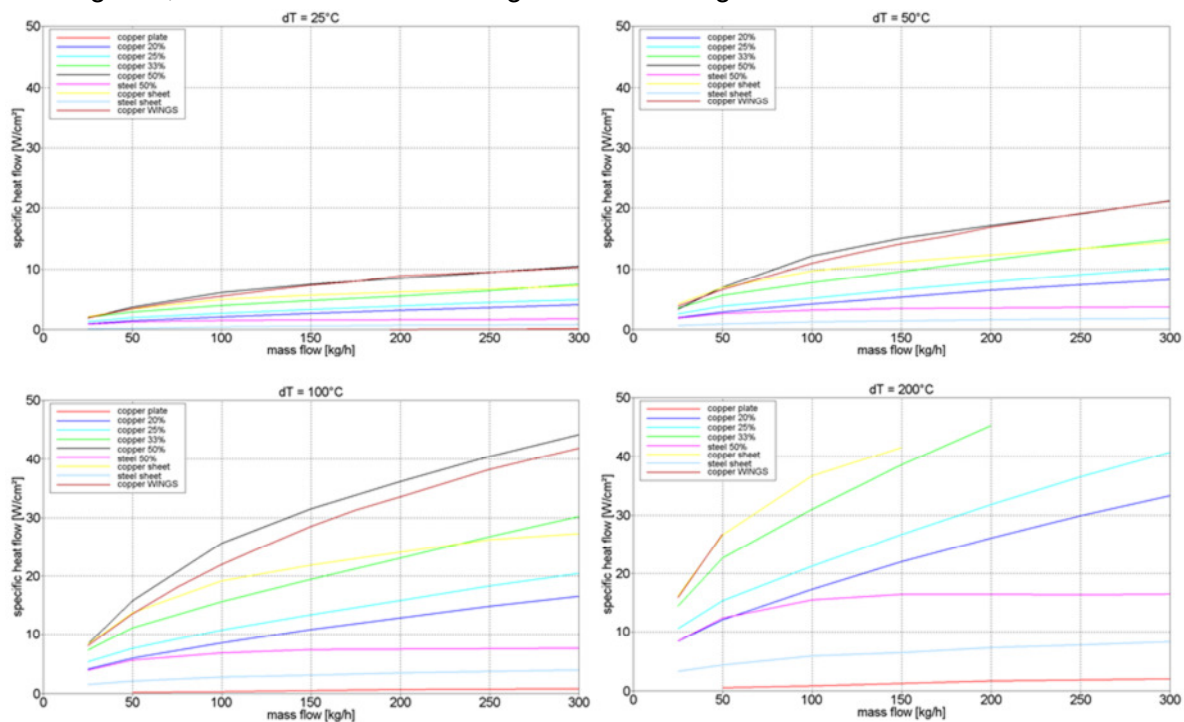


Abbildung 107: Vergleich der Wärmeübertrager in Abhängigkeit der Temperaturdifferenzen

Kaltseiten-Wärmeübertrager

Wie bereits bei den Heissseiten-Wärmeübertragern wurde auch bei der kalten Seite verstärkt Wert auf die Variation der Geometrie und des Materials gelegt. Dazu wurden verschiedene Konzepte erarbeitet und auf ihre Umsetzbarkeit überprüft.

Anfängliche Probleme mit der Dichtigkeit der Wärmeübertrager konnte mit verschiedenen Optimierungsstufen behoben werden.

Der letzte Stand der im Projekt erarbeiteten Wärmeübertrager wurde in einem Benchmarkvergleich mit einem kommerziell erhältlichen Wärmeübertrager, der nach der Swirl-Technik arbeitet, verglichen. Ziel war es Größen wie Druckverlust und Wärmeströme in Abhängigkeit von verschiedenen Randbedingungen zu bestimmen (siehe Tabelle 5).

Größe	Einheit	Werte
Temperatur WT Oberfläche	°C	40, 60, 80, 120
Volumenstrom Kühlwasser	l/min	2, 4, 6, 8
Temperatur Kühlwasser Eingang	°C	30
Wärmetauscher-Material		Kupfer (vernickelt), Stahl (vernickelt), Aluminium
Aufbautechnik		Swirl-Technik, gefräste Rippe

Tabelle 5: Randbedingungen für die Charakterisierung der Kaltseiten-Wärmeübertrager

In Abbildung 108 ist der TEG2020-Wärmeübertrager abgebildet. Man erkennt auf der linken Seite die versetzte Rippenstruktur, die vom Kühlwasser umspült wird. Das rechte Bild zeigt die Unterseite mit den Schlitzen für bis zu vier Thermoelemente und die seitlich aufgesteckten Flansche. Dieser Wärmeübertrager wurde bei gleicher Geometrie in dem Materialen Kupfer, Aluminium und Stahl gefertigt.

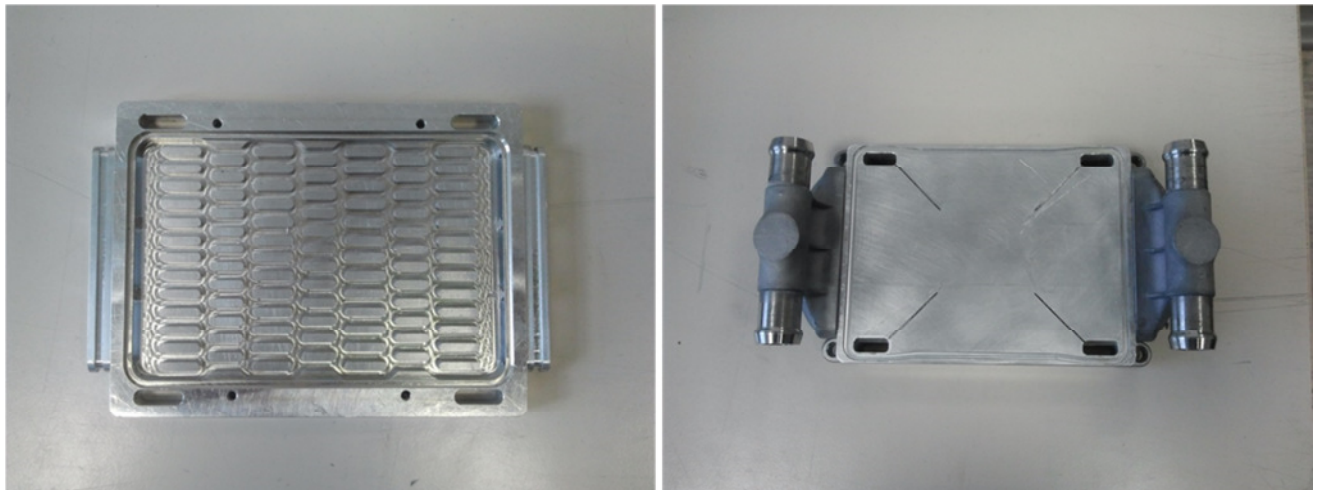


Abbildung 108 Rippenstruktur und untere Ansicht der TEG2020-Wärmeübertragers

In Abbildung 109 ist der Swirl-Wärmeübertrager dargestellt. Eine Ansicht der Rippenstruktur ist leider nicht veröffentlicht. Da die Ein- und Austrittsseite unterschieden wird, wird von einem unsymmetrischen Aufbau ausgegangen. Laut Aussage des Herstellers ist der Wärmeübertrager aus Kupfer gefertigt und hat eine Nickelbeschichtung.

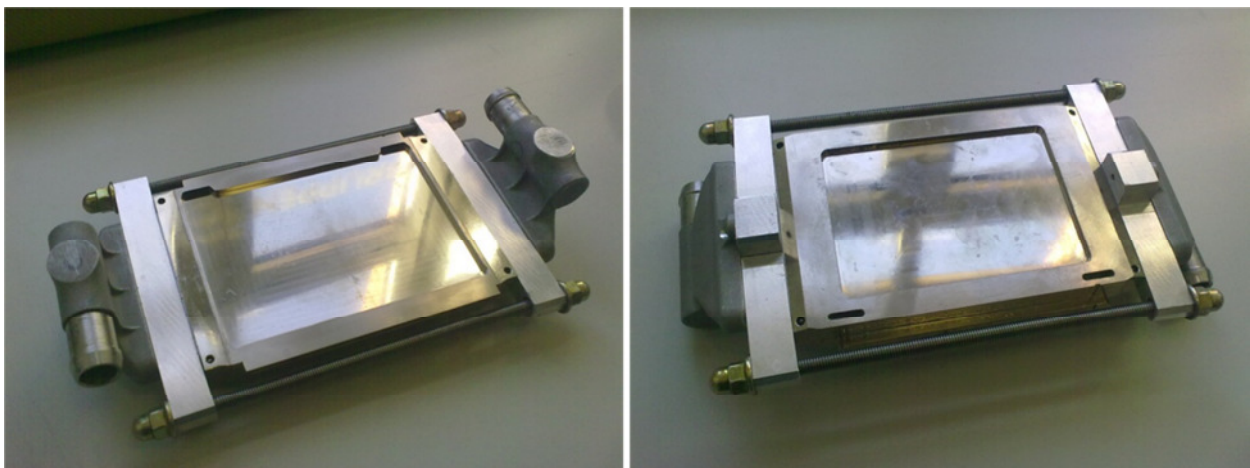
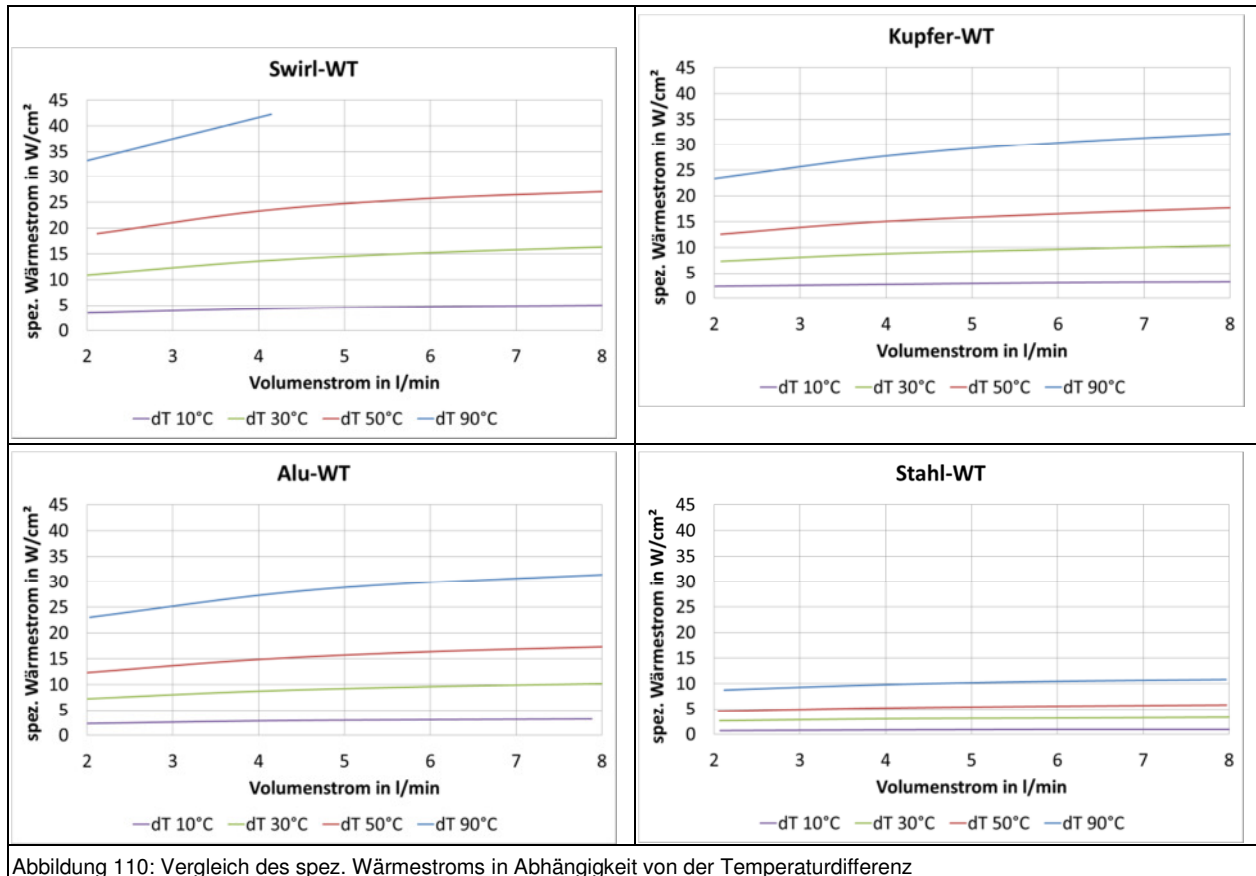


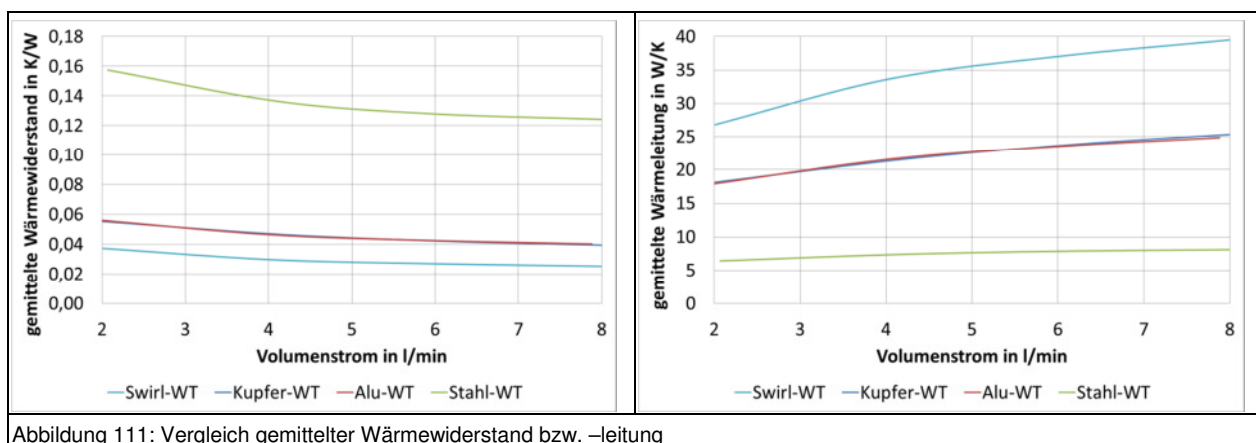
Abbildung 109: Obere und untere Ansicht des Swirl-Wärmeübertragers

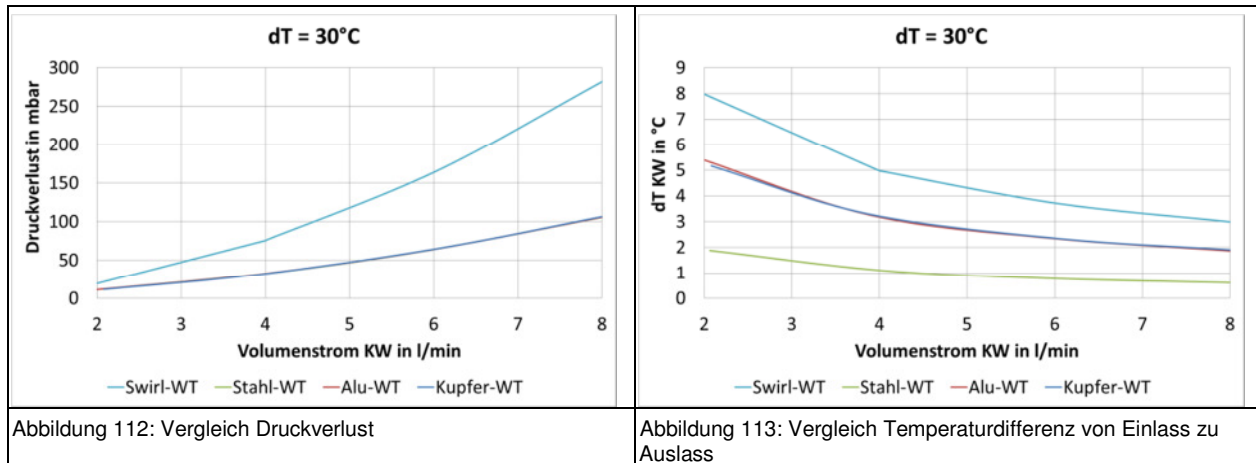
Die Vermessung der Wärmetauscher erfolgte stets nach gleichem Schema mit gleichem Aufbau. Als Regelgröße für die Versuche wurde die Temperaturdifferenz von Oberfläche Wärmeübertrager zu Kühlmittel herangezogen, wobei die Heisseite variiert wurde.

In Abbildung 110 ist der flächenbezogene Wärmestrom für alle Wärmeübertrager dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass mit größerer Temperaturdifferenz der übertragbare Wärmestrom ansteigt. Bei der Gegenüberstellung der gefrästen Wärmeübertrager ist die Abhängigkeit vom Material deutlich zu erkennen. Und bei dem Vergleich des Swirl-WT mit den gefrästen wird der Einfluss der Ausbautechnik deutlich, da hier das Material gleich ist.



Bei dem Vergleich des gemittelten Wärmewiderstand bzw. der –leitung erkennt man deutlich, wie sehr der Swirl-WT gegenüber den gefrästen Wärmeübertragern heraussticht. Auch wird deutlich, dass der Materialeinfluss von Kupfer zu Aluminium sehr klein ist.





1.7.3.3 Versuche am Heißluftprüfstand

An dem Heißluftprüfstand wurden sowohl die Funktionen der einzelnen Komponenten, als auch verschiedene TE-Module getestet.

Die Versuche am Heißluftprüfstand gliedern sich in

- A) Temperaturverläufe an den Schnittstellen im System
 - Macor-Keramik
 - HZ-20 Module (nicht funktionsfähig)
- B) Einzel-Module
 - HZ-20 Module
 - HZ-560 Module
 - Oxid-Module 0x-7 TES
 - Stoffschlüssige TE-Module vom Projektpartner IPM
- C) Gesamtsysteme
 - TEG 2020 System
 - TEG-System der Fa. Duropan
- D) Sonstige Komponenten
 - Abgasklappen
 - Wärmetauscher

A) Temperaturverläufe an den Schnittstellen im System

Macor-Keramik hat einen ähnlichen Wärmedurchgangskoeffizienten wie das TE-Modul und ist zugleich hochtemperaturbeständig bis zu 1.000 °C (Abbildung 114). Das Ziel der Versuchsreihe war, die Macor-Keramik als Dummy-Modul zu nutzen, um annähernd gleiche thermische Verhältnisse wie im „echten“ TEG-System darstellen zu können. Der Versuch ist grundsätzlich gelungen. Für eine kraftschlüssige Verbindung ist die Macor-Keramik jedoch nur bedingt geeignet. Durch die hohe Festigkeit ist das Material sehr spröde und neigt bei kleinen Unebenheiten zu Brüchen.

Ein weiterer Systemaufbau wurde mit nicht funktionsfähigen HZ-20 Modulen durchgeführt, die das thermische Verhalten im TEG-System ebenfalls realitätsnah abbilden. Das Ziel dieses Versuchs war, die Temperaturverteilung an der Oberfläche der Module zu untersuchen (Abbildung 115).



Abbildung 114: Macor mit Thermoelementen

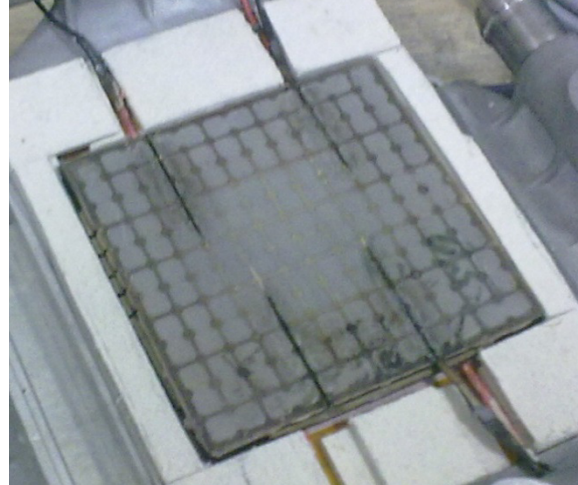


Abbildung 115: HZ-20 mit Thermoelementen

Mit den HZ-20 Modulen wurden Messungen mit variabler Wärmequelle und –senke, sowie mit variablem Anpressdruck durchgeführt. Um Aussagen über den Temperaturverlauf entlang des Wärmestrompfades treffen zu können, wurden an verschiedenen Positionen in allen Schnittstellenebenen Temperaturen aufgenommen.

Folgende Schnittstellenebenen wurden untersucht:

- 1 Gas zu Heissseitenwärmeübertrager
- 2 Heissseitenwärmeübertrager zu heiße Seite HZ-20 Modul
- 3 Heiße Seite zu kalte Seite HZ-20 Modul
- 4 Kalte Seite HZ-20 Modul zu Kaltseitenwärmeübertrager
- 5 Kaltseitenwärmeübertrager zu Kühlwasser

In Abbildung 116 ist zu erkennen, dass der Temperatursprung vom Wärmetauscher zur Oberfläche des HZ-20 Moduls bei zu geringer Anpressung deutlicher ausfällt. Dies ist prinzipbedingt, verdeutlicht allerdings, dass Konzepte mit den HZ 20-Modulen durch die Kraftschlüssigkeit einen sehr stabilen Aufbau benötigen.

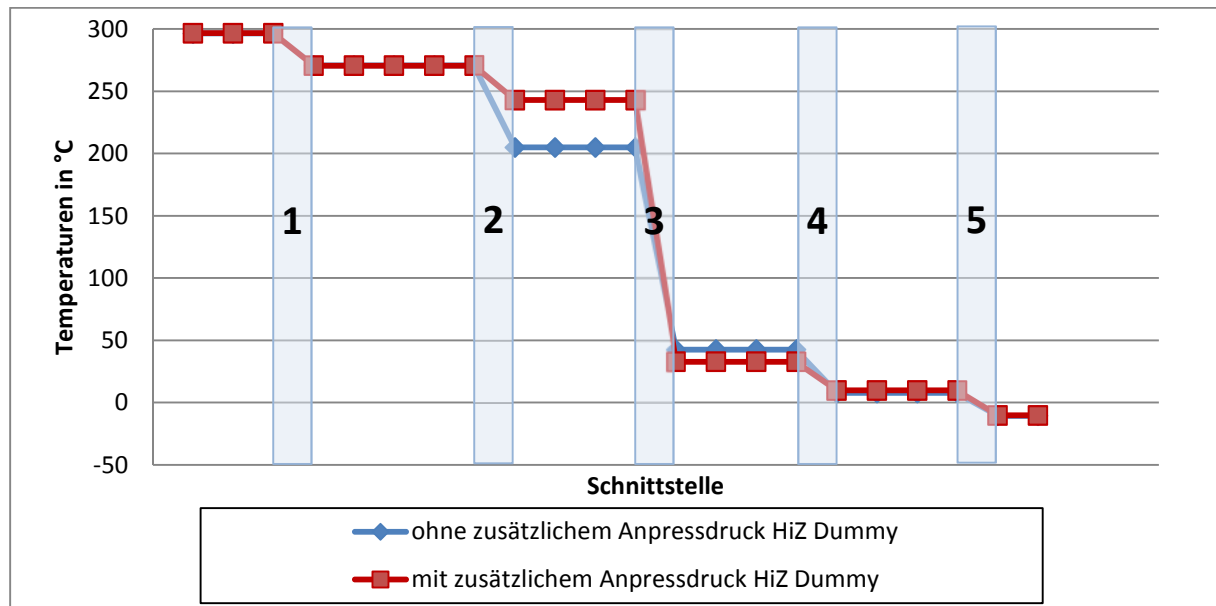


Abbildung 116: Temperaturverlauf im Modul entlang des Wärmestrompfads

Eine weitere Erkenntnis aus der Messung ist der geringe Temperaturabfall von der Gastemperatur zum Heissseitenwärmeübertrager. Dies ist durch die sehr gute Wärmeleitfähigkeit des Kupfer-Wärmeübertragers mit 50% Rippendichte zu erklären.

Um den Einfluss des Heissseitenwärmeübertragers auf den Temperaturverlauf untersuchen zu können, wurden weitere Messungen mit Wärmeübertragern mit verschiedenen Rippendichten und aus Kupfer und Edelstahl durchgeführt. Die Ergebnisse sind im weiteren Verlauf des Berichts zu finden.

B) Versuche mit einzelnen TE-Modulen

Vermessung der HZ-20 Module von der Fa. Hi-Z Technology, Inc.

Vermessen wurden zwei TE-Module des Typs HZ-20 (Abbildung 117). Ziel der Vermessung war die Aufnahme der elektrischen Leistung bei Reihen- und Parallelschaltung der jeweiligen Module. Zudem wurde die Abhängigkeit der elektrischen Parameter von der kalten Seite untersucht.

