



Projektbericht

HD-TEG

31. Dezember 2020

**Deutsches Zentrum für Luft-
und Raumfahrt e.V.**

Institut für Fahrzeugkonzepte



HDTEG

Thermoelektrischer Generator im Nutzfahrzeug



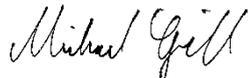
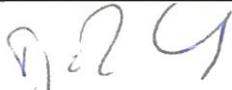
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

 Institut für Fahrzeugkonzepte
 Pfaffenwaldring 38-40
 D-70569 Stuttgart

 Institutsleitung
 Prof. Dr.-Ing. Tjark Siefkes
 Tel.: +49 (0)711/6862-691
 FAX.: +49 (0)711/6862-258

 Projektleitung
 Lars Heber
 Tel.: +49 (0)711/6862-8207
 FAX.: +49 (0)711/6862-258

Titel	HD-TEG		
Autor	Lars Heber Tel.: +49 (0)711/6862-8207 lars.heber@dlr.de Weitere Autoren: J. Schwab, T. Knobelspies, Dr. M. Grill, K. Yang		
Projekt	HD-TEG: Effizienzsteigerungspotential bei Nutzfahrzeugen durch den Einsatz eines neuartigen Abwärmenutzungssystems (Thermoelektrik)		
Dateiname	2020-12-31_Projektbericht_HD-TEG_V1_[de].pdf		
Ablage	https://elib.dlr.de/142027/		
Versions-Nr.	Änderung	Gesamt-Seitenzahl	Datum
1	Abschlussbericht_V1	73	31.12.2020

Erstellt		31.03.2021 Lars Heber, Projektleiter (DLR FK)
Geprüft		30.04.2021 Dr. F. Rinderknecht, Abteilungsleiter (DLR FK)
Geprüft		14.04.2021, Dr. M. Grill Leiter 0D/1D-Simulation (FKFS)
Freigegeben		30.04.2021, Prof. Dr.-Ing. Tjark Siefkes, Institutsleiter (DLR FK)
Freigegeben		14.04.2021, Dr. M. Grill Leiter 0D/1D-Simulation (FKFS)

Inhaltsverzeichnis

0	Kurzfassung	1
1	Einleitung und Zielsetzung	2
2	Projekthalte und Ergebnisse	4
2.0	AP 0: Projektmanagement & Reporting.....	4
2.1	AP 1: Recherche zum Stand der Technik der Thermoelektrik	6
2.2	AP 2: Randbedingungen	9
2.3	AP 3: Simulative Gesamtsystemwechselwirkungen	15
2.3.1	Motor und Abgasnachbehandlung.....	15
2.3.2	Motorkühlung	19
2.4	AP 4: Konstruktive TEG-Auslegung	26
2.4.1	Methodische Konzept- und Lösungsfindung.....	26
2.4.2	Validierungsstudie.....	27
2.4.3	Dimensionierung	28
2.4.4	Ergebnisse des Konstruktionsprozesses	30
2.5	AP 5: Gesamtsystemische TEG-Simulation	35
2.5.1	Fahrzeugwechselwirkungen	35
2.5.2	Technoökonomische Randbedingungen	38
2.5.3	Simulationsumgebungen und Modellbildung	39
2.5.4	Ergebnisse der Simulation.....	44
2.6	AP 6: Validierung durch Funktionsmuster	48
2.7	AP 7: Bewertung und Ausblick.....	52
2.7.1	TEG-Potential-Bewertung und Ausblick.....	52
2.7.2	Ausblick zukünftiger NFZ-Motoren hinsichtlich Abwärmenutzung.....	52
3	Reflexion	56
4	Literaturverzeichnis	58
5	Anhang	60
5.1	Gleichungen.....	60
5.2	Zusätzliche Ergebnisse.....	62

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Projektstrukturplan des HD-TEG Projektes	4
Abbildung 2-2 Potentialanalyse der verfügbaren Abgastemperaturen entlang der Abgasanlage, des -massenstroms sowie des -gedrucks der Abgasanlage ohne TEG im Motorkennfeld (Ausgangsdaten der Interpolation basieren auf dynamischen Simulationswerten)	11
Abbildung 2-3 Potentialanalyse anhand der verfügbaren Wärmeströme $Q_{Ag,AGN}$ am Ausgang der Abgasnachbehandlung (AGN) im Motorkennfeld	12
Abbildung 2-4 Detailabbildungen der Fahrzeug- und Bauraumbegutachtung im Bereich der Abgasanlage des IVECO Stralis NP460 LNG	14
Abbildung 2-5 Simulationsergebnisse für Kraftstoffverbrauch und Rohemissionen in Abhängigkeit von Motordrehzahl und -drehmomenten	17
Abbildung 2-6 Aufbau des angepassten Kühlsystems für Cursor-13-Gasmotor	20
Abbildung 2-7 Wärmebilanzkennfeld in Abhängigkeit von Motordrehzahl und -drehmoment aus Simulationsergebnissen mit dem Modell von Luft- und Kraftstoffpfad. Links: Absolute Wärmeeinträge ins Kühlmittel in kW; Rechts: Prozentueller Wärmeeintrag ins Kühlmittel bezogen auf Kraftstoffleistung in %	22
Abbildung 2-8 Simulationsergebnisse für Kühlungspotentiale des Kühlsystems bei Verschaltung des TEG nach dem HT-Kühler mit Kühlmitteltemperatur am Motorauslass von 91 °C als Zielgröße bei den verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten unter Umgebungstemperatur von 20 °C	24
Abbildung 2-9 Maximal zulässige Wärmeabfuhr des TEGs ins Kühlsystem bei Konstantfahrten auf der Ebene beim NFZ mit Cursor-13-Gasmotor für unterschiedliche Integrationspositionen des TEG (12.Gang, Fahrzeugmasse mit Zuladung 40 t, Umgebungstemperatur 20 °C)	25
Abbildung 2-10 Schematische Darstellung eines reinen Gleichstrom- (a) bzw. reinen Gegenstrom-WÜ (b) sowie Fluidströme entlang der Wärmeübertrager bei unterschiedlichen Wärmeübertragerflächen A ((c), (d), Randbedingungen: $\vartheta_1' = 600\text{ °C}$, $m_1 = 350\text{ kg/h}$, $\vartheta_2' = 85\text{ °C}$, $m_2 = 10\text{ l/min}$)	31
Abbildung 2-11 CAD-Modell des 3-Kanal-TEG-Ergebnisdesigns als Funktionsmuster für die experimentelle Validierung (a) und mit transparenten Gehäusebauteilen (b)	32
Abbildung 2-12 Konstruktion des Prüfstandaufbaus	33
Abbildung 2-13 3D CAD-Modell des TEG-Einbaukonzeptes in die Abgasanlage (rot eingefärbt) des Referenzfahrzeuges der Erdgas-Sattelzugmaschine	34
Abbildung 2-14 TEG als Teilsystem im Fahrzeugesamtsystem und deren Wechselwirkungen	35
Abbildung 2-15 Resultierende Änderung des Kraftstoffverbrauchs bei Änderung des Abgasgedrucks der Abgasanlage des Referenzfahrzeuges bei variierender Motorleistung	36
Abbildung 2-16 Darstellung des elektrischen Bordnetzes eines konventionellen NFZ mit 24-Volt Bordnetzarchitektur	37

Abbildung 2-17 Beispielhafte Bewertung der positiven und negativen Effekte bei TEG-Integration in ein Erdgas-NFZ in Form der Änderung des Kraftstoffverbrauchs (*für typische Lastpunkte der Autobahnfahrt; $B_e = 32,2$ kg/100 km; spezifische CO ₂ -Emissionen $c = 813$ g/km; TEG versorgt das elektrische Bordnetz vollständig)	38
Abbildung 2-18 TCO-Kostenstruktur für Sattelzug mit Erdgasverbrennungsmotor (LNG) mit Laufleistung von 150.000 km/Jahr (a) und Zielkostenanalyse eines beispielhaften TEG-Designs sowie Angabe von dessen Nutzenschwelle (b; Annahmen: Nutzungsdauer von 5 Jahren für die Sattelzugmaschine bzw. 10 Jahren für den Auflieger, $B_s = 35,3$ l/100 km für das Diesel- bzw. $B_e = 32,2$ kg/100 km für das Erdgas-NFZ, TEG-Stückkosten $K_{TEG} = 1500$ EUR).....	39
Abbildung 2-19 Integration der CadNexus Schnittstelle zur bidirektionalen Kommunikation des CAD-Modells in CATIA und der ANSYS-Workbench.....	40
Abbildung 2-20 Beispielhafte grafische Benutzeroberfläche der Simulationsumgebung in Ansys Workbench.....	41
Abbildung 2-21 Beispielhafte Umwandlung von der physikalische Nachbildung über das Simulationsergebnis über die Ableitung in ein mathematisches Modell aus den simulativen Ergebnissen.....	42
Abbildung 2-22 Modulcharakteristik auf Basis der Modulmesswerte des Wirkungsgrades und der elektrischen Leistung der ausgewählten TEM (LGC100).....	43
Abbildung 2-23 Prinzipdarstellung des CFD-Modells der Modellumgebung	44
Abbildung 2-24 Ergebnisse der Voruntersuchung zum Einfluss der TEG-Länge in Strömungsrichtung.....	45
Abbildung 2-25 TEG-Funktionsmuster als Hardwarerealisierung des TEG-Ergebnisdesigns mit Zielsetzung minimaler TCO: (a) HDTEG1: Aufbau mit Ersatzmodulen und (b) HDTEG2: Aufbau mit TEM LGC100 der Firma LG Chem.....	48
Abbildung 2-26 Prinzipdarstellung des TEG-Funktionsmusters in Gegenstrombauweise anhand des TEG-Kerns (ohne Gehäusebauteile) sowie der Heißgas- und Kühlmittelstromführung	49
Abbildung 2-27 Vergleich der Heiß- und Kaltseitentemperaturen zwischen der Simulation und dem Experiment des Funktionsmusters HDTEG2 auf dem Heißgasprüfstand in den Betriebspunkten 1.1* und 3.2* (*: Randbedingungen siehe Tabelle 2-12).....	51
Abbildung 2-28 Aufteilung der eingesetzten Primärenergie im Verbrennungsmotor [12]..	53
Abbildung 2-29 Sattelzug auf <i>Long Haul Cycle</i> (dt. Fernverkehr), Einzelmaßnahmen [10]	54
Abbildung 2-30 Änderung der Fahrzeugkosten eines Sattelzugs 40 t im Fernverkehr bis 2018 [10].....	55
Abbildung 5-1 Ergebnis der Potentialanalyse anhand der Motorleistung und der verfügbaren Abgasenthalpie in der AGN für das Erdgas-NFZ im WHVC mit 15 t GG	62
Abbildung 5-2 Ergebnis der Potentialanalyse anhand der Motorleistung und der verfügbaren Abgasenthalpie in der AGN für das Erdgas-NFZ im WHVC mit 40 t GG	62
Abbildung 5-3 Vollastkurve des Cursor-13-Gasmotors.....	63

Abbildung 5-4 Simulationsergebnisse für Abgastemperaturen und -massenströme, IK-Wert, Druckverluste im Drei-Wege-Katalysator in Abhängigkeit von Motordrehzahl und -drehmomenten.....	64
Abbildung 5-5 WHSC-Betriebspunkte	65
Abbildung 5-6 Simulationsergebnisse für spezifische Kraftstoffverbräuche und Abgasemissionen in WHSC-Betriebspunkten	65
Abbildung 5-7 Simulationsergebnisse für die Abgastemperaturen an unterschiedlichen Stellen in der Abgasstrecke des Cursor-13-Gasmotors.....	66
Abbildung 5-8 Simulative Untersuchungen für den Einfluss des zusätzlichen Abgasgedrucks auf den spezifischen Kraftstoffverbrauch bei den WHSC-Betriebspunkten in den BP01-06	67
Abbildung 5-9 Weiterführung von Abbildung 5-8 für BP07-11	68
Abbildung 5-10 Übersetzungen des Lüfters bei den verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten (Umgebungstemperatur von 20 °C; trocken – 0 % Luftfeuchtigkeit; Luftdruck von 1,013 bar)	69
Abbildung 5-11 Simulationsergebnisse für Kühlungspotentiale des Kühlsystems bei Verschaltung des TEG nach dem HT-Kühler mit Kühlmitteltemperatur am Motorauslass von 100 °C als Zielgröße bei den verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten unter Umgebungstemperatur von 20 °C.....	70
Abbildung 5-12 Simulationsergebnisse für Kühlungspotentiale des Kühlsystems bei Verschaltung des TEG nach dem Ladeluftkühler mit Kühlmitteltemperatur am Motorauslass von 100 °C als Zielgröße bei den verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten unter Umgebungstemperatur von 20 °C.....	71
Abbildung 5-13 Ergebnis der TEG-Leistung im WHVC mit 15 t GG beim Ergebnisdesign mit Zielsetzung für minimale TCO (TEG-System integriert am Ausgang der AGN und im NT-KMK)	72
Abbildung 5-14 Ergebnis der TEG-Leistung im WHVC mit 40 t GG beim Ergebnisdesign mit Zielsetzung für minimale TCO (TEG-System integriert am Ausgang der AGN und im NT-KMK)	72
Abbildung 5-15 Funktionsmuster HDTEG2 auf dem DLR eigenen Heißgasprüfstand	73

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1 Meilensteinübersicht des Projekts und Angabe des jeweiligen Status zum Stand 31.12.2020 (Anpassung im Projektverlauf gegenüber Projektantrag).....	4
Tabelle 2-2 Überblick über die technologierelevanten Eigenschaften wichtiger Thermoelektrischer Materialklassen, Darstellung in Anlehnung an [4]	7
Tabelle 2-3 Übersicht zum Stand der Technik von TEG-Forschungsarbeiten bei SNFZ ...	8
Tabelle 2-4 Marktübersicht von Erdgas-NFZ für den Regional- und Fernverkehr.....	9
Tabelle 2-5 Carnot-Wirkungsgrad η_c & Dreieckprozess-Wirkungsgrad η_{Dr} für unterschiedliche Wärmequellen ϑ_h und -senken ϑ_k im Erdgas-NFZ.....	10
Tabelle 2-6 Übersicht der definierten Betriebspunkte (BP) für die TEG-Auslegung.....	13
Tabelle 2-7 Übersicht konventioneller TEG-Konfigurationen, Abbildungen aus [7].....	26
Tabelle 2-8 Ergebnisse der Voruntersuchung mit kommerziellen TEM anhand der Vorstudie	28
Tabelle 2-9 Dimensionierung der TEG-Stapelanzahl	29
Tabelle 2-10 Übersicht auf Basis der Herstellerangaben der untersuchten hocheffizienten sowie segmentierten TEM für hohe Einsatztemperaturen der Firma LG Chem Ltd.	42
Tabelle 2-11 Ergebnis der Optimierung der ganzheitlichen TEG-Systemauslegung (TEG-Ergebnisdesign ausgewählt für maximale Reduktion des Kraftstoffverbrauchs bei günstigsten Systemkosten ausgewogen über alle Betriebspunkte, BP)	47
Tabelle 2-12 Vergleich der mittleren Heiß- ϑ_{HS} und Kaltseitentemperaturen ϑ_{KS} sowie der elektrischen Generatorleistung P_{TEG} zwischen der Simulation und dem Experiment des Funktionsmusters HDTEG2 auf dem Heißgasprüfstand.....	50
Tabelle 5-1 Technische Daten des Forschungsmotors Cursor-13-Gasmotors	63
Tabelle 5-2 WHSC-Betriebspunkte	65
Tabelle 5-3 NFZ-Fahrzeugdaten für die Simulation.....	71
Tabelle 5-4 Vergleich des Heißgasgegendrucks Δp_{TEG} zwischen der Simulation und der Experimente der Funktionsmuster HDTEG1 und HDTEG2 auf dem Heißgasprüfstand ...	73

Abkürzungsverzeichnis

AGN	Abgasnachbehandlung
AGR	Abgasrückführung
AP	Arbeitspaket
BP	Betriebspunkt
CO ₂	Kohlendioxid
d. h.	das heißt
DLR FK	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR e.V.), Institut für Fahrzeugkonzepte
EU	Europäische Union
FKFS	Forschungsinstitut für Kraffahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart
GG	Gesamtgewicht
GT	Gamma Technologies
HGWÜ	Heißgaswärmeübertrager
HT	Hochtemperatur
k. A.	keine Angabe
KMK	Kühlmittelkreis
KMWÜ	Kühlmittelwärmeübertrager
LNG	Flüssigerdgas, engl.: <i>Liquid Natural Gas</i>
MS	Meilenstein
NFZ	Nutzfahrzeug
NO _x	Stickstoffoxide
NT	Niedrigtemperatur
PKW	Personenkraftwagen
SNFZ	Schweres Nutzfahrzeug
SHHS	Stuttgart – Hamburg – Stuttgart (Referenzstrecke)
TCO	Gesamtbetriebskosten, engl.: <i>Total Cost of Ownership</i>
TEG	Thermoelektrischer Generator
TEM	Thermoelektrisches Modul
WHSC	World Harmonized Stationary Cycle
WHTC	World Harmonized Transient Cycle
WÜ	Wärmeübertrager
z. B.	zum Beispiel

0 Kurzfassung

In diesem Projekt wurde die Effizienzsteigerung von modernen schweren Nutzfahrzeugen durch den Einsatz eines neuartigen Abwärmenutzungssystems demonstriert. Dabei wurde erstmalig ein nutzfahrzeugspezifisches System basierend auf der Thermoelektrik mit Hilfe eines gesamtheitlichen Entwicklungsansatzes entwickelt und das Potential dieser Technologie für heutige und zukünftige Nutzfahrzeuge dargestellt. Als Referenzfahrzeug diente ein innovatives Serien-Nutzfahrzeug mit Erdgasmotor, welches als eine Schlüsseltechnologie für den zukünftigen emissionsärmeren Straßengüterverkehr im Nah- sowie im Fernbereich gilt.

Projektschwerpunkte waren gleichermaßen die Effizienzsteigerung des thermoelektrischen Systems und des Fahrzeuges sowie die Kostensenkung des Systems durch Verwendung von seriennahen Aufbautechnologien und Fertigungsverfahren. Die Systemkosten von Abwärmenutzungssystemen im Nutzfahrzeug müssen sich anwendungsspezifisch in möglichst kurzer Nutzungszeit im Realbetrieb amortisieren. Dazu wurde eine Bauweise des TEG gewählt, die eine hohe Energieausbeute bei gleichzeitig geringem Gewicht verspricht und somit Vorteile sowohl unter Realfahrbedingungen als auch in relevanten Fahrzyklen bietet. Eine neuartige ganzheitliche Auslegungsmethode bietet das Potential, thermoelektrische Systeme in Zukunft deutlich effizienter auslegen zu können. Hierbei wurden neben der Systemauslegung erstmals auch alle Wechselwirkungen mit dem Nutzfahrzeug betrachtet und quantifiziert. Die Umsetzung dieser Ansätze wurden in mehreren Funktionsmustern dargestellt. Durch die enge Zusammenarbeit der Projektpartner, konnte das Wissen und die umfangreiche Erfahrung beider in das Projekt einfließen, um der Technologie im Nutzfahrzeug zum Durchbruch zu verhelfen.

Als Ergebnis konnte erstmalig ein Abwärmenutzungssystem in Form eines Thermoelektrischen Generators für ein innovatives Erdgasnutzfahrzeug wirtschaftlich ausgelegt werden. Die berechnete Amortisation wurde zumeist in einer Zeit von kleiner als zwei Jahren, unter Annahme der Serienentwicklung des Systems, erzielt. Die Kraftstoffreduktion liegt bei bis zu 2,5 %, das entspricht rund 1 kg/100 km Kraftstoff. Zukünftiges Potential liegt bei weiteren 1,2 Prozentpunkten. Bei einer Hardwarerealisierung wurde am Funktionsmuster über 2,5 kW elektrische Leistung gemessen.

1 Einleitung und Zielsetzung

Zur weiteren Reduzierung der Abgasemissionen, insbesondere der CO₂-Emissionen, sowie des Energieverbrauchs eines Nutzfahrzeugs (NFZ), reichen die in der Forschung und Entwicklung bisher fokussierten innermotorischen Maßnahmen alleine nicht aus. Moderne Nutzfahrzeugmotoren sollen höchsten Ansprüchen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit, speziell des Kraftstoffverbrauchs und der Investitionskosten, sowie der Schadstoffemissionen genügen. Aufgrund des hohen technologischen Entwicklungsstandes der heutzutage beinahe ausschließlich eingesetzten Diesel-Verbrennungsmotoren im Bereich schwerer Nutzfahrzeuge (SNFZ), wird beim ausschlaggebenden Kosten-Nutzen-Verhältnis eine weitere Optimierung zunehmend erschwert. Daher müssen für die weitere Optimierung der Fahrzeuge alternative Entwicklungspfade betrachtet werden, welche die Komponentenentwicklung im Gesamtfahrzeugkontext einbezieht und diese hinsichtlich des angesprochenen Verhältnisses entwickelt. Zudem sind Aspekte wie alternative Antriebskonzepte und Kraftstoffe, sowie die zunehmende Elektrifizierung von Nebenaggregaten erwähnenswert und zu berücksichtigen.

Bei NFZ stehen vor allem die Gesamtbetriebskosten, die sogenannten Total Cost of Ownership (TCO), im Fokus der Betreiber. Der Kraftstoffverbrauch ist für die laufenden Betriebskosten des Spediteurs ein immenser Kostenfaktor, während für die Hersteller niedrige Schadstoffemissionen für die Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben unerlässlich sind. Dabei stand in der Vergangenheit hauptsächlich die Reduzierung der Emissionen von Stickstoffoxiden (NO_x) im Fokus der Hersteller. Zukünftig werden hierbei CO₂-Emissionen, ergo der Kraftstoffverbrauch, deutlich stärker in den Vordergrund treten. Nach der einzigen öffentlich zugänglichen Quelle zu Verbrauchsangaben von schweren Nutzfahrzeugen auf einer Teststrecke, in der Zeitschrift Lastauto Omnibus, ist der Verbrauch von SNFZ im Laufe der letzten 25 Jahre nicht signifikant gesunken [1]. Zur Verbrauchssenkung müssen deshalb verstärkt neue Möglichkeiten in Betracht gezogen werden. Ein vielversprechender Ansatz ist ein Abwärmenutzungssystem, um beispielsweise den Fahrzeugwirkungsgrad zu steigern und damit den Verbrauch sowie die Abgasemissionen senken.

Die Verwendung von gasförmigen Kraftstoffen wie z. B. Erdgas bietet aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung ein großes Potential zur Reduzierung von CO₂-

Emissionen. Dieses liegt im Bereich von rund 25 % gegenüber konventionellen Kraftstoffen, aufgrund des besseren Kohlenstoff- zu Wasserstoffverhältnisses. Bislang können Gasmotoren nicht mit gleichhohen Wirkungsgraden wie konventionelle Dieselmotoren betrieben werden, jedoch zeigen aktuelle nationale und internationale Forschungsprojekte vielversprechende Ansätze. Dieses Projekt steigert durch die Kombination aus innovativem Antriebs- und Abwärmenutzungskonzept in Form eines Thermoelektrischen Generators (TEG) zudem die Attraktivität der Technologie des Erdgasverbrennungsmotors und begünstigt den Einsatz von emissionsärmeren Antriebskonzepten. Dadurch werden einerseits die zukünftig zu erwartenden Regularien, insbesondere zu CO₂- und Kraftstoffsenkung, adressiert und andererseits ist die Entwicklung von effizienten Gasantrieben Teil der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung [2], wie auch der Europäischen Union (EU) mit dem Projekt LNG Blue Corridors (*Liquefied Natural Gas*, LNG aus dem Englischen für Flüssigerdgas) [3].

In dem hier beschriebenen Projekt HD-TEG wurde erstmalig eine TEG-Applikation für ein serienmäßiges schweres NFZ mit Erdgasmotor entwickelt und anhand von experimentellen Untersuchungen an Funktionsmustern getestet. Diese Vorgehensweise liefert eine fundierte Wissensgrundlage im Bereich TEG-Applikation und kann zukünftigen Projekten und dem Technologieverständnis der Automobilindustrie dienlich sein. Durch die enge Zusammenarbeit zwischen den Einrichtungen DLR FK und dem FKFS kann die Kompetenz bei der Entwicklung von Abwärmenutzungssystemen und die Kompetenz der Motorentechniksynergetisch genutzt werden. Dabei erfolgte erstmalig eine umfassende Untersuchung der TEG-Technologie für NFZ, die anhand einer spezifischen und eigens entwickelten NFZ-Entwicklungsmethode sowohl technologische als auch ökonomische Randbedingungen erfüllen soll. Bei bisherigen Untersuchungen wurden bislang weder eine Validierung der Potentialabschätzungen (auf Fahrzeugebene) getätigt noch eine für NFZ spezifische Entwicklung im Fahrzeuggesamtkontext durchgeführt. Aufgrund der Kompetenz der Projektpartner und der deutlich gesteigerten Leistungsdichten von TEG-Systemen durch das DLR FK, wurde diese Forschungslücke mit Hilfe der erzielten Erkenntnisse adressiert, um verlässliche Aussagen zum Potential von TEG-Systemen bei NFZ-Applikationen treffen zu können.

2 Projektinhalte und Ergebnisse

2.0 AP 0: Projektmanagement & Reporting

Das Projektvorhaben umfasst 7 Arbeitspakete (AP), welche zur Übersicht in Abbildung 2-1 dargestellt sind. Die verantwortliche Organisationseinheit ist mithilfe ihres Logos gekennzeichnet.

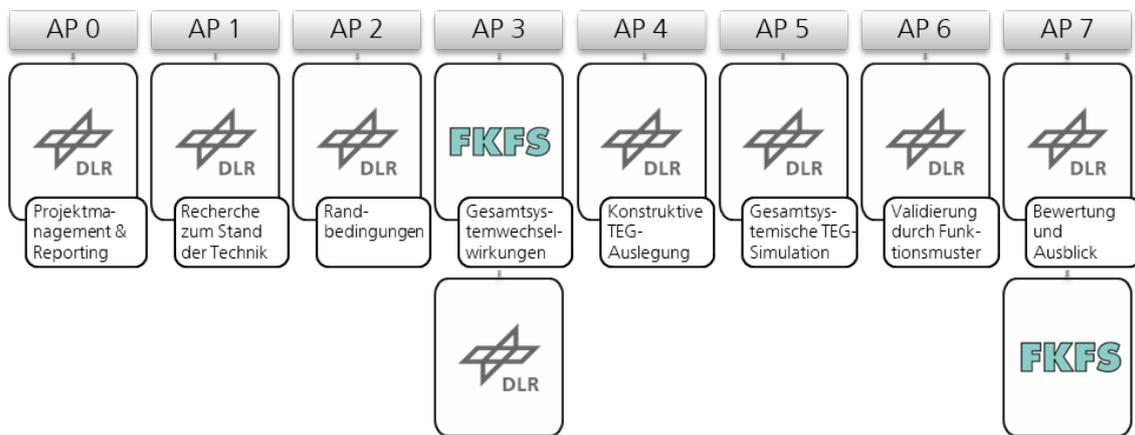


Abbildung 2-1 Projektstrukturplan des HD-TEG Projektes

Im Projekt konnten, wie in Tabelle 2-1 dargestellt, alle Meilensteine erfüllt werden und es konnte mit herausragenden Ergebnissen erfolgreich abgeschlossen werden.

Tabelle 2-1 Meilensteinübersicht des Projekts und Angabe des jeweiligen Status zum Stand 31.12.2020 (Anpassung im Projektverlauf gegenüber Projektantrag)

Meilenstein (MS)	Fälligkeit	Institut	Bezeichnung	Status
MS 0	03/2018	DLR-FK	Kick-Off Meeting	Erfolgt.
MS 1	11/2019	DLR-FK	(Simulations-) Ergebnisse Referenzfahrzeug liegen vor	Erfolgt.
MS 2	02/2020	FKFS	Gesamtsystemwechselwirkungen liegen vor	Erfolgt.
MS 3	03/2020	DLR-FK	TEG-Konstruktion ist abgeschlossen	Erfolgt.
MS 4	11/2020	DLR-FK	TEG-Funktionsmuster ist aufgebaut	Erfolgt.
MS 5	12/2020	DLR-FK	Messergebnisse vom TEG-Funktionsmuster liegen vor	Erfolgt.
MS 6	12/2020	DLR-FK	Abschluss des Projekts anhand des Abschlussberichts	Erfolgt.

Im bisherigen Projektverlauf sind folgende Veröffentlichungen getätigt worden:

- Heber, Lars (2018): Thermoelectric Generators for Heavy-Duty Vehicles: A Systemic Approach and Development. ICT/ECT-2018, 02.-05. Jul. 2018, Caen, Frankreich.
- Heber, Lars; Schwab, Julian und Friedrich, Horst E. (2018): Design of a Thermoelectric Generator for Heavy-Duty Vehicles: Approach Based on WHVC and Real Driving Vehicle Boundary Conditions. Springer Nature Scientific Publishing Services (P) Ltd., 2. ETA-Tagung | Energie- und Thermomanagement, Klimatisierung, Abwärmenutzung, 22. - 23. Nov. 2018, Berlin, Deutschland.
- Heber, Lars; Schwab, Julian; Yang, Kangyi und Grill, Michael (2019): Effects of a Thermoelectric Waste Heat Recovery System on the Engine Performance and the Cooling System of a Natural Gas Powered Heavy-Duty Vehicle. 5th Annual World Congress of Smart Materials 2019, 06.-08. März 2019, Rom, Italien.
- Heber, Lars und Schwab, Julian (2019): Thermoelectric Generators in Heavy-Duty Vehicle Applications: Development Approach and Optimization under Real Driving Conditions. ICT/ACT 2019 - International Conference on Thermoelectrics, 30. Juni - 04. Juli 2019, Gyeongju, Korea.
- Heber, Lars und Schwab, Julian (2020): Modelling of a thermoelectric generator for heavy-duty natural gas vehicles: Techno-economic approach and experimental investigation. Applied Thermal Engineering, 174 (11515). Elsevier.

