

Experimentelle Fahrzeug–Untersuchungen im Hinblick auf exergetische Potentiale und Gesamtsystemrückwirkungen bei der Integration Thermoelektrischer Generatoren

Christian Häfele, Michael Schier, Steffen Hahn, Tobias Weiler, Horst Friedrich

Abstract

The recuperation of waste heat fluxes by thermoelectric generators (TEG) is a promising technology for the reduction of fuel consumption of combustion–engined vehicles. At the institute of vehicle concepts of the German Aerospace Center (DLR) such generators are developed, integrated into the vehicle architecture and tested. The present article initially reports on the analysis of energetic and exergetic potentials of different installation positions and driving conditions. These were defined by experimental investigation of the thermodynamic conditions of exhaust and coolant. In a further step the interactions between TEG and vehicle system have been looked at more closely, whereby special attention was paid to the effects of back–pressure and electrical power injection on the fuel consumption. To be able to analyse the particular influences separated from each other and in different amount, an exhaust flap respectively an electrical power supply have been used representatively for the TEG. Beyond that on the development of two functional TEG–models is reported. By means of these a further step on the way of TEG–industrialisation could be shown.

Kurzfassung

Die Rekuperation von Abwärmeströmen mittels Thermoelektrischer Generatoren (TEG) ist eine vielversprechende Technologie zur Verbrauchsreduktion verbrennungsmotorisch betriebener Fahrzeuge. Am Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) werden solche Generatoren entwickelt und in die Fahrzeugarchitektur integriert und getestet.

Im vorliegenden Beitrag wird zunächst von der Analyse der energetischen und exergetischen Potentiale unterschiedlicher Einbaupositionen und Fahrzustände berichtet. Diese wurden auf Basis von experimentellen Untersuchungen der thermodynamischen Zustände von Abgas und Kühlwasser bestimmt. In einem weiteren Schritt wurden die Wechselwirkungen zwischen TEG und Fahrzeugsystem genauer untersucht, wobei besonderes Augenmerk auf den Auswirkungen von Abgasgedruck und elektrischer Leistungseinspeisung auf den Kraftstoffverbrauch lag. Um dabei die jeweiligen Einflüsse isoliert voneinander und in unterschiedlicher Ausprägung betrachten zu können, wurde repräsentativ für den TEG eine Abgasklappe bzw. ein externes elektrisches Netzteil verwendet.

Darüber hinaus wird von der Entwicklung zweier TEG–Funktionsmuster berichtet, anhand derer ein Fortschritt in Richtung Industrialisierung der TEG–Komponente aufgezeigt werden konnte.

1. Einleitung

Trotz der zunehmenden Elektrifizierung der Fahrzeugantriebe ist zu erwarten, dass verbrennungsmotorisch betriebene Fahrzeuge bzw. Hybridfahrzeuge noch über Jahrzehnte die Hauptlast im Personen- und Güterverkehr tragen werden. Dabei gewinnt deren Energieeffizienz gerade vor dem Hintergrund steigender Primärenergiekosten sowie der Forderung nach Reduktion des CO₂-Ausstoßes zunehmend an Bedeutung.

Zwar wurden in der Vergangenheit bereits beachtliche Erfolge erzielt, dennoch gehen nach wie vor ca. 2/3 der Kraftstoffenergie in Form von Wärme verloren. Die Nutzung eines Teils dieser Verlustenergie durch Wandlung in elektrische Energie mittels Thermoelektrischer Generatoren (TEG) scheint gerade auch vor dem Hintergrund einer stetig wachsenden Zahl von elektrischen Verbrauchern im Fahrzeug als attraktive Lösung.

Am Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt werden fahrzeuggerechte TEG entwickelt und in die Fahrzeugarchitektur integriert und getestet. Im vorliegenden Beitrag wird von der experimentellen Untersuchung des institutseigenen Versuchsfahrzeugs berichtet. Dabei wurden zunächst die Abgastemperaturen an unterschiedlichen potentiellen Einbaupositionen in der Abgasanlage ermittelt und danach die zugehörigen exergetischen Potentiale bestimmt. Darüber hinaus sollten die unterschiedlichen Einflüsse eines TEG auf den Kraftstoffverbrauch bestimmt werden. Besonderes Augenmerk lag hierbei auf dem Einfluss des erhöhten Abgasgedrucks sowie der elektrischen Leistungseinspeisung eines TEG. Um dabei die jeweiligen Einflüsse isoliert voneinander und in unterschiedlicher Ausprägung betrachten zu können, sollten die Untersuchungen zunächst nicht an einem integrierten TEG-Funktionsmuster vorgenommen werden. Vielmehr sollte repräsentativ für den TEG eine Abgasklappe zur Erzeugung des Abgasgedrucks bzw. ein externes elektrisches Netzteil zur Bereitstellung der elektrischen Leistung verwendet werden.