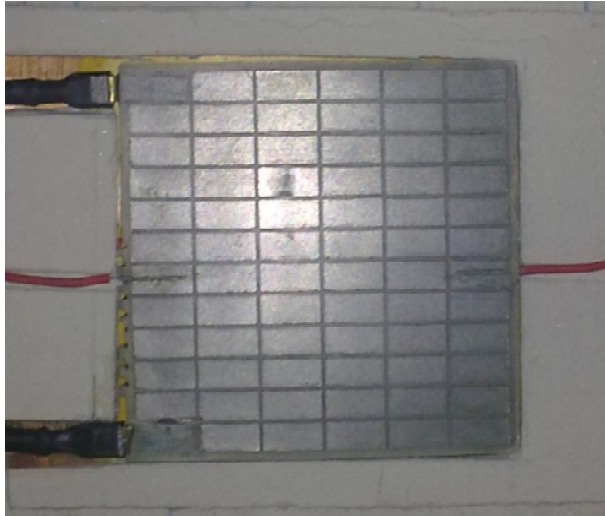


Abbildung 117: HZ-20 Modul mit zwei Messstellen

Variiert wurde bei der Messung die Wassereintrittstemperatur (-10; 30; 50; 80°C) und der Volumenstrom (3 und 10 l/min Gesamtvolumenstrom) im Kaltseitenwärmeübertrager. Die maximal zulässige Temperatur an der Oberfläche der HZ-20 Module wurde auf 250°C begrenzt.

In Abbildung 118 und Abbildung 119 sind die Verläufe der elektrischen Leistung für die Reihen- und Parallelschaltung dargestellt.

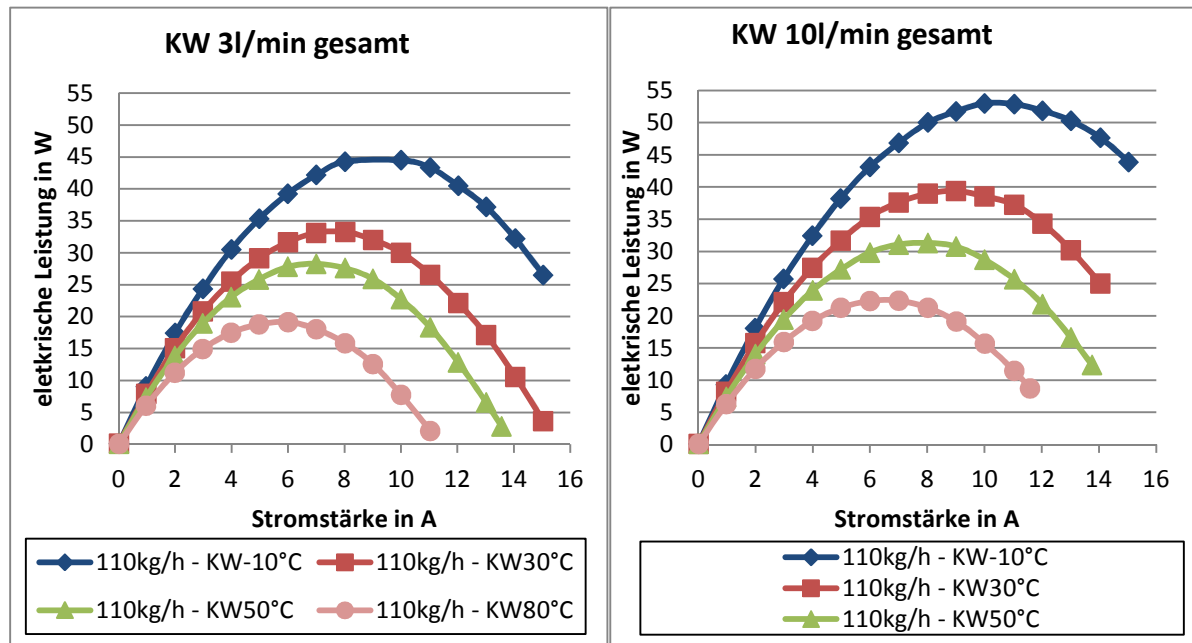


Abbildung 118: Leistungskurven von zwei in Reihe verschalteten HZ-20 Modulen bei Variation der kaltseitigen Temperatur und des Volumenstroms

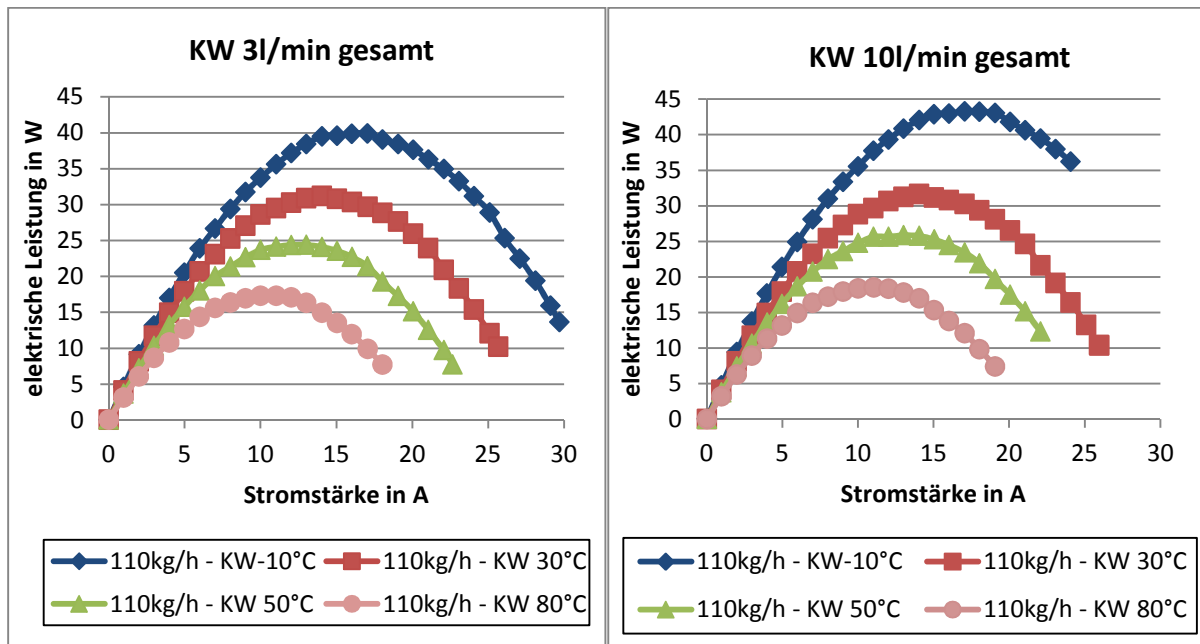


Abbildung 119: Leistungskurven von zwei parallel verschalteten HZ-20 Modulen bei Variation der kaltseitigen Temperatur und des Volumenstroms

Die Messungen zeigen eine starke Abhängigkeit der Leistungsentfaltung der Module von der Kühlwassertemperatur. Mit einer um 90°C niedrigeren Kühlwassertemperatur steigert sich die Leistung des Einzelmoduls um 55% (Abbildung 120), die Leistung der in Reihe verschalteten um 60% und die der parallel verschalteten um 58%. Der Einfluss des Volumenstroms ist nicht so stark ausgeprägt: Eine Steigerung des Volumenstroms um 7 l/min erhöht die Leistung um 5% (Einzelmodul), 15% (in Reihe verschaltet) bzw. 7% (parallel verschaltet).

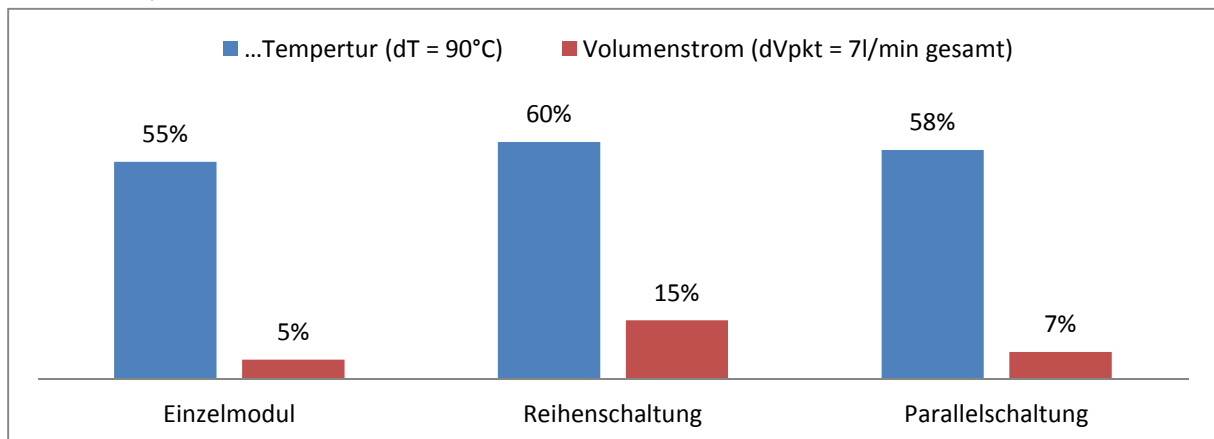


Abbildung 120: Einfluss Kühlwassertemperatur und -volumenstrom auf die Leistung der HZ-20 Module

Dieses Ergebnis bestärkt die Bemühungen einen separaten Niedertemperatur-Kühlkreis für den TEG aufzubauen und ihn nicht in den Motorkühlkreis zu integrieren. Auch die Pumpenleistung kann ohne große Leistungseinbußen stark gesenkt werden.

Vermessung der HZ 560 Module von der Fa. Hi-Z Technology, Inc.

Vermessen wurden zwei TE-Module des Typs HZ 560. Diese Module sind aus PbTe und Bi₂Te₃ segmentiert. Ziel der Vermessung war die Aufnahme der Leerlaufspannungen sowie der elektrischen Leistung der jeweiligen Module. Zusätzlich wurde die Langzeitstabilität der Module ermittelt.

Um die parasitären Wärmeströme um die Module zu minimieren, wurden die Module mit Isolationsmaterial umrandet (siehe Abbildung 121).

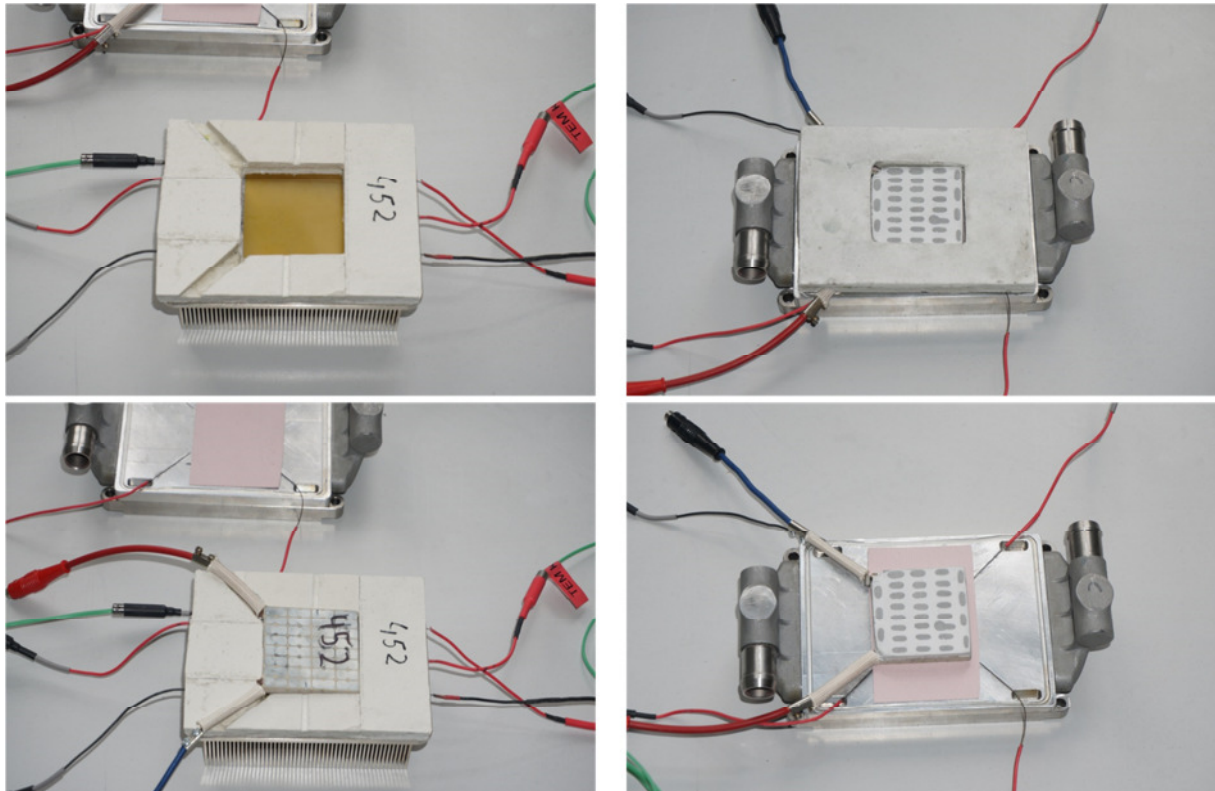


Abbildung 121: Einbau HZ 560 mit Messstellen

Gemessen wurden die elektrische Spannung und der elektrische Strom bei den in Tabelle 6 angegebenen Temperaturkombination der Heiß- und Kaltseite. Daraus resultierend wurden die elektrische Leistung sowie die Leerlaufspannung ermittelt.

Heißseite [°C]	300	400	500	550
Wasser [°C]	-10, 0, 20, 50, 80	-10, 0, 20, 50, 80	-10, 0, 20, 50, 80	-14, 0, 20, 50, 80

Tabelle 6: Definierte Temperaturkombinationen für die Vermessung der HZ 560 Module

Die Maximalwerte der Leerlaufspannungen sowie der gemessenen Leistungen sind in Tabelle 7 abgebildet.

Heißseitentemperatur	max. Leistung [W]		max. Leerlaufspannung [V]	
	Modul 1	Modul 2	Modul 1	Modul 2
300 °C	5,2	5,7	2,3	2,4
400 °C	9,1	9,9	3,5	3,6
500 °C	14,1	15,4	4,9	4,9
550 °C	17,6	18,8	5,6	5,7

Tabelle 7: Maximale Leistung und Leerlaufspannung HZ 560 Module

Bei Modul 1 ist in Abbildung 122 bei 500 °C Heißluft und 80 °C Kühlwassertemperatur ein starker Einschnitt der Spannung und daraus resultierend der elektrischen Leistung zu erkennen. Hier deutete sich der Ausfall des Moduls an.

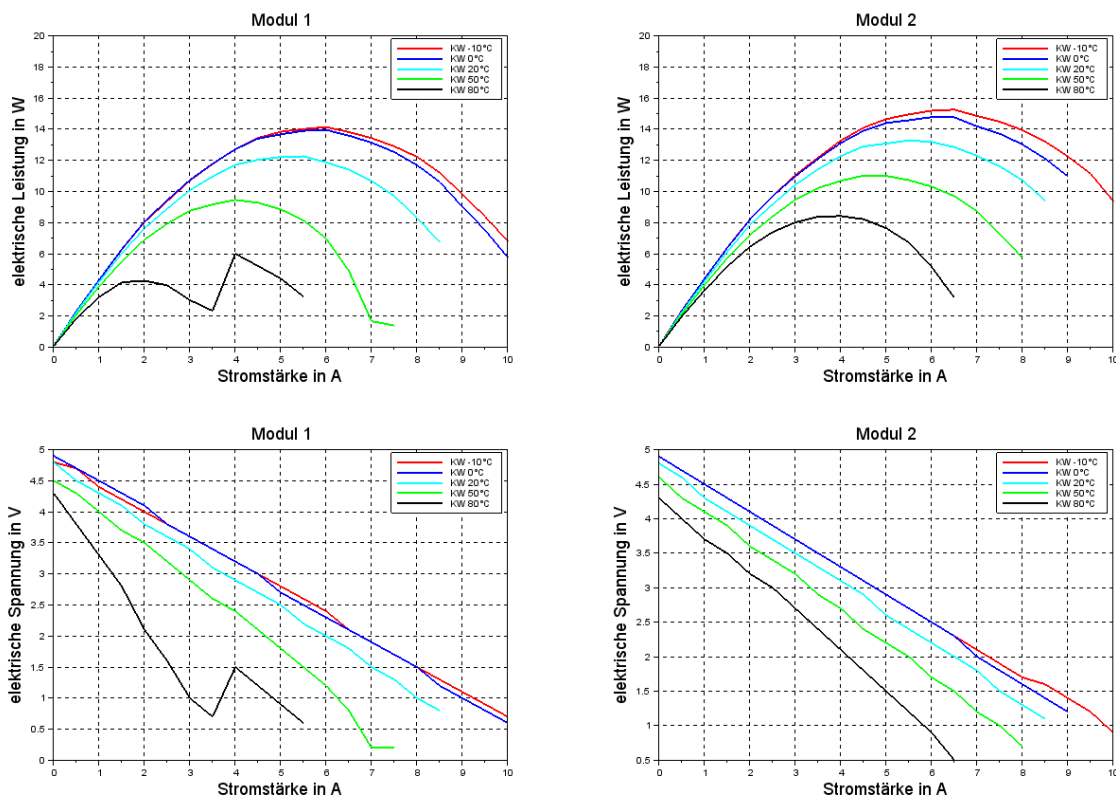


Abbildung 122: Elektrische Leistung und Spannung bei 500 °C Heißluft

Nach einer Betriebszeit von ca. 50 Stunden traten weitere Unregelmäßigkeiten im Spannungs- und Leistungsverlauf beider TE-Module auf, und die gemessenen Werte folgten immer weniger den zu erwartenden Verläufen. Nach 60 Stunden Betriebszeit war das Modul 1 komplett ausgefallen. Die Leistung des Moduls 2 hatte sich um insgesamt 41% vermindert (Abbildung 123).

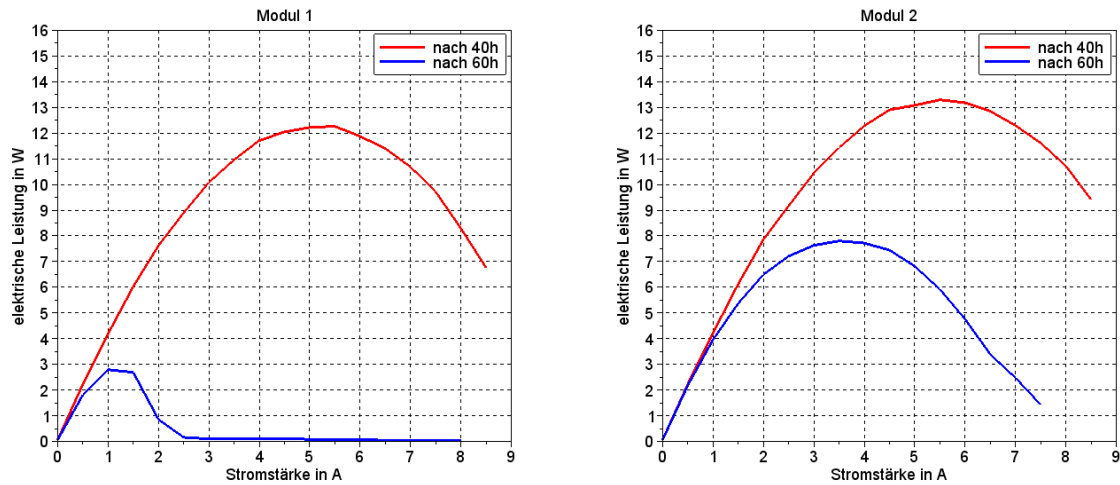


Abbildung 123: Elektrische Leistung nach 40 und 60 Betriebsstunden

Nach Ausbau der TE-Module waren keine sichtbaren Veränderungen zu erkennen. Das Andruckbild der Folien ließ auf eine sehr gute Anbindung der Module schließen. Nach Rücksprache mit der Fa. HiZ wurde ein zu hoher Anpressdruck als mögliche Fehlerursache gefunden.

Vermessung der Oxid-Module 0x-7 TES von der Fa. TES New Energy

Vermessen wurden zwei TE-Oxidmodule des Typs 0x-7 TES. Ziel der Vermessung war die Aufnahme der Leerlaufspannungen sowie der elektrischen Leistung der jeweiligen Module. Zusätzlich wurde die Langzeitstabilität der Module ermittelt.

Um die parasitären Wärmeströme um die Module zu minimieren, wurden die Module mit Isolationsmaterial umrandet (siehe Abbildung 124).

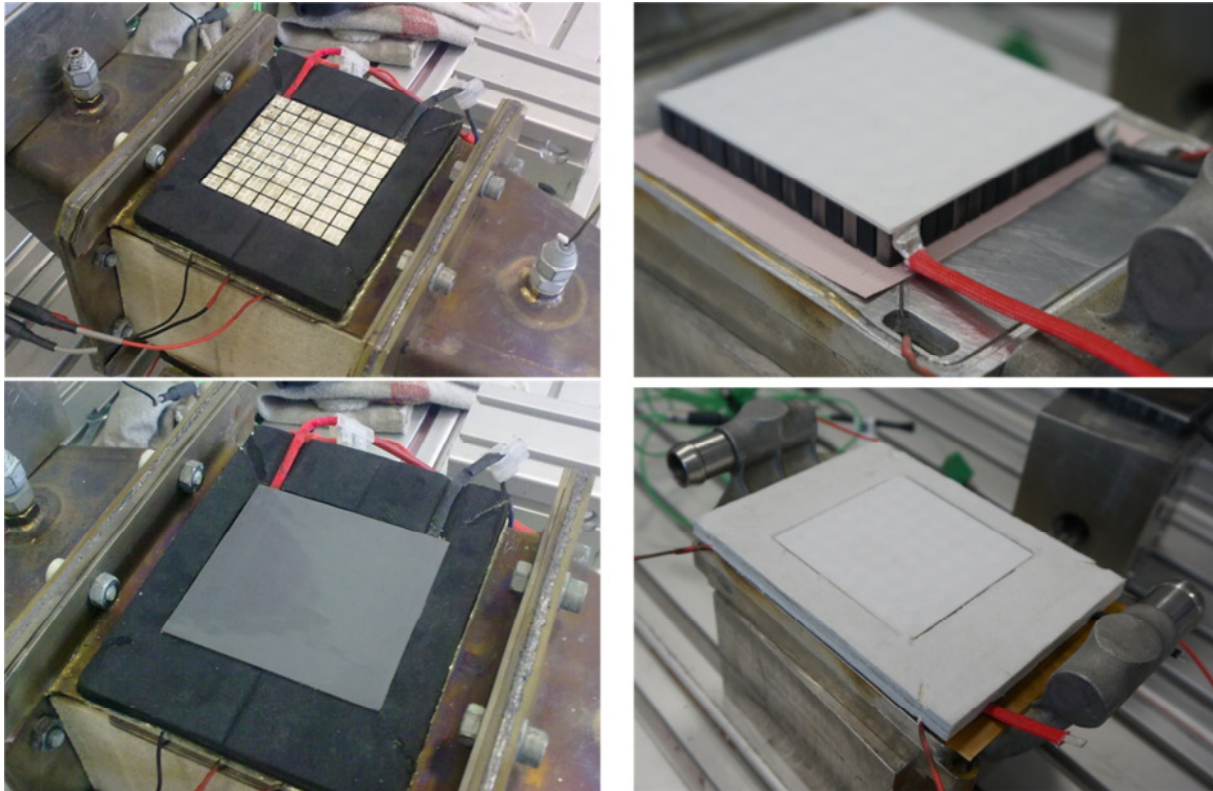


Abbildung 124: Einbau der Oxidmodule in den 2-Modul-Prüfstand

Gemessen wurden die elektrische Spannung und der elektrische Strom bei den in Tabelle 8 angegebenen Temperaturkombination der Heiß- und Kaltseite. Daraus resultierend wurden die elektrische Leistung sowie die Leerlaufspannung ermittelt.

Heißseite [°C]	300	400	500	530
Wasser [°C]	20	20	-10, 20, 50, 80	-15, 20

Tabelle 8: Gemessene Kühlwassertemperatur bei entsprechender Heißseitentemperatur 0x-7-Module

Die Maximalwerte der Leerlaufspannungen sowie der gemessenen Leistungen sind in Tabelle 9 abgebildet.

Heißseitentemperatur	max. Leistung [W]		max. Leerlaufspannung [V]	
	Modul 1	Modul 2	Modul 1	Modul 2
300 °C	1,6	1,6	4,4	4,3
400 °C	3,0	2,9	6,1	6,0
500 °C	5,6	5,4	8,4	8,2
530 °C	6,6	-	9,2	-

Tabelle 9: Maximale Leistung und Leerlaufspannung 0x-7 TES-Module

Bei den Messungen mit Kühlwasser im Bereich von 20 °C bis 80 °C sinken elektrische Leistung und Leerlaufspannung mit steigender Kühlwassertemperatur im Modul 1 ab. Das Modul 2 war bei der Messung mit 20 °C komplett ausgefallen. Bei der Messung mit 530 °C wurden die höchsten Werte für Leerlaufspannung und Leistung im Modul 1 erreicht. Die Temperaturdifferenz zwischen Heißluft und Kühlwasser betrug 595 °C. Beim Modul 2 wurden

aufgrund des vorzeitigen Ausfalls eine Maximalleistung von 5,2 W und 8,2 V Leerlaufspannung erreicht.

