

Abschlussbericht der

Eberspächer Exhaust Technology GmbH & Co. KG

(bis 31.12.2012: J. Eberspächer GmbH & Co. KG)

Zum Vorhaben:

EcoTEG

**Industrialisierungskonzept für hochtemperaturtaugliche
thermoelektrische Generatoren zur Abgaswärmenutzung in
Automobilen auf Basis neuartiger Materialien**

Förderkennzeichen: 03X3551C

Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2011 – 31.12.2013

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Projektpartner:

Daimler – Bosch – Eberspächer – HSRW – DLR

Autor: Dipl. Ing. (FH) U. Rusche

Co-Autoren: Dipl. Ing. (FH) D. Rabiega BEng. M. Padberg
T. Bukes

Datum: 22.09.2014

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhalt

Inhalt	2
Tabellenverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	4
1 Kurzdarstellung	7
1.1 Aufgabenstellung	7
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	8
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	9
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn	10
1.4.1 Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden	11
1.4.2 Verwendete Fachliteratur und Informationen	12
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	12
2 Eingehende Darstellung	13
2.1 Detaillierte Darstellung der Projektergebnisse	13
2.1.1 Anforderungen an einen Thermoelektrischen Generator	13
2.1.2 Betriebsstrategie und TEG-Peripherie	16
2.1.3 Auslegung eines Thermoelektrischen Generators	17
2.1.4 Berechnung und Simulation zur TEG-Auslegung	33
2.1.5 Grundlagenversuche am Sub-TEG	38
2.1.6 Untersuchung und Charakterisierung der TE-Module	49
2.1.7 Versuche mit TEG-Funktionsmustern	57
2.1.8 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	64
2.1.9 Industrialisierungs- und Modularisierungskonzepte	65
2.2 Verwertung der Ergebnisse und voraussichtlicher Nutzen	68
2.2.1 Verwertung in Wissenschaft, Forschung und Lehre	70
2.3 Technischer Fortschritt bei anderen Stellen	70
2.4 Veröffentlichungen der Projektergebnisse	76
Literaturverzeichnis	77

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1 Arbeitsplan Projekt EcoTEG	9
Tabelle 2.1 Funktionstabelle nach Lastenheft.....	15
Tabelle 2.2 Morphologischer Kasten.....	32
Tabelle 2.3 TEG EVO 2 Halbseite mit By-Pass System	33
Tabelle 2.4 Definition verschiedener Betriebspunkte und Auslegungspunkt.....	39
Tabelle 2.5 Ergebnisse der Wärmetauscherprototypen	39
Tabelle 2.6 Geometrische Vermessung der ersten 3 Bosch-Module.....	50
Tabelle 2.7 geometrische Vermessung weiterer 15 Module.....	52
Tabelle 2.8 Reihenfolge der Module bezüglich max. Leistung 400°C Heißseite und 70°C Kaltseite bei 1 MPa Anpressdruck	54
Tabelle 2.9 Erweitertes Betriebspunktkennfeld	60

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1 Prototyp der TEG – Einheit im Projekt „Modul TEG“ mit Dummy's.....	11
Abbildung 2-1 TEG Gesamtsystem mit Baugruppenbezeichnung	15
Abbildung 2-2 Verschiedene Verschaltungen von 3 TEM im Betriebspunkt 4.....	17
Abbildung 2-3 Konzeptbasis CAD-Modell aus Vorprojekt	18
Abbildung 2-4 Alternative Konzeptauslegung zur thermischen Anbindung der TE-Module.....	19
Abbildung 2-5 Funktionsgruppe auf Basis der Anzahl heißseitiger WÜT-Strukturen.....	19
Abbildung 2-6 Halbseitiger TEG mit Bypasssystem	20
Abbildung 2-7 Submodul, Komponenten	21
Abbildung 2-8 TEM der Firma Bosch	22
Abbildung 2-9 Abgaswärmeübertrager mit Baugruppenbezeichnung	23
Abbildung 2-10 Rippen Abgaswärmeübertrager	24
Abbildung 2-11 M-Verteiler	25
Abbildung 2-12 Kühlwasserwärmeübertrager.....	25
Abbildung 2-13 Zusammenbau Werkzeug.....	26
Abbildung 2-14 Verpressung Submodul [1], [2].....	26
Abbildung 2-15 Ersatzschaltbild der Kühler-Feder-Funktion	27
Abbildung 2-16 Darstellung der TEG Höhentoleranzen im modularen Aufbau	28
Abbildung 2-17 Federkennlinien Kühler-Wärmeübertrager	29
Abbildung 2-18 Druckverlust-Kennlinie Kühlmittelwärmeübertrager (vor/nach Optimierung)	30
Abbildung 2-19 CFD-Berechnung zur Kühlmediumverteilung im BP4	30
Abbildung 2-20 Messung Wärmegleichverteilung am Kühlmedium-Wärmeübertrager.....	31
Abbildung 2-21 Kühlwasserwärmeübertrager Weiterentwicklung.....	32
Abbildung 2-22 Berechnung und Simulation zur TEG Auslegung.....	34
Abbildung 2-23 CFD-Modellerstellung 3-D und Optimierung der Wärmeübertragung.....	34
Abbildung 2-24 Beispielrechnung eines Temperaturverlaufs durch die einzelnen Material-schichten in 2 TEM (in Strömungsrichtung hintereinander).....	36
Abbildung 2-25 Netzaufbau mit ‚Boundary Layer‘ im Trichter sowie den heißseitigen WÜT.....	37
Abbildung 2-26 Strömungslinien der Strömung im Bereich des TEG.....	37
Abbildung 2-27 Versuchsaufbau	38
Abbildung 2-28 Kompensation des Temperaturabfalls über die WÜT-Länge	40
Abbildung 2-29 Einfluss des Anpressdruckes	40
Abbildung 2-30 Aufbau mit TEM und Alukühler auf AWT.....	41
Abbildung 2-31 TEM Leerlaufspannung für verschiedene thermische Kontaktmaterialien mit Aluminiumkühler (Versuch 2).....	42

Abbildung 2-32 Komponenten eines Submoduls	43
Abbildung 2-33 Aufbau Dichtigkeitsprüfung Abgaswärmeübertrager	43
Abbildung 2-34 Verbund aus Zirkonoxidummys, Graphitfolien und Thermoelementen.....	44
Abbildung 2-35 Submodul vor dem Pressvorgang	44
Abbildung 2-36 Submodul im Werkzeug fixiert	44
Abbildung 2-37 CAD-Modell unverpresst.....	45
Abbildung 2-38 CAD-Modell verpresst.....	45
Abbildung 2-39 vorgespannter Aufbau im Presswerkzeug (mit Dummy's)	45
Abbildung 2-40 Ober- und Unterschale mit Schweißnaht verbunden (optimierter Stand einseitig mit Modulen Evo 2.1-1)	45
Abbildung 2-41 Halbseitiger TEG CAD-Abbildung	46
Abbildung 2-42 Werkzeug mit unterer Mantelschale	46
Abbildung 2-43 Das erste Kühlmodul wird eingelegt.....	46
Abbildung 2-44 Der erste Wärmeübertrager wurde eingefügt	47
Abbildung 2-45 Der zweite Verbund aus Dummys, Graphitfolien und Thermoelementen wurde positioniert.....	47
Abbildung 2-46 Der vierte Kühlkanal wurde montiert	47
Abbildung 2-47 Der Aufbau wurde mit der Presse verpresst	47
Abbildung 2-48 WIG-Schweißnaht der beiden Mantelschalen	47
Abbildung 2-49 fertiger halbseitiger TEG	48
Abbildung 2-50 fertiger halbseitiger TEG Seitenansicht	48
Abbildung 2-51 schematischer Aufbau TEM-Prüfstand	49
Abbildung 2-52 Foto Modulprüfstand	49
Abbildung 2-53 Gemessene elektrische Leistung bezogen auf den Strom, Variation der Heißseitentemperatur, Kaltseitentemperatur bei 70°C, Anpressdruck bei 1 MPa / TLP-Modul.....	50
Abbildung 2-54 Variation des Anpressdrucks bei 400°C Heißseitentemperatur, 70° Kaltseitentemperatur	51
Abbildung 2-55 Höhentoleranz der 15 Module.....	52
Abbildung 2-56 Vergleich der 15 Module Elektrische Leistung zum elektrischen Strom bei 400°C Heißseitentemperatur und 70°C Kaltseitentemperatur und einem Anpressdruck von 1 MPa	53
Abbildung 2-57 Vergleich der 15 Module Modulwirkungsgrad zum elektrischen Strom bei 400°C Heißseitentemperatur und 70°C Kaltseitentemperatur und einem Anpressdruck von 1 MPa	53
Abbildung 2-58 Vergleich der maximalen Leistung der 15 Module Silbergesintert	54
Abbildung 2-59 Einbauorte der Module im Sub-TEG.....	55

Abbildung 2-60 Vergleich der Kontaktierung Leistung zum elektrischen Strom bei 400°C Heißseite und 70°C Kaltseite. Anpressdruck 1MPa	55
Abbildung 2-61 Elektrische Leistung zum elektrischen Strom bei 600°C Heißseitentemperatur und 70°C Kaltseitentemperatur und einem Anpressdruck von 1 MPa.....	56
Abbildung 2-62 Modulwirkungsgrad zum elektrischen Strom bei 600°C Heißseitentemperatur und 70°C Kaltseitentemperatur und einem Anpressdruck von 1 MPa.....	56
Abbildung 2-63 Materialproben für Round Robin Test	57
Abbildung 2-64 Heißgasprüfstand.....	58
Abbildung 2-65 Fertiggestellter Sub-TEG Evo 2.1-3	60
Abbildung 2-66 Leistungskennfeld SubTEG Evo 2.1-1, Parallelschaltung 3 Module TLP	60
Abbildung 2-67 Leistungskennfeld SubTEG Evo 2.1-2, Reihenschaltung 6 TEM Ar-gesintert	60
Abbildung 2-68 Leistungskennfeld SubTEG Evo 2.1-3, Reihenschaltung 6 TEM Ar-gesintert	61
Abbildung 2-69 Darstellung Temperaturprofil für zyklischen Betrieb	62
Abbildung 2-70 Versuchsergebnisse nach Dauerlauf	63
Abbildung 2-71 Oberflächentemperaturen der TEMs nach Dauerlauf	63
Abbildung 2-72 Leistungsausbeute EcoTEG 2.1-3 nach Dauerlauf	64
Abbildung 2-73 Herstellkosten TEG Evo 2	64
Abbildung 2-74 TEG-Register mit angeschlossenen Abgastrichern.....	66
Abbildung 2-75 elektrische Kontaktierung	67
Abbildung 2-76 Doppeltes Modul mit gegenseitigen Steckkontakten zur Bildung von Modulketten...	67
Abbildung 2-77 BMW AGRTEG.....	71
Abbildung 2-78 GM TEG	72
Abbildung 2-79 DLR Kapselrohrbauweise	73
Abbildung 2-80 BSST TEG	73
Abbildung 2-81 BSST TEG Bypass	74
Abbildung 2-82 Schema eines TEG's in Kartuschenbauform mit Leistungsdiagramm für verschiedene Heißseitentemperaturen.	75
Abbildung 2-83 NFZ TEG.....	75

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Basierend auf der Initiative des BMBF unter dem Namen ThermoPower soll Energie aus Abwärme, insbesondere von Fahrzeugen, mittels thermoelektrischen Generatoren rekuperiert werden. Die hierzu notwendigen Technologien werden in verschiedenen Projekten erarbeitet. In dem hier dargestellten Projekt unter dem Namen EcoTEG wird in Zusammenarbeit mit den Partnern Daimler AG, Robert Bosch, DLR und Hochschule Rhein-Waal folgendes Projektziel bearbeitet:

„Erstellung eines thermoelektrischen Generators auf Basis eines hochtemperaturbeständigen thermoelektrischen Materials zur Abgaswärmenutzung in Fahrzeugen.“

Die Zielsetzung des EcoTEG-Projekts liegt in der Herstellung eines thermoelektrischen Generators zur Abgaswärmenutzung in Kraftfahrzeugen. Die Dimensionierung erfolgt für eine PKW-Anwendung zur Deckung bzw. Entlastung des elektrischen Bordnetzbedarfs.

Das Prinzip der Thermoelektrizität ist bereits seit 1794 bekannt. Bedingt durch die Notwendigkeit zur Darstellung von hoher elektrischer Leitfähigkeit bei gleichzeitig hohem Seebeck-Koeffizienten und in Verbindung mit niedriger thermischer Leitfähigkeit im Wandlermaterial sind sehr komplexe Werkstoffsysteme erforderlich.

Im EcoTEG-Projekt sollen die im Labor gewonnen Erkenntnisse auf industriell anwendbare Verfahren umgesetzt werden. Hierzu werden marktverfügbare thermoelektrische Materialien z.B. Skutterudite eingesetzt und im Weiteren zum Aufbau und Erprobung einer ersten TEG Einheit verwendet.

In der zu erarbeitenden Modultechnologie werden die Arbeitsschritte Materialkompaktierung durch Drucksintern, elektrische und thermische Kontaktierung, Korrosionsschutz und Modulaufbau erarbeitet. Neben der eigentlichen Umsetzung kommt der Erarbeitung von qualitätssichernden Maßnahmen eine zentrale Bedeutung zu.

Kernfragen beim Aufbau von Hochtemperatur TEG-Einheiten sind die leistungsoptimale Stromentnahme (Maximum Power Point Tracking, DC/DC-Wandler) und vor allem die Beherrschung der hoch transient auftretenden thermisch induzierten Verformungen bzw. Beanspruchungen durch thermomechanische Spannungen. Darüber hinaus sind Fragen der thermischen Kontaktierung und Fragen der Integration und des Packaging in Fahrzeugabgasanlagen zu klären und in weiterer Folge umzusetzen.

Primäres Leistungsziel ist eine mittlere TEG-Nettoleistung von 350 W. Dieses entspricht einer Reduktion des Kraftstoffverbrauchs um ca. 5 g CO₂/km für einen PKW der Oberklasse mit aktuellem Stand der Technik.

Das wesentliche Ziel für Eberspächer ist die Integration des TEG's in die Fahrzeugabgasanlage. Dieses erfordert eine Analyse der Anforderungen an ein TEG-System mit anschließender Auslegung und Dimensionierung der Komponenten. Mit dem Anspruch einer späteren Industrialisierungsmöglichkeit ist der TEG skalierbar bzw. modular aufzubauen. Durch die Verwendung vieler Gleichteile und etablierten Fertigungsverfahren soll eine gute Wirtschaftlichkeit berücksichtigt werden. Im Weiteren sind die Entwicklungsergebnisse durch die Herstellung von Prototypen hinsichtlich Herstellbarkeit, Funktion und Haltbarkeit zu bewerten. Die insgesamt gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse sollen die Basis für ein zukünftiges Industrialisierungskonzept darstellen.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit thermische Abgasenergie in Fahrzeugen auf unterschiedliche Art und Weise zu nutzen bzw. zu rekuperieren. Neben einer reinen thermischen Nutzung, z.B. der Unterstützung des Fahrzeugwarmlaufs oder der Fahrgastraumbeheizung kann die Abgasenergie auch mittels eines Dampfkreisprozesses (Rankine) genutzt werden. Somit steht der thermoelektrische Generator im Wettbewerb zu weiteren Technologien. Ein gleichzeitiger Einsatz mehrerer dieser Technologien erscheint unwirtschaftlich. Für eine erfolgreiche Umsetzung dieser Technologie ist somit ein technologischer und/oder wirtschaftlicher Wettbewerbsvorteil notwendig. Die direkte Umwandlung thermischer Energie in hochwertige elektrische Energie ist ein wesentlicher technischer Vorteil. Dem gegenüber steht ein bisher geringer Wirkungsgrad bei der Energieumwandlung durch das thermoelektrische Material. Zudem sind einige hochtemperaturbeständige Materialien mit Potenzial zu höheren Wirkungsgraden aufgrund ihrer eingeschränkten Umweltverträglichkeit nicht für den Fahrzeugbau zulässig. Andere Materialien sind weniger wirtschaftlich aufgrund der eingeschränkten Verfügbarkeit dieser Rohstoffe. Diese Voraussetzungen erschweren den Erfolg dieser Technologie signifikant. Gerade durch diesen hohen Schwierigkeitsgrad ist eine Förderung dieser Technologie besonders wichtig, um das Entwicklungsrisiko breiter zu verteilen. Erst durch eine umfangreiche Förderung dieser Technologie werden neue Ideen entwickelt, die zu verbesserten Materialien und Komponenten führen. Trotz der hohen Materialkosten wurde für das EcoTEG-Projekt Skutterudit als Halbleitermaterial für die Entwicklung der TE-Module ausgewählt. Dieses Material ist für hohe Temperaturen unter Schutzatmosphäre geeignet und kann somit für z.B. heißes ottomotorisches Abgas eingesetzt werden. Aus der Literatur ist Skutterudit bekannt für steigerungsfähige Wirkungsgrade, jedoch sind die Rohstoffkosten derzeit besonders hoch. Dieses könnte die Wirtschaftlichkeit negativ beeinflussen.

Ein weiterer Aspekt ist die Wirtschaftlichkeitsbewertung für die CO₂ Einsparung. Diese erfolgt häufig im europäischen Fahrzyklus NEFZ. Aufgrund der anfänglichen Kaltstartbedingungen ist der Nutzen für nahezu alle Technologien zur Abgaswärmenutzung im NEFZ stark begrenzt. Bei der Betrachtung realer Kundenfahrzyklen kann eine höhere Kraftstoffeinsparung erreicht werden. Aus diesem Grund und vor dem Hintergrund sich ändernder gesetzlicher Vorschriften wird die Bewertung in diesem Projekt insbesondere für kundenrelevante Betriebspunkte durchgeführt.

Es ist weiter zu beachten, dass die Einhaltung der gesetzlichen Emissionsgrenzwerte Vorrang zu der Einsparung von Kraftstoff hat. Somit ist der Eingriff in die Abgasanlage stark eingeschränkt. Aus diesem Grund wird der TEG stromabwärts der Abgasreinigung positioniert. Dieses führt zu einem reduzierten Nutzen aufgrund des geringeren Temperaturniveaus im Vergleich zur motornahen Abgastemperatur. Besonders nachteilig wirkt sich dieses im Kurzstreckenbetrieb aus.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Mit dem Projektantrag und zu Beginn des Projekts wurde ein Arbeitspaket-Plan aufgestellt. Dieser unterteilt sich in 6 Arbeitspakete sowie dem Projektmanagement. Wesentliche Teilergebnisse wurden mit Meilensteinen markiert und dienen der Erfolgskontrolle im laufenden Projekt. Die Arbeitspakete unterteilen sich weiter in kleinere Unterpunkte, die die Arbeitsschwerpunkte und Themen genau wiedergeben. Für die erfolgreiche Zusammenarbeit mit den Projektpartnern wurden die Arbeitspakete für jeden Partner einzeln genauer beschrieben und das Ziel für jeden Unterpunkt definiert. Darüber hinaus wurden Schnittstellen und Abhängigkeiten zwischen den Projektpartnern festgestellt und in die Planung integriert.

Arbeitsplan Projekt EcoTEG						1. JAHR	2. JAHR	3. JAHR
Zeitraum 01.01.2011 - 31.12.2013						2011	2012	2013
Arbeitspaket	Personenmonate					2011	2012	2013
	Daimler	Bosch	JE	DLR	HSRW			
AP 0 Projektmanagement	6							
AP 1 Systembewertung und Lastenheft								
AP 1.1 Lastenheft	4	4	1					
AP 1.2 Simulation Systembewertung	7							
AP 1.3 Betriebsstrategie, Fahrzeugkonzept, TEG Peripherie, Validierung	13	1	2					
AP 2 Moduldesign u. Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT)								
AP 2.1 Bereitstellung und Qualifizierung von TE Material und Halbzeugen	3		6					
AP 2.2 Moduldesign, Simulation Funktion (1D, 3D) u. Beanspruchung (3D)	7							
AP 2.3 AVT: Aufbaukonzept, Kontaktwerkstoffe und Prozesstechnik	14		12					
AP 2.4 Charakterisierung von gegühten Modellproben	5		12					
AP 2.5 Herstellung von prototypischen Modulen	10		6					
AP 3 Prüfung Module Einzelmodulteststand								
AP 3.1 Test und Bewertung Hochtemperaturmodule	3	5			20			
AP 3.2 Zyklusbetrieb, Dauerhaltbarkeit u. Zuverlässigkeitsmethoden		9				9		
AP 3.3 Messung der Temperaturverteilung und Verformung		1			16			
AP 3.4 Validierung Simulation		3				3		
AP 4 Auslegung TEG								
AP 4.1 Konstruktion Konzepte Bauweisen	2	1	10			13		
AP 4.2 Packaging			3			5		
AP 4.3 Simulation Strömung und Festigkeit Subsystem			12			12		
AP 4.4 Simulation Gesamtsystem			12			12		
AP 5 TEG Test am Prüfstand/im Fahrzeug								
AP 5.1 Konstruktion und Fahrzeugaufbau	11.5	1	3			15.5		
AP 5.2 Test Heißgasprüfstand Module im Verbund+Komponenten+ Zyklusbetrieb+Dauerhaltbarkeit	3		10			13		
AP 5.3 Test Motorprüfstand Zyklusbetrieb+Dauerhaltbarkeit+Bypassstrategie			4			4		
AP 5.4 Fahrzeugtest	6					6		
AP 6 Industrialisierungskonzept								
AP 6.1 Kostenanalyse	2	3	3			8		
AP 6.2 Industrialisierungs- und Modularisierungskonzepte	2	5	5			12		
Total Personenmonate	61.5	72	65	36	36	270.5		
1. Jahr 2010	20.5	25	31	12	12	100.5		
2. Jahr 2011	20.5	24	22	12	12	90.5		
3. Jahr 2012	20.5	23	12	12	12	79.5		

Tabelle 1.1 Arbeitsplan Projekt EcoTEG

Im laufenden Projekt erfolgte eine regelmäßige Telefonkonferenz, eingeladen über die Projektleitung im monatlichen Rhythmus. Je Partner wurden der Projektstatus und die erreichten Projektergebnisse dargestellt. Verzögerungen

einzelner Aufgaben sowie die Schnittstellenabstimmung erfolgten damit regelmäßig und zeitnah sowie zusätzlich über E-Mail-Verteiler. Eine ausführliche Berichterstattung zum Status und zu den Ergebnissen erfolgte zu den Halbjahrestreffen.

Aufgrund der verspäteten TE-Modulverfügbarkeit wurden davon abhängigen Arbeitspakete zeitlich verschoben. Zudem wurde der Inhalt dieser Arbeitspakete entsprechend der verfügbaren Modulanzahl angepasst. Aufgrund dessen wurden mehr Untersuchungen mit Modul-Dummy's durchgeführt. Dieses betraf insbesondere den Aufbau eines kompletten halbseitigen TEG's.

Die wesentlichen Projektergebnisse für Eberspächer konnten so trotz reduzierter verfügbarer TE-Modulanzahl erreicht werden. Für einzelne Konzeptuntersuchungen konnte auch auf kommerziell erhältliche TE-Module zurückgegriffen werden. Durch diese Vorgehensweise wurden Baumuster hergestellt, die besonders wichtig für erste Fertigungsversuche waren, aber auch zur Validierung der parallel entwickelten Rechenprogramme genutzt wurden.

Insgesamt wurden eine abschließende Leistungsbewertung des TEG's und eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erstellt, die auch zukünftige Entwicklungspotentiale verdeutlicht. Somit ist das wesentliche Projektziel erreicht worden.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn

Bedingt durch die begrenzte Verfügbarkeit fossiler Brennstoffe und die damit steigenden Kosten für die Mobilität entsteht der Bedarf nach effizienteren Fahrzeugen. Weiterer Bedarf entsteht durch die Schonung der Umwelt und der damit Verbundenen Klimazielen. Diese werden umgesetzt durch gesetzliche Vorschriften, welche schrittweise den zulässigen Ausstoß von Kohlendioxid (CO₂) limitieren. Neue CO₂-Grenzwerte sind hierzu festgeschrieben worden.

Zur Einhaltung weiter verschärfter Verbrauchszielwerte wird an der Optimierung des gesamten Antriebsstrangs und sparsamen Verbrauchern entwickelt. Eine weitere Möglichkeit ist die Abgaswärmenutzung welche einen Großteil der Verlustenergie im Fahrzeug ausmacht. Grundsätzlich stehen alle Technologien zur Kraftstoffeinsparung im Wettbewerb zueinander und müssen bezüglich des Kosten-Nutzen-Verhältnisses bewertet werden. Ebenfalls zu beachten ist, dass nicht alle Potentiale je Maßnahme addiert werden dürfen, sondern gegenseitige Beeinflussungen bestehen bzw. Technologien sich gegenseitig ausschließen können.

Wie bereits beschrieben wurde bietet der thermoelektrische Generator interessantes Weiterentwicklungspotential und lässt sich gut in bestehende Fahrzeugkonzepte integrieren. Wesentliches Entwicklungspotential beinhaltet das thermoelektrische Material selbst. Bislang ist der erreichte Materialwirkungsgrad bzw. die Materialgütezah zu gering für eine wirtschaftliche Nutzung. Zudem ist zu beachten, dass das thermoelektrische Material umweltverträglich sein muss. Dieses ist nicht immer gegeben. Allerdings konnte auch beobachtet werden, dass sich die Entwickler vermehrt den umweltverträglichen Materialien zuwenden und stetig Fortschritte berichten. Es besteht weiterhin vielversprechendes Potential bei der zukünftigen Materialentwicklung. Für den

Fahrzeugeinsatz sollten zukünftig Materialien für mittlere Temperaturbereiche bis ca. 500°C im Fokus stehen.

Mit den verfügbaren TE-Modulen wurden thermoelektrische Generatoren entwickelt, die bis zu einigen hundert Watt elektrische Leistung erzeugen können in Abhängigkeit des Betriebspunktes. Diese TE-Generatoren sind für den Laboreinsatz oder als Demonstrator hergestellt worden und entsprechen nicht industrialisierbaren Ansprüchen. Häufig ist die Konstruktion sehr massiv ausgeführt. Nur selten sind alle notwendigen Funktionen für den Fahrzeugeinsatz z.B. Vollastbetrieb bedacht. Zudem werden bislang keine Angaben zur Lebensdauer der eingesetzten Materialien gegeben.

Das hier beschriebene Projekt schließt an diesem Stand der Technik an, mit dem Ziel, wesentliche Punkte für ein industrialisierbares TEG-Konzept bewerten zu können.

1.4.1 Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Durch Fachkonferenzen und Veröffentlichungen sind unterschiedliche Konzepte für einen TEG bekannt. Durch die Partnerschaft und Unterstützung des Projekts „Modul-TEG“ (Thermoelektrischer Generator zur Abwärmenutzung in Verbrennungskraftmaschinen) wurden funktionale Grundzüge entsprechend der Patentanmeldung A526/2009 genutzt und weiterentwickelt [1]. Wesentliche Merkmale die übernommen wurden sind die Modulpositionierung und besonders die geometrische Grundform der Wärmeübertrager für die Kaltseite [2].



Abbildung 1-1 Prototyp der TEG – Einheit im Projekt „Modul TEG“ mit Dummy's

Aufgrund der speziellen Anforderungen für die Fahrzeuganwendung wurden darüber hinaus kostengünstigere Lösungsansätze entworfen. Diese unterscheiden sich zu dem ersten Konzept durch geringeres Gewicht und der Modulordnung. Erreicht wurde dieses durch die Verwendung etablierter Fertigungsverfahren für Abgassysteme. Jedoch wurden hierbei Nachteile für eine gute Wärmeübertragung festgestellt, welches zukünftig weiteren Forschungsbedarf begründet.

1.4.2 Verwendete Fachliteratur und Informationen

Grundsätzlich sind die Kenntnisse zur Thermoelektrik seit dem 19. Jahrhundert bekannt und werden in der Grundlagen-Literatur vollständig beschrieben und hier verwendet. Gleiches gilt für die Wärmeübertragung. Für die Umsetzung in dem entwickelten Berechnungstool wurden für die verwendeten Rippen zur Wärmeübertragung Rechenverfahren nach dem VDI Wärmeatlas verwendet. Darüber hinaus wurde für die Berechnung von Offset Rippen ein Modell von Manglik und Bergles „Heat Transfer and Pressure Drop Correlations“ eingesetzt.

1. **VDI- Wärmeatlas**; VDI-Wärmeatlas, VDI Verlag, 10. Auflage 2006 [3]
2. **Manglik, R.M., Bergles, A.E.**; „Heat Transfer and Pressure Drop Correlations“ in Experimental Thermal and Fluid Science 1995; 10:171-180, © Elsevier Science Inc., 1995; 655 Avenue of the Americas, New York, NY 10010 [4]

Darüber hinaus wurden Informationen durch die Teilnahme an Fachkonferenzen ausgetauscht (Auswahl):

1. Statusseminar Thermopower, Frankfurt, 16.-17.10.2012
2. IAV, 3rd Conference on Thermoelectrics, 21. - 23. November 2012, Berlin, Germany

Weiteres Wissen wurde eigenständig erarbeitet bzw. basiert auf Grundlagenwissen wie z.B. der Materialkunde. Im Rahmen von Vorarbeiten bei Eberspächer wurden erste Ansätze zur Auslegung eines TEG's verwendet [2]. Grundsätzlich eignet sich eine Patentrecherche zur tieferen Analyse zum Stand der Technik. Für die Konzeptentwicklung wurden hierzu nur in Einzelfällen kurze Internetrecherchen durchgeführt.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Durch die Projektpartner Daimler, Bosch, DLR und Hochschule Rhein Waal wurde umfangreiches Wissen und Erfahrung zur Abgaswärmenutzung und zur Thermoelektrik in das EcoTEG-Projekt eingebracht. Durch intensive Zusammenarbeit und Aufteilung in entsprechende Arbeitspakete konnten die wesentlichen Projektziele erreicht werden. Für die TEG-Konzeptentwicklung und den Aufbau der TEG-Prototypen wurden keine weiteren Unternehmen seitens Eberspächer beauftragt. Für einzelne Komponenten und Fertigungsschritte, wie z.B. das Hartlöten des Wärmeübertragers, wurden Fertigungsaufträge erteilt die nach Eberspächer-Entwicklungsvorgaben durchgeführt wurden.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Detaillierte Darstellung der Projektergebnisse

2.1.1 Anforderungen an einen Thermoelektrischen Generator

2.1.1.1 Gemeinsames System-Lastenheft

Mit dem Beginn des Projektes wurden die Anforderungen an einen thermoelektrischen Generator, seine Schnittstellen zum Gesamtsystem und das Design durch einen Anforderungskatalog der Firma Daimler definiert. Ausgehend von einem Zielfahrzeug wurde die Systemgrenze um den TEG, die Kühlwasserversorgung inklusive Kühler und Steuergerät gezogen. Das System sollte im Bereich des Mittelschalldämpfers nach der Abgasnachbehandlung positioniert werden. Folgende Zuständigkeiten wurden in diesem ersten Entwurf eines Anforderungskatalogs festgeschrieben:

- Daimler zuständig für System- und Fahrzeugintegration
- Bosch zuständig für die Entwicklung eines neuen thermoelektrischen Moduls gemeinsam mit dem DLR und der Hochschule Rhein-Waal
- Eberspächer zuständig für die Abgasführung und Einbindung der TEMs in einen Abgaswärmeübertrager inklusiv eines Bypass-Systems

Im Folgenden wurden unterschiedliche Gesamtsysteme entworfen und zu Projektbeginn zu einem Lastenheft zusammengestellt. Hierbei wurden die wesentlichen Komponenten weiter beschrieben und Produkthanforderungen quantifiziert. Hauptanforderung ist die zu erreichende Nettoleistung des TEG von 350W im Auslegungspunkt. Um dieses Leistungsziel erreichen zu können, muss die erzeugte elektrische Leistung um den Anteil der Verlustleistung durch zusätzlichen Abgasgegendruck, Gewicht, Kühlung und weiterer Energie für Aktuatoren z.B. By-Pass-Klappe höher sein. Die sich hieraus ergebende Bruttogleistung wird mit 530W angegeben. Der Auslegungspunkt ist ein mittlerer Betriebspunkt zwischen Überlandfahrt und Autobahnfahrt. Um dieses Leistungsziel erreichen zu können wurden für die Wärmeübertragung eine Flächenleistung von 10W/cm² errechnet bei einem Modulwirkungsgrad von 8%.