2. TEG-Entwicklung am DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte

Um die Fahrzeug-Energieeffizienz zu verbessern, wird am DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte (IFK) in Stuttgart die Entwicklung und Systemintegration Thermoelektrischer Generatoren (TEG) betrieben. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf dem Zusammenspiel von TEG und Fahrzeugesamtsystem, wobei das Verständnis der Teilsysteme Grundvoraussetzung ist.

Auf Material- bzw. Modulseite kann hierbei auf ein breites Know-how am Institut für Werkstoff-Forschung in Köln zurückgegriffen werden, wo die Entwicklung hochtemperaturfähiger Module mit hohen Wirkungsgraden im Vordergrund der Arbeiten steht [1].

Die Entwicklung der Gesamtkomponente TEG geschieht am Institut für Fahrzeugkonzepte. Zu Beginn jeder Entwicklungsphase werden dabei stationäre wärmetechnische Simulationen durchgeführt, um unterschiedliche TEG-Designs hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit bewerten zu können. Mit Hilfe eines dynamischen TEG-Modells kann darüber hinaus der TEG im Gesamtfahrzeugmodell bewertet werden. Mittels CAD-Programmen wird das vielversprechendste Design ausgearbeitet. Hier kommen auch FE-Methoden zum Einsatz, um die thermomechanische Festigkeit zu untersuchen. Nach der Fertigung der Einzelkomponenten können die Prototypen zu-

sammengebaut und experimentell untersucht werden. Der dafür zur Verfügung stehende Heißgasprüfstand des IFK wird aktuell erweitert und in diesem Zuge mit einem Gasbrenner mit 200 kW Heizleistung ausgerüstet. In der zertifizierten Werkstatt des Instituts werden für den Einbau des thermoelektrischen Generators packageoptimierte Lösungen für die Einzelbereiche Abgasanlage, Kühlkreislauf und Messsystem entwickelt und umgesetzt. Als Versuchsfahrzeug steht ein BMW der 5er Reihe zur Verfügung, der in der Vergangenheit zum Versuchsträger aufgerüstet wurde. Der Klima-Rollenprüfstand des Instituts macht es möglich, thermoelektrische Generatoren im Fahrzeug bei verschiedenen Betriebszuständen zu untersuchen und somit auch die Wechselwirkungen des TEG mit dem Fahrzeuggesamtsystem, von denen der vorliegende Beitrag schwerpunktmäßig handelt, analysieren zu können.

Ein aktueller Forschungsschwerpunkt am DLR zielt derzeit darauf, die Fertigungstechnologie der Generatoren vor dem Hintergrund eines späteren Serieneinsatzes zu verbessern. Aktuelle Funktionsmuster sind kraftschlüssig verspannte – und damit relativ schwere – Systeme, deren Zusammenbau höchst zeitintensiv ist. U.a. im Verbund mit dem Institut für Werkstoff-Forschung und dem Institut für Technische Thermodynamik wird hier eine Aufbautechnologie entwickelt, die mit serientauglichen – vorzugsweise stoffschlüssigen – Fügeverfahren arbeitet und dabei den hohen betriebstechnischen und kostenseitigen Anforderungen des Systems gerecht wird. Darüber hinaus werden am Institut für Fahrzeugkonzepte derzeit neuartige Systemkonzepte entwickelt, mit dem Ziel, durch Funktions- und Komponentenintegration die Komplexität und Kosten der Systeme zu reduzieren und gleichzeitig die Leistungsdichte auf Werte größer 50 W/kg zu erhöhen.

3. Wechselwirkungen des TEG im Fahrzeuggesamtsystem

Der TEG ist in die Fahrzeugteilsysteme Abgasanlage, Kühlsystem und das Bordnetz eingebunden und übt Wechselwirkungen mit diesen aus. Diese Wechselwirkungen sollen im Folgenden betrachtet werden.

3.1. Fahrwiderstände und Kraftstoffverbrauch

Formel (3-1) beschreibt den Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor.

$$\dot{m}_k = \frac{1}{\eta_{Tr} \cdot \eta_{thv} \cdot \eta_G \cdot \eta_m} \cdot \frac{1}{H_K} \cdot \left[f \cdot m \cdot g + c_W A \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} + m \cdot g \cdot \sin \beta + \left(m + \frac{J_R + i^2 J_m}{r_{stat} \cdot r_{dyn}} \right) \frac{dv}{dt} \right] \cdot v \quad (3-1)$$

Diese enthält zum einen die gesamte Wirkungsgradkette, also den thermischen Wirkungsgrad η_{thv} der Verbrennung, den Gütegrad η_G des realen Kreisprozesses, den mechanischen Motorwirkungsgrad η_m sowie den Wirkungsgrad des Triebstrangs η_{Tr} . Innerhalb der eckigen Klammer sind die Fahrwiderstände, der Rollwiderstand, Luftwiderstand, Steigungswiderstand und Beschleunigungswiderstand enthalten. Im Folgenden soll durch Betrachtung obenstehender Verbrauchsformel genauer analysiert werden, an welchen Stellen sich der Einbau eines TEG auf den Kraftstoffverbrauch auswirkt. Darüber hinaus sollen alle weiteren im Zusammenspiel mit dem Fahrzeuggesamtsystem auftretenden TEG-Effekte betrachtet werden.