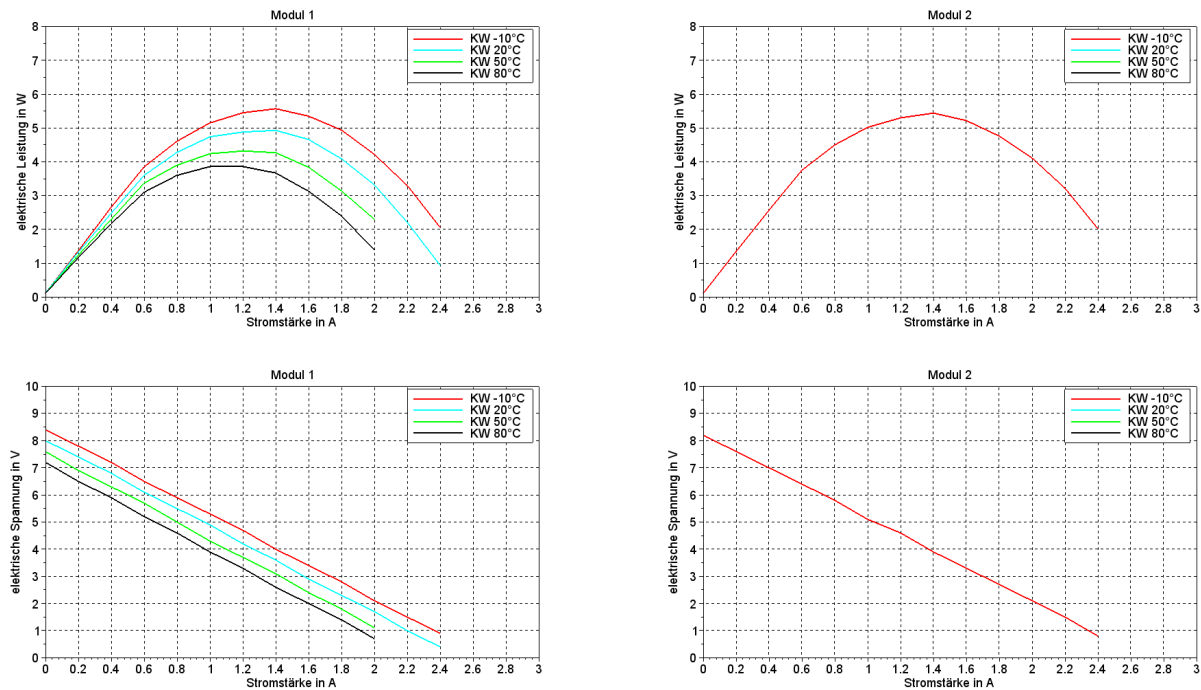


Abbildung 125: Messergebnisse - Leistung und Spannung (500°C)

Aufgrund von Problemen bei der Leistungs- und Spannungsmessung nach ca. 10 Betriebsstunden, wurden die Module aus dem Prüfstand ausgebaut und überprüft. Wie in Abbildung 126 zu erkennen ist, wies das Modul 1 keine sichtbaren Veränderungen an der Oberfläche auf.

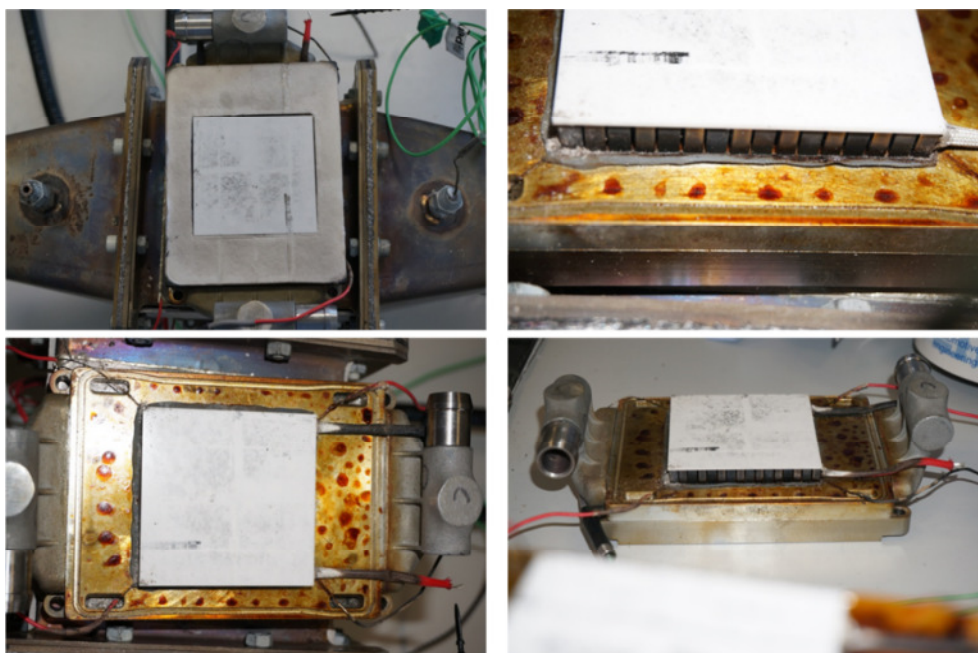


Abbildung 126: Ausbau von Modul 1

Das Modul 2 war nach ca. 10 Stunden Betriebszeit ausgefallen. Beim Ausbau des Moduls ist in Abbildung 127 deutlich zu erkennen, dass die Keramikschicht gebrochen ist.

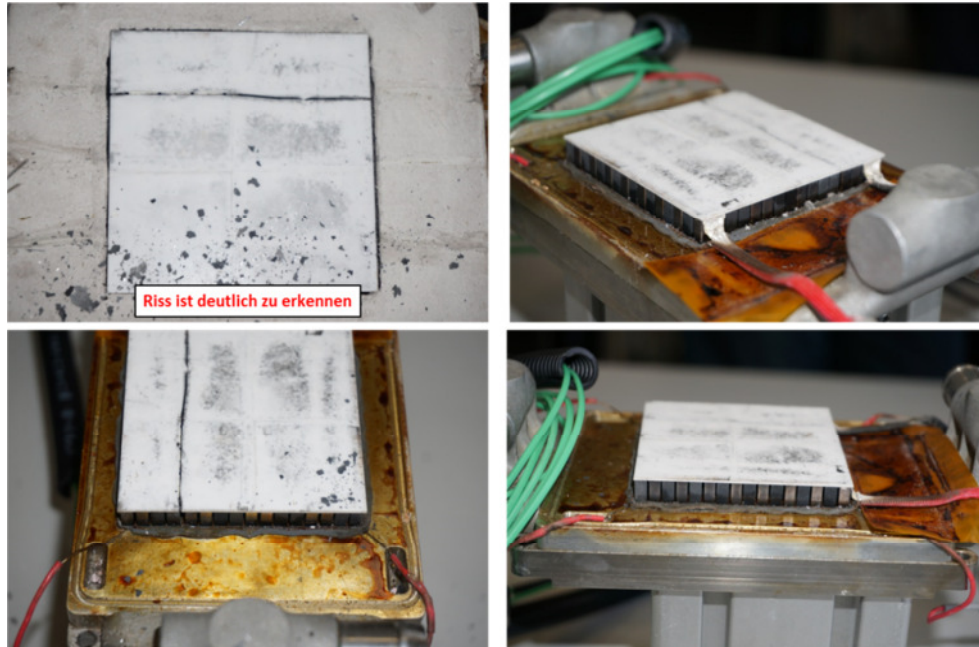


Abbildung 127: Ausbau von Modul 2

Eine konkrete Ursache ist nicht bekannt. Eine mögliche Ursache kann ein ungleichmäßiger Andruck beim Einbau gewesen sein. Dadurch hat sich das Modul evtl. verkantet wodurch es nach erhöhter Temperatureinwirkung zum Bruch kam. Da das zweite Modul nicht beschädigt wurde, kann ein zu festes Anziehen der Module ausgeschlossen werden.

Nach Wiedereinbau des Modul 1 lief das Modul noch weitere 32 Stunden bis zu einer Temperatur von 530°C (Abbildung 128).

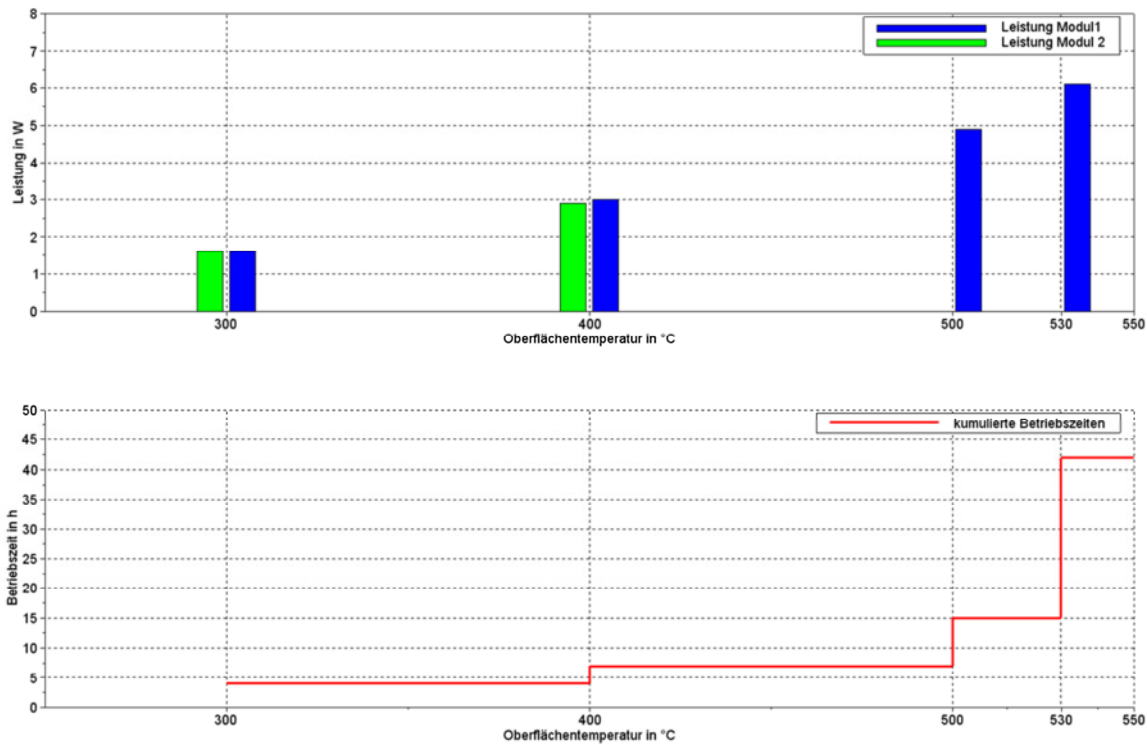


Abbildung 128: Leistungen und kumulierte Betriebszeit der Oxidmodule

Auch nach insgesamt 40 Stunden Betriebszeit des Modul 1 wurden keine nennenswerten Veränderungen der elektrischen Leistung festgestellt (Abbildung 129).

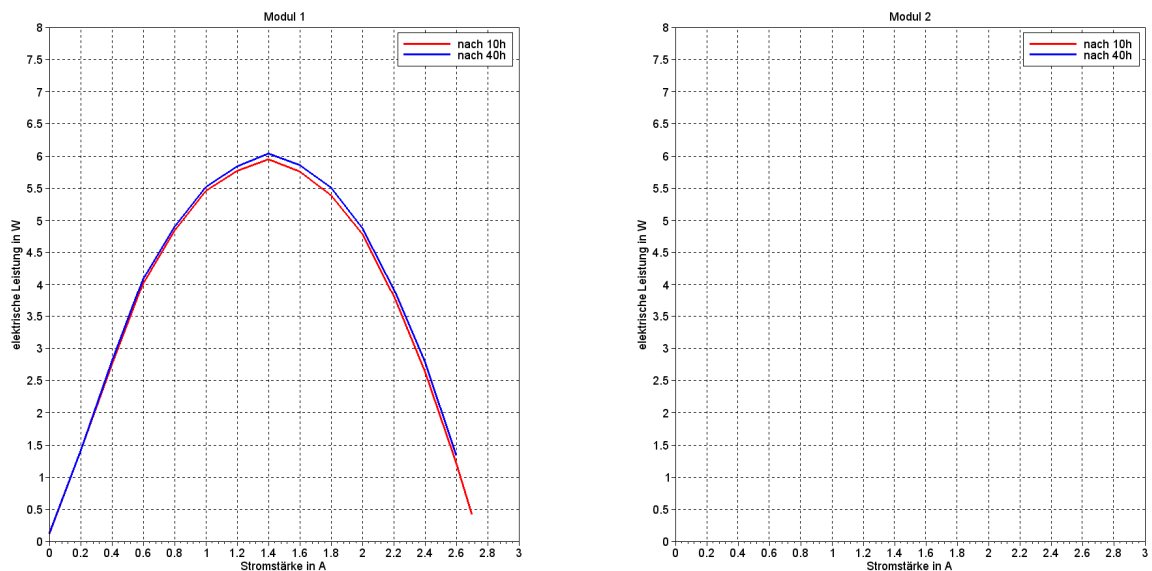


Abbildung 129: Degradation der Leistung

C) Versuche mit einflutigem TEG-System mit zehn HiZ-20 TE-Modulen

Auf Grund der langen Verzögerung bei der Fertigung der TE-Module wurde das einflutige TEG-Prototypen-System mit kommerziell erhältlichen Modulen der Firma HiZ aufgebaut (s. Abbildung 130).

Ziel des Aufbaus und der darauf folgenden Versuche war:

- Prüfung der Verbaubarkeit, Maßhaltigkeit und mechanischen Stabilität der konstruierten Komponenten
- Praktische Darstellung des modularen Aufbaukonzepts für TEG-Systeme
- Darstellung der maximal möglichen elektrischen Leistung bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen
- Verifikation der virtuellen Wärmetauscherauslegung durch realen Messdaten
- Verifikation der DC/DC-Wandler-Auslegung und Überprüfung seiner Funktionalität

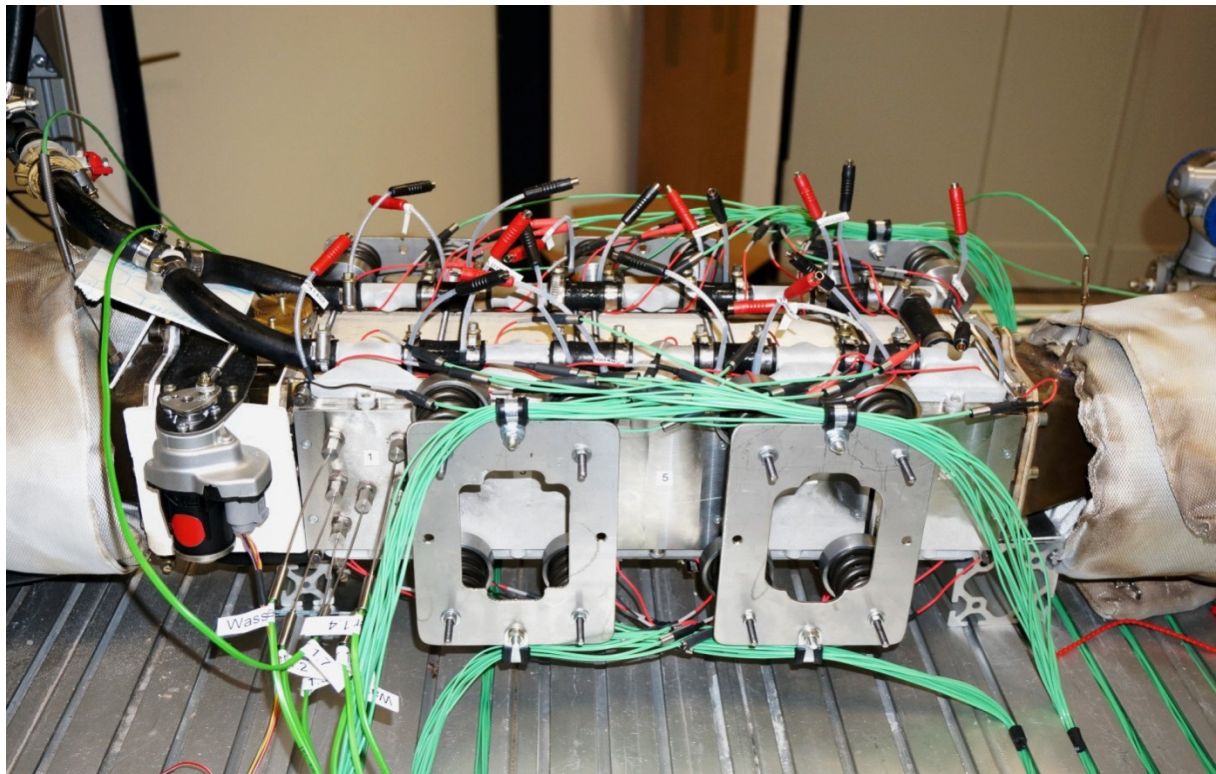


Abbildung 130: einflutiges TEG-System mit Messtechnik am Heißluftprüfstand

Um eine fundierte Aussage über den Temperaturverlauf machen zu können, wurden die Oberflächen der heißen und kalten Seite mit mehreren Thermoelemente bestückt. In Abbildung 131 ist die Anzahl und Anordnung der Thermoelemente dargestellt.

Im TEG	Medien Luft und Wasser
<ul style="list-style-type: none"> • 50 TE für Heiß-Seite • 40 TE für Kalt-Seite • 14 TE für Wasser 	<ul style="list-style-type: none"> • Drücke (Ein-/ Auslass) • Massenströme • Temperaturen (Ein-/ Auslass)

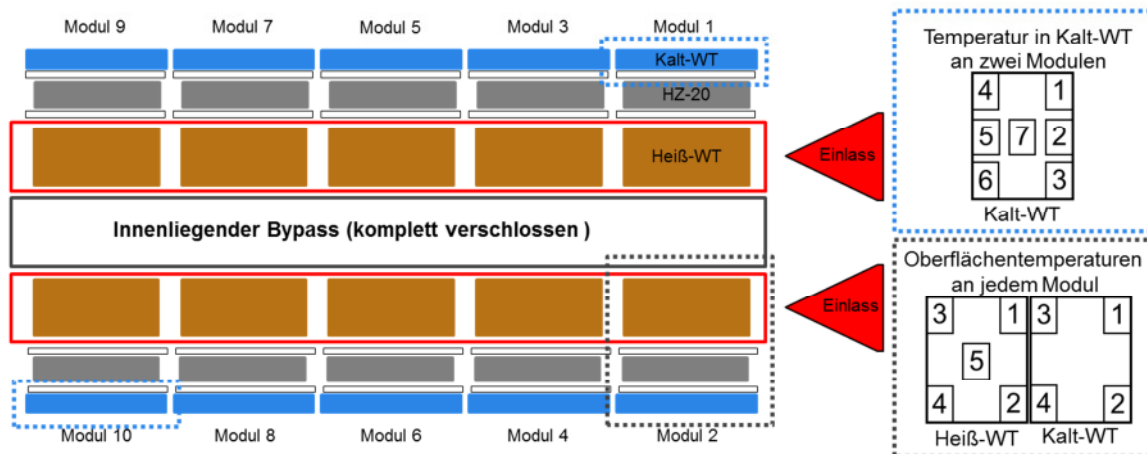


Abbildung 131: Messstellenplan Temperatursensoren

Um einen annähernd gleichmäßigen Temperaturverlauf auf der heißen Seite der TE-Module zu erzielen, wurden längs in Strömungsrichtung Block-Wärmeübertrager (WT) mit verschiedenen Rippendichten eingesetzt.

1.Reihe	2.Reihe	3.Reihe	4.Reihe	5.Reihe
20%-Cu-WT	25%-Cu-WT	33%-Cu-WT	50%-Cu-WT	50%-Cu-WT

Tabelle 10: Abstufung der Rippendichte des WT längs zur Strömungsrichtung im TEG-System

In Abbildung 132 ist eine Hälfte des TEG-System dargestellt.

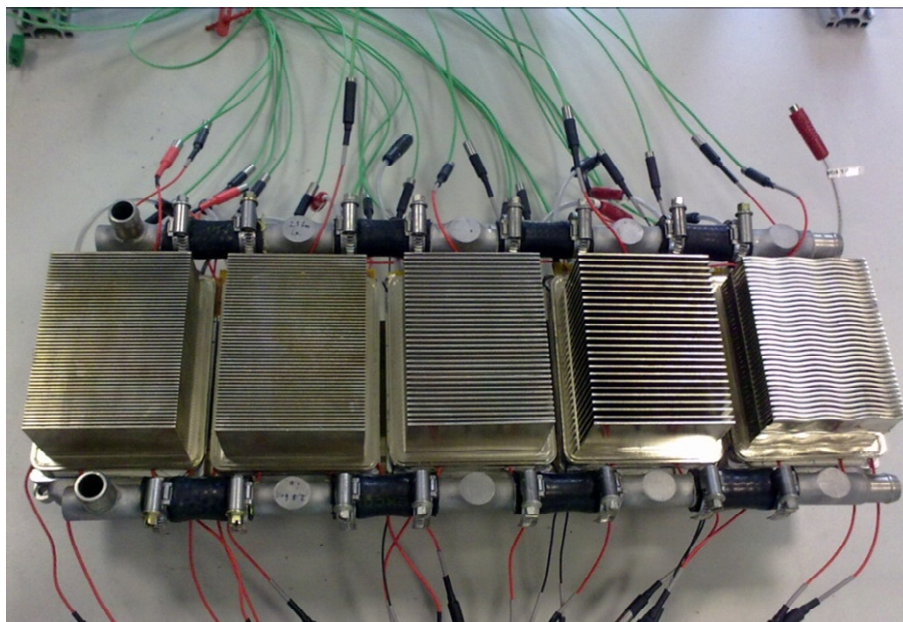


Abbildung 132: TE-Module mit unterschiedlichen Wärmeübertragern

Diese Variation der Wärmeübertrager hat es ermöglicht, die Temperaturverteilung soweit anzugleichen, dass eine Spreizung auf der heißen Seite von unter 10°C aufgetreten ist. Um den Einfluss der Dichtigkeit der Abgasklappen zu quantifizieren, wurde der Bypass in verschiedenen Abstufungen abgedichtet, um eine ungewollte Durchströmung des Bypasses zu verhindern.

- Bypass wird durch Klappen abgedichtet ohne zusätzliche Maßnahmen. Dieser Fall entspricht dem normalen Fahrbetrieb mit einer nur unzureichend schließenden Klappe.
- Die Spalte und Übergänge von Abgasklappe zu Bypass werden besser abgedichtet.
- Der Bypass wird mechanisch komplett verschlossen. Das Abgas muss über die aktiven TEG-Fluten.

Bei der Betrachtung der elektrisch erzielbaren Leistung ist eine deutliche Verringerung dieser bei nicht 100%ig geschlossenem Bypass zu erkennen. Hier sind Einbußen von bis zu 40% möglich (s. Abbildung 133).

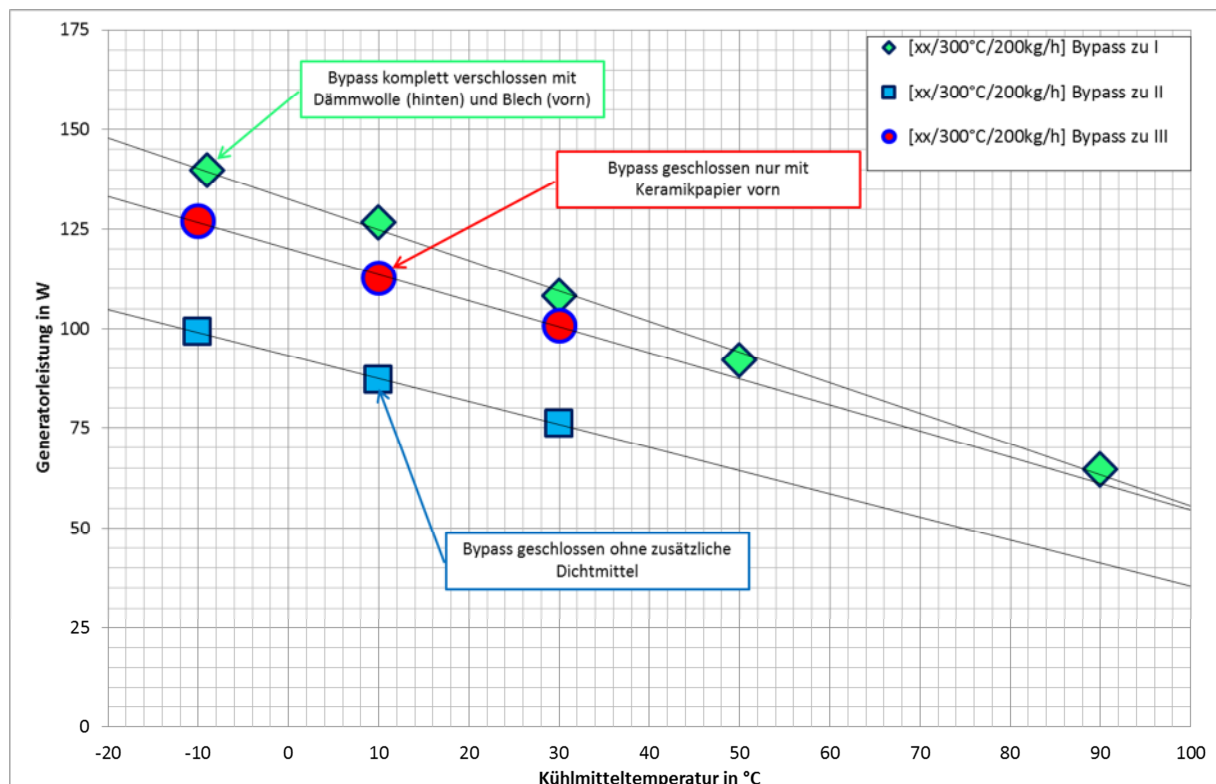


Abbildung 133: Einfluss der Dichtigkeit des Bypasses auf die elektrische Leistung des TEG

Um die Sensibilität des TEG-Systems gegenüber Veränderungen der heißen und kalten Seite zu quantifizieren, sind in Abbildung 134 mehrere Leistungspunkte dargestellt. Jeder Punkt entspricht den summierten Einzelleistungen der 10 Module. Man erkennt gut die deutliche Abhängigkeit von der Temperatur sowohl von der kalten als auch von der heißen Seite. In Abbildung 135 sind die dazugehörigen Leerlaufspannungen, gebildet aus den summierten Einzelspannungen, dargestellt.