2.1 AP 1: Recherche zum Stand der Technik der Thermoelektrik

In diesem Arbeitspaket (AP) wurde die Recherche zum Stand der Technik bezüglich der Thermoelektrik und speziell der Entwicklung von TEG für die NFZ-Applikation, der für eine Einordnung gegenüber alternativen Abwärmenutzungssystemen dienlich ist, durchgeführt. Die Datenbasis basiert auf einer Literaturrecherche, der Teilnahme an Fachtagungen und der Durchführung von Expertengesprächen.

In Tabelle 2-2 sind die technologierelevanten Materialklassen für thermoelektrische Module (TEM) in TEG aufgeführt und deren Einsatz im SNFZ bewertet. Die rot markierten Bereiche stellen dabei kritische Materialeigenschaften dar, die den Einsatz im NFZ erschweren bzw. nicht erlauben. Für Niedertemperaturanwendungen stellen Bismuttellurid (BiTe) TEM aufgrund der Verfügbarkeit, des Wirkungsgrades und der Zuverlässigkeit die derzeit beste Alternative dar. Für Hochtemperaturanwendungen stellen die Materialklassen der Skutterudite und der Halb-Heusler-Legierungen die aktuell vorteilhafteste Auswahl dar. Jedoch ist der Entwicklungsreifeegrad der beiden Hochtemperaturmaterialklassen derzeit noch nicht vergleichbar mit den bereits länger erforschten BiTe-TEM. Allgemein muss bei der Materialauswahl für die Gesamtsystemauslegung auf die Modulkosten geachtet werden, beispielsweise anhand der Reduktion der eingesetzten Materialmenge pro Modul oder der Modulanzahl.

Eine Übersicht über bisherige Arbeiten und Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Thermoelektrik bei SNFZ und deren Ergebnisse kann der Tabelle 2-3 entnommen werden. Auffallend und hervorzuheben sind die zahlreichen rotmarkierten Felder, bei denen keine Angaben (k. A.) für die TEG-Projekte verfügbar sind. Informationen zu Bauweisen und Bruttoleistungen der TEG-Systeme sind umfassend vorhanden, jedoch fehlen spezifische Erkenntnisse bzw. Angaben zu bspw. Wirkungsgrad, TEG-Gewicht, Randbedingungen, Systemkosten und Kraftstoffeinsparung, was den Entwicklungsstand der TEG-Technologie im SNFZ-Anwendungsgebiet widerspiegelt. Es fehlt bislang eine wissenschaftlich nachvollziehbare Gesamtsystemauslegung, um von der Bruttoleistung der Systeme auf die (netto) Kraftstoffeinsparung, sowie auf die Kosten und die Amortisationsdauer der Systeme zu schließen. Aufgrund der Forschungslücke ist ein Vergleich beziehungsweise eine Bewertung der durchgeführten Projekte nicht möglich.

Tabelle 2-2 Überblick über die technologierelevanten Eigenschaften wichtiger Thermoelektrischer Materialklassen, Darstellung in Anlehnung an [4]

Materialklasse	Bismut-tellurid	Bismut-Antimon	Bleitellurid / LASt	TAGS	Skutterudite	Zintl-Phasen	Eisen-Silicide	Magnesium-Silicide	höhere Magnesium-Silicide (HMS)	Zink-Antimonide	Halb-Heusler	Silizium/SiGe	Clathrate	Oxide
Basismaterial	BiTe	Bi-Sb	PbTe / $Ag_{1-x}Pb_xSbTe_{2-x}$	(AgSbTe ₂) _{1-x} (GeTe) _x	R ₂ CoSb ₂	versch.	FeSi ₂	Mg ₂ Si	Mg ₂ Sn _{1-x} Si _x	Zn ₂ Sb ₃	versch.	Si/SiGe	versch.	versch.
Temperaturbereich [K]	< 500 K	< 300 K	300 - 800 K	500 - 900 K	300 - 900 K	500 - 1100 K	500 - 1200 K	300 - 900 K	300 - 900 K	250 - 670 K	300 - 1000 K	600 - 1300 K	> 600 K	> 800 K
max. ZT p/n	1,4/1,0	-0,3	1,8/ 1,3	1,5	1,0/ 1,7	-1,0	0,2/ 0,4	0,5 - 1,1	0,6 - 0,8	1,0 (nur p)	0,8	0,1 - 0,7	0,6/ 1,4	0,2 - 1,0
bei Temperatur (ca.)	430 K	200 K	750 K	750 K	750 K	> 700 K	900 K	800 K	800 K	650 K	700 - 1000 K	800 - 1300 K	800 - 1000 K	1000 K
Thermische Stabilität	bis 250 °C	k. A.	Oxidationsschutz nötig	instabil	OK, Oxidationsschutz nötig	instabil	ja	unklar, Oxidationsschutz nötig	instabil	instabil an Luft, Degradation	OK	OK	OK	OK
Kontaktierung entwickelt	OK	OK	OK	OK	in Entwicklung	nein	in Entwicklung	OK	nein	OK	OK	OK	nicht bekannt	in Entwicklung
Rohstoffpreis (\$/kg)*	190	20	60 - 200	variiert stark	16 + x	stark abh. von Yb-Gehalt	3	4 - 20	4 + x	10	25 - 250	3 (Si) 150 - 420 (SiGe)	1000	ab 30
Mögl. Lieferant	diverse	nicht bekannt	nicht bekannt	nicht bekannt	Tegma, Treibbacher	nicht bekannt	NIST	Romy, Komatsu	nicht bekannt	(AlpCon)	GMZ	nicht bekannt	nicht bekannt	nicht bekannt
Krit. Element: Preis	Te	--	Ag, Te	Ge, Ag	Yb, Ce, In	Yb	--	(Ge)	(Ge)	--	Hf	Ge	Ge, Yb	--
Umweltverträglichkeit	unklar	unklar	Blei	unklar	OK	unklar	OK	OK	OK	OK	unklar	OK	unklar	unklar
NFZ-Anwendungsgebiet	Diesel-NFZ	unklar	Diesel-NFZ	Diesel-NFZ	Erdgas-NFZ	Erdgas-NFZ	unklar	Diesel-/Erdgas-NFZ	Diesel-/Erdgas-NFZ	unklar	Erdgas-NFZ	unklar	unklar	unklar

Tabelle 2-3 Übersicht zum Stand der Technik von TEG-Forschungsarbeiten bei SNFZ

(Abkürzungen: AGKr: Abgaskrümmer; AGN: Abgasnachbehandlung; AGR: Abgasrückführung; N3: EU-Fahrzeugklassenkategorie; vKat: vor Katalysator;)

Jahr	TEG-System (Firmen- bzw. Projektkürzel)	Referenzsystem	Technologie Reifegrad	Layout/ Topologie WU	Layout/ Material TEM	max. TEG-Leistung	Ø TEG-Leistung	TEG-Wirkungsgrad netto	TEG-Gewicht, Volumen	TEG-Leistungsdichte	Abgas-mengenstrom	Abgas-temperatur	Kühlmitteltemperatur	Auslegungsmethode (Simulation)	Systemkosten	Kraftstoff-einsparung	Quelle
						Pei,max (W)	Ø Pei (W)	η _{max} (%)	M _{TEG} , V _{TEG} (kg/l)	ρ _{TEG} (W/kg)	ṁ _{max} (kg/s)	T _{ex} (°C)	T _{mit} (°C)		K _{res} (USD/W)	ΔAB ₃ (%)	
1991-1994 bzw. 2000-2004	HzZ Technology, Inc.	Dieselmotor (41 / 250 kW) D-N3-HC N3 (412 kW)	(-) Motor-Funktionsmuster	Abgasrohrbauweise (Bridgman, Fichtelberg, Henschel, Sauer, Fichtelberg)	Büchse TEM / BiTe	1000	480 (brutto)	k.A.	13,8 kg, 10,3 l (TEG/Agm)	72,5 W/kg bzw. 97,1 W/kg (brutto, TEG-Kern)	0,46	627	k.A.	Experiment	k.A.	k.A.	Bass and Ebene (1991)
2008	Magna Powertrain Engineering	DieselfNFZK N3 (12 l)	Simulationsstudie	Stapelbauweise	Büchse TEM / BiTe und SGe	2700	kAT: 179 AGR: 882 AGR: 1200 (brutto)	11,2-21, AGR: 5,4-9,5, AGR: 5,6-9,5	k.A.	k.A.	nach Zyklus	nach Zyklus	nach Zyklus	1D-analytische Simulation	k.A.	0,49-0,96	Ephner et al. (2008)
2009-2011 bzw.	Michigan State University et al.	Dieselmotor (151 / 403 kW)	Labor-Funktionsmuster	Zylinderbauweise / Bröppung	Büchse TEM / Halbschuhkontakt / SKD, JAST	AGR: 74,7	k.A.	2,8-6,2	k.A.	k.A.	0,054-0,1	max. 650	52	1D-analytische Simulation, Experiment	0,93-0,45 \$/W (netto)	k.A.	Schock et al. (2011)
2008-2011	RENOTER	DieselfNFZK N3 (11,339 kW)	Simulationsstudie	Stapelbauweise	Büchse TEM / BiTe und MSt	1200	AGR: 100-1200 (brutto)	k.A.	10 kg, 7 l (brutto, TEG-Kern)	120 W/kg bzw. 171 A/W (brutto, TEG-Kern)	0,045	400	k.A.	2D-analytische Simulation	k.A.	k.A.	Anala (2011)
2013	Magna Powertrain Engineering	DieselfNFZK N3 (105 l; 120 kW; Euro VI)	Labor-Funktionsmuster	Stapel- und Ringbauweise	TEM Staps / BiTe	200	k.A.	5	k.A.	k.A.	0,25	300-400	50-100	1D + 3D-CFD Simulation, Experiment	k.A.	k.A.	Steiner et al. (2013)
2015	Eberspächer Ext. Tech.	DieselfNFZK N3	Labor-Funktionsmuster	Stapelbauweise	Büchse TEM / BiTe	nAGN: 550	nAGN: 219 (brutto)	1,6	k.A.	k.A.	0,278	350	80	1D + 3D-CFD Simulation, Experiment	k.A.	k.A.	Gaiser et al. (2015)
2012-2015	MAN (M. Bernath)	DieselfNFZK N3 (12,4 l; Euro V)	Labor-Funktionsmuster	Zylinderbauweise / Bröppung	V-Kerze / Isoporene BiTe und SKD (TEG-Präzisions-Formen)	1200	AGR: 578 (brutto)	k.A.	k.A.	k.A.	nach Zyklus	nach Zyklus	NF (bis 40) und HT (bis 70) KK	1D-analytische Simulation, Experiment	k.A.	0,28-0,7	Bernath (2016)
2013-2015	Scania et al.	DieselfNFZK N3 (12,7 l; 440 kW)	Prüfung im Fahrzeug	Stapelbauweise	Büchse TEM / BiTe	785	vAGR: nAGN: 448 (brutto) 225 (netto)	2,7-5,4	k.A.	1,125 W/kg	0,117-0,387	nAGN: 248-386 AGR: 318-560	95-100	Simulation (1-Pk-Opt., g-Pk. Sim.), Fahrzeug-einbau	150 \$/W (netto)	k.A.	Risken et al. (2017)
2014-2017	GASTone	Erdgasmotor (8,7 l; 243 kW)	Simulationsstudie	runde Lamellen	Runde TEM-Kontakten / SKD	800	506 (brutto, simulativ)	k.A.	k.A.	k.A.	nach Zyklus	nach Zyklus > 700	k.A.	analytische 1D-Simulation	k.A.	k.A.	Hervas-Blanco et al. (2017)

2.2 AP 2: Randbedingungen

Im AP 2 erfolgte die Auswahl und Vermessung eines SNFZ, das im folgenden Projektverlauf repräsentativ als Referenzfahrzeug dient. Damit wurden die Randbedingungen für den TEG ermittelt. Eine Übersicht der zur Verfügung stehenden Fahrzeuge ist Tabelle 2-4 zu entnehmen. Nach Prüfung der technischen Anforderungen sowie der Verfügbarkeit fiel die Auswahl zu Gunsten des Iveco Stralis NP, da es zu Projektbeginn als das einzige serienreife reine Erdgas-NFZ für den Fernverkehr (≥ 300 kW Antriebsleistung) geeignet war. Aufgrund von vertragsrechtlichen Komplikationen führte die Fahrzeugbereitstellung zunächst zu zeitlichen Verzögerungen im Projekt und konnte nicht im Rahmen dieses Projektes erfolgen. Stattdessen wurde eine Simulationsstudie für die Ermittlung der Fahrzeugrandbedingung beauftragt.

Tabelle 2-4 Marktübersicht von Erdgas-NFZ für den Regional- und Fernverkehr



Modell	Iveco Stralis NP	Mercedes-Benz Econic NGT	SCANIA P/G LNG	Volvo FM LNG	Volvo FH LNG
Treibstoff	LNG/C-LNG/CNG	CNG	C(B-)NG/LNG	LNG + Diesel	LNG + Diesel
Motor	Cursor 9/Cursor 13	M 936 G	OC09 /OC13	G13C	G13C
Hubraum	8,7l / 13 l	7,7l	9,3l / 12,7l	13 l	13 l
Max. Leistung	294 kW (400 PS) 338 kW (460 PS)	222 kW (302 PS)	250 kW (340 PS) 302 kW (410 PS)	309 kW (420 PS) 338 kW (460 PS)	309 kW (420 PS) 338 kW (460 PS)
Max. Drehmoment	1700 Nm / 2000 Nm	1200 Nm	1600 Nm / 2000 Nm	2100 Nm / 2300 Nm	2100 Nm/2300 Nm
Gesamtzuggewicht (GG)	40 t	32 - 40 t	40 t	40 t	40 t
Max. Reichweite	1600 km / 1035 km / 570 km	k. A.	500 km / 1600 km	1000 km	1000 km
Abgasnorm	Euro VI	Euro VI	Euro VI	Euro VI	Euro VI
Daten- & Bildquelle	www.iveco.de	www.Daimler.de	www.Scania.de	www.Volvotrucks.de	www.Volvotrucks.de

Im NFZ stehen mehrere Energiequellen zur Energierückgewinnung zur Verfügung. Neben der Abwärmenutzung spielen deren Potential zur Rekuperation thermischer Energie, d. h. die enthaltene Exergie, eine bedeutende Rolle. Zur Bewertung der zur Verfügung stehenden Integrationspositionen und -konzepte zur Abwärmenutzung in einem Erdgas-SNFZ, werden der theoretisch Wirkungsgrad, sowie die Qualität und Quantität der verfügbaren Energieströme analysiert. Dies dient als Grundlage für die TEG-Auslegung.

In Tabelle 2-5 werden anhand der zur Verfügung stehenden Abwärmequellen die theoretisch möglichen und potentiellen Wirkungsgrade der verfügbaren Energieströme zur Abwärmenutzung im Erdgas-NFZ dargestellt (vgl. Gleichungen (2) und (3) im Kapitel 5.1 des Anhangs). Dabei wird ersichtlich, dass je größer die Temperatur- und die Enthalpiedifferenz ist, desto höhere Wirkungsgrade lassen sich erzielen. Die Abwärmenutzung am Motorausgang bietet das höchste Potential, gefolgt von der Nutzung am Ausgang der Abgasnachbehandlung (AGN). Ein Projektziel stellte die nach Möglichkeit nur geringfügige Beeinflussung des Gesamtfahrzeugsystems durch die TEG-Integration dar. Daher erschien die Position am Ausgang der AGN als sinnvollster Einsatzort des TEG und wurde weiterverfolgt.

Tabelle 2-5 Carnot-Wirkungsgrad η_c & Dreieckprozess-Wirkungsgrad η_{Dr} für unterschiedliche Wärmequellen ϑ_h und -senken ϑ_k im Erdgas-NFZ

Abwärmequelle	Umgebung		Niedertemperatur-Kühlkreislauf (NT-KMK)		Hochtemperatur-Kühlkreislauf (HT-KMK)		
	ϑ_k	20 °C	60 °C	90 °C			
	ϑ_h	n_c	n_{Dr}	n_c	n_{Dr}	n_c	n_{Dr}
Hochtemperatur-Kühlkreislauf	90 °C	19,3%	10,3%	8,3%	4,2%	k. A.	k. A.
Ladeluft	100 °C	21,4%	11,6%	10,7%	5,6%	2,7%	1,4%
Abgas AGN-Ausgang	670 °C	68,9%	47,3%	64,7%	43,2%	61,5%	40,2%
Abgas Motorausgang	800 °C	72,7%	51,2%	69,0%	47,3%	66,2%	44,6%

Die folgende Analyse der relevanten Randbedingungen der Abgasanlage für ein TEG-System in Abbildung 2-2 und Abbildung 2-3 basiert auf der 0D/1D-Fahrzeugsimulation des FKFS. Soweit nicht spezifiziert dienen die Daten der Fahrstrecke Stuttgart-Hamburg-Stuttgart (SHHS) als Grundlage. Die Simulation wurde als Alternative zu Realfahrdaten im Rahmen des Projektes beauftragt und dient als Grundlage für die TEG-Auslegung durch das DLR FK.

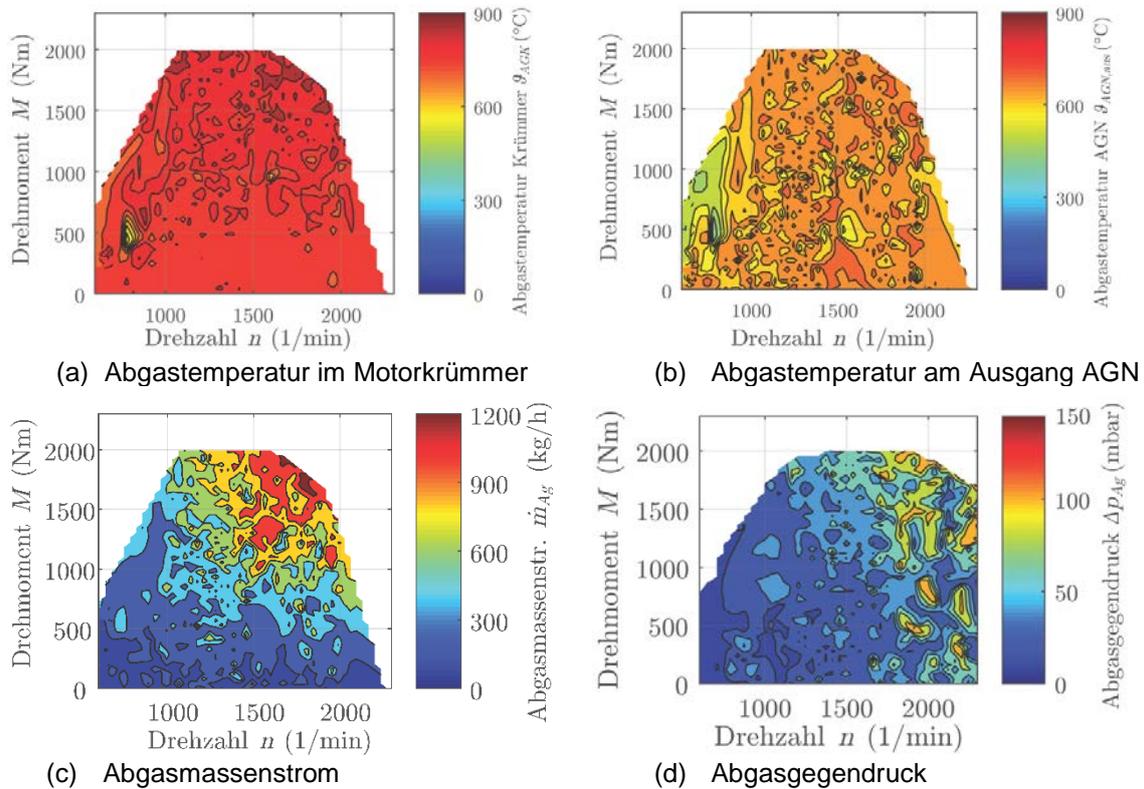


Abbildung 2-2 Potentialanalyse der verfügbaren Abgastemperaturen entlang der Abgasanlage, des -massenstroms sowie des -gedrucks der Abgasanlage ohne TEG im Motorkennfeld (Ausgangsdaten der Interpolation basieren auf dynamischen Simulationenwerten)

Aus der Abbildung 2-2 wird anhand der inhomogenen Konturflächen der dreidimensionalen Polynominterpolation ersichtlich, dass ein Fernverkehr-NFZ ein nicht kontinuierliches Betriebsverhalten aufweist. Dies lässt eine TEG-Auslegung unter dynamischen Randbedingungen unabdinglich erscheinen. Die Abgastemperatur im Motorkrümmen (a) ist verhältnismäßig konstant hoch, im Mittel rund 800°C über dem gesamten Motorkennfeld. Die Abgastemperatur am Ausgang der AGN (b) zeigt eine erwartbare Lastabhängigkeit auf. Höchstwerte im Bereich der Vollastkurve sind nicht erkennbar. Dies ist durch die Funktion der AGN begründet, die zu einer Homogenisierung der Abgastemperaturen führt. Beim Abgasmassenstrom in (c) ist die Lastabhängigkeit deutlich erkennbar. Für die Fernverkehrsstrecke sind mit maximalen Abgasgegendrücken (d) von bis zu 150 mbar, bei Messung am Ausgang des Turboladers, für die nachfolgende Abgasanlage zu rechnen.

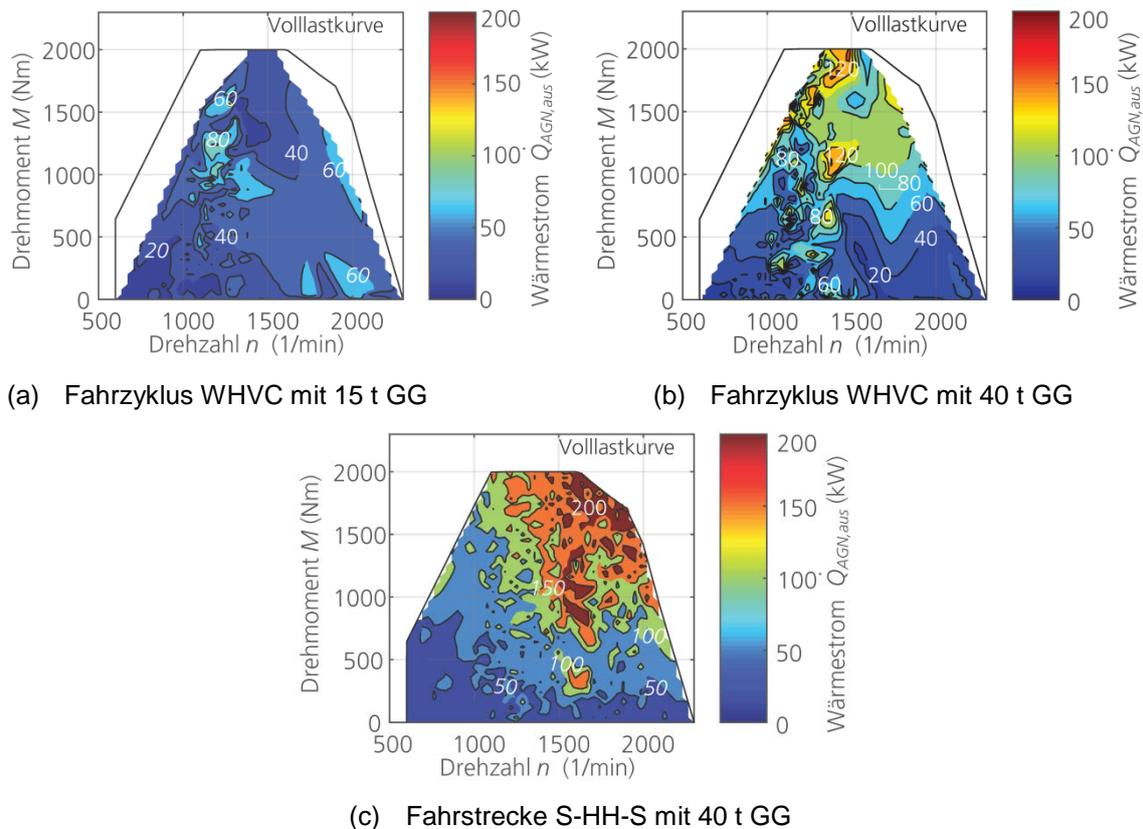


Abbildung 2-3 Potentialanalyse anhand der verfügbaren Wärmeströme $\dot{Q}_{Ag,AGN}$ am Ausgang der Abgasnachbehandlung (AGN) im Motorkennfeld
(Ausgangsdaten der Interpolation basieren auf dynamischen Simulationenwerten)

Der Kraftstoffverbrauch ist lastabhängig, d. h. abhängig von der angeforderten Antriebsleistung. Für höhere Lastanforderungen, wie z. B. bei maximaler Fahrzeugbeladung, anspruchsvollen Geländeprofil oder bei hohen Geschwindigkeiten wird mehr Kraftstoffenergie benötigt, die abhängig vom Fahrzeuggesamtwirkungsgrad zu höheren Abgasenthalpien und folglich höheren nutzbaren Wärmeströmen führt. In Abbildung 2-3 werden die Wärmeströme exemplarisch für den Fahrzyklus WHVC mit 15 t GG (a) bzw. 40 t GG (b) und für die Realfahrstrecke SHHS mit 40 t GG (c) dargestellt. Anhand dieser Fahrscenarien ist die oben erwähnte Steigerung der erforderlichen Antriebsleistungen und damit auch der verfügbaren Wärmeströme ersichtlich.

Als Zusammenfassung der Ergebnisse der Potentialanalyse dient Tabelle 2-6. Anhand der Indexbezeichnung werden die mittleren (m) und maximalen (max) Betriebspunkte sowie der Beladungszustand für den jeweiligen Fahrzyklus bzw. die -strecke

gekennzeichnet. Anhand der im Vergleich zu Diesel-NFZ, hohen Abgastemperaturen $\vartheta_{AGN,aus}$ mit mehr als 500 °C als Mittelwert, müssen für einen effizienten TEG-Einsatz hochtemperaturstabile TEM, wie beispielsweise Skutterudite, zum Einsatz kommen. Weitere detaillierte Ergebnisse sind für den WHVC dem Anhang unter Abbildung 5-1 und Abbildung 5-2 zu entnehmen.

Tabelle 2-6 Übersicht der definierten Betriebspunkte (BP) für die TEG-Auslegung

BP	Bezeichnung	Abgas- temperatur $\vartheta_{AGN,aus}$ (°C)	Abgas- massenstr. \dot{m}_{Ag} (kg/h)	Abgas- wärmestr.* $\dot{Q}_{AGN,aus}$ (kW)	Abgas- exergiestr.* $\dot{E}_{AGN,aus}$ (kW)	Kühlmittel- temp. $\vartheta_{KM,ein}^{*2}$ (°C)	Kühlmittel- vol.-str. \dot{v}_{KM}^{*2} (dm ³ /s)
1.1	WHVC _{15 t,m}	609	207	33,1	21,9	50	0,3
1.2	WHVC _{15 t,max}	659	564	96,2	64,8	43	0,4
2.1	WHVC _{40 t,m}	652	351	63,6	43,9	52	0,3
2.2	WHVC _{40 t,max}	710	776	169,4	118,0	46	0,4
3.1	SHHS _{40 t,m}	676	490	94,5	65,2	54	0,4
3.2	SHHS _{40 t,max}	743	1284	275,3	195,8	58	0,6

* im Bezug zur Umgebungstemperatur $\vartheta_U = 20$ °C

*2 Angaben für den berücksichtigten Niedertemperatur-Kühlmittelkreislauf (NT-KMK)

Neben den thermodynamischen sollten auch die geometrischen Randbedingungen für das Integrationskonzept berücksichtigt werden. In Abbildung 2-4 ist der äußere einsehbare Bereich der Abgasanlage der Sattelzugmaschine dargestellt. Das Referenzfahrzeug ist mit einem Drei-Wege-Katalysator ausgestattet. Wie erwähnt, sollte der TEG am Ausgang der AGN positioniert werden. Dabei kamen zwei Positionen in Frage. Erstens direkt hinter der AGN, also zwischen AGN und Endschalldämpfer und zweitens hinter dem Endschalldämpfer. In beiden Fällen könnte dieser wahrscheinlich kleiner dimensioniert werden, da der TEG einen Teil der Funktion übernimmt. Die Positionierung ist damit in erster Linie von der erforderliche Baugröße des TEG abhängig, was dem Ergebnis der gesamtsystemischen TEG-Simulation zu entnehmen ist. Falls der TEG derart groß ausfällt, dass nur die Integration nach dem Endschalldämpfer erfolgen kann, ist mit hoher Wahrscheinlichkeit einseitig das Tankvolumen zu reduzieren. Die Analyse der Bauraumuntersuchung hat gezeigt, dass in erstgenannter Position (zwischen den Längsträgern) ein Volumen von maximal:

550 x 360 x 360 mm³ bzw. in zweitgenannter Position (außerhalb des Längsträgers) ein Volumen von maximal: 750 x 800 x 600 mm³ zur Verfügung steht.