3.2. Erhöhung der Fahrzeugmasse

TEG bestehen aus einer Vielzahl von Einzelkomponenten, wie Abgaswärmeübertrager(n), Kühlwasserwärmeübertrager(n), thermoelektrischen Modulen, Spannelementen, Zu- und Abführungselementen für Abgas und Kühlwasser, Dichtungen, usw. Hinzu kommen weitere Systemkomponenten wie Abgasklappe(n), zusätzliche Abgasverrohrung, Kühlwasserschläuche, Verbindungselemente, elektrische Verkabelung und elektronische Bauelemente. All diese Komponenten bringen zusätzliches Gewicht ins Fahrzeug und erhöhen damit den Rollwiderstand sowie gegebenenfalls den Steigungs- und Beschleunigungswiderstand. Daraus ergibt sich die Anforderung, die durch das Generatorsystem eingebrachte Masse so gering wie möglich zu halten.

3.3. Auswirkungen auf Kühlsystem und Warmlauf

Infolge der ins Kühlsystem eingebrachten Abgaswärme kann der TEG den Motorwarmlauf beim Kaltstart unterstützen und verkürzen, was mehrere positive Effekte mit sich bringt. Zum einen wird durch den schnelleren Motorwarmlauf das Kraftstoff/Luft-Gemisch besser aufbereitet und der Katalysator schneller auf Temperatur gebracht, wodurch die Schadstoffemissionen reduziert werden [2]. Zum anderen wird durch die bessere Erwärmung des Motoröls die Motorreibung verringert, wodurch der mechanische Wirkungsgrad η_m zunimmt und der Kraftstoffverbrauch sinkt. Darüber hinaus erhöht sich durch die schnellere Erwärmung der Fahrgastzelle der Komfort für die Fahrzeuginsassen.

Auf der anderen Seite erhöht der TEG die Kühllast des Fahrzeugs, sobald der Antrieb auf seiner optimalen Arbeitstemperatur ist. Dem kann durch eine größere Kühlerfläche begegnet werden, was aber wiederum den Luftwiderstandsbeiwert c_w erhöht und damit die Gesamtenergiebilanz des Fahrzeugs negativ beeinträchtigt. Bei unveränderter Kühlergeometrie wird gerade bei niedrigen Fahrzeuggeschwindigkeiten der Kühlerventilator häufiger in Betrieb sein müssen, evtl. ist gar eine Leistungserhöhung der Kühlwasserpumpe notwendig. Beides wirkt sich negativ auf den mechanischen Motorwirkungsgrad η_m und damit auf den Kraftstoffverbrauch aus. Es müssen hier also Lösungen gefunden werden, um die zusätzliche Kühllast des Fahrzeugs zu minimieren bzw. mit möglichst geringem Kraftstoffverbrauch abführen zu können. Darüber hinaus muss dafür gesorgt werden, dass das Kühlsystem bei Fahrzuständen, in denen es ohnehin an seiner Kapazitätsgrenze arbeitet, z.B. bei einer Bergfahrt mit hohen Außentemperaturen, nicht zusätzlich belastet wird.

3.4. Erhöhung des Abgasgedrucks

Um Medienströmen effektiv Wärme entziehen zu können, wird in Wärmeübertragern über geeignete Maßnahmen, beispielsweise das Einbringen von Rippen, versucht, die Turbulenz der Medienströme zu erhöhen sowie die vom Fluid überströmte Oberfläche zu vergrößern und somit den Wärmeübergang zu verbessern. Allerdings bedingen diese Maßnahmen immer auch eine Erhöhung des Strömungswiderstandes, was bei Verbrennungsmotoren zu einer erhöhten Ausschleubarbeit am Kolben führt und damit grundsätzlich zunächst zu einem Kraftstoffmeherverbrauch. Auf der ande-

ren Seite können sich aber in geringem Maß erhöhte Abgasgegendrücke durch die dadurch bewirkte interne Abgasrückführung gerade im Teillastbetrieb von Verbrennungsmotoren auch positiv auf den Verbrauch auswirken. Beim Ausschlebevorgang verlassen die wandnahen Gasanteile den Zylinder relativ spät, weshalb ein vergrößerter Abgasgegendruck für einen erhöhten Restgasverbleib dieser Gasanteile sorgt. Da die betreffenden Anteile reich an unverbrannten Kohlenwasserstoffen sind, kommt es dadurch zu einer Verbrauchsreduzierung. Darüber hinaus muss bei erhöhtem Restgasgehalt weniger stark gedrosselt werden, wodurch die Drosselverluste abnehmen und der Gütegrad steigt. Im Weiteren wird durch die verdünnte Ladung die Verbrennungstemperatur gesenkt, wodurch die Entstehung von Stickstoffen reduziert wird [3].