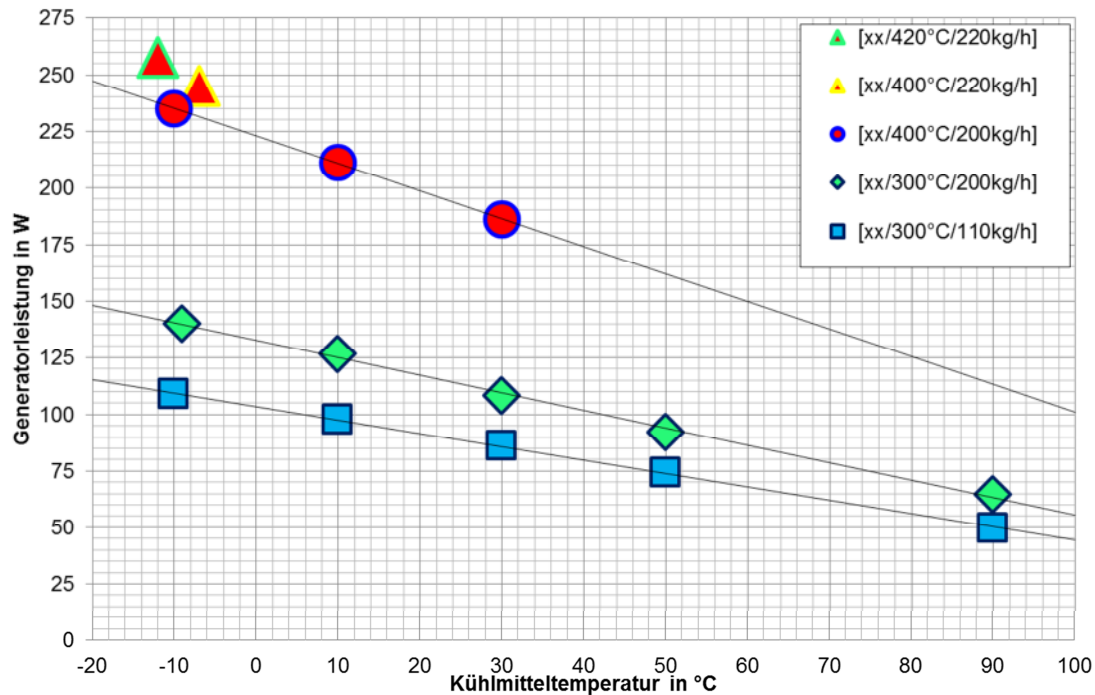


Abbildung 134: elektrische Leistung des TEG in Abhängigkeit der Temperaturen auf der kalten Seite und des Luftmassenstroms

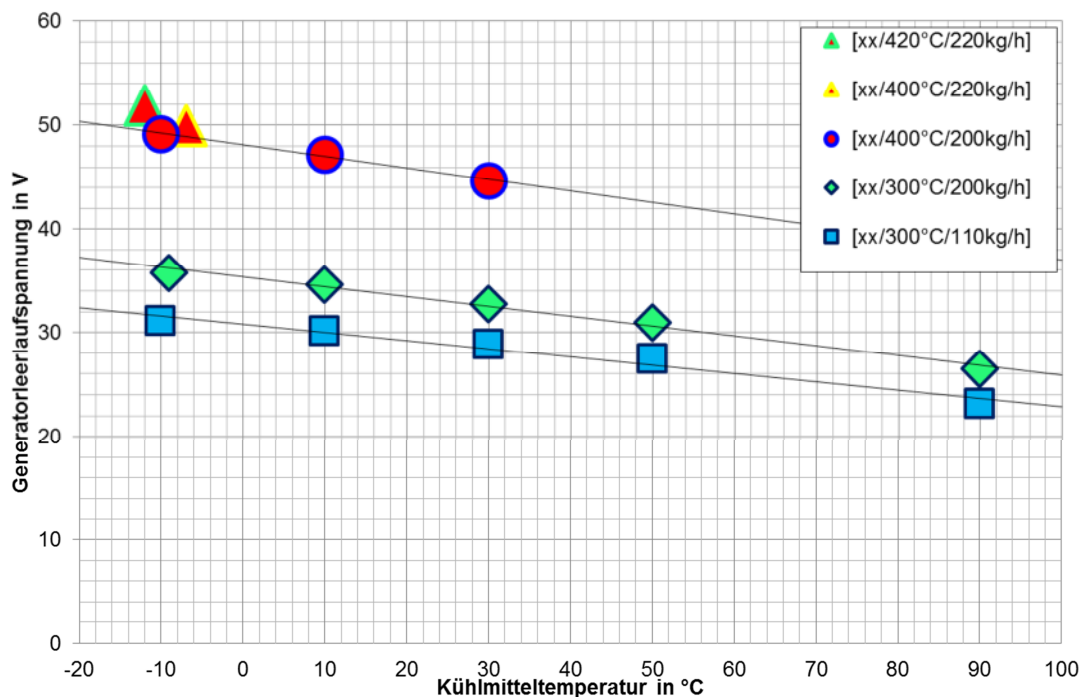


Abbildung 135: Leerlaufspannung des TEG in Abhängigkeit der Temperaturen auf der kalten Seite und des Luftmassenstroms

Versuche mit stoffschlüssigem 4-Streifen-Modul von IPM

Das von IPM konzipierte Modul bestand aus vier einzelnen Streifen (Cu-Wings ohne TE-Material direkt auf Keramiksubstrat gelötet), die am Fuß und an der Spitze der Wings mit unterschiedlichen Klebern verklebt waren. Der 4-Streifen-Block wurde direkt auf dem Kaltseiten-Wärmeübertrager gelötet (s. Abbildung 136).

Ziel war es, die thermomechanische Stabilität der Lötung und Klebung zu untersuchen und daraus Erkenntnisse für den Aufbau der funktionsfähigen Module zu ziehen.



Abbildung 136: 4-Streifen Modul ohne TE-Material mit einzelnen verlöteten Cu-Wärmeübertragern (Wings)

Das Modul wurde am Heißluftprüfstand definierten Umgebungsbedingungen für feste Zeitintervalle ausgesetzt. Nach jedem Versuch wurde das Modul unter einer Mikroskopkamera auf Veränderungen in den Klebestellen und der Lötung untersucht. Wie aus Abbildung 137 zu entnehmen ist, sind bei niedrigen Temperaturen keine bzw. geringfügige Änderungen in den Klebungen festzustellen. Diese kleinen Veränderungen konnten auf kleine thermomechanische Bewegungen zurückgeführt werden.

Versuchsdurchgang	Auffälligkeiten
100 °C / 1 h	Keine Veränderungen an den Klebestellen
200 °C / 1 h	Längsrisse: Neue Risse (1,2) bzw. Risse größer geworden (5,6 & 9,10) Querrisse: Risse kleiner geworden (4,5 & 6,7) bzw. Risse verschmolzen (15,16)
300 °C / 1 h	Keine Veränderungen im Vergleich zum vorherigen Versuch
300 °C / 6 h	Längsrisse: Risse größer geworden (1,2 & 10,11,12)
400 °C / 1 h	Keine Veränderungen im Vergleich zum vorherigen Versuch
500 °C / 1 h	Lötung zum Wärmeübertrager kalt teilweise abgegangen Struktur des dunklen Klebers zerstört, Spalte größer geworden, Farbe stark nachgedunkelt
600 °C / 3 h	Bauteil kaputt, Lötung und Klebung hat sich an mehreren Stellen gelöst

Abbildung 137: Ergebnisse

Ab 500 °C waren deutliche Schwächen an den Klebungen zu erkennen. Zudem begann sich das Modul vom Wärmetauscher zu lösen (s. Abbildung 138). Evtl. wurde hier der maximal zulässige Temperaturbereich der Weichlötung überschritten.

Nach 500 °C / 1 h

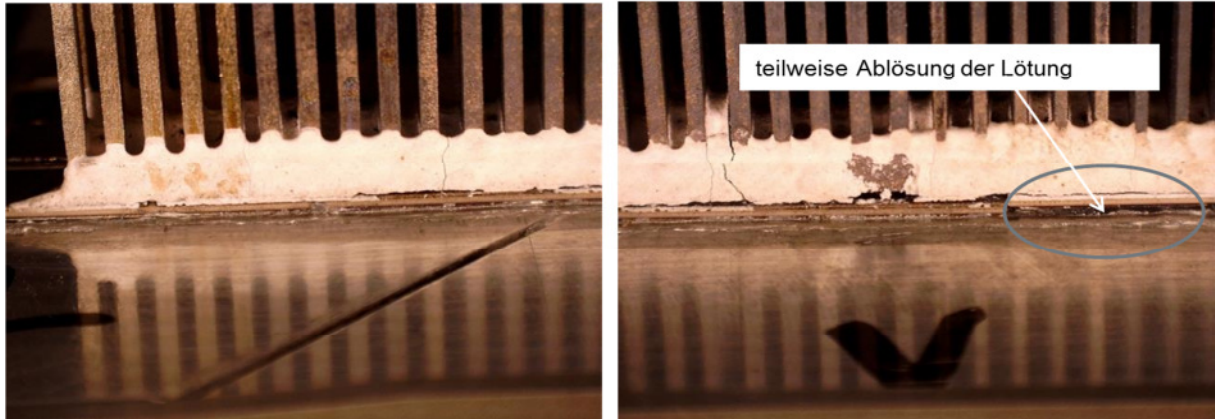


Abbildung 138: Schadensbild nach Versuch bei Lufttemperatur von 500 °C

Bei 600 °C hatte sich das komplette Modul vom Wärmetauscher gelöst. Die vier verklebten Streifen waren in drei in sich noch feste Teile zerfallen (s. Abbildung 139).

Nach 600 °C / 3 h

nach Öffnung des Systems



Abbildung 139: Schadensbild nach Versuch bei Lufttemperatur von 600 °C: komplette Ablösung vom Kaltseiten-Wärmeübertrager

Die Ergebnisse wurden an IPM übergeben und gemeinsam diskutiert. Aufgrund dieser Versuche konnte durch IPM ein geeigneter Kleber für zukünftige Aufbauten ausgewählt werden.

Versuche mit stoffschlüssigen Block-Modulen von IPM

Vermessen wurden mehrere All-in-one-Modul vom Fraunhofer IPM. Die Module unterschieden sich in der Aufbauart (Kraftschluß, Klebung und Lötung) und im verwendeten TE-Material (PbTe, Halb-Heusler).

Ziel der Vermessung war die Aufnahme der Leerlaufspannungen sowie der elektrischen Leistung. Zusätzlich wurden die Klebung und Lötung bei Wechselbelastung untersucht.

Gemessen wurden die elektrische Spannung und die elektrische Leistung bei Heißlufttemperaturen zwischen 150°C und 550°C. Die Kaltseitentemperatur wurde zwischen Raumtemperatur und 10°C variiert. Für die Untersuchung der Wechselbelastung wurden die Temperaturen und Leerlaufspannung über mehrere Stunden aufgenommen. Anschließend wurden eine Sichtprüfung sowie eine Widerstandsmessung zur Überprüfung der Haltbarkeit durchgeführt.

Die ersten beiden Module unterscheiden sich zum Modul 3 darin, das Modul 1 und 2 komplett stoffschlüssig aufgebaut waren. Auch waren die Wings zu einem einheitlichen Block verklebt. Beim Modul 3 wurden Entlastungsschnitte in die Klebung eingefräst, um hier die Spannungen besser aus dem Block zu nehmen. Zudem wurde der Block nicht mit dem Kaltseiten-Wärmetauscher verlötet, sondern per Kraftschluss verpresst. Bei den Modulen 4 und 5 wurde auf die Verklebung der verbauten Wings verzichtet. Da das verbaute Halb-Heusler-Material jedoch eine Grundfläche von 2,5mm x 2,5mm besaß, also um die Hälfte kleiner war als das PbTe-Material, wurde entschieden die Wings durch einen Deckel zu stabilisieren (siehe Abbildung 140).

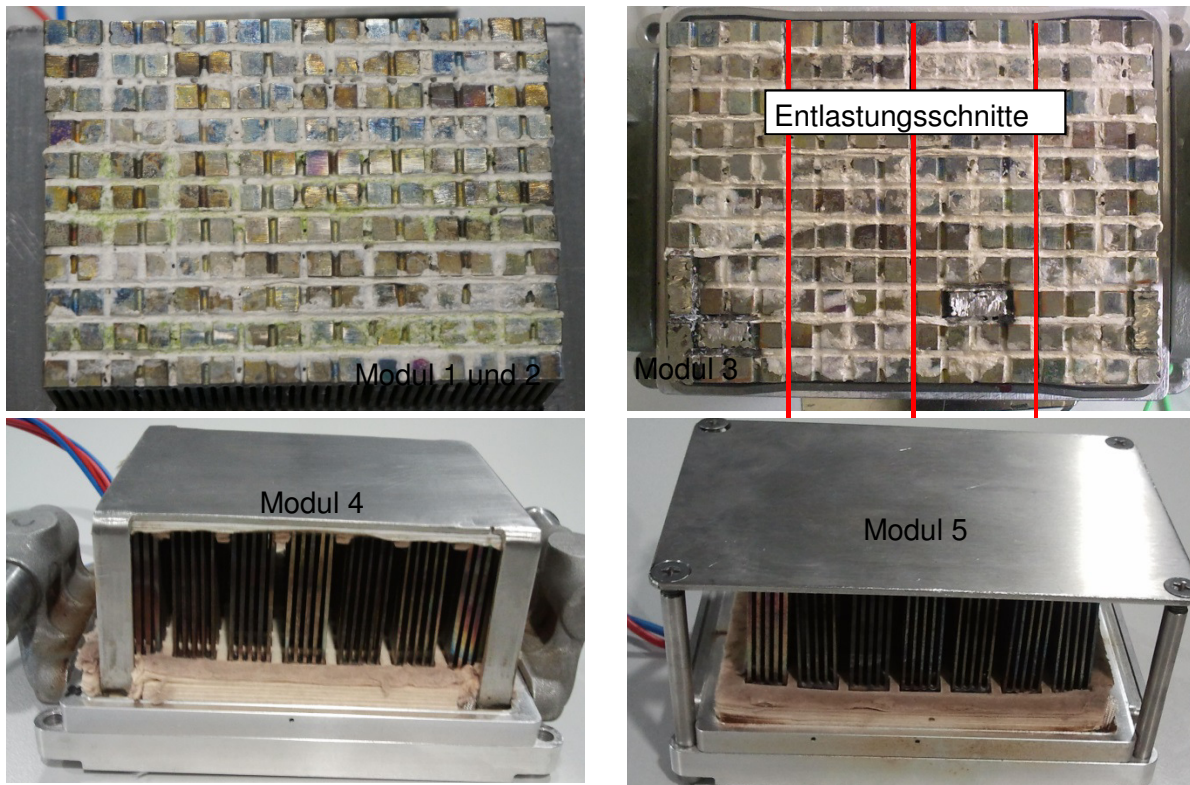


Abbildung 140: Aufbau der stoffschlüssigen Module

Die Ergebnisse der ersten drei Module sind stark unterschiedlich. Bei den Modulen 1 und 2 hat sich ein Totalausfall gezeigt. Es entstanden deutliche Risse in den Kontaktflächen und dem TE-Material selbst. Bei dem Modul 3 konnte eine elektrische Leistung gemessen werden. Aber auch hier hat sich eine Leistungsdegradation nach einigen Stunden Wechselbelastung eingestellt. Eine Widerstandsmessung hat gezeigt, dass die Kontaktgüte im Modul stark unterschiedlich war.

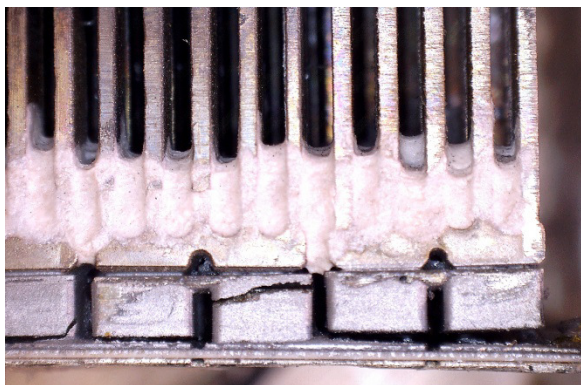


Abbildung 141: Schadensbild Modul 1



Abbildung 142: Schadensbild Modul 2

Bei Modul 4 musste der Deckel zur Montage am Heißluftprüfstand abgenommen werden, da der Querschnitt zu groß für den vorhandenen Ausschnitt war. Bei der Demontage haben sich die Wings an den Außenseiten deutlich nach oben gewölbt. Die Ablösung fand zwischen den Kaltseitenwärmetauscher und der Keramikschicht zur Isolierung statt. Zudem hat sich die

Lötung an den Kabeln gelöst (siehe Abbildung 143). Das Modul 4 konnte in diesem Zustand nicht getestet werden.

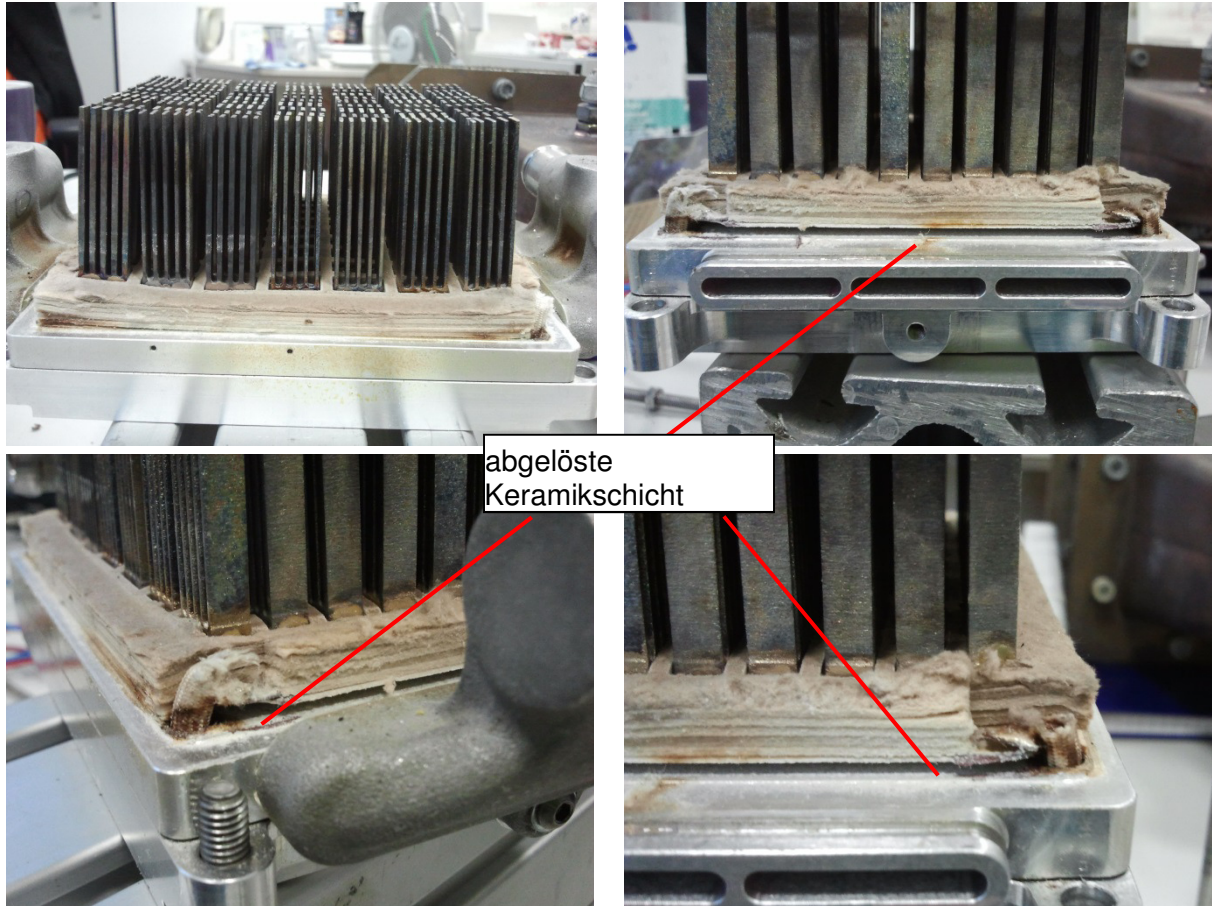


Abbildung 143: Schadensbild Modul 4

Bei dem Modul 5 war der Deckel an den Ausschnitt vom Prüfstand angepasst, eine Demontage war nicht notwendig. Nach der Inbetriebnahme konnte man in Abhängigkeit vom Anpressdruck entweder einen unendlich hohen Widerstand oder einen Kurzschluss gegenüber dem Deckel messen. Eine Leistungsmessung war in diesem Zustand nicht möglich.

Detaillierte Ergebnisse sind Tabelle 11 (folgende Seite) zu entnehmen.

	Modul 1	Modul 2	Modul 3	Modul 4 und 5
Aufbau	Stoffschlüssig mit Lötung zum Kaltseiten-Wärmetauscher Wings zu festem Block an Kopf und Fuß verklebt Isolierschicht → Keramiksubstratplatte (DCB-Substrat)		Wings zu festem Block an Kopf und Fuß verklebt, aber mit Schlitzen in der Verklebung zur Reduzierung der inneren Spannungen Kraftschlüssiger Aufbau ohne Lötung zum Wärmeübertrager	Stoffschlüssig mit Lötung zum Kaltseiten-Wärmetauscher Wings über Deckel stabilisiert, keine Verklebung Isolierschicht → gespritzte Keramik
TE-Material	PbTe			Halb-Heusler
Versuch	Ermittlung der elektrischen Parameter im Bereich bis dT ca. 500°C Untersuchung der Stabilität der Lötung und Klebung bei Wechselbelastung der Temperatur			
Leistung / Leerlaufspannung	Konnten nicht ermittelt werden	3,5W @ $dT = 500^\circ\text{C}$ 9V @ $dT = 500^\circ\text{C}$	13W (10,5W) @ $dT = 500^\circ\text{C}$ 8,5V @ $dT = 500^\circ\text{C}$	Konnten nicht ermittelt werden
Schadensbild	Wings komplett in der Lotschicht zwischen DCB-Substrat und Kaltseiten-Wärmetauscher gelöst. Risse im Kleber zu erkennen Wechselbelastung nicht messbar da Kontaktprobleme → Komplettausfall	Risse der Kontaktplättchen zum TE-Material und im TE-Material selbst zu erkennen Risse im Kleber zu erkennen Wechselbelastung nicht messbar da Kontaktprobleme → Komplettausfall	Keine Risse in den Kontaktflächen oder TE-Material zu erkennen Risse im Kleber zu erkennen Reduzierung der Leistung nach wiederholtem Messen Wechselbelastung ohne erkennbare Veränderung → Leistungsdegradation	Ablösung der Keramikschicht vom Wärmetauscher Kurzschluss gegenüber Deckel Wechselbelastung nicht messbar da Kontaktprobleme → Komplettausfall

Tabelle 11: Fakten und Ergebnisse zu den stoffschlüssigen Modulen

Versuche mit dem stoffschlüssigen Modul von IAV und Fa. TecCom

Das TE-Modul wurde auf Basis des thermisch bespritzten Kaltseitenwärmetauschers aufgebaut. Als TE-Material wurde Bismuttellurid in der Größe 5 x 5 mm verwendet. Die BiTe-Klötzchen wurden mit Hilfe eines speziell angefertigten Keramikpapiers auf die Kupferbrücken aufgelegt, und auf die Klötzchen wiederum die Aluminiumbrücken. Das Keramikpapier dient der besseren Positionierung und zur thermischen Entkopplung (siehe Abbildung 144)

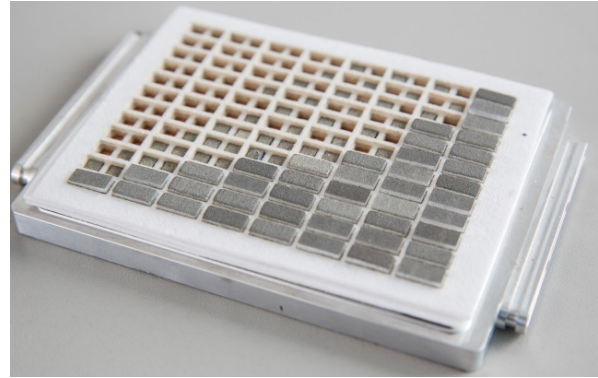
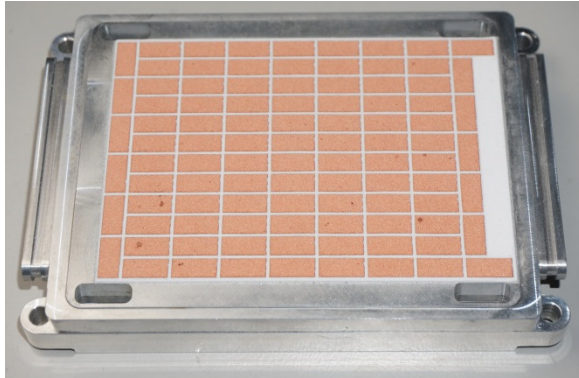


Abbildung 144: Thermisch gespritzten Kupferbrücken mit Positionierungsrahmen

Für den Aufbau und nachfolgenden Lötvorgang im Ofen wurde eine entsprechende Verspannvorrichtung angefertigt, die das TE-Modul beim Löten zusammenhält (siehe Abbildung 145).