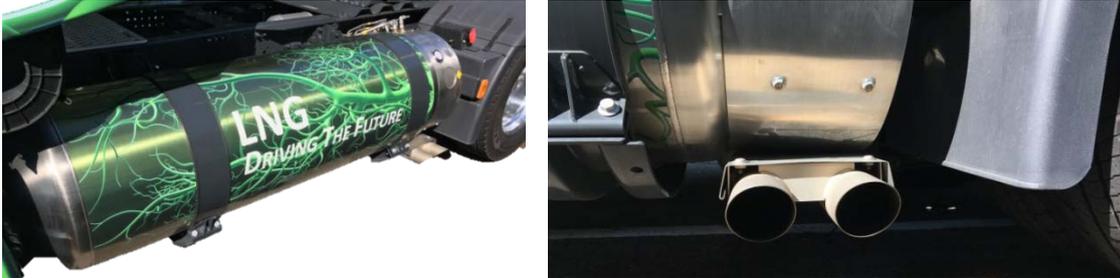


Abbildung 2-4 Detailabbildungen der Fahrzeug- und Bauraumbegutachtung im Bereich der Abgasanlage des IVECO Stralis NP460 LNG

2.3 AP 3: Simulative Gesamtsystemwechselwirkungen

In diesem Abschnitt werden Arbeitsinhalte in Kürze beschrieben. Weitere detailliertere Ergebnisdarstellungen sind dem Anhang in Kapitel 5 zu entnehmen.

2.3.1 Motor und Abgasnachbehandlung

Ziel des Arbeitspaketes ist es, ein Strömungsmodell für einen ausgewählten Gasmotor aufzubauen, anschließend ein Abgasnachbehandlungssystem entsprechend des Betriebskonzepts des Motors abzubilden und das gesamte Gaspfadsystem virtuell darzustellen. Das heißt, Modellierungen und Abstimmungen erfolgen ohne konkrete Messdaten am Motor- und Komponentenprüfstand, sondern mit den beim FKFS Institut vorliegenden Erfahrungswerten und Vorkenntnissen für Motorentechnik.

Auslegung des Luft- und Kraftstoffpfads

Die grundlegende Auslegung des Luft- und Kraftstoffpfads des Verbrennungsmotors stammt von einem Nutzfahrzeugdieselmotor mit Modellbezeichnung D2676 der Firma MAN. Die Modellierung des Strömungsmodells des Motors erfolgt anhand der Anpassung des Luft- und Kraftstoffpfads vom zuvor genannten Modell. Der zweite Schritt der Modellierung umfasst die Abstimmung des Brennverlaufs des Motors. Zur Beschreibung des Brennverfahrens des Motors wird das auf phänomenologischen Ansätzen beruhende Verbrennungsmodell durch Verwendung des Plug-In Moduls „FkfsUserCylinder“[®] erarbeitet. Schließlich wird der Turbolader an das Motormodell angepasst. Ein Modell des Turboladers wird mit Hilfe der Skalierungsmethoden aufgestellt, die beim FKFS Institut bereits vorhanden sind. Die Modellierung des Motors wird komplett in der Softwareumgebung von GT-Power der Firma Gamma Technologies (GT) durchgeführt.

Im Rahmen dieses Projektes wird ein 6-Zylinder-Nutzfahrzeug-Gasmotor in Reihenanordnung mit Modellbezeichnung Cursor-13 von der Firma FPT Motorenforschung AG (Iveco Motorenforschung vor dem Jahr 2012) als Untersuchungsträger ausgewählt (vgl. Tabelle 5-1 und Abbildung 5-3 im Anhang). Der Motor verfügt über eine Saugrohreinspritzung und ist fremdgezündet. Ein einstufiger Abgasturbolader mit einem geregelten Abgasbypassventil (Wastegate) wird zur Aufladung des Motors eingesetzt. Der Motor wird im gesamten Betriebsbereich stöchiometrisch ($\lambda = 1$) und ohne Abgasrückführung (AGR) betrieben. Ein Drei-Wege-Katalysator wird bei dem Motor nachgeschaltet und ermöglicht eine gleichzeitige Reduzierung aller Schadstoffemissionen. Zusammenfassend wurden folgende Schritte vorgenommen, um die Modellbildung zu realisieren:

- Anpassung des Luft- und Kraftstoffpfads
- Abstimmung des Brennverlaufs
- Modellierung des Abgasturboladers mit einer Skalierungsmethode

Modellierung des Abgasnachbehandlungssystems

Da der für die Untersuchung zur Verfügung stehende Cursor-13-Gasmotor mit $\lambda = 1$ betrieben wird, ist ein Drei-Wege-Katalysator für die Abgasreinigung ausreichend. Dieser besteht aus einem metallischen Gehäuse, in dem auf Quell- oder Fasermatten ein keramischer oder metallischer Träger bruchstabil gelagert ist. Der Träger – auch als Substrat bezeichnet – muss sehr hohe Anforderungen bezüglich mechanischer und thermischer Festigkeit erfüllen. Er verfügt im Querschnitt hauptsächlich über eine runde, ovale oder rechteckige Form. Der Träger wird in axialer Richtung von einer großen Anzahl kleiner, dünnwandiger so genannter Wabenkanäle durchzogen, die entweder eine runde, dreieckige, rechteckige oder sechseckige Gestalt aufweisen.

Die Modellierung des Drei-Wege-Katalysators erfolgt mit einer 1D-Oberflächen-Reaktion-Methode. In der Literatur existiert eine Vielzahl an Modellen, die das komplexe Reaktionsschema eines Drei-Wege-Katalysators beschreiben. Einen Überblick über die verschiedenen Reaktionsmodelle liefert [5]. Im vorliegenden Bericht wird das Modell aus dem Tutorial von GT-Power, das auf eine Veröffentlichung von Holder [6] bezogen ist, als Basismodell übernommen. Bei der Abstimmung des Modells werden die Reaktionsmechanismen im Basismodell, das ursprünglich für Benzinbetrieb eingesetzt

wurde, nach den Anforderungen für die Anwendung des Katalysators für Gasmotoren entsprechend angepasst.

Die Informationen über Geometrie, Materialien und Struktur des Katalysators, die für die Modellierung benötigt werden, kommen aus den beim FKFS vorliegenden Erfahrungswerten. Das Modell des Drei-Wege-Katalysators wird über eine Schnittstelle mit dem Luft- und Kraftstoffpfadmodell verbunden. Die Schnittstelle ermöglicht den Einsatz unterschiedlicher numerischer Solver in einem Modell, um die Berechnung mit chemischen Reaktionen zu beschleunigen. Die Druckverluste im Katalysator werden an denen im Partikelfilter von einem Diesel-NFZ durch Einsatz des Multipliers für Druckverluste angepasst.

Simulationsergebnisse in Motorenkennfeldern

In Abbildung 2-5 werden die Simulationsergebnisse des Modells für den Verbrennungsmotor für die Kraftstoffverbräuche und Rohemissionen dargestellt. Obwohl das Modell nur aus Erfahrungswerten und abgeschätzten Daten erstellt wurde, gibt es grundsätzlich Ergebnisse mit plausiblen Größenordnungen aus und kann das Motorverhalten qualitativ beschreiben.

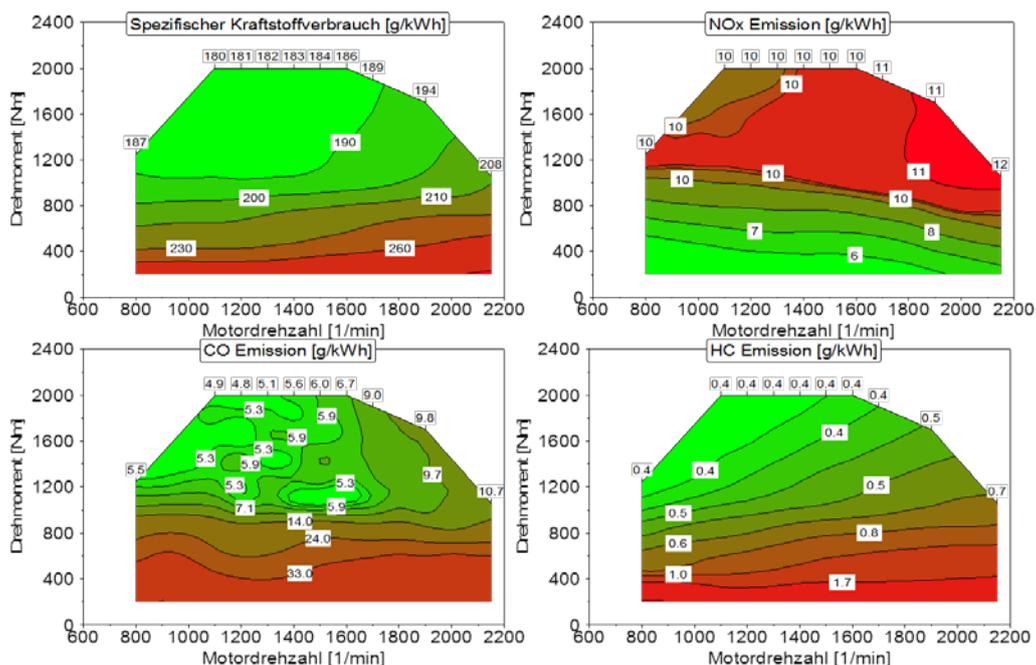


Abbildung 2-5 Simulationsergebnisse für Kraftstoffverbrauch und Rohemissionen in Abhängigkeit von Motordrehzahl und -drehmomenten

Weitere Ergebnisse der Abgastemperaturen und -massenströme, I_K -Wert (Klopfgrenze) und Druckverluste im Drei-Wege-Katalysator, in Abhängigkeit der Motordrehzahl und des Drehmoments sind im Anhang in Abbildung 5-4 dargestellt.

Simulative Untersuchung für Emissionen und Einfluss der Druckverluste auf den Kraftstoffverbrauch

Seit dem Jahr 2013 werden der World Harmonized Stationary Cycle / World Harmonized Transient Cycle (WHSC / WHTC) als gesetzliche Testzyklen für die Prüfung der Abgasemissionen von SNFZ angewendet. Die nach den gesetzlich vorgeschriebenen Prozeduren bestimmten WHSC-Betriebspunkte sind dem Anhang in Abbildung 5-5 und Tabelle 5-2 und zu entnehmen. Eine Simulation mit den transienten Berechnungen des thermischen Verhaltens, d. h. die zeitliche Änderung der Abgastemperaturen im Drei-Wege-Katalysator wurde durchgeführt. Es zeigte sich, dass das Modell des Drei-Wege-Katalysators gut funktioniert und der Motor mit dem nachgeschalteten Abgasnachbehandlungssystem die gesetzlichen Anforderungen an den Emissionen erfüllen kann. Für Details wird auf die Abbildung 5-6 im Anhang verwiesen. In der Darstellung werden die gesetzlichen Grenzwerte für Abgasemissionen in schwarzer Schrift angegeben. Die Werte in roter Schrift stellen die Simulationsergebnisse dar und werden anhand der Richtlinien für die Berechnung der Abgasemission im WHSC kalkuliert.

Der TEG soll die Abgastemperatur nach dem Abgasnachbehandlungssystem nutzen. Dabei soll die Funktionsweise des Katalysators nicht beeinträchtigt werden. Die auftretenden Abgastemperaturen in der Abgasstrecke in den WHVC-Betriebspunkten sind dem Anhang in Abbildung 5-7 zu entnehmen. Es ist zu sehen, dass die Abgastemperaturen am Auslass des Katalysators bei einigen Betriebspunkten höher als die vor dem Katalysator sind. Dies ist auf die exothermen Reaktionen im Katalysator zurückzuführen. Bei der Simulation wurde ein Abgasrohr mit einer Länge von 60 cm aus Karbonstahl nach dem Katalysator eingesetzt. Die blauen Balken in der Darstellung stellen die Abgastemperatur am Ende dieses Abgasrohres dar. Die Integration des TEG nach dem Katalysator ist vorteilhaft, da der Einfluss auf die AGN als vergleichsweise gering eingeschätzt wird und die verfügbaren Temperaturen je nach Last- bzw. Betriebspunkt höher sein können.

Das TEG-System in der AGN ruft einen zusätzlichen Abgasgegendruck aufgrund der verwendeten Wärmeübertragerstruktur hervor. Um das Abgas von dem Motorzylinder gegen den erhöhten Abgasgegendruck auszuschieben, muss mehr Kraftstoff in den Zylinder eingespritzt und eine extra Leistung zur Überwindung der Ladungswechselverluste angebracht werden. Dies führt vorerst zu steigenden Kraftstoffverbräuchen. Um den Einfluss des erhöhten Abgasgegendrucks auf den Kraftstoffverbrauch qualitativ darzustellen, werden Simulationen mit den, dem Motormodell vorgegebenen zusätzlichen Abgasgegendrücken bei den WHSC-Betriebspunkten durchgeführt. Durch den Wärmeentzug des Abgases beim Einsatz des TEG steigt die Dichte des Gases an. Dies führt dazu, dass sich die Strömungsgeschwindigkeit des Abgases verlangsamt und damit der Druckverlust in den nachfolgenden Komponenten der Abgasanlage gegenüber demselben Betriebspunkt ohne Wärmeentzug sinkt. Deshalb herrschen zusätzliche Abgasgegendrücke, die dem Modell vorgegeben werden, mit positiven (bis 300 mbar) als auch negativen Werten (bis -100 mbar). Die ausführlichen Simulationsergebnisse sind dem Anhang in Abbildung 5-8 und Abbildung 5-9 zu entnehmen. Es ist zu sehen, dass der spezifische Kraftstoffverbrauch mit dem zunehmenden Abgasgegendruck tendenziell linear ansteigt. Die minimalen Schwankungen der Kurven sind auf die geringfügigen Änderungen des Lambdawertes im Abgas zurückzuführen. Allerdings funktioniert die Lambda-Reglung in dem Modell grundsätzlich gut. Die geringfügigen Schwankungen des Lambdawertes können von den numerischen Lösern, die gleichzeitig im Modell eingesetzt werden, verursacht werden.

2.3.2 Motorkühlung

Die Kühlung des TEG erfolgt mit dem Kühlmedium aus dem Motorkühlsystem und ist unerlässlich für die Funktion des TEG. Das Ziel dieses Teilarbeitspaketes ist es, die möglichen Integrationen des TEG in das Motorkühlsystem und die Kühlungspotentiale des Kühlsystems für TEG-Anwendung mit Hilfe von 1D-Simulation darzustellen.

Aufbau des Kühlsystems

Im Rahmen des Projektes stehen keine Messdaten bzw. Informationen über den Kühl- und Ölkreislauf des Cursor-13-Gasmotors zur Verfügung. Des Weiteren ist das Ziel der Untersuchungen, die Kühlungspotentiale eines allgemeinen Nutzfahrzeugkühlsystems

für TEG-Anwendung qualitativ darzustellen. Es wurde deshalb beschlossen, das Kühlsystem des Cursor-13-Gasmotors von dem vorhandenen Kühlsystem des MAN-Dieselmotors abzuleiten. Mit Berücksichtigung von dem Motorkonzept des Cursor-13-Gasmotors sind einige Änderungen bei der Kühlsystemkonfiguration vorzunehmen. Als erstes wird der Cursor-13-Gasmotor mit dem einstufigen Abgasturbolader mit dem geregelten Bypassventil aufgeladen. Im Vergleich zu dem MAN-Dieselmotor mit einer zweistufigen Aufladung wird nur ein Ladeluftkühler benötigt. Außerdem entfällt der beim MAN-Dieselmotor eingesetzte AGR-Kühler, da der Cursor-13-Gasmotor ohne AGR betrieben wird. Der Aufbau des Kühlsystems für den Motor wird in Abbildung 2-6 gezeigt und die im Rahmen des Projektes entwickelten Verschaltungspositionen dargestellt.

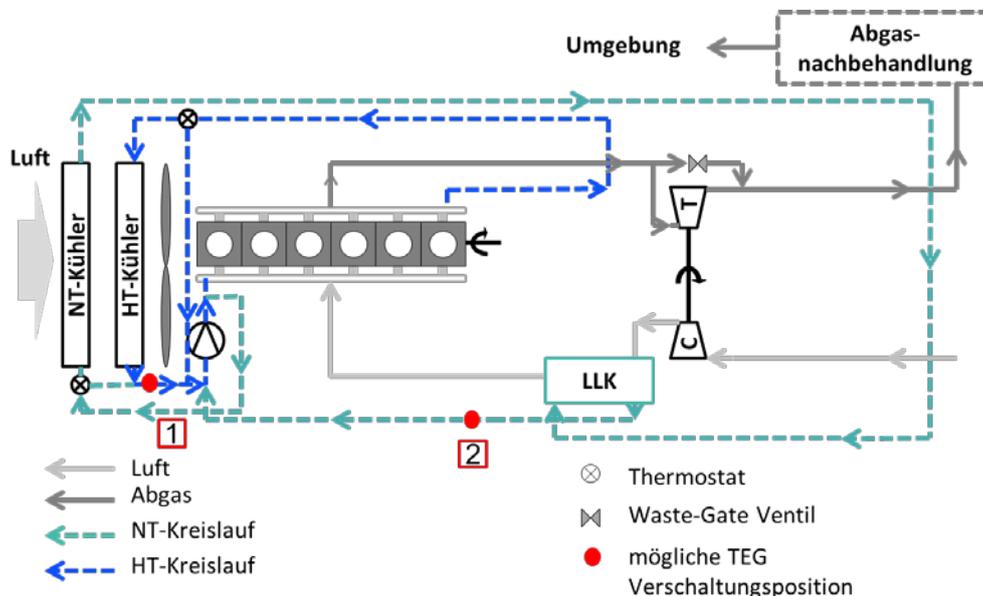


Abbildung 2-6 Aufbau des angepassten Kühlsystems für Cursor-13-Gasmotor

Das Kühlsystem verfügt über einen Hochtemperatur-Kreislauf (HT-Kreislauf) mit einem Hochtemperaturkühler, der zur Kühlung des Verbrennungsmotors dient und einen Niedrigtemperatur-Kreislauf (NT-Kreislauf) mit einem Niedrigtemperatur-Kühler, der zur Kühlung der verdichteten Frischluft eingesetzt wird. Als Komponente für das Thermomanagement werden zwei Thermostate, eine Kühlmedienpumpe und ein Lüfter bei dem Kühlsystem eingesetzt. Die Thermostate steuern die Kühlmedienmassenströme durch den Hoch- und Niedrigtemperatur-Kühler, um die eingestellten Kühlmedientemperaturen zu halten. Während der Warmlaufphase wird das Thermostat

im Hochtemperatur-Kreislauf geschlossen, um den Verbrennungsmotor schnellstmöglich aufzuwärmen. Die Kühlmedienpumpe wird von dem Motor mechanisch betrieben und hat ein festes Übersetzungsverhältnis zwischen Pumpen- und Motordrehzahlen. Die Aufgabe des Fahrzeuglüfters ist es, bei mangelnder Kühlleistung der Kühler, z. B. bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten des Fahrzeugs oder Bergfahrt mit maximaler Zuladung, die Luftmassenströme durch den Kühler zu erhöhen. Der Lüfter wird von dem Motor über eine Visco-Kupplung mit variierenden Übersetzungsverhältnissen betrieben. Das gesamte Thermomanagement hat die Funktion, die optimalen thermischen Zustände des Verbrennungsmotors bei den variierenden Fahrgeschwindigkeiten und Umgebungstemperaturen zu gewährleisten.

Kühlsystemmodell des Cursor-13-Gasmotors

Das für den Cursor-13-Gasmotor angepasste Kühlsystem wird in GT-Suite anhand von einer 1D-Methode (Finite Volumen Methode) modelliert. Das Kühlsystem verfügt über 18 l von Ethylene-Glykol-Wasser Vol. 50/50 gemischtem Kühlmittel. Der Hochtemperaturkühler kann 240 kW Wärme bei dem Auslegungspunkt, der bei Nenndrehzahl des MAN-Dieselmotors liegt, mit einer minimal erforderlichen Kühlmittelumlaufmenge von 390 l/min abführen. Der Niedrigtemperatur-Kühler kann bei dem gleichen Betriebspunkt 106 kW Wärme mit einer minimal erforderlichen Kühlmittelumlaufmenge von 45 l/min abführen. Die Modelle der beiden Kühler werden für das Kühlsystem des Cursor-13-Gasmotors unverändert eingesetzt. Um das bestehende Kühlsystem dem Cursor-13-Gasmotor anzupassen, wird vor allem die Motorstruktur ähnlich wie bei dem Modell des Luft- und Kraftstoffpfads geändert. Anschließend werden die Berechnungsergebnisse der Wärmebilanz, die in Abbildung 2-7 dargestellt werden, bei dem Kühlsystemmodell eingesetzt. Diese Berechnungsergebnisse dienen zur Charakterisierung der thermischen Interaktion des Brennraums mit den ihn umgebenden Wänden und werden als Kennfelder im Kühlsystemmodell hinterlegt.

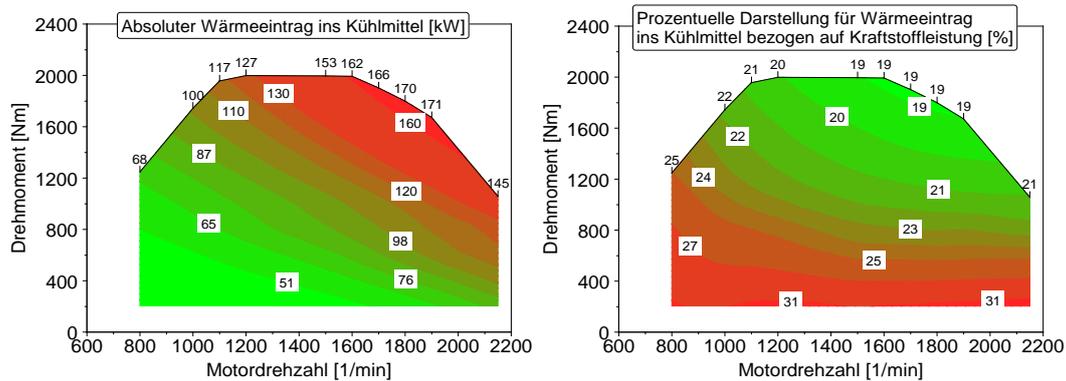


Abbildung 2-7 Wärmebilanzkennfeld in Abhängigkeit von Motordrehzahl und -drehmoment aus Simulationsergebnissen mit dem Modell von Luft- und Kraftstoffpfad. Links: Absolute Wärmeinträge ins Kühlmittel in kW; Rechts: Prozentueller Wärmeeintrag ins Kühlmittel bezogen auf Kraftstoffleistung in %

Durch den Einsatz des angepassten Modells des Kühlsystems von dem Cursor-13-Gasmotor können die Kühlungspotentiale bei den variierenden Betriebspunkten numerisch untersucht werden. Voraussetzung für die Untersuchungen ist, dass die Wärmeabfuhr vom TEG ins Kühlsystem keine zusätzlichen Leistungen des Fahrzeuglüfters hervorrufen soll. Deshalb wurde zuerst eine Simulation für das Kühlsystem mit Grundauslegung durchgeführt, um das Übersetzungsverhältnis zwischen Motor- und Lüfterdrehzahlen zu berechnen. Die Ergebnisse dieser Simulationen sind im Anhang in Abbildung 5-11 für drei verschiedene Fahrgeschwindigkeiten dargestellt.

Untersuchung der Kühlungspotentiale des Kühlsystems im Hinblick auf TEG-Anwendung

Da das Motorkühlsystem auf extreme Fahrzustände, wie z.B. Bergfahrten mit kleineren Fahrgeschwindigkeiten bei maximaler Zuladung, ausgelegt ist, besteht in den meisten Fahrsituationen Potential zur zusätzlichen Wärmeabfuhr. Diese Kühlungspotentiale bei den verschiedenen Betriebspunkten können für TEG-Anwendungen ausgenutzt werden. Um die Potentiale der Wärmeabfuhr vom TEG ins Kühlsystem und die damit hervorgerufenen Einflüsse auf thermische Zustandsänderung des Motorkühlsystems darzustellen, werden in diesem Abschnitt unterschiedliche Integrationskonzepte mit Hilfe des angepassten Modells des Kühlsystems, das im vorherigen Abschnitt vorgestellt wurde, untersucht.

Das Kühlsystem des Motors verfügt über drei Kreisläufe: Kurzkreislauf, Hochtemperatur-Kreislauf und Niedrigtemperatur-Kreislauf. Der Kurzkreislauf wird in Kombination mit dem Thermostat im Hochtemperatur-Kreislauf sowohl zum Warmlauf des Motors als auch zur Einstellung der Temperatur der Motorstruktur beim Warmbetrieb verwendet. Der Kurzkreislauf wird in die Motorstruktur integriert und ist für die TEG-Anwendung nicht geeignet. Für die Integration des TEG ins Motorkühlsystem stehen dennoch Hoch- und Niedrigtemperaturkreisläufe zur Verfügung. Nach Detailuntersuchungen, die im Zwischenbericht I enthalten sind, werden zwei mögliche Integrationspositionen des TEG ins Kühlsystem festgelegt, die in Abbildung 2-6 mit den roten Punktmarkierungen gekennzeichnet sind. Die Wärmeabfuhr $\dot{Q}_{Zu_Potential}$ vom TEG in den Kühlkreislauf kann prinzipiell nach Gleichung (4) des Anhanges berechnet werden.

Untersuchung der Kühlungspotentiale mittels Simulation

Bei den folgenden Berechnungen der Kühlungspotentiale werden die Übersetzungen des Lüfters vorgegeben. Die Kühlungspotentiale des Kühlsystems mit Integration des TEG werden anschließend bei der Verschaltungsmöglichkeit 1, d.h. Verschaltung des TEG nach dem HT-Kühler (vgl. Abbildung 2-6), berechnet. Dabei wird die Kühlmitteltemperatur am Motorauflaus von 91 °C als Zielwert eingesetzt, d. h. die Wärme wird dem Kühlsystem zugeführt, bis die Kühlmitteltemperatur am Motorauflaus 91 °C erreicht. Außerdem wird noch eine Beschränkung bei der Simulation angegeben, dass die Kühlmitteltemperatur der Rohrstücke direkt nach der Wärmezufuhr 100 °C nicht überschreiten darf. Die Ergebnisse der Simulationen werden in Abbildung 2-8 dargestellt.

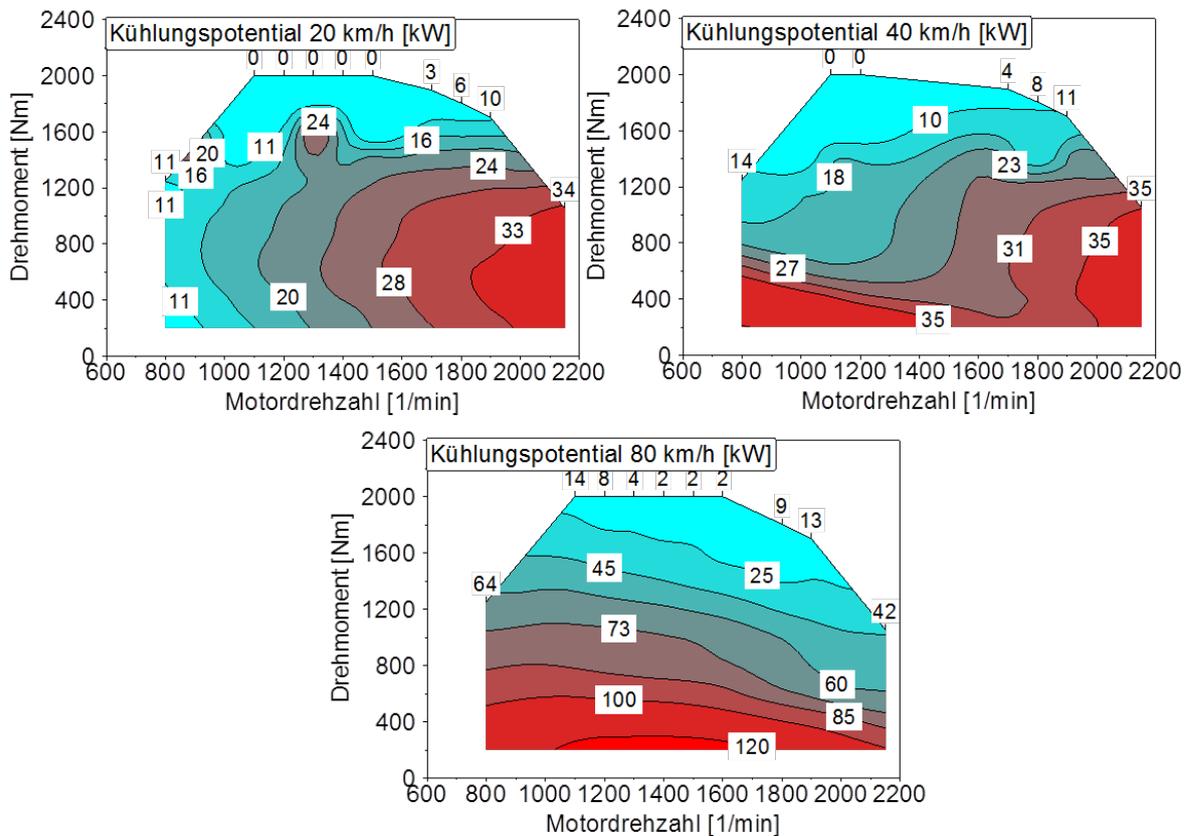


Abbildung 2-8 Simulationsergebnisse für Kühlungspotentiale des Kühlsystems bei Verschaltung des TEG nach dem HT-Kühler mit Kühlmitteltemperatur am Motorauslass von 91 °C als Zielgröße bei den verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten unter Umgebungstemperatur von 20 °C

Die Simulationsergebnisse des Kühlungspotentials des Kühlsystems für die gleiche Integrationsposition des TEG, jedoch mit der Kühlmitteltemperatur am Motorauslass von 100 °C als Zielwert, sind dem Anhang in Abbildung 5-11 zu entnehmen. In der folgenden Abbildung 5-12 sind die Ergebnisse der Berechnung der Kühlungspotentiale des Kühlsystems bei Verschaltung des TEG nach dem Ladeluftkühler im NT-Kreislauf, Integrationsposition 2 (vgl. Abbildung 2-6), dargestellt.