2.1.1.2 Lastenheft für TEG-Komponenten

Projektbegleitend wurde das Lastenheft auf TEG-Komponentenebene zur Herstellung des TEG bei Eberspächer fortgeschrieben. Hierbei konnte in besonderem Maße auf die Erkenntnisse aus den ersten Sub-TEG-Aufbauten und dem halbseitigen Aufbau mit Modul-Dummys zurückgegriffen werden. Allgemein wurden die primären Funktionen des TEG's erfasst bzw. vervollständigt, die als Grundlage für eine spätere FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) benötigt werden.

Im Folgenden wurden die Funktionen detaillierter beschrieben. Dabei bestand die Vorgehensweise zunächst in der Quantifizierung der Funktionen durch

messbare Größen. Im Weiteren wurden Prüfmethode und Grenzwerte vorgegeben zur späteren Bewertung des TEG's. Einige Anforderungen an den TEG können über bestehende Standards in der Automobiltechnik abgeleitet werden. Für diese neue Technologie in der Abgasanlage sind aber auch neue Prüfverfahren und Anforderungen für zukünftige Standards zu entwickeln. In der folgenden Tabelle 2.1 sind die Funktionen mit dem entsprechenden Entwicklungsstand zu Projektende aufgelistet.

Als Auslegungsbetriebspunkt wird ein „niedriger Autobahnpunkt“, abgeleitet aus einem Daimler Kundenzyklus, herangezogen. Dieser beinhaltet Abgastemperaturen von 640 °C und einen Abgasmassenstrom von 102 kg/h bzw. 17kg/h für einen Sub-TEG mit einem Skalierungsfaktor von 1/6.

Funktionstabelle nach Lastenheft mit quantifizierten Größen im Auslegungspunkt

Funktion Nr.	Bezeichnung Einzel-funktionen	Beschreibung	Größen, Parameter	Einheit
Fkt 1	Abgas gleichmäßig leiten (Wärme zuführen)	Gleichmäßige Heißeittemperatur erzeugen	28,4 Massenstromanteil über alle WÜT gleich; Abweichung < 5% (Toleranz für die Abgasgleichverteilung) bei zulässigem Druckverlust von 30 mbar	g/sec @ 640 °C % mbar
Fkt 2	Wärme übertragen	Gleichmäßigen Wärmeübergang herstellen	Gesamtwärmestromdichte über TEM-Oberfläche: 10 entspricht ca. 6 kW übertragener Wärme	W/cm² kW
Fkt 3	Spannung (elektr.) erzeugen	Entlastung Bordnetz / Generator, ->CO2 Reduktion, pos. Energiebilanz auf das Gesamtsystem bezogen	Wirkungsgrad TEM: 8 % bei TEM-Oberflächentemperaturen: T_Heißeite: 450 T_Kaltseite: 100 insg. 350 W netto, entspricht 530 W brutto auf 0,05m² TEM-Fläche	% °C °C W W
Fkt 4	Elektrischen Strom leiten	Ausreichende Stromleiter vorsehen	Leitungsquerschnitte der Anschlusskabel tbd Richtwert: max 50 W/TEM	mm²
Fkt 5	Kühlwasser gleichmäßig leiten (Wärme abführen)	Gleichmäßige Kaltseittemperatur erzeugen	10 l/min Wasser / Glykol Gemisch Druckverlust gesamt 280 mbar auf TEG-Kühler bezogen: 30 mbar	l/min mbar mbar
Fkt 6	TEM vor Überhitzung (innere Einflüsse durch Betrieb) schützen	z.B.: Bypass vorgesehen	max TEM Heißeittemperatur: 600 °C	°C
Fkt 7	Gegendruck-Vorgabe einhalten (Auslegungspunkt und Nennleistung Verbrennungsmotor)	z.B.: Bypass vorgesehen und Wärmeübertrager dimensionieren	Vollastdruckverlust vergleichbar zu Abgassystem ohne TEG	
Fkt 8	Akustik vergleichbar zu Mittelschalldämpfer	optionale Funktion - Ersatz Mittelschalldämpfer	vergleichbar zu Mittelschalldämpfer	
Fkt 9	TEM vor äußeren Einflüssen schützen	Verkapselung der TEM und Schutzklasse erfüllen	Schutzklasse sicherstellen: IP6K9K TEM vor Oxidation schützen, Verantwortung derzeit bei TEM-Lieferant	

Fkt. 10	TEG Spannungen und Kräfte (mech. und thermisch) aufnehmen	thermische Spannungen, Schwingungen, stat. Kräfte	Beschleunigungen: 10 g (zu prüfen) Kräfte: tbd Spannungen @ 800 °C: tbd	g °C
Fkt. 11	TEM Module aufnehmen	Lagerung und Schutz der TEM-Module gegen mech. Einflüsse (Verrutschen, G-Kräfte)	Lagerung der TEM für Beschleunigung 10 g	g
Fkt. 12	TEG gegen Einflüsse (mech., chem.) von außen und innen schützen	Schutz gegen Steinschlag und aggressive Medien	Schutz gegen Steinschlag und aggressive Medien (Salzlauge)	

Tabelle 2.1 Funktionstabelle nach Lastenheft

Für ein TEG-Gesamtsystem sind weitere Baugruppen und Schnittstellen erforderlich, die in Wechselwirkung zu einigen Funktionen stehen. Dementsprechend wird folgend ein komplettes System beispielhaft beschrieben (Abbildung 2-1).

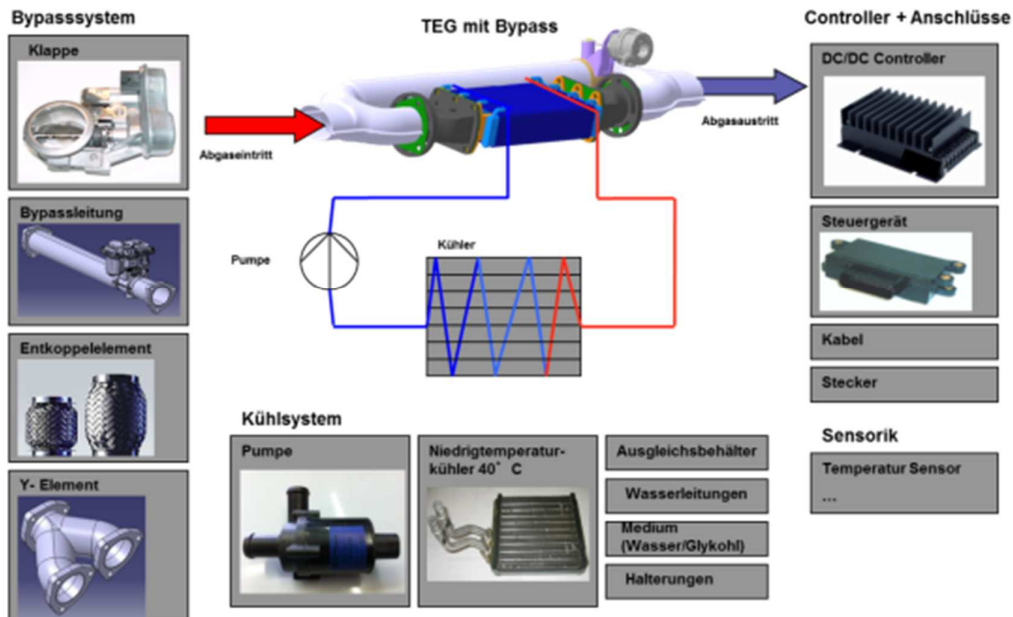


Abbildung 2-1 TEG Gesamtsystem mit Baugruppenbezeichnung

Bypass mit Abgasklappen: Um Betriebspunkte und Heißseitentemperaturen über der erlaubten Höchsttemperatur der TEMs zu verhindern ist eine gesteuerte Bypasslsung mit Abgasklappen notwendig.

Folgende Komponenten sind nicht Bestandteil der Projektarbeit von Eberspächer Exhaust Technology:

Wasserpumpe und Kühler: Um die notwendige Kaltseitentemperatur für die TEMs gewährleisten zu können ist ein Anschluss des Systems an das Fahrzeugkhlsystem bzw. bei niedrigeren erforderlichen Kaltseitentemperaturen ein separater Kühlkreis mit Pumpe und Kühler notwendig.

DC/DC Konverter: Die Ausgangsspannung der verschalteten TEMs wird mittels DC/DC Konverter an das Bordspannungsniveau angeglichen. Als eventu-

elle Funktion ist auch eine variable Verschaltung der einzelnen TEMs angedacht. So könnte auf verschiedenen Lastfälle reagiert werden.

Steuergerät: Die Kontrolle des Bypass, des DC/DC Wandler und der Kühlwasserpumpe wird durch ein Steuergerät gewährleistet.

2.1.2 Betriebsstrategie und TEG-Peripherie

Für den fahrzeugtechnischen Betrieb eines TEG's im Abgassystem werden zusätzliche Komponenten benötigt, um alle Funktionen und Anforderungen zu erfüllen. Je nach Ausstattung des Fahrzeugs und der Zielsetzung können die dargestellten zusätzlichen Baugruppen teilweise durch bereits im Fahrzeug bestehende Systeme ersetzt werden. In diesem Fall verändert sich das TEG-Gesamtsystem individuell entsprechend der Fahrzeuganwendung. Grundsätzlich werden neben der Hauptkomponente „TEG“ folgende Nebenkompontenten benötigt:

- Kühlkreislauf bestehend aus Medienpumpe, Kühler, Ausgleichsbehälter und Leitungen.
- Spannungswandler oder Einspeiseregler mit einer Kontrolleinheit, Kabeln und Steckern. Ggf. sind zusätzliche Sensoren erforderlich.
- By-Pass-System bestehend aus einem Abgasventil (Klappe) mit Stellantrieb, Abgasrohrleitungen und Ausdehnungskompensator.

In der Systemdarstellung des TEG-Gesamtsystems wurde beispielhaft eine Übersicht aller benötigter Komponenten erstellt. Nochmals zu berücksichtigen ist, dass einige bereits im Fahrzeug bestehende Komponenten prinzipiell einige TEG-Systemfunktionen übernehmen könnten (Abbildung 2-1).

Bei genauerer Analyse der Nebenkompontenten ist festzustellen, dass insbesondere das Kühlsystem ersetzt werden kann durch bereits bestehende bzw. zukünftige Niedertemperaturkühlsysteme. Die dadurch anzunehmende höhere Kaltseitentemperatur führt nur zu einer kleinen Leistungseinbuße, die durch geringere Systemkosten überkompensiert werden sollten.

Im Gegensatz hierzu ist die By-Pass-Funktion nach derzeitigem Stand der Technik unverzichtbar. Bei sehr hohen Motorbetriebspunkten steigt zwar die verfügbare rekuperierbare Energiemenge an, jedoch überwiegt ab einer bestimmten Kennfeldgrenze der zunehmende Kraftstoffmeherverbrauch durch den ansteigenden Abgasgegendruck. Zudem bewirkt der höhere Abgasgegendruck eine abgesenkte Vollastkurve und der Motor hätte nicht mehr die ursprüngliche Nennleistung. Eine weitere Limitierung stellt das Kühlsystem dar. Unabhängig welches Kühlsystem zum Einsatz kommt, müssten bei hohen Motorbetriebspunkten große Wärmemengen übertragen werden, um eine sinnvolle Kaltseitentemperatur zu gewährleisten. Eine weitere Notwendigkeit für die By-Pass Funktion ist die maximal zulässige Temperaturbelastbarkeit des TE-Materials. Dieses ist je nach Wahl des Materials (z.B. Skutterudit) bzw. dem Aufbau und der Zusammensetzung temperaturbegrenzend und wird über den By-Pass geschützt.

Durch Systemberechnungen kann eine Betriebsstrategie für das Schalten des By-Pass ermittelt werden, um stets positive bzw. maximale Nettoleistung zu

erzeugen ohne die Fahrleistung zu beeinträchtigen. Prinzipiell können bei hohen Betriebspunkten auch Abgasströme genutzt werden und dadurch der Anstieg des Abgasgedrucks minimiert werden. Bei diesem By-Pass-Konzept müsste ein erhöhter Regelaufwand und ein geeigneter By-Pass-Steller berücksichtigt werden.

Bei der Systemauslegung und der Betriebsstrategie ist die Anordnung und Verschaltung der einzelnen TE-Module von besonderer Bedeutung. Durch Unterschiede in der Heiß- und Kaltseitentemperatur bedingt durch die Medienführung und Sekundäreinflüssen wie die Mediengleichverteilung erzeugt jedes Modul individuell unterschiedliche elektrische Maximalleistungen. Mit dem Ziel die maximale elektrische Leistung zu ernten, muss die Modulverschaltung entsprechend ausgewählt werden. Dieses hängt wiederum von der Art der Einspeisung in das Fahrzeugbordnetz ab.

Mit dem ersten Aufbau eines Sub-TEG mit projekteigenen Skutterudite-Modulen konnten Untersuchungen zur elektrischen Verschaltung am Heißgasprüfstand durchgeführt werden. Die Messungen in Abbildung 2-2 zeigen, dass eine elektrische Verschaltung der TE-Module als Reihenschaltung die höchste elektrische Gesamtleistung ergibt (Basis: 3 Module in Abgasströmung hintereinander). Für die etwas geringere Gesamtleistung der Parallelschaltung sind naheliegender höhere Leitungsverluste aufgrund des höheren Stroms zu vermuten. Für einen kompletten TEG bestehend aus z.B. 36 TE-Modulen ist die elektrische Verschaltung zielgerichtet auszulegen, um die elektrischen Verluste im TEG selbst und in der Bordnetzeinspeisung zu minimieren.

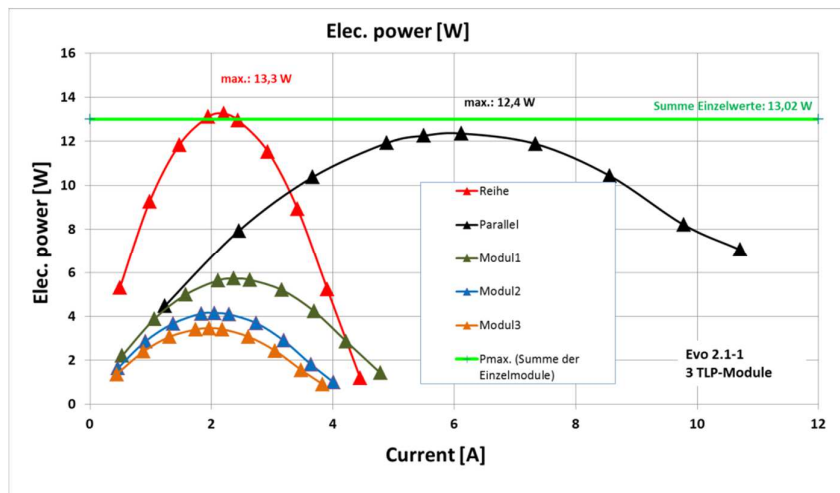


Abbildung 2-2 Verschiedene Verschaltungen von 3 TEM im Betriebspunkt 4

2.1.3 Auslegung eines Thermoelektrischen Generators

Ziel in diesem Kapitel ist die Konzeptionierung und konstruktive Umsetzung aller benötigten Komponenten und Halbzeuge für den TEG als Hauptkomponente. Zusätzlich ist eine By-Pass Lösung für die Fahrzeuganwendung zu entwerfen. Weitere Nebenkomponten z.B. der Kühlreislauf sind nicht Bestandteile dieser Auslegung.

Bei der Konzeptionierung ist besonders auf eine modulare Bauweise zu achten für eine spätere Bewertung als Industrialisierungskonzept. Aufgrund bestehender Vorarbeiten kann hier auf bestehende Lösungsansätze aufgebaut werden. Grundlage für die Auslegung ist das gemeinsame Lastenheft entsprechend dem Kapitel 2.1.1.1.

2.1.3.1 Konstruktion und Konzeptionierung einer modularen Bauweise

Basierend auf den in Abbildung 2-3 dargestellten und vorhandenen Konzeptentwurf wurde dieser Lösungsansatz weiter verfolgt und mittels eines 3D-Konstruktionsmodells konstruktiv ausgearbeitet. Für die Herstellung und den Zusammenbau der Baugruppen erfolgte die detaillierte zweidimensionale Zeichnungsableitung. Parallel begleitend erfolgte die rechnerische Auslegung des TEG's zur Erreichung des Leistungsziels und insbesondere zur Erfüllung der Haltbarkeit für die Funktionsuntersuchungen. Ergebnisse aus den begleitenden Simulationsrechnungen und durchgeführte Komponentenversuche wurden stetig in die Optimierung des Konzepts integriert.

Zudem wurde bei der CAD-Erstellung auf einen weitestgehend parametrisierten Modellaufbau geachtet, um die laufenden Optimierungen im TEG-Konzept einfach in das aktuelle CAD-Modell übertragen zu können.

Für eine möglichst variable Umsetzung wurden sogenannte Submodule (auch Sub-TEG) definiert, aus welchen sich komplette TEG's mit unterschiedlichen Leistungsstufen kombinieren lassen. Hiermit konnte die modulare Bauweise erreicht werden für den Einsatz in verschiedenen Fahrzeugbauräumen sowie Fahrzeugklassen.

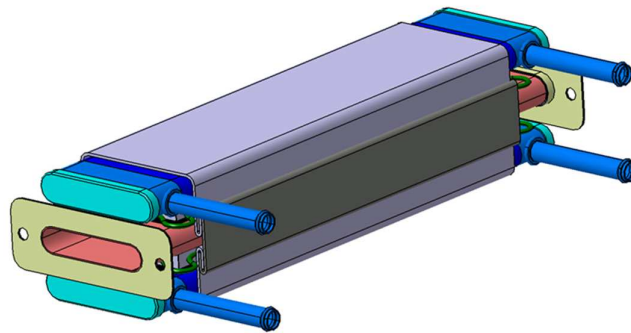


Abbildung 2-3 Konzeptbasis CAD-Modell aus Vorprojekt

Abweichend zu dem favorisierten Konzept wurden aufbauend zusätzliche Konzeptvarianten erstellt. Die zusätzlichen Konzeptideen sollten bei der späteren Bewertung hilfreich sein, sowie im Falle des Konzeptversagens als Rückfalllösung dienen.

Auch hierbei wurden vor allem Konzepte berücksichtigt, welche modular zu verwirklichen sind und die geforderte Flächenpressung der TE-Module für eine gute thermische Kontaktierung realisieren können. Deshalb unterscheiden sich diese Konzepte wesentlich im Spannkonzert der TE-Module zur gleichmäßigen Druck- und Temperaturverteilung. Abbildung 2-4 veranschaulicht die hierbei betrachteten Konzepte:

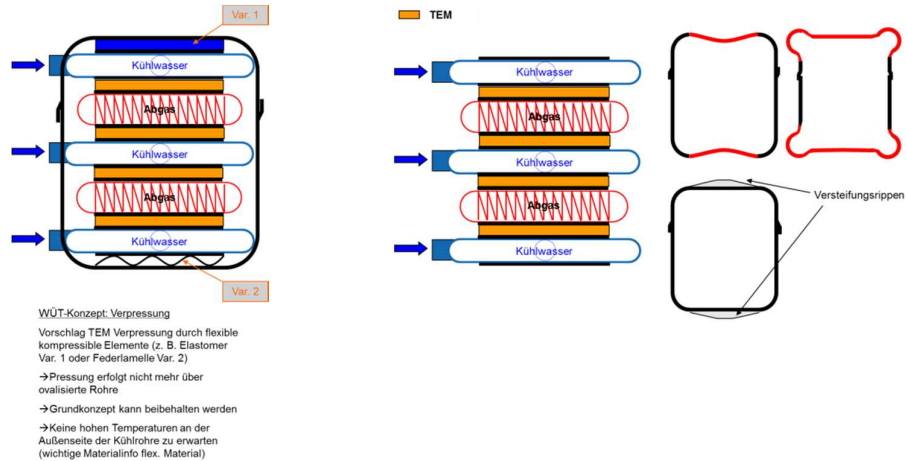


Abbildung 2-4 Alternative Konzeptauslegung zur thermischen Anbindung der TE-Module

Im favorisierten Konzept (im Folgenden EVO-2 bzw. EVO-2.1 genannt) erfolgt die Erzeugung der Flächenpressung zur thermischen Kontaktierung der TE-Module an die Wärmeübertrager über den durch die dreidimensionale Ovalisierung der Kühler-Wärmeübertrager entstehenden Druck infolge der Zusammenpressung der Einhausung. Diese zusammengepresste Ovalisierung wirkt wie eine gespannte Feder und kompensiert Längenänderungen z.B. aufgrund thermischer Ausdehnung in Abhängigkeit von der Federkennlinie. Zudem werden durch diese Art der thermischen Kontaktierung Toleranzen in der Fertigung gut kompensiert.

Bei den alternativen Konzeptideen wird die Spannfunktion für eine gute Flächenpressung über innen angebrachte flexible Elemente an der Ober- und Unterseite des Mantels sichergestellt, oder diese wird komplett über in den Mantel eingearbeitete flexible Strukturen erzeugt.

Nach der Ideenfindung und der beschriebenen Rückfalllösungen wurde das favorisierte Konzept zu einem Baukastensystem ausgearbeitet. Wie zuvor beschrieben wird durch das Baukastenprinzip eine Leistungsklassifizierung erreicht, die für verschiedene Fahrzeugklassen und Bauräume eingesetzt werden kann. Beispielhaft für 3 Leistungsklassen ist dieses in der Abbildung 2-5 dargestellt.

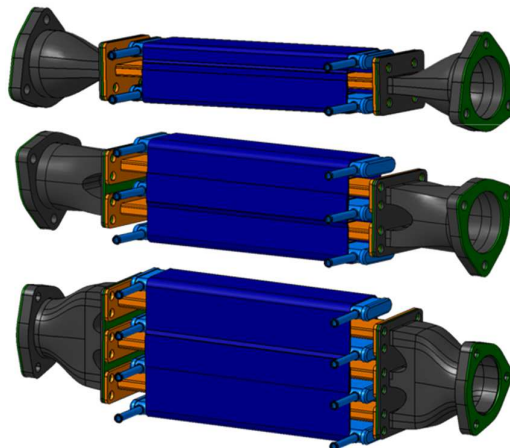


Abbildung 2-5 Funktionsgruppe auf Basis der Anzahl heißseitiger WÜT-Strukturen

2.1.3.2 TEG-Konzeptbeschreibung

In Abbildung 2-6 (CAD- Modell) ist der erste Stand eines halbseitigen TEG's dargestellt (TEG für zweiflutige Abgasanlage bestehend aus zwei Halbseiten). Für einen halbseitigen TEG werden drei Abgaswärmeübertrager parallel geschaltet, die Wärme wird über insgesamt 18 thermoelektrische Module an vier Kühlwasserwärmeübertrager abgegeben. Der Aufbau wird wiederum mit einem Gehäuse verpresst und über Flansche an zwei M-Verteiler zur Aufteilung des Abgasstroms angeschlossen. Die M-Verteiler sollen eine gleichmäßige Anströmung aller drei Abgaswärmeübertrager gewährleisten. Im Falle einer örtlichen Überhitzung im TEG, kann das heiße Abgas über einen Bypass mit einer Abgasklappe umgeleitet werden.

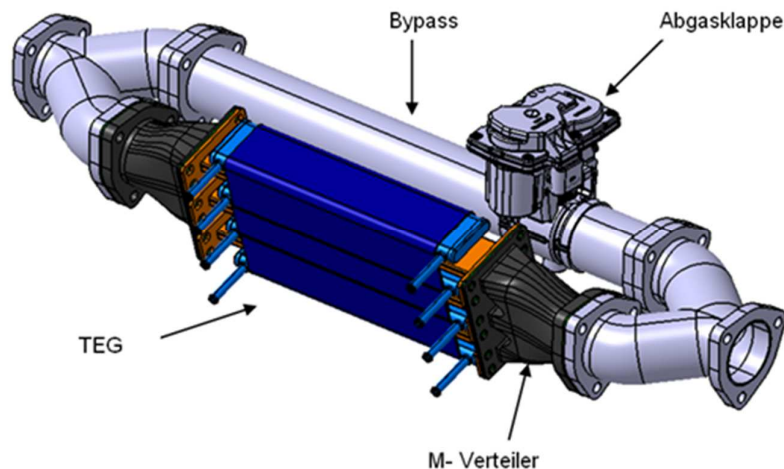


Abbildung 2-6 Halbseitiger TEG mit Bypasssystem

Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten des TEG's detailliert dargestellt:

Für Prüfstandversuche und erste Prototypen werden sogenannte Submodule aufgebaut. Submodule sind, wie in Abbildung 2-7 zu sehen, mit nur einem Abgaswärmeübertrager ausgestattet und stellen die kleinste Funktionseinheit dar.

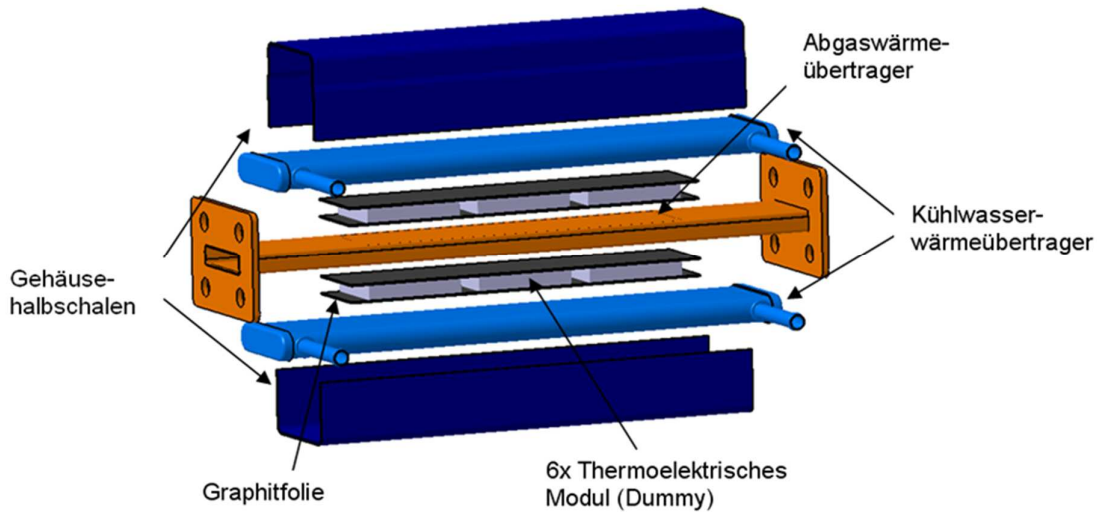


Abbildung 2-7 Submodul, Komponenten

Auf Ober- und Unterseite des WÜT befinden sich jeweils drei thermoelektrische Module oder Dummies (Dummies werden für Vorversuche eingesetzt). Die Beiden mit einer Bombierung (Wölbung) versehenen Kühlwasserwärmeübertrager sind auf der Kaltseite der TEM platziert. Zwischen den jeweiligen Schichten sind Graphitfolien zur besseren Wärmeübertragung eingelegt. Mithilfe der beiden Gehäuseshalben wird der gesamte Aufbau verpresst und durch eine Schweißnaht an der Außenseite zusammen gehalten. Die Bombierung im Kühler gewährleistet einen anhaltenden Anpressdruck nach dem Verpressen und der Montage. Dieser modulare Aufbau ermöglicht es für die spätere Anwendung im Fahrzeug mehrere Abgaswärmeübertrager parallel zusammen zu bauen.

Thermoelektrisches Modul

Der TEG ist dimensioniert für 6 TE-Module je Abgaswärmeübertrager. Für die Zielanwendung im Projekt sind insgesamt 36 TE-Module vorgesehen.

Abbildung 2-8 zeigt eines der im Prototyp verbauten TE-Module, welche von der Firma Bosch, in Zusammenarbeit mit weiteren Partnern, hergestellt werden und CoSb_3 (Skutterudit) als thermoelektrisches Material benutzen. Eine Besonderheit dieser Module ist ihr Gehäuse aus Edelstahl welches das ei-

gentliche TEM umschließt und durch diese Vakuumkapselung vor dem korrosiven Einfluss von Nässe oder Sauerstoff schützt. Die elektrische Kontaktierung des Modules erfolgt über zwei isolierte Hülsen, durch die die Anschlüsse aus dem Gehäuse geleitet werden.

Die Abmessungen der TE-Module betragen 40,4mm × 56,4mm × 9,8mm (Breite * Länge * Höhe).



Abbildung 2-8 TEM der Firma Bosch

Kontaktwärmeübergang (Folien)

Der Kontaktwärmeübergang zwischen dem Abgaswärmeübertrager und den thermoelektrischen Modulen bzw. zwischen den Modulen und dem Kühlwasserwärmeübertrager muss für eine maximale Leistungsausbeute der TEM optimal sein. Das funktioniert gut, wenn die Toleranzen der Komponenten möglichst klein gehalten werden. Im Projekt wurde deshalb eine umfangreiche Toleranzanalyse der Bauteile erstellt. Planmäßig werden die Toleranzen durch eine 0,75mm (0,5mm ohne Temperaturmessstellen für den Versuchsbetrieb) starke, plastisch und elastisch verformbare Graphitfolie ausgeglichen. Die Graphitfolie befindet sich zwischen den einzelnen Komponenten, WÜT, Kühler und TEM. Sie soll die Oberflächenrauigkeit, die Parallelitätstoleranzen, die Ebenheitstoleranzen und die Toleranzen auf Profil einer Fläche, der Kontaktflächen ausgleichen. Neben dem Toleranzausgleich soll die Graphitfolie die Temperaturen gleichmäßig über die Fläche der TEM verteilen, so dass dort wenig Spannungsabfall entsteht.