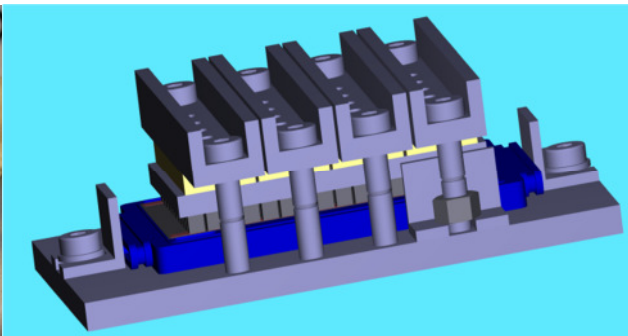
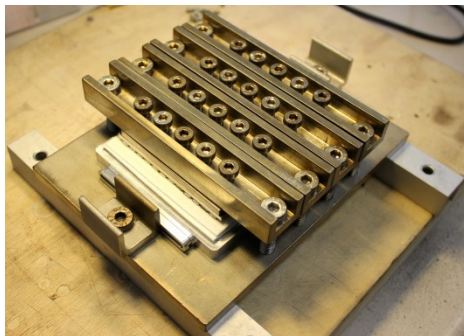


Abbildung 145: Verspannvorrichtung

Der Lötvorgang fand unter Schutzgasatmosphäre in einem Lötöfen statt. Dabei wurde der Rezipient auf eine Temperatur von 350 °C erhitzt und anschließend abgekühlt. Für eine bessere Benetzung der Werkstückoberfläche wurde ein Flussmittel auf Kolophonium-Basis verwendet.

Nach dem Zusammenbau des TE-Moduls wurde ein Funktionstest durchgeführt. Hierbei wurde überprüft ob die Substratschicht intakt ist, die Lötung erfolgreich war, der elektrische Kontakt kurzschlussfrei ist und die elektrische Leistung des TE-Moduls gegeben ist. Da bei der Vermessung nur eine Funktionsprüfung durchgeführt wurde, und keine Performancemessung, wurde das TE-Modul ohne Krafteinwirkung vermessen. Entsprechend gering sind die gemessenen Leistungen. Diese Vorsichtsmaßnahme wurde gewählt, um das TE-Modul nicht zu beschädigen. In der nachfolgenden Tabelle 12 sind die Messwerte dargestellt.

Messung	T_{heiss} °C	T_{kalt} °C	\dot{V} in l/min	U_0 in V	I in A	P_{el} in W
1	100	25	1,4	1,2	0	0
2	100	25		0,6	1,3	0,8
3	130	10	1,8	1,8	0	0
4	130	10		0,8	2,1	1,7
5	165	10	1,8	2,4	0	0
6	165	10		1	2,8	2,8
7	215	10	1,8	3,3	0	0
8	215	10		1,6	3,3	5,2
9	215	10	1,8	3,5	0,0	0
10	215	10		1,8	3,1	5,6

Tabelle 12: Messprotokoll vom Testaufbau eines TE-Moduls

Bei einem ΔT von 205 °C lieferte das TE-Modul eine elektrische Leistung von 5,6 W. Diese geringe Leistung ist dem nicht idealen Wärmeübergang von heißer Quelle zum TE-Modul geschuldet. Eine Optimierung würde hier sicherlich bessere Ergebnisse liefern.

Anzumerken ist, dass im Laufe des ersten Löttests festgestellt wurde, dass das eingesetzte Flussmittel in die Aluminiumoxidschicht eindringt und zu einer Ablösung der Beschichtung von der Bauteiloberfläche führt (s. Abbildung 146). An dieser Stelle müssen weitere Untersuchungen bezüglich eines Flussmitteleinsatzes vorgenommen werden.

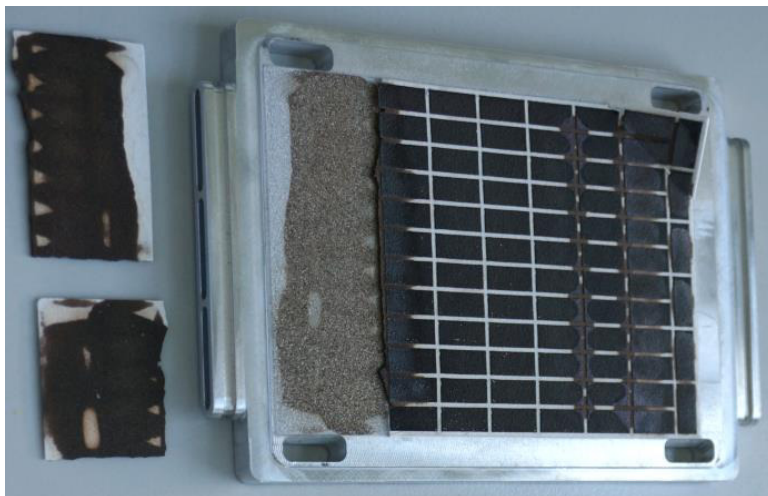


Abbildung 146: Ablösung der Al_2O_3 -Schicht durch Flussmittel

D) Funktionsversuche der Abgasklappen und Kennfeldaufnahme für Regelalgorithmus im Fahrzeug

Um das TEG-System zu komplettieren und die volle Funktionalität darzustellen, wurden im Rahmen des Projekts mehrere Abgasklappen entwickelt und als Versuchsteile aufgebaut. Ziel war es mit einer möglichst einfachen Konstruktion zu zeigen, dass eine definierte Temperatur über die TEG-Fluten einstellbar ist. Dies bedingte natürlich, dass eine Klappenstellung angesteuert und gehalten werden kann. Dadurch können Schutz- und Sicherheitsfunktionen für das TEG-System realisiert werden.

Es wurden verschiedene Stellmechanismen, -motoren, Klappengeometrien und Regelalgorithmen untersucht, um die Klappen zu stellen. In Abbildung 147 sind die verschiedenen Abgasklappen dargestellt. Die Variante unten rechts im Bild wurde im Fahrzeug eingesetzt. Sie besteht aus zwei Stellmotoren die unabhängig voneinander beide Klappen stellen können.

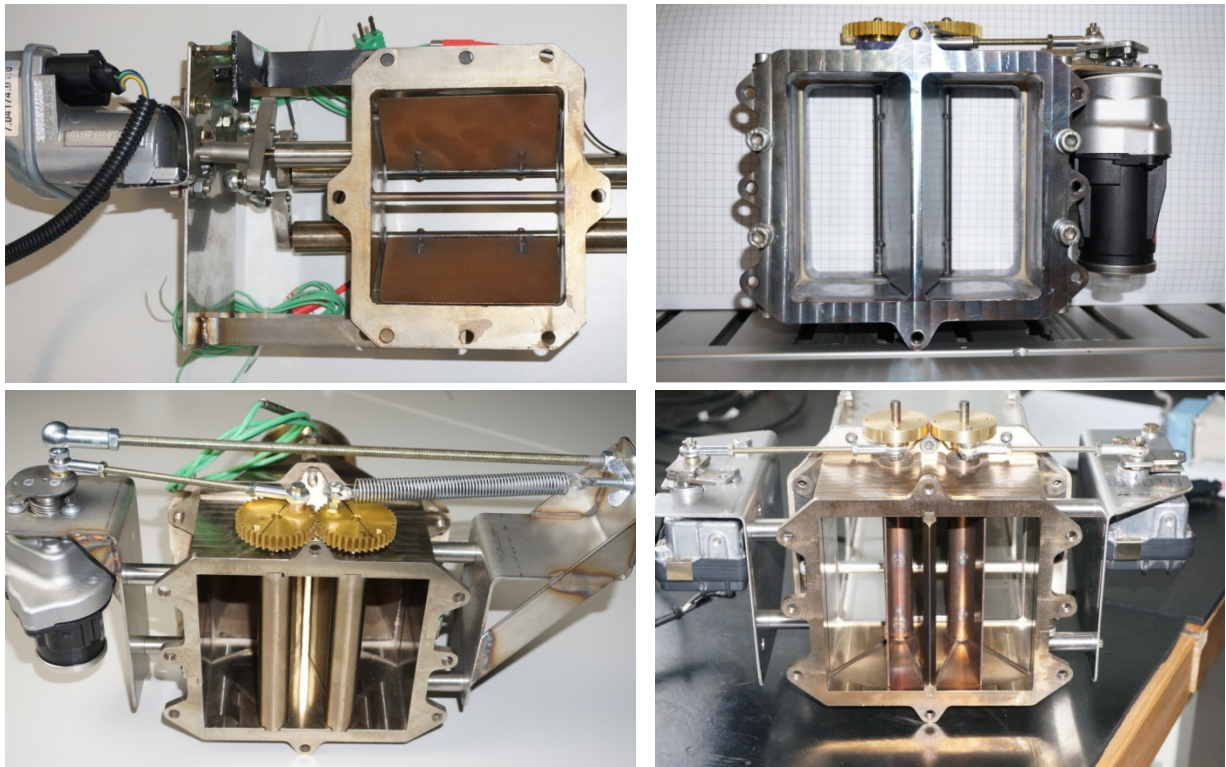


Abbildung 147: Verschiedene Prototypen für Abgasklappe

Funktionstest

In Abbildung 148 sind in Abhängigkeit der Lufteinlasstemperatur (grün) die Wärmeübertragertemperaturen der ersten und letzten Reihe (blau und braun) dargestellt, sowie der Gesamtmassenstrom (rot) und der Druckverlust (orange) durch das TEG-System. Die Erfassung der Einzelmassenströme durch den Bypass und die Arbeitsfluten ist nicht möglich.

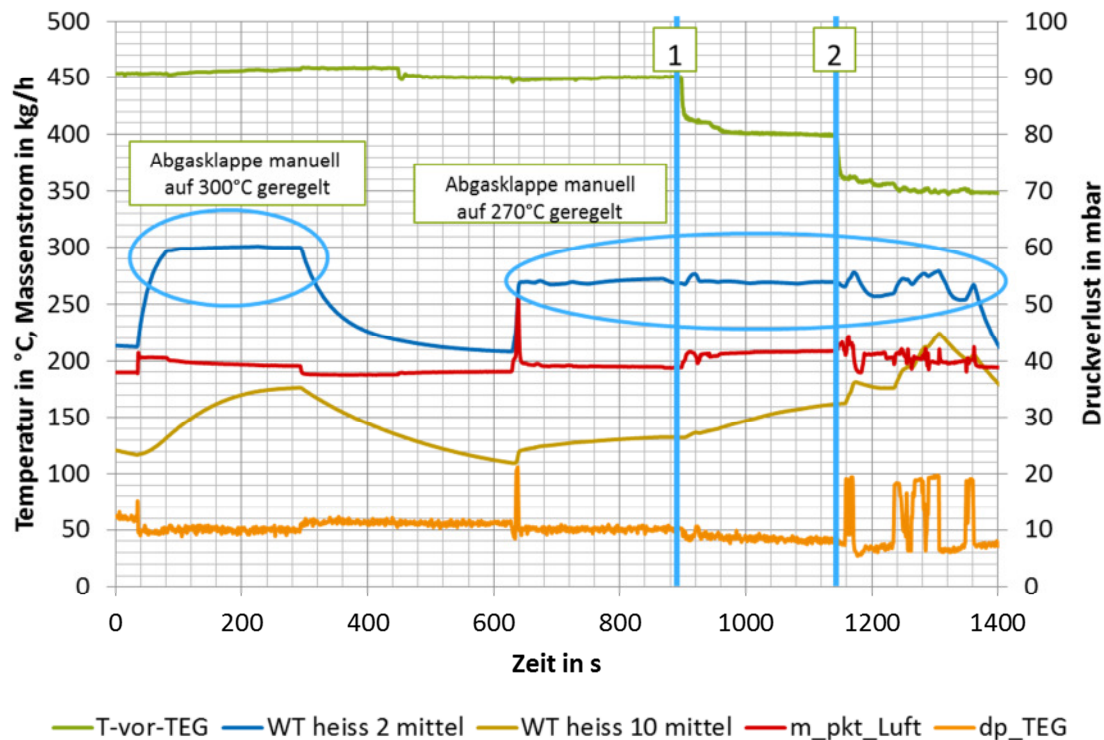


Abbildung 148: Funktionstest der Abgasklappe

Es wurde versucht durch manuelle Variation der Klappenstellung, die beiden Grenztemperaturen 300°C und 270°C (am Wärmeübertrager 2) einzustellen. Man erkennt deutlich das unterschiedliche Verhalten bei der Aufheizung und der Abkühlung. Aufgrund der hohen Wärmekapazität des massiven Wärmeübertragers findet eine Abkühlung deutlich langsamer statt. Zudem verhält sich der Wärmeübertrager der letzten Reihe deutlich träger. Dies ist auf den geringen Massenstrom durch die Arbeitsfluten zurück zu führen.

Bei Punkt 1 wurde die Lufttemperatur von 450°C auf 400°C verringert. Um die Temperatur am ersten Modul auf 270°C halten zu können, musste die Klappe etwas geöffnet werden. Dieser erhöhte Massenstrom kommt den hinteren Modulen zugute, was durch einen Anstieg der Wärmeübertragertemperatur (WT heiß 10) erkennbar ist.

Bei nochmaliger Verringerung der Lufttemperatur auf 350°C (Punkt 2), setzt sich das Verhalten fort. Der Gradient der Wärmeübertragertemperatur steigt sogar. Der ungleichmäßige Verlauf im Massenstrom und Druckverlust ist durch die manuelle Regelung zu erklären. Hier hat es sich als schwierig erwiesen, eine konstante Temperatur einzuregeln.

Der Versuch hat gezeigt, dass eine Regelung auf eine bestimmte Temperatur mit der umgesetzten Abgasklappe möglich ist. Zumal durch eine abgestimmte Applikation in Verbindung mit geeigneten Stellern diese Regelung noch besser funktionieren sollte.

Kennfeldaufnahme Abgasklappe

Für die Abgasklappenvorsteuerung wurde am Heißluftprüfstand Kennfelder der Klappenstellungen in Abhängigkeit von Temperatur und Massenstrom aufgenommen. Ziel dieser Messung war, durch die Vorsteuerung auch bei schnellen Änderungen des Abgasenergieangebotes eine ausreichend kurze Stellzeit der Klappen zu gewährleisten. Für die Kennfeldaufnahme wurde das 10-Modul-TEG-System verwendet (siehe Abbildung 149) wie es auch im Fahrzeug eingesetzt wurde.

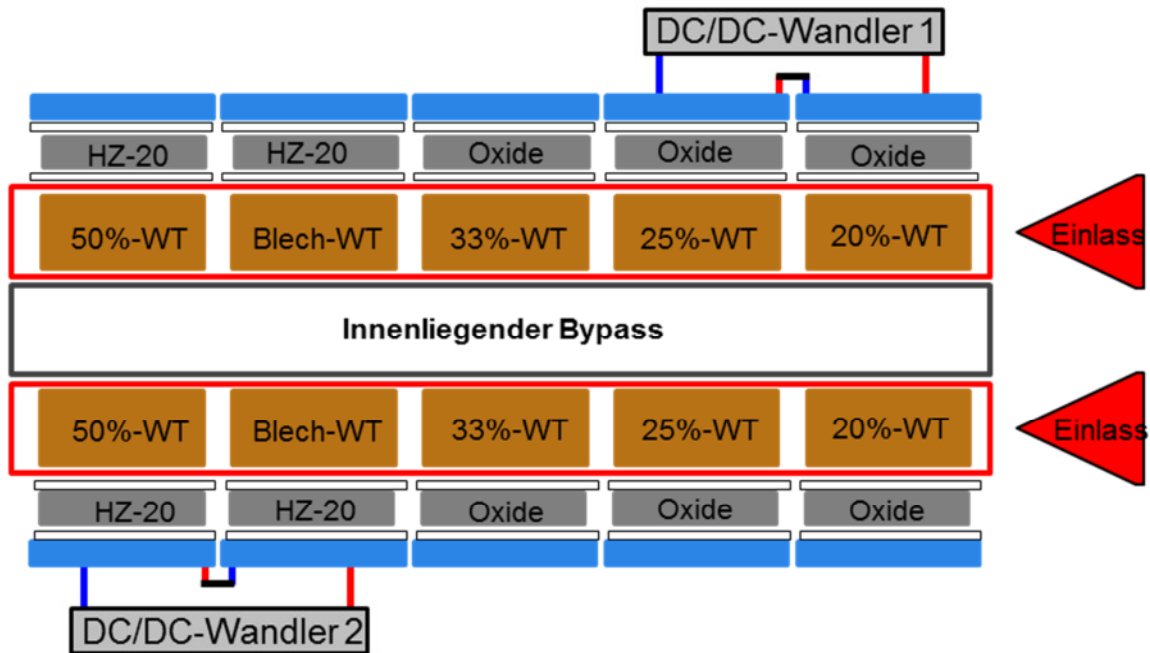


Abbildung 149: 10-Modul- TEG-System für den Fahrzeugeinsatz

Ausgestattet wurde das System in den ersten drei Reihen mit 0x-7 TES Oxid-Modulen, die für den Hochtemperaturbereich bis 800°C ausgelegt sind, und somit den hohen Abgastemperaturen aushalten. In den letzten beiden Reihen sind HZ-20 Module verbaut, die noch bis zu Temperaturen bis 300°C zuverlässig arbeiten. Mit dieser Konstellation konnte das Abgasenergieangebot möglichst effektiv ausgenutzt werden. Da die HZ20-Module bzgl. der Temperatur der einschränkende Faktor im System sind, wurde die Abgasklappenregelung für die 4. Reihe ausgelegt.

Die Wärmeübertrager sind so gewählt, dass eine möglichst gleichmäßige Energieentnahme aus dem Abgas stattfindet. In Längsrichtung steigt die Rippendichte von vorne nach hinten an.

Neben der Aufnahme des Kennfeldes wurden zudem noch die Funktionsfähigkeit der Abgasklappenmechanik und der Stellmotoren bei hoher Temperatur untersucht.

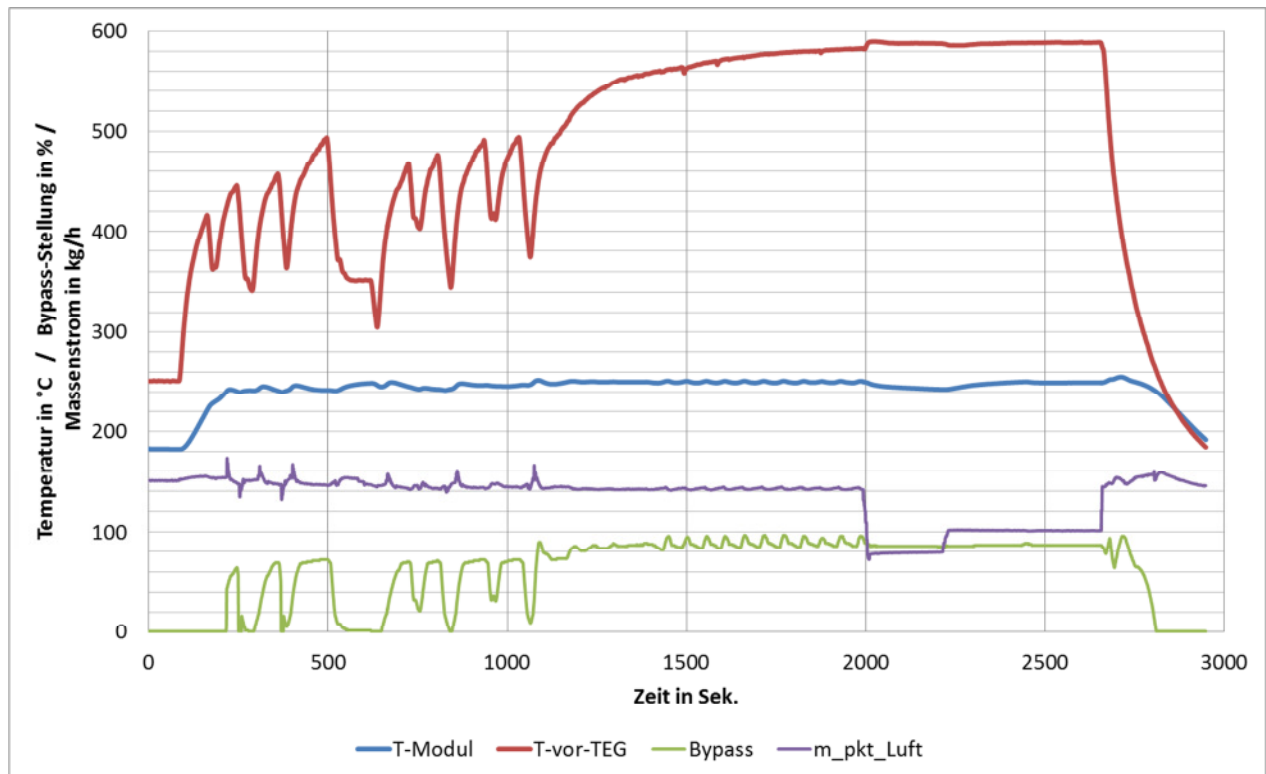


Abbildung 150: Versuchsreihe für die Abgasklappenregelung

Die Auswertung zeigt, dass die Implementierung des Vorsteuerkennfeldes gute Ergebnisse liefert. Abbildung 150 zeigt exemplarisch, dass auch bei hohen Temperaturgradienten (Bereich 0 bis 1000 Sekunden) die Oberflächentemperatur der 4. Reihe kaum reagiert und der Sollwert von 250 °C gut eingeregelt wurde. Ein ähnliches Verhalten zeigt die Oberflächentemperatur in dem Bereich ab 2000 Sekunden. Hier wurde der Massenstrom variiert. Auch hier konnte der Sollwert gut gehalten werden. Insgesamt konnte die Einsatzfähigkeit der Abgasklappen gezeigt werden. Auf dem Prüfstand wurden ca. 100 Betriebsstunden absolviert.

Die Überprüfung der realen Betriebspunkte wurde direkt im Fahrzeug vorgenommen. Eine Auswertung hierzu findet durch den Projektpartner BTU- Cottbus statt.

Abschätzung von gewonnener zu verbrauchter elektrischer Leistung

Für die Erstellung einer Leistungsbilanz des TEG müssen alle zusätzlichen Bauteile wie Wasserpumpe, Abgasklappen und Leistungswandler berücksichtigt werden, die für den Betrieb notwendig sind. Die folgende Berechnung soll eine qualitative Übersicht über das Leistungsverhältnis geben. Eine quantitative Berechnung ist nur mit fundierten Kenntnissen des jeweiligen Einsatzes und Betriebspunkts möglich.

Für die Rechnung werden zwei Stellmotoren für die Abgasklappe mit je einer Leistung von 12 W angenommen. Eine Leistungsaufnahme findet nur während des Schaltvorgangs statt. Bei konstanter Stellung hemmen sich die Motoren von selbst. Die Schaltzeit soll im ungünstigen Fall 0,25 Sekunden betragen. Somit ergibt sich für die konservative Abschätzung eine Leistung von ca. 6 W. Stellt man diese nun ins Verhältnis zur gewonnenen Leistung des TEG mit 250 W im Teillast- bzw. 500 W im Volllastbetrieb, ergibt sich eine Einbuße von 2,5 - 1%.

Äquivalent dazu erfolgt die Berechnung für die Wasserpumpe. Hier wird von einer Leistung von 50 W und einer Einschaltdauer im Mittel von 100% ausgegangen. Hier ist berücksichtigt,

dass die Wasserpumpe auch nach dem Abstellen des Fahrzeugs noch betrieben werden könnte. Somit ergibt sich auch hier bei pessimistischer Abschätzung für die Teil- bzw. Vollast eine Einbuße von ca. 20 - 10%.

Da davon ausgegangen werden kann, dass die Wasserpumpe während des Kaltstarts nicht, und eher zu hohen Lasten hin benötigt wird, kann die Einbuße im Bereich von 10% gesehen werden. Eine intelligente Ankopplung des TEG-Kühlkreislaufs an den Kühlkreislauf des Motors ergäbe hier sicher noch weiteres Einsparpotenzial.

Auf die Abschätzung des Leistungswandlers wird in dem Bericht unseres Projektpartners eingegangen.

In Summe kann man davon ausgehen, dass 10% von der gewonnenen elektrischen Leistung des TEG für den eigenen Betrieb aufgebracht werden muss.

Versuche mit einem luftgekühlten TEG-System der Firma Duropan

Ziel der Vermessung war die Aufnahme der Leerlaufspannungen sowie der elektrischen Leistung, sowie die Überprüfung der Einsatzmöglichkeit im Fahrzeug.

Der TEG ist aus insgesamt 60 BiTe-Modulen aufgebaut, die direkt mit der heißen und kalten Seite verklebt sind. Der Kaltseitenwärmeübertrager besteht aus Graphitlamellen und ist luftgekühlt. Die Heißeitenwärmeübertrager bestehen aus engen Kanälen, die mäanderförmig angeordnet sind. Diese werden mit heißem Wasser durchflossen. Elektrisch sind die Module in zwei Kreisen seriell verschaltet.