Die Kühlungspotentiale des Kühlsystems bei den kleinen Fahrgeschwindigkeiten sind tendenziell abhängig von den Motordrehzahlen aufgrund des Betriebs des Lüfters. Mit steigenden Fahrgeschwindigkeiten hängen die Kühlungspotentiale stärker von den Motorlasten ab.

Eine weitere Simulation für Konstantfahrten auf der Ebene des 40 t-NFZ mit Cursor-13-Gasmotors für den 12. Gang, beruhend auf den bekannten Informationen über das Fahrzeug und die beim FKFS vorliegenden Erfahrungswerte für NFZ (vgl. Tabelle 5-3 im Anhang), wurde durchgeführt. Abbildung 2-9 zeigt beispielhaft die maximal zulässige Wärmeabfuhr des TEG ins Kühlsystem für die oben erläuterten Verschaltungsvarianten.

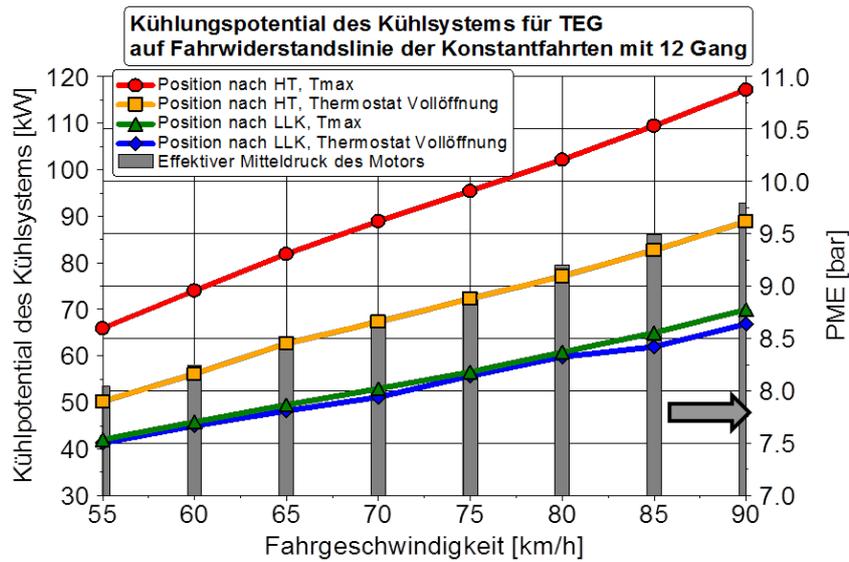


Abbildung 2-9 Maximal zulässige Wärmeabfuhr des TEGs ins Kühlsystem bei Konstantfahrten auf der Ebene beim NFZ mit Cursor-13-Gasmotor für unterschiedliche Integrationspositionen des TEG (12.Gang, Fahrzeugmasse mit Zuladung 40 t, Umgebungstemperatur 20 °C)

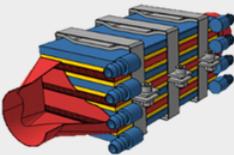
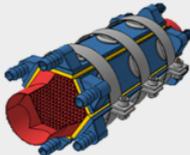
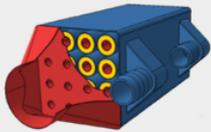
2.4 AP 4: Konstruktive TEG-Auslegung

2.4.1 Methodische Konzept- und Lösungsfindung

Zur Auslegung eines TEG im neuen Anwendungsgebiet muss zunächst die Konzeption der Bauweise festgelegt werden. Die Möglichkeiten der Gestaltvariation zeigt Tabelle 2-7. Aufgrund des geringen Vorerfahrungsstandes in NFZ-Anwendungen und der großen Unterschiede bei der Vorgehensweise des Stands der Technik, wie in Kapitel 2.1 aufgezeigt, war eine Vorstudie erforderlich.

Als Ergebnis von dieser erschien die Rohrbündelbauweise aufgrund des geringen Wirkungsgrades, der Problemstellungen bei der Thermomechanik und der hohen Systemkosten für NFZ-Anwendungen ungeeignet. Die Stapelbauweise bietet Vorteile anhand des Bewertungskriteriums des Kosten-Nutzen-Verhältnisses gegenüber der polygonalen Bauweise. Letztgenannte Bauweise kann unter spezifischen Randbedingungen einen besseren Nutzen anhand der Brutto- und Nettoleistung erbringen, jedoch wird dieser durch die deutlich höheren Kosten negiert. Aus diesem Grund wurde die weitere Entwicklung auf Grundlage der Stapelbauweise durchgeführt.

Tabelle 2-7 Übersicht konventioneller TEG-Konfigurationen, Abbildungen aus [7]

	Stapelbauweise	Polygonale Bauweise (z.B.Hexagon)	Rohrbündelbauweise
Beispiel- abbildung (Häfele 2016)			
Forschungs- anwendung	PKW, NFZ	PKW, NFZ	PKW, NFZ
Wärme- übertrager- Bauweise	Platten- Rippenwärmetauscher	Waben- oder Drallflossen- bzw. Rippenwärmetauscher	Rohrbündel bzw. Rippenwärmetauscher
Thermoelekt- rische Modul- bauweise	flächig	flächig	ringförmig

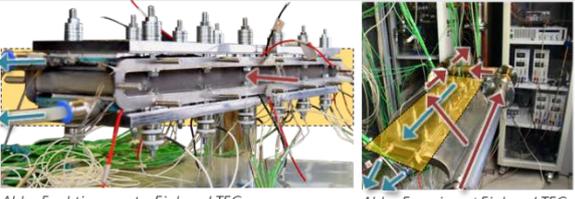
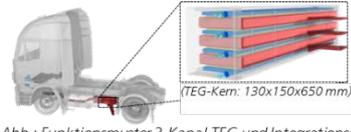
Für den TEG-Einsatz in der Anwendung im SNFZ sind die Systembauteile, wie beispielsweise die Wärmeübertrager (WÜ), zu dimensionieren. Als Machbarkeitsstudie

und als Prüfung der Funktion der Bauweise in der SNFZ-Dimension und zur Validierung der TEG-Simulationen ist ein Funktionsmuster im Rahmen einer Vor- bzw. Validierungsstudie erforderlich.

2.4.2 Validierungsstudie

Für diese Studie wurde ein Teilaufbau des TEG-Systems als Einkanal-TEG, d. h. ein Heißgas- (HGWÜ) und entsprechend zwei Kühlmittelwärmeübertrager (KMWÜ), auf Basis der ganzheitlichen Simulation ausgelegt. Kommerziell verfügbare Thermoelektrische Module (TEM) der Materialklasse SnSe wurden verwendet. Die Ergebnisse der Validierungsstudie sowie das resultierende Kosten-Nutzen-Optimum des 3-Kanal-TEG-Aufbaus, integriert im Referenzfahrzeug, ist in Tabelle 2-8 dargestellt. Das TEG-Design würde unter optimalen Bedingungen im BP_{max} eine elektrische Leistung von bis zu 1510 W liefern bei Stückkosten (hohe NFZ-typische Stückzahl) von 1811 EUR. Selbst unter der theoretischen Annahme, dass dieses TEG-System dauerhaft im BP_{max} betrieben werden würde, würde das System den Kraftstoffverbrauch um nur 0,5 % reduzieren und sich bei dem definierten Einsatzszenario (vgl. Kapitel 2.5.2) erst nach einer deutlich längeren Zeit als 3 Jahren amortisieren. Dieses Ergebnis zeigt, dass die kommerziell verfügbaren Module und deren Auslegung des Standes der Technik nicht geeignet sind, um die Projektziele zu erfüllen und ein ausreichend geringes Kosten-Nutzen-Verhältnis für den NFZ-Einsatz darzustellen. Stattdessen wurden im Projektverlauf speziell für die NFZ-Anwendung entwickelte TEM in Zusammenarbeit mit einem Modulhersteller entwickelt und berücksichtigt.

Tabelle 2-8 Ergebnisse der Voruntersuchung mit kommerziellen TEM anhand der Vorstudie

Bezeichnung	Fz.	Simulation	Experiment	Abbildung
TEM-Material	-	SnTe _{1-x} Se _x	SnTe _{1-x} Se _x	 <p>Abb.: Funktionsmuster Einkanal-TEG Abb.: Experiment Einkanal-TEG</p>
TEM-Anzahl	n_{TEM}	56	56	
el. Leistung ¹	P_{el}	405 W	282,9 W*	
Gegendruck ¹	Δp_{TEG}	22 mbar	25,9 mbar	
Gewicht**	m_{TEG}	6 kg	6,8 kg	
TEM-Anzahl	n_{TEM}	168	-	 <p>Abb.: Funktionsmuster 3-Kanal-TEG und Integrationskonzept im Erdgas-NFZ mit LNG</p>
max. el. Leistung ²	$P_{el\ max}$	1.510 W	-	
Gegendruck ²	Δp_{TEG}	32 mbar	-	
Gewicht**	m_{TEG}	30,2 kg	-	

¹ Randbedingung BP: $\vartheta_{Ag}=550\text{ °C}$, $\dot{m}_{Ag}=300\text{ kg/h}$, $\vartheta_{KM}=85\text{ °C}$, $\dot{m}_{KM}=5\text{ l/min}$.

² Randbedingung BP_{max}: $\vartheta_{Ag}=550\text{ °C}$, $\dot{m}_{Ag}=900\text{ kg/h}$, $\vartheta_{KM}=5\text{ °C}$, $\dot{m}_{KM}=20\text{ l/min}$.

* Abweichung durch geringeren Anpresdruck und aufgrund von Fertigungstoleranzen.

** Angabe für den TEG-Kern ohne Messtechnik.

Legende:

→ Heißgasmassenstrom

→ Kühlmittelvolumenstrom

2.4.3 Dimensionierung

Die Dimensionierung des TEG-Kerns, bestehend aus den Wärmeübertragern mit den TEM und der Verspanneinrichtung, wird durch die Anzahl und Anordnung der Thermoelektrischen Module maßgeblich bestimmt. Bei dem Konzept der Stapelbauweise werden eine Vielzahl an Stapeln aus abwechselnd WÜ und TEM übereinander positioniert und die Position durch eine Vorspannvorrichtung fixiert. Simulationsergebnisse weisen auf ein optimales Kosten-Nutzen-Verhältnis des Systems bei drei TEM-Streifen in Strömungsrichtung (x-Koordinate) hin (vgl. Abbildung 2-24). Als Ergebnis sollen 144 TEM mit der Abmessung von jeweils rund 31x31x3,4 mm³ (vgl. Auswahl Kapitel 2.5) verwendet werden und der Abstand zwischen den Modulen soll jeweils 1 mm betragen. Somit ergibt sich eine aktive Gesamtfläche von rund 95x1525 mm² (Modulfläche von rund 0,14 m²).

Tabelle 2-9 Dimensionierung der TEG-Stapelanzahl

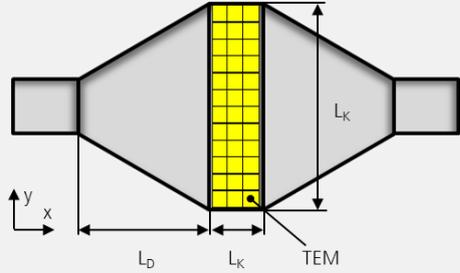
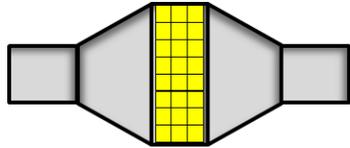
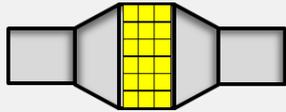
Stapel (-)	L_K (mm)	B_K (mm)	L_D (mm)	Draufsicht (Schnittdarstellung auf Modulebene)
2	94	381	243	
3	94	254	133	
4	94	191	79	

Tabelle 2-9 zeigt eine Auflistung der TEG-Geometrien mit den relevanten Stapelanzahlen 2, 3 und 4 im TEG-Kern und dem Diffusor sowie Konfusor. Das Abgasrohr ist dabei als 4“ Rohr mit einem Durchmesser von etwa 100 mm dargestellt. Nach [8] sollte der Öffnungswinkel eines Diffusors und Konfusors einer Abgasanlage 30° nicht überschreiten. Ansonsten treten Strömungsablösungen auf, welche eine inhomogene Strömungsverteilung bedingen und einen erhöhten Gegendruck erzeugen. Nach dieser Randbedingung sind die Zu- und Ableitungen des Abgases dimensioniert. Es ist die deutliche Verringerung der Baugröße und damit des Volumens des TEG bei einer Erhöhung der Stapelanzahl in der Abbildung erkennbar. Eine geringere Baugröße resultiert in geringerem Platzbedarf und damit auch geringerem Gewicht, sowie erhöhter mechanischer Stabilität. Gleichzeitig bedeutet eine höhere Stapelanzahl jedoch erhöhte Kosten in der Herstellung und Montage des TEG. Die besten Ergebnisse in der Kombination der Einflusskriterien werden mit 3 Stapeln erreicht, die Baugröße ist deutlich geringer als die der Variante mit 2 Stapeln und die Anzahl an Stapeln ist seitens der Fertigungskosten vertretbar.

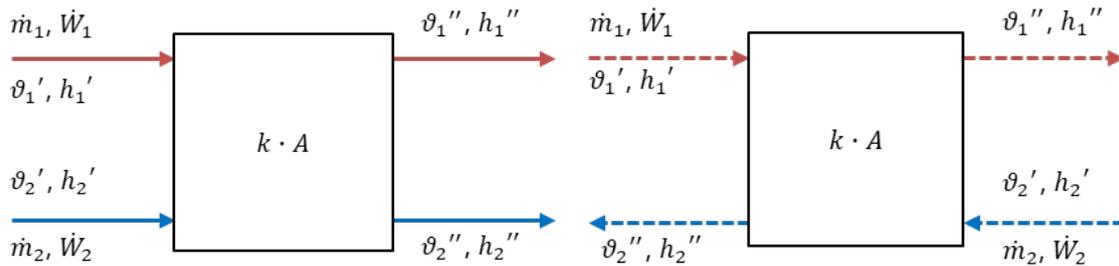
2.4.4 Ergebnisse des Konstruktionsprozesses

Konzeption Wärmeübertrager (WÜ)

Ein TEG besteht zum Großteil aus angeordneten Wärmeübertragern wie in Tabelle 2-7 anhand der rot und blau eingefärbten Bauteile ersichtlich wird. Zur Konzeptionierung und Auslegung des TEG kommt der Ausgestaltung dieser WÜ eine wichtige Rolle zu. Grundsätzlich kommt beim verfolgten Konzeptansatz der Stapelbauweise des DLR eine indirekte Wärmeübertragung mit Platten-Wärmeübertragern der beiden Medien zum Einsatz. Die Strömungsführung der heißen Abgase der Verbrennungskraftmaschine dominiert die Bauweise, die Führung des zweiten Mediums Kühlwasser ordnet sich unter. Im Allgemeinen sollten für eine gute Effizienz der WÜ die Bauteile, welche die Medien trennen, eine gute Wärmeleitfähigkeit und große Oberfläche aufweisen. Für einen guten Wärmeübergang ist eine turbulente Strömung günstig. Diese tritt vor allem bei hohen Reynolds-Zahlen auf. Deshalb sollte die Strömungsgeschwindigkeit hochgehalten werden und die Viskosität der Medien gering sein. Dabei ist zu beachten, dass hohe Geschwindigkeiten und große benetzte Oberflächen auch einen hohen Energieaufwand verlangen, um die Medien durch den Wärmeübertrager zu „pumpen“. Bei den WÜ des TEG kommen zwei unterschiedliche Medien zum Einsatz, eines ist flüssig und eines gasförmig. Daher unterscheiden sich die Wärmekapazitäten je Volumen der Medien stark. Optimalerweise sollte der gasförmige Fluidstrom deutlich größer sein als der flüssige. Die Fläche für den Wärmeübergang sollte auf der Gasseite vergrößert werden. Dies kann beispielsweise durch Rippen erfolgen.

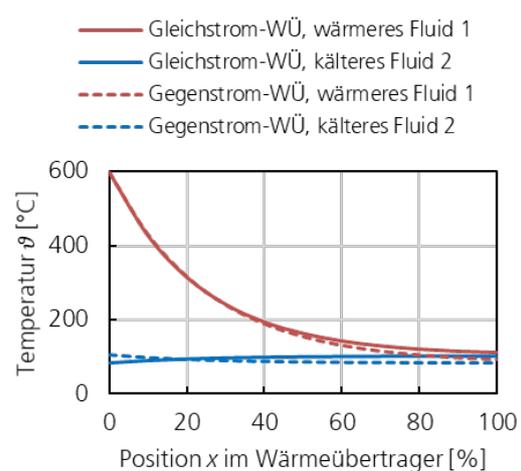
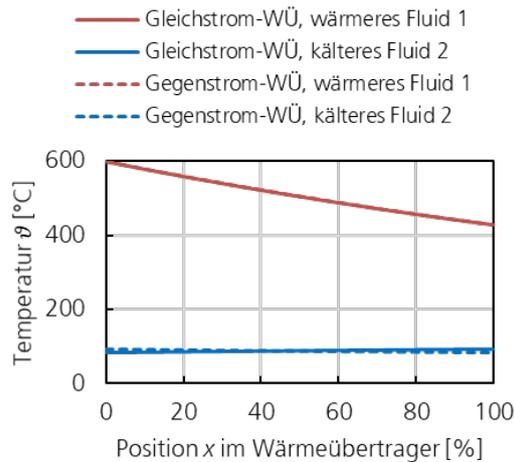
Die Wärmeübertragungsleistung und der dazugehörige η -Wirkungsgrad hängt hauptsächlich vom Wärmedurchgangskoeffizient k sowie der Übertragungsfläche A ab (vergleiche Abbildung 2-10 (a) und (b)). Das Ausmaß der Wärmeübertragung hängt zudem stark von der geometrischen Führung der beiden Stoffströme zueinander ab, die im Folgenden beispielhaft dargestellt wird. Als Grundformen kommen für die Stapelbauweise der Gleich-, Gegen- mit symmetrischem Aufbau und der Kreuzstrom mit asymmetrischem Aufbau in ihrer reinen Form bzw. auch mit Quervermischung in Frage. Der Gegenstrom stellt dabei hinsichtlich der thermischen Leistung die günstigste Stromführung dar, der Gleichstrom die ungünstigste. Der Kreuzstromaufbau liegt abhängig vom gewählten Aspektverhältnis von Länge L zu Breite B zwischen den beiden genannten und wird daher nicht dargestellt. Der Unterschied der Strömungsführung ist

dabei stark abhängig von der Größe der ausgewählten Übertragungsfläche $A_{WÜ}$, wie in Abbildung 2-10 (c) und (d) dargestellt ist. Zudem bezieht sich die Unterscheidung nur auf die thermische und nicht auf die thermoelektrische Auslegung, bei der weitere Kriterien wie elektrische Leistung, Kosten und Gewicht entscheidend sind, was zu einer differenten Auswahl der Strömungsführung führen kann.



(a) Gleichstrom-WÜ

(b) Gegenstrom-WÜ



(c) $A_{WÜ} = 0,1 \text{ m}^2$

(d) $A_{WÜ} = 1 \text{ m}^2$

Abbildung 2-10 Schematische Darstellung eines reinen Gleichstrom- (a) bzw. reinen Gegenstrom-WÜ (b) sowie Fluidströme entlang der Wärmeübertrager bei unterschiedlichen Wärmeübertragerflächen A ((c), (d), Randbedingungen: $\vartheta_1' = 600 \text{ °C}$, $\dot{m}_1 = 350 \text{ kg/h}$, $\vartheta_2' = 85 \text{ °C}$, $\dot{m}_2 = 10 \text{ l/min}$)

Bei Wärmeübertragerflächen ($A_{WÜ} < 0,5 \text{ m}^2$) spielt die Strömungsführung eine untergeordnete Rolle. Da bei den betrachteten Systemspezifikationen die Differenz der übertragenen Wärmeleistung $\Delta\dot{Q}_h < 2 \%$ und die Differenz der mittleren logarithmischen Temperaturdifferenz $\Delta T_m < 2 \text{ K}$ ist. Im Rahmen der Zielsetzung dieses Projektes soll ein

TEG mit hohem Wirkungsgrad entwickelt werden. Aus diesem Grund wird ein Gegenstrom-WÜ für die Systemauslegung ausgewählt.

Funktionsmuster

Abbildung 2-11 zeigt das Funktionsmuster des TEG-Ergebnisdesigns als 3-Kanal-TEG. In (a) ist die Gehäuseform dargestellt. Der Flansch ist mit einer V-Band-Schelle ausgeführt. Das Gehäuse ist um den TEG-Kern und den Diffusor ausgeführt, um – wie in Abschnitt 2.4.3 beschrieben – die axialen thermischen Ausdehnungen durch den Metallbalg in runder Bauform aufnehmen zu können. Die mechanische Steifigkeit des Gehäuses ist außerdem durch Sicken erhöht, um möglichen Schwingungen entgegenzuwirken. Das Funktionsmuster hat zudem beidseitig Wartungsklappen, um Änderungen an der Messtechnik oder weitere Hardware-Konfigurationen ausführen zu können. In (b) ist die gleiche Darstellung mit transparentem Gehäuse illustriert.

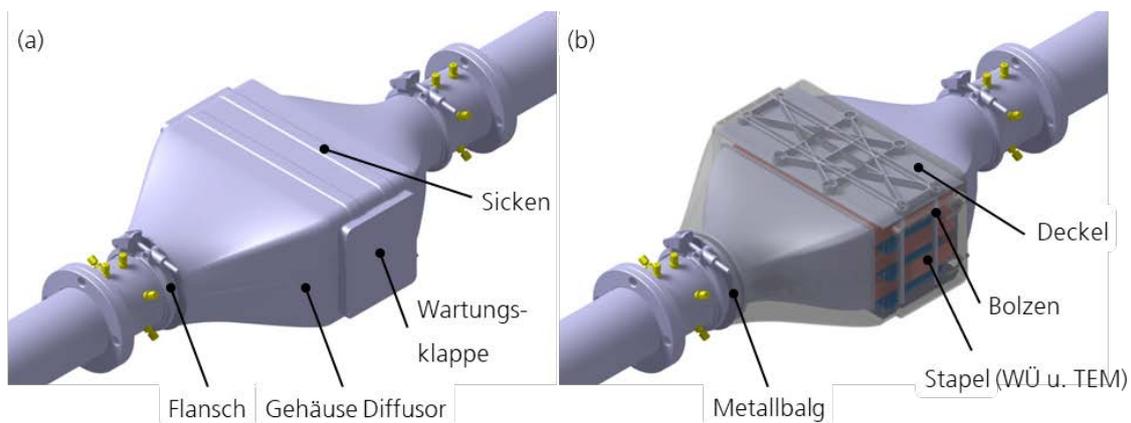


Abbildung 2-11 CAD-Modell des 3-Kanal-TEG-Ergebnisdesigns als Funktionsmuster für die experimentelle Validierung (a) und mit transparenten Gehäusebauteilen (b)

Der Metallbalg ist direkt hinter dem Flansch und vor dem Diffusor erkennbar. Im TEG-Kern sind die drei Heißgas-Wärmeübertrager als Stapel ausgeführt und die insgesamt acht Bolzen sowie der Deckel bringen bei entsprechender Bolzenzugkraft die nötige Flächenpressung auf. Der Deckel hat zur zusätzlichen Versteifung Rippen zwischen den Bolzen und über den TEM. Durch die erhöhte Steifigkeit wird die Anpresskraft gleichmäßiger und somit effizient auf die TEM verteilt. Das Funktionsmuster hat inklusive Wartungsklappen und Diffusor/Konfusor die Abmessungen (Länge/Breite/Höhe): 530 x

355 x 180 [mm]. Es entspricht damit den Anforderungen, die der zur Verfügung stehende Bauraum im Abgasstrang eines Erdgas-NFZ bietet (vgl. Kapitel 2.2).

Prüfstand

Das Funktionsmuster wurde auf dem DLR-Heißgasprüfstand experimentell untersucht, welcher dafür auf die neuen Abmessungen im Nutzfahrzeugbereich umgerüstet wurde. Dies betrifft primär den Rohrdurchmesser, der auf 4“ erweitert wurde (vgl. Abbildung 2-12). Damit werden mögliche Verwirbelungen aus dem Brennraum und andere Inhomogenität verringert, vergleichbar zur Einbauposition hinter der AGN im Referenzfahrzeug. Vor und nach dem TEG-Funktionsmuster ist ein Messring angebracht, der die genauen Einlauftemperaturen entlang des Rohrradius und den Druckabfall über den Prüfling erfasst. Im Auslaufbereich ist eine weitere Strecke zur Verringerung äußerer Einflüsse angebracht. Mit diesem Aufbau wird eine Messung mit definierten Randbedingungen sichergestellt.

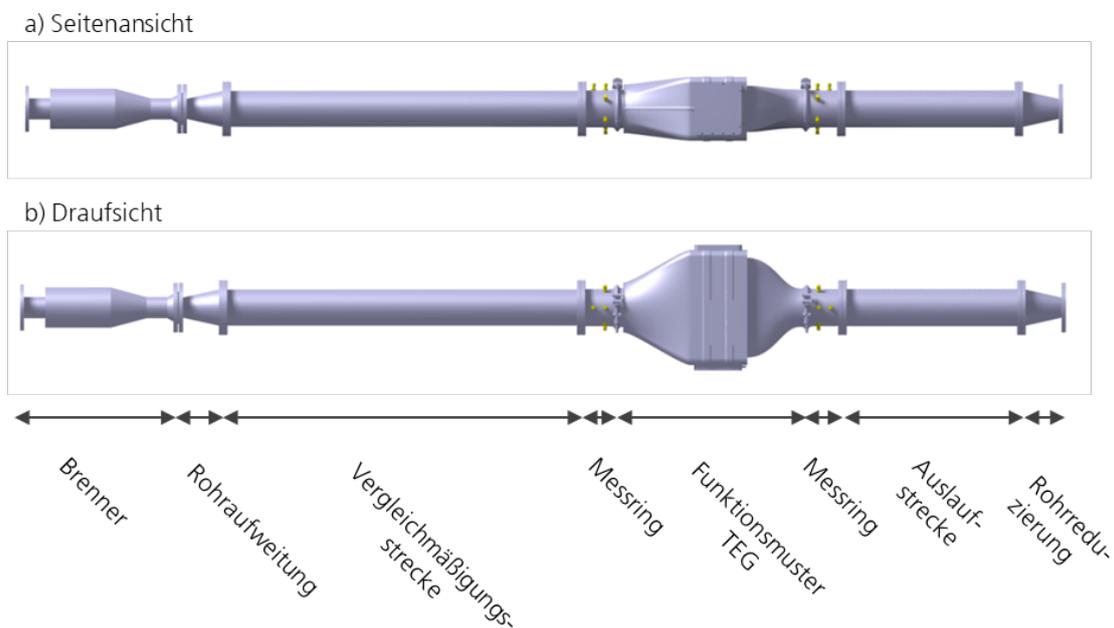


Abbildung 2-12 Konstruktion des Prüfstandaufbaus

Fahrzeugintegrationskonzept

Die potentielle und zielführende Fahrzeugintegration des TEG ist in Abbildung 2-13 dargestellt. Der Abgasstrang und der TEG sind dabei in Rot hervorgehoben. Erstmals konnte, aufgrund der Steigerung der Leistungsdichte des TEG-Systems und des daraus resultierenden geringen TEG-Volumens, die vollständige Integration in die AGN des Referenzfahrzeuges der Sattelzugmaschine für den Fernverkehr erfolgen. Diese hohe Integrationsstufe direkt im Anschluss zum Drei-Wege-Katalysator ist sehr vorteilhaft. Die Abgasenthalpien sind durch die exotherme Reaktion des Katalysators lastabhängig höher. Der Einfluss auf die AGN ist vergleichsweise gering und durch den nachfolgenden Endschalldämpfer sind große Strömungsquerschnitte bei der Umsetzung denkbar. Somit entstehen Synergieeffekte. Ebenfalls kann bei dieser Integration nur ein gemeinsames Gehäuse verwendet und der Schalldämpfer kann durch verringerte Strömungsgeschwindigkeiten und eine Dämpfung im TEG kleiner dimensioniert werden. Eine Bypassklappe am Ende der -strecke erscheint als ausreichend und im Bauraum konstruktiv umsetzbar. Eine solche Integration wird für zukünftige Entwicklungsarbeiten als zielführend angesehen.