Die oben beschriebenen Effekte finden bei der Optimierung des Zusammenspiels von Serien-Verbrennungsmotoren und Abgasanlagen in hohem Maße Berücksichtigung, so dass davon ausgegangen werden kann, dass eine weitere Erhöhung des Abgasgegendrucks durch zusätzliche Komponenten in der Abgasanlage bei einem Serienfahrzeug zu einer Verbrauchserhöhung führt.

3.5. Auswirkung auf Abgasnachbehandlungskomponenten

Der TEG entzieht dem Abgas Wärme und tritt damit in Konkurrenz zu den Abgasnachbehandlungskomponenten, die für ihren Betrieb ebenfalls Wärme benötigen. Infolge der verschärften Schadstoff- und Partikelemissionsgesetzgebung hat die Zahl der Abgasnachbehandlungskomponenten in den letzten Jahren deutlich zugenommen. So kommen bei Ottomotoren Dreiwegekatalysatoren, SCR-Katalysatoren (SCR = selective catalytic reduction) und NO_x -Speicher-katalysatoren zum Einsatz, bei Dieselmotoren Oxidationskatalysatoren, NO_x -Speicher-katalysatoren und Partikelfilter.

Für die chemische Umsetzung der Schadstoffe bzw. deren Einlagerung müssen die Katalysatoren eine gewisse Betriebstemperatur aufweisen. Bei Dreiwegekatalysatoren setzt eine nennenswerte Konvertierung der Schadstoffe bei Temperaturen größer 200 °C ein, wobei hohe Konvertierungsraten größer 90% erst zwischen Temperaturen von 400 bis 800 °C erreicht werden [4]. Bei NO_x -Speicher-katalysatoren ergeben sich Wirkungsgrade größer 90% je nach Art des Katalysators zwischen 350 und 500 °C . Auch bei SCR-Katalysatoren hängt der Arbeitstemperaturbereich von der Art des Katalysators ab, bspw. liegt er für Vanadium-Titan-Katalysatoren zwischen 200 und 450 °C [3].

Um den Betrieb der Systeme und deren Anspringen beim Kaltstart nicht negativ zu beeinträchtigen und damit die Schadstoffemissionen des Fahrzeugs zu erhöhen, muss der TEG entweder in der Abgasanlage nach den Nachbehandlungskomponenten eingebaut werden, oder es müssen intelligente Lösungen – bspw. mittels Bypass-Systemen – gefunden werden, um deren Aufheizen und einwandfreien Betrieb trotz der TEG-Integration zu gewährleisten.

3.6. Auswirkung auf das elektrische Bordnetz

Der Sinn und Zweck der Einbindung des TEG in das Fahrzeug ist es, durch Entlastung der Lichtmaschine den mechanischen Wirkungsgrad des Motors, welcher den

Betrieb der Nebenaggregate berücksichtigt, zu verbessern und damit Kraftstoff zu sparen.

Allerdings müssen auch bei der elektrischen Einbindung des TEG die Wechselwirkungen mit dem Fahrzeugbordnetz berücksichtigt werden. So wäre beispielsweise ein Abfallen der TEG–Ausgabespannung unterhalb des Niveaus von Generator und Batterie, welches im Bereich von 14 V liegt, kontraproduktiv, da dies ein Entladen der Batterie bzw. den Verbrauch von generatorisch erzeugter Leistung zur Folge hätte. Auf der anderen Seite darf das Spannungsniveau der rückgespeisten elektrischen Energie nicht zu hohe Werte annehmen, da andernfalls u. U. elektrische Bauteile des Bordnetzes zerstört würden.