Die Versuche wurden an einem Luftprüfstand durchgeführt (siehe Abbildung 151). Dieser Prüfstand besteht aus einem Messraum, der vakuumdicht verschlossen werden kann und definierte Ein- und Ausströmöffnungen besitzt. Variiert wurden die Temperaturen und Durchflüsse auf der heißen und kalten Seite.



Abbildung 151: Einbau des TEG in Wärmetauscher-Prüfstand

Bei der Vermessung wurden die angegebenen Werte aus dem Datenblatt nicht erreicht. Als Ursache hat sich eine fehlerhafte Klebung der heißen Seite an den TE-Modulen herausgestellt. Durch den entstandenen Luftspalt wurde der Wärmetransport behindert und die erreichbare Temperaturdifferenz an den TE-Modulen gemindert.

In den einzelnen Messkreisen wurden folgende elektrische Leistungen gemessen:

Kreis 1	2,3 W (5,3 V) bei 80 °C Temperaturdifferenz (Luft zu Wasser)
Kreis 2	2,1 W (4,7 V) bei 80 °C Temperaturdifferenz (Luft zu Wasser)

1.7.3.4 AP 83 200 Motorprüfstandtests

HiL-Simulation am Diesel-Motor-PST

Ziel der Untersuchungen am Motorprüfstand ist, das TEG-System unter realen Abgas- und Motorbetriebsbedingungen zu testen und Erkenntnisse über Funktion, Systemverhalten, mechanische und thermische Stabilität zu erlangen. Weiterhin werden die entwickelten Steuer- und Regelkonzepte sowie Betriebsstrategien überprüft und optimiert.

Bei den Untersuchungen am Motorprüfstand stand insbesondere der Einsatz eines TEG-Systems in Verbindung mit einem PKW-Dieselmotor in Fokus der Betrachtungen. Aufgrund des im Vergleich zum Ottomotor geringeren Abgastemperaturniveaus stellt dies eine besondere Herausforderung für diese Kombination dar. Des Weiteren besitzen Dieselmotoren ein aufwändigeres motornahes Abgasreinigungssystem als Ottomotoren. Der verwendete Dieselmotor ist mit einem aktiven Abgasnachbehandlungssystem zur Minderung der Stickoxide ausgerüstet. Die Abgasnachbehandlung besteht aus einem motornahen Oxidationskatalysator gefolgt von einem SCR-beschichteten Partikelfilter (SCR/DPF). Die Fahrzeugumgebung wird durch ein Velodyn-Simulationsmodell abgebildet. Als repräsentative Fahrzeuganwendung wurde ein E-Segmentfahrzeug gewählt (Abbildung 138).

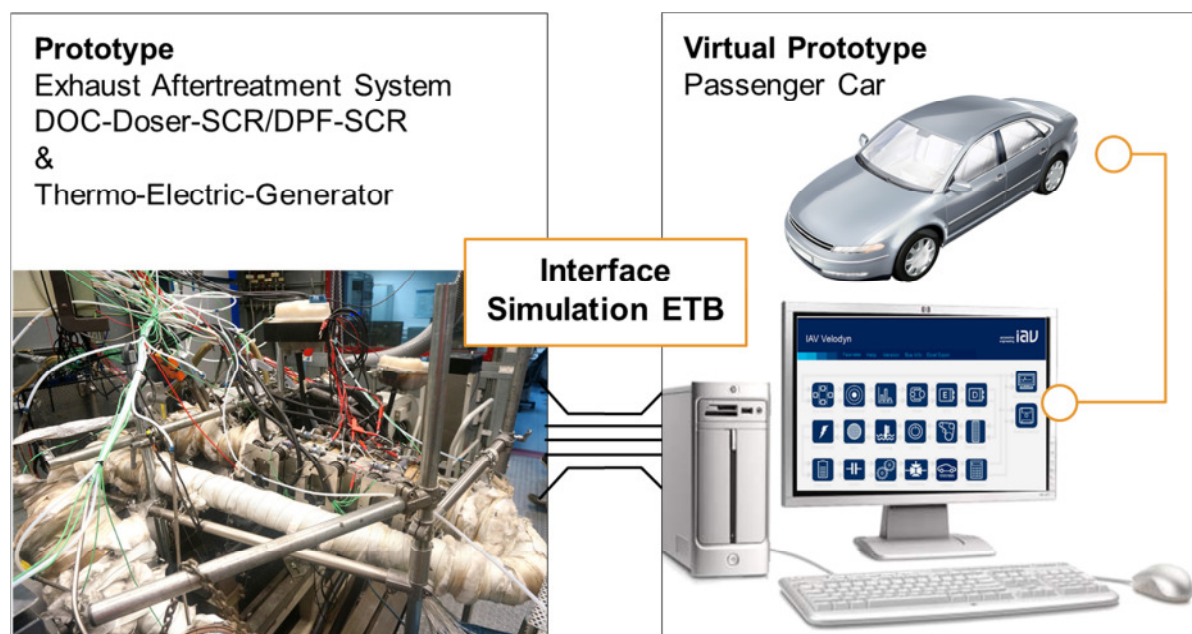


Abbildung 152: Fahrzeugsimulation am Motorprüfstand

Die Regelung und Steuerung der Aktivität des TEG-Systems erfolgt temperaturabhängig. Zielgröße ist die Temperatur im SCR/DPF-Katalysator.

Konzeption

Für Dieselmotoren kommt aus konzeptioneller Überlegung nur eine Positionierung des TEG vor den Komponenten der Abgasnachbehandlung in Frage. Hauptparameter dabei sind die thermische Masse des TEG und die Temperaturverluste zwischen Abgasturbolader und Abgasnachbehandlungssystem. Der konzeptionelle Ansatz besteht in der Architektur des Gesamtsystems. Dabei ist der TEG in einem Bypass zwischen Turbine und Oxidationskatalysator positioniert (Abbildung 153).

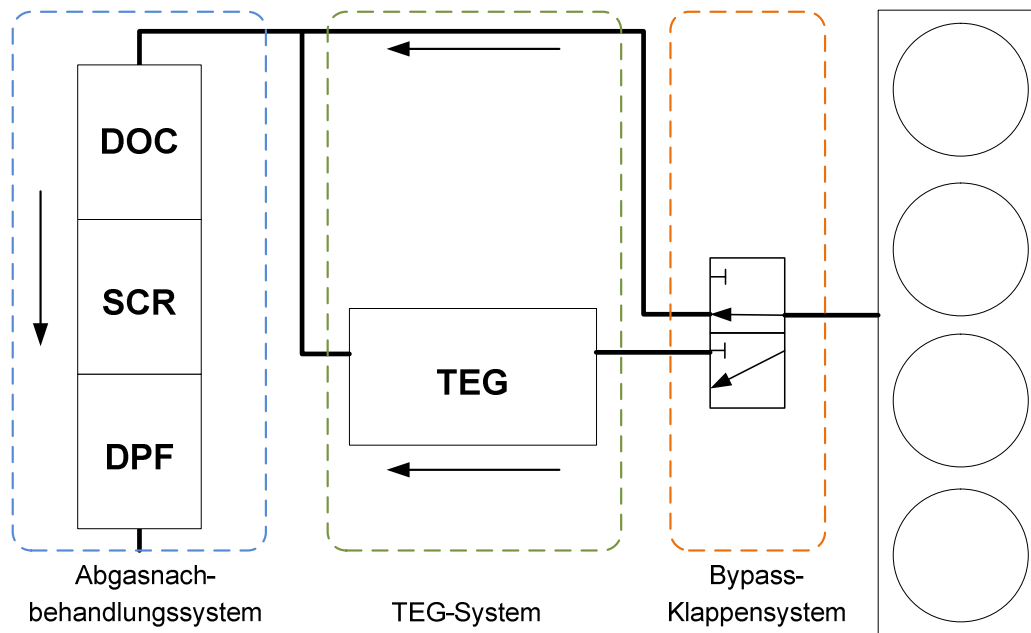


Abbildung 153: Systemarchitektur TEG-Abgasnachbehandlung

Während der Warmlaufphase des Dieselmotors wird der TEG mittels Umschaltklappensystem gebypassed, sodass die thermische Masse des TEG nicht zu einem verzögerten Aufheizverhalten der Abgasnachbehandlung führt. Eine weitgehende thermische Entkopplung des TEG vom Abgasrohr ist dabei sinnvoll. Nach dem Erreichen der Zieltemperatur der Katalysatoren werden die Bypassklappen so gestellt, dass der heiße Abgasmassenstrom durch den TEG hindurchströmt und Abgasenergie rekuperiert werden kann. Dabei ist die Temperaturregelung so konzipiert, dass eine gewünschte Zieltemperatur an den Katalysatoren, insbesondere am SCR-Katalysator, eingestellt werden kann. Ziel ist es 200 – 250 °C im SCR-Katalysator möglichst stabil einzuregeln, um eine optimale Funktion der Komponente zu gewährleisten. Je größer das Temperaturniveau am Ausgang der Turbine ist, umso höher ist das Rekuperationspotenzial.

Realisierung

Die Prüfstandsversuche wurden mit einem aktuellen PKW-Dieselmotor durchgeführt. Das TEG-System wurde hierbei in gleichem Aufbau übernommen, wie es im Fahrzeug verwendet wurde (Abbildung 154).

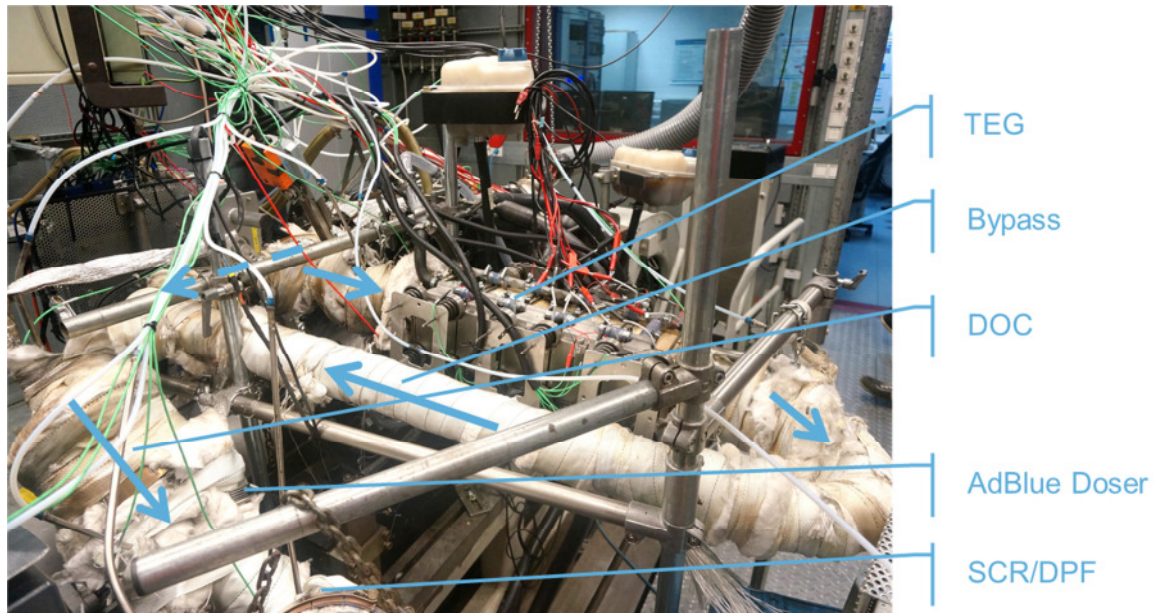


Abbildung 154: Aufbau Diesel-Motorprüfstand mit TEG-System

Das Bypassklappensystem wurde zur Darstellung der Funktionalität als Rapid-Prototype-System ausgeführt (Abbildung 155).

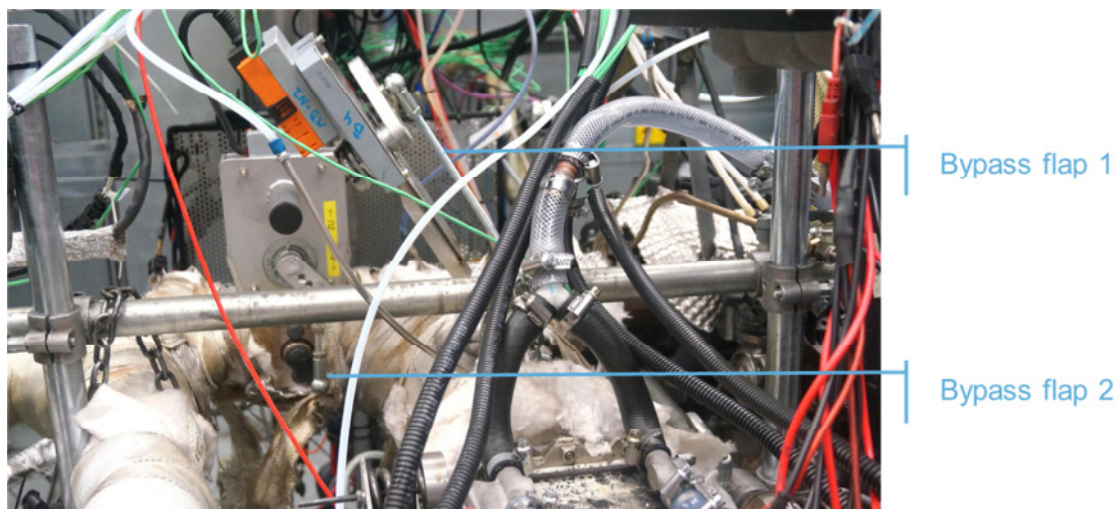


Abbildung 155: Rapid-Prototype-Bypassklappensystem

Die experimentellen Untersuchungen am Motorprüfstand erfolgten in folgenden Schritten:

- Entwurf Diesel-Abgasnachbehandlungsprototypensystem (Architektur)
- Entwurf des Regelungskonzeptes
- Aufbau TEG-Prototypensystem
- Integration des TEG-Prototypensystems in die Abgasanlage
- Instrumentierung des Gesamtsystems
- Aufbau des Gesamtsystems auf dem Motorprüfstand
- Inbetriebnahme des Gesamtsystems

- Untersuchung der Funktionalität und Gesamtsystemperformance in dynamischen Motorbetriebszuständen

Abbildung 156 zeigt den TEG-Prototypen mit Instrumentierung. Zur Überwachung der Funktion des TEG wurden Temperatur- und Druckmessstellen verbaut.

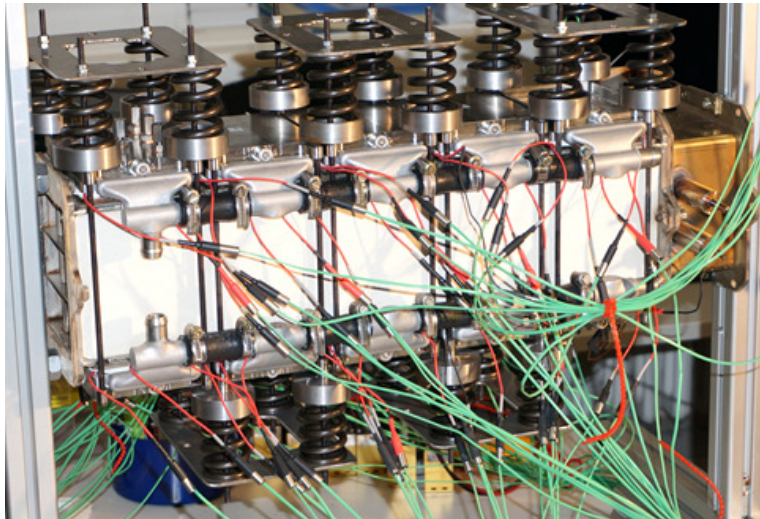


Abbildung 156: TEG-Prototypen mit Instrumentierung

Die zentrale Steuerung der Fahrzeugumgebung (Simulink-Fahrzeugmodell) erfolgt über eine EMCON-MATLAB-Schnittstelle via Puma-CAN des Motorprüfstandes. Für den transienten Betrieb des TEG am Motorprüfstand wird die Fahrzeugumgebung simuliert. Hierbei wird die Leistungsanforderung an den Dieselmotor in Bezug auf Motordrehzahl und Motordrehmoment berechnet. Das Prinzip ist in Abbildung 157 schematisch dargestellt.

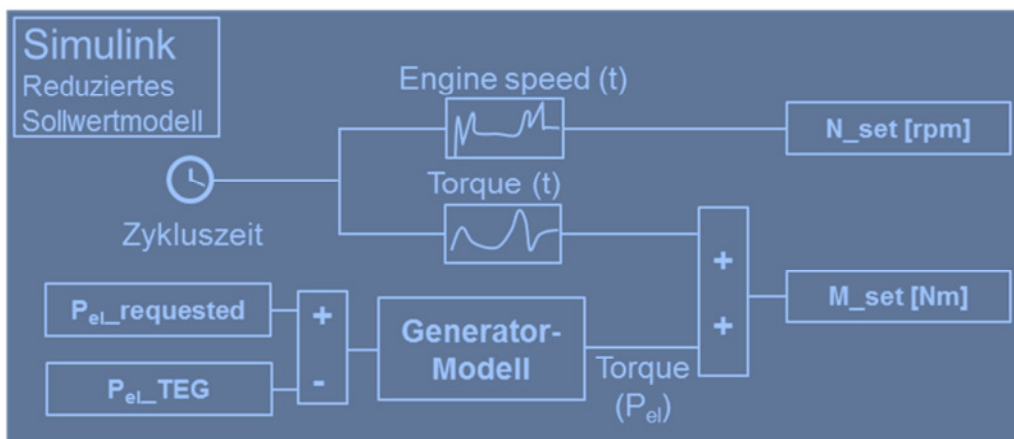


Abbildung 157: Simulink-Modell zur Berechnung von Motordrehzahl und -moment

Folgende Versuchsinhalte wurden festgelegt.

- Überprüfung und Optimierung entwickelter Konzepte für Rapid-Prototype-Abgasklappenregelung
- Simulationen für:
 - Eine Fahrzeugvariante im Oberklasse D-Segment
 - TEG-Kühlwasser-Eintrittstemperatur von $\sim 20^\circ\text{C}$

- Vier Fahrzyklen: WLTC, ADAC BAB, US06
- Erkenntnisse und Messdaten für das TEG-System aus/über:
 - Dynamischen Motorbetrieb in verschiedenen Prüfzyklen mit unterschiedlich hoher Dynamik

Ergebnisse

Abbildung 156 zeigt die Temperaturregelung mittels TEG-System im WLTC auf 240°C vor SCR-System. Der WLTC-Zyklus wurde bei ca. 30°C kalt gestartet.

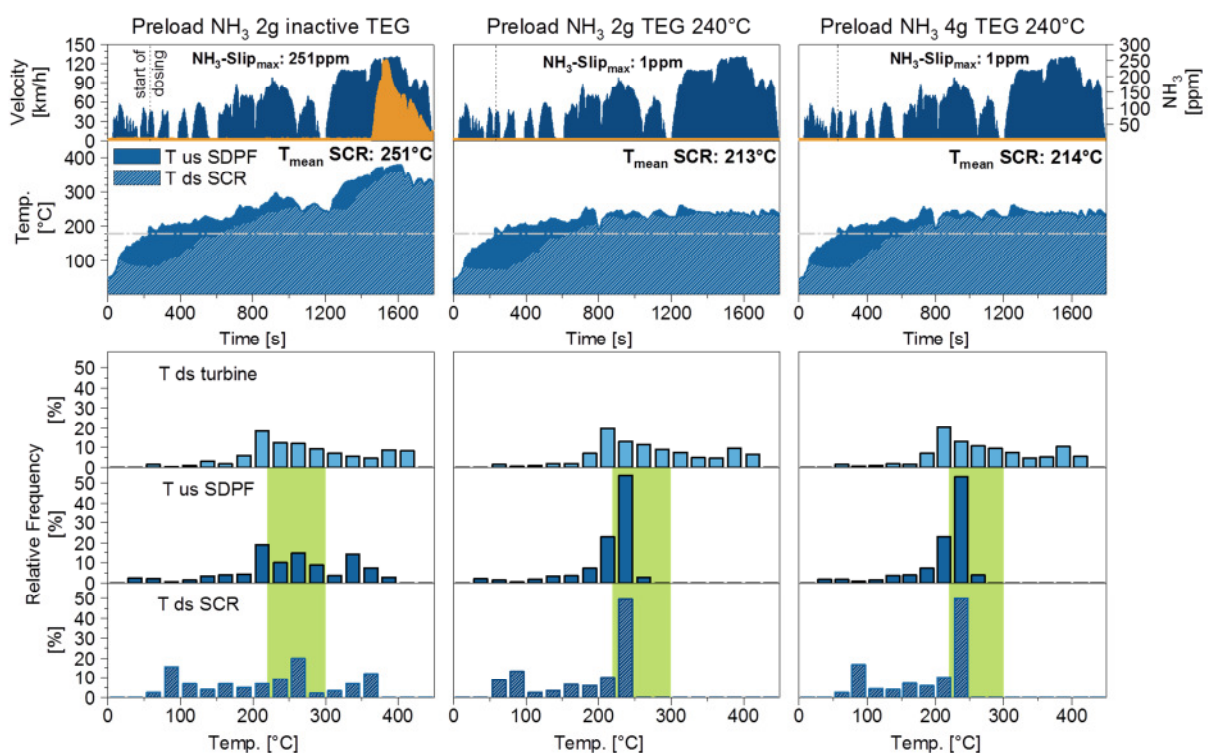


Abbildung 158: Abgastemperatur-, NH₃-Verläufe und Temperaturhistogramme im WLTC

Ab Sekunde 1200 überschreitet die Abgastemperatur vor dem SCR-System den Optimalbereich für die Entstickung des Abgases von 200 – 250°C mittels SCR-System. Ab Sekunde 1400 führt die hohe Temperaturdynamik im SCR-System zum deutlichen Verlust an NH₃-Speicherfähigkeit. Es kommt zu NH₃-Schlupfwerten bis zu 251ppm ab Auspuffende. Ab hier beginnt das Rapid-Prototype-Klappensystem den Bypass zum TEG zu öffnen, um die überschüssige Energie anteilig zu rekuperieren. Im Frequenzspektrum der Abgastemperaturen vor und nach dem SCR-System ist die Anpassung auf ca. 250°C zu erkennen. Die Maximalwerte befinden sich innerhalb der grün hinterlegten Zielbereiche. Während der Aufheizphase des Abgasnachbehandlungssystems ist das TEG-System inklusive der thermischen Masse gebypassed. Somit kann die verfügbare Abgasenergie des Dieselmotors bis Sekunde 600 zu schneller Aufwärmung eingesetzt werden, um die Funktion des SCR-Systems zu gewährleisten.

Zur Realisierung eines hohen NO_x-Umsatzes wurde das SCR-System mit 2g NH₃ durch die Vorkonditionierung vorbeladen.

Abbildung 159 zeigt die NO_x-Abgasemissionen und DeNO_x-Effizienzen im WLTC-Zyklus.

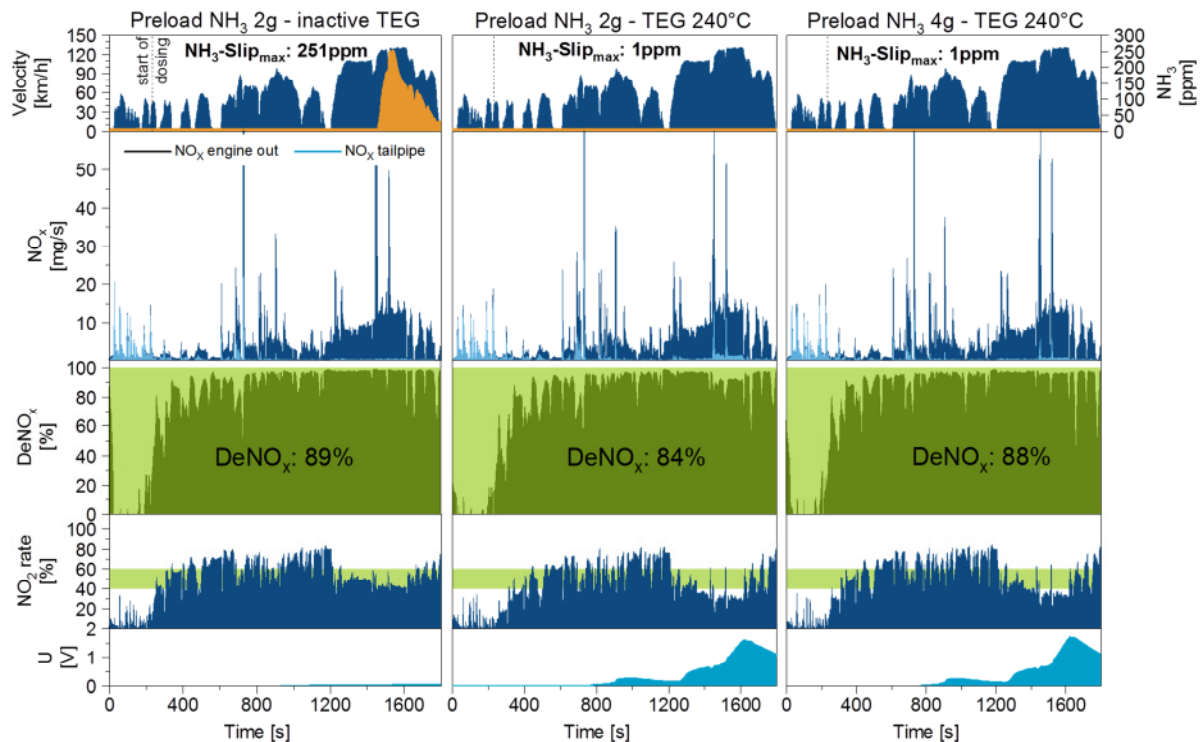


Abbildung 159: NO_x-Emissionen, DeNO_x-Effizienzen, NH₃-Verläufe und TEG-Modulspannung im WLTC

Im Referenztest mit inaktivem TEG-System werden mit einer Vorladung von 2g NH₃ hohe NO_x-Umsatzraten von über 90% im WLTC ab Sekunde 400 erzielt. Im Zyklusmittel ergibt sich eine DeNO_x-Rate von 89%. Allerdings führt die hohe Temperaturdynamik zu einem hohen NH₃-Schlupfrisiko, welches bei Sekunde 1400 zu hohen NH₃-Emissionen am Auspuffende führt. Der Einsatz des TEG-Systems zur Begrenzung der Temperaturdynamik im SCR-System optimiert die NH₃-Speicherfähigkeit der SCR-Katalysatoren und verhindert relevanten NH₃-Schlupf. Die dabei tendenziell fallende mittlere DeNO_x-Rate von 89% auf 84%, kann über eine erhöhte NH₃-Vorladung des SCR-Katalysatorsystems von 2g auf 4g auf 88% zurückgeführt werden.