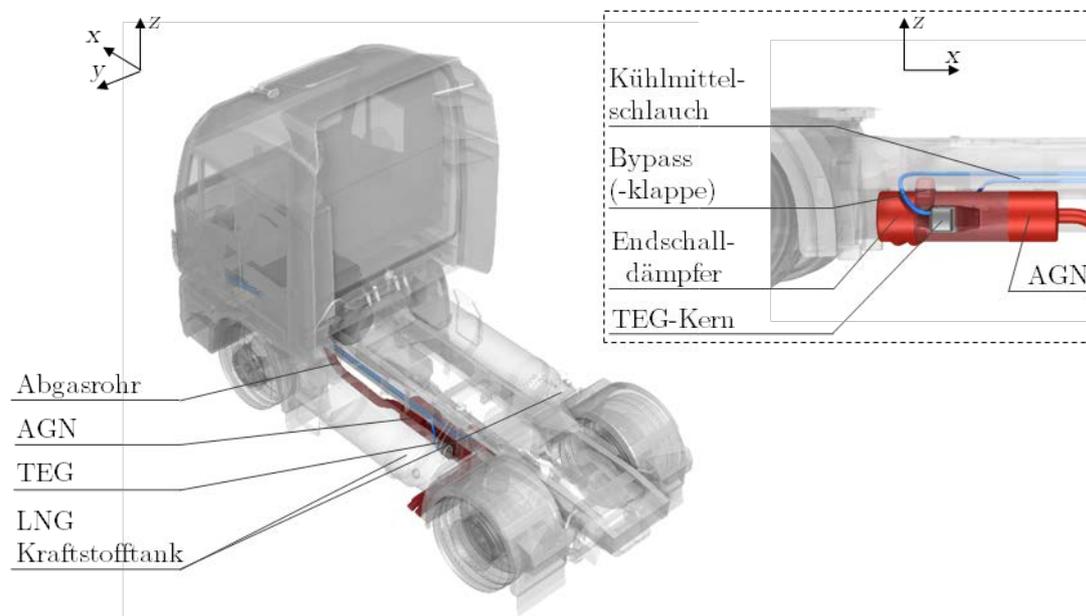


Abbildung 2-13 3D CAD-Modell des TEG-Einbaukonzeptes in die Abgasanlage (rot eingefärbt) des Referenzfahrzeuges der Erdgas-Sattelzugmaschine

2.5 AP 5: Gesamtsystemische TEG-Simulation

2.5.1 Fahrzeugwechselwirkungen

Die Simulation des TEG-Systems folgt einem ganzheitlichen bzw. holistischen Ansatz, d. h. Berücksichtigung aller Fahrzeugwechselwirkungen sowie Berücksichtigung der Kosten-Nutzen-Relation. Die Zielsetzung stellt die erstmalige Erreichung der beabsichtigten Amortisationszeit von <2 Jahren dar. Die bestehenden Fahrzeugwechselwirkungen sind in Abbildung 2-14 im Zusammenhang dargestellt.

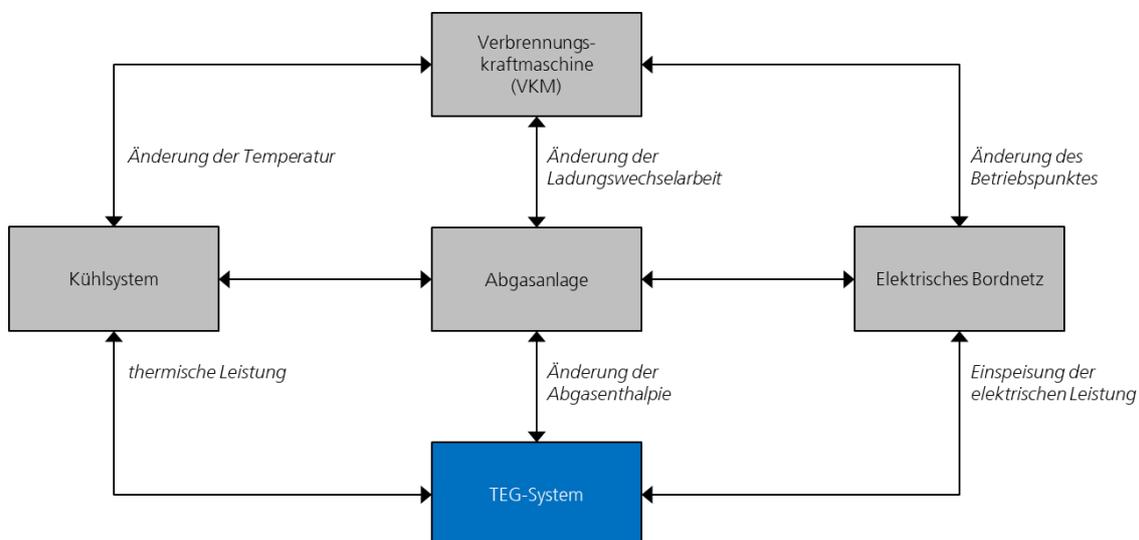


Abbildung 2-14 TEG als Teilsystem im Fahrzeuggesamtsystem und deren Wechselwirkungen

Das simulative Vorgehen und die Optimierungsstrategie folgen den definierten Projektzielen und fokussieren sich auf ein möglichst niedriges Kosten-Nutzen-Verhältnis und eine geringe Amortisationszeit der TEG-Komponenten (bei typischer Konstantfahrt, in semitransienten Fahrszenarien und in spezifischen Fahrzyklen).

Fahrzeugwechselwirkung mit der Verbrennungskraftmaschine

Der Einfluss des TEG-Systems auf die Verbrennungskraftmaschine ist in erster Linie durch die Änderung der Ladungswechselarbeit aufgrund des zusätzlichen Gegendrucks des TEG, durch die Änderung des Motorbetriebspunktes, durch geänderte Einkopplung der Lichtmaschine und durch das Zusatzgewicht begründet. Durch den erhöhten

Wärmestrom des TEG in das Fahrzeugkühlsystem kann zudem die Verbrennungskraftmaschine anhand der geänderten Kühlmitteltemperatur beeinflusst werden.

Die angesprochenen Aspekte werden alle nach dem ganzheitlichen Ansatz berücksichtigt. Die Lastpunktverschiebung wird dabei über den Ansatz der Willans-Linien und einer Längsdynamiksimulation abgebildet. Zudem wird der Einfluss des Zusatzgewichtes ermittelt. Für die Berücksichtigung des Abgasgegendrucks ist eine lastpunktabhängige Korrelation, basierend auf den durchgeführten 0/1D-Simulationen des FKFS aus dem AP 3 (siehe für Details Kapitel 2.3.1, Abbildung 5-8 und Abbildung 5-9 im Anhang), wie in Abbildung 2-15 anhand der dreidimensionalen Polynominterpolation ersichtlich ist, erstellt worden.

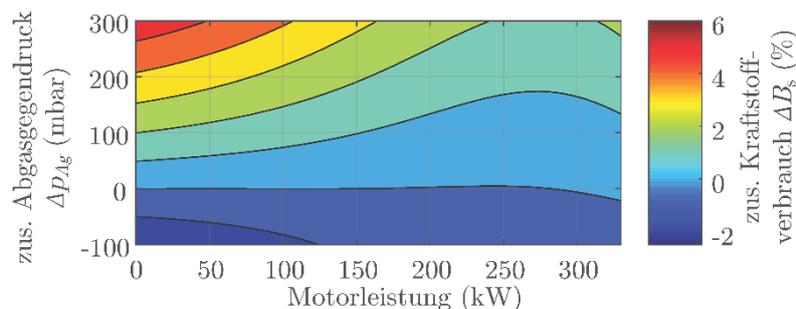


Abbildung 2-15 Resultierende Änderung des Kraftstoffverbrauchs bei Änderung des Abgasgegendrucks der Abgasanlage des Referenzfahrzeuges bei variierender Motorleistung

Fahrzeugwechselwirkung mit dem Kühlsystem

In Kapitel 2.3.2 wurden die Grundlagen des Referenzfahrzeuges und dessen Kühlsystem ermittelt. Aufbauend auf den dort dargestellten Ergebnissen wurden Korrelationen abgeleitet und in der gesamtsystemischen TEG-Simulation eingebunden. Dabei wird unter anderem die zusätzliche Wärmekapazität des Kühlsystems bis zur Zuschaltung vom Fahrzeuglüfter berücksichtigt.

Fahrzeugwechselwirkung mit dem elektrischen Bordnetz

Die Einspeisung der gewandelten elektrischen Leistung des TEG aus der Abgasenthalpie ist die Grundlage für die Reduktion des Kraftstoffverbrauchs. Im Rahmen des Projektes wurde eine konventionelle 24-Volt Bordnetzarchitektur (Stand der Technik, siehe Abbildung 2-16) berücksichtigt. In erster Linie ersetzt der TEG den elektrischen Generator des Fahrzeuges, der einen Nennstrom von 90 A zur Versorgung der elektrischen Verbraucher erzeugt. Der Bedarf der Verbraucher variiert je nach Fahrzeugkonfiguration und Fahrstrecke und liegt im Bereich von 600 bis 1500 W für konventionelle SNFZ. Im Rahmen des Projektes wurde nach [9] und [10] ein durchschnittlicher Bordnetzbedarf von 1025 W zu Grunde gelegt. Sofern das TEG-System eine größere Leistung erzeugt, werden die Akkumulatoren mit einer Nennkapazität von 220 Ah geladen, bis zum (maximalen) Ladezustand von 90 %.

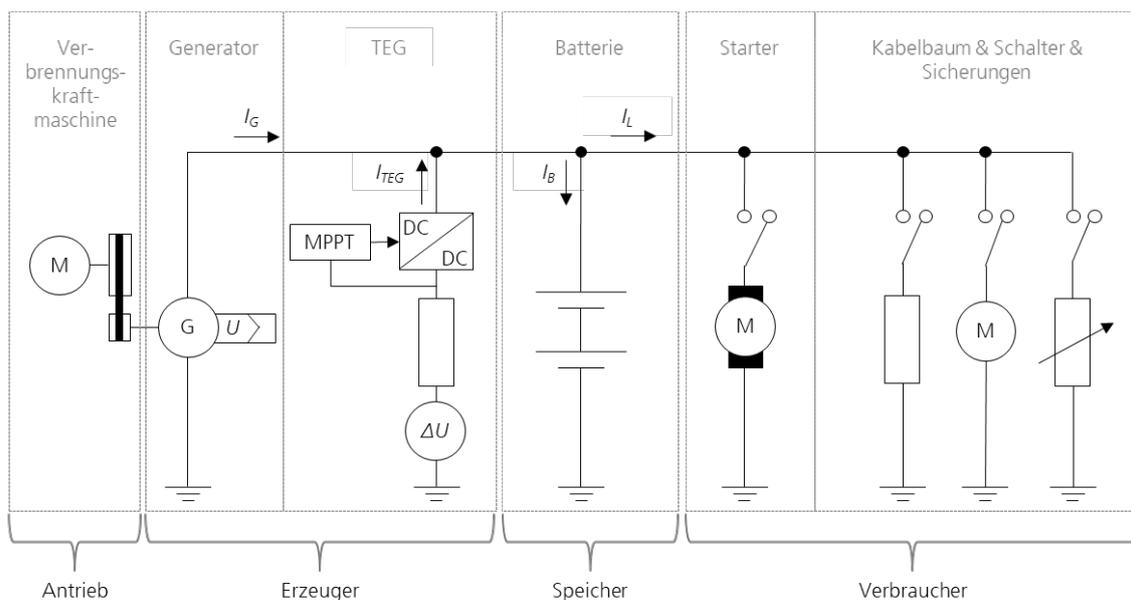


Abbildung 2-16 Darstellung des elektrischen Bordnetzes eines konventionellen NFZ mit 24-Volt Bordnetzarchitektur

Bewertung der Fahrzeugwechselwirkungen

Zur Bewertung der Fahrzeugwechselwirkungen des TEG mit dem Fahrzeug werden alle positiven wie negativen (parasitäre Effekte) Wechselwirkungen summiert und damit die Änderung des Kraftstoffverbrauchs des Fahrzeuges (ΔB_e) ermittelt. Für typische

Lastpunkte eines Erdgas-NFZ für den Fernverkehr sind in Abbildung 2-17 beispielhaft die Fahrzeugwechselwirkungen bilanziert und summiert zu einer resultierenden Reduktion des Kraftstoffverbrauchs.

Einfluss auf den Verbrennungsmotor

- ➔ *Zusatzgewicht m_{TEG}* + 0,1 % ΔB_e^*
- ➔ *Zusätzlicher Gegendruck p_{TEG}* + 0,05–0,3 % ΔB_e^*

+ Einfluss auf das Kühlsystem

- ➔ *Zusätzliche Kühllast \dot{Q}_{TEG}* 0 % ΔB_e^* (~ 40–90 kW)
- ➔ *Zusätzliche Pumpleistung P_{KP}* < + 0,05 % ΔB_e^*

– Einfluss auf das elektrische Bordnetz

- ➔ *Zusätzliche el. Leistung P_{TEG}* –(0,8–2,3) % ΔB_e^*

= Summe: **–(0,35–2,1) % ΔB_e^***
($c=2,8–17,9$ g/km)

Abbildung 2-17 Beispielhafte Bewertung der positiven und negativen Effekte bei TEG-Integration in ein Erdgas-NFZ in Form der Änderung des Kraftstoffverbrauchs (*für typische Lastpunkte der Autobahnfahrt; $B_e = 32,2$ kg/100 km; spezifische CO₂-Emissionen $c = 813$ g/km; TEG versorgt das elektrische Bordnetz vollständig)

2.5.2 Technoökonomische Randbedingungen

Im Rahmen des Projektes wurde erstmalig die Kosten-Nutzen-Relation bei der Systemoptimierung berücksichtigt und derart minimiert, sodass sich das TEG-System wirtschaftlich im Erdgas-NFZ rentiert und amortisiert. Hierfür ist die Kenntnis der Gesamtbetriebskostenstruktur bzw. nutzfahrzeugspezifisch die *Total Cost of Ownership* (TCO) und deren Abhängigkeiten zwingend erforderlich, um diese in die holistische Simulationsumgebung einfließen zu lassen. Als Zielsetzung der Optimierung sollte die geringste Kosten-Nutzen-Relation gefunden werden, die eine minimale Zeit der Systemamortisation ermöglicht.

Es wurde ein Gesamtbetriebskostenmodell für Erdgas-NFZ mit CNG- und LNG-Betankungssystemen erstellt. Für letztgenanntes ist die Kostenverteilung in Abbildung

2-18 (a) dargestellt. Zudem wurde eine Modellierung der Zielkosten entwickelt (siehe Abbildungsteil (b)), welche die Nutzenschwelle und die Amortisation für das jeweilige TEG-Ergebnisdesign ermittelt. In der Illustration ist zum Vergleich das Diesel-NFZ aufgeführt.

Als Einsatzszenario und zur Bewertung des TEG-Systems werden folgende Randbedingungen definiert: Durchschnittliche jährliche Laufleistung des Sattelzuges von 150.000 km/Jahr bei einer Nutzungsdauer von 5 Jahren für die Sattelzugmaschine bzw. 10 Jahren für den Auflieger.

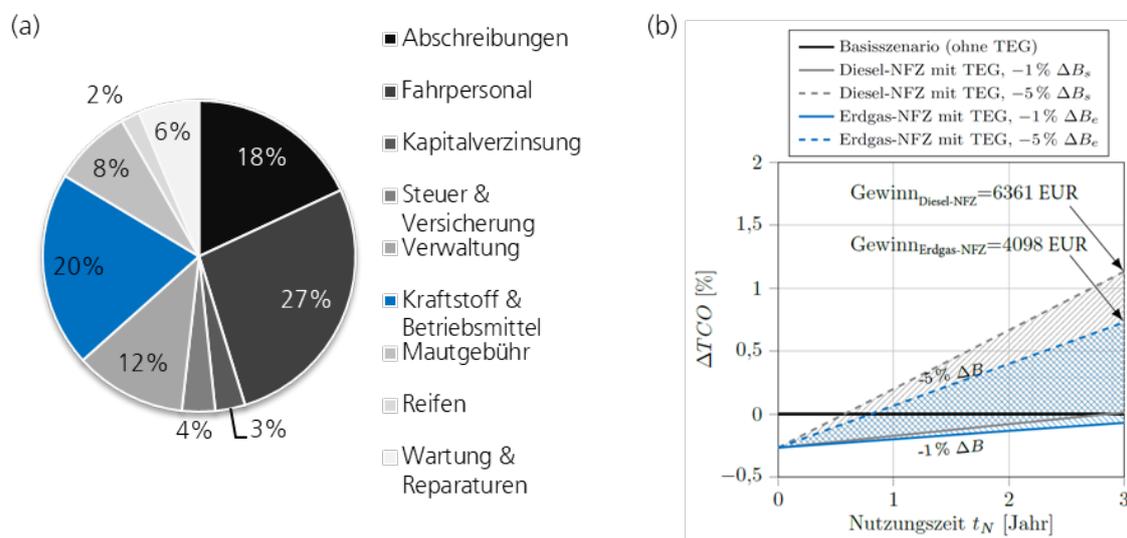


Abbildung 2-18 TCO-Kostenstruktur für Sattelzug mit Erdgasverbrennungsmotor (LNG) mit Laufleistung von 150.000 km/Jahr (a) und Zielkostenanalyse eines beispielhaften TEG-Designs sowie Angabe von dessen Nutzenschwelle (b; Annahmen: Nutzungsdauer von 5 Jahren für die Sattelzugmaschine bzw. 10 Jahren für den Auflieger, $B_s = 35,3 \text{ l}/100 \text{ km}$ für das Diesel- bzw. $B_e = 32,2 \text{ kg}/100 \text{ km}$ für das Erdgas-NFZ, TEG-Stückkosten $K_{TEG} = 1500 \text{ EUR}$)

2.5.3 Simulationsumgebungen und Modellbildung

Als Basis der Simulationsumgebung wird die Workbench der Firma ANSYS Inc., mit den dazugehörigen Unterprogrammen verwendet. Die Simulationsumgebung ist flexibel erweiterbar und auch nicht den ANSYS Workbench zur Verfügung stehenden Simulation- und Auswertungstools verknüpfbar. Das Ziel der hier beschriebenen Simulationsumgebung ist es, einen TEG innerhalb des Fahrzeugesamtsystems zu simulieren, die Fahrzeugwechselwirkungen sowie das TEG-System wechselseitig zu

bewerten. Diese Vorgehensweise erlaubt die ganzheitliche und simultane Optimierung vom Wärmeübertrager und TEM, um die optimale TEG-Bauweise zu ermitteln.

Für die Optimierung der Wärmeübertrager und insbesondere vom HGWÜ ist es notwendig, dessen innere Geometrie detailliert nachzubilden. Dafür wurde ein entsprechendes CAD-Modell in CATIA der Firma Dassault Systèmes angefertigt. Mit der bidirektionalen Schnittstelle CadNexus ergibt sich die Möglichkeit, das CAD- mit dem CFD-Modell und dadurch ein iteratives Vorgehen bei der Optimierung zu erlauben. In Abbildung 2-19 wird dieses Vorgehen verdeutlicht.

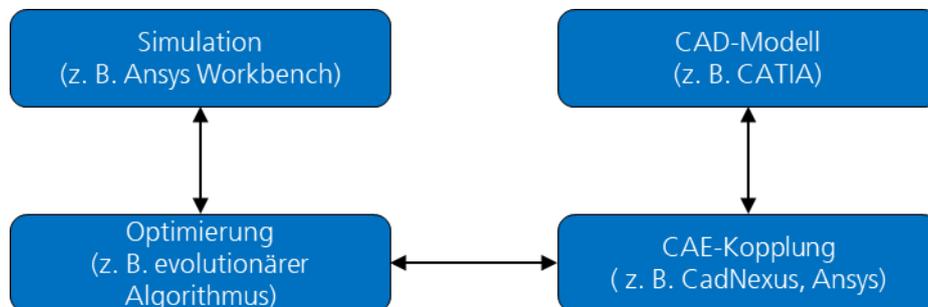


Abbildung 2-19 Integration der CadNexus Schnittstelle zur bidirektionalen Kommunikation des CAD-Modells in CATIA und der ANSYS-Workbench

Die Herausforderung und Komplexität bei der Erstellung und Verwendung einer solchen CAE-Modellumgebung ist es, dass sämtliche Änderungen auch geometrische Veränderungen in einem Iterationsschritt updatestabil und automatisiert ablaufen.

Wie in der beispielhaften Form der Simulationsumgebung in ANSYS-Workbench in der Abbildung 2-20 dargestellt ist, muss die Geometrie für die CFD-Simulation noch aufbereitet werden. Dies geschieht durch die Vernetzung. Diese muss ebenfalls updatestabil alle Veränderungen der Geometrie berücksichtigen können und ein effizientes Netz erstellen. Nur mit einer hohen Netzqualität kann die CFD-Simulation zuverlässige und aussagekräftige Ergebnisse generieren. Nur dieses komplexe Vorgehen ermöglicht die Berechnung einer sehr hohen Variantenanzahl in einem vertretbaren Zeitaufwand und die erforderliche multikriterielle Optimierung.

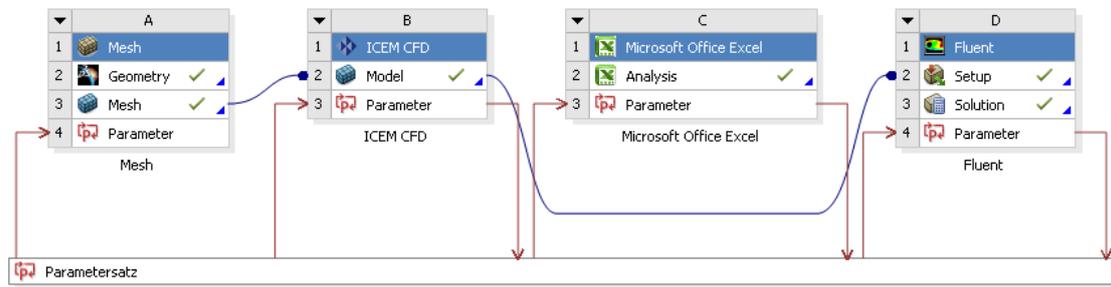


Abbildung 2-20 Beispielhafte grafische Benutzeroberfläche der Simulationsumgebung in Ansys Workbench

In Kapitel 2.5.1 wurde aufgezeigt, wie sich die Einflüsse des TEG auf das Gesamtsystem auswirken. Um diese Erkenntnisse in der Simulationsumgebung nutzen zu können, wird ein mathematisches Modell erstellt und in die Simulation integriert. Durch den strukturellen Aufbau von ANSYS-Fluent ist es möglich, mit der Programmiersprache C die Berechnungen um eigene Modelle und Ansätze zu erweitern.

Durch die physikalischen Abhängigkeiten der vorhandenen Daten bzgl. der Einflüsse auf das Gesamtsystem war es möglich, diese Daten mit Hilfe eines mathematischen Modells zu interpolieren. Dieses mathematische Modell wird dann in die Simulationsumgebung integriert. Dadurch kann zu jeder gegebenen Randbedingung, wie Geschwindigkeit oder Last, der daraus resultierenden Effekt des TEG auf das Gesamtsystem Fahrzeug berechnet und bewertet werden.

Somit kann als Wechselwirkung beispielsweise das zusätzliche Gewicht des TEG bewertet werden. Dazu wurde, wie schon in Kapitel 2.5.1 eingeführt, eine Längsdynamiksimulation für NFZ erstellt, um das zusätzliche Gewicht durch den TEG bewerten zu können. Diese Ergebnisse wurden dann, wie in Abbildung 2-21 beispielhaft zu erkennen ist, in das interpolierte mathematische Modell überführt. Die Vorgehensweise erfolgte analog für die weiteren positiven und negativen TEG-Effekte.

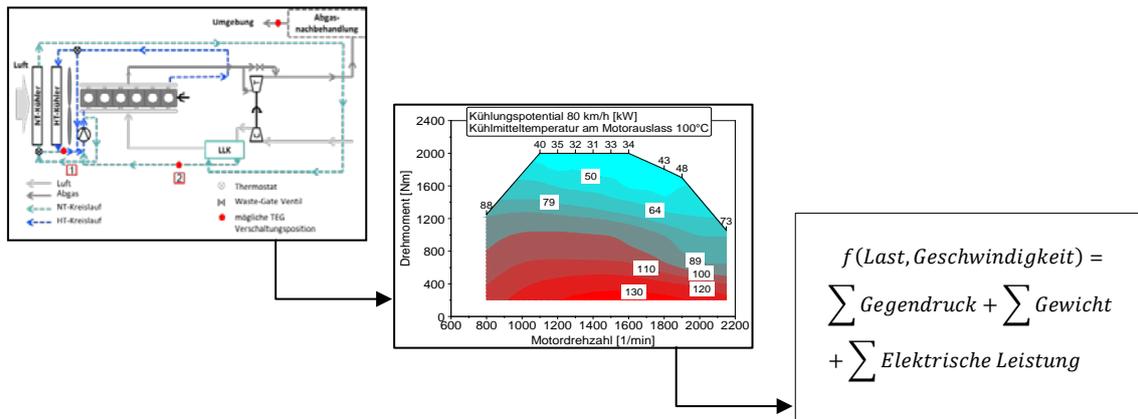


Abbildung 2-21 Beispielhafte Umwandlung von der physikalische Nachbildung über das Simulationsergebnis über die Ableitung in ein mathematisches Modell aus den simulativen Ergebnissen.

Die verwendeten thermoelektrischen Module wurden speziell für diesen Einsatzzweck und nach DLR Vorgaben von der Firma LG Chem Ltd. entwickelt und gefertigt (siehe Tabelle 2-10). Es kamen hochtemperaturfähige und -effiziente segmentierte TEM bestehend aus Bismuttellurid (BiTe) auf der Kaltseite und Skutterudit (SKD) auf der Heißseite zum Einsatz. Nur durch die simultane Optimierung und Anpassung der TEM und der HGWÜ wird gewährleistet, dass für die Anwendung das benötigte Optimum, daher die geringste Kosten-Nutzen-Relation, erreicht wird.

Tabelle 2-10 Übersicht auf Basis der Herstellerangaben der untersuchten hocheffizienten sowie segmentierten TEM für hohe Einsatztemperaturen der Firma LG Chem Ltd.

				
		LGC102	LGC101	LGC100
Schenkelwerkstoff	[-]	BiTe & SKD	BiTe & SKD	BiTe & SKD
Max. Temperatur (kzz.)	[°C]	500 (550)	500 (550)	500 (550)
Modulmaße	[mm]	31x31x5,2	31x31x4,4	31x31x3,2
Schenkelhöhe	[mm]	1,9 / 2	1 / 2	1 / 1
Anzahl Schenkelpaare	[-]	31	31	31
Gewicht	[g]	25,4	19,7	14
El. Widerstand ¹	[Ω]	0,2	0,2	0,1
Max. Leistung ²	[W]	14,7	18,6	26 (20,5)
Max. Wirkungsgrad ²	[%]	9	8,2	7,5

¹ Bei Umgebungstemperatur $\vartheta_U=25\text{ °C}$.

² Bei $\vartheta_{HS}=500\text{ °C}$ und $\vartheta_{KS}=50\text{ °C}$.

Es wurden herstellerseitig sowie seitens des DLR experimentelle Voruntersuchung der Module durchgeführt. Auf Basis dieser Messdaten wurde eine Interpolation

vorgenommen, um die mathematische Abhängigkeit der Temperaturdifferenz der Heiß- und Kaltseitentemperatur mit Hilfe der Temperaturdifferenz ΔT und des entsprechenden Wirkungsgrades bzw. der elektrischen Leistung zu erhalten. Auf diese Weise konnten Kennfelder als Eingangsgrößen für die TEG-Simulationsumgebung abgeleitet werden. Beispielhaft sind diese mittels ausgewählter Kurvenscharen in Abbildung 2-22 anhand des zielführend ausgewählten TEM LGC100 dargestellt (siehe Gleichungen (5) und (6) von Kapitel 5.1 im Anhang). Für die Simulationsumgebung ist es vorteilhaft, die Abhängigkeiten der Moduldaten multidimensional zu erfassen und zu integrieren.