Abgaswärmeübertrager

Der Abgaswärmeübertrager (WÜT) (Abbildung 2-9) besteht aus zwei Halbschalen, zwei Anschlussflanschen für den M-Verteiler und den Rippen. Insgesamt hat der WÜT eine Länge von 250mm und eine Breite von 40mm, so dass oben und unten jeweils drei Module Platz finden.

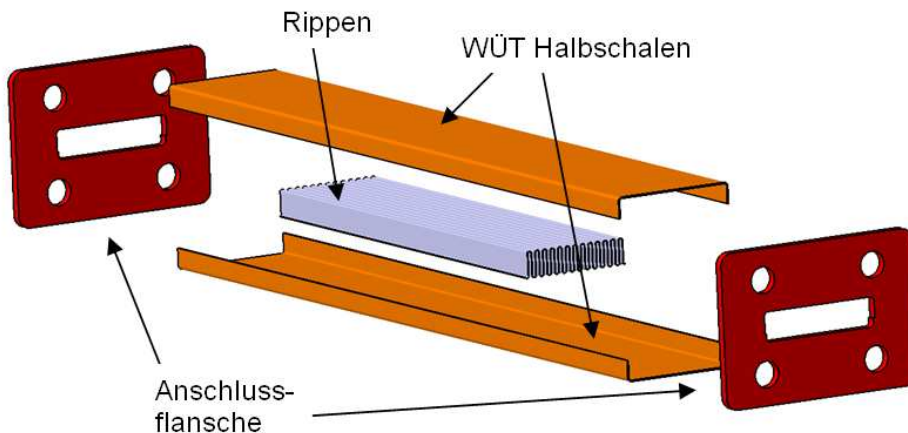


Abbildung 2-9 Abgaswärmeübertrager mit Baugruppenbezeichnung

Die Oberflächenbeschaffenheit sowie die Toleranzen der beiden Halbschalen sind bei der Auslegung der WÜT besonders wichtig. Weil ein guter Wärmeübergang zwischen WÜT und thermoelektrischen Modul nur mit zwei möglichst plan zueinander stehenden Flächen gewährleistet werden kann. Um die Wärme aus dem Abgas bestmöglich aufnehmen und an die TEM abgeben zu können, werden zusätzlich Strukturen (Fins) in den Abgaswärmeübertrager eingelegt. Dadurch wird die Fläche im WÜT wesentlich größer, dass erhöht den Wärmestrom.

Eine integrierte Struktur führt allerdings auch dazu, dass der Abgasgegendruck steigt. Im Lastenheft ist ein maximaler Abgasgegendruck von $\Delta p = 30\text{mbar}$ im Auslegungspunkt ($T_{\text{Abgas}} = 640^\circ\text{C}$, $\dot{m}_{\text{Abgas}} = 17,04\text{kg/h}$ je WÜT-Kanal) für den gesamten thermoelektrischen Generator angegeben. Die Auslegung der Fins erfolgt entsprechend den Simulationsrechnungen und Grundlagenversuchen, die in späteren Kapiteln beschrieben werden. Der WÜT sollte aufgrund von Abgastemperaturen bis hin zu 800°C steif ausgeführt werden, um eine Verformung zu vermeiden. Der Abgaswärmeübertrager ist grundsätzlich als Lötbaugruppe ausgelegt. Für eine geeignete Herstellung wurden unterschiedliche Fertigungsmethoden, z.B. das Laserschweißen, untersucht. Die im Abgaswärmetauscher verwendeten Rippen sind in Abbildung 2-10 dargestellt.

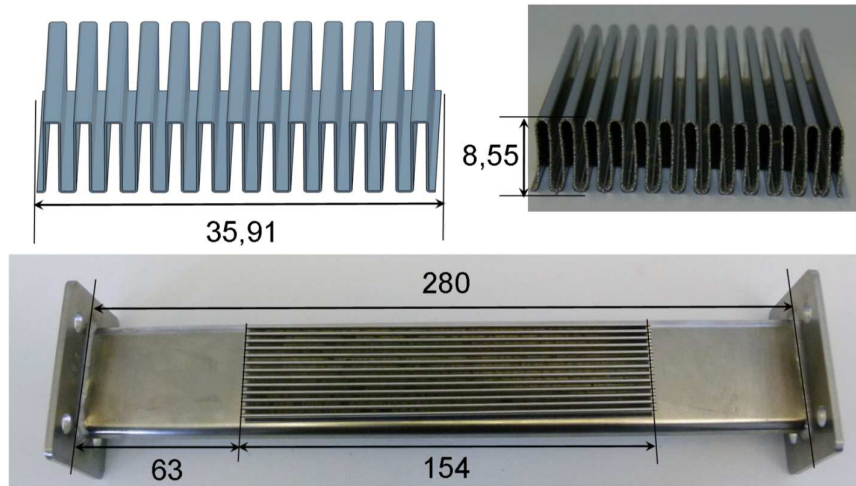


Abbildung 2-10 Rippen Abgaswärmeübertrager

Mit den 26 Rippen hat der WÜT einen zu erwartenden Druckverlust von ca. $\Delta p = 21 \text{ mbar}$ im Auslegungspunkt und erzeugt eine Wärmestromdichte von $q = 11 \text{ W/cm}^2$. Damit werden die Lastenheftanforderungen gut eingehalten.

Für Abgasanlagen werden insbesondere Edelstähle verwendet, um gegen Korrosion beständig zu sein. Aus gleichem Grund ist für den Wärmeübertrager ebenfalls Edelstahl zu verwenden. Grundsätzlich können hier unterschiedliche Legierungen verwendet werden. Ferritische Stähle haben Vorteile im Wärmeleitkoeffizienten und der damit verbundenen besseren Wärmeleitfähigkeit. Nachteilig können Eigenschaften zur Herstellung besonderer Formen sein. Aus Verfügbarkeitsgründen wurde in diesem Projekt überwiegend austenitischer Stahl eingesetzt. Jedoch wurden zusätzlich einzelne Halbzeuge mit ferritischem Stahl erfolgreich fertigungstechnisch untersucht, z.B. die Halbschalen des WÜT's.

M- Verteiler

Für die gleichmäßige Abgasanströmung der bis zu drei Abgaswärmeübertrager wird derzeit ein M- Verteiler (Abbildung 2-11) eingesetzt. Der M- Verteiler besteht aus zwei Verteilerhalbschalen, einem Verteilerflansch, einem Dreiecksflansch und Dichtungen an den jeweiligen Flanschen.

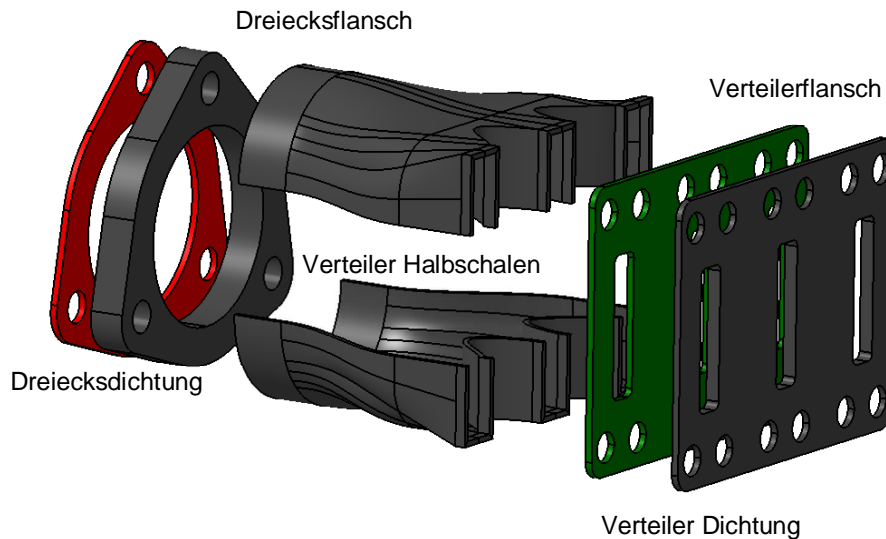


Abbildung 2-11 M-Verteiler

Für eine gute Strömungsverteilung ist darauf zu achten, dass dies mit möglichst wenig Druckverlust geschieht. Daher sollten Turbulenzen und größere Querschnittsverkleinerungen im Verteiler vermieden werden. Der M-Verteiler hat einen Dreiecksflansch, der die Anbindung an ein übliches Abgasrohr mit dem Durchmesser von 55mm ermöglicht. Die Höhe der Halbschale ist 89,4mm, die Breite 21,5mm und die Materialstärke ist 1,5mm, die Abmessungen entsprechen den Abständen und der Breite der WÜT im Gesamtaufbau. Die Flanschverbindungen können auch durch direkte Schweißverbindungen ersetzt werden, sofern die Zugänglichkeit gegeben ist.

Kühlwasserwärmeübertrager

In Abbildung 2-12 ist der Entwurf des Kühlwasserwärmeübertragers zu sehen. Dieser wird nach dem Gegenstromprinzip mit einem Kühlmedium durchströmt.

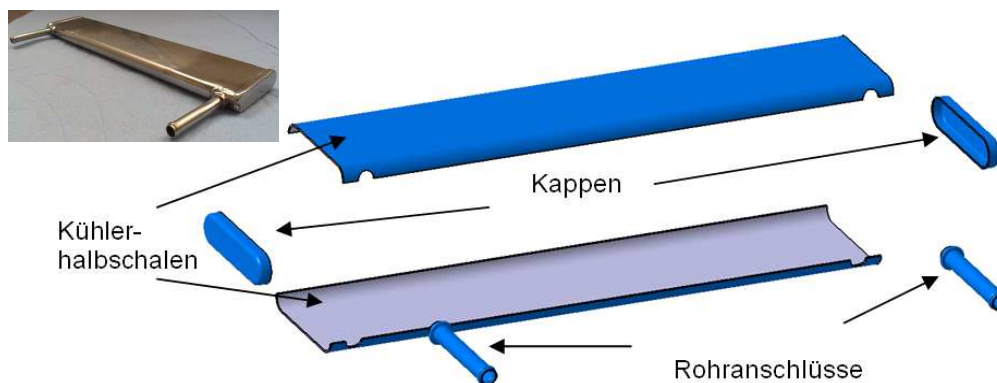


Abbildung 2-12 Kühlwasserwärmeübertrager

Der Kühler besteht aus zwei Halbschalen, zwei Kappen und zwei Rohranschlüssen. Er ist 242 mm lang, 48 mm breit und hat eine Höhe von 11,6 mm, so dass wie beim Abgaswärmeübertrager auf jeder Seite drei TE-Module

Platz finden. Neben der Funktion die TE-Module zu kühlen hat der Kühler noch eine weitere Funktion. Durch die Bombierung (Wölbung) wird eine Vorspannkraft als Flächenpressung zu den TE-Modulen durch das Spannen über die Gehäuseschalen von etwa 1 MPa erreicht. Die Auslegung des Spannkonzpts wird in folgenden Absatz genauer erklärt. Gefertigt werden die beiden Halbschalen durch Tiefziehen. Sie werden dann mit den Kappen und den beiden Anschlussrohren für Wassereintritts und -austrittsseite verschweißt. Diese Baugruppe ist insgesamt als Schweißbaugruppe vorgesehen. Simulationstechnisch wurde zusätzlich ein Innenhochdruck-Umformen (IHU) eines Kühler-Rohres als Fertigungsprozess betrachtet. Aus Kostengründen wurde dieses nicht weiter verfolgt.

Funktion des Spannkonzpts

Der gesamte Aufbau des thermoelektrischen Generators beinhaltet mehrere Modul-Lagen bzw. sich abwechselnde Schichten der Einzelkomponenten entsprechen dem modularen Konzept. In Abbildung 2-13 ist der spätere Zusammenbau eines halbseitigen TEG zu sehen. Die einzelnen Komponenten werden übereinander gestapelt und dabei von dem Werkzeug geführt bzw. in Position gehalten. Das Werkzeug hält die Kühlwasserwärmeübertrager und die Abgaswärmeübertrager an den Seiten in genauer Position. Nach dem Einlegen der oberen Gehäuseschale und dem Zusammenpressen mit einer speziellen Werkstattpresse werden die Gehäuseschalen final verschweißt.



Abbildung 2-13 Zusammenbau Werkzeug

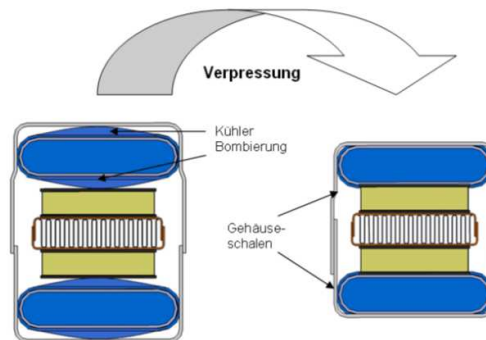


Abbildung 2-14 Verpressung Submodul [1], [2]

Um die bestmögliche Leistungsausbeute bei den thermoelektrischen Modulen erzielen zu können, müssen die Flächen der Komponenten thermisch gut kontaktiert werden. Dies wird durch das aktuelle Presskonzept erreicht, hierbei wird der gesamte Aufbau verspannt wie schematisch in Abbildung 2-14 gezeigt wird.

Beim Zusammenbau drückt ein Presswerkzeug die beiden Gehäuseschalen und den Aufbau, wie in Abbildung 2-13 gezeigt, mit einer resultierenden Flächenpressung von 10 bar (1 MPa) zusammen. Das Presswerkzeug verharrt in seiner Position und die Gehäuseschalen werden miteinander verschweißt. Durch die Bombierung (Wölbung) im Kühler wird eine bleibende Vorspannkraft durch die Federwirkung im Aufbau erzeugt.

Kompensation von Höhentoleranzen durch das Spannkonzep

Wie bereits beschrieben wird das Spannkonzep durch die dreidimensionale Ovalisierung der Kühler-Wärmeübertrager dargestellt. Durch diesen Lösungsansatz wird jede TE-Modulreihe einzeln verspannt. Es entsteht eine Federreihenschaltung die durch das TEG-Gehäuse bei der Fertigung gespannt wird. Alle TE-Module werden gleichmäßig entsprechend der resultierenden Flächenpressung gelagert.

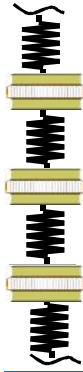


Abbildung 2-15 Ersatzschaltbild der Kühler-Feder-Funktion

Das ausgewählte Konzept beinhaltet auch einige Nachteile, insbesondere aufgrund von Höhentoleranzen der verschiedenen modularen Schichten. Je mehr Sub-TEG-Module zu einem TEG aufgeschichtet werden, desto größer sind die maximal möglichen Höhentoleranzen. Die Designauslegung muss diese fertigungsbedingten Toleranzen berücksichtigen und bewerten. Um realistische Toleranzwerte zu bekommen wurden die ersten hergestellten Halbzuge und TEG's exakt geometrisch vermessen.

Der Soll-Ist-Abgleich wurde an einem TEG mit 3 Abgaswärmeübertragern durchgeführt, welcher die maximale Summe aller Toleranzen im Baukasten darstellt.

Die Betrachtung der Höhen-Toleranzkette anhand von Herstellerangaben und theoretischen Annahmen ergibt über die gesamte Bauteilhöhe eine max. Differenz von 4,7 mm (- 2,71mm / + 1,99 mm).

Die im aktuellen TEG- Aufbau ermittelten Abweichungen sind jedoch sehr viel geringer. Die hier gemessenen Werte belaufen sich auf -0,58 / -0,18, bezogen auf Zeichnungssollmaße (Gesamthöhe lt. Zeichnung: 146,68 mm). Diese deutlich geringere Toleranz konnte nur durch eine weggesteuerte Montage mittels eines Werkzeuganschlags erreicht werden.

Über die weggesteuerte Montage werden nur die Außenabmessungen gut eingehalten. Der Innere Aufbau kann sich durch eine „schwimmende Lagerung“ verschieben. Es stellt sich ein resultierendes Kräftegleichgewicht im Inneren des Gehäuses ein.

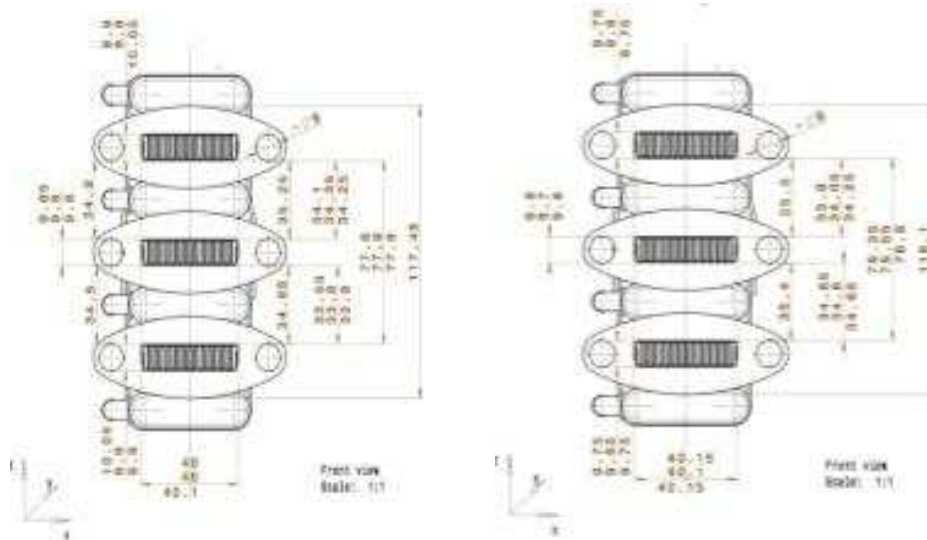


Abbildung 2-16 Darstellung der TEG Höhentoleranzen im modularen Aufbau

Zusätzlich zu den fertigungsbedingten Toleranzen ist die thermische Ausdehnung aller Komponenten zu berücksichtigen die beispielhaft für den Auslegungspunkt (BP 4) durchgeführt wurde. Diese erfolgte rechnerisch und durch eine Abstraktion der Bauteilgeometrien.

Aus dieser Rechnung ergeben sich Ausdehnungen (in der Höhe) durch thermomechanische Effekte von bis zu 0,38 mm im Betrieb. Da das Gehäuse aus zwei miteinander verschweißten U-Profilen besteht und sich aufgrund der geringeren Bauteiltemperatur weniger ausdehnt, ergibt sich aus der beschriebenen thermischen Verformung ein veränderter Anpressdruck im Inneren des TEG- Aufbaus. Dieser muss ebenfalls über die Federfunktion kompensiert werden.

Über die Länge betrachtet ergibt sich durch den höheren Wärmetransport im TEG Eintritt eine unterschiedliche Bauteiltemperatur. Demnach nimmt die thermomechanische Ausdehnung über die TEG-Länge in Abgasströmungsrichtung ab. Bezogen auf den Kontaktwärmeübergang bedeutet das, dass im stationären Betrieb die in Strömungsrichtung vorderen TEM einen höheren Anpressdruck erfahren als die hinteren. Im geringen Maße kann dadurch die Effizienz der hinteren TEM verschlechtert werden.

Durch die federnde Funktion der Kühlwasser- Wärmeübertrager werden alle Höhentoleranzen aufgenommen und entsprechend ihrer Federkennlinie kompensiert. Der sich dadurch einstellende Kontaktdruck soll im Bereich 5 bis 10 bar sein. Betrachtet man die in Abbildung 2-17 dargestellte Federkennlinie, so kann der Werkstoff 1.4509 ca. 1mm pro Kühler ausgleichen und der Werkstoff 1.4301 ca. 1,4mm. Aus der Toleranzsumme (ungünstigster Fall ohne weggesteuerte Montage) ergibt sich ein zu kompensierender Toleranzwert je Kühler von 1,27mm. Diese Höhentoleranz kann mit dem Werkstoff 1.4301 ausgegli-

chen werden. Trotzdem bleibt festzuhalten, dass der Kontaktdruck (folglich Kontaktwärmeübergang) großen Toleranzen unterliegt und die Bauteiltoleranzen möglichst gering ausgelegt werden sollten.

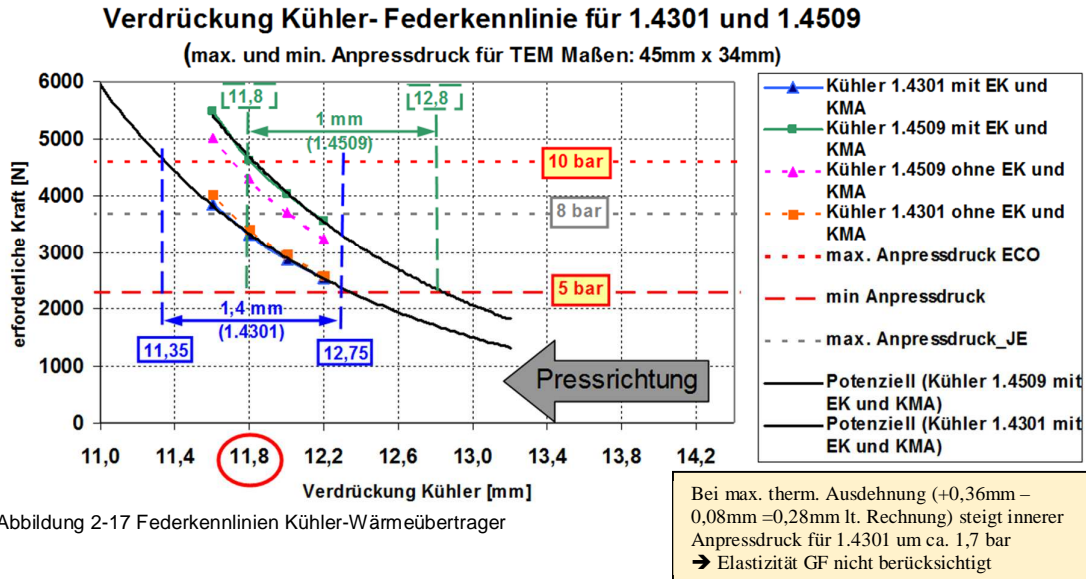


Abbildung 2-17 Federkennlinien Kühler-Wärmeübertrager

2.1.3.3 Projektbegleitende Konzeptoptimierung des Kühlers

Insbesondere das Kühlerdesign im bestehenden Konzept zeigte nach ersten Untersuchungen erhebliches Optimierungspotential. Folgende Potentiale wurden ermittelt:

- Senkung des Druckverlusts im Zu- und Ablauf
- Vergleichmäßigung der Strömungsverteilung
- Verbesserung des Spannkonzpts durch Stützstrukturen (Rippen)

Entsprechend dem ersten Punkt ist der Kühlwasser-Druckverlust zu minimieren. Laut Lastenheft darf der zusätzliche Energiebedarf 25W nicht überschreiten (Elektrische Leistung für eine Zusatzkühlmittelpumpe). Dieser Wert beinhaltet die Summe der Energieverluste durch das gesamte zusätzliche Kühlsystem.

Im ersten Schritt wurde eine Gegendruckvermessung mit einem Kühler durchgeführt. Hierzu wurde der Kühler mit einem Massenstrom von 1,25 l/min bei ca. 20°C (Medium Wasser) in einem Prüfstandsversuch durchströmt. Dabei stellte sich ein Gegendruck von 15,9 mbar ein. Dieser Gegendruck entspricht im untersuchten Betriebspunkt 0,03W hydraulische Leistung bzw. 1,4W elektrisch für 8 Kühler bei einem Pumpenwirkungsgrad von 20% (Annahme). In Abbildung 2-18 ist der Druckverlust über dem Volumenstrom aufgetragen. Zwar ist der gemessene Druckverlust unterhalb des Zielwerts, jedoch besteht durch die geringen Querschnitte im Zu- und Ablauf weiteres Optimierungspotential wie das Ergebnis der Optimierung mit dem rot dargestellten Kurvenverlauf zeigt.

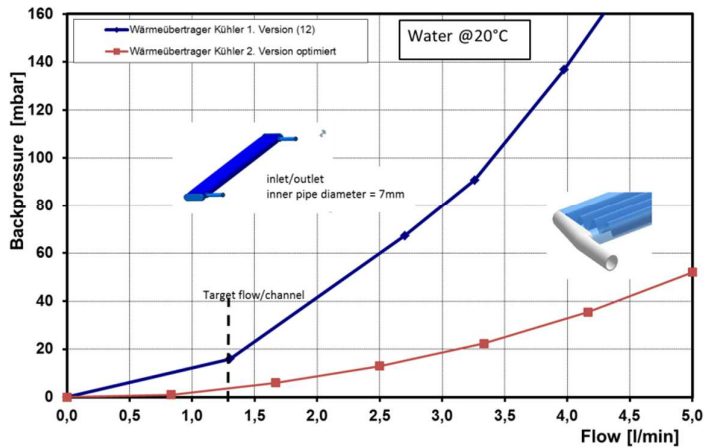


Abbildung 2-18 Druckverlust-Kennlinie Kühlmittelwärmeübertrager (vor/nach Optimierung)

Entsprechend dem zweiten Optimierungspunkt wurde das aktuelle Kühler-Design auf Gleichverteilung des Kühlmediums untersucht. Hierzu wurde zuerst eine CFD- Berechnung durchgeführt. Als Randbedingungen wurde auch hier der Auslegungsbetriebspunkt gewählt.

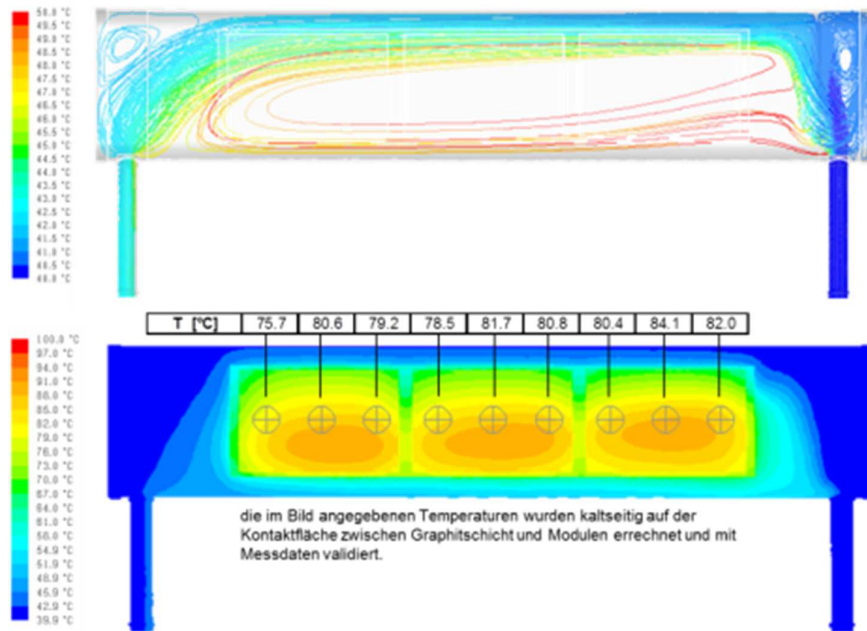


Abbildung 2-19 CFD-Berechnung zur Kühlmediumverteilung im BP4

Das Ergebnis der Rechnung ist in Abbildung 2-19 dargestellt. Im oberen Bildabschnitt ist der Temperaturverlauf von Strömungsfäden im Kühlmediumstrom dargestellt. Im unteren Bildabschnitt ist für den BP4 die Temperatur an den Kontaktflächen zu den TEM dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich das einströmende Kühlwasser an die Außenwand des Kühlers anlegt und in einem bogenförmigen Verlauf bis zur Austrittsseite im Wandbereich verbleibt. Dies deutet auf eine Ungleichverteilung der Strömung im Kühler hin. Weiterhin ist im mittleren Bereich des Kühlers eine Wirbelbildung von erwärmtem Kühl-

wasser zu erkennen. Der Bereich, in dem die TEMs auf dem Kühler aufliegen wird nur am Rande gut durchströmt. Dies führt zu ungleichen Temperaturen auf der Kontaktfläche zu den TE-Modulen und resultiert in ungleichen Kaltseitentemperaturen am TE-Modul.

Untersuchung zur Kühlmittel-Temperaturverteilung im Labor:

Die Validierung im Laborversuch mit einer Wärmebildkamera zeigt ähnliche Ergebnisse wie die Berechnung. Hierbei strömt 80°C warmes Wasser in den Kühler ein. Um den Temperaturwechsel mittels einer IR-Kamera optisch zu erkennen, wurde der Kühler vorher mit 20°C kaltem Wasser durchströmt. Über ein Ventil erfolgte schlagartig die Umstellung auf 80°C vorkonditioniertes Wasser. Dabei wurden verschiedene Massenströme eingestellt.

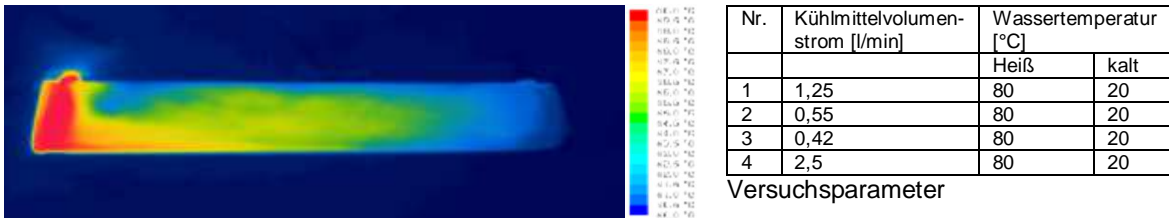


Abbildung 2-20 Messung Wärmegleichverteilung am Kühlmedium-Wärmeübertrager

Insgesamt konnten die Ergebnisse der CFD-Rechnung bestätigt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Laboruntersuchung bei freier Konvektion durchgeführt wurde und die Berechnung den Wärmestrom über die TEM berücksichtigt (Abbildung 2-20).

Für eine weitere Verbesserung des TEG's muss der Kühlmittel-Wärmeübertrager gleichmäßiger durchströmt werden.

Um die Kühlerprobleme für alle 3 Optimierungspunkte zu lösen werden im Folgenden Morphologischen Kasten Lösungsansätze aufgelistet (Tabelle 2.2). Neben den Merkmalen Temperatur- und Strömungsverteilung gibt es noch weitere Anforderungs-Merkmale. Nach der Auflistung verschiedener Lösungsansätze werden Varianten gebildet. Bei der Variantenbildung gilt es auf die bisherige Doppelfunktion des Kühlwasserwärmeübertragers zu achten. Denn bekanntermaßen muss der Kühler, neben der Kühlung der TEM noch eine Vorspannkraft von 10bar im TEG gewährleisten. Wird diese Funktion in einer der Varianten nicht vom Kühler übernommen, so muss ein anderes Bauteil diese übernehmen.