4. Das DLR–Versuchsfahrzeug

Am Institut für Fahrzeugkonzepte steht ein Versuchsfahrzeug für TEG–Untersuchungen zur Verfügung. Hierbei handelt es sich um einen BMW–Kombi Baujahr 2006 aus der 5er Reihe vom Typ 535i. Der Saugmotor mit 3 l Hubraum basiert auf der im Jahr 2004 vorgestellten Reihenmotorgeneration [5] und entwickelt bei einer Drehzahl von 6600 1/min eine Maximalleistung von 190 kW. Der Motor ist mit einer Direkteinspritzung und dem von BMW entwickelten strahlgeführten Brennverfahren ausgerüstet, wobei er im Teillastbereich im Schichtbrennverfahren arbeitet [6]. Das heißt, dass nur im Bereich der Zündkerze ein zündfähiges Gemisch besteht, während der übrige Brennraum ein sehr mageres Gemisch aufweist. Durch die innere Gemischbildung und die infolge dessen starke Verminderung der Drossel- und Wandwärmeverluste sowie die Erhöhung des effektiven und geometrischen Verdichtungsverhältnisses bietet dieses Verfahren hohe Verbrauchspotentiale. In *Bild 1* sind die wichtigsten Daten des Fahrzeugs und seiner Motorisierung zusammengestellt.


Fahrzeug		
Hersteller	BMW	
Typ	535i touring	
Motorisierung		
Bauart	Reihenmotor	
Zylinder	6	
Hubvolumen	2,996 l	
Effektive Leistung	190 kW	
bei Drehzahl	6600 1/min	
Brennverfahren	strahlgeführt mit Direkteinspritzung; Schichtbrennverfahren in Teillast	

Bild 1: Daten des TEG–Versuchsfahrzeugs vom Typ BMW 535i touring

In den folgenden Kapiteln wird genauer auf die für die TEG–Integration relevanten Teilsysteme Abgasanlage, Kühlsystem und elektrisches Bordnetz sowie die für die Versuche eingebrachte messtechnische Ausrüstung eingegangen.

4.1. Abgasanlage und Bauraumanalyse

Die Abgasanlage des DLR-Versuchsfahrzeugs ist zweiflutig ausgeführt, wobei je ein Rohr den Abgasstrom von drei Zylindern aufnimmt. *Bild Bild 2* zeigt eine schematische Darstellung der Abgasanlage in der Seitenansicht. Die Oxidationskatalysatoren sind unmittelbar hinter den Krümmern leicht versetzt zueinander angeordnet. Anschließend wird die Verrohrung an den Fahrzeugboden in den Bodentunnel geführt, wo sich ungefähr auf Höhe der Vordersitze die beiden NO_x-Speicher-katalysatoren befinden. Kurz darauf mündet die Verrohrung in den Mittelschalldämpfer. Der Endschalldämpfer befindet sich im Heckbereich des Fahrzeugs.

Um später die für die Entwicklung des TEG notwendigen bauraumtechnischen Anforderungen definieren zu können, wurden in einem ersten Schritt die potentiellen Einbaupositionen und Bauräume analysiert. Dabei ergibt sich aus den thermischen Anforderungen des TEG und denen der Abgasnachbehandlungskomponenten ein Zielkonflikt. Auf der einen Seite nimmt die Leistungsausbeute eines TEG mit höherer Temperaturdifferenz zu, weshalb es grundsätzlich wünschenswert wäre, den TEG motornah zu positionieren. Auf der anderen Seite benötigen die Katalysatoren für nennenswerte Konvertierungsraten ebenfalls hohe Betriebstemperaturen. Wie bereits in Kap 3.5 erläutert, stellen Oxidationskatalysatoren mit Arbeitstemperaturen von 500 bis 800 °C relativ hohe thermische Anforderungen, wohingegen die NO_x-Speicher-katalysatoren bereits bei Temperaturen kleiner 500 °C zufriedenstellend arbeiten. Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen und der vorhandenen Platzverhältnisse entlang der Abgasanlage wurden im Folgenden drei potentielle Bauräume definiert.

Ein erster möglicher Bauraum A (siehe *Bild Bild 2*) liegt im Bereich des Motorraums direkt hinter den Oxidationskatalysatoren. Dieser hat aufgrund der in diesem Bereich äußerst beschränkten Platzverhältnisse mit ca. 11,6 l ein recht kleines Volumen. Allerdings würde der entsprechende Bauraum erst durch eine leichte Modifikation der Abgasanlage frei werden. Dazu müssten die bislang versetzt zueinander angeordneten Oxidationskatalysatoren nebeneinander positioniert werden.

Ein weiterer potentieller Bauraum B wurde am Unterboden unter dem Beifahrerfußraum identifiziert. Dieser langgezogene Bauraum hat mit 10,2 l ein etwas kleineres Volumen als Bauraum A und bietet aufgrund des Temperaturabfalls entlang der Abgasanlage in jedem Fall ein schlechteres exergetisches Potential. Auf der anderen Seite muss hier bei der TEG-Integration lediglich die Verrohrung der Abgasanlage geändert werden, eine Verlegung der Katalysatoren ist im Gegensatz zu Bauraum A nicht notwendig. Aus diesem Grund sollte Bauraum B im Folgenden weiter mit betrachtet werden. Schließlich wurde hinter dem NO_x-Speicher-katalysator ein dritter Bauraum C definiert, der mit 20,2 l beinahe doppelt so groß ist wie die Bauräume A und B. Allerdings sind hier infolge der motorfernen Lage und dem stromaufwärts angeordneten NO_x-Speicher-katalysator die niedrigsten Abgastemperaturen zu erwarten.