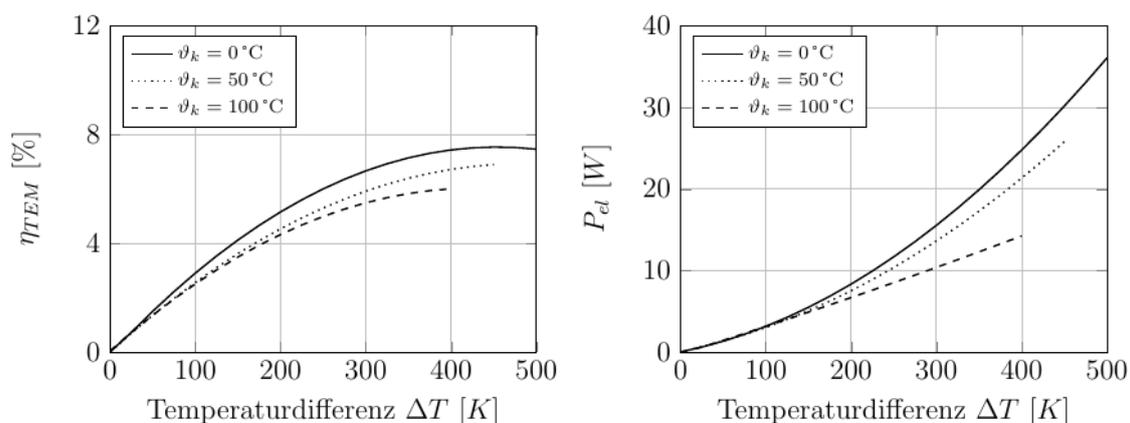


Abbildung 2-22 Modulcharakteristik auf Basis der Modulummesswerte des Wirkungsgrades und der elektrischen Leistung der ausgewählten TEM (LGC100)

Bei der Modellierung des TEG werden alle bereits erwähnten Komponenten in einer Simulationsumgebung zusammengeführt. Für die Optimierung wird, wie schon in Kapitel 2.5.3 erwähnt, ein CAD-Modell des WÜ-Aufbaus verwendet. Die Geometrie und Komplexität werden reduziert. Dabei wird auch das Prinzip der Periodizität ausgenutzt, um die Modellkomplexität und die Rechenzeit so gering wie möglich zu halten. Eine prinzipielle Darstellung der Geometrie des CFD-Modells ist in Abbildung 2-23 dargestellt. Die Hauptströmungsrichtung des Abgases ist entlang der x-Koordinate. Anhand des reduzierten Modellaufbaus ist es möglich, eine Aussage über das Gesamtsystem und seine Wechselwirkungen treffen zu können.

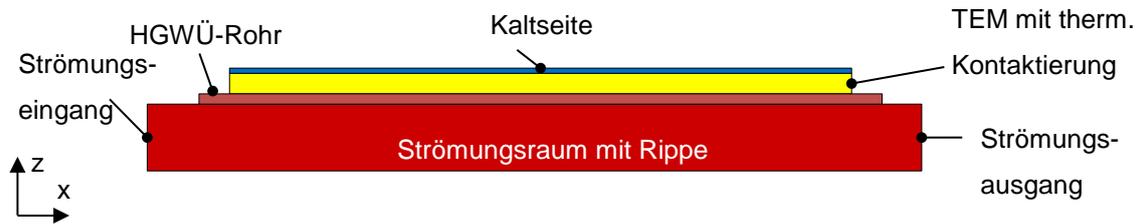


Abbildung 2-23 Prinzipdarstellung des CFD-Modells der Modellumgebung

Für die korrekte und realistische Modellierung der Wärmeübergänge werden auch die zur Reduzierung der Kontaktwiderstände benutzten thermischen Kontaktierungen in der Simulation berücksichtigt. Dadurch kann der Wärmestrom, welcher zur Berechnung der elektrischen Leistung durch das TEM benötigt wird, korrekt berechnet werden.

Das TEM wird als Ersatzmodell in der Simulation integriert. Die entsprechenden Materialeigenschaften der Komponenten werden temperaturabhängig implementiert. Trotz der getroffenen Vereinfachung und der effizienten Vorgehensweise ist es dennoch möglich, den Wärmestrom sowie die daraus resultierende elektrische Leistung korrekt zu modellieren. Dies konnte unter anderem mit Hilfe der Validierungsstudie aus Kapitel 2.4.2 nachgewiesen und die Simulationsumgebung damit überprüft werden.

2.5.4 Ergebnisse der Simulation

Durch die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebene Simulationsumgebung, die entwickelten Methoden sowie Teilmodelle war es nun möglich, Simulationsergebnisse unter den gegebenen Randbedingungen zu erzeugen. Als Referenz wurden fahrzeugseitige Betriebspunkte in Kapitel 2.2 definiert. Diese ermöglichen, die erzielten TEG-Ergebnisdesigns zum einen im Teillastbereich, aber auch im Hochlastbereich, in unterschiedlichen Einsatzprofilen bewerten zu können.

Die Komplexität bei der Auswahl des Optimums soll anhand der Voruntersuchung zur TEG-Länge und der Ergebnisgröße des Gegendrucks Δp erläutert werden. In der Abbildung 2-24 ist das Verhältnis der zu erwartenden elektrischen Leistung eines jeden Ergebnisdesigns zum Gegendruck dargestellt. Die Ergebnisdesigns wurden aufgrund der TEG-Länge in Strömungsrichtung aufgeteilt. Dabei ist die Anzahl der TEM in Strömungsrichtung diskretisiert worden und von Relevanz. Sie variiert hierbei von 2 bis hin zu 5 TEM-Streifen in Strömungsrichtung. Die Gesamtanzahl der TEM bleibt dabei

jedoch gleich und somit auch die Modulfläche. Jedoch unterscheidet sich das Verhältnis der TEG-Länge in Strömungsrichtung zur TEG- Breite. Strömungsmechanisch bedeutet ein breiter TEG, genauso wie ein höherer TEG geringere Strömungsgeschwindigkeiten. Ein längerer TEG, bei ansonsten identischer Geometrie, wird einen höheren Gegendruck, jedoch auch einen höheren Wärmestrom aufweisen. Um das Optimum für die TEM-Fläche zu finden, wurde eine grobe Optimierung hinsichtlich der Länge des TEG in Strömungsrichtung durchgeführt.

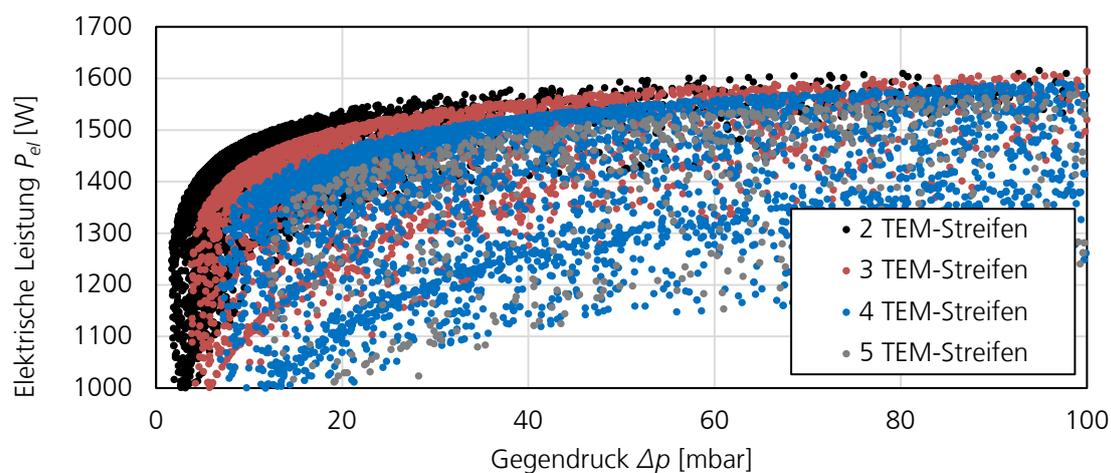


Abbildung 2-24 Ergebnisse der Voruntersuchung zum Einfluss der TEG-Länge in Strömungsrichtung

Es zeigte sich, dass bei einem kürzeren TEG die zu erwartende elektrische Leistung im Vergleich zu einem längeren steigt und dies bei einem geringeren Gegendruckniveau. Dieses Ergebnis bestätigt die zuvor getroffene Vermutung und kann durch den höheren thermoelektrischen Wirkungsgrad erklärt werden. Bei einer kurzen aber breiten TEG-Geometrie ist die durchschnittliche Temperaturdifferenz zwischen der Heiß- und Kaltseite höher. Dies erhöht den thermoelektrischen Wirkungsgrad und somit die maximal zu erwartende elektrische Leistung. Durch die gleichbleibende Modulfläche in dieser Optimierung, bedeutet ein kurzer TEG auch ebenfalls einen breiteren TEG. Somit sorgen die niedrigeren Strömungsgeschwindigkeiten für einen vergleichsweise niedrigen Gegendruck. Bei dieser Voruntersuchung ist noch keine endgültige ganzheitliche Bilanz und kein Kosten-Nutzen-Verhältnis berechnet worden. Als Fazit lässt sich dennoch feststellen, dass der positive Effekt durch eine höhere Ausgangsleistung bei einem TEG mit 2 TEM-Streifen in Strömungsrichtung einer sehr komplexen, schweren und teuren

Konstruktion aufgrund der effektiven Gesamtbreite von über 750 mm (vgl. geometrische Randbedingungen aus Kapitel 2.2), gegenübersteht. Ein optimaler Kompromiss zwischen einem hohen resultierenden positiven Effekt auf das Gesamtsystem und einer realisierbar und vor allem ökonomisch vertretbaren Konstruktion liegt in diesem Fall bei einem TEG mit 3 TEM-Streifen in Strömungsrichtung.

Komplexer gestaltete sich die Auswahl eines gewichteten Optimums der ganzheitlichen Simulationsumgebung, bei der alle negativen und positiven Effekte auf das Gesamtsystem bilanziert sowie ein Kosten-Nutzen-Verhältnis kalkuliert wurde. Bei der multikriteriellen Optimierung erfolgte eine Gewichtung der Ergebnisgrößen. Als zielführendes TEG-Ergebnisdesign wurde ein TEG mit 3 HGWÜ, 4 KMWÜ und 144 TEM LGC100 ermittelt. Dieses ist charakterisiert durch kalkulierte Systemkosten (bei Annahme einer hohen Serienstückzahl) von 1002 EUR, einem Gewicht von 27,4 kg und einer Wärmeübertragerfläche von 1655 cm². Als abschließende Zusammenfassung der TEG-Auslegung wird auf Tabelle 2-11 verwiesen. Hierin werden alle definierten Betriebspunkte mit den abschließend erzielten Ergebnissen dargestellt. Die elektrische TEG-Leistung P_{TEG} stellt die elektrische Leistung der TEM P_{el} multipliziert mit dem Wirkungsgrad der Leistungselektronik η_{LE} dar. Die TEG-Integration erfolgt dabei abgasseitig direkt im Anschluss an die AGN und wie beschrieben im NT-KMK.

Die höchste relative Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs $\Delta B_{e,netto}$ (resultierende Kraftstoffverbrauchsänderung, nach Abzug von negativen Effekten) wurde mit 2,5 % im BP 1.1, daher im WHVC mit 15 t GG im Mittel, erzielt. Damit wurde zudem weltweit erstmalig eine Amortisationszeit des TEG-Systems von <2 Jahren, unter Berücksichtigung der Annahmen des TCO-Modells, erreicht. In allen Betriebspunkten wurde eine Amortisationszeit von kleiner 3 Jahren erreicht. Das Minimum wurde im Mittel des WHVC 40 t GG mit bis zu einem Jahr ermittelt. Die Reduktion als absolute Angabe liegt bei bis zu 1 kg/100 km.

Weitere Ergebnisdarstellung zu den dynamischen Simulation der TEG-Leistung und der jeweiligen Motorleistung im jeweiligen WHVC sind im Anhang in Abbildung 5-13 und Abbildung 5-14 dargestellt. In der Realfahrstrecke SHHS ist die verfügbare Batteriekapazität nicht ausreichend groß, um die überschüssige TEG-Leistung in der Fahrtzeit zu speichern. Sofern eine zusätzliche Kapazität verfügbar wäre, könnte die Kraftstoffreduktion weiter gesteigert werden.

Tabelle 2-11 Ergebnis der Optimierung der ganzheitlichen TEG-Systemauslegung (TEG-
Ergebnisdesign ausgewählt für maximale Reduktion des Kraftstoffverbrauchs bei günstigsten
Systemkosten ausgewogen über alle Betriebspunkte, BP)

BP	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2	
Bezeichnung	WHVC _{15 t,m}	WHVC _{15 t,max}	WHVC _{40 t,m}	WHVC _{40 t,max}	SHHS _{40 t,m}	SHHS _{40 t,max}	
Fahrzeug	Kraftstoffverbrauch (kg/100 km)	25,0	30,5	42,7	38,1	35,0	88,9
	Geschwindigkeit (km/h)	40,2	83,2	39,3	86,8	74,9	72
	Motorleistung (kW)	42	130	77	180	114	341
	Drehzahl (1/min)	1106	1237	1119	1293	1392	1760
	Drehmoment (Nm)	329	1003	587	1333	759	185
	Leistung P_{TEG} (W)	1030	1954	1424	2371	1686	2688
TEG-System	Kraftstoffverbrauch $\Delta B_{e,brutto}$ (%)	-2,6	-1,7	-2,3	-1,9	-2,2	-1,4
	Kraftstoffverbrauch $\Delta B_{e,netto}$ (%)	-2,5	-1,5	-2,3	-1,6	-2,1	-0,8
	CO ₂ -Emissionen (g/km)	-15,7	-11,6	-24,6	-15,5	-18,9	-18,0
	Gewicht m_{TEG} (kg)	27,4	27,4	27,4	27,4	27,4	27,4
	Kosten K_{TEG} (EUR)*	1002	1002	1002	1002	1002	1002
	Amortisation t_A (Jahren)*	1,8	2,9	1,0	1,9	1,4	1,5

* Annahmen: Jährliche Laufleistung 150.000 km, Nutzungsdauer 5 Jahre, TEG-Systemkosten für große Stückzahlen (30.000 Stück/a – Erfahrungskurveneffekt: Berücksichtigung der Kosten im Verhältnis zur kumulierten Produktionsmenge).

2.6 AP 6: Validierung durch Funktionsmuster

Zur Validierung der Simulationsergebnisse wurden zwei Funktionsmuster aufgebaut, die die thermischen Wärmeströme und die TEG-Bauweise sowie die ermittelte TEG-Leistung der Simulation nachbilden sollen. Beide Realisierungen, siehe Abbildung 2-25, weichen nur geringfügig vom ermittelten geometrischen TEG-Ergebnisdesign zur Minimierung der TCO ab. Im ersten Funktionsmuster „HDTEG1“ (siehe Abbildung 2-25 (a)) kamen keramische Ersatzmodule, jeweils zur Hälfte Mullit und Zirconiumdioxid, mit ähnlichen thermomechanischen Eigenschaften wie die TEM zum Einsatz. Im zweiten Aufbau „HDTEG2“¹ wurden die TEM LGC100 der Firma LG Chem (siehe Abbildung 2-25 (b)), bei ansonsten identischem Aufbau, integriert.



Abbildung 2-25 TEG-Funktionsmuster als Hardwarerealisierung des TEG-Ergebnisdesigns mit Zielsetzung minimaler TCO: (a) HDTEG1: Aufbau mit Ersatzmodulen und (b) HDTEG2: Aufbau mit TEM LGC100 der Firma LG Chem

Die Funktionsmuster konnten erfolgreich auf dem DLR eigenen Heißgasprüfstand experimentell getestet werden. Der Propangasbrenner mit maximaler Nennleistung von 200 kW (60 % der Nennleistung des Referenzfahrzeuges) ermöglicht die Nachbildung des Verbrennungsmotors. Aufgrund der geringeren Leistungsklasse als die des NFZ-Motors, konnte der maximale Lastpunkt in der Referenzstrecke SHHS (SHHS_{40 t,max}) nicht ganz erreicht werden. Das Kühlsystem des Nutzfahrzeuges wurde beim experimentellen Aufbau mit Hilfe eines ausreichend groß dimensionierten Temperiergerätes dargestellt. Das elektrische Bordnetz wurde durch einen multiplen

¹ Die Umsetzung des zweiten Funktionsmusters „HDTEG2“ wurde nur durch die zusätzliche Finanzierung bzw. Anschlussfinanzierung des DLR-Technologiemarketing möglich.

Maximum-Power-Point-Tracker (MPPT) inklusive Gleichspannungswandler und zwei Bleiakumulatoren analog zur Bordnetztopologie mit 24-V Spannungsniveau und 220 Ah Kapazität abgebildet. Abbildung 2-26 stellt die prinzipielle Heißgas- und Kühlmittelstromführung im TEG-Kern dar. Dem Anhang ist zudem in Abbildung 5-15 der Prüfstands Aufbau auf dem DLR eigenen Heißgasbrennerprüfstand zu entnehmen. Der experimentelle Aufbau entspricht somit der Realisierung auf Technologie-Reifegrad 5: Versuchsaufbau in Einsatzumgebung.

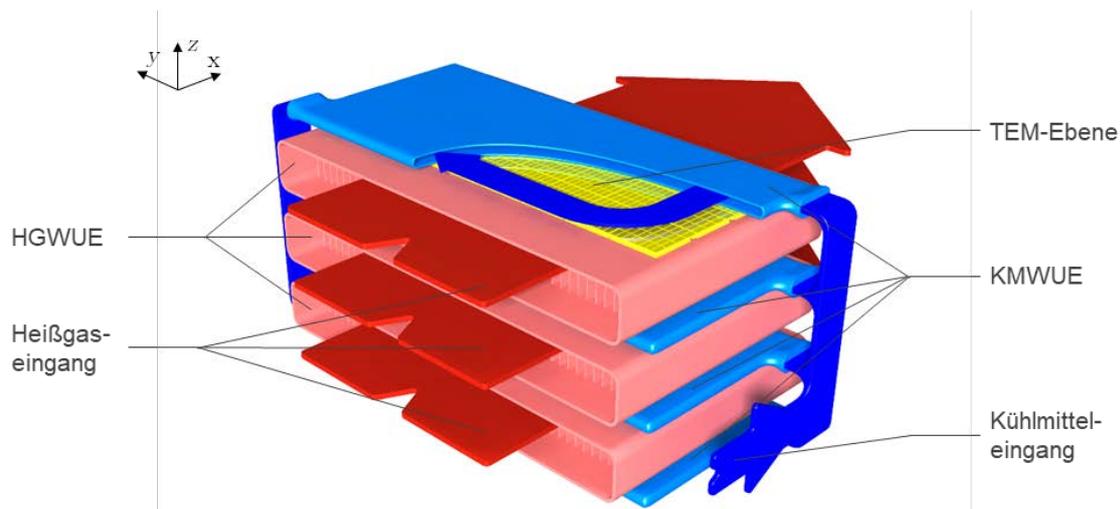


Abbildung 2-26 Prinzipdarstellung des TEG-Funktionsmusters in Gegenstrombauweise anhand des TEG-Kerns (ohne Gehäusebauteile) sowie der Heißgas- und Kühlmittelstromführung

In Tabelle 2-12 sind die Ergebnisse des Funktionsmusters HDTEG2 anhand der im jeweiligen Betriebspunkt vorliegenden Temperaturdifferenz und der resultierenden elektrischen Generatorleistung aufgeführt. Allgemein wird die gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment deutlich, insbesondere was die Generatorleistung betrifft. Als Mittelwert beträgt die Abweichung nur -2% . Im Spitzenlastpunkt BP3.2 konnten bis zu 2562 W gemessen werden. Bei den mittleren Oberflächentemperaturen der Wärmeübertrager ist der Unterschied zwischen Simulation und Experiment bei Betrachtung der absoluten Abweichungen größer. Als Mittelwert liegt die Abweichung über alle Betriebspunkte bei $2,2\%$. In die Oberflächen wurden 60 Mantelthermoelemente eingebracht, an denen punktuell Temperaturen aufgezeichnet wurden. Aus diesen Messdaten wurden die Mittelwerte bestimmt. Jeder Temperaturfühler unterliegt einer anderen Messabweichung, was bereits zu Abweichungen führt. Zudem treten inhomogene Temperaturverteilungen in jedem KMWÜ und HGWÜ sowie quer zur jeweiligen Strömungsrichtung auf. Beides ist durch die Simulation nicht abgebildet, was

die Abweichungen im angeführten Bereich bereits erklären kann. Zudem ist die simulative Abbildung der thermischen Widerstandsänderung der TEM beim Stromfluss, verursacht durch den Einfluss des Peltiereffekts, komplex und wurde aufgrund des verhältnismäßig geringen Einflusses vernachlässigt.

Tabelle 2-12 Vergleich der mittleren Heiß- $\bar{\vartheta}_{HS}$ und Kaltseitentemperaturen $\bar{\vartheta}_{KS}$ sowie der elektrischen Generatorleistung P_{TEG} zwischen der Simulation und dem Experiment des Funktionsmusters HDTEG2 auf dem Heißgasprüfstand

BP*		1.1* ²	1.2* ²	2.1* ²	2.2* ²	3.1* ³	3.2* ⁴
Bezeichnung		WHVC _{15 t,m}	WHVC _{15 t,max}	WHVC _{40 t,m}	WHVC _{40 t,max}	SHHS _{40 t,m}	SHHS _{40 t,max}
mittlere Heißseiten-temperatur $\bar{\vartheta}_{HS}$	Simulation	299,6 °C	437,7 °C	390,5 °C	493,7 °C	432,3 °C	512,1 °C
	Experiment	315,7 °C	438,1 °C	394,2 °C	486,4 °C	439,3 °C	518,2 °C
	Abweichung	5,4 %	0,1 %	0,9 %	-1,5 %	1,6 %	-2,6 %
mittlere Kaltseiten-temperatur $\bar{\vartheta}_{KS}$	Simulation	53,1 °C	75,9 °C	67,6 °C	81,6 °C	73,6 °C	90,5 °C
	Experiment	57,3 °C	79,4 °C	69,8 °C	81,8 °C	78,1 °C	90,6 °C
	Abweichung	7,9 %	4,5 %	3,2 %	0,3 %	6,1 %	0,1 %
Leistung P_{TEG}	Simulation	1163 W	2013 W	1592 W	2445 W	1987 W	2664 W
	Experiment	1118 W	1954 W	1657 W	2365 W	1957 W	2562 W
	Abweichung	-4 %	-3 %	3,9 %	-3,4 %	-1,6 %	-4 %

* Die Messabweichung wird zur besseren Übersichtlichkeit der Ergebnisse nicht angegeben.

*² Abweichung zur Tabelle 2-6: $\vartheta_{KM, ein} = 20$ °C, $\dot{v}_{KM} = 0,4$ dm³/s.

*³ Abweichung zur Tabelle 2-6: $\vartheta_{KM, ein} = 20$ °C, $\dot{v}_{KM} = 0,5$ dm³/s.

*⁴ Abweichung zur Tabelle 2-6: $\vartheta_{KM, ein} = 20$ °C, $\dot{v}_{KM} = 0,5$ dm³/s, $\dot{m}_{Ag} = 906$ kg/h.

Die Temperaturverteilung in Strömungs- und in Längsrichtung zum WÜ ist in Abbildung 2-27 für die Betriebspunkte BP1.1 und BP3.2 exemplarisch darstellt. Hieraus wird wiederum die gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment sowie die genannte Abweichung der Messwerte in den einzelnen Wärmeübertragern erkennbar. Die Messwerte der Kaltseite liegen allgemein über den simulierten Werten. Bei der Heißseite ist diese Abweichung nur in der Mitte des HGWÜ im BP1.1* ersichtlich. Hervorzuheben ist die gute Vergleichmäßigkeit in Längsrichtung, die sich quantitativ

ausdrücken lässt als Temperaturabfall pro Länge HGWÜ in BP1.1* mit 11,7 °C/cm und in MP3.2* mit nur 4,6 °C/cm.

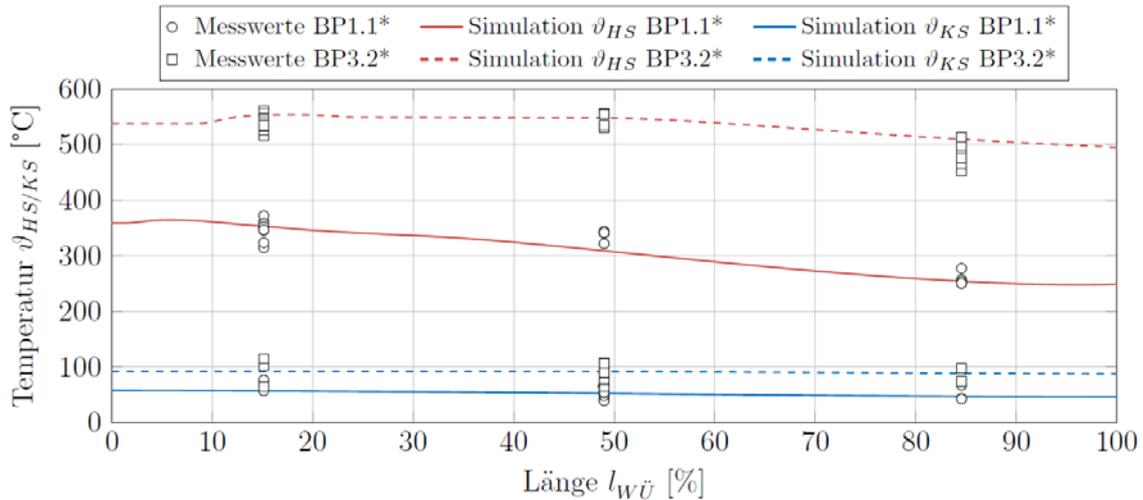


Abbildung 2-27 Vergleich der Heiß- und Kaltseitentemperaturen zwischen der Simulation und dem Experiment des Funktionsmusters HDTEG2 auf dem Heißgasprüfstand in den Betriebspunkten 1.1* und 3.2* (*: Randbedingungen siehe Tabelle 2-12)

Der Vergleich zwischen Simulation und Experiment des TEG-Gegendrucks für alle Betriebspunkte ist in Tabelle 5-4 dem Anhang zu entnehmen. Hierbei konnten die Simulationenwerte mit einer geringen mittleren Abweichung <6 % bestätigt werden. Hervorzuheben ist zudem die Reproduzierbarkeit der Messwerte durch beide baugleichen Funktionsmuster HDTEG1 und HDTEG2. Das Niveau des Gegendrucks ist typisch für Komponenten in Abgasanlagen von Nutzfahrzeugen sehr gering ausgewählt worden, um diesen parasitären Effekt möglichst gering zu halten.

Aufgrund der überwiegend guten bis sehr guten (zumeist >90 %) Übereinstimmungen zwischen Simulation und den Experimenten gilt die ganzheitliche Simulationsumgebung als validiert. Es konnten im Vergleich zum Stand der Technik (vgl. Tabelle 2-3) sehr hohe TEG-Leistungen auch im Experiment bestätigt werden. Anhand des TEG-Kerns mit rund 15,5 kg und einem Volumen von nur 8,3 dm³ lässt sich auf Basis der experimentellen Messwerte eine Leistungsdichte des TEG-Systems von bis zu 174 W/kg und 326 W/dm³ bestimmen. Diese Kennzahlen stellen für TEG-Systeme im Nutzfahrzeug weltweite Spitzenwerte der Technologie dar.

2.7 AP 7: Bewertung und Ausblick

2.7.1 TEG-Potential-Bewertung und Ausblick

Die erzielten Projektergebnisse der TEG-Auslegung für ein innovatives Erdgas-NFZ sind als sehr erfolgreich zu bewerten, da alle Zielsetzungen des Projektes, die anfangs sehr herausfordernd formuliert wurden, erreicht werden konnten. Es wurde weltweit erstmalig eine Amortisationszeit des TEG-Systems von <2 Jahren für NFZ erzielt. Es konnte damit zudem erstmalig aufgezeigt werden, dass TEG-Systeme im SNFZ mit Erdgasmotor wirtschaftlich zum Einsatz kommen können. Im Vergleich zum Stand der Technik konnte gegenüber der Arbeit von Hervas-Blanco et al. [11] eine Steigerung von bis zu 440 %, anhand des Vergleichs der TEG-Leistung, für ein TEG-System im Erdgas-NFZ erzielt werden. Bemerkenswert ist dabei, dass im vorliegenden Projekt insbesondere die Systemkosten und das zusätzliche Gewicht im Gegensatz zur Arbeit von Hervas-Blanco et al. berücksichtigt wurden.

In diesem Projekt wurde als Bewertungsgrundlage ein konventionelles Nutzfahrzeug verwendet. Als zukünftiges Potential würde beispielsweise die Elektrifizierung von Nebenaggregaten den Nutzen des TEG-Systems insbesondere auf der Realfahrstrecke weiter steigern, da damit der elektrische Verbraucherbedarf ansteigt. Hiermit ließen sich nach erster Abschätzung zumindest weitere 0,5 Prozentpunkte der Kraftstoffreduktion, zu den bereits aufgeführten Ergebnissen, erzielen. Es ist zu erwarten, dass sowohl die thermoelektrischen Materialien und Module sowie auch die Wärmeübertrager zukünftig noch bessere Wirkungsgrade und Leistungskennzahlen liefern können. Beispielsweise würde allein eine Steigerung des Wirkungsgrades des eingesetzten Halbleitermaterials des TEM um 25 %, im Vergleich zu dem verwendeten in diesem Projekt, die Kraftstoffreduktion um bis zu weiteren 0,7 Prozentpunkte steigern. Sofern es möglich wird, diese vielversprechende Technologie im Anschluss an dieses Projekt zur Serienreife zu bringen, ist zudem mit deutlichen Kostensenkungen zu rechnen.

2.7.2 Ausblick zukünftiger NFZ-Motoren hinsichtlich Abwärmenutzung

Um die Klimaziele im Abkommen von Paris zu erreichen, hatte das EU-Parlament eine Reduktion der CO₂-Emissionswerte von den schweren Nutzfahrzeugen bis 2030 um 30 % beschlossen. Die dramatische Verschärfung der CO₂-Emissionen stellt eine sehr

große Herausforderung an die Entwicklung der Technologie für Nutzfahrzeuge. Bei den modernen Verbrennungsmotoren werden mehr als 50 % der Energie, die von den in den Zylindern eingespritzten Kraftstoffen freigesetzt werden, ungenutzt in die Umgebung abgegeben. Die Abbildung 2-28 hat ein Sankey-Diagramm für die Aufteilung der eingesetzten Primärenergie im Verbrennungsmotor als Beispiel dargestellt.