Morphologischer Kasten Kühlwasserwärmeübertrager							
Lösungen	1	2	3	4	5	6	7
Merkmale							
Druckverlust bei 1,25l/min	Seitliche Anströmung	Querschnittserweiterung von Ein- und Auslass	große Rippenabteilung	Strömungsoptimierte Formgebung (Kantenverrundung)			
Strömungs- und Temperaturgleichverteilung: im Bereich der Modulkontaktflächen $\Delta T=5K$	Einlegen von Flächen im Einströmbereich	seitliche Positionierung der Rohranschlüsse	Dreieckskanal mit Inlay (Rippen)	Einlegen von unterschiedlich langen Rohrquerschnitten mit angepassten Einströmwinkeln	Rippenstrukturen (optional angeschrägt)	Grillstruktur (optional angeschrägt)	Mäander
abzuführende Wärmeleistung: Transport über Kühlmedium ca. 6kW für den gesamten TEG (8Kühler)	Einlegen (und Fügen) von Elastischen Fins bzw. Rippen	Kompletter Kühler aus Aluminium (AL- Guss) mit integrierten Strukturen	Einlegen (und Fügen) von einer Grillstruktur	Gewellte Rippen (Wavy)	Einlegen und Fügen von Rohren	Grillstruktur (optional angeschrägt)	
Modulanpressdruck: Federwirkung für ausreichend Kontaktdruck	Bombierter Kühler	Wölbung der Gehäusehalbshalen nach innen	Einlegen von elastischen Rohrquerschnitten in den Kühler	Einlegen von elastischen Rippenkonturen in den Kühler	Schmale Sicke seitlich im Gehäuse	Grillstruktur (optional angeschrägt)	Integration von Zugdruckfedern im Kühler
Herstellbarkeit	Formgebungsverfahren	Tiefziehen (2-Halbschalen)	Aluminiumguss	IHU	Aluminium Strangpressen	Alurohr-Fins (ARUP)	
	Fügeverfahren	Laserschweißen	Löten	WIG	Elektronenstrahlschweißen	Aluminiumschweißen	
Anströmung	seitliche Anströmung	veränderte Formgebung	Dreiecksanströmung	herkömmlicher Rohranschluss			
Varianten:	4	3	1	2	5		

Tabelle 2.2 Morphologischer Kasten

Als optimaler Kühlwasserwärmeübertrager wurde aus der qualitativen Bewertungsmatrix die zweite Variante ermittelt. Das neue Kühlerkonzept besteht aus einem Kühler mit einer 3D Bombierung, einer dreieckigen Anströmung und einer steifen Rippenstruktur. Damit bleibt die Darstellung der Spannfunktion nach der Optimierung unverändert. Abbildung 2-21 zeigt ein CAD Modell des neuen Kühlwasserwärmeübertragers, die Außenwände sind transparent dargestellt um die Rippenkontur sichtbar zu machen.

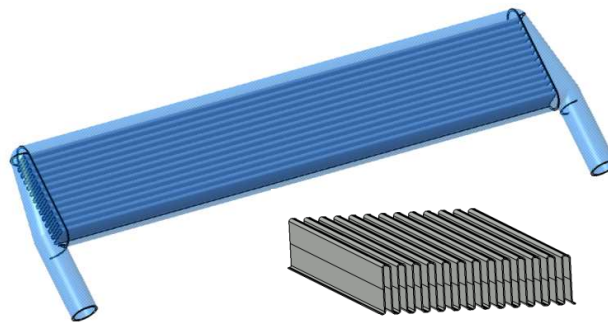


Abbildung 2-21 Kühlwasserwärmeübertrager Weiterentwicklung

Um den Druckverlust zu verringern werden die Durchmesser der Ein- und Auslassrohre von 7mm auf 10mm vergrößert (Abbildung 2-18). Die Kombination eines dreieckigen Einlasskanals mit einer Rippenkontur, ergibt eine verbesserte Strömungs- und Temperaturverteilung über den Kühler. Die Rippen ragen dabei wie in Abbildung 2-21 zu sehen in den dreieckigen Einlasskanal hinein. Dadurch, dass der Druckverlust im oberen Teil des Dreieckskanals zunimmt, verringert sich an dieser Stelle die Strömungsgeschwindigkeit. Es entsteht eine gleichmäßige Strömungsverteilung über den gesamten Querschnitt des Kühlers. Folglich ist auch die Temperaturverteilung wesentlich gleichmäßiger. Die integrierten Rippen unterstützen die abzuführende Wärmeleistung des Kühlers. Der durch den Dreieckskanal und die integrierte Rippen-

kontur entstandene Druckverlust kann durch die Querschnittserweiterung der Ein- und Auslasskanäle überkompensiert werden.

Im vorherigen Kapitel wurde dargestellt, dass in einem halbseitigen TEG große Höhenunterschiede durch thermische Ausdehnung und Toleranzen entstehen können. Derartige Toleranzen führen dazu, dass der Druck im TEG über 10bar steigen kann. Eine Bombierung alleine würde einer so hohen Belastung nicht mehr standhalten, der Kühler würde ohne eine stützende Rippenkontur einfach einklappen (Knackfroscheffekt), welches hierdurch ebenfalls verhindert wird. Unverändert werden die beiden Kühlerhalbschalen durch Tiefziehen gefertigt und schließlich miteinander Laserverschweißt. Die Rippen werden lediglich in den Kühler eingelegt. Sie sind nach dem Verpressen des thermoelektrischen Generators fest zwischen den beiden Halbschalen fixiert und liegen innen flächig an den Wänden an.

2.1.3.4 Zusammenfassung der Einzelkomponenten

In der folgenden Tabelle 2.3 ist die Übersicht der Komponenten und Baugruppen beispielhaft für einen halbseitigen TEG mit 18 Modulen dargestellt. Die Baugruppen werden weiter in Einzelteile gegliedert. Das Gesamtgewicht der Baugruppen setzt sich jeweils aus den Einzelteilgewichten und der verwendeten Anzahl zusammen. Der Anteil der Module am Gesamtgewicht beträgt etwa 21% für einen halbseitigen TEG. Die für diesen Prototypen verwendeten Flanschverbindungen und den By-Pass tragen mit 44% einen erheblichen Gewichtsanteil.







Komponenten	Bild	Material	Blechstärke in mm	Anzahl	Gewichtsanteil [%]
TEM (Bosch)		-	-	18	21,0
Abgas-WÜT Übertragerrohr Flansch		1.4301	0,5	3	11,7
KM-WÜT		1.4301	0,8	4	11,8
Graphitfolie		-	0,75	12	0,8
Mantel		-	-	1	11,1
Anbindung an Abgasstrang		-	-	-	43,6
M-Verteiler		1.4301	1,5	2	
Y-Hose		1.4301	1,5	2	
Bypassrohr		1.4301	1,5	1	
Bypassklappe		-	-	1	
Schrauben		Zylinderkopf M8x20	-	12	
Mütter		M8	-	12	
Dichtung		-	-	2	
Halter		-	-	2	

Tabelle 2.3 TEG EVO 2 Halbseite mit By-Pass System

2.1.4 Berechnung und Simulation zur TEG-Auslegung

Zur Simulation der einzelnen Wärmeübertrager als auch des Aufbaus einzelner Submodule wurden sowohl 1- als auch 3-dimensionale Simulationswerkzeuge eingesetzt.

Zur schnellen Abschätzung der Leistungsdaten verschiedener Wärmeübertrager (Material, Rippenstruktur, ~anzahl etc.) wurde ein Excel-basiertes Werkzeug programmiert, welches unter Berücksichtigung eines eindimensionalen Ansatzes die Möglichkeit bietet, sowohl den zu erwartenden Gegendruck als auch die Temperaturen der einzelnen Bauteile und daraus die übertragbare Wärmemenge abzuleiten.

Zur Validierung dieses 1-D Ansatzes wurden in einem weiteren Schritt detaillierte dreidimensionale Strömungsberechnungen (CFD) durchgeführt. Hierbei wurde die Geometrie der Wärmetauscher jeweils exakt modelliert, um sowohl das Strömungsverhalten auf der Abgas- als auch der Kühlmittelseite bestmöglich zu berücksichtigen. Zudem wurden Berechnungen zur Wärmeübertragung abgeleitet. Zur Reduzierung der nicht unerheblichen Rechenzeiten wurde unter Nutzung der Symmetriebedingungen nur ein repräsentativer Kanal unter Anpassung der Randbedingungen berechnet.

Auf dieser Basis wurden dann umfangreiche Parameterstudien zur Auswahl geeigneter WÜT-Strukturen durchgeführt. Bewertungskriterien waren hierbei vor allem der resultierende Gegendruck über den WÜT sowie die übertragbare Wärmemenge bei festgelegten Betriebspunkten. Auslegungspunkt war hierbei der Betriebspunkt 4. Weitere Betriebspunkte wie Stadt-, Überland- und Autobahnfahrt wurden für einzelne Geometrien zusätzlich berechnet.

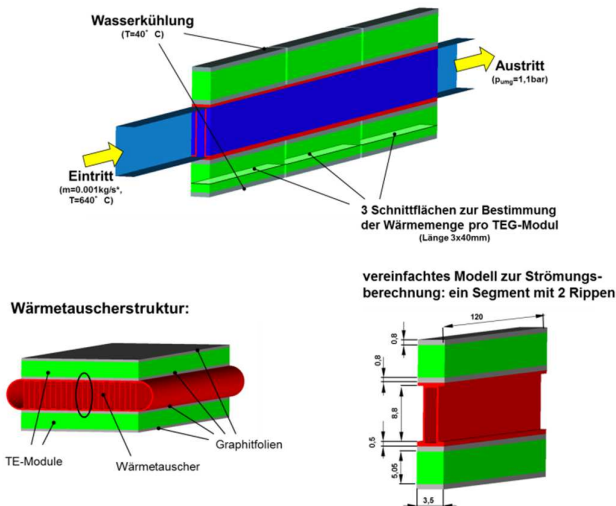


Abbildung 2-22 Berechnung und Simulation zur TEG Auslegung

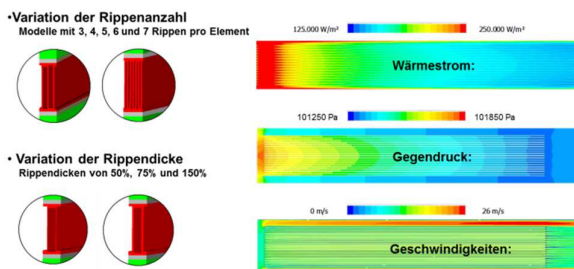


Abbildung 2-23 CFD-Modellerstellung 3-D und Optimierung der Wärmeübertragung

Durch die Verwendung verschiedener Simulationswerkzeuge konnten die hieraus erzielten Ergebnisse verglichen werden und sicherten so das Berechnungsergebnis für eine zuverlässige Auslegung des TEG's zusätzlich ab. Für die weitere Verwendung ist das 1D-Rechenprogramm vorgesehen. Dieses arbeitet deutlich schneller und lässt sich einfacher auf Konzeptänderung anpassen. Nachdem ein ausreichend genauer Softwarestand erreicht wurde und das erste Konzept ausgelegt worden ist, wurde das 1D-Programm durch Validierung mit Messungen am Sub-TEG stetig optimiert und erweitert.

Insbesondere zur Berechnung der elektrischen Leistung eines jeden TEM sind charakteristische Kenngrößen des TE-Moduls durch Messdaten vom Modulprüfstand hinterlegt bzw. eingefügt worden. Im aktuellen Stand der Software sind zusätzlich bekannte Literaturdaten von BiTe-Modulen hinterlegt. Später können diese aktualisiert werden mit zukünftigen Modulleistungsdaten. Das Programm kann hinsichtlich Geometriedaten und Werkstoffdaten dem Entwicklungsstand des TEG angepasst werden. Übliche Werkstoffe für Abgasanlagen sind bereits hinterlegt. Für den Wärmeübertrager sind verschiedene Rippengeometrien berücksichtigt worden, wenngleich sich die aktuelle Rippengeometrie als guter Kompromiss zwischen Druckverlust und Wärmeübertragung bewährt hat. Auf Basis neuer Erkenntnisse können nun Parameter leicht variiert werden und deren wesentlichen Einflüsse auf den gesamten TEG dargestellt werden. Dieses Berechnungsprogramm ist zusätzlich geeignet Betriebsstrategien zur Maximierung der Nettoleistung zu analysieren.

In Abbildung 2-24 ist eine Beispielrechnung für 2 TEM's, die nacheinander im TEG angeordnet sind, dargestellt. Für beide Module ist der Temperaturverlauf in den einzelnen Schichten über der Sub-TEG-Höhe dargestellt. Die unterschiedlichen Temperaturen an, bzw. im TEM lassen sich gut erkennen und stimmen mit Versuchen entsprechend den Validierungsergebnissen gut überein.

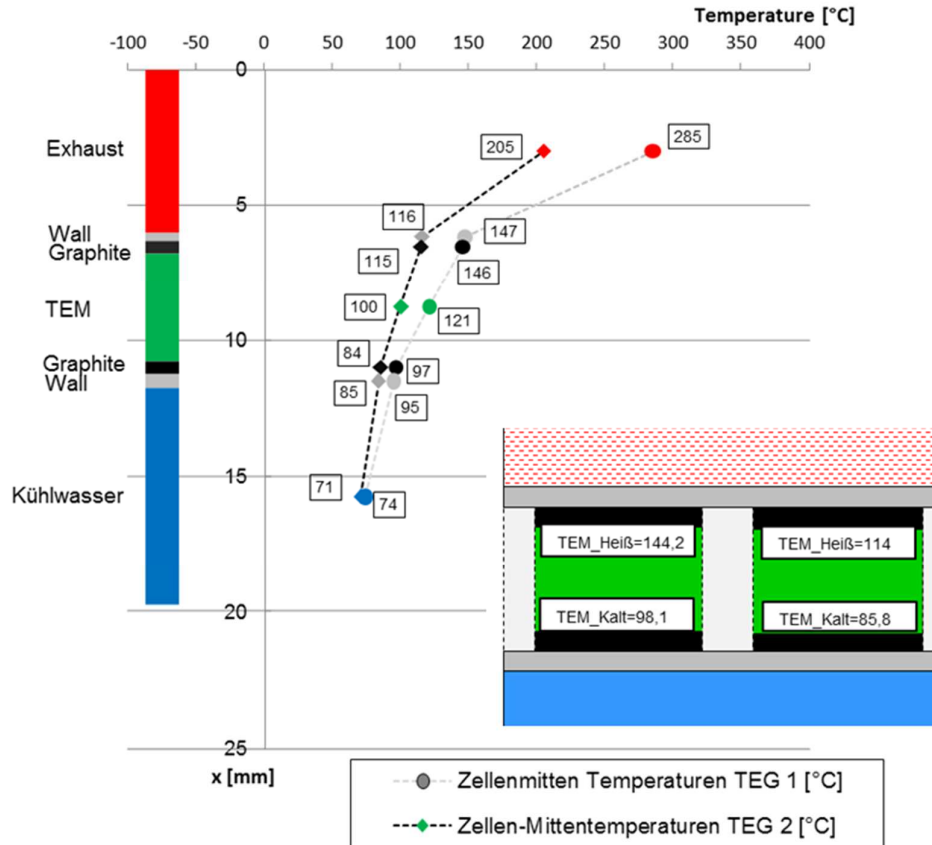


Abbildung 2-24 Beispielrechnung eines Temperaturverlaufs durch die einzelnen Material-schichten in 2 TEM (in Strömungsrichtung hintereinander)

Im 1-D-Berechnungsprogramm nicht enthalten sind die Abgasanströmung und Gleichverteilung über den M-Verteiler bzw. Abgastrichter sowie die Kühlwasseranströmung und Verteilung.

Für die Strömungsgleichverteilung bzw. Aufteilung der Abgasströmung auf die drei Abgaswärmeübertrager wurde ein separates Simulationsmodell erstellt. Die Geometrien der abgasführenden Bauteile wurden mit einem Volumennetz vernetzt, dass im wandnahen Bereich feiner ausgeführt ist (Boundary Layer), Abbildung 2-25. Hierdurch ergeben sich Vorteile bei der Berechnung der wandnahen Grenzschichten, welche sehr sensibel auf unterschiedliche Turbulenzmodelle reagieren. Das Volumennetz selbst wurde im Bereich der Verteiler durch ein Tetraedernetz realisiert.

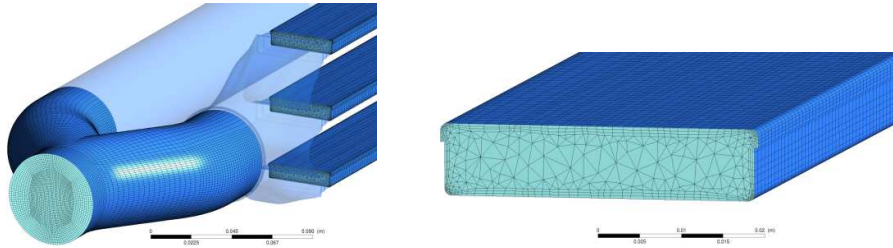


Abbildung 2-25 Netzaufbau mit ‚Boundary Layer‘ im Trichter sowie den heißseitigen WÜT

Für die Optimierung der Verteilerstruktur wurden die Strömungsrandbedingungen für zwei unterschiedliche Betriebspunkte gewählt: 51.1 kg/h und 240 kg/h. Hierbei wurde als Austrittsbedingung jeweils ein Druck von 1.1 bar angenommen, um den Einfluss nachfolgender Komponenten auf das Druckniveau und somit die Abgaseigenschaften zu berücksichtigen.

Die Darstellung der Durchströmung durch sogenannte Path-lines in Abbildung 2-26 zeigt deutlich die sehr gleichmäßige Aufteilung des Gesamtmassenstroms auf die einzelnen WÜT-Kanäle. Gleichzeitig ist ersichtlich, dass der durch die Klappe geschlossene Bypass ebenfalls eine Auswirkung auf das Strömungsbild zeigt, da einzelne Path-lines auch diesen Bereich durchströmen.

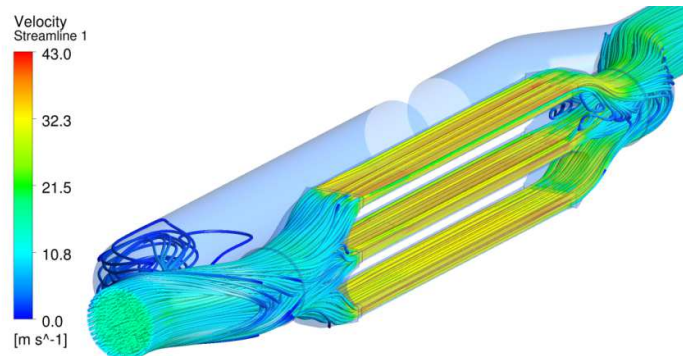


Abbildung 2-26 Strömungslinien der Strömung im Bereich des TEG

Aus der Berechnung der Teilströme zeigt sich, dass der modellierte Verteiler bereits eine sehr gute Aufteilung des Gesamtmassenstroms auf die einzelnen WÜT realisiert. Die Massenströme teilen sich unabhängig vom Massenstrom im Verhältnis 33.2%:33.6%:33.2% auf. Die entsprechenden Gegendrucke betragen hierbei 21 mbar bzw. 305 mbar für die beiden Massenströme. Hiervon ergeben sich die anteiligen Gegendrucke über die WÜT zu 17.78/18.05/17.78 mbar bzw. 263/271/263 mbar.

Diese Aufteilung ist bereits im ersten Schritt so nahe am Optimum, dass hier keine weiteren Optimierungsiterationen sinnvoll sind. Der hohe Abgasgegendruck im zweiten Betriebspunkt verdeutlicht die Notwendigkeit eines Bypasses, der in diesem Punkt geöffnet werden sollte.

2.1.5 Grundlagenversuche am Sub-TEG

Dieses Kapitel hat den geometrischen Aufbau der Sub-TEG und die verwendeten TEM Module bzw. Dummies, so wie ihre Anordnung, zum Inhalt. Über die Laufzeit des Projektes wurden verschiedene Prototypen aufgebaut und getestet. Dies reicht von einfachen Wärmeübertragern mit Rippenstruktur bis zu komplett verschweißten Halbseiten-TEGs. Im Folgenden werden die einzelnen Entwicklungsstufen näher beschrieben.

Zunächst wurden Wärmeübertrager mit unterschiedlichen Rippenstrukturen hergestellt. Diese wurden im Labor mittels eines Heißgas-Prüfstands entsprechend der Abbildung 2-27 vermessen. Die Ergebnisse dienen der Validierung und Optimierung der Simulations- und Berechnungssoftware.

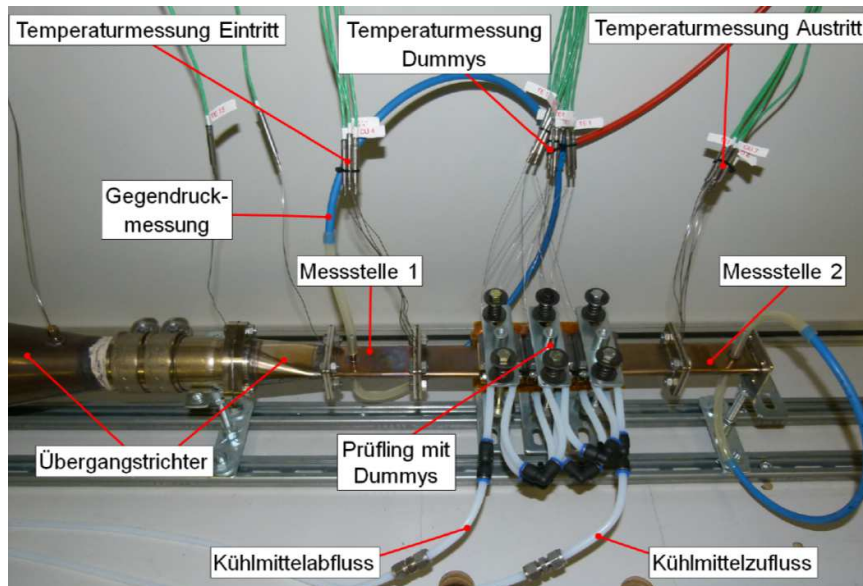


Abbildung 2-27 Versuchsaufbau

Prototyp 1 besitzt gerade Rippen mit 26 Stegen der Blechstärke 0,203 mm, Prototyp 4 besitzt ebenfalls gerade Rippen mit 32 Stegen der Blechstärke 0,127 mm sowie Prototyp 5 mit versetzte Rippenstrukturen mit 26 Stegen der Blechstärke 0,102 mm.

Zudem wurden Prototypen mit unterschiedlich zugeschnittenen Lamellenstrukturen aufgebaut und vermessen. Prototyp 2 besitzt die gleichen Lamellen aber als trapezförmiger Zuschnitt und im Prototyp 3 wurden dieselben Lamellen in 3 Segmente unterteilt und eingesetzt. Eine Übersicht der Rippen ist in Tabelle 2.5 dargestellt.

Die verschiedenen Wärmeübertrager wurden nicht nur im Auslegungspunkt gemessen, es wurden für den MBVT-Fahrzyklus fünf signifikante Punkte ausgewählt (Tabelle 2.4). Die Tabellenwerte gelten für einen Sub-TEG mit einem Abgaswärmeübertrager. Der Minimalpunkt richtet sich nach dem minimalen Massenstrom von 3 kg/h und einem Mittelwert der auftretenden Abgastempe-

raturen bei diesem Massenstrom. Die anderen Betriebspunkte sind im Lastenheft festgelegt und richten sich nach verschiedenen charakteristischen Betriebszuständen während Stadt- (BP 2), Überland- (BP 3) und Autobahnfahrten (BP 5). Der BP 4 ist der für den TEG festgelegte Auslegungspunkt.

Betriebspunkt	Bezeichnung	\dot{m}_L in [kg/h]	ϑ_L in [°C]	$\vartheta_{Kupferkreuz}$ in [°C]
1	Minimal	3	489	440
2	Stadt	7,26	506	462
3	Überland	13,68	646	598
4	Auslegung	17,04	640	610
5	Autobahn	24,48	744	719

Tabelle 2.4 Definition verschiedener Betriebspunkte und Auslegungspunkt

Die folgende Tabelle 2.5 zeigt die Messergebnisse im Auslegungspunkt BP 4 der Prototypen P1, P2, P3, P4 und P7.

	P1	P2	P3	P4	P7	
	Gleiche Struktur - unterschiedliche Zuschnitte			Unterschiedliche Struktur		
	Gerade Rippen 26 Stege / 0,2 mm	Gerade Rippen 26 Stege / 0,2 mm	Gerade Rippen 26 Stege / 0,2 mm	Gerade Rippen 32 Stege / 0,13 mm	Versetzte Rippen 26 Stege / 0,1 mm	
T-Kalt_vorne [°C]		92	79	88	93	107
T-Kalt_mitte [°C]		84	71	79	78	77
T-Kalt_hinten [°C]		70	70	65	66	66
T-Heiß_vorne [°C]		384	338	390	400	371
T-Heiß_mitte [°C]		318	294	326	326	297
T-Heiß_hinten [°C]		264	266	284	275	254
ΔT_{vorne} [°C]		292	259	302	307	264
ΔT_{mitte} [°C]		234	223	247	247	219
ΔT_{hinten} [°C]		194	197	219	210	188
Tein [°C]		611	610	611	610	611
Taus [°C]		406	417	404	393	407
Δp [mbar]		14,7	8,8	15,2	15,6	25,7
η_{th} [%]		35,9	33,9	36,3	38,2	35,8
Q_ges [W/m²]		115474	109753	117432	121940	115128

Tabelle 2.5 Ergebnisse der Wärmetauscherprototypen

Hier zeigt sich, dass der Prototyp P4 die höchste Wärmestrommenge und die größten Temperaturdifferenzen liefert.

Vergleicht man die Zuschnitte der Strukturen lässt sich auch hier erkennen, dass der Wärmeübertrager mit drei einzelnen Segmenten eine höhere Wärmestromdichte und größere Temperaturdifferenzen bereitstellen kann als die durchgängige oder trapezförmige Lamellenstruktur. Dies lässt sich in der nachfolgenden Abbildung 2-28 verdeutlichen. P3 hat dabei nicht nur die höheren Wärmeströme und größeren Temperaturdifferenzen, sondern auch den Vorteil, dass die Temperaturdifferenzen über die drei Positionen, die jeweils in

Abgasströmungsrichtung den Mittelpunkt der 3 aufeinanderfolgenden TE-Module entsprechen, etwas näher aneinander liegen als bei der durchgängigen Struktur.

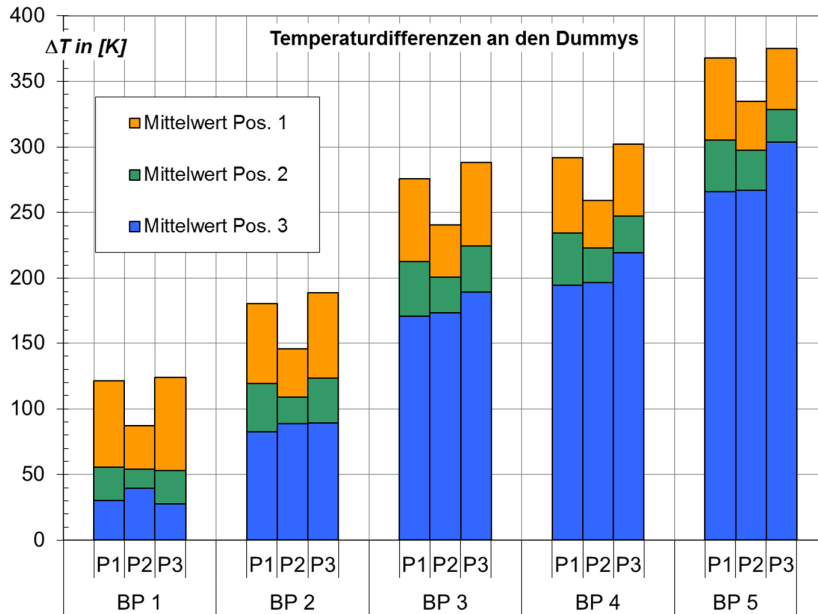


Abbildung 2-28 Kompensation des Temperaturabfalls über die WÜT-Länge

Auch die Variation des Anpressdruckes wurde untersucht (Abbildung 2-29). Durch Erhöhung der Anpressdrücke der Dummymodule zwischen den heißseitigen und kaltseitigen Wärmeübertragern lässt sich der Wärmeübergang deutlich verbessern. Dies resultiert in höheren Oberflächentemperaturen und höheren Wärmestromdichten. Für zukünftige Versuche wurde ein Anpressdruck von 10 bar festgelegt als Zielwert für die Auslegung des finalen TEG's.

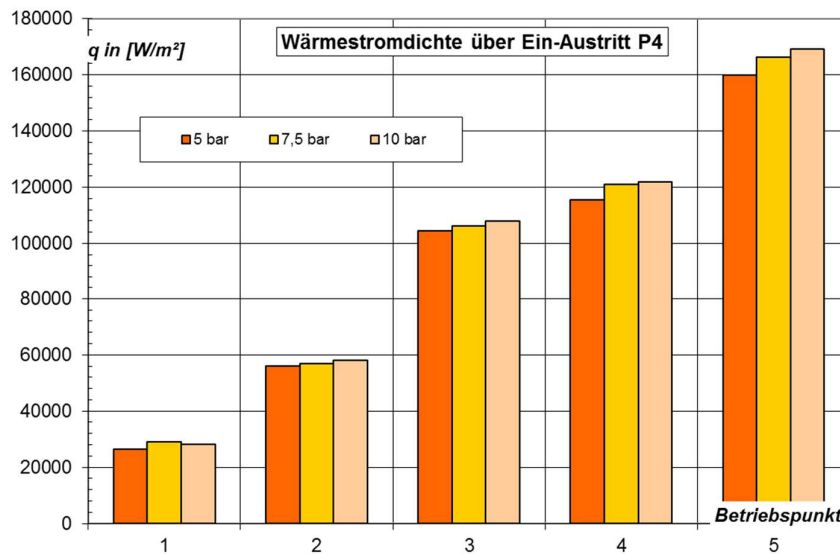


Abbildung 2-29 Einfluss des Anpressdruckes

2.1.5.1 Thermische Anbindung der TE-Module

Vor dem Aufbau der finalen Sub-TEG's als Funktionsmuster wurden Untersuchungen bezüglich der thermischen Anbindung der Module an die Heiß- und Kaltseite durchgeführt. Dabei sollten Einflüsse wie Verformungen der Wärmetauscheroberflächen und Oberflächenrauigkeiten hinsichtlich des Wärmestroms und der zu erzielenden Leistungsausbeute der Module untersucht werden.

Das TEM wurde mit unterschiedlichen Materialien (Folien, Pasten und im direkten Kontakt) als thermische Anbindung auf die Wärmeübertrager montiert und im immer gleichen Betriebspunkt vermessen. Für die Untersuchung wurde ein Laboraufbau mit einem kommerziellen Aluminiumkühler und einem Abgaswärmeübertrager für den Sub-TEG verwendet (Abbildung 2-30). Als TE-Modul wurde ein Standard-BiTe-Modul verwendet.