Bei der Positionierung der Thermolemente für die spätere Vermessung des Basisfahrzeugs wurde darauf geachtet, dass jeweils vor und nach den Einzelkomponenten der Abgasanlage sowie im Bereich der potentiellen Einbauorte eine Messstelle angebracht wurde. Der Abgasmassenstrom wurde nicht direkt gemessen, konnte aber im Nachgang anhand des vom OBD-System ausgegeben angesaugten Luftmassenstroms sowie des Verbrennungsluftverhältnisses bestimmt werden.

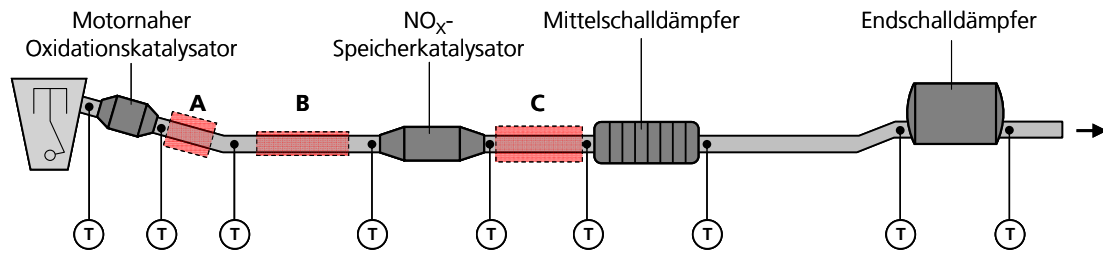
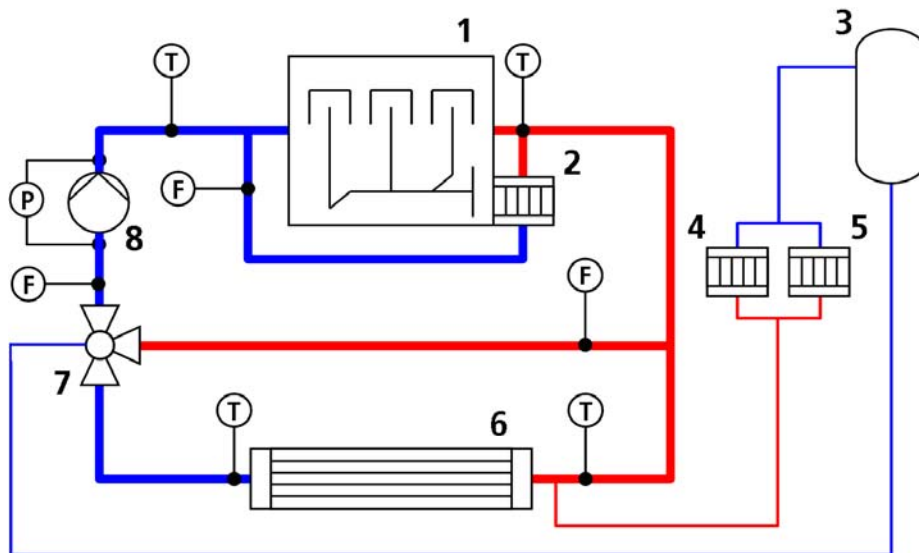


Bild 2: Schematische Seitenansicht der Abgasanlage des DLR-Versuchsfahrzeugs mit potentiellen TEG-Bauräumen und den eingebauten Temperatursensoren

4.2. Kühlsystem

Bild Bild 3 zeigt die schematische Darstellung des Fahrzeugkühlsystems. Ein Teil des im Motor erwärmten Kühlwasserstroms wird direkt am Motor über einen Wärmeübertrager geleitet, der für die Kühlung des Motoröls zuständig ist. Der über das Thermostat geregelte Bypass sorgt dafür, dass sich der Motor beim Kaltstart schnell auf Betriebstemperatur erwärmen kann. Bei niedriger Kühlwassertemperatur wird das Kühlwasser am Hauptkühler vorbei und direkt wieder dem Motor zugeführt. Die Wasserpumpe des Versuchsfahrzeugs ist elektrisch betrieben und besitzt eine komplexe Regelung. Die Kühlwasserpumpen der Vorgängermodelle wurden noch mechanisch über den Riementrieb des Fahrzeugs angetrieben, was allerdings den Nachteil hatte, dass die Drehzahl der Pumpe und damit deren Förderleistung immer direkt von der Motordrehzahl abhing – unabhängig davon, ob die dadurch erhöhte Kühlleistung benötigt wurde oder nicht. Vor dem Kühler des Fahrzeugs wird ein kleiner Kühlwasseranteil ausgeleitet, der zum einen für das Kühlen des Getriebeöls und zum anderen für das Beheizen des Fahrzeuginnenraums zuständig ist. Darüber hinaus ist in diesem Parallelkreislauf der Ausgleichsbehälter integriert, der dafür sorgt, dass Volumenänderungen, wie sie beispielsweise bei partiellem Verdampfen von Kühlwasser auftreten können, keine übermäßige Druckerhöhung im Kühlsystem zur Folge haben. Ein weiterer Teil des Kühlwasserstroms wird direkt am Motor vorbei über einen Wärmeübertrager geleitet, der für die Kühlung des Motoröls zuständig ist.