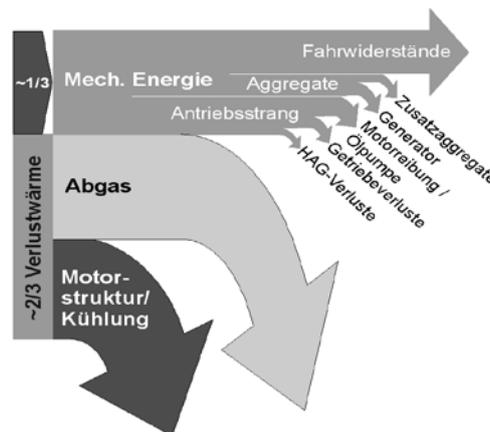
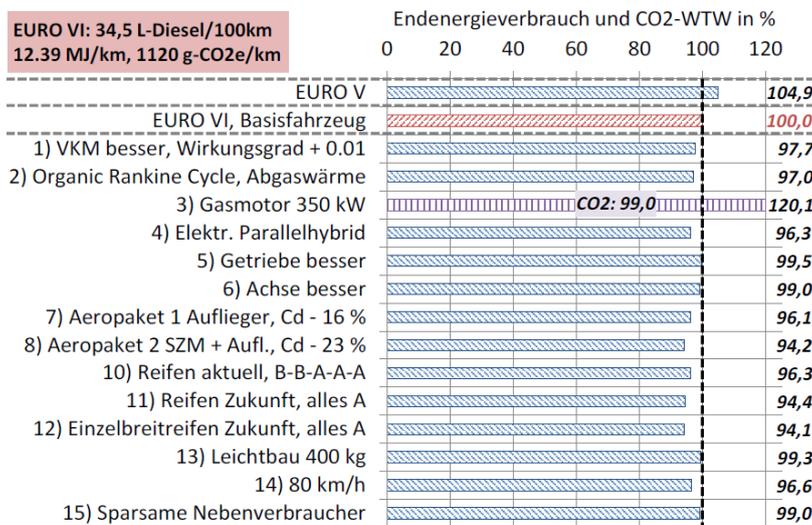


Abbildung 2-28 Aufteilung der eingesetzten Primärenergie im Verbrennungsmotor [12]

Ausgehend von dieser Tatsache können die Restwärmenutzungstechnologien, die sich auf unterschiedliche Ansätze stützen, z. B. Seebeck-Effekt (thermoelektrische Generatoren, TEG), Rankine-Prozess (ORC) und Turbocompound, durchaus beim Erreichen der strengeren gesetzlichen Vorschriften für CO₂-Emissionen beitragen.

Die zukünftigen Nutzfahrzeuge werden mit umfangreichen neuen Technologien optimiert. In einer Studie [10] vom Umweltbundesamt wurden unterschiedliche zukünftige Maßnahmen zur Effizienzerhöhung der schweren Nutzfahrzeuge gegenübergestellt. Dabei wurde die Simulation-Software VECTO eingesetzt, um die Potentialanalysen zu verwirklichen. Die Abbildung 2-29 zeigt die Potentiale der CO₂-Reduzierung der ausgewählten zukünftigen Technologien für die schweren Nutzfahrzeuge.



Die dargestellten Balken zeigen den geänderten Endenergieverbrauch. Wo aufgrund des Einsatzes alternativer Energieträger (statt Diesel) die Änderung der Treibhausgasemissionen (CO₂-Äquivalente well-to-wheel) von der Änderung des Energieverbrauchs abweicht, sind entsprechende Zahlenangaben separat ausgewiesen.

Abbildung 2-29 Sattelzug auf *Long Haul Cycle* (dt. Fernverkehr), Einzelmaßnahmen [10]

Die Abbildung 2-30 stellt die Analysenergebnisse der Studie für die Änderungen der Fahrzeugkosten eines Sattelzugs mit 40 t GG im Fernverkehr dar.

Im Hinblick auf die Anwendung von Restwärmenutzungstechnologie können im Allgemeinen zwei Prinzipien bei der Optimierung des Nutzfahrzeugmotors verfolgt werden. Bei dem ersten Prinzip kann die Energiebilanz des Motors so optimiert bzw. eingestellt werden, dass die Abwärme ins Kühlmittel reduziert und dafür die Abgaswärme vergrößert wird. Ein Beispiel dafür ist der Einsatz einer neuen Generation von Kolbenbeschichtungen in Nutzfahrzeug-Dieselmotoren. Die Firma Mahle hat die Technologie in [13] vorgestellt. Außerdem kann das Thermomanagement so optimiert werden, dass mehr Kühlpotential des Kühlsystems für Restwärmenutzungssysteme bereitgestellt wird. Ein Beispiel dafür wird in der Veröffentlichung von der Firma Mahle [14] dargestellt.

Die Reduktion der CO₂-Emissionen für schwere Nutzfahrzeuge um 30 % bis zum Jahr 2030 ist eine große Herausforderung. Die Erreichung dieser Zielwerte ist immer nur mit einer Kombination von Technologien möglich, z. B. Nutzung von CNG/LNG, aerodynamische Maßnahmen und Abgasrestwärmenutzung. In solchen Kombinationen kann ein TEG ein gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis aufweisen und es ist die Senkung der CO₂-Emissionen eines Fahrzeuges um 30 % möglich.

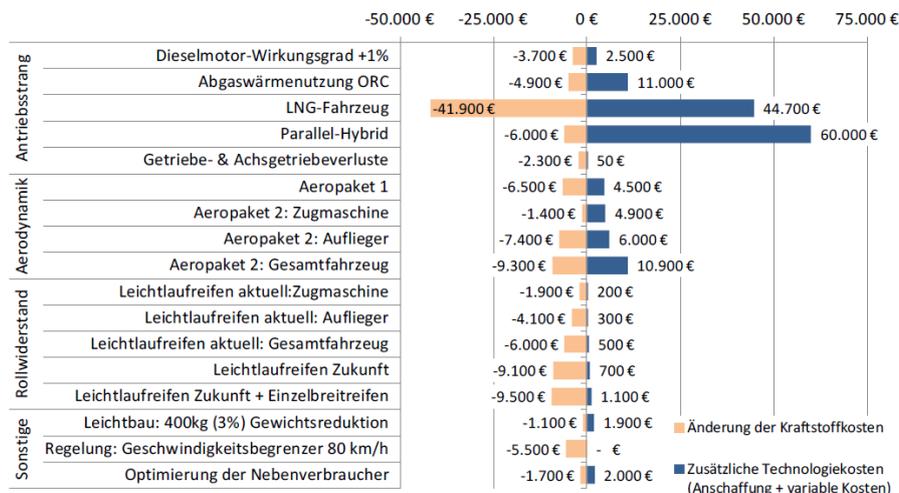


Abbildung 2-30 Änderung der Fahrzeugkosten eines Sattelzugs 40 t im Fernverkehr bis 2018

[10]

Dies wird aber zur Erreichung der CO₂-Flottenziele nicht ausreichen, da auch 2030 absehbar Dieselantriebe verkauft und mit höheren CO₂-Emissionen in die Flottenemissionen eingehen werden. Da nicht absehbar ist, welche Flottenanteile an Brennstoffzellen-Antrieben (mit Wasserstoff: H₂) bis 2030 vorliegen, ist gegenwärtig auch der Einsatz von Wasserstoff im Verbrennungsmotor wieder im Fokus. Da dort in der Abgasnachbehandlung der Oxidations-Katalysator und der Partikelfilter entfallen, wird sich eine verbesserte Einbausituation für einen TEG ergeben. Eine Abschätzung der Temperaturrandbedingungen für einen TEG in einem H₂-Motor ist nur schwer möglich. Grundsätzlich führt Wasserstoff zunächst zu einer deutlich heißeren Verbrennung, was jedoch i. A. über eine starke Gemischverdünnung kompensiert oder überkompensiert wird. Der Grad der Gemischverdünnung ergibt sich aus der Auslegung des Gesamtmotors. Grundsätzlich ist aber davon auszugehen, dass es bei der H₂-Verbrennung auch große Potentiale für die Abgaswärmenutzung geben sollte. Die Projektergebnisse zeigen große Potentiale für die Technologie der Thermoelektrik zur Effizienzsteigerung beim untersuchten Erdgasmotor auf. Zudem deuten die vielversprechenden Ergebnisse auch auf einen lohnenswerten Einsatz bei Dieselmotoren sowie für die Verbrennung von Wasserstoff und anderen synthetischen, regenerativ erzeugten, Kraftstoffen hin.

3 Reflexion

Zum Abschluss des Projektes wurden die Arbeiten entsprechend der ursprünglichen Vorhabensbeschreibung in AP 1 bis AP 7 dokumentiert. Teilergebnisse wurden bereits im Zwischenbericht I und II dargestellt und sind somit nicht erneut in der Ausführlichkeit aufgeführt. In diesem Abschlussbericht wurden alle Berichte und Arbeitspakete zusammengefasst.

Die erzielten Projektergebnisse der TEG-Auslegung für ein innovatives Erdgas-NFZ können vollumfassend als positiv bewertet werden. Die Effizienz von modernen schweren Nutzfahrzeugen durch den Einsatz eines neuartigen Abwärmenutzungssystems in Form eines TEG konnte simulativ und anhand von realisierten Funktionsmustern demonstriert werden. Es wurde die Kraftstoffreduktion simulativ von bis zu 2,5 % ermittelt und die Systemamortisation in <2 Jahren erreicht. Abhängig vom Fahrscenario und den Lastpunkten ist dieses bereits nach einem Jahr im Bereich des Möglichen. Dabei wurde erstmalig ein nutzfahrzeug-spezifisches TEG-System mit Hilfe eines ganzheitlichen Entwicklungsansatzes entwickelt und das Potential dieser Technologie für heutige und zukünftige Nutzfahrzeuge (weitere +1,2 Prozentpunkte, Kraftstoffreduktion bis zu 3,7 %) dargestellt. Im Projekt wurde eine hochintegrierte TEG-Bauweise für die Nutzfahrzeuganwendung entwickelt und erstmalig realisiert, da sie viele Vorteile für eine potentielle Serienfertigung bietet sowie den Stand der Technik in vielerlei Hinsicht verbessert. Bei der Hardwarerealisierung in Form eines Funktionsmusters wurden über 2,5 kW elektrische Leistung gemessen, was 98 % der Simulationswerte und damit einer guten Übereinstimmung von der Simulation entspricht.

Durch die enge Zusammenarbeit der Projektpartner DLR FK und FKFS bei der Systementwicklung konnten diese Fortschritte erreicht und der TEG speziell auf die Vorteile und Anforderungen des Referenzfahrzeuges ausgelegt werden. Durch die gewählte Vorgehensweise konnten die Expertise, Schwerpunkte und fachlichen Ausrichtungen der beteiligten Forschungseinrichtungen optimal genutzt werden. Des Weiteren wurde durch die intensive Zusammenarbeit die Vernetzung zwischen den Instituten weiter verbessert.

Ein großer Dank gilt an dieser Stelle dem Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg, das das Projekt unterstützt und gefördert hat. Dem

DLR-Technologiemarketing ist es zu verdanken, dass durch eine Anschlussfinanzierung die Hardwarerealisation vom zweiten Funktionsmuster ,vollständig ausgestattet mit TEM, im Maßstab 1:1 realisiert werden konnte. Zusätzlich soll der Firma LG Chem, die im Rahmen einer Zusammenarbeit mit dem DLR Institut für Fahrzeugkonzepte die thermoelektrischen Module zur Verfügung gestellt und auf die Expertise beim TEG-Aufbau vertraut hat, gedankt werden. Die Unterstützung und Kompetenzeinbringung aller weiteren beteiligten Partner und Firmen insbesondere in Baden-Württemberg soll hiermit der Dank ausgesprochen sein.

Die in diesem Projekt gewonnenen Erkenntnisse sollen als fundierte Grundlage für zukünftige Projekte der Automobilindustrie dienen, den Forschungsstandort Deutschland stärken sowie der Vorreiterrolle Baden-Württembergs in Innovation in der Automobilbranche dienlich sein.

Zusammenfassend konnte im Projekt ein neuartiger Thermoelektrischer Generator für ein innovatives Erdgas-NFZ entwickelt werden. Dabei konnten tiefe wissenschaftliche Erkenntnisse beim Gesamtsystem, dem Systemaufbau des TEG sowie bei der Auslegung der Komponente Thermoelektrisches Modul erarbeitet werden. Aus diesen sind zahlreiche Veröffentlichungen (siehe Kapitel 2.0) entstanden. Die Bearbeitung des Projektes zeigte, dass genügend Potential für eine Fortführung des Projektes bzw. der Aufgabe besteht. Die Ergebnisse des Projektes werden der Thermoelektrik auf dem Weg ins Fahrzeug helfen.

4 Literaturverzeichnis

- [1] Lastauto Omnibus, „Messfahrten 1967–2012,“ *Lastauto Omnibus*, 04/2014.
- [2] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 03 08 2017. [Online]. Available: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/mks-strategie-final.pdf?__blob=publicationFile.
- [3] LNG Blue Corridors, „Demonstration of heavy duty vehicles running with liquefied methane,“ 03 08 2017. [Online]. Available: <http://lngbc.eu/>.
- [4] C. Stiewe und E. Müller, „Anwendungspotential thermoelektrischer Generatoren in stationären Systemen – Chancen für NRW: Studie im Auftrag des Ministeriums für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen,“ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Köln, 2015.
- [5] L. Olsson und B. Andersson, „Kinetic Modelling in Automotive Catalysis,“ *Topics in Catalysis*, 04/2004.
- [6] Holger, Bollig, Anderson und Hochmuth, „A discussion of transport phenomena and three-way kinetics of monolithic converters,“ *Chemical Engineering Science*, 2006.
- [7] C. Häfele, „Entwicklung fahrzeuggerechter Thermoelektrischer Generatoren zur Wandlung von Abgaswärme in Nutzenergie,“ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Forschungsbericht DLR 2016-08, Köln, 2016.
- [8] C. Hagelüken, *Autoabgaskatalysatoren*, Renningen: Expert Verlag, 2016.
- [9] VECTO, „Standarddaten 07/2014,“ 2014. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/vecto_en. [Zugriff am 18 08 2018].

- [10] F. Dünnebeil, C. Reinhard, U. Lambrecht und A. Kies, „Zukünftige Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung und Treibhausgasminderung bei schweren Nutzfahrzeugen,“ *Studie Umwelt Bundesamt*, 04/2015.
- [11] E. Hervas-Blasco, E. Navarro-Peris, M. Rosa und J. Corberán, „Potential fuel saving in a powertrain derived from the recovery of the main energy losses for a long haul european mission,“ *Energy Conversion and Management*, Nr. 150, p. 485–499, 2017.
- [12] J. Liebl und A. Eder, „Wärmemanagement - ein Beitrag zu BMW Efficient Dynamics,“ *Wärmemanagement des Kraftfahrzeugs VI.*, 2008.
- [13] Mahle, „Kolbenbeschichtung,“ *MTZ*, 12/2018.
- [14] R. Lutz, A. Kleber und E. Pantow, „Potentialuntersuchung zur indirekten Ladeluftkühlung bei Nutzfahrzeugen,“ *Ladungswechsel im Verbrennungsmotor*, 2016.

5 Anhang

5.1 Gleichungen

- Die Wärmekonvektion, d. h. Übertragung von Wärme durch Mitführung in bewegten Medien bzw. Strömungen, wird über den Wärmestrom \dot{Q} beschrieben:

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p\Delta T = \dot{m}c_p(\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad (1)$$

Dabei stellt \dot{m} den Massenstrom, c_p die spezifische Wärmekapazität des Mediums bei konstantem Druck und ΔT die Temperaturdifferenz sowie ϑ_i die jeweiligen Temperaturen dar.

- Der Exergieströme \dot{E} werden durch die Multiplikation des Wärmestroms mit dem Carnot-Wirkungsgrad n_c bestimmt:

$$\dot{E} = \dot{Q}n_c = \dot{Q}\left(1 - \frac{T_k}{T_h}\right) \quad (2)$$

Der Carnot-Wirkungsgrad stellt den höchstmöglichen theoretischen Wirkungsgrad bei der Umwandlung von thermischer in mechanische Energie dar, bei Berücksichtigung der Temperatur der Wärmequelle T_h bzw. der Wärmesenke T_k . Zur qualitativen Bewertung ist er aussagekräftig, hat aber quantitativ einen geringen praktischen Wert.

- Der Carnot-Wirkungsgrad ist nur dann zutreffend, wenn die Temperatur der Wärmequelle und -senke konstant bleibt, was üblicherweise nicht der Realität entspricht. In einem TEG basierten Abwärmenutzungssystem erfährt die Wärmequelle während des Wärmeaustauschprozesses einen Temperaturabfall, während die Wärmesenke erwärmt wird. Dafür kann der realistischere Dreiecksprozess-Wirkungsgrad n_{Dr} eingeführt werden:

$$n_{Dr} = 1 - \frac{\ln\left(\frac{T_h}{T_k}\right)}{\frac{T_h}{T_k} - 1} \quad (3)$$

- Für die Integration des TEG ins Motorkühlsystem stehen dennoch Hoch- und Niedrigtemperaturkreisläufe zur Verfügung. Die Wärmeabfuhr vom TEG in den Kühlkreislauf kann prinzipiell mit der folgenden Gleichung berechnet werden.

$$\dot{Q}_{Zu_Potential} = c_{p,KM} \cdot \dot{m}_{KM} \cdot (T_{KM,aus} - T_{KM,ein}) \quad (4)$$

Dabei ist $\dot{Q}_{Zu_Potential}$ die Wärmemenge, die maximal ins Kühlsystem zugeführt werden darf. c_{p_KM} ist die spezifische Wärmekapazität des Kühlmittels. \dot{m}_{KM} ist der Massenstrom des Kühlmittels. $T_{KM,aus}$ und $T_{KM,ein}$ sind Temperaturen des Kühlmittels am Ein- bzw. Austritt von der Wärmezufuhrstelle. $c_{p,KM}$ ist abhängig von der Kühlmitteltemperatur und wird im GT-Power durch Fitting eines Polynoms berechnet. $T_{KM,ein}$ ist sowohl abhängig von der Integrationsposition des TEG ins Kühlsystem als auch von den anderen Wärmequellen des Kühlsystems, wie z. B. Verbrennungsmotor und Ladeluftkühler.

- Die elektrische Leistung P_{el} eines bzw. mehrerer Thermoelektrischer Module wird durch den Modulwirkungsgrad η_{TEM} und die Höhe des Wärmestroms \dot{Q} [W] von der Heiß- zur Kaltseite bestimmt:

$$P_{el} = \eta_{TEM} \cdot \dot{Q} \quad (5)$$

- Der Wirkungsgrad kann, unter der Annahme der maximalen Ausgangsleistung, anhand der Gütezahl Z , der Heiß- T_h und Kaltseitentemperatur T_k sowie deren mittleren Temperatur $\bar{T} = \frac{T_h + T_k}{2}$ beschrieben werden als:

$$\eta_{TEM} = \eta_c \cdot \frac{1}{\frac{4}{Z \cdot T_h} + 2 - \frac{1}{2} \frac{T_h - T_k}{T_h}} \quad (6)$$

5.2 Zusätzliche Ergebnisse

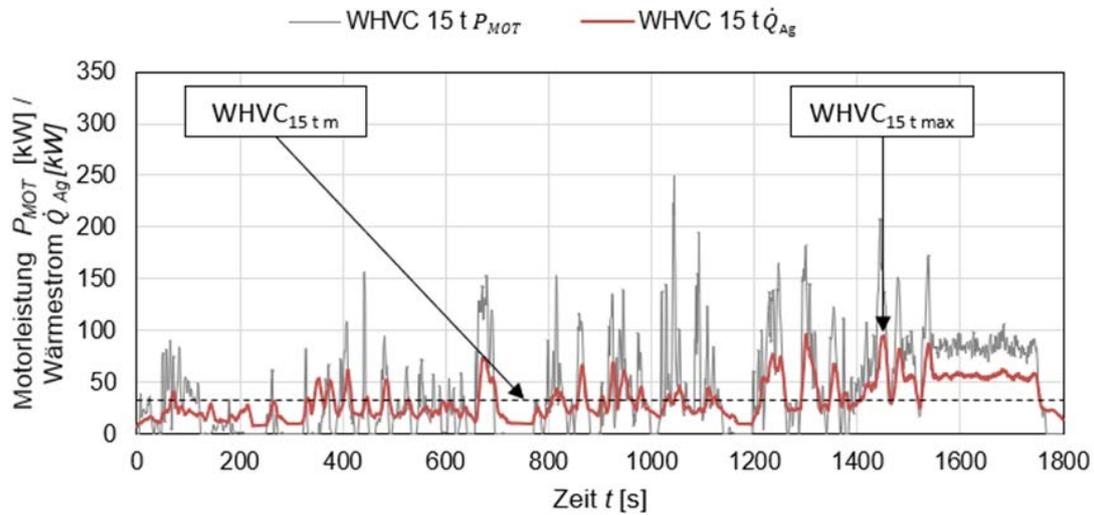


Abbildung 5-1 Ergebnis der Potentialanalyse anhand der Motorleistung und der verfügbaren Abgasenthalpie in der AGN für das Erdgas-NFZ im WHVC mit 15 t GG

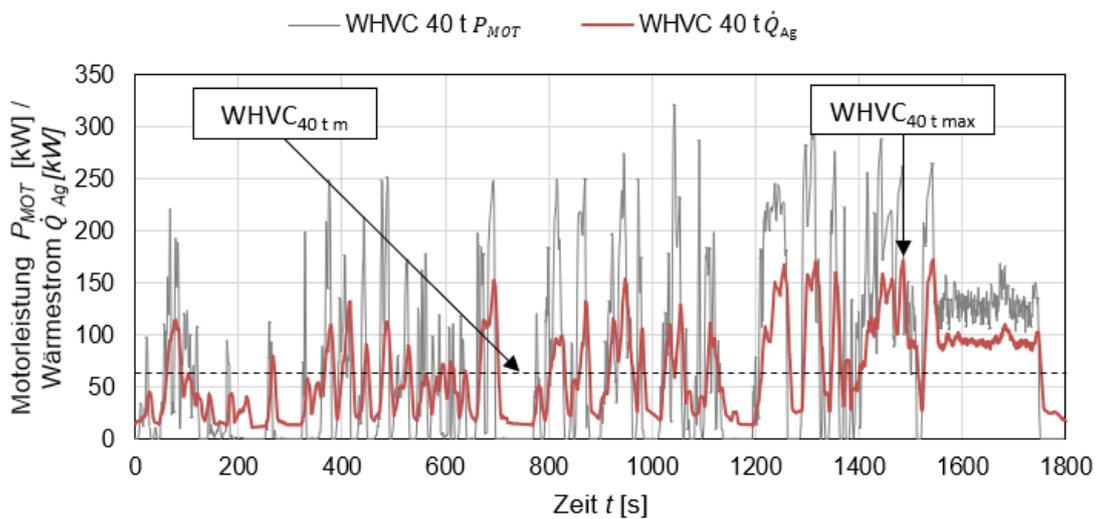


Abbildung 5-2 Ergebnis der Potentialanalyse anhand der Motorleistung und der verfügbaren Abgasenthalpie in der AGN für das Erdgas-NFZ im WHVC mit 40 t GG

Tabelle 5-1 Technische Daten des Forschungsmotors Cursor-13-Gasmotors

Größen	Einheit	Werte
Nennleistung P_{Nenn}	[kW]	338 @ 1900 1/min
Max. Drehmoment M_{max}	[Nm]	2000
Kolbenhub h	[mm]	150
Bohrung d_B	[mm]	135
Hubraum V_h	[L]	12,9
geom. Verdichtungsverhältnis ϵ_{geo}	[-]	12:1
Anzahl der Ventile (EV/AV)	[-]	4 (2/2)

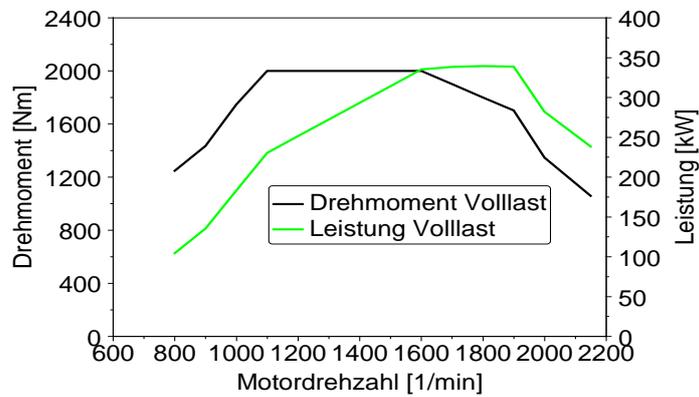


Abbildung 5-3 Volllastkurve des Cursor-13-Gasmotors

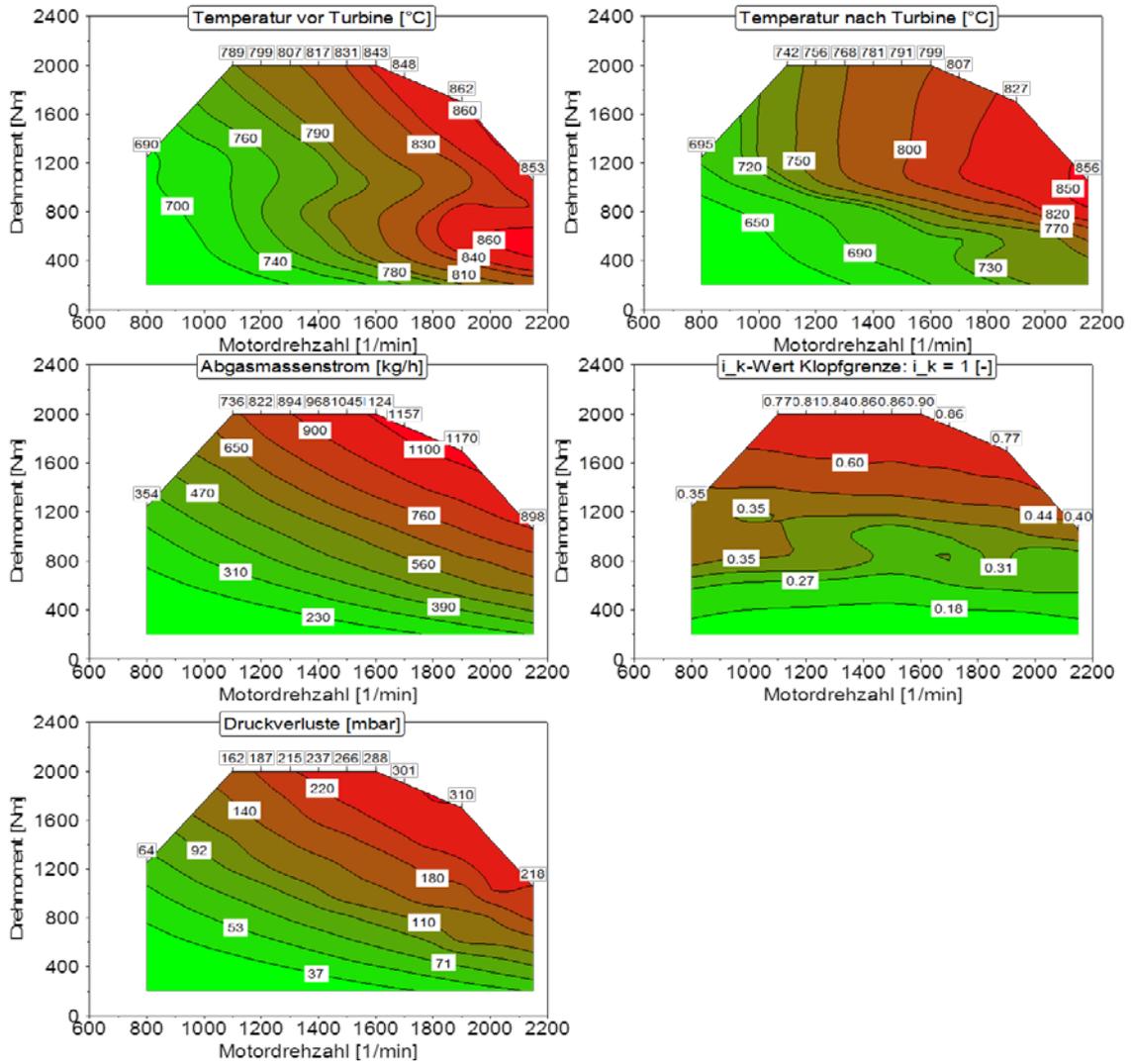


Abbildung 5-4 Simulationsergebnisse für Abgastemperaturen und -massenströme, i_k -Wert, Druckverluste im Drei-Wege-Katalysator in Abhängigkeit von Motordrehzahl und -drehmomenten