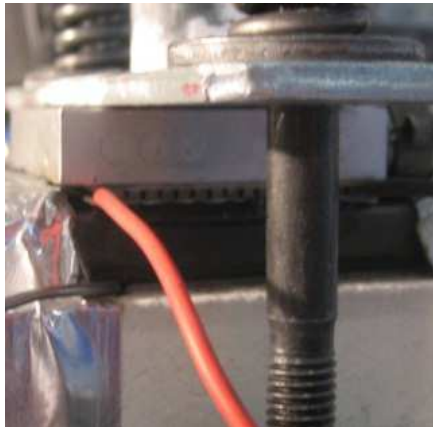


Abbildung 2-30 Aufbau mit TEM und Alukühler auf AWT

Die gemessenen Leerlaufspannungen (Abbildung 2-31) zeigen deutliche Unterschiede bei den verwendeten Materialien zur thermischen Anbindung. Die Referenzmessung mit 0,5mm Graphitfolie bestätigt die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Die geringste gemessene Spannung U_0 wurde dabei mit 0,1 mm Glimmerfolie gemessen. Diese hat isolierende Eigenschaften und aufgrund der geringen Foliendicke gleicht diese kaum Oberflächenunebenheiten aus. Das beste Ergebnis lieferte eine Kombination aus 0,5 mm Graphitfolie und Molycote-Paste. Die Graphitfolie füllt makroskopische Spalte, während die Graphitpaste kleine Unebenheiten auf mikroskopischer Ebene verfüllt.

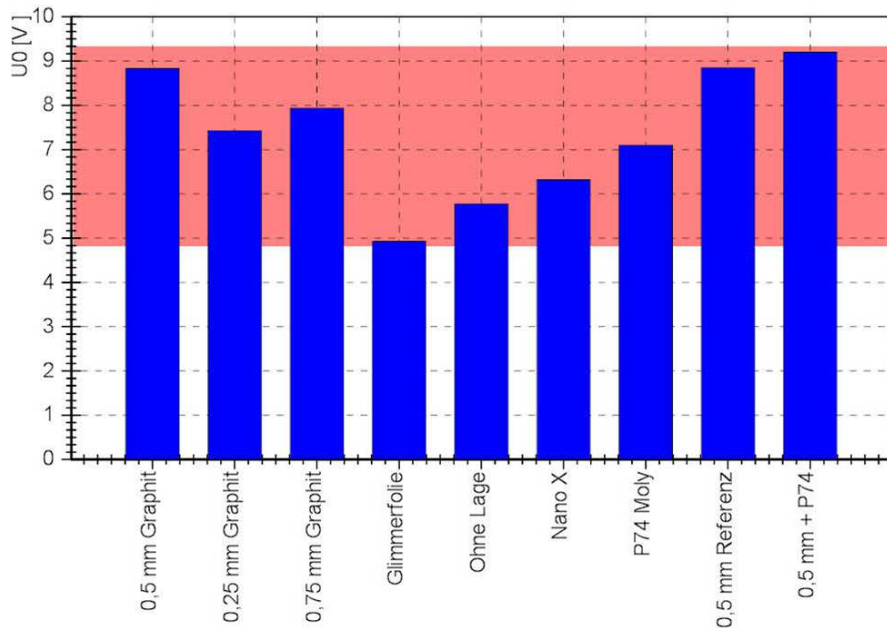


Abbildung 2-31 TEM Leerlaufspannung für verschiedene thermische Kontaktmaterialien mit Aluminiumkühler (Versuch 2)

Die Auswahl der passenden thermischen Anbindung ist abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit (Planheit, Rauigkeit, Parallelität) der zu kontaktierenden Oberflächen (Wärmeübertrager zu TEM). An einem Komponentenprüfstand mit gefrästen Oberflächen ist eine Wärmeleitpaste auf Graphitbasis ausreichend, um mikroskopische Unebenheiten auszugleichen und einen guten Wärmeübergang herzustellen. Bei den hier verwendeten Abgaswärmeübertragern werden dünnwandige Bleche mit innerer Rippenstruktur verwendet. Hierbei ist eine dickere Schicht zur thermischen Kontaktierung vorteilhaft, wie z.B. 0,5mm Graphitfolie.

2.1.5.2 Sub-TEG als vollständig montierter Versuchsträger (EVO 2.0)

Gemäß diesem Entwicklungsstand wurden 2 Submodule aufgebaut:

- 1 Submodul mit 7mm Zirkonoxid-Dummys
- 1 Submodul mit 10,1mm Zirkonoxid-Dummys

Der Aufbau der Sub-TEG's ist der Abbildung 2-32 zu entnehmen. Dieser entspricht dem wie im Kapitel *Auslegung* beschrieben. Zur Funktionsüberprüfung wurden in den Graphitfolien auf der Heiß- und Kaltseite des ZrO₂-Dummys je ein Thermoelement eingebracht.

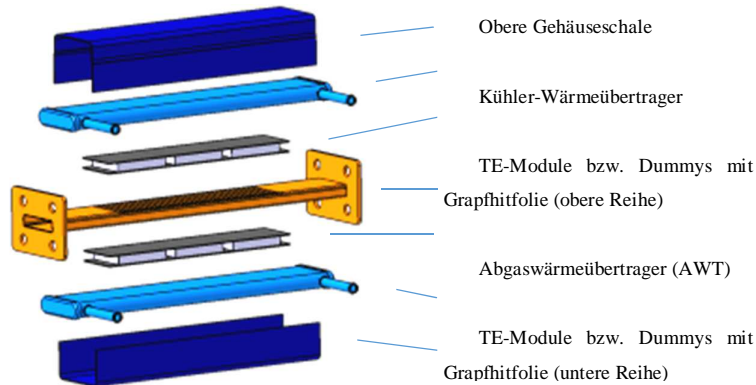


Abbildung 2-32 Komponenten eines Submoduls

Vor dem Zusammenbau wurden die Wärmeübertrager auf Maßhaltigkeit und Dichtigkeit geprüft. Im Folgenden sind die Dichtigkeitsprüfungen beschrieben:

Dichtigkeitsprüfung der Kühlwassermodule

Zur Prüfung der Kühlwassermodule wurden diese einseitig verschlossen und mit Druckluft beaufschlagt. In einem Wasserbad wurden die Kühlmedium-Wärmeübertrager auf Leckage mittels einer Sichtprüfung untersucht.

Dichtigkeitsprüfung der Abgaswärmeübertrager

Zur Prüfung der Dichtigkeit der Fügenähte wurde der Wärmeübertrager mit einer Graphitfolie an den Heißgasprüfstand angeflanscht und verschraubt. Das Gebläse wurde nun auf einen Luftmassenstrom von 100 kg/h eingestellt. Der WÜT wurde mit Lecksuchspray eingesprüht, um potentielle Fehlstellen in Lot- oder Schweißnähten durch Blasenbildung zu erkennen.



Abbildung 2-33 Aufbau Dichtigkeitsprüfung Abgaswärmeübertrager

Zusammenbau Graphitfolien mit Thermoelementen und Zirkonoxid-Dummies

Damit die Thermoelemente und weitere Komponenten vor dem Zusammenbau fixiert werden können, wurden aus Graphitfolien, Thermoelementen und ZiO_2 -Dummies eine Unterbaugruppe gebildet. Je 3 Dummies mit der Graphitfo-

lie heißseitig und kaltseitig wurden mit Klebstoff (punktuell aufgetragen) verbunden.



Abbildung 2-34 Verbund aus Zirkonoxiddummys, Graphitfolien und Thermoelementen

Zusammenbau Sub-TEG's mit Dummy-Modulen

Für den Zusammenbau der Sub-TEG's wurden Hilfswerkzeuge zur genauen Positionierung der einzelnen Komponenten und Unterbaugruppen konstruiert und hergestellt.

Für den Zusammenbau musste zuerst das Werkzeug in einer Werkstattpresse installiert werden. Das zweigeteilte Werkzeug zum Spannen des TEG (der Kühler) blieb zunächst weit geöffnet zum Einlegen der Baugruppen.

Anschließend wurde die Unterschale mit eingepprägtem Absatz (Sicke) in das Werkzeug eingelegt. Danach folgte das erste Kühlwasser-Modul. Im nächsten Schritt wurde der Verbund aus Graphitfolien, TE und ZrO_2 - Dummys mittig in x- und y-Richtung aufgelegt. Die Baugruppe wurde so eingelegt, dass die Kabel der Thermoelemente in Richtung der Kühlerrohre zeigten.

Der Wärmeübertrager wurde nun eingelegt und in x- und y- Richtung mit einer Schieblehre mittig positioniert.

Dann wurde ein zweiter Verbund aus Graphitfolien, Thermoelementen und ZrO_2 - Dummys mittig in x- und y-Richtung auf den WÜT aufgelegt.

Danach wurde das zweite Kühlwasser-Modul auf die Graphitfolie aufgelegt. Abschließend wurde die obere Mantel- Halbschale aufgelegt. Die Seitenwände wurden in die untere Mantel-Halbschale eingefügt (Abbildung 2-35).

Bevor das Submodul mit einer Vorpresskraft beaufschlagt wurde, die den Verbund und die Position der einzelnen Komponenten fixierte, musste der WÜT mittig in x und y-Richtung ausgerichtet werden.

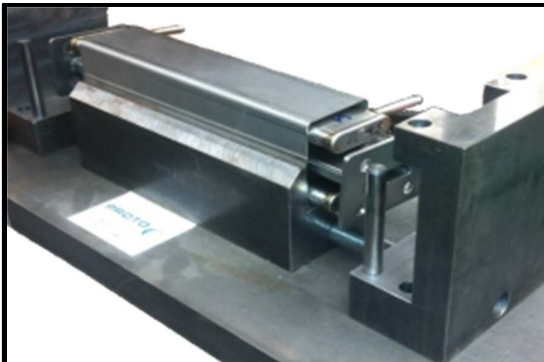


Abbildung 2-35 Submodul vor dem Pressvorgang



Abbildung 2-36 Submodul im Werkzeug fixiert

Der optimale Druck im Submodul (Flächenpressung am TEM = 10 bar) wird durch die Verpressung der Komponenten mittels eines definierten Hubwegs

im Werkzeug erzeugt. Auf die vertikalen Anschlagpunkte am Werkzeug wurden zusätzlich Bleche als Toleranzausgleich für den optimalen Hubweg gelegt (Abbildung 2-36). Die Höhe der Bleche ergab sich aus der Geometrievermessung der Halbzeuge vor dem Zusammenbau. Die seitlichen Werkzeugbacken wurden nun horizontal bis zum Anschlag eingeschoben.

CAD-Modell unverpresst

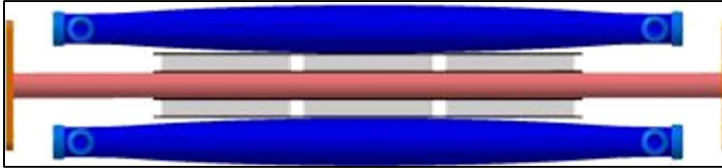


Abbildung 2-37 CAD-Modell unverpresst

CAD-Modell verpresst

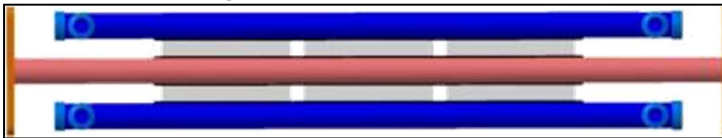


Abbildung 2-38 CAD-Modell verpresst

Nachdem die Presse den vertikalen Anschlag erreicht hatte wurde an beiden Seiten des Submoduls Ober- und Unterschale mittels WIG-Schweißverfahren verschweißt und der Zusammenbau fertiggestellt. Das CAD-Modell in Abbildung 2-37 und Abbildung 2-38 zeigen schematisch den Pressvorgang im TEG. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Umsetzung im Werkzeug für zwei verschiedene Sub-TEG's mit Dummy-Modulen und den späteren finalen TE-Modulen. Mit diesen TE-Modulen wurden insgesamt 3 Sub-TEG's nach dem gleichen Prozess hergestellt. Im weiteren Verlauf wurden die Prototypen auf Laborprüfständen untersucht, wie in den folgenden Kapiteln dargestellt wird.



Abbildung 2-39 vorgespannter Aufbau im Presswerkzeug (mit Dummy's)



Abbildung 2-40 Ober- und Unterschale mit Schweißnaht verbunden (optimierter Stand einseitig mit Modulen Evo 2.1-1)

2.1.5.3 Aufbau eines Halbseitigen TEG's mit Dummy-Modulen

Ein halbseitiger TEG besteht aus 3 Abgaswärmeübertragern, 4 Kühlermodulen und 18 Zirkonoxid-Dummys als Ersatz für die TE-Module. Es wurden am TEG-Eingang jeweils am 1. Dummy ein Thermoelement an der Heiß- und Kaltseite vorgesehen. Beim mittleren Wärmeübertrager wurden bei 3 Dummys

über die Durchflusslänge Thermoelemente an Heiß- und Kaltseite vorgesehen für zukünftige Untersuchungen. Der gesamte Aufbau wird mit 2 Mantelschalen zusammengepresst und verschweißt, analog zum Aufbau der Sub-TEG's.

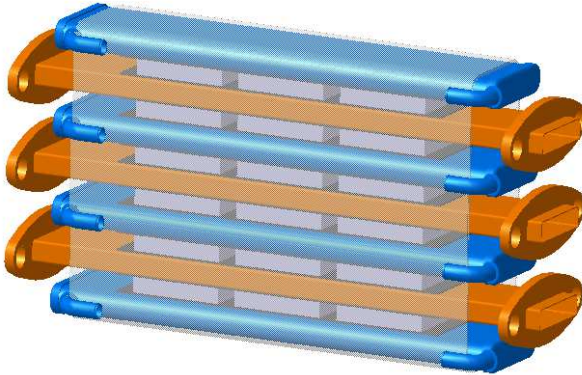


Abbildung 2-41 Halbseitiger TEG CAD-Abbildung

Folgend wird in einer Bilderdokumentation der Zusammenbau des TEG dargestellt. Erkenntnisse aus dem Zusammenbau sind später in die Bewertung und das Industrialisierungskonzept eingeflossen.

Im ersten Schritt wurde das Werkzeug mit dem ersten Abstandshalter und der unteren Mantelschale bestückt. Anschließend wurde das erste Kühlermodul eingelegt.



Abbildung 2-42 Werkzeug mit unterer Mantelschale

Abbildung 2-43 Das erste Kühlermodul wird eingelegt

Auf das Kühlermodul wurde der Verbund aus 3 Zirkonoxid-Dummys, Graphitfolie und Thermoelementen eingelegt und mittig positioniert.



Abbildung 2-44 Der erste Wärmeübertrager wurde eingefügt



Abbildung 2-45 Der zweite Verbund aus Dummies, Graphitfolien und Thermoelementen wurde positioniert

Der zweite Verbund aus 3 Dummies, Graphitfolien und Thermoelementen wurde eingebracht.

Der zweite Kühlkanal wurde mit der Werkzeughalterung montiert. Die Arbeitsschritte wiederholen sich nun entsprechend dem modularen Aufbau des TEG bis das vierte Kühlmodul im Werkzeug positioniert ist. Zum Abschluss wird die obere Mantelschale aufgelegt und der gesamte Aufbau unter der Presse ausgerichtet und entsprechend der Auslegung Weg-gesteuert verpresst.

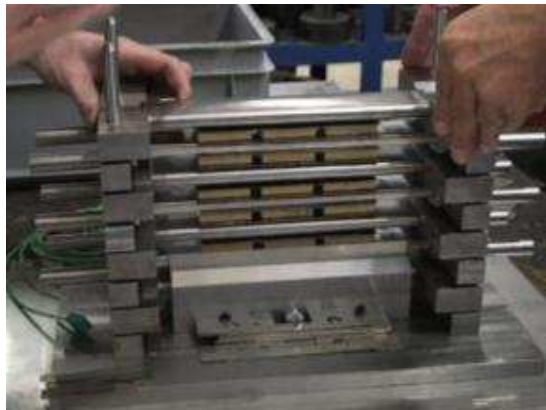


Abbildung 2-46 Der vierte Kühlkanal wurde montiert

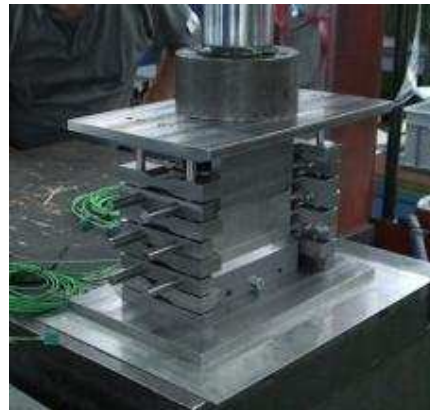


Abbildung 2-47 Der Aufbau wurde mit der Presse verpresst



Abbildung 2-48 WIG-Schweißnaht der beiden Mantelschalen

Nach dem Schweißen der sich nun überlappenden Gehäusehälften wurde die Presse entlastet und die Werkzeughalterungen entfernt.



Abbildung 2-49 fertiger halbseitiger TEG

Abbildung 2-50 fertiger halbseitiger TEG Seitenansicht

Durch diesen ersten Zusammenbau eines halbseitigen TEG's konnte der zuvor geplante Fertigungsprozess erfolgreich umgesetzt werden. Die Werkzeuge haben den modularen Aufbau bis zum finalen Verschweißen ausreichend positioniert. Die Herstellung dieses TEG-Konzepts konnte damit anhand eines ersten Prototyps erfolgreich nachgewiesen werden.

Jedoch wurden auch einige Nachteile festgestellt. Aufgrund des reinen Kraftschlusses können sich die Komponenten innerhalb des Gehäuses unterschiedlich ausrichten. Geometrische Nachmessungen ergaben, dass sich die Wärmeübertrager nach dem Entnehmen aus dem Werkzeug hinsichtlich ihrer Lage verändert haben. In dem Pressverbund stellte sich ein Federgleichgewicht ein. Durch lokale Fertigungsunterschiede in den Kühlermodulen und der anderen Komponenten lässt sich diese Beobachtung erklären. Für ein serientaugliches Konzept, insbesondere für die Anbindung der M-Verteiler zur Abgasanlage ist hier eine Optimierung im Konzept bzw. Fertigungsprozess vorzusehen.

Für die Herstellung einiger Funktionsmuster lassen sich diese Toleranzen durch einen individuellen M-Verteiler ausgleichen. Für eine spätere Serienlösung ist ein anderes Konzept zu entwickeln, z.B. wie das in Kapitel 2.1.9 mit dem Konzept „TEG EVO 4“ dargestellte.

2.1.6 Untersuchung und Charakterisierung der TE-Module

Die Vermessung der thermoelektrischen Module wurde am Modulprüfstand durchgeführt. Dieser Modulprüfstand besteht aus einer hydraulischen Presse, einem Kraftmesssensor, einer Heizplatte und einer Kühlplatte. Mit der Presse kann der Anpressdruck des Moduls eingestellt werden. Mit der Heiz- und Kühlplatte können die Heiß- und Kaltseitentemperaturen eingestellt werden. Über einem Kupferblock kann über Temperaturdifferenzen der Wärmestromeintrag ins Modul gemessen werden. Mit einer elektronischen Last wird der Lastwiderstand stufenlos variiert. Die Größen Strom, Spannung, Widerstand und Leistung werden hierbei aufgezeichnet.

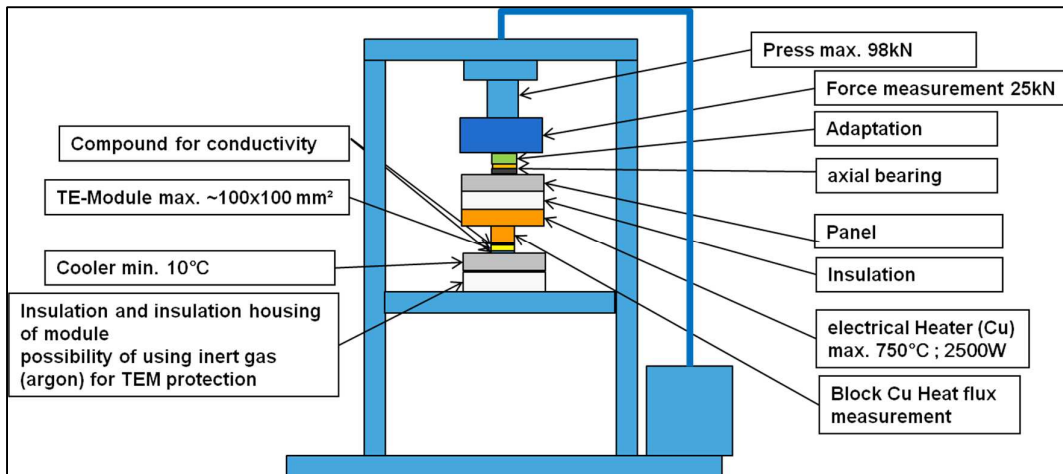


Abbildung 2-51 schematischer Aufbau TEM-Prüfstand

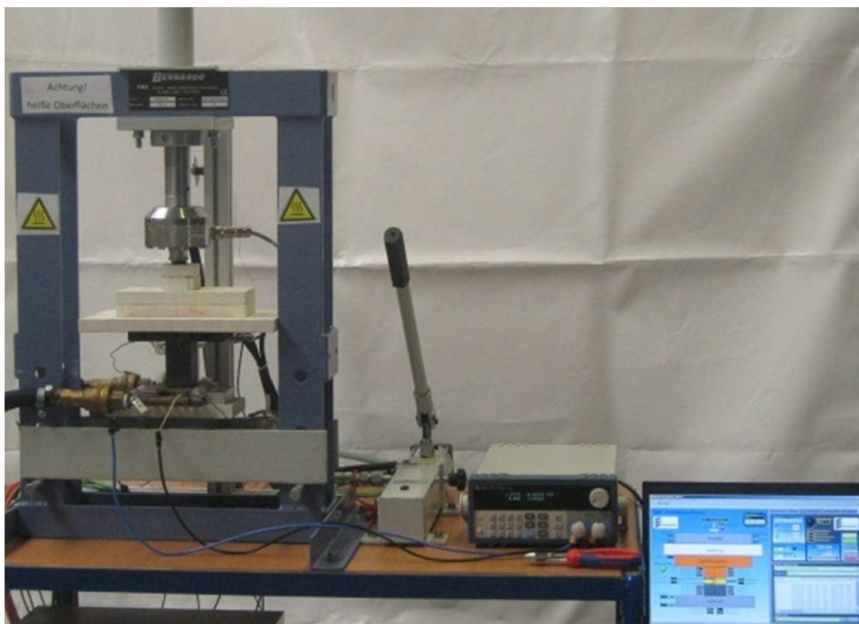


Abbildung 2-52 Foto Modulprüfstand

2.1.6.1 Grundvermessung der TE-Module für den Einbau im Sub-TEG
 Sub-TEG 2.1-1

Für den Aufbau eines Sub-TEGs analog dem Kapitel 2.1.5.2 wurden 3 thermoelektrische Module von Bosch geliefert. Bei allen 3 Modulen handelt es sich um Module die mit dem TLP-Verfahren hergestellt wurden. Diese wurden vor dem Einbau geometrisch vermessen (Tabelle 2.6). Anschließend erfolgte eine Überprüfung der Leistungsfähigkeit an einem der Module im TEG-Modulprüfstand. Es wurde das Modul Nr. 80 vermessen. Dazu wurden die Heißeitentemperaturen von 100, 200, 300, 400°C eingestellt. Als Kaltseitentemperatur wurde 70°C eingestellt. Der Anpressdruck wurde zwischen 0,3 MPa und 1 MPa variiert. Um die Module nicht unnötig thermisch zu belasten, wurde auf Temperaturen größer 400°C verzichtet (Abbildung 2-53).

Modul	optisch Prüfung	Abmaße Kaltseite [mm]	Außenmaß Kante Deckel [mm]	Dicke zwischen Modulfläche HS und Kaltseite [mm]	Gewicht [g]
1 (80)	ok	43 x59	62 x 46	9,8	102,49
3 (78)	ok	43 x 59	62 x 46,1	9,8	102,15
5 (77)	ok	43 x 59	62 x 46,1	9,8	102,66

Tabelle 2.6 Geometrische Vermessung der ersten 3 Bosch-Module

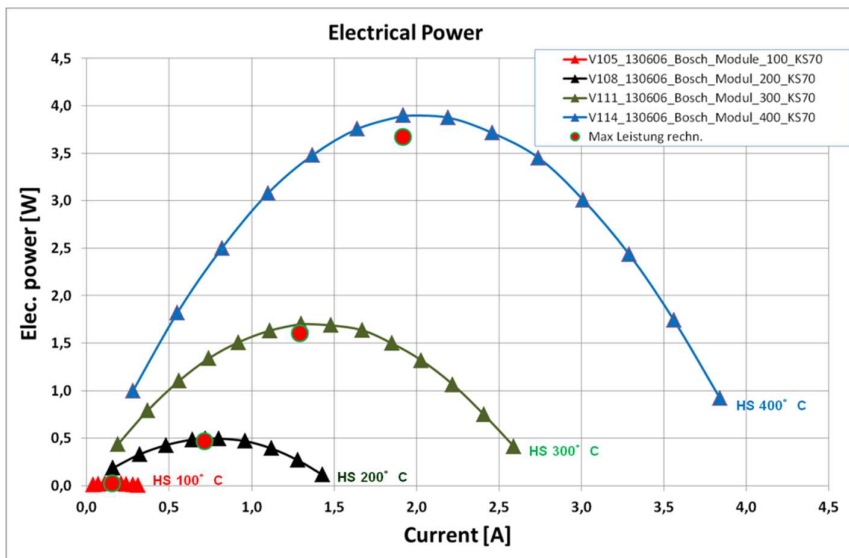


Abbildung 2-53 Gemessene elektrische Leistung bezogen auf den Strom, Variation der Heißeitentemperatur, Kaltseitentemperatur bei 70°C, Anpressdruck bei 1 MPa / TLP-Modul

Bei 400°C wurde der Anpressdruck variiert. Es wurden 0,3 MPa, 0,5 MPa und 1 MPa an Druck aufgebracht (Abbildung 2-54).

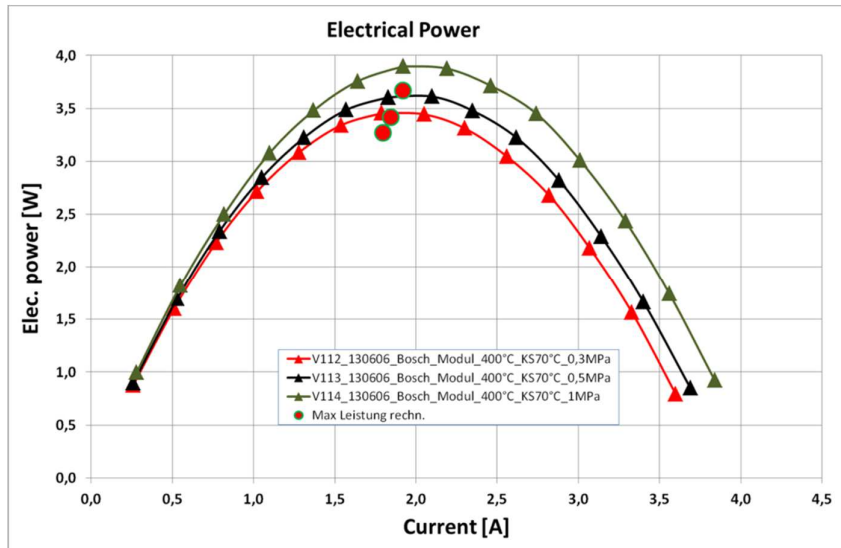


Abbildung 2-54 Variation des Anpressdrucks bei 400°C Heißseitentemperatur, 70° Kaltseitentemperatur

Bei einem Anpressdruck von 1 MPa wurde die höchste Leistung erzielt.

Die gemessenen Ergebnisse liegen im Bereich der Werte, die beim DLR gemessen wurden. Die Funktionsfähigkeit ist gegeben und die TE-Module wurden in den Sub-TEG eingebaut.

2.1.6.2 Modulvermessung für Sub-TEG 2.1-2 und 2.1-3

Für den Aufbau zwei weiterer Sub-TEGs wurden 15 Thermoelektrische Module von Bosch geliefert. Bei allen 15 Modulen handelt es sich um Module die mit dem Silbersinterverfahren hergestellt wurden. Diese wurden vor dem Einbau geometrisch vermessen (Tabelle 2.7). Die gemessenen Modulhöhen schwanken zwischen 9,8 mm und 9,95 mm (Abbildung 2-55).

Anschließend erfolgte eine Überprüfung der Leistungsfähigkeit der Module im TEG-Modulprüfstand. Es wurde eine Heißseitentemperatur von 400°C eingestellt. Als Kaltseitentemperatur wurde 70°C eingestellt. Als Anpressdruck wurde 1 MPa eingestellt. Um die Module nicht unnötig thermisch zu belasten, wurde auf Temperaturen größer 400°C verzichtet. Nur zwei Module wurden bei 600°C Heißseitentemperatur vermessen um die maximale Leistung zu ermitteln. Diese beiden Module wurden nicht in die Sub-TEGs eingebaut. Die Module mit der größten Leistung wurden ausgewählt für den Einsatz in den Sub-TEG's (Abbildung 2-59).