Bei der Positionierung der Durchfluss- und Temperatursensoren wurde darauf geachtet, dass nach Möglichkeit an den Bauteilen, an denen relevante Wärmeströme zu bzw. abgeführt werden, später Energiebilanzen aufgestellt werden können. Die Kühlwasserdurchflüsse werden sowohl im Hauptkreislauf vor der Pumpe, im Bypass sowie im Motorölkühlkreislauf gemessen. Darüber hinaus werden die Temperaturen vor und nach den Komponenten Motor, Getriebeöl/Kühlwasser-Wärmeübertrager und Hauptkühler ermittelt. Um auch die Förderleistung der Kühlwasserpumpe bestimmen zu können, wurde zusätzlich auch deren Druckdifferenz gemessen.



- 1 Motor
- 2 Motoröl/Kühlwasser-Wärmeübertrager
- 3 Ausgleichsbehälter
- 4 Getriebeöl/Kühlwasser-Wärmeübertrager
- 5 Wärmeübertrager für Innenraumheizung
- 6 Hauptkühler
- 7 Thermostat
- 8 Wasserpumpe (elektrisch)

Bild 3: Schematische Darstellung des Kühlsystems des DLR-Versuchsfahrzeugs sowie der eingebauten Messtechnik (T Temperatursensor, F Durchflussmesser, P Differenzdruckmesser)

4.3. Elektrisches Bordnetz

Das Fahrzeugbordnetz besteht wie üblicherweise aus dem Generator, der Batterie und den Verbrauchern. Allerdings besitzt das Fahrzeug im Vergleich zu anderen Modellen vergleichbaren Baujahrs bereits eine intelligente Generatorregelung. Herkömmlicherweise werden Generatoren mit der Strategie betrieben, die Batterie jederzeit voll zu laden. Die intelligente Generatorregelung hingegen sieht das Aktivieren und Deaktivieren des Generators, das Steuern des Generatorstroms zwischen den Verbrauchern und der Batterie und einen Ladepuffer für die Rekuperation in den Schubphasen vor. Dabei werden drei Phasen unterschieden [7]. In der ersten Phase, bei niedrigem Ladezustand der Batterie, arbeitet die Laderegulierung wie in konventionellen Fahrzeugen durchgehend bei voller Leistung. Ist ein bestimmter Ladezustand erreicht (zweite Phase) stellt der Generator in den Antriebsphasen nur noch Energie für die Verbraucher zur Verfügung. Die Batterie wird nur noch in Schubphasen geladen. Sobald die zweite Ladeschwelle erreicht ist (dritte Phase), wird der Generator in den Antriebsphasen völlig entlastet, die Verbraucher werden nur noch aus der Batterie versorgt. Der Generator lädt jetzt in den Schubphasen des Fahrzeugs mit maximal möglicher Leistung die Batterie.

In *Bild Bild 4* ist das Fahrzeugbordnetz und die eingebaute Messtechnik dargestellt. Bei den experimentellen Untersuchungen des Basisfahrzeugs sollte zum einen die

Bordnetzspannung mitgemessen werden, da der TEG–Spannungswandler auf deren Niveau angepasst werden muss. Darüber hinaus sollten der Generatorstrom sowie der durch die elektrischen Verbraucher fließende Strom gemessen werden. Um das Verhalten des Kühlsystems besser untersuchen zu können, sollten dabei die Stromaufnahme der Kühlwasserpumpe sowie des Kühlerlüfters getrennt von den übrigen Verbrauchern ermittelt werden (in *Bild Bild 4* nicht dargestellt).