Im kalt gestarteten WLTC konnte für einen PKW-Dieselmotor die synergetische Interaktion des TEG-Systems und des Abgasnachbehandlungssystems gezeigt werden.

Abbildung 160 zeigt die Temperaturregelung mittels TEG-System im ADAC Bundesautobahntest (BAB) auf 240 °C vor SCR-System. Der ADAC-BAB-Zyklus wurde als Heißtest gefahren.

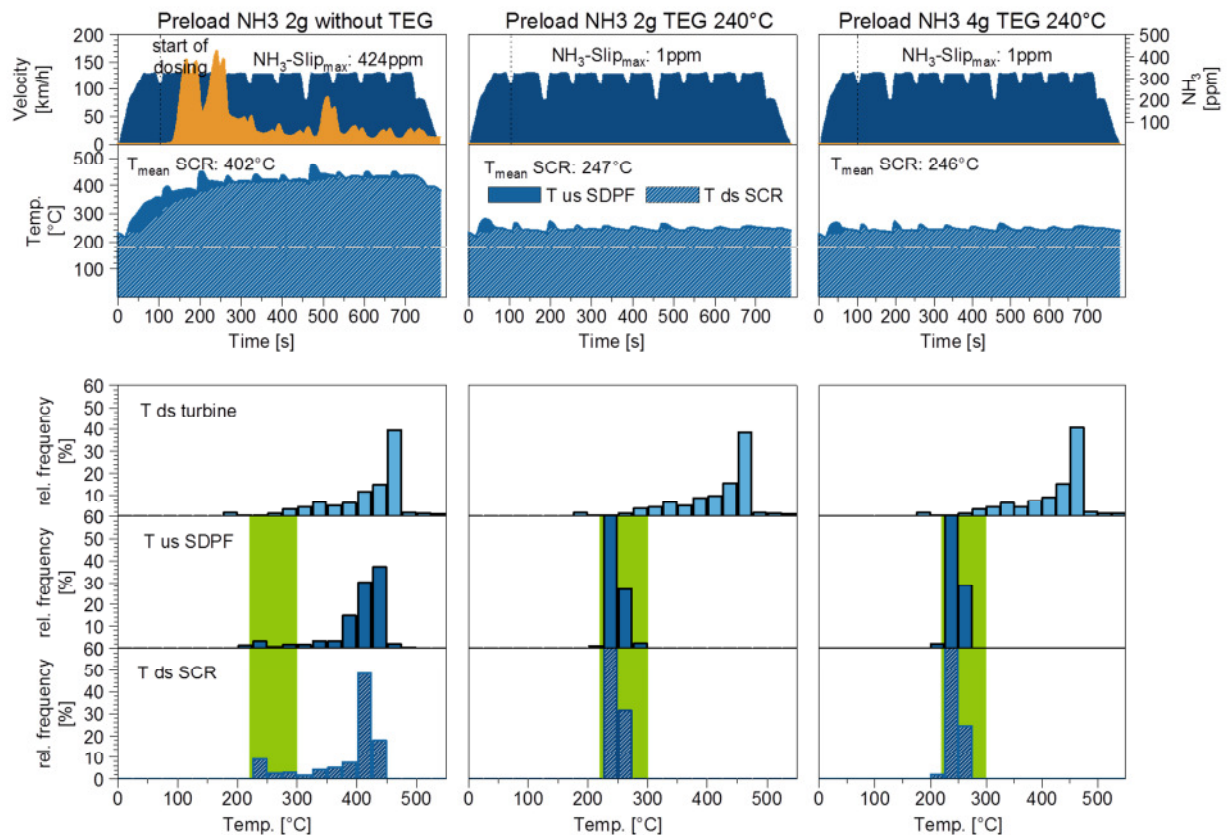


Abbildung 160: Abgastemperatur-, NH₃-Verläufe und Temperaturhistogramme im ADAC BAB Testzyklus

Ab Sekunde 50 überschreitet die Abgastemperatur vor dem SCR-System den Optimalbereich für das SCR-System von 200 – 250 °C. Ab Sekunde 150 führt die hohe Temperaturdynamik im SCR-System zum deutlichen Verlust an NH₃-Speicherfähigkeit. Es kommt zu NH₃-Schlupfwerten bis zu 424ppm ab Auspuffende. Ab Sekunde 50 beginnt das Rapid-Prototype-Klappensystem den Bypass zum TEG zu öffnen, um die überschüssige Energie anteilig zu rekuperieren. Im Frequenzspektrum der Abgastemperaturen vor und nach dem SCR-System ist die Anpassung auf ca. 250 °C zu erkennen. Die Maximalwerte befinden sich innerhalb der grün hinterlegten Zielbereiches.

Zur Realisierung eines hohen NO_x-Umsatzes wurde das SCR-System mit 2g NH₃ durch die Vorkonditionierung vorbeladen.

Abbildung 161 zeigt die NO_x -Abgasemissionen und DeNO_x -Effizienzen im ADAC-BAB-Zyklus.

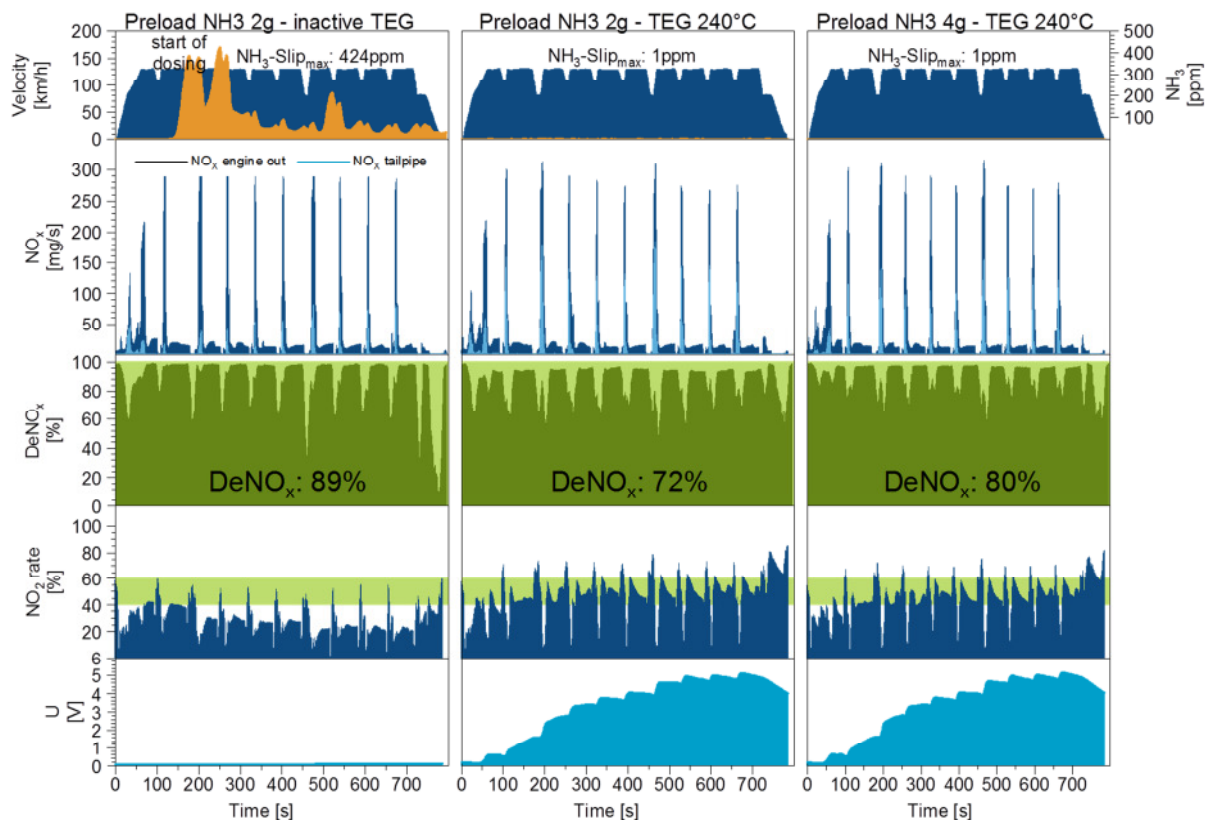


Abbildung 161: NO_x -Emissionen, DeNO_x -Effizienzen, NH_3 -Verläufe und TEG-Modulspannung im ADAC BAB

Im Referenztest mit inaktivem TEG-System werden mit einer Vorbeladung von 2g NH_3 hohe NO_x -Umsatzraten von über 90% im ADAC-BAB erzielt. Im Zyklusmittel ergibt sich eine DeNO_x -Rate von 89%. Allerdings führt die hohe Temperaturdynamik zu einem hohen NH_3 -Schupfrisiko, welches bei Sekunde 150 zu hohen NH_3 -Emissionen am Auspuffende führt. Der Einsatz des TEG-Systems zur Begrenzung der Temperaturdynamik im SCR-System optimiert die NH_3 -Speicherfähigkeit der SCR-Katalysatoren und verhindert relevanten NH_3 -Schlupf. Die dabei tendenziell fallende mittlere DeNO_x -Rate von 89% auf 72%, kann über eine erhöhte NH_3 -Vorbeladung des SCR-Katalysatorsystems von 2g auf 4g auf 80% optimiert werden. Gleichzeitig wird die optimale NO_2/NO_x -Rate von 40 – 60% sehr gut eingestellt.

Im heißen ADAC-BAB-Zyklus ist die optimale Leistungsfähigkeit des TEG-Systems zur Konditionierung des SCR-Abgasnachbehandlungssystems zu erkennen.

Abbildung 162 zeigt die Temperaturregelung mittels TEG-System im US06 Testzyklus auf 240°C vor SCR-System. Der US06-Zyklus wurde als Heißtest gefahren.

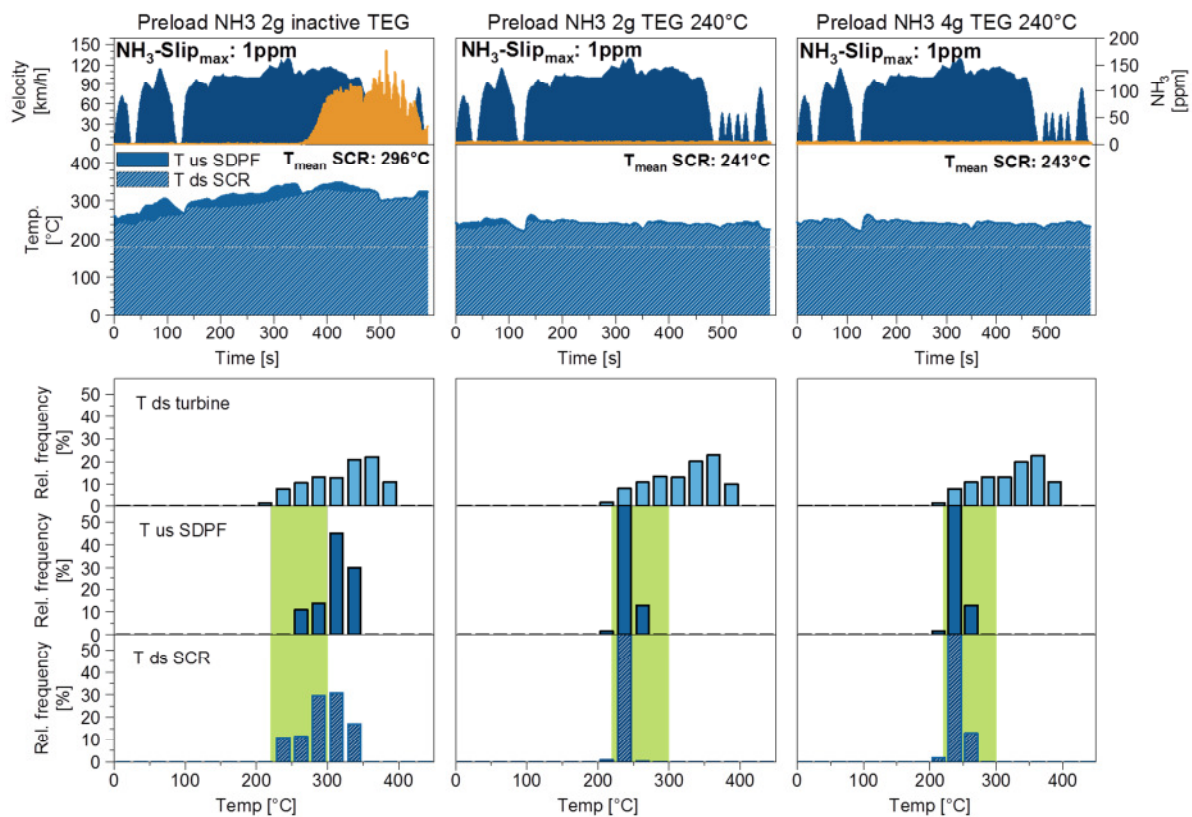


Abbildung 162: Abgastemperatur-, NH₃-Verläufe und Temperaturhistogramme im US06 Testzyklus

Zum Beginn des Tests überschreitet die Abgastemperatur vor dem SCR-System den Optimalbereich des SCR-Systems von 200 – 250°C. Ab Sekunde 150 führt die hohe Temperaturdynamik im SCR-System zum deutlichen Verlust an NH₃-Speicherfähigkeit. Es kommt zu NH₃-Schlupfwerten bis zu 175ppm ab Auspuffende. Ab Teststart beginnt das Rapid-Prototype-Klappensystem den Bypass zum TEG zu öffnen, um die überschüssige Energie anteilig zu rekuperieren. Im Frequenzspektrum der Abgastemperaturen vor und nach dem SCR-System ist die Anpassung auf ca. 250°C zu erkennen. Die Maximalwerte befinden sich innerhalb der grün hinterlegten Zielbereiche.

Zur Realisierung eines hohen NO_x-Umsatzes wurde das SCR-System mit 2g NH₃ durch die Vorkonditionierung vorbeladen.

Abbildung 163 zeigt die NO_x-Abgasemissionen und DeNO_x-Effizienzen im US06-Zyklus.

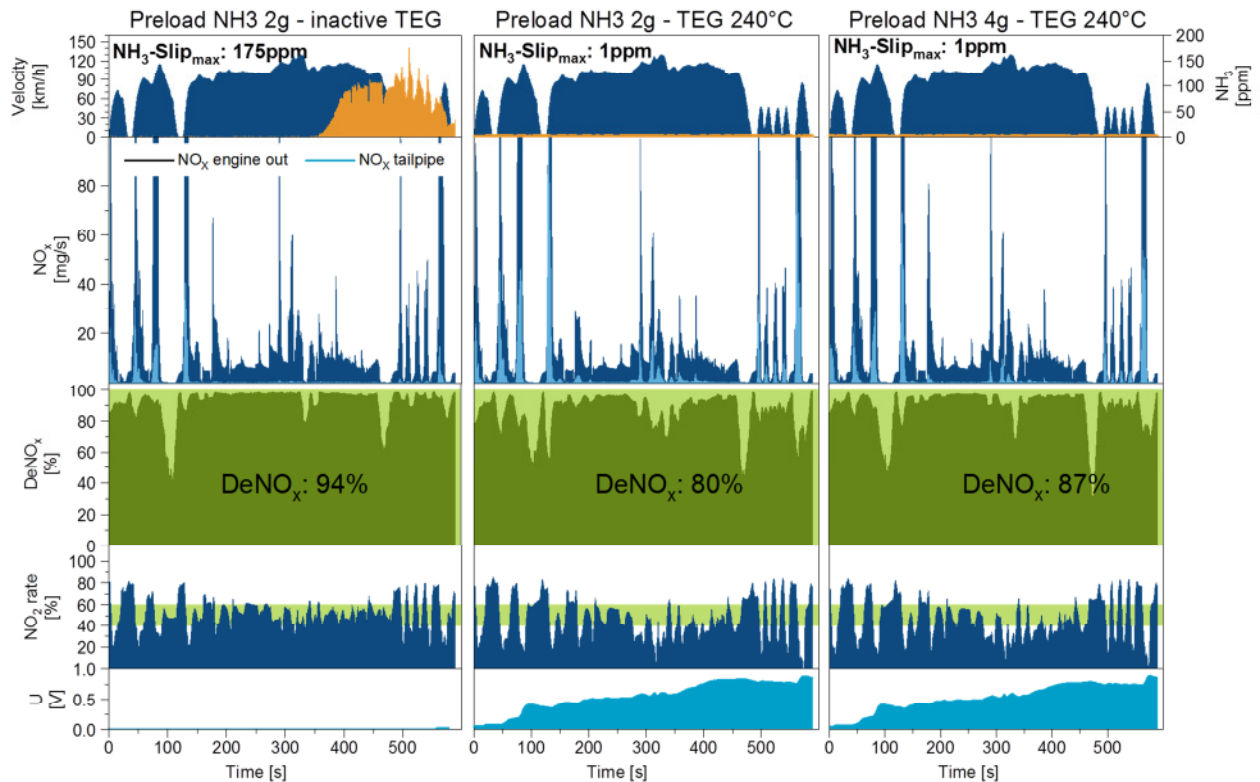


Abbildung 163: NO_x-Emissionen, DeNO_x-Effizienzen, NH₃-Verläufe und TEG-Modulspannung im US06

Im Referenztest mit inaktivem TEG-System werden mit einer Vorbelastung von 2g NH₃ hohe NO_x-Umsatzraten von über 90% im US06 erzielt. Im Zyklusmittel ergibt sich eine DeNO_x-Rate von 94%. Allerdings führt die hohe Temperaturdynamik zu einem hohen NH₃-Schupfrisiko, welches bei Sekunde 350 zu hohen NH₃-Emissionen am Auspuffende führt. Der Einsatz des TEG-Systems zur Begrenzung der Temperaturdynamik im SCR-System optimiert die NH₃-Speicherfähigkeit der SCR-Katalysatoren und verhindert relevanten NH₃-Schlupf. Die dabei tendenziell fallende mittlere DeNO_x-Rate von 94% auf 80%, kann über eine erhöhte NH₃-Vorbelastung des SCR-Katalysatorsystems von 2g auf 4g auf 87% optimiert werden.

1.7.4 AP 85 000 OEM Zielsysteme (Fahrzeug/BHKW/etc.)

Blockheizkraftwerke (BHKW) sind sehr gut für den Einsatz der Thermoelektrik geeignet. Durch die Integration eines TEG in die Abgasanlage des BHKW kann ein Teil der Verlustwärme in elektrische Energie umgewandelt werden. Die stationär laufende Antriebseinheit des BHKW liefert günstige Betriebsbedingungen für den TEG. Die kontinuierliche Stromabgabe des TEG während des BHKW-Betriebs steigert den Anteil der gewonnenen elektrischen Energie und damit den Gesamtwirkungsgrad der Anlage.

Im Rahmen des Projekts TEG2020 wurde angestrebt, den für das Fahrzeug entwickelten TEG auch in ein BHKW zu verbauen. Die Integration erfolgt im Abgasstrang nach dem Katalysator und vor dem Abgas-Wärmetauscher (s. Abbildung 164).

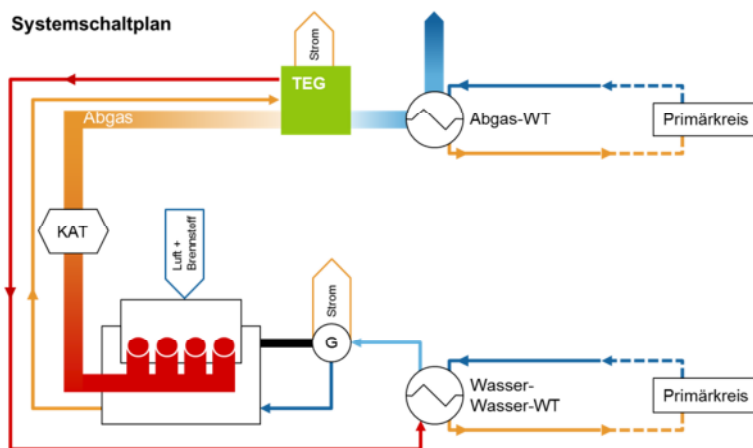


Abbildung 164: Systemschaltplan BHKW-TEG



Abbildung 165: CAD-Konzept BHKW

Das Konzept sah vor, den TEG außerhalb des BHKW-Gehäuses in ein separates Gestell einzubringen. Dies hat zum einen der Vorteil, dass das der TEG schnell wieder entfernt werden kann, und zum anderen, dass er von außen gut zugänglich und repräsentativ ist (s. Abbildung 165). Die Berechnung des Energieinhaltes in Abgasstrom hat eine Leistung von 5-6 kW ergeben. Auf dieser Grundlage konnte eine rekuperierte elektrische Leistung von 500-700W simuliert werden, basierend auf PbTe-Material.

Da das Konzept aus Zeit- und Kostengründen nicht umgesetzt wurde, konnte ein Rechnung-/Messungsvergleich nicht durchgeführt werden.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Material

124.180 EUR waren laut Änderungsbescheid vom 03.12.2013 geplant. Davon konnten durch effektive Konstruktion und Entwicklung sowie Preisverhandlungen 15.096,81 EUR eingespart werden, so dass insgesamt nur 109.083,19 EUR an Materialaufwendungen angefallen sind.

Personalkosten

Bei den Personalkosten waren laut Änderungsbescheid Kosten in Höhe von 1.892.121 EUR beantragt und genehmigt worden. Im Projektverlauf musste der Jobsplit zwischen den Partnern angepasst werden, da Benteler auf Grund von Ressourcenengpässen bestimmte Arbeitspakete nicht vollständig durchführen konnte. IAV musste sich daher, abweichend zu der ursprünglichen Projektplanung, verstärkt bei der Konzepterarbeitung für stoffschlüssige TE-Module engagieren und IPM bei der Herstellung von Prototypenteilen unterstützen. Weiterhin hat IAV einen wesentlichen Anteil der Aktivitäten zum TEG-Systemaufbau und Inbetriebnahme übernommen. Diese Zusatzumfänge führten zu einer Erhöhung der Personalkosten (Kostenart 0837) um 84.691,28 EUR (ca. 5%).

Abschreibungen

Es waren projektbezogene Investitionen vorgesehen, die während der Projektlaufzeit Abschreibungen in Höhe von 18.643 EUR ergeben hätten. Die Investitionen wurden getätigt, jedoch durch den Projektfortschritt bedingt, später als ursprünglich geplant. Somit haben sich für den abschreibungsfähigen Zeitraum Abschreibungen in Höhe von 15.547,23 EUR ergeben.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Der Verlauf der Arbeit im Projekt TEG2020 folgte der im Antrag formulierten Planung und war daher, wie einzeln aufgeführt, für die technologisch hochgesteckte Ziele des Vorhabens notwendig und in dieser Form angemessen. Alle im Arbeitsplan definierten Aufgaben wurden erfolgreich bearbeitet, es waren keine zusätzlichen Ressourcen für das Projekt nötig.

4 Voraussichtlicher Nutzen / Verwertbarkeit der Ergebnisse

4.1 Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen, erteilte Schutzrechte, (standortbezogene) Verwertung, weitere Verwertungsmöglichkeiten

Im Rahmen des Vorhabens wurden keine Erfindungen beantragt sowie keine Schutzrechtsanmeldungen erteilt.

4.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten leiten sich direkt aus dem Bedarf der Industrie an der Verlustenergienutzung ab. Ihre Bedeutung wird weiter zunehmen, denn der weltweite Energiebedarf steigt dramatisch und fossile Primärenergien werden auch in mittelfristiger Zukunft den größeren Anteil am Weltenergiebedarf abdecken müssen. Ihr Vorrat ist begrenzt. Beschaffung, Aufbereitung, Verteilung und Nutzung von Energie verbraucht natürliche Ressourcen und beeinflusst Umwelt und Klima negativ. Der Reduzierung der Verteilungs-, Speicher- und Wandlungsverluste sind aber technische und wirtschaftliche Grenzen gesetzt. Was bleibt ist eine drastische Einschränkung des Energiebedarfs und die Vermeidung jeglicher Energieverluste durch konsequente Nutzung von Abwärme. Die Abwärmerecuperation hat auch deshalb ein riesiges wirtschaftliches Potenzial, weil die vollständige Umwandlung von Primär- in Sekundärenergie und weiter in End- und Nutzenergie nie möglich sein wird. Ein großer Anteil der zugeführten Energie wird immer system- und betriebsbedingt als thermische Energie zurückbleiben (siehe hierzu auch Abbildung 2). In Zukunft wird es nicht mehr vertretbar sein, diese Abwärme ungenutzt an die Umgebung zu verlieren. Stark begünstigt werden die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten thermoelektrischer Systeme durch den Umstand, dass TE-Wandler gegenüber anderen Wandlertechnologien signifikante Vorteile aufweisen. Für die Abwärmenutzung kommen bisher meist ausschließlich thermodynamische Lösungen mit Dampfturbinen oder Kolbenmaschinen zum Einsatz. Die zugrunde liegenden Verfahren sind zwar bestens bekannt und haben sich im Megawattbereich über Jahrzehnte bewährt. Sie haben allerdings auch Nachteile: z. B. sind sie durch ihre bewegten Teile wartungsbedürftig und anfällig für mechanische Störungen. Zudem lassen sie sich nicht ohne Abstriche vom Mega- in den Kilowattbereich herunterskalieren.