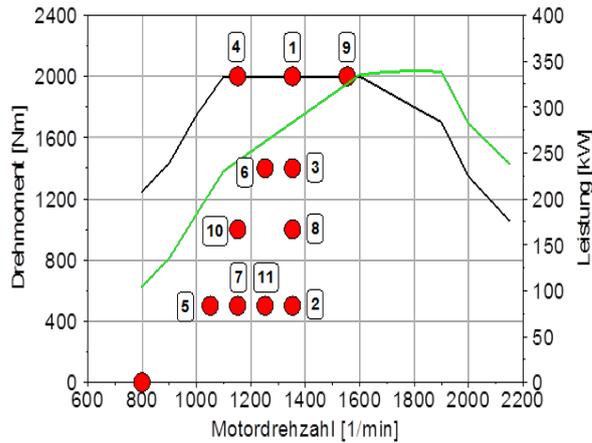


Abbildung 5-5 WHSC-Betriebspunkte

Betriebspunkt (BP)	Drehzahl [1/min]	Drehmoment [Nm]
1	1353	2000
2	1353	500
3	1353	1399
4	1152	2000
5	1052	500
6	1253	1399
7	1152	500
8	1353	1000
9	1555	2000
10	1152	1000
11	1253	500
Leerlauf	800	0

Tabelle 5-2 WHSC-Betriebspunkte

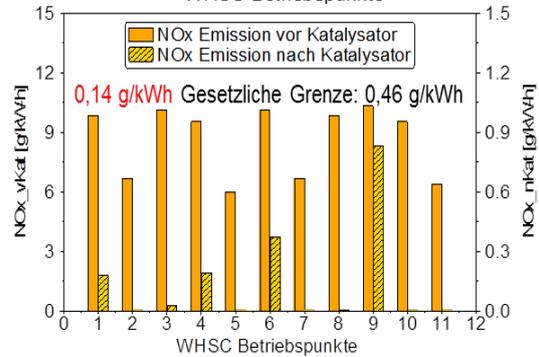
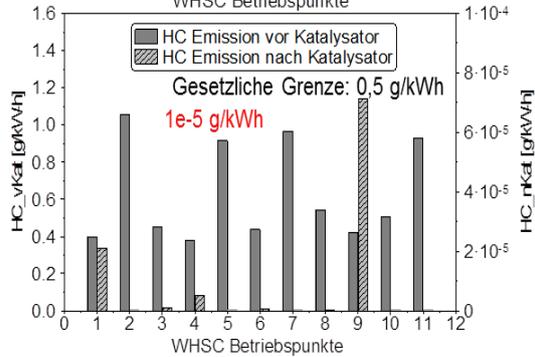
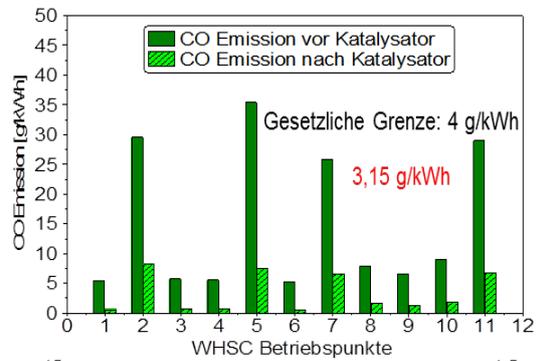
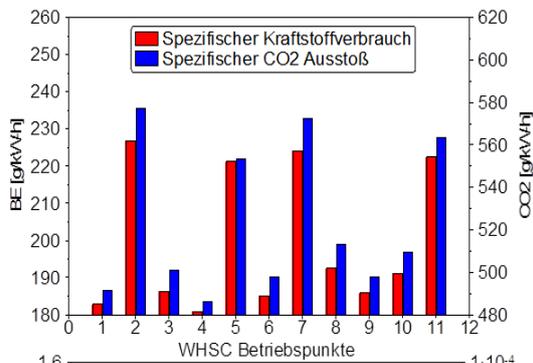


Abbildung 5-6 Simulationsergebnisse für spezifische Kraftstoffverbräuche und Abgasemissionen in WHSC-Betriebspunkten

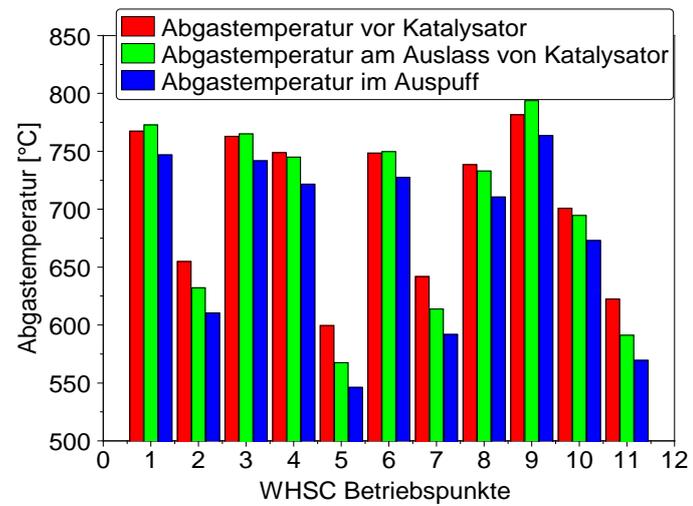


Abbildung 5-7 Simulationsergebnisse für die Abgastemperaturen an unterschiedlichen Stellen in der Abgasstrecke des Cursor-13-Gasmotors

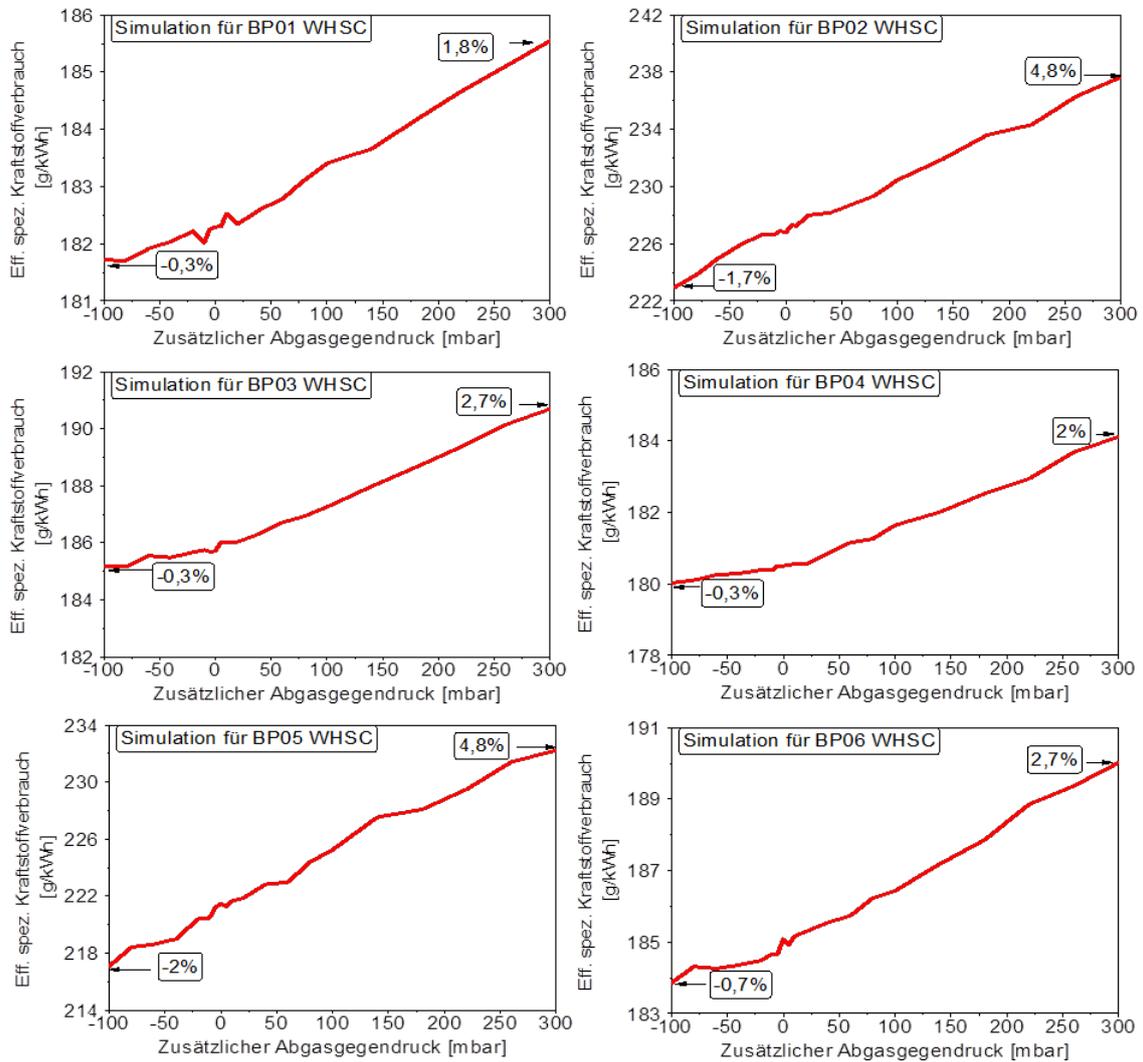


Abbildung 5-8 Simulative Untersuchungen für den Einfluss des zusätzlichen Abgasgedrucks auf den spezifischen Kraftstoffverbrauch bei den WHSC-Betriebspunkten in den BP01-06

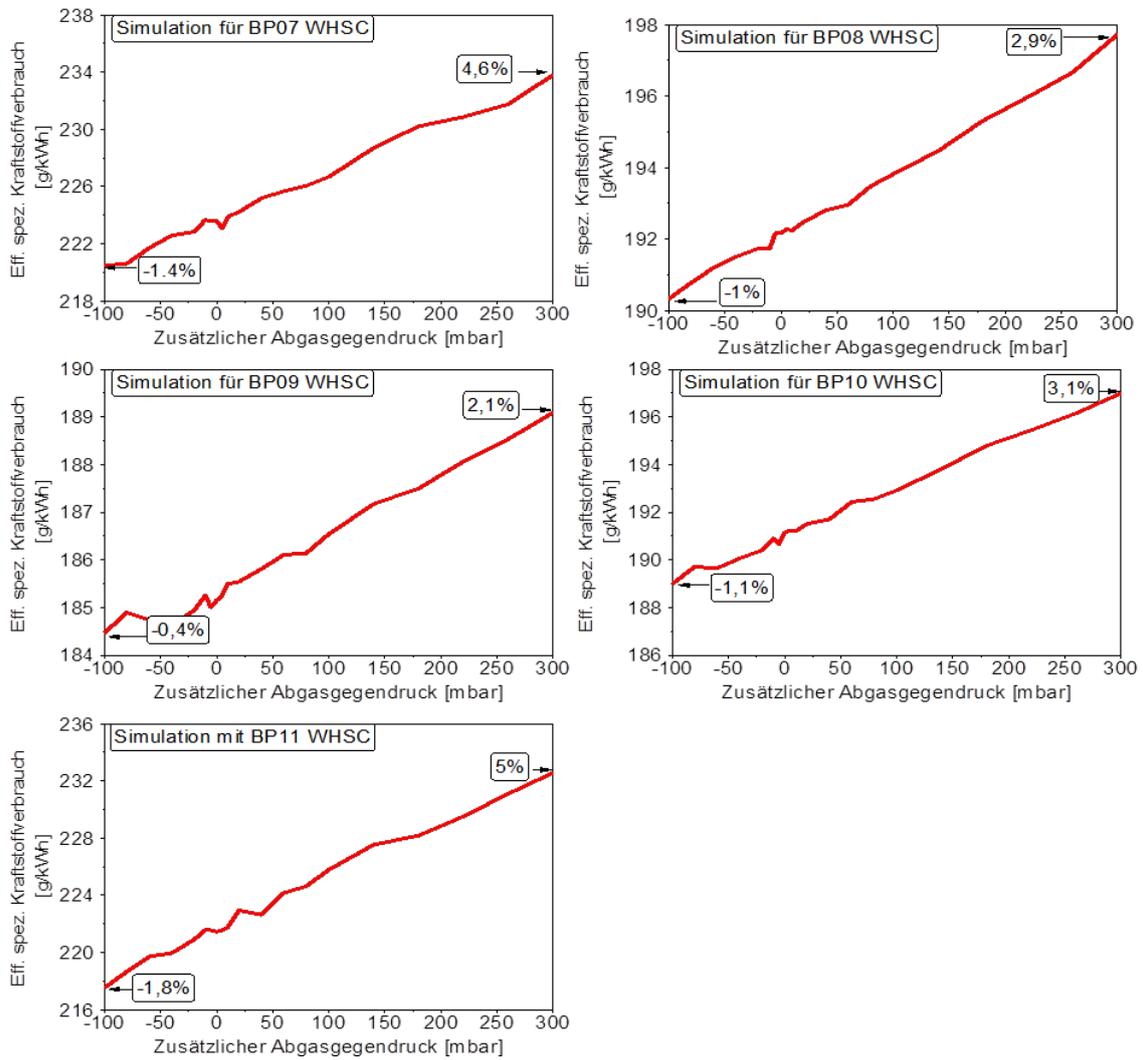


Abbildung 5-9 Weiterführung von Abbildung 5-8 für BP07-11

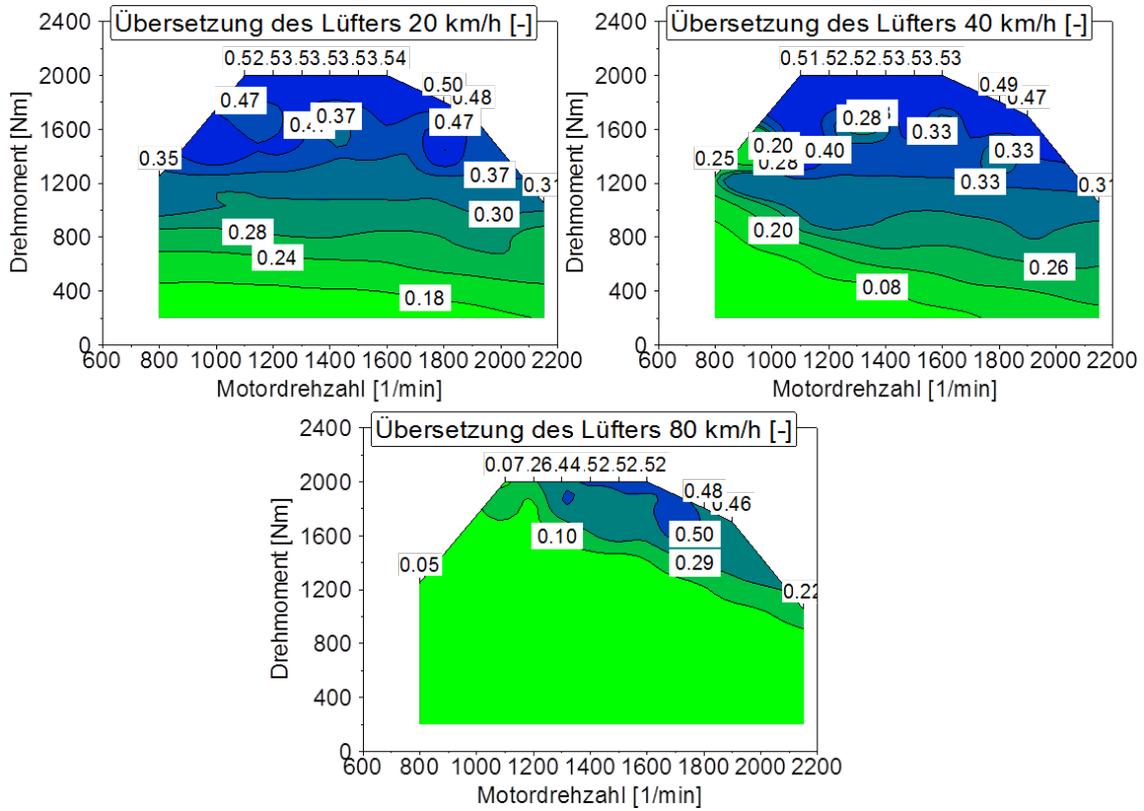


Abbildung 5-10 Übersetzungen des Lüfters bei den verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten (Umgebungstemperatur von 20 °C; trocken – 0 % Luftfeuchtigkeit; Luftdruck von 1,013 bar)

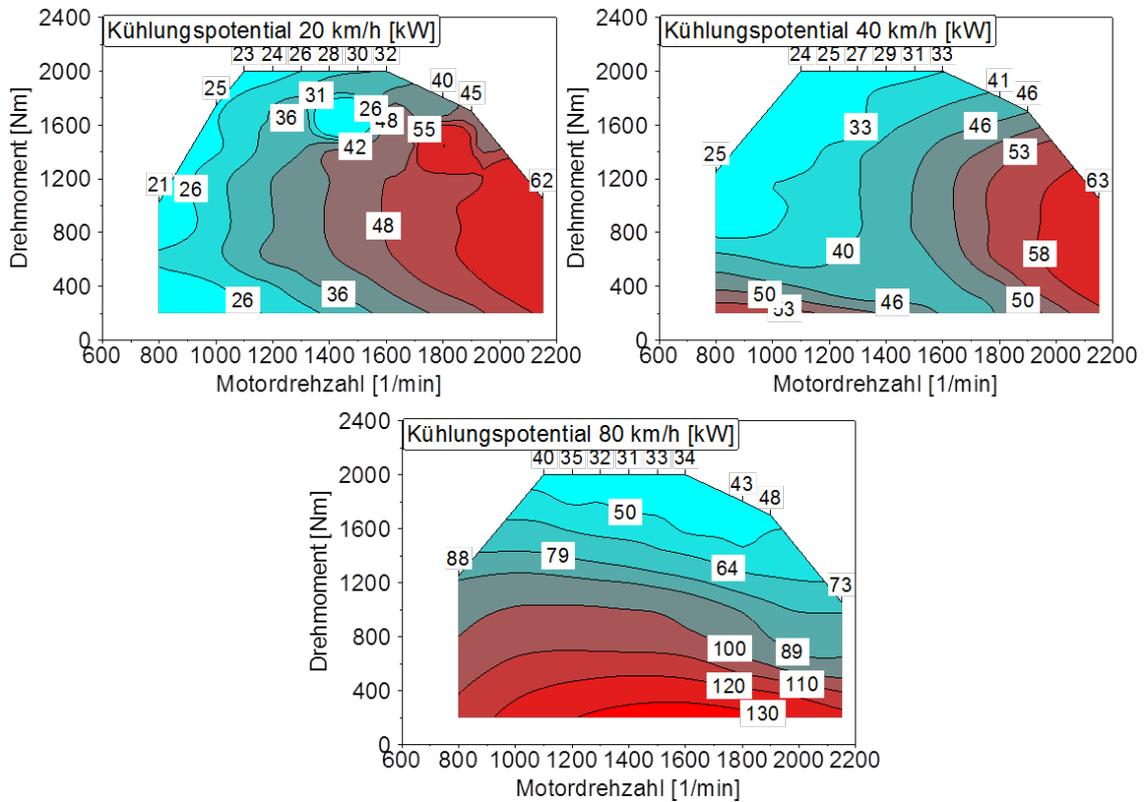


Abbildung 5-11 Simulationsergebnisse für Kühlungspotentiale des Kühlsystems bei Verschaltung des TEG nach dem HT-Kühler mit Kühlmitteltemperatur am Motorauslass von 100 °C als Zielgröße bei den verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten unter Umgebungstemperatur von 20 °C

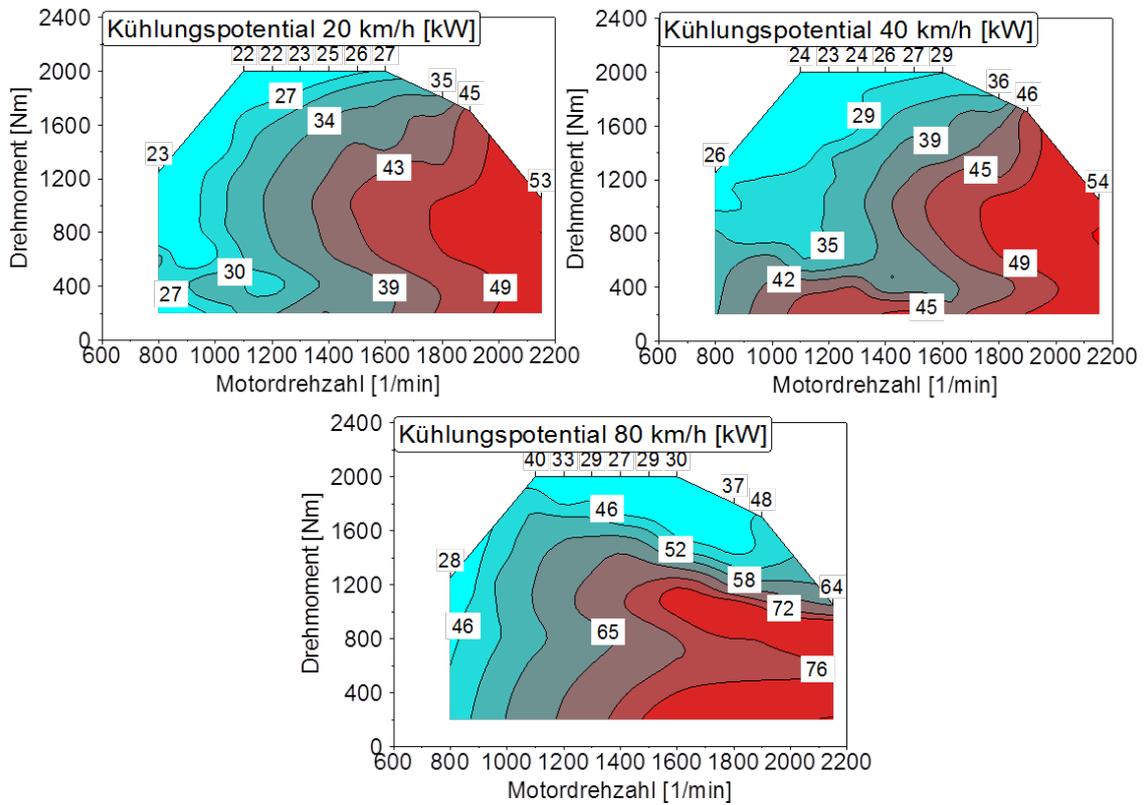


Abbildung 5-12 Simulationsergebnisse für Kühlungspotentiale des Kühlsystems bei Verschaltung des TEG nach dem Ladeluftkühler mit Kühlmitteltemperatur am Motorauslass von 100 °C als Zielgröße bei den verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten unter Umgebungstemperatur von 20 °C

Tabelle 5-3 NFZ-Fahrzeugdaten für die Simulation

Information/ Parameter	Einheit	Werte
Getriebe	[-]	ZF 12 AS 2330 TD
Reifen	[-]	315/80 R22,5
Strömungswiderstandskoeffizient	[-]	0,6
Rollwiderstandsbeiwert	[-]	0,01
Stirnfläche	[m ²]	7,12
Fahrzeugmasse mit Zuladung	[kg]	40 000

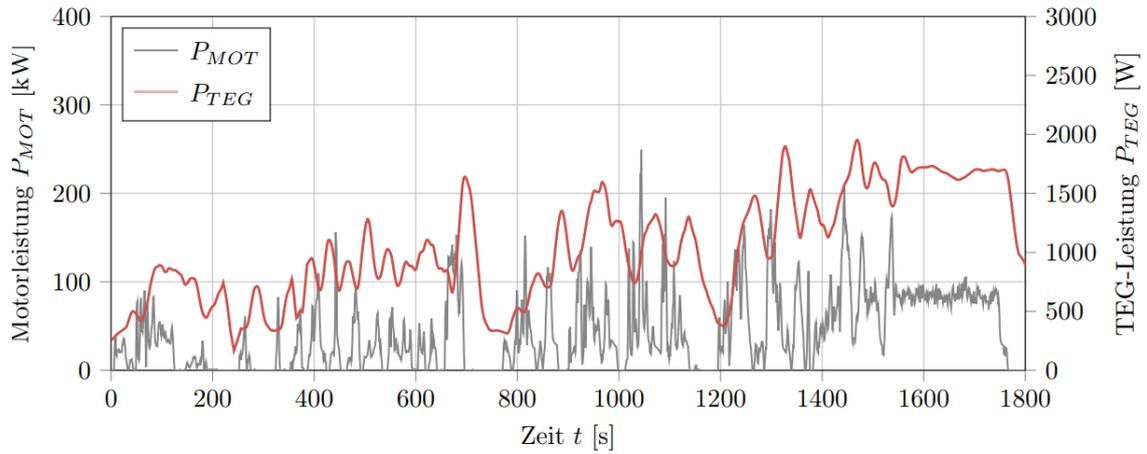


Abbildung 5-13 Ergebnis der TEG-Leistung im WHVC mit 15 t GG beim Ergebnisdesign mit Zielsetzung für minimale TCO (TEG-System integriert am Ausgang der AGN und im NT-KMK)

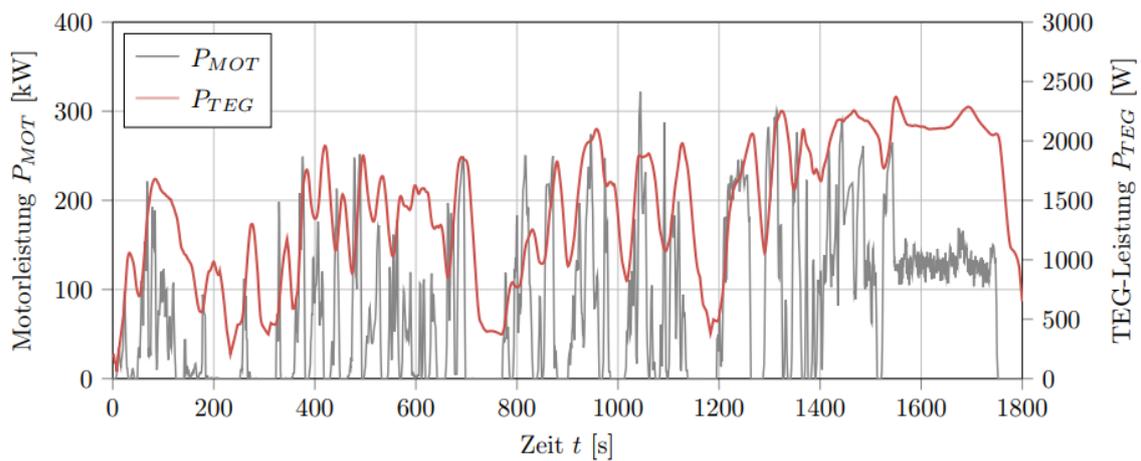


Abbildung 5-14 Ergebnis der TEG-Leistung im WHVC mit 40 t GG beim Ergebnisdesign mit Zielsetzung für minimale TCO (TEG-System integriert am Ausgang der AGN und im NT-KMK)

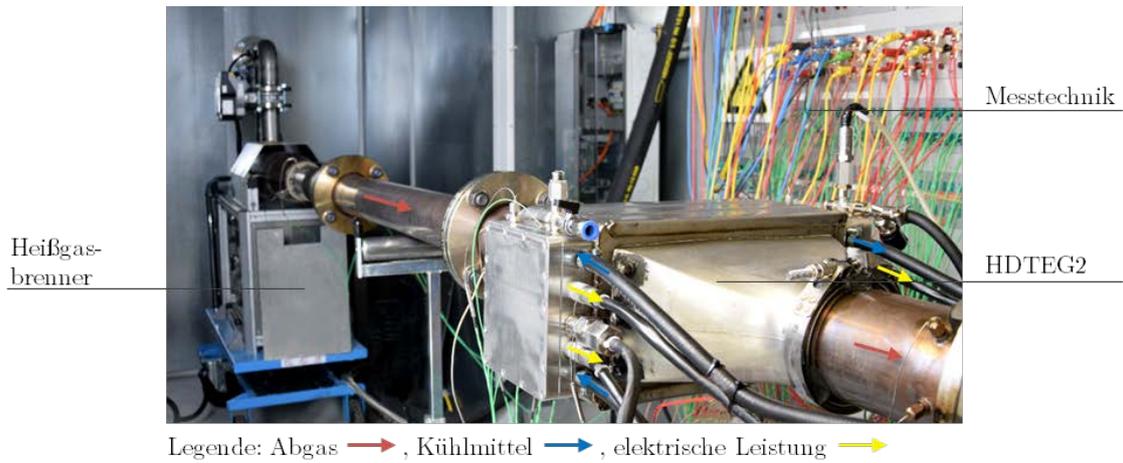


Abbildung 5-15 Funktionsmuster HDTEG2 auf dem DLR eigenen Heißgasprüfstand

Tabelle 5-4 Vergleich des Heißgasgedrucks Δp_{TEG} zwischen der Simulation und der Experimente der Funktionsmuster HDTEG1 und HDTEG2 auf dem Heißgasprüfstand

BP*		1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2
Bezeichnung	Einheit	WHVC _{15 t,m}	WHVC _{15 t,max}	WHVC _{40 t,m}	WHVC _{40 t,max}	SHHS _{40 t,m}	SHHS _{40 t,max}
Simulation	[mbar]	2,3	11,5	5,5	20,8	9,5	29,3
HDTEG1	[mbar]	2,3	12,7	6,0	21,0	10,4	25,9
HDTEG2	[mbar]	2,1	12,3	6,5	22,6	10,6	28,7
min. Abweichung	[%]	-2,0	6,5	8,3	1,0	8,7	-2,1

* Zwischen den Experimenten variieren die Randbedingungen im Bereich von max. $\mp 1,5$ %. Die Messabweichung wird zur besseren Übersichtlichkeit der Ergebnisse nicht angegeben.