Modulnummer	Gehäusenummer	Dicke [mm]	MW	Gewicht [g]
84	19	9,88	9,9	102,75
83	7	9,85	9,9	102,66
85	15	9,78	9,9	102,46
93	10	9,91	9,9	103,03
94	12	9,95	9,9	103,19
95	8	9,91	9,9	103,21
96	25	9,84	9,9	103,41
98	7A	9,85	9,9	103,12
81	14	9,87	9,9	102,45
86	9	9,91	9,9	102,73
89	13	9,85	9,9	103,31
88	18	9,92	9,9	103,04
87	5	9,82	9,9	102,73
90	20	9,85	9,9	103,01
91	6	9,87	9,9	102,75
Mittelwert		9,87		102,92
Max.		9,95		103,41
Min.		9,8		102,45
STAW		0,04		0,30

Tabelle 2.7 geometrische Vermessung weiterer 15 Module

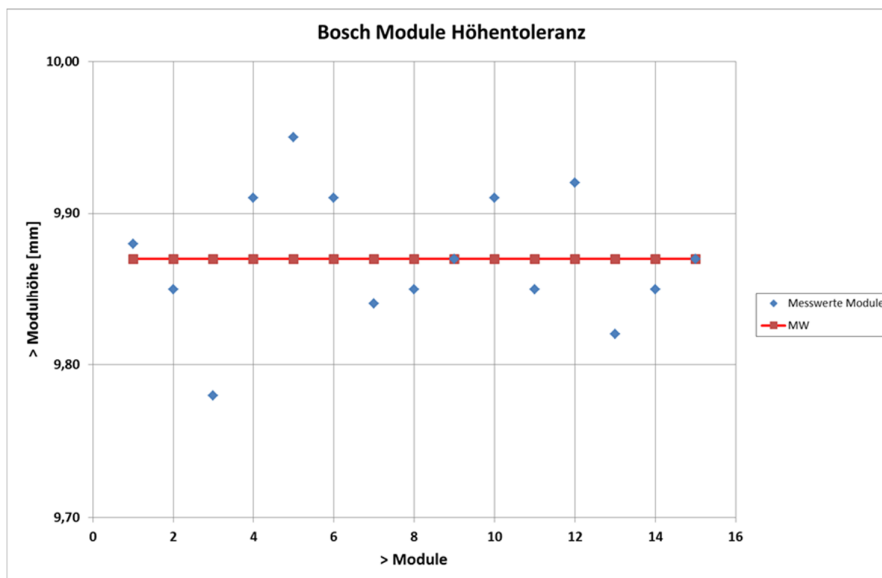


Abbildung 2-55 Höhentoleranz der 15 Module

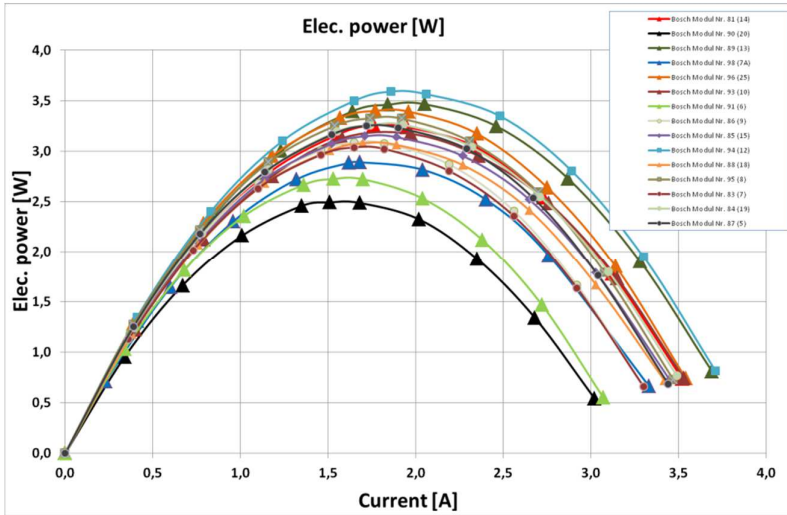


Abbildung 2-56 Vergleich der 15 Module Elektrische Leistung zum elektrischen Strom bei 400°C Heißseitentemperatur und 70°C Kaltseitentemperatur und einem Anpressdruck von 1 MPa

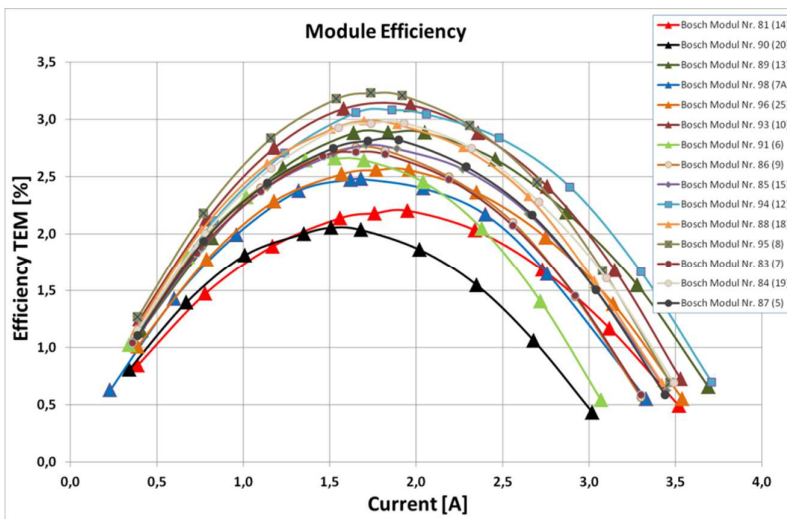


Abbildung 2-57 Vergleich der 15 Module Modulwirkungsgrad zum elektrischen Strom bei 400°C Heißseitentemperatur und 70°C Kaltseitentemperatur und einem Anpressdruck von 1 MPa

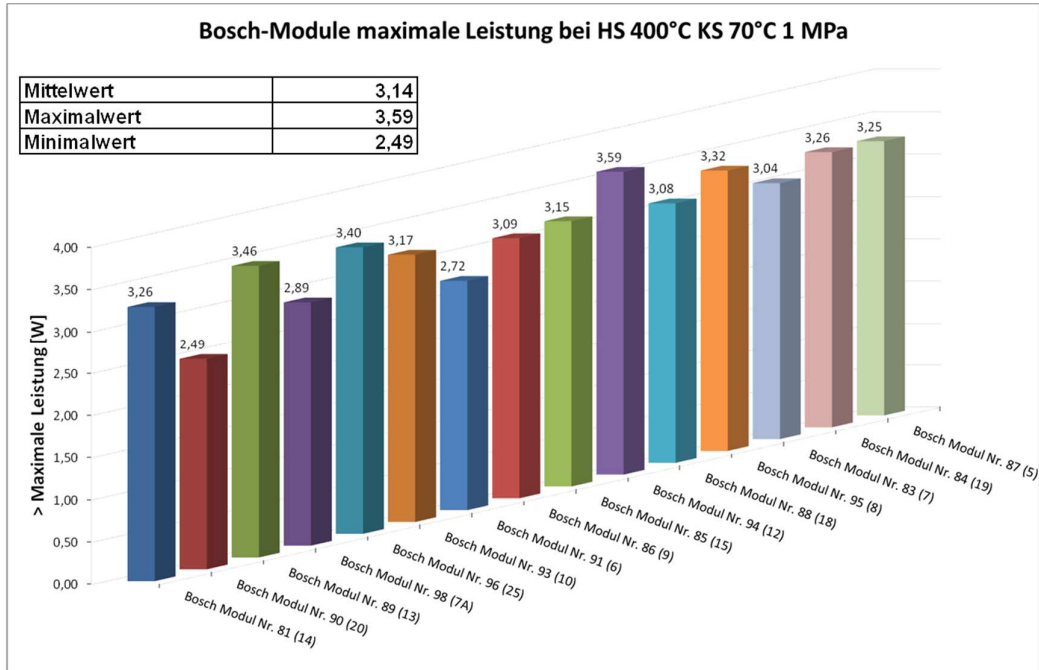


Abbildung 2-58 Vergleich der maximalen Leistung der 15 Module Silbergesintert

Die maximale Modulleistung der Bosch-Module bei 400°C HS und 70°C KS und 1 Mpa Druck schwankte zwischen 2,49 W und 3,59 W. Die maximale Moduleffizienz der Bosch-Module schwankt bei 400°C HS, 70°C und 1 Mpa Druck zwischen 2,05 % und 3,23%. Alle Module waren funktionsfähig.

Modul-Nr.	Gehäuse-Nr.	Maximalpowerpoint @HS400°C:KS70°C: 10bar [W]	Reihenfolge
94	12	3,59	1
89	13	3,46	2
96	25	3,40	3
95	8	3,32	4
81	14	3,26	5
84	19	3,26	6
93	10	3,22	7
85	15	3,15	8
86	9	3,09	9
88	18	3,08	10
83	7	3,04	11
98	7A	2,89	12
91	6	2,72	13
90	20	2,49	14
87	5	3,25	15

Tabelle 2.8 Reihenfolge der Module bezüglich max. Leistung 400°C Heißseite und 70°C Kaltseite bei 1 MPa Anpressdruck

Die Module wurden so in den Sub-TEG eingebaut, dass die leistungsstärkeren Module zum Gasaustritt hin positioniert und die schwächeren Module zum Gaseintritt hin positioniert wurden.

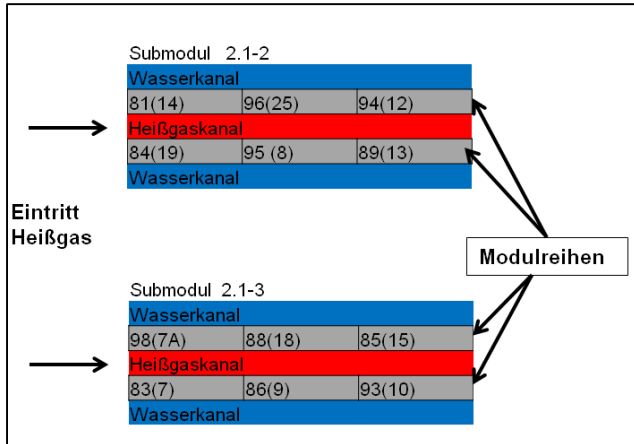


Abbildung 2-59 Einbauorte der Module im Sub-TEG

2.1.6.3 Vergleich der Kontaktierung TLP- mit Silbersinterverfahren

Die Module Nr. 90 und Nr.94 sind mit dem Silbersinterverfahren hergestellt. Das Modul Nr. 80 wurde nach dem TLP-Verfahren hergestellt. Das Modul Nr. 94 zeigt die höchste Leistung der Module mit Silbersinterverfahren. Das Modul Nr.90 zeigt die geringste Leistung der Silbersintermodule.

Das Modul Nr. 80, das mit dem TLP-Verfahren gefertigt wurde, zeigte in der Moduleistung einen um 8,6 % höheren Output als das Modul Nr. 94 mit der höchsten Leistung mit Silbersinterung.

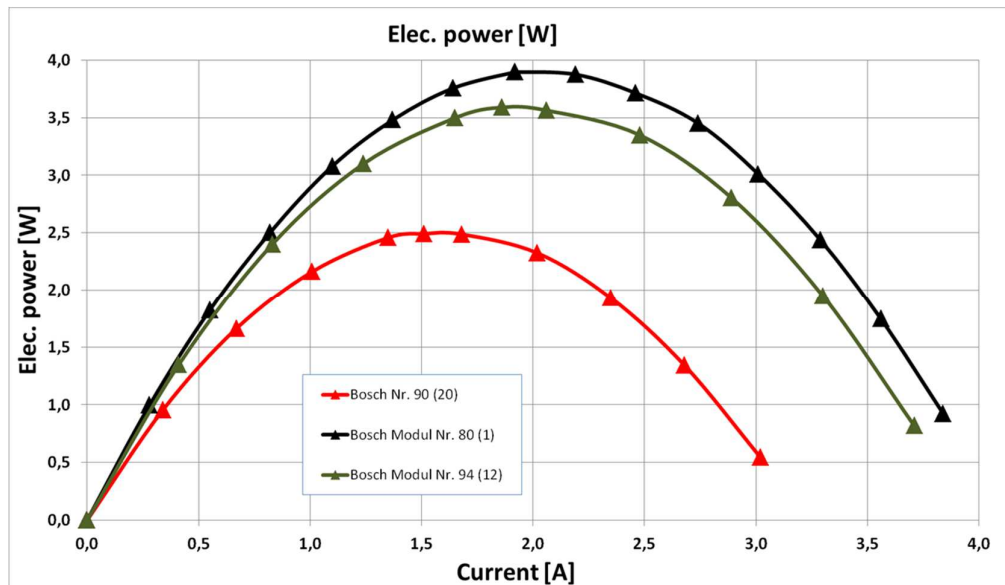


Abbildung 2-60 Vergleich der Kontaktierung Leistung zum elektrischen Strom bei 400°C Heißseite und 70°C Kaltseite. Anpressdruck 1MPa

2.1.6.4 Vermessung der Module bei 600°C Heißseite und 70°C Kaltseite

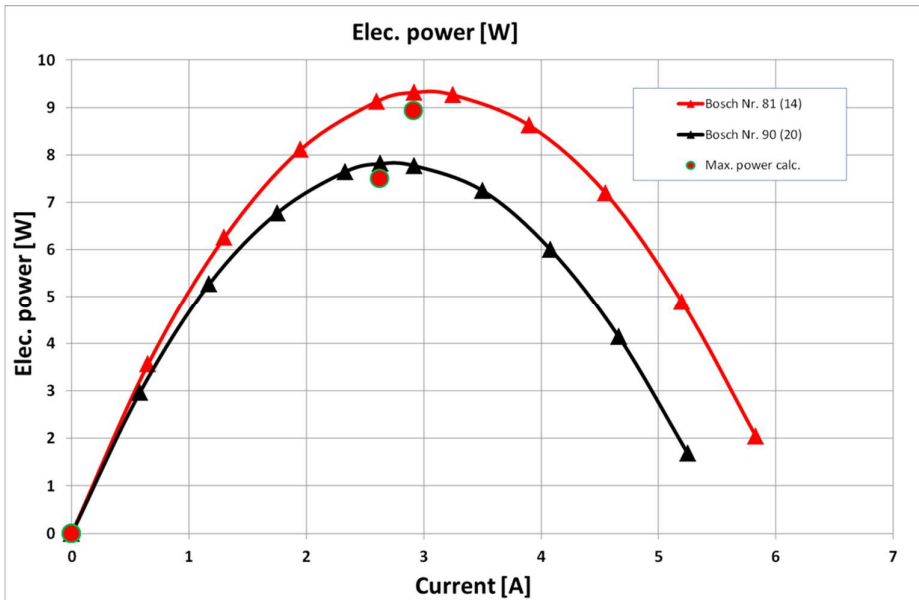


Abbildung 2-61 Elektrische Leistung zum elektrischen Strom bei 600°C Heißseitentemperatur und 70°C Kaltseitentemperatur und einem Anpressdruck von 1 MPa

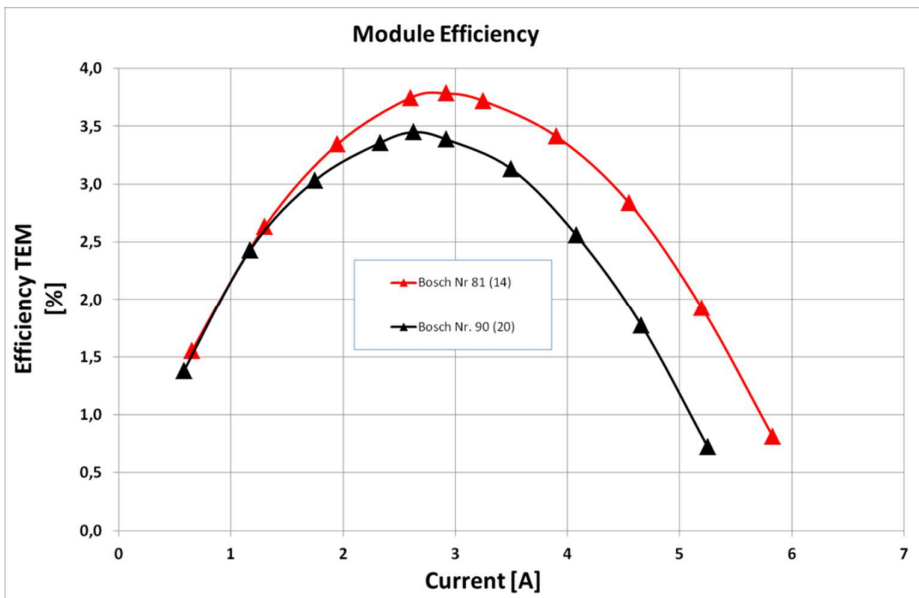


Abbildung 2-62 Modulwirkungsgrad zum elektrischen Strom bei 600°C Heißseitentemperatur und 70°C Kaltseitentemperatur und einem Anpressdruck von 1 MPa

Als maximale Leistung bei 600°C Heißseite wurde 9,31 W erreicht. Der maximale Wirkungsgrad betrug 3,78%. Die Module Nr. 81(14) und Nr. 90(20) lagen im Vergleich der Module (Ag-gesintert) im unteren Bereich. Somit stellen diese Ergebnisse den schlechtesten Fall dar. Die Leistungsdaten der TE-Module für die Sub-TEG's sind höher anzunehmen.

2.1.6.5 Round Robin-Test:

Im Rahmen des Thermo-Power-Projekts „Eco-TEG“ wurde ein Vergleichstest zur Bestimmung der Performance von Thermoelektrischen Generatoren durchgeführt. Teilnehmer sind internationale Labore, Hersteller und Forschungsinstitute die Erfahrungen in der Performancemessung von TEGs haben. Insgesamt nahmen 18 Teilnehmer an dem Vergleichstest teil. Aufgeteilt werden die Teilnehmer in 3 Messsterne mit jeweils 6 Teilnehmern. Die Firma Eberspächer Exhaust Technology GmbH & Co. KG hat an diesem Test teilgenommen. Um die Qualität der Messungen unterschiedlicher Institute bewerten zu können und ein standardisiertes Messverfahren für die Zukunft zu entwickeln, wurde dieser internationaler Ringversuch (Round-Robin-Test) durchgeführt.

Für den Vergleichstest wurden Messungen an einem kommerziellen TEG-Modul und einem thermischen Referenzmaterial durchgeführt. Die Messungen wurden durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt koordiniert. Nach der Messphase werden die Messungen ausgewertet und anschließend ist eine anonymisierte Publikation vorgesehen.

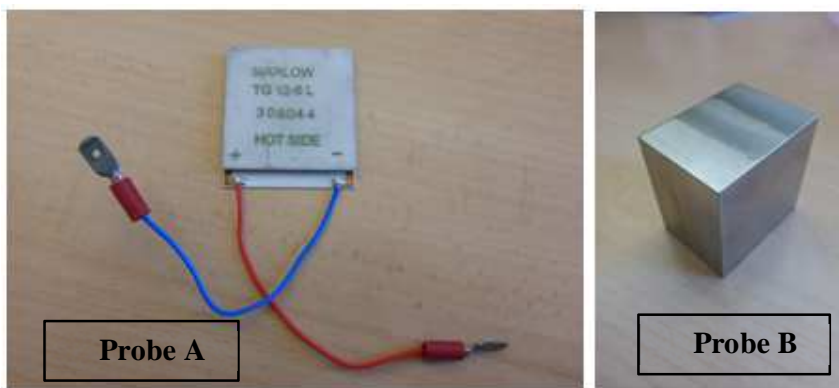


Abbildung 2-63 Materialproben für Round Robin Test

Bei Probe A wurden die Effizienz, der Wärmestrom und die elektrische Leistung bei entsprechenden Betriebspunkten gemessen. Zusätzlich wurden der Seebeck-Koeffizient und der elektrische sowie thermische Widerstand gemessen. Bei der Probe B wurden der Wärmefluss und der thermische Widerstand gemessen.

2.1.7 Versuche mit TEG-Funktionsmustern

Für den Funktionsnachweis wurden drei funktionsfähige Sub-TEG's mit der Bezeichnung EcoTEG 2.1-1, 2.1-2 und 2.1-3 entsprechend dem aktuellsten Design-Stand inklusiv der dargestellten Optimierungen aufgebaut. Der Zusammenbau erfolgte analog zu den zuvor beschriebenen Aufbauten. Im Prototyp EcoTEG 2.1-1 sind drei Module, welche im TLP (Transient Liquid Phase, → sputtern) Verfahren hergestellt wurden, verbaut. Die anderen drei Positionen sind durch Zirkonoxid-Dummy's besetzt. Die Dummy's kommen wegen der beschränkten Verfügbarkeit an gleichartigen TEMs zum Einsatz.

Die anderen beiden TEGs sind mit silbergesinterten Modulen bestückt.

Folgende Anordnung der Dummy's und der TEMs wurde beim Aufbau der drei SubTEG gewählt:

TEG 2.1-1: Drei TLP beschichtete und gefügte Module auf der Oberseite mit drei Zirkonoxid-Dummy's auf der Unterseite.

TEG 2.1-2 und TEG 2.1-3: Sechs silbergesinterte Module siehe Abbildung 2-59

Im Folgenden wird der verwendete Prüfstands Aufbau erläutert (Abbildung 2-64).

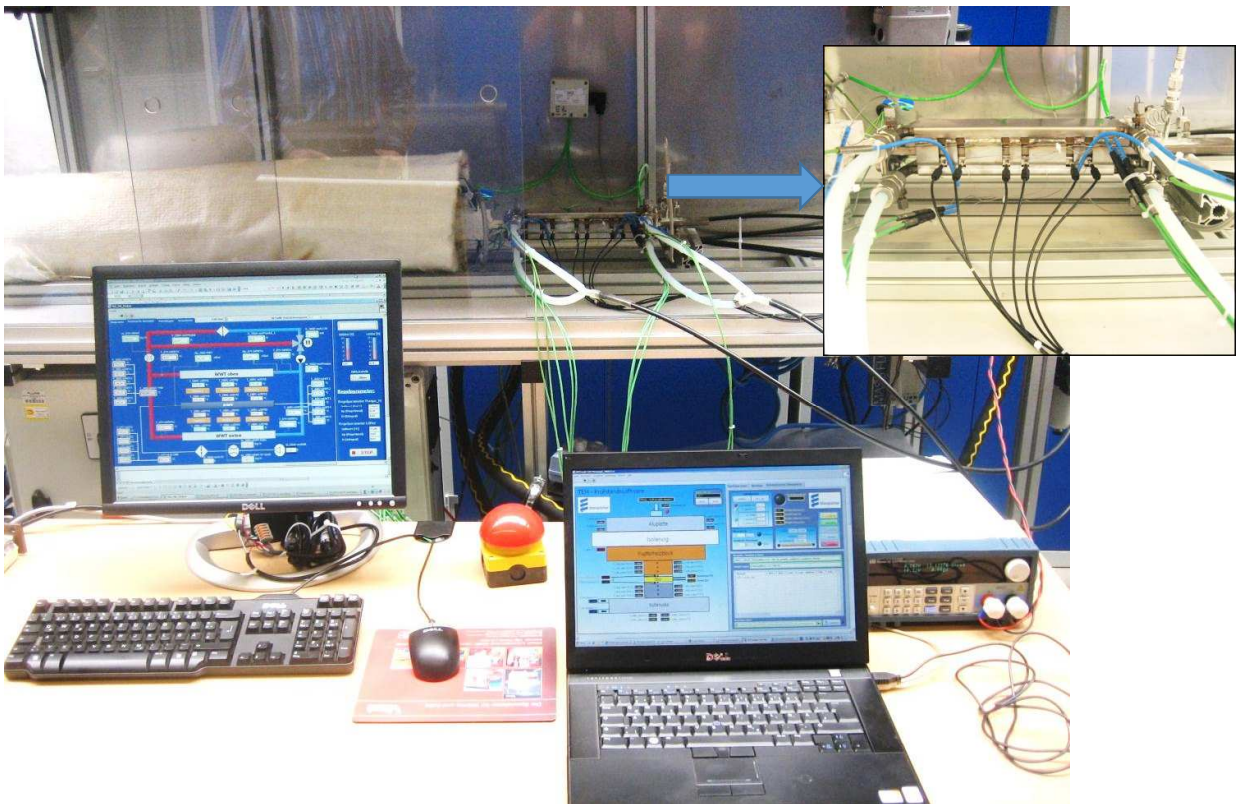


Abbildung 2-64 Heißgasprüfstand

Versuchsüberwachung

Der Prüfstand ist mit einem Laborsteuergerät C-Rio der Firma National Instruments ausgestattet. Das Gerät verfügt über acht Kanäle/Slots für Ein-/Ausgangsmodule mit einer Vielzahl an Einzelkanälen für verschiedene Größen. Dieses übernimmt zum einen die Steuerung des Prüfstands, zum anderen ist auch die Messwerterfassung über die Eingangskanäle auf sehr einfache Art und Weise möglich. Die Verknüpfung aus Steuerung und Messwerterfassung ermöglicht außerdem das Festlegen von Grenzwerten und automatischen Überwachungsroutrinen. Überwacht werden folgende Größen: Gastemperaturen, Wassermassenströme und -temperaturen und der Luftmassen-

strom. Zusätzlich erfolgt eine automatisierte Leistungsmessung der TE-Module mit Hilfe einer elektronisch einstellbaren Last.

Messgrößen

Temperatur:

Im Wesentlichen werden für die Erfassung der Gas- und Oberflächentemperaturen Mantelthermoelemente (TC) vom Typ K eingesetzt. Der Durchmesser des Mantels richtet sich nach dem jeweiligen Einsatzzweck. Im Heißgaspfad werden 1mm TCs eingesetzt und zwischen den thermoelektrischen Modulen sind 0,5 mm TCs in einer Graphitschicht geklemmt.

Luft- / Gasmassenströme:

Die Luftmassenströme werden mit Hilfe von Mass-Flow-Controllern (elektrisch ansteuerbare Ventile) aus trockener, ungeölter Druckluft realisiert und mit einem Heißfilmmassenstromsensor gemessen.

Wassermassenströme:

Der Kühlwassermassenstrom wird mit einem Durchflussmesser nach dem Coriolis-Messprinzip ermittelt. Über einen integrierten Temperatursensor und den Stoffdaten des Kühlmediums kann zusätzlich der Volumenstrom angezeigt werden.

2.1.7.1 Stationäre Leistungsmessungen am Sub-TEG

Nach Fertigstellung der Sub-TEG's erfolgt für jedes Bauteil eine Grundvermessung. Dazu wird jeder Sub-TEG in 5 Betriebspunkten (OP), siehe Tabelle 2.4, betrieben. Diese Betriebspunkte umfassen Luftmassenströme von 3 bis 24 kg/h bei Temperaturen von 490°C bis 740°C. Der Luftmassenstrom wurde auf die Sub-TEG Wärmeübertrager-Anzahl skaliert. Der Skalierungsfaktor beträgt 1/6. Der Kühlwassermassenstrom wird auf insgesamt 2,5 l/min bei 25 °C Vorlauftemperatur eingestellt und ist ebenfalls skaliert.

Bevor die Messdatenerfassung in einem OP gestartet wird, ist ein stationärer Wärmestrom erforderlich. Dieser wird mittels fünf, im Rohrquerschnitt gleichmäßig verteilten Thermoelementen im Zustrom des Sub-TEG's überwacht und in jedem OP werden die TE-Module einzeln und als Reihen- bzw. Parallelschaltung vermessen. Dabei wird die Leerlaufspannung U_0 , der Kurzschlussstrom I_{max} und die maximale Leistungsabgabe mit Hilfe einer elektronischen Last gemessen.

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen wird das aus fünf Punkten bestehende Grundkennfeld um weitere 20 Punkte erweitert (Tabelle 2.9). Das Ziel ist die Erstellung eines Leistungskennfelds für jeden der drei hergestellten Sub-TEG's. Die Versuchsrandbedingungen bleiben jeweils gleich.

Betriebspunkt	Luftmasse	T 1	T 2	T 3	T 4
	kg/h	°C	°C	°C	°C
1	7,26	400	500	600	640?
2	17	400	500	600	640
3	30	400	500	600	640
4	40	400	500	600	640
5	50	400	500	600	640

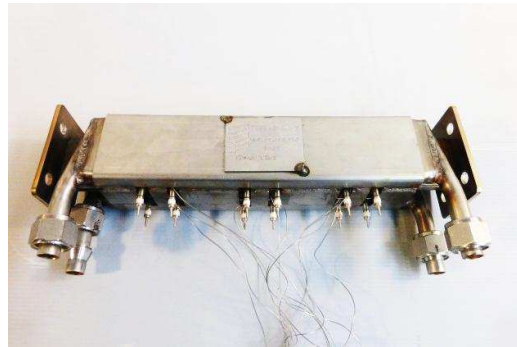


Tabelle 2.9 Erweitertes Betriebspunktkennfeld

Abbildung 2-65 Fertiggestellter Sub-TEG Evo 2.1-3

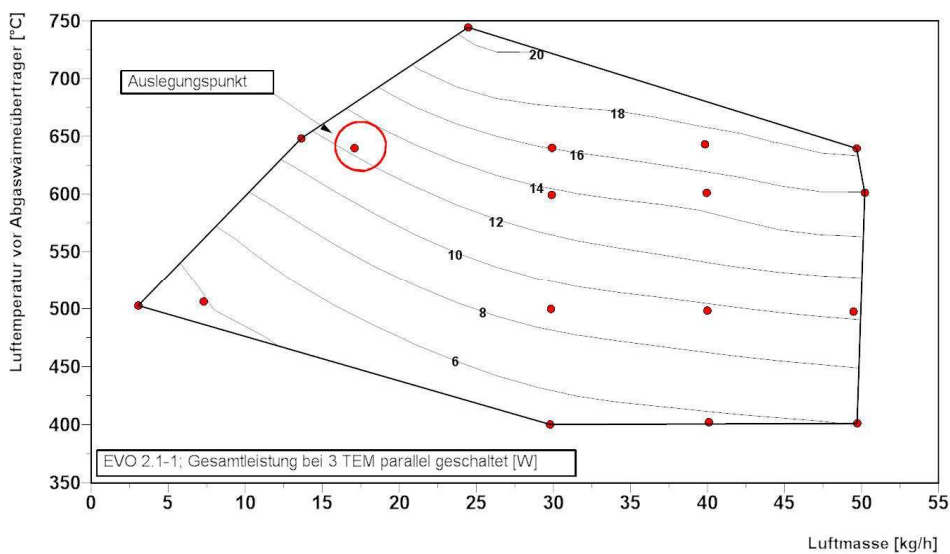


Abbildung 2-66 Leistungskennfeld SubTEG Evo 2.1-1, Parallelschaltung 3 Module TLP

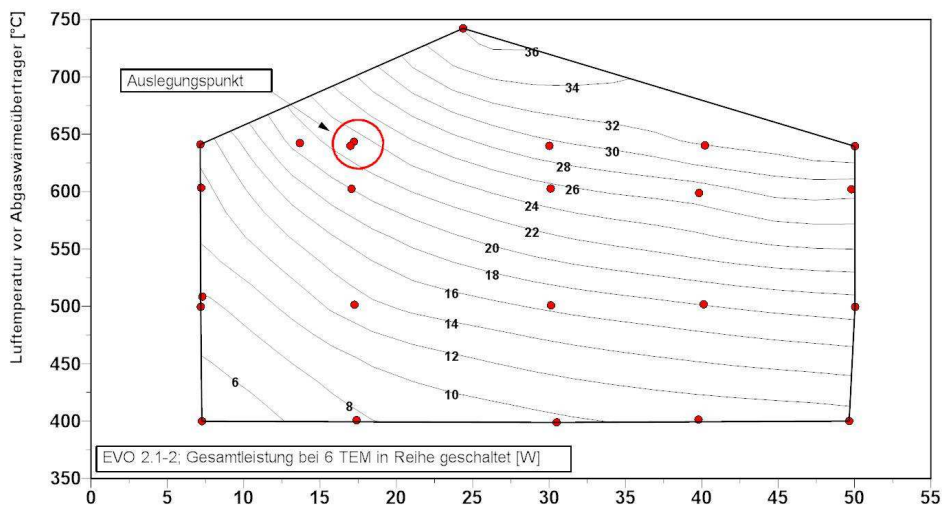


Abbildung 2-67 Leistungskennfeld SubTEG Evo 2.1-2, Reihenschaltung 6 TEM Ar-gesintert

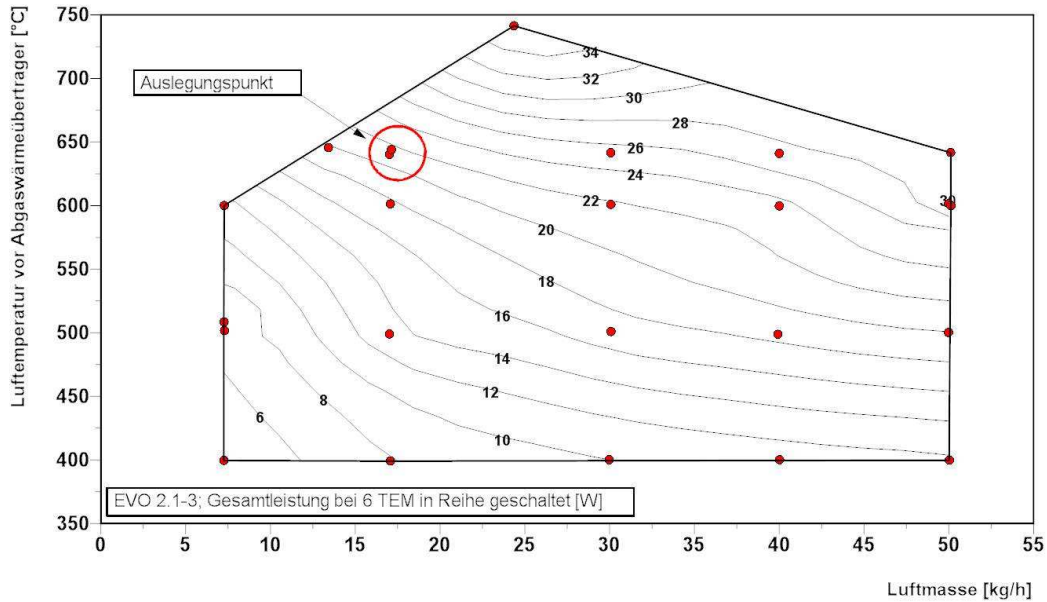


Abbildung 2-68 Leistungskennfeld SubTEG Evo 2.1-3, Reihenschaltung 6 TEM Ar-gesintert

Die oben dargestellten Kennfelder (Abbildung 2-66 bis Abbildung 2-68) zeigen die Leistungsausbeute der drei fertiggestellten Prototypen in Abhängigkeit von Luftmassenstrom und Eintrittsgastemperatur. Der TEG Evo2.1-1 ist nur mit drei TEM bestückt (hergestellt im TLP-Verfahren) und erzeugt eine Leistungsausbeute von 13 W im Auslegungspunkt. Rechnet man diesen Wert hoch auf sechs Module, wie in den anderen zwei Prototypen verbaut, dann ist mit einer Gesamtleistung von ca. 26 W zu rechnen. Damit wird deutlich, dass das TLP Verfahren gegenüber dem AG-Sintern mit 22 W bis 23W im gleichen Betriebspunkt deutliche Leistungsvorteile zeigt.