Nachteilig für die Industrialisierung der Thermoelektrik waren bisher die noch hohen Kosten bei vergleichsweise geringem Wirkungsgrad. Die Technologie war wegen des ungünstigen Kosten-Nutzen-Verhältnisses bisher nicht wettbewerbsfähig. Aufgabenstellung des Projekts ist auch, für die erarbeiteten bzw. ausgewählten Konzepte entsprechende Fertigungstechnologien zu definieren und bzgl. ihrer Industrialisierungstauglichkeit und -kosten zu bewerten. Hieraus sind dann auch die tatsächlich zu erwartenden Systemkosten abzuschätzen. Die Ergebnisse dieser Umfänge sind dem entsprechenden Bericht des Projektpartners zu entnehmen. An dieser Stelle werden deshalb keine Systemkosten publiziert, nicht zuletzt auch deshalb, weil Zielsystem, Leistungsklasse, Energieangebot und Betriebsparameter, etc. sowie Stückzahlen einen großen Einfluss auf die Kosten haben. Andererseits ist es aber durchaus möglich und sinnvoll für Fahrzeuge eine Abschätzung über die möglichen, aus Industrie und Kundensicht noch vertretbaren, Kosten zu tätigen, Abbildung 1111(?). Ein Schlüssel dazu ist die durchschnittliche Systemeffizienz eines TEG: Bei einer Nennleistung von 500 W spart ein TEG im Mittel 2,5% Kraftstoff ein. Ein Oberklassefahrzeug, das im Kundenbetrieb 10 Liter auf 100 Kilometer verbraucht, spart $\frac{1}{4}$ Liter Kraftstoff auf 100 Kilometer sowie 6 Gramm CO₂ pro Kilometer ein. Für den Kunden bedeutet das – bei einem künftigen Kraftstoffpreis von 2 Euro pro Liter und einer Fahrleistung von 100.000 Kilometer – eine Einsparung von 500 Euro. Aktuelle Trends zeigen außerdem, dass der Kunde zunehmend bereit ist, für eine umweltfreundliche Technologie Mehrkosten in Kauf zu nehmen, die sich nach fünfzig bzw. hunderttausend Kilometern amortisieren. Weiterhin muss die Fahrzeugindustrie ab 2019 bei Überschreitung der Zielvorgabe für jedes Gramm CO₂ 95 Euro pro Fahrzeug bezahlen (siehe Abbildung 14), was bei 6 Gramm 570 Euro entspricht, somit ca. 1 Euro/Watt. Aktuell wird die Automobilindustrie aber kaum so viel für das eingesparte Gramm CO₂ bezahlen wollen. Es dürfte höchstens die Hälfte sein, also etwa 48 Euro, was 285 Euro pro System ergäbe.

Wirtschaftlichkeit TEG Was darf ein TEG kosten?

Ausgangslage! (TEG mit 500 Watt Nennleistung)

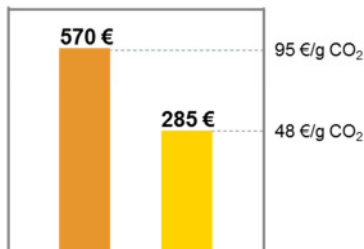
TEG: **2,5%** Systemeffizienz im Fahrzeug
Fahrzeug: **10 l/100km** Kraftstoffverbrauch



0,25 l/100km Kraftstoffersparnis
6,0 g/km Reduktion CO₂-Ausstoß

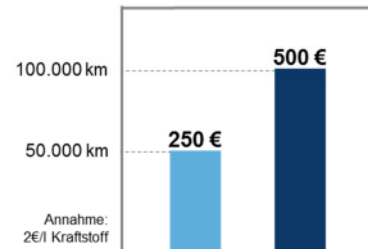
OEM

- Kosten bis max. Höhe der Strafzahlung
- wettbewerbsfähige Kosten in Konkurrenz zu anderen CO₂-Maßnahmen



Kunde

Amortisation über Fahrleistung



→ Kosten kleiner 0,50 €/W bzw. 40 €/g CO₂ werden den Eintritt der Technologie in die Fahrzeugserie bei entsprechender Reife vermutlich ermöglichen

Abbildung 166: Was darf ein TEG kosten?

Welchen Preis die Fahrzeughersteller bereit sind für ein Gramm CO₂ zu zahlen kann aus relevanten Studien und Veröffentlichungen abgeleitet werden. So kann man der Aufstellung in Abbildung 1112 entnehmen, dass die mittleren Kosten bei 30 Euro pro Gramm CO₂ in 2010 für ein Maßnahmenbündel aus 5 Paketen, dass insgesamt 64 g CO₂ einsparen sollte, lagen. Die teuersten Maßnahmen liegen hier bei 50 Euro pro Gramm und beinhalten die verschiedensten Hybridtechnologien.

Kosten für Maßnahmen zur Senkung der CO₂-Flottenemissionen

Ziel: Senkung Flottenemissionen von 159 g CO₂/km (6,7l/100km Otto) im Ø 2007 auf 95g (4l/100km) 2020

	Maßnahmen	Kosten	CO ₂ -Ersparnis [g]
Paket 1	leichte Gewichtsreduzierung Rollwiderstand reduzierte Reifen variabler Ventiltrieb moderate Reibungsreduzierung im Ottomotor	240 €	19 g (13 €/g)
Paket 2	moderates Downsizing stärkere Gewichtsreduzierung elektrifizierte Nebenaggregate optimierte Aerodynamik Start-Stopp-System	310 €	13 g (24 €/g)
Paket 3	voll ausgereizter Leichtbau und Reibungsreduzierung Start-Stopp-System mit Bremsenergierückgewinnung max. ausgeschöpftes Downsizing-Potenzial beim Ottomotor (max. Ladedruck)	550 €	16 g (34 €/g)
Paket 4	homogene Direkteinspritzung bei Ottomotor optimierte Getriebe	300 €	6 g (50 €/g)
Paket 5	graduelle Elektrifizierung: mild, voll, plug-in Hybrid (durchschnittlich 500 EUR für 10g CO ₂ -Reduktion)	500 €	10 g (50 €/g)
Gesamt		1900 €	64 g (30 €/g)

Quelle: VDI nachrichten, München, 30.07.2010, Zugriff 26.11.2012
<http://www.vdi-nachrichten.com/artikel/Autohersteller-koennen-jaehrlich-Milliarden-durch-Teilnahme-am-CO2-Handel-sparen/48874/1>

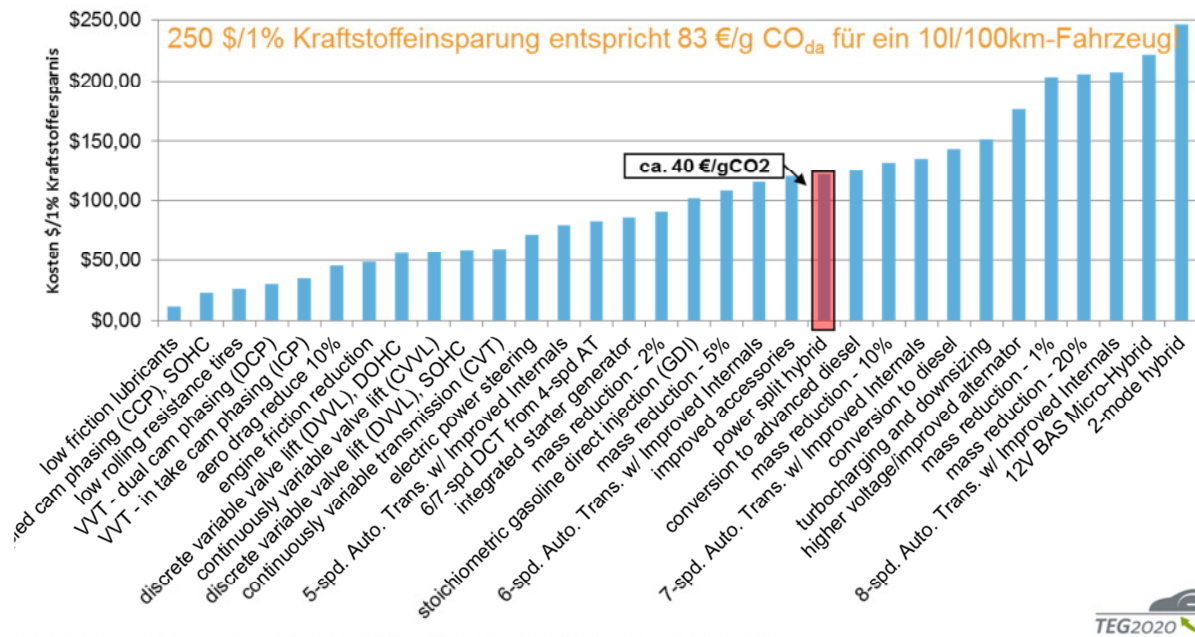


Abbildung 167: Kosten für Maßnahmen zur Senkung der CO₂-Flottenemission

Die Studie „Assessment of fuel economy technologies for light-duty vehicles“, The National Academy Press 2011 (s. Abbildung 1113) liefert ebenfalls Zahlen für unzählige Maßnahmen, hier bezogen auf ein Prozent Kraftstoffeinsparung. Überträgt man die Daten auf ein 10 Liter Fahrzeug, kommt man auf ähnliche Preise. Auch hier kosten die verschiedenen Hybridtechnologien zwischen 40 und 60 Euro, je nach Fahrzeugklasse. Ausnahme ist der 2-Mode Hybrid. (Siehe hierzu auch: An economic assessment of low carbon vehicles: Study from Cambridge Econometrics and Ricardo AEA, March 2013)

Kosten für Maßnahmen zur Senkung der CO₂-Flottenemissionen

Maßnahmen zur Kraftstoffeffizienz



Quelle: „Assessment of fuel economy technologies for light-duty vehicles“, The National Academy Press 2011



Abbildung 168: Kosten für Maßnahmen zur Senkung der CO₂-Flottenemission

Bis zu 50 Euro scheinen also tatsächlich bereits eingepreist, vielleicht auch mehr, wenn die dazugehörigen Maßnahmen weiteren Kundennutzen versprechen. Ende 2014 gab es diesbezüglich klare Aussagen: „Jedes Gramm CO₂, das Volkswagen in Europa in der Flotte einspart, kostet den Konzern fast 100 Millionen Euro.“ (Dr. Martin Winterkorn, 02.10.2014: <http://www.autobild.de/artikel/autobauer-zu-co2-vorgaben-der-eu-5360012.html>) und „Ein Gramm eingespartes CO₂ kostet Daimler pro Auto etwa 50 Euro“ (Dr. Dieter Zetsche, 02.10.2014).

Durch die Material- und Modulentwicklung der letzten drei Jahre dürfte auch die Befürchtung widerlegt sein, dass die Thermoelektrik wegen der hohen Materialkosten für den Einsatz im Fahrzeug zu teuer sei. Man kann pro Kilogramm Material mehrere Hundert Watt Leistung erzeugen. Skutterudite liefern momentan etwa 0,8 Kilowatt pro Kilogramm, während Silizide z. B. auf rund 1,8 Kilowatt pro Kilogramm kommen. Bestimmt wird die spezifische Leistung durch das Wärmeangebot und das dazu passende Moduldesign. Wenn ein TEG im Fahrzeug 500 Watt liefern soll, dann sind 500 g TE-Material für 10 bis 100 € das Kilogramm nicht der dominante Kostenanteil. Entscheidender sind die Herstellkosten für Module bzw. Systeme, die maßgeblich durch die notwendige Aufbau und Verbindungstechnik (AVT) beeinflusst werden.

Durch entsprechende Herstellprozesse und Skaleneffekte durch hohen Stückzahlen können die Kosten jedoch deutlich gesenkt werden. Zielwerte von deutlich weniger als 1€ pro Watt sollten so in Zukunft möglich sein.

Bezüglich der Kosten- und Effizienzdefizite verfügt die Thermoelektrik über ein noch großes, unerschlossenes Entwicklungspotenzial in den Bereichen TE-Material, TE-Module und Aufbautechnologien aber auch Wärmeübertrager, Zielsystem-/Fahrzeugintegration sowie Betriebsstrategien. Diese Bereiche werden von den in diesem Projekt entwickelten Konzepten erschlossen. Der Schlüssel dazu ist u. a. das flexible und modulare Baukastensystem, das eine große Bandbreite von verschiedensten Anwendungen und Zielsysteme, Leistungsklassen, Einsatzbereiche und Betriebscharakteristiken abdeckt und je nach TE-Material, Zielsystem und Einsatzart eine Systemeffizienz von ca. 10% aufweisen kann. Es wird erwartet, dass die im Projekt entwickelten Konzepte im hohen Maße dazu beitragen werden, dass das Kostenziel von deutlich weniger als 1 Euro pro Watt erreicht wird und somit ein hohes Marktpotenzial besitzen.

4.3 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Der baldige und erfolgreiche Einsatz der Thermoelektrik in Industrie und Verkehr erfordert, dass Grundlagen-, Anwendungsforschung und Produktentwicklung eng zusammenarbeiten. Für dieses Verbundprojekt wurde deshalb ein Konsortium mit interdisziplinären Kompetenzen zusammengestellt, das vom TE-Material über die AVT und TE-Modulherstellung bis hin zur Systemfertigung und -integration alle notwendigen Arbeitsschritte beherrscht.

Trotz einiger Änderungen im Projektverlauf und der daraus notwendigen Veränderungen bei Teilzielen, Maßnahmen und Jobsplit konnten die wesentlichen Projektziele erreicht werden. Das Hauptziel, einen TEG mit einer realen elektrischen Nennleistung von 500 W im Projektfahrzeug bei kundenähnlichen Bedingungen zu betreiben, zu vermessen und die vorhergesagte Kraftstoffeinsparung zu belegen, konnte im Projekt nicht zuende geführt werden. Ursache waren fehlende materialschlüssig eingebundene TE-Module mit ausreichender Leistung und Standfestigkeit. Damit dennoch die im Projekt erarbeiteten Konzepte, TEG-Teilsysteme und Komponenten betrieben und Teilfunktionen getestet werden konnten, wurde von IAV der entwickelte Generator mit verschiedenen Kaufmodulen kraftschlüssig bestückt und auf Prüfständen sowie im Projektfahrzeug in Betrieb genommen und getestet. Statt der geplanten und berechneten 500 W elektrische Nennleistung mit segmentierten PbTe-Material stoffschlüssig bestückten „all-in-one“-Modulen im kundentypischen Fahrzeugbetriebspunkt (ca. 120 km/h) konnten mit handelsüblichen und kraftschlüssig gekoppelten Bi_2Te_3 -Modulen 150 W im stationären Betrieb auf dem Heißluftprüfstand bei für die Bi_2Te_3 -Module angepasstem Wärmeangebot gezeigt werden. Aus dem Ergebnis lässt sich eindeutig ableiten, dass beim Einsatz der geplanten segmentierten PbTe-Module die anvisierte Nennleistung durch das TEG-System im Projektfahrzeug sicher erreicht werden kann. Dies bestätigen auch die Fahrzeugversuche auf dem Rollenprüfstand. Der dort vielfach getestet Generator war teilweise mit kommerziellen Oxid-Modulen und Bi_2Te_3 -Module kraftschlüssig bestückt und lieferte für eine virtuelle PbTe-„all-in-one“- Modulbestückung bis zu 450 W im real auf der Rolle gefahrenen Autobahnzyklus Motorway 150 (s. Kapitel 1.3.9: Hardware-in-the-Loop Simulation). Bei diesen Versuchen konnte allerdings das Wärmeangebot nicht vollständig ausgeschöpft werden, da die im hinteren Teil des Generators eingesetzten Bi_2Te_3 -Module durch eine entsprechende Abgasstromregelung wie geplant geschützt wurden. Dabei wurden alle anderen Zielgrößen, wie z. B. der Abgasgegendruck, eingehalten. Aufgrund des kraftschlüssigen Einbaus der Module musste der Generator allerdings erheblich ertüchtigt werden. Dies führte schließlich dazu, dass das Zielgewicht überschritten wurde, was teilweise auch durch die messtechnische Ausstattung erklärt werden muss. Bei entsprechender Modulbestückung wird das Zielgewicht jedoch sicher erreicht.

Die im Projekt erarbeiteten Teilziele, die gefundenen und ausgewählten Konzepte, deren prototypenhafte Umsetzung und Erprobung sowie das im Projekt gewonnen Know-how liefern zur Industrialisierung wichtige Beiträge. Sie führen zwar – wegen der Grundlagenorientierung des Projektes – nicht zur kurzfristigen Verwertung, zeigen und bestätigen jedoch die wissenschaftliche und technische Machbarkeit der Technologie im industriellen als auch im Bereich mobiler Anwendungen (Fahrzeuge aller Art) auf. Insbesondere hat die Erweiterung und Optimierung der IAV-Simulationsumgebung und die Umsetzung des HiL-Konzepts alle Erwartungen bestätigt. Die breite Zielstellung dieses Vorhabens konnte mit ihrer Hilfe realisiert werden. Durch die Simulation ist nun die Möglichkeit geschaffen, von der Grundlagenentwicklung des thermoelektrischen Systems, über die Integration im Fahrzeug bis zur energetischen Verknüpfung mit peripheren Fahrzeugkomponenten, Aussagen zur optimalen Systemkonfiguration und deren Leistungsfähigkeit zu treffen.

Das im Projekt ausgearbeitete Baukastenkonzept einschließlich Medienführung und der autarken/gekoppelten Wasserkühlung sind mittelfristig industrialisierbar. Die dazu notwendigen Bauteile sind einfach herzustellen und lassen sich aus Serienkomponenten leicht ableiten bzw. können 1:1 mit Fahrzeugserienbauteile dargestellt werden.

Die Hauptelemente „all-in-one“-Modul, Wärmetauscher und Abgasmanagement wurden im Projekt prototypenhaft von IAV dargestellt und erprobt. Aus den Ergebnissen kann abgeleitet werden, dass die Serienumsetzung gelingen wird. Voraussetzung ist, dass (siehe hierzu auch Kapitel 1.4.5: Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf)

- ein Thermoelektrikum mit ausreichendem ZT-Wert/Materialwirkungsgrad für den notwendigen Temperaturbereich in ausreichender Menge, Qualität und Preis zur Verfügung steht

sowie

- eine dem jeweiligen Thermoelektrikum angepasste AVT
- eine materialschlüssige elektrische Isolierung und Kontaktierung
- für das WING-Konzept die erforderliche thermische Isolierung, chemische Kapselung und mechanische Strukturverstärkung
- auf das Wärmeangebot und die Zielleistung angepasste Wärmetauscher, deren thermische Leistung bei geringem Gewicht und Widerstandsfähigkeit für Abgase gegeben ist und
- für das notwendige Abgasmanagement geeignete Abgasklappen nebst Aktorik

entwickelt werden, die dem jeweiligen Zielsystem üblichen Anforderungen entsprechen. Eine durchaus anspruchsvolle Herausforderung ist es, für alle o. g. Bauteile bzw. Subsysteme wirtschaftliche Fertigungskonzepte zu identifizieren. Es ist aber davon auszugehen, dass der Automobilindustrie dies gelingen wird.

4.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase

Die anhaltende Unsicherheit und Zurückhaltung der Fahrzeugindustrie für Abwärmenutzungskonzepte aller Art bei Fahrzeugen, im speziellen für TE-Lösungen, ist auf das bisher ungünstige Kosten-Nutzen-Verhältnis und den noch großen Abstand der Technologie zur Großserienreife zurückzuführen. Die Erfolge der TE-Materialentwicklung der letzten Jahre, die positiven Ergebnisse unzähliger weltweit durchgeführter Forschungsprojekte und eben auch die Ergebnisse dieses Projekts bringen die Technologie ein großes Stück näher an die Industrialisierung heran. Zusammen mit dem zunehmenden Druck auf die Automobilindustrie, einerseits durch mit Sicherheit wieder steigende

Kraftstoffpreise, andererseits durch die künftige Abgasgesetzgebung, wird die Abwärmenutzung an Bedeutung gewinnen.

Aufgrund der von IAV – zusammen mit den Partnern sowie Auftraggebern aus der Wirtschaft als Grundlage für weiterführende Dienstleistungs-, Forschungs- und Entwicklungsprojekte – in diesem Forschungsprojekt gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse ist von einer hohen wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Anschlussfähigkeit auszugehen.

IAV wird mit dem ausgebauten bzw. neu gewonnenen Know-how, unterstützt durch den Netzwerkausbau mit den Projektpartnern und externen Unternehmen und Forschungseinrichtungen Beratungs-, Marktanalyse-, Potenzialbestimmungs-, Benchmarking-Aufträge sowie Forschungs- und (Produkt-) Entwicklungsprojekte aktiv einwerben. Neben den im vorangegangenen Kapiteln aufgeführten offenen Fragen und dem aufgezeigten Forschungs- und Entwicklungsbedarf stehen dabei die folgenden Themenschwerpunkte im Fokus:

- Effizienzsteigerung und Emissionsreduktion von Verbrennungskraftmaschinen aller Art
- autarke Energieversorgung für Komponenten und Systeme
- Rest- und Umgebungswärmenutzung
- Energie- und Thermomanagement
- Bauteilschutz und -erwärmung
- TEG-System- und Komponentenauslegung und -design
- TE-Material und TE-Modulauslegung und -design
- Funktionsentwicklung und Entwurf von Betriebsstrategien für TEG
- TEG Integration und Betrieb
- Modell- und Prototypenentwurf und -bau

Weiterhin werden die gewonnenen Ergebnisse auf eine Vielzahl von Anwendungen übertragen, so z. B. bei

- der Abwärmenutzung durch direkte Übertragung, (Zwischen-)Speicherung, Transformation
- der Wandlung in mechanische Energie mittels thermodynamischer Verfahren, sowie für
- das aktuelle Thema TE-Wärmepumpen, dass durch das große Interesse an Elektrofahrzeugen besonders an Bedeutung gewonnen hat.

5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordene Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Informationsrecherchen wurden von IAV regelmäßig durchgeführt. Hauptquellen waren dabei die Auswertung von Fachzeitschriften, Patentrecherchen, elektronische Recherchen, der Besuch und die aktive Teilnahme an Tagungen, Kongressen und Messen sowie Direktkontakte zu Netzwerk-Institutionen.

Im Projektlaufzeit sind IAV keine Forschungs- und Entwicklungsergebnisse bekannt geworden, die direkten Einfluss auf die Forschungsarbeiten gehabt hätten, bzw. zur Änderung der Arbeitspläne hätten führen können.

6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

6.1 Veröffentlichungen

Im Rahmen des Projekts sind folgende Veröffentlichungen seitens IAV erschienen:

“The virtual continuous TEG model – Efficient optimization of thermoelectric generators”, Jens Kitte, Felix Beck, Daniel Jänsch, Journal of electronic materials, 2013

“Dimensioning and evaluation of a multi-channel thermoelectric generator using a customized simulation architecture”, Jens Kitte, Roland Kühn, Hans-Fridjof Pernau, Kristof Littmann, Daniel Jänsch, “Thermoelectrics Goes Automotive”, Expert Verlag, 2012

“Beurteilung und Optimierung thermoelektrischer Systeme im Rahmen der Rekuperation und Wandlung von thermischer Energie im Fahrzeug“, Dissertation Jens Kitte, Logos Verlag 2015

„Ein Baukasten für die optimale Abwärmenutzung“, Daniel Jänsch, Jana Topalova, IAV Automotion 01/2014

6.2 Vorträge

Im Rahmen des Projekts wurden folgende Vorträge gehalten.

“The virtual continuous TEG model – Efficient optimization of thermoelectric generators”, Jens Kitte, Felix Beck, Daniel Jänsch, ITC 2012

“Dimensioning and evaluation of a multi-channel thermoelectric generator using a customized simulation architecture”, Jens Kitte, Roland Kühn, Hans-Fridjof Pernau, Kristof Littmann, Daniel Jänsch, IAV Tagung “Thermoelectrics Goes Automotive”, Dezember 2012

“Abwärmenutzung in Kraftfahrzeugen mit thermoelektrischen Generatoren“, Daniel Jänsch, HANSER Fachtagung „Energy Harvesting – Technologien, Anforderungen, Anwendungen“, November 2012

“Abwärmenutzung in Kraftfahrzeugen mit thermoelektrischen Generatoren“, Daniel Jänsch, Energieforum 2013, FH Brandenburg, 2013

“Comparison of simulated and measured data of a thermoelectric generator (TEG) developed in research project TEG2020 and its hardware in the loop (HIL) results“, Roland Kühn, Olaf Köppen (TU Berlin), Jens Kitte (IAV), IAV Tagung “Thermoelectrics Goes Automotive II“, Dezember 2014