Die Leistungsdifferenzen zwischen Evo2.1-2 und Evo2.1-3 liegen in der durchgeführten Selektion der Module, die vor dem Aufbau durchgeführt wurde, begründet. Evo2.1-2 ist mit den leistungsfähigeren Modulen bestückt worden.

2.1.7.2 Zyklusbetrieb an einem Heißgasprüfstand

Nach Fertigstellung des EcoTEG 2.1-3 ist ein Nachweis der Haltbarkeit des TEGs zu führen. Vorgesehen ist eine Mindestlaufzeit von 250 h bei gleichzeitiger Überwachung der Leistungsparameter des Bauteils.

Um die silbergesinterten Module realitätsnah zu belasten wurde eine zyklische Veränderung der Heißseitengastemperatur von 100 °C auf 600 °C auf 100 °C gewählt. Der Gradient der Temperatursprünge richtet sich hier in erster Linie nach den Gegebenheiten am Prüfstand. Technische Grenzen sind gegeben durch den elektrischen Luftherhitzer (Leister), die Wärmekapazität der Edelstahlrohre und den maximalen Luftmassenstrom. Es hat sich gezeigt, dass eine Zyklusdauer von einer Stunde eine gute Temperaturbeharrung vor AWT und damit ein brauchbares Ergebnis der Leistungsmessung an den Modulen bringt. Erst in der Beharrung ist eine reproduzierbare Leistungsmessung des SubTEG möglich.

Zyklus-Profil

Das zu fahrende Lastprofil besteht aus einer 30 minütigen Warmlaufphase mit anschließender Referenzphase. Der TEG wird hierbei durchströmt mit einem Gasmassenstrom von 50 kg/h der schrittweise auf eine Soll-Temperatur von 600°C erhitzt wird. Es folgt nach 1800 sec ein Sprung auf 640°C bei einem Massenstrom von 17 kg/h. Dauer der Referenzphase ist ebenfalls 1800 sec. Danach folgen 6 Zyklen bei 600 °C und 100 °C mit einer Dauer von jeweils 3600 sec bevor nach einer 30 min. Abschlussreferenzmessung (640°C; 17 kg/h) das System wieder kaltgefahren wird. Die folgenden Diagrammauswertungen stellen das Ergebnis über einen Index dar, der eine periodische Messung der Leistungsdaten im Zyklus darstellt.

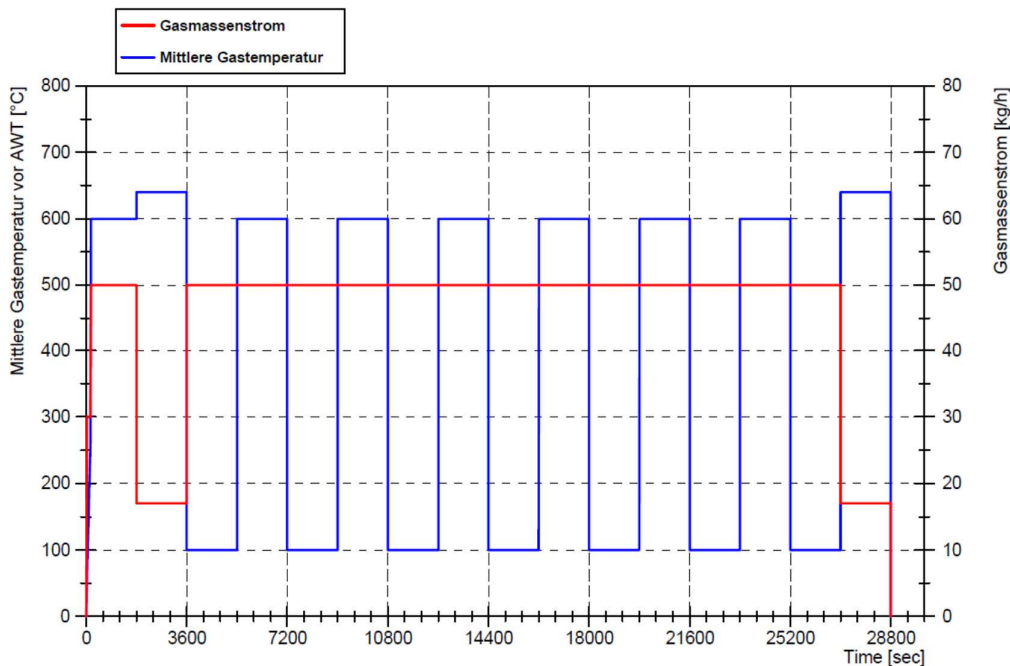


Abbildung 2-69 Darstellung Temperaturprofil für zyklischen Betrieb

Versuchsergebnisse nach Tests mit zyklischem Verlauf

Aus der Abbildung 2-70 wird ersichtlich, dass nach einer anfänglichen Leistungsabgabe von 24 W der Leistungs-Output des Sub-TEG's kontinuierlich über eine Laufzeit von 250 h auf 19 W absinkt. Ein Trend ist auch bei der Auswertung der Heiß- (rot) und Kaltseitentemperaturen (blau) zu beobachten. Die Differenz zwischen Heiß- und Kaltseite nimmt immer weiter zu, was im Umkehrschluss bedeutet, dass die Effizienz der Module abnimmt (Abbildung 2-71).

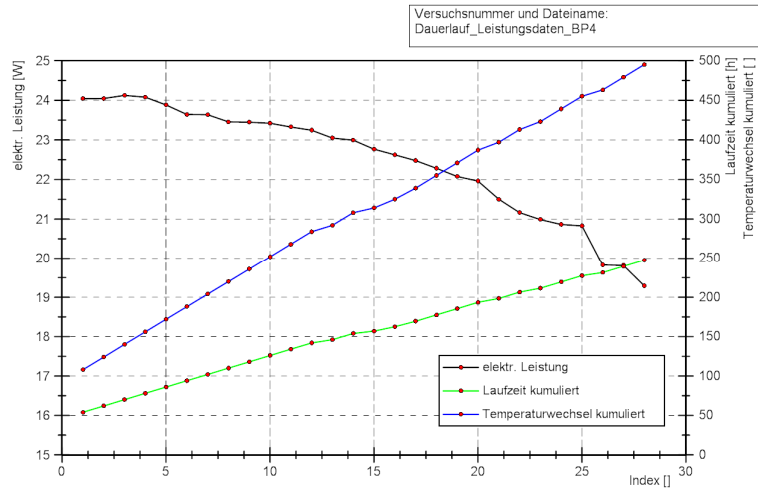


Abbildung 2-70 Versuchsergebnisse nach Dauerlauf

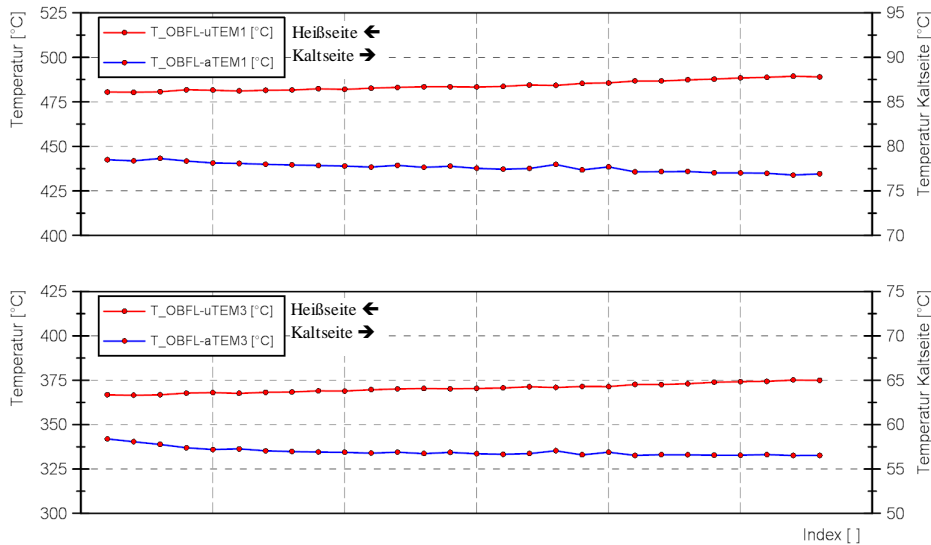


Abbildung 2-71 Oberflächentemperaturen der TEMs nach Dauerlauf

2.1.7.3 Finale Vermessung nach Dauerlauf BP4

In der Abbildung 2-72 ist eine Auswahl der Ergebnisse der Referenzfahrten vom 18.09 bis zum 04.12.2013 gezeigt. Es ist die elektrische Leistung [W] aller sechs Module (Reihenschaltung) ber der Spannung aufgetragen worden. Am Verlauf der Graphen von rot nach grün erkennt man die verringerte Leistungsfähigkeit des TEG Evo 2.1-3 nach 250 h Laufzeit.

Da zur Modulalterung nur wenig in der Literatur bekannt ist, geben diese ersten Versuchsergebnisse wichtige Erkenntnisse zur Weiterentwicklung neuartiger TE-Module. Es ist zu empfehlen, derartige Versuche fortzuführen und die Wirkmechanismen genauer zu analysieren. Wie im Lastenheft beschrieben sind die Lebensduranforderungen in der Automobiltechnik sehr hoch. Dementsprechend wichtig sind zukünftige Dauerhaltbarkeitsuntersuchungen.

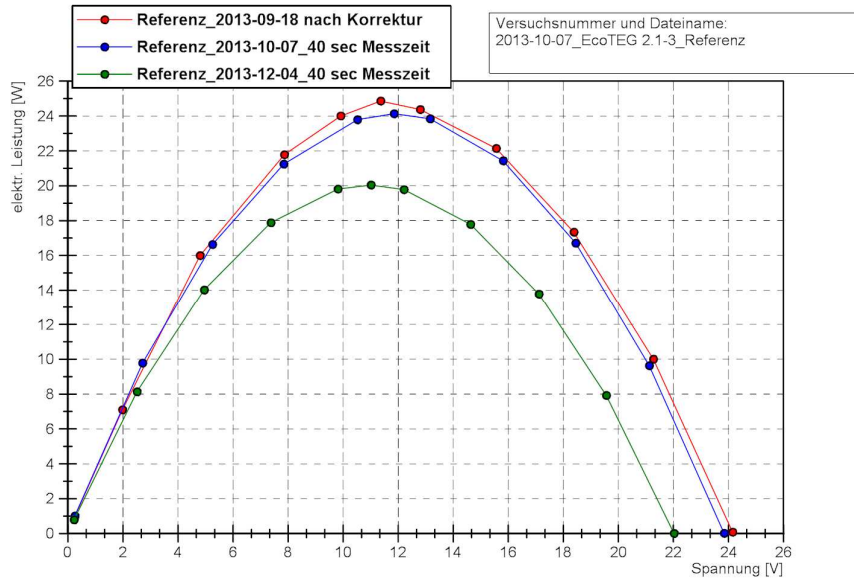


Abbildung 2-72 Leistungsausbeute EcoTEG 2.1-3 nach Dauerlauf

2.1.8 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Nach der Konzeptionierung und Herstellung der TEG's wurde eine kostenmäßige Bewertung durchgeführt. Diese erfolgte für die gewählte Zielanwendung. Die gewählten Fertigungsverfahren basieren auf einer jährlichen Produktionsmenge <100.000 Fahrzeugen. Die modulare Bauweise des TEG ermöglicht eine Kostenaufteilung auf einzelne Baugruppen. Die Folgende Abbildung 2-73 zeigt die Herstellkostenverteilung des thermoelektrischen Generators entsprechend dem dargestellten Entwicklungsstand. Für den TEG ist ein By-Pass-System mit Klappenelement enthalten. Wie in der Graphik zu erkennen ist, stellt der By-Pass einen wesentlichen Kostenfaktor dar.

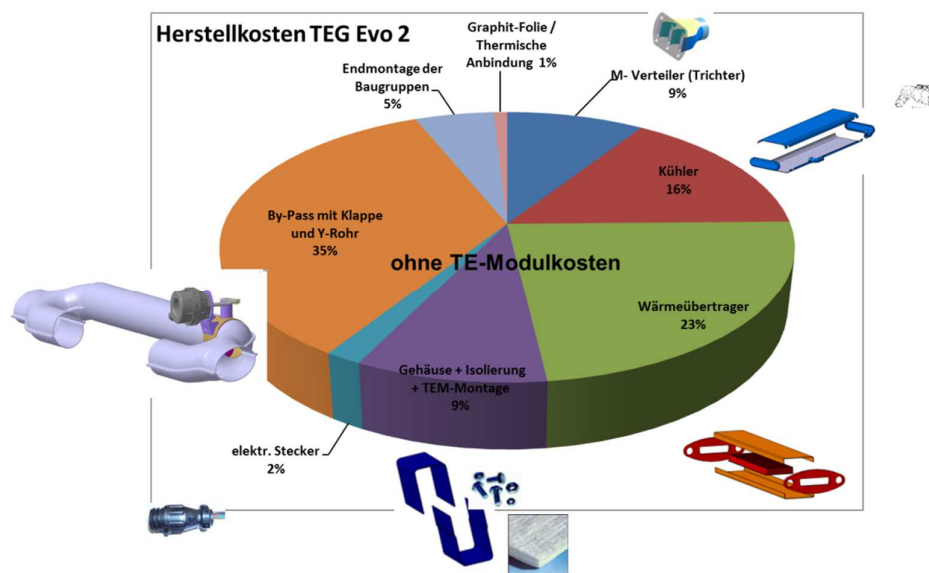


Abbildung 2-73 Herstellkosten TEG Evo 2

Nicht berücksichtigt sind weitere Kosten für die TE-Module selbst, den Kühlkreislauf (z.B. zusätzliche Leitungen und Pumpe) und der Fahrzeugintegration (Steuerung und Bordnetzeinspeisung). Die TE-Modulkosten für Großserien sind derzeit unbekannt und können lediglich abgeschätzt werden. Aus diesem Grund stellt die Graphik die Kostenverteilung ohne Modulkosten dar. Zu beachten ist, dass auch Kosten eingespart werden können indem Bauteile, wie z.B. der Mittelschalldämpfer durch den TEG ersetzt oder verkleinert werden können. Dieser mögliche Nutzen wurde in dieser Kalkulation ebenfalls nicht berücksichtigt.

Die hier erstellte Kostenabschätzung ergibt Energiekosten von mehreren Euro pro Watt rekuperierter elektrischer Energie. Zum heutigen Zeitpunkt wäre diese Technologie in dieser Form nicht wettbewerbstauglich. Eine weitere Effizienzsteigerung der Module durch innovative Materialentwicklung und Kostensenkung bei weiterentwickelten Industrialisierungskonzepten sollten unter 1 Euro pro Watt zum Ziel haben.

2.1.9 Industrialisierungs- und Modularisierungskonzepte

Für die TEG-Konzeptentwicklung wurde von Beginn an auf eine skalierbare modulare Bauweise geachtet mit dem Ziel, verschiedene Leistungsklassen darstellen zu können. Ein weiteres wesentliches Ziel war das Erfüllen der Leistungsziele, insbesondere die Brutto- und Nettoleistung. Somit wurde mit dem ersten Konzept das wirtschaftliche Ziel weniger intensiv verfolgt. Im Projektverlauf wurde aufbauend auf den ersten TEG ein weiterentwickeltes Konzept dargestellt. Hierbei lag der Fokus auf geringe Herstellkosten und Industrialisierbarkeit. Nachdem die Wirtschaftlichkeit bereits im vorherigen Abschnitt bewertet wurde folgt in diesem Kapitel die Konzeptbeschreibung für die mögliche Industrialisierung dieser Technologie.

Der im Folgenden ausgelegte TEG Evo4 wurde auf Basis des fortgeschriebenen Lastenhefts entwickelt folgende besondere Aspekte für eine industrialisierbare Lösung sind berücksichtigt worden:

- Geringe Herstellkosten
- Modularer Aufbau
- Geringe Anzahl von Einzelteilen
- Einfache Herstellverfahren bzw. für Abgasanlagen typische Verfahren
- Geringes Gewicht, Volumen und Gegendruck (zur Erhöhung der Nettoleistung)
- Leicht erfüllbare Fertigungstoleranzen

Für die Umsetzung wurde eine Moduleinheit nach dem Kreuz-Gegenstrom-Prinzip entwickelt. Das Modell basiert auf TE-Module mit den Abmessungen 40x40 mm² (Länge x Breite). Durch Aufschichtung der Moduleinheiten mit jeweils 6 Modulen auf zwei Reihen verteilt können mehrere Lagen zu einem TEG zusammengefügt werden. In diesem Konzept sind 48 TE-Module mit einer Wärmeübertragungsfläche von 770cm² enthalten.

Durch die Verwendung von Halbschalen aus Edelstahl können die kalt- und heißseitigen Wärmeübertrager zu kleinen Unter-Baugruppen einfach im Hartlötverfahren hergestellt werden. Das dabei vorgesehene Vakuumlöten könnte

zukünftig durch ein Durchlaufverfahren kostengünstiger erfolgen. Der Funktionsnachweis im Durchlaufofen konnte jedoch noch nicht nachgewiesen werden.

Durch das Stapeln der Modulbaugruppen inklusive der Wärmeübertrager wird im verpressten Zustand der TEG zu einer Gehäuseeinheit verschweißt. Die entstehenden Flächen zum Ein- und Ausströmen des Abgases können leicht mit üblichen Abgastrichtern in die Abgasanlage integriert werden (Abbildung 2-74). Durch ausreichende Schweißnahtflächen wird damit das bisherige Toleranzproblem gelöst. Ein Kühlwasser-Rail (hier nicht dargestellt) verbindet die ein- und ausströmenden Kühlwasserkanäle und stellt die Schnittstelle zum Fahrzeugkühlsystem dar.

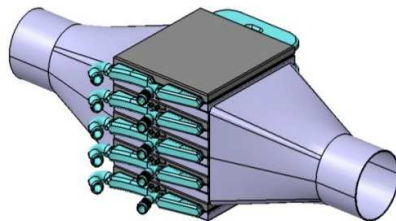


Abbildung 2-74 TEG-Register mit angeschlossenen Abgastrichtern

Durch den Einsatz der Berechnungs- und Auslegungssoftware und der ausgeführten Konstruktion ergeben sich folgende Leistungsdaten:

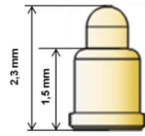
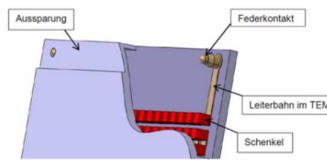
- Elektrische Bruttoleistung: 200 W (Basis BiTe-Module mit ca. 3% Wirkungsgrad)
- Abgasdruckverlust 4,2 mbar (BP: 425°C - 150kg/h)
- Gesamtgewicht: 4,1 kg (ohne Kühlwasser); Anteil für Blechteile beträgt: 2,9kg
- Bauraumvolumen: 5 Liter ohne Kühlwasser-Rail

Jedoch finden sich auch bei diesem Konzept Nachteile die im Wesentlichen die thermische Anbindung der Module betreffen. Ein schlechter Flächenkontakt durch geringere Anpresskräfte und zu große Oberflächentoleranzen sind bei diesem Konzept zu erwarten. Aus diesem Grund sollte eine grundsätzlich verbesserte Lösung zur Anbindung der Module, z.B. „stoffschlüssig“ untersucht und zukünftig gefördert werden. Auch eine Modulverkapselung wie für Skutterudite erforderlich ist bisher in diesem Konzept nicht integriert.

Für eine bessere elektrische Verschaltung einzelner Module zu Modulreihen wurden folgende Lösungsansätze entworfen. Durch die Verwendung von elektrischen Leiterbahnen im TEG-Gehäuse bzw. auf den kaltseitigen Wärmeübertragern könnten kommerzielle Federkontakte die mühsame Verkabelung ersetzen. Bei der Montage dieser Baugruppe würden hierdurch weitere Prozessschritte zur Modulverbindung eingespart. Dadurch könnten kleinere TE-Moduleinheiten verwendet werden, die sich formschlüssiger an die Oberflächen der Wärmeübertrager anlegen.

elektrische Kontaktierung:

- Federkontakt dient zur Kontaktierung der Module an die Leiterbahn
- Feder wird dauerhaft belastet
- Mulde bietet größtmögliche Kontaktfläche
- Unterbrechung der Leiterbahn für Reihenschaltung



Nennfederweg: 0,7mm

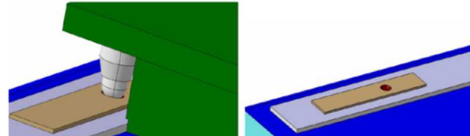


Abbildung 2-75 elektrische Kontaktierung

Eine zweite Möglichkeit ist die direkte Verbindung mehrerer TE-Module zu sogenannten Modulketten. Durch die entsprechende Auswahl der Steckverbinder und in Zusammenarbeit mit Modulherstellern könnte so eine sichere und haltbare elektrische Verbindung gewährleistet werden. Auch diese Lösung lässt sich gut industrialisieren.

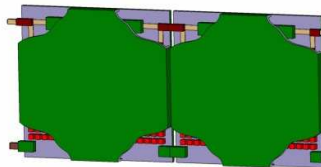


Abbildung 2-76 Doppertes Modul mit gegenseitigen Steckkontakten zur Bildung von Modulketten

2.2 Verwertung der Ergebnisse und voraussichtlicher Nutzen

Die Nutzung der Exergie in motorischen Abgasen steht weiterhin im Fokus der Entwicklungsingenieure. Jedoch stehen für die Nutzung verschiedene Technologien zur Verfügung, die überwiegend miteinander im Wettbewerb stehen und ggf. für verschiedene Anwendungen unterschiedlich zum Einsatz kommen können. Aus diesem Grund ist eine umfangreiche Bewertung dieser Technologien von besonderer Bedeutung, um die Vorteile und Nachteile anwendungsbezogen darstellen zu können.

Im vorliegenden Projekt EcoTEG wurde diese Bewertung durch die Umsetzung von Konzeptideen anhand von hergestellten Prototypen erfolgreich durchgeführt.

In der ersten Projektphase war es Eberspächer möglich umfangreiches Wissen und Verständnis über thermoelektrische Module, ihre grundlegenden physikalischen Eigenschaften sowie die mögliche Verwendung in Fahrzeugabgasanlagen aufzubauen. Darüber hinaus wurde die thermische Anbindung der Module in Abgasanlagen untersucht und erfolgreich angewendet. Dieses Wissen wird in Zukunft in mehreren Fahrzeugbereichen Verwendung finden.

Im weiteren Projektverlauf wurden Methoden zur Auswahl und Bewertung Thermoelektrischer Module entwickelt, die für eine spätere Integration in einen Wärmeübertrager bzw. thermoelektrischen Generator zum Einsatz kommen können. Durch das Untersuchen unterschiedlicher Module und den Austausch mit den Projektpartnern und öffentlichen Quellen konnte so eine Übersicht der Modul-Entwicklung mit dem heutigen Stand der Technik aufgebaut werden. Die hieraus abgeleiteten Anforderungen sind die Basis für zukünftige Entwicklungen und werden für Gespräche mit potentiellen Modulherstellern verwendet.

Durch den intensiven Austausch von Messdaten und Ergebnissen mit den Projektpartnern und die Teilnahme am Round Robin Test kann die Qualität der eigenen Messergebnisse sehr gut bewertet werden für den nationalen und internationalen Vergleich von Laborergebnissen.

Die heute verfügbaren Module, auch für Prototypenanwendungen, weisen in der Regel nicht die notwendigen Wirkungsgrade auf, die für einen effektiven Betrieb im Fahrzeug notwendig sind. Deshalb ist eine weitere Förderung der TE-Modultechnologie besonders empfehlenswert.

Durch die im Projekt erfolgte Entwicklung einer Berechnungs- und Simulationssoftware können neuartige TE-Module mit verbesserten Eigenschaften bewertet werden. Neben der primären Berechnung der zu erwartenden rekurrierten elektrischen Energie bietet das Berechnungsprogramm eine Reihe zu optimierender Parameter an. Im EcoTEG-Projekt konnten die wesentlichen Einflussparameter ermittelt werden, die notwendig sind, um einen TEG auszuliegen und zu optimieren. Dieses stellt ein wesentliches Ziel zur Integration in die Abgasanlage für künftige TE-Materialien dar, weil durch die Simulation

eine gute Potentialbewertung auf einfache Art möglich wird. Dabei werden auch Parameter mit Rückwirkung auf den Motorbetrieb berücksichtigt, um die Effizienz des Gesamtsystems besser beurteilen zu können.

Einige dieser Parameter konnten durch prüfstandsbegleitende Untersuchungen genauer Quantifiziert werden z.B. der Kraftstoffmehrerverbrauch durch erhöhten Abgasgegendruck. Von besonderer Bedeutung ist die Validierung der Berechnungssoftware mit den aufgebauten Prototypen und den Prüfstandsmessergebnissen. Basierend auf den hier untersuchten Konzepten können so verlässliche Berechnungen zur Systembewertung durchgeführt werden.

Besonders schwierig zu beziffern ist der Wärmeübergang bzw. die thermische Anbindung der TE-Module an den Wärmeübertrager. Hierzu konnten verschiedene Materialpaarungen untersucht werden. Die Art der thermischen Anbindung der TE-Materialien ist für die Berechnung und Effizienz des Systems ein wichtiger Parameter.

Durch die Auslegung und Herstellung mehrerer TEG-Konzepte konnte Eberspächer umfangreiche Erfahrungen und Erkenntnisse sammeln, die wesentlich für die Funktion und Haltbarkeit des TEG's sind. Diese Erkenntnisse werden verwertet für künftige Prüfverfahren bzw. dienen der Bewertung zukünftiger TEG-Entwicklungen. Insbesondere die thermische Wechselbeanspruchung führt zu einer vorzeitigen Alterung des TEG's und limitiert die Lebensdauer der Module. Für eine zufriedenstellende Lösung ist hier ebenfalls weiterer Forschungsbedarf notwendig.

Im Verlauf der Prototypenherstellung wurden verschiedene Fertigungstechniken erprobt und erfolgreich eingesetzt. Darunter fallen beispielsweise das Laserschweißen und das Vakuumlöten zur Integration der TE-Module in die Wärmeübertrager. In Verbindung mit einer ausführlichen Kostenbewertung der einzelnen Baugruppen und Fertigungsverfahren ist es möglich eine Kosten-Nutzen-Analyse des Systems abzuleiten. In Zusammenarbeit mit den Partnern konnte so das Gesamtsystem bewertet werden. Für eine mögliche Industrialisierung eines TEG-Konzepts wurden wesentliche Kostentreiber ermittelt und in einem kostenoptimierten Konzept diese Erkenntnisse angewendet. Für die Industrialisierung konnte somit eine erste Kosten-Nutzen-Bewertung auf Basis serientauglicher Verfahren erstellt werden. Trotzdem konnten nicht alle Funktionen durch seriennahe Konzeptlösungen dargestellt werden. Dieses betrifft insbesondere Schnittstellen zum Fahrzeug und einer effizienten Integration der Module woraus sich weiterer Forschungsbedarf ableiten lässt.

Die in diesem Projekt verfolgte Modulbauweise hat sich insoweit bewährt, dass sich unterschiedliche Baugrößen (Leistungsklassen) in unterschiedlichen Bauräumen leicht realisieren lassen. Durch den Einsatz vieler Gleichteile kann so über die Stückzahl ein besseres Kosten-Nutzen-Verhältnis erreicht werden. Durch die detaillierte Darstellung der Kosten konnten für einige TEG-System-Baugruppen Zielkosten abgeleitet werden. Als Vorgabewert können diese Zielkosten für zukünftige Entwicklungen eingesetzt werden.

Insgesamt hat sich gezeigt, dass die Effizienz des TEG's noch nicht wettbewerbsfähig gegenüber anderen kraftstoffeinsparenden Entwicklungen am Verbrennungsmotor ist. Jedoch insbesondere durch die öffentliche Förderung

dieser Technologie, ist eine stetige Effizienzsteigerung, besonders bei der Materialentwicklung, zu beobachten. Es ist anzunehmen, dass nach weiteren Entwicklungsjahren und durch Verschiebung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses diese Technologie marktfähig wird. Hierbei sind auch technologieverwandte Bereiche z.B. dezentrale Kleinkraftwerke (Kraft-Wärme-Kopplung) eine mögliche alternative Anwendung. Die bei Eberspächer entwickelten Methoden und gewonnenen Erfahrungen in diesem Projekt werden weiter eingesetzt, um diesen Entwicklungsprozess fortzuschreiben und Möglichkeiten zu entwickeln, Fahrzeugkonzepte effizienter zu gestalten.

2.2.1 Verwertung in Wissenschaft, Forschung und Lehre

Im EcoTEG Projekt wurden begleitend mehrere Praktika und Abschlussarbeiten (Bachelor und Master) durch Studierende an nationalen Hochschulen durchgeführt. Die Studierenden bekommen dadurch umfangreiche Kenntnisse zu aktuellen Forschungsprogrammen und sammeln Praxiserfahrung in der Industrie. Dieses dient der Qualifizierung des Studierenden und verbreitet wichtige neue Technologien fachübergreifend. Mit folgenden Universitäten und Hochschulen wurde kooperiert:

- Hochschule Aalen
- Duale Hochschule Baden-Württemberg
- Hochschule Bochum
- Technische Universität Dortmund
- Fachhochschule Dortmund
- Universität Stuttgart

2.3 Technischer Fortschritt bei anderen Stellen

Die Thermoelektrik ist eine Möglichkeit die Effizienz des Verbrennungsmotors weiter zu erhöhen. Derzeit wird davon ausgegangen, dass in den nächsten 10 bis 20 Jahren der Verbrennungsmotor der dominierende Fahrzeugantrieb bleibt. Motiviert durch höhere Kraftstoffpreise und politische Maßnahmen zur Verbrauchsreduzierung (CO₂-Gesetzgebung) arbeiten viele Institute und die Industrie an technischen Lösungen für effizientere Antriebe. Umfangreich unterstützt durch nationale und internationale Förderprojekte zur Abgaswärmenutzung entstehen neu Konzepte die zu bewerten sind. Viele dieser Ergebnisse werden auf Kongressen dem Fachpublikum vorgestellt. Für die Thermoelektrik ist hier eine Auswahl der Kongresse aufgelistet:

- ICT (Internationale Conference on Thermoelectrics)
- ECT (European Conference on Thermoelectrics)
- IAV-Tagung Thermoelektrik, Berlin
- Symposium Thermoelektrik, Dresden

Zudem entwickeln im Rahmen von Thermo-Power viele Forschungseinrichtungen und Unternehmen an unterschiedlichen Lösungsansätzen und Nutzung der Thermoelektrik. Ein Zwischenstand wurde beim Statusseminar Thermopower (16. Okt. 2012 Frankfurt a.M.) dem Publikum vorgestellt.

Entsprechend den hohen Teilnehmerzahlen und Beiträgen zu den Kongressen besteht großes Interesse an dieser Technologie. Durch die Teilnahme an Tagungen und Veranstaltungen zum Thema TEG konnten neue Veröffentlichungen gemeinsam im Projekt diskutiert werden. Im Folgenden werden einige Beispiele aus Veröffentlichungen aufgeführt, um den fortlaufenden Entwicklungsstand der Thermoelektrik für die Fahrzeuganwendung zu dokumentieren.

BMW / DLR/ Emitec „AGRTEG“ [5]

Die BMW Group entwickelt seit 2009 an einem thermoelektrischen Generator der in das Abgasrückführungssystem integrieren ist. In Abbildung 2-77 ist der AGRTEG im eingebauten Zustand zu sehen.

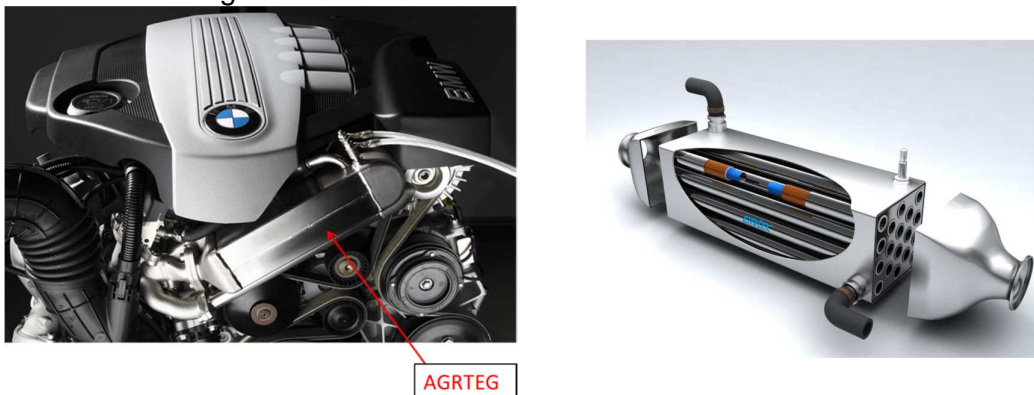


Abbildung 2-77 BMW AGRTEG

Das Programm wird in Kooperation mit der Gesellschaft für Emissionstechnologien (Emitec) durchgeführt und heißt „AGRTEG“. Die Abgasrückführung dient in erster Linie dazu, die Temperatur während der Verbrennung im Motor niedrig zu halten und dadurch die Entstehung von Stickoxiden zu minimieren. Das aus dem Verbrennungsmotor kommende Abgas wird zunächst abgekühlt bevor es mit Frischluft und Kraftstoff erneut in den Brennraum gelangt. Diese Kühlung erfolgt bei herkömmlichen Abgasrückführungssystemen mit einem Wärmetauscher über das Motorkühlwasser. In dem aktuellen BMW Konzept übernimmt diese Aufgabe der TEG. Neben den üblichen AGR Bauteilen wie Kühler und Abgaswärmeübertrager wird für den „AGRTEG“ zusätzlich nur noch das thermoelektrische Material benötigt [Ede-12]. Die Vorteile des „AGRTEG“ sind neben dem geringen Bauraum, eine wesentlich höhere Temperaturdifferenz an den thermoelektrischen Modulen und somit ein höherer Wirkungsgrad als bei einem TEG im Abgasstrang.

In Abbildung 2-77 ist der prinzipielle Aufbau des „AGRTEG“ dargestellt. Wie auch bei anderen TEG's wird das heiße Abgas zunächst auf mehrere Leitungen (Abgaswärmetauscher) verteilt. Das Abgas gibt dann seine Wärme über die thermoelektrischen Module an das Kühlwasser ab. Die Besonderheit bei diesem System sind die thermoelektrischen Module. Hierbei werden die Pellets (thermoelektrische Materialien) um ein Rohr angeordnet. Dadurch das übliche Motorapplikationen nur in einem kleineren Motor-Kennfeldbereich Abgasrückführung betreiben, wird die Nutzung des TEG's auf diesen Bereich eingeschränkt.

General Motors [6]

Ein weiteres Beispiel eines TEG's im Abgasstrang zeigt die Veröffentlichung von General Motors (sowie weiteren Partnern). In Abbildung 2-78 ist der TEG von GM auf dem Stand von März 2012 zu sehen.

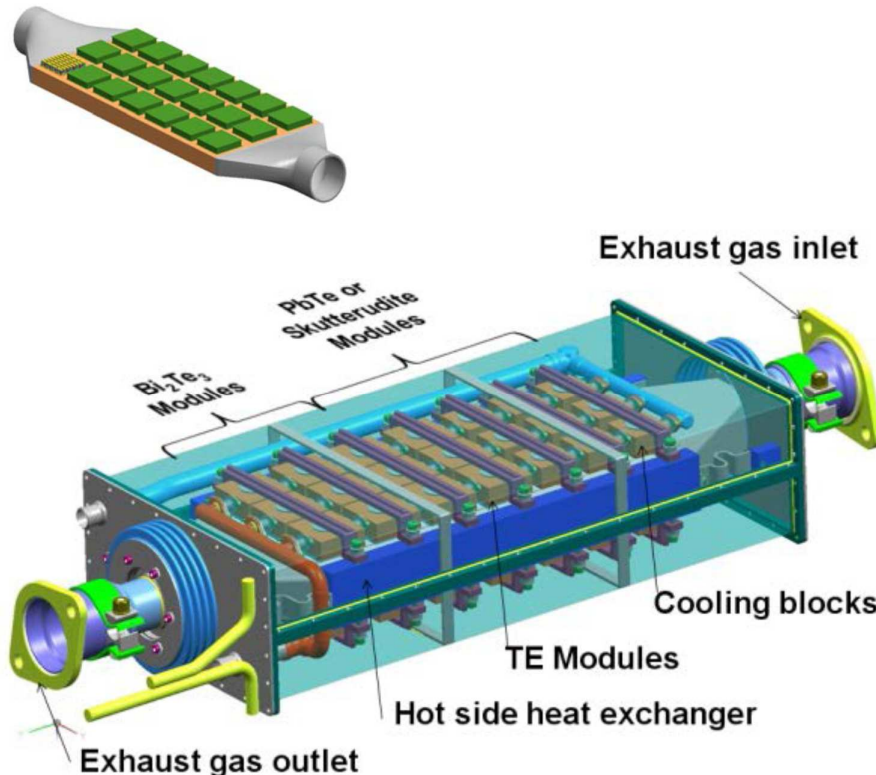


Abbildung 2-78 GM TEG

Der hier dargestellte TEG ist mit einem Abgaswärmetauscher (grau) ausgestattet, der die Wärme über insgesamt 42 thermoelektrische Module (21 oben; 21 unten) an 42 Kühler (orange) abgibt. Um einen besseren Wärmeübergang zu gewährleisten wird der gesamte Aufbau verpresst, es werden jeweils drei Kühler über eine Verstrebung mit dem Abgaswärmetauscher verschraubt. Die Einbauposition des TEG's ist nach dem Katalysator im Abgasstrang des Fahrzeugs. Eine Besonderheit bei diesem TEG ist, dass zwei verschiedene Ausführungen von thermoelektrischen Modulen verbaut werden. Wegen der hohen Temperatur an der Abgaseintrittsseite sind die Module der ersten vier Modulreihen jeweils aus PbTe oder alternativ aus Skutterudit. Da das Abgas bereits im Abgaswärmeübertrager deutlich an Wärme verliert, können nahe der Austrittsseite Module aus Bi_2Te_3 (Bismuttellurid) verwendet werden. Darüber hinaus ist diese Bauform sehr robust ausgeführt.

DLR Stuttgart [7]

Bereits zu Projektbeginn (2010/2011) veröffentlichte das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) einen TEG in einer sogenannten Kapselrohrbauweise. Der Abgaswärmeübertrager und das thermoelektrische Module

werden zusammengesetzt und mit einem Kapselrohr umschlossen. Mehrere dieser Kapselrohre werden in einem Gehäuse zusammengefügt. Durch einen Verteiler wird das Abgas gleichmäßig auf die Abgaswärmeübertrager verteilt. Das Kühlwasser zirkuliert zwischen den Kapselrohren und dem Gehäuse und kühlt so die Kaltseiten der thermoelektrischen Module. Abbildung 2-79 zeigt den Prototypen des DLR mit dem Ein- und Auslasskanal für das Kühlwasser, den Verteilern für das Abgas und den Anschlüssen für die thermoelektrischen Module. Vorteil dieser Lösung ist eine Verkapselung der Module zum Schutz vor Oxidation des Modul-Materials mit Umgebungsluft.



Abbildung 2-79 DLR Kapselrohrbauweise

BSST/Amerigon in BMW X6 / Ford Lincoln [8], [9]

Der TEG Aufbau von BSST ist zylinderförmig. Wie in Abbildung 2-80 zu sehen wird das heiße Abgas durch ein Rohr geführt, dieses Rohr ist an der Außenseite mit den thermoelektrischen Modulen besetzt. Gekühlt werden die Module von der anderen Seite durch einen Kühler der im Mantel des TEG's integriert ist.

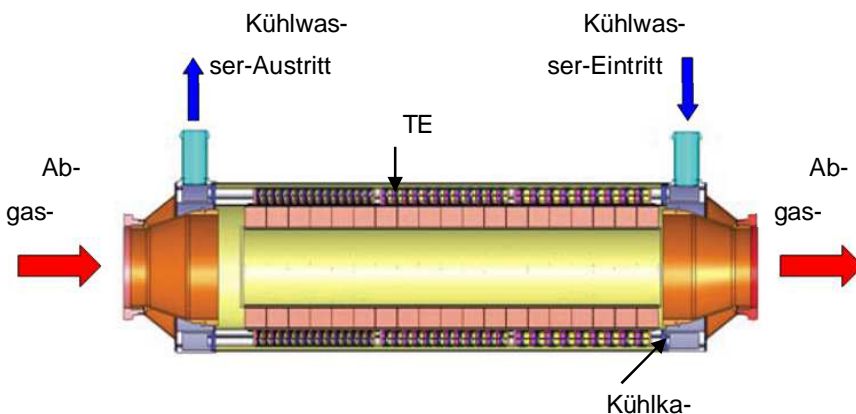


Abbildung 2-80 BSST TEG

Diese spezielle Bauweise ermöglicht es den ohnehin benötigten Bypass in den TEG bzw. in das abgasführende Rohr (Abbildung 3.8) zu integrieren.

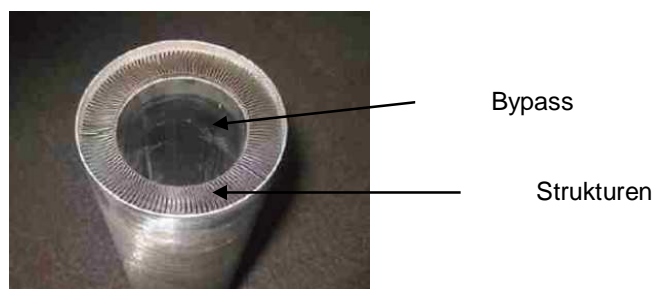


Abbildung 2-81 BSST TEG Bypass

Das heiße Abgas wird bei einem normalen Betrieb des TEG's über den äußeren, mit Strukturen (Fins) besetzten Kanal geführt. Bei einer zu hohen Abgastemperatur wird das Abgas über das innere Rohr (Bypass) umgeleitet, die TEM sind so vor einer Überhitzung geschützt. Eine Integration der Bypass-Funktion in den TEG führt zu einem kompakteren Gesamtsystem und reduziert das Gewicht. Der TEG erzeugt bei einer Heißeitentemperatur von 600°C und einem Massenstrom 0.04kg/s eine Leistung von 500W [Nav-11].

Gentherm, Tenneco [10]

Entsprechend der ATZ-Ausgabe 9/2013 wird von Gentherm ein modulares weiterentwickeltes TEG-Konzept in zylindrischer Bauweise vorgestellt. Das favorisierte Modulmaterial ist ebenfalls Skutterudit und soll für Heißeitentemperaturen bis 600°C eingesetzt werden. Die Skalierbarkeit wird durch eine Kartuschenbauweise erreicht. Diese Kartuschen können wie ein Rohrbündelwärmeübertrager in einem zylindrischen Gehäuse angeordnet werden. Die Außenseite mit den Rippen wird vom heißen Abgas umströmt. Im Kern der Kartusche strömt das Kühlmedium. Dazwischen ist das Modulmaterial angeordnet. Bei einer Heißeitentemperatur von 600°C werden $26,9\text{W}$ je Kartusche in einem Prototyp erzeugt mit zukünftigem Potential bis zu 40W zu erzeugen. Im Weiteren soll dieses Konzept mit einer katalytischen Beschichtung kombiniert werden, um die Abgasnachbehandlung zu unterstützen.

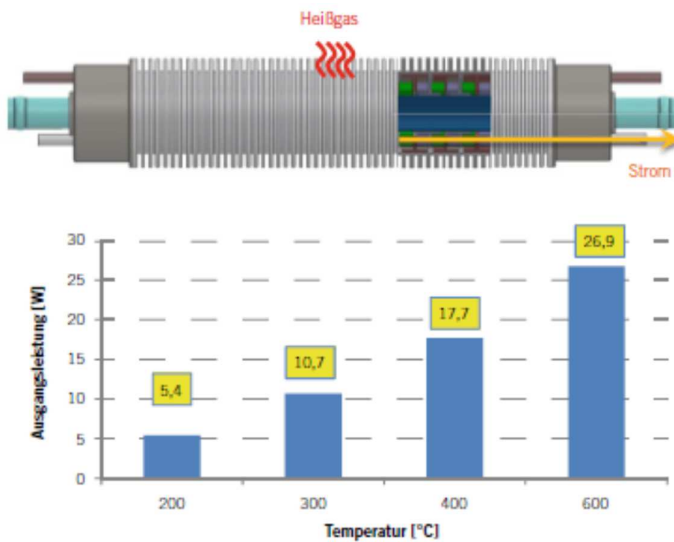


Abbildung 2-82 Schema eines TEG's in Kartuschenbauform mit Leistungsdiagramm für verschiedene Heißseitentemperaturen.

HeatReCar: first light commercial vehicle equipped with a TEG [11]

In diesem Projekt gefördert durch die EC (EC FP7) wurde ein TEG in ein leichtes Nfz eingebaut. Das Register ist quaderförmig mit den Abmessungen 500x100x100 [mm³]. In den Bauraum sind 504 BiTe-Module mit einer Querschnittsfläche von je 16x16 [mm²] integriert. Für hohe Betriebspunkte ist ein By-Pass außen zwischen den Abgastrichtern vorgesehen. Auf dem Prüfstand liefert der TEG ca. 500W bei 450°C Abgastemperatur. Im WLTP-Zyklus konnte eine Kraftstoffeinsparung von ca. 4% gemessen werden. Im aktuellen NEFZ rekuperiert der TEG nur im außerstädtischen Teil nennenswerte Energie. Im zukünftigen Zyklus WLTC wurde eine Peak-Leistung von 220W gemessen.

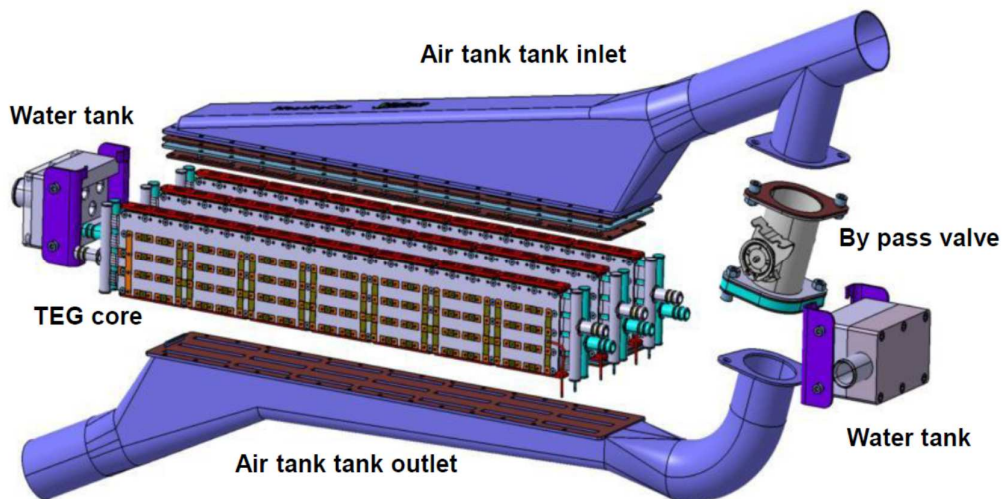


Abbildung 2-83 NFZ TEG

Zusammenfassende Beobachtung zum technischen Fortschritt bei anderen Stellen:

Insgesamt zeigen diese Beispiele unterschiedliche Möglichkeiten zur Integration in bestehende Fahrzeugkonzepte. Bei der Auswahl der Beispiele wurde der Schwerpunkt auf die Integration des TEG's in die Abgasanlage gelegt. Dieses entspricht den Aufgaben von Eberspächer im EcoTEG-Projekt. Weitere Schwerpunkte z.B. die Modulentwicklung wurde ebenfalls beobachtet jedoch nicht intensiv bewertet. Für zukünftige Fahrzeuganwendungen besteht der Bedarf, TE-Module für Heißseitentemperaturen zwischen 400°C und 500°C zu entwickeln. Dieser Temperaturbereich wird derzeit selten angeboten.

Die bisher erzielte elektrische Leistung zur Rekuperation kann auf einige 100 Watt bei PKW-Anwendungen beziffert werden. In Veröffentlichungen werden häufig Maximalwerte publiziert. Diese lassen sich nicht auf geltende Fahrzyklen z.B. NEFZ übertragen. Bei qualitativen Angaben zum Nutzen des thermoelektrischen Generators im NEFZ werden bisher nur sehr kleine Verbrauchsvorteile im außerstädtischen Teil berichtet. Die Notwendigkeit zur deutlichen Effizienzsteigerung des TEG's und insbesondere der Modul-Materialien kann hieraus abgeleitet werden.

2.4 Veröffentlichungen der Projektergebnisse

Im Projektzeitraum wurden durch die Projektpartner in enger Abstimmung und durch eigene Veröffentlichungen die wesentlichen Ergebnisse dieses Projekts öffentlich zugänglich gemacht [12]. Für die Veröffentlichungen durch die Projektpartner sei hier auf die entsprechenden Abschlussberichte der Partner verwiesen.

Seitens Eberspächer wurde folgender Beitrag veröffentlicht und im Rahmen der 3. IAV-Tagung Thermoelektrik präsentiert:

Sebastian Leicht, Andreas Resch, Enver Kurpejovic, Jonathan Lang, Bianca Buchberger, Annika Stark, Dr. Jörg Oesterle, Dr. Rolf Jebasinki

Optimierung der Leistungsdaten gasseitiger Wärmeübertrager eines TEG und Auswirkungen auf den Kraftstoffverbrauch im PKW

21. – 23.11.2012 in Berlin

3. IAV-Tagung Thermoelektrik

in

Thermoelectrics Goes Automotive III (Thermoelectrics III)

Dipl.-Ing. Daniel Jänsch (ed.) and 85 Co-Authors

S. 189ff, Expert Verlag, ISBN-13: 978-3-8169-3169-0

Darüber hinaus erfolgt die Veröffentlichung der Projektergebnisse gemäß den Vorgaben durch Übermittlung des öffentlichen Berichts an die UB/TIB Hannover.

Literaturverzeichnis

- [1] D. K. Salzgeber, „Thermoelektrische Generatoreinheit“. Austria Patent AT 506262B1 2011-07-15, 02 April 2009.
- [2] A. Hettel, R. Dr. Jebasinski, J. Dr. Oesterle, A. Bürkle und H. Tchamgoue, „Numerical optimisation of contact pressure with respect to the heat exchange properties of a thermoelectric generator,“ IAV, IAV Tagung, 2010.
- [3] VDI, VDI Wärmeatlas, VDI Verlag, 2006.
- [4] R. Manglik und A. Bergles, Heat transfer and pressure drop correlations, New York, USA: Elsevier Science Inc., 1995.
- [5] D. A. Eder, D. J. Liebl, R. Brück und W. Maus, Der thermoelektrische Generator zur Reduktion der CO2 Emissionen- Rekuperation der Energieverluste im Abgassystem, 2012.
- [6] G. P. Meisner, Skutterodite thermoelectric generator for automotive waste heat recovery, 2012.
- [7] C. Häferle, Die Kapselrohrbauweise - Ein industrialisierbares Fertigungskonzept für fahrzeuggerechte TEG, 2012.
- [8] P. Navneesh, Thermo electric generators, 2011.
- [9] J. W. Fairbanks, „Automotive thermoelectric generators and HVAC,“ Troy, Michigan, 2011.
- [10] T. Gentherm, *ATZ*, Nr. 9/2013, pp. 714-719, 2013.
- [11] D. Magnetto, „HeatReCar: First light commercial vehicle equipped with a TEG,“ 2013.
- [12] S. Leicht, A. Resch, E. Kurpejovic, J. Lang, B. Buchberger, A. Stark, D. J. Oesterle und D. R. Jebasinki, „Optimierung der Leistungsdaten gaseitiger Wärmeübertrager eines TEG und Auswirkungen auf den Kraftstoffverbrauch im PKW,“ in *Thermoelectric goes automotive III*, Dipl.Ing. Daniel Jänsch, Expert Verlag, Berlin, 2012.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel EcoTEG Industrialisierungskonzept für hochtemperaturtaugliche thermoelektrische Generatoren zur Abgaswärmenutzung in Automobilen auf Basis neuartiger Materialien	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dipl. Ing. (FH) Ulrich Rusche Tobias Bukes BEng. Michael Padberg Dipl. Ing. (FH) Daniel Rabiega	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2013
	6. Veröffentlichungsdatum geplant
	7. Form der Publikation Techn. Informationsbibliothek Hannover
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Eberspächer Exhaust Technology GmbH & Co. KG (bis 31.12.2012: J. Eberspächer GmbH & Co. KG) Abteilung: Applied Research Eberspächerstraße 24 73730 Esslingen	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 03X3551C
	11. Seitenzahl: 89
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben: 12
	14. Tabellen: 11
	15. Abbildungen: 101
16. Zusätzliche Angaben keine	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Forschungszentrum Jülich GmbH, Projektträger PTJ NMT, Dipl.-Ing. Hermann Haag, 23.06.2014	
18. Kurzfassung Zur weiteren Kraftstoff einsparung in Kraftfahrzeugen werden derzeit sehr unterschiedliche Technologien verfolgt. Die Nutzung der Abwärme gewinnt hierbei immer mehr an Bedeutung, weil der überwiegende Teil ungenutzt an die Umgebung abgegeben wird. Die Thermoelektrik kann diese Abwärme nutzen und in elektrische Energie umwandeln. Zur Rekuperierung der Abgasenergie von PKW's wird in diesem Vorhaben ein thermoelektrischer Generator ausgelegt und nach der Herstellung von Prototypen untersucht und für die zukünftige Nutzung im Fahrzeug bewertet. Die Zielsetzung besteht in der Entwicklung hochtemperaturtauglicher thermoelektrischer Module z.B. Skutterudit sowie die Auslegung, Herstellung und Bewertung des thermoelektrischen Generators (TEG). Hierfür sind industrialisierbare Verfahren und Konzepte zu entwickeln und im Rahmen von Prototypen anzuwenden. Zu Beginn sind wesentliche Anforderungen und Zielwerte für einen TEG definiert worden, wodurch sich im Projektverlauf ein Lastenheft entwickelt hat. Dieses war Basis für die numerische Auslegung des modularen TEG-Konzepts. Durch die Entwicklung von gekapselten Skutterudit-Modulen und die Integration in die Wärmübertrager wurde ein hochtemperaturtauglicher TEG hergestellt und mittels Laborprüfständen eingehend untersucht. Durch das gemeinschaftliche Zusammenfügen der Entwicklungsergebnisse und –erkenntnisse, ausgehend von der Komponentenebene bis zum Gesamtsystem, konnte so eine gesamtheitliche Systembewertung durchgeführt werden. Von besonderem Nutzen war dabei die Validierung und Weiterentwicklung der Auslegungs-Software für einen TEG dieser Bauart. Auf Basis der Untersuchungen und weiteren Berechnungen konnte somit eine Brutto/Netto – Energiebilanz erstellt werden. Darauf aufbauend erfolgte eine Wirtschaftlichkeitsbewertung mit Darstellung des Kosten/Nutzen Verhältnisses. Mit dem Projektergebnis konnte der Nutzen im Fahrzeugeinsatz quantifiziert werden. Das resultierende Ergebnis macht deutlich, die weiter notwendige Effizienzsteigerung des TEG's für den wirtschaftlichen Einsatz im Fahrzeug. Hierbei sollte besonders das aktive Modulmaterial entsprechend den Automobilanforderungen weiterentwickelt werden. Unter der Annahme deutlich steigender Material-Gütezahlen (ZT-Werte) ist eine zukünftige Nutzung dieser Technologie im Fahrzeug vorstellbar.	
19. Schlagwörter EcoTEG, Thermoelektrischer Generator, Thermoelektrik, Abgaswärmenutzung, Abgaswärmerekuperation, Skutterudit	
20. Verlag Entf.	21. Preis Entf.

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN planned	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title EcoTEG, industrialization concept for waste heat recovery with Thermoelectric Generators suitable for high temperatures in automobile applications based on new materials	
4. author(s) (family name, first name(s)) Dipl. Ing. (FH) Ulrich Rusche Tobias Bukes BEng. Michael Padberg Dipl. Ing. (FH) Daniel Rabiega	5. end of project 31th December 2013
	6. publication date planned
	7. form of publication Techn. Informationsbibliothek Hannover
8. performing organization(s) (name, address) Eberspächer Exhaust Technology GmbH & Co. KG (until 31 December.2012: J. Eberspächer GmbH & Co. KG) Department: Applied Research Eberspächerstraße 24 73730 Esslingen	9. originator's report no.
	10. reference no. 03X3551C
	11. no. of pages: 89
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references: 12
	14. no. of tables: 11
	15. no. of figures: 101
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) Forschungszentrum Jülich GmbH, Projektträger PTJ NMT, Dipl.-Ing. Hermann Haag, 26.06.2014	
18. abstract Due to further fuel savings in vehicles a variety of technologies are currently in developing. Waste heat recovery becomes more and more important, because most of the fuel energy is discharged to the environment by coolant and exhaust. Thermoelectrics can use this waste heat and convert it into electrical energy. Within this project a thermoelectric generator for exhaust systems is designed and tested by the production of prototypes. They are evaluated for future use in vehicle applications. The objective is to develop high-temperature thermoelectric modules e.g. Skutterudite. In addition dimensioning, manufacturing and evaluation of the thermoelectric generator (TEG) is focused by the EcoTEG project. For this industrial processes and concepts have to be developed and applied in the context of prototypes. At the start key requirements and target values for this TEG have been defined. This resulted in a first specification during this project. Based on this a modular TEG concept was designed by numerical dimensioning for gasoline use. Through the development of encapsulated Skutterudite modules and the integration into the heat exchangers a high temperature TEG was produced and investigated by varied laboratory tests. Through joining the development results and findings by all project partners starting from the component level to the complete system an entirety evaluation could be performed. Therefore the developed simulation software for dimensioning and optimization of the TEG was used to maximize the efficiency of the system. Based on this a gross / net power output calculation was performed for this application. With all the results and a cost calculation of the components an economic assessment was realized to show the cost / benefit ratio. With the outcome of this project, the benefits in vehicle use by today's TEG-concepts could be quantified. The results show the need for further increased efficiency of TEG's for economical use in vehicles. Here, especially the active module material should be developed according to the automotive requirements. Assuming a significantly increasing of TE-materials efficiency by figure of merit (ZT) is a future use of this technology in vehicle applications imaginable.	
19. keywords EcoTEG, Thermoelectric Generator, TEG, Waste Heat Recovery, Skutterudite	
20. publisher	21. price