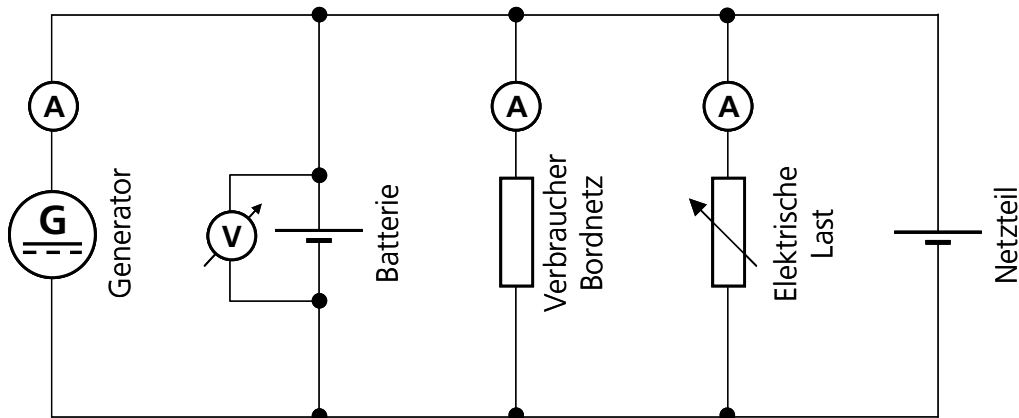


Bild 4: Schematische Darstellung des Fahrzeugbordnetzes des DLR–Versuchsfahrzeugs mit Generator, Batterie und Verbrauchern sowie der eingebauten Messtechnik (V Voltmeter, A Amperemeter). Die rechts im Bild dargestellte elektrische Last sowie das Netzteil wurden im Weiteren für die später durchzuführenden Verbrauchsmessungen installiert (vgl. Kap. 5.4 und 6.3)

4.4. Datenerfassungssystem

Zur Messdatenerfassung wurden Datenerfassungsmodule vom Typ CANSAS verwendet, die von der Firma imc hergestellt und vertrieben werden [8]. Sie zeichnen sich besonders durch ihre Robustheit und hochdynamische Datenerfassung aus. Die analogen Messsignale werden im Modul digitalisiert und als CAN–Botschaften ausgegeben. Die Module sind in unterschiedlicher Form und für unterschiedliche Messgrößen erhältlich. Die Sammlung und Aufzeichnung der Daten geschieht in einem separaten Modul, dem sogenannten Datenlogger. Dieser wiederum verfügt über eine Ethernet–Schnittstelle, mit deren Hilfe die Daten nach Abschluss der Messung an einen Rechner übertragen werden können.

5. Versuchsvorbereitung und Fahrzeugmodifikationen

Um später reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, müssen bei den Versuchen sowohl prüfstandsseitig als auch fahrzeugseitig die gleichen Randbedingungen herrschen. Um dies zu gewährleisten, wurde eine Prüfvorschrift entwickelt, welche bei allen Versuchen einzuhalten war. Beispielsweise wurden hier Rollenparameter, Temperatur und Luftfeuchte des Prüfstands aber auch die Art der Bereifung sowie der Reifenluftdruck am Fahrzeug definiert.

5.1. Problematik: Instationäres Fahrzeugverhalten

Erste Versuche mit dem Fahrzeug zeigten, dass sich einige Fahrzeugteilsysteme trotz langer Konstantfahrt nicht in stationäre Zustände einpendelten. So zeigten die Massenströme und Temperaturen von Abgas und Kühlwasser ein sehr instationäres Verhalten, ebenso die Leistungsaufnahme einiger Verbraucher im Fahrzeugbordnetz. Da jede Veränderung des Fahrzeuggesamtsystems aber auch mehr oder weniger großen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch hat, ist das oben beschriebene Fahrzeugverhalten für Verbrauchsmessungen äußerst ungünstig, weshalb durch unterschiedliche Maßnahmen versucht wurde, diesem entgegenzuwirken. Im Folgenden werden das instationäre Verhalten der jeweiligen Teilsysteme sowie die ergriffenen Gegenmaßnahmen erläutert.

5.2. Instationäres Verbrennungsluftverhältnis und Gegenmaßnahmen

Erste Konstantfahrtversuche zeigten, dass sich trotz konstanter Fahrgeschwindigkeit und Gangstufe meist kein stationäres Verbrennungsverhalten am Motor einstellte. So schwankte das Verbrennungsluftverhältnis λ , das über das On-Board-Diagnose-System (OBD) des Fahrzeugs ausgelesen wurde, oftmals sprunghaft zwischen Werten weit über eins und eins. *Bild Bild 5* zeigt beispielhaft einige Messwerte für 100 km/h-Konstantfahrt im 5. Gang. Nach stationärem stöchiometrischem Betrieb ist bei einer Messdauer von 75 s deutlich der sprunghafte Anstieg des angesaugten Luftmassenstroms von 21 g/s auf 47 g/s zu erkennen. Die Abgastemperaturen am Eintritt des NO_x-Speicherkatalysators schwanken im betreffenden Zeitintervall zwischen 370 und 530 °C, die Kühlwassertemperatur am Motoraustritt zwischen 90 und 104 °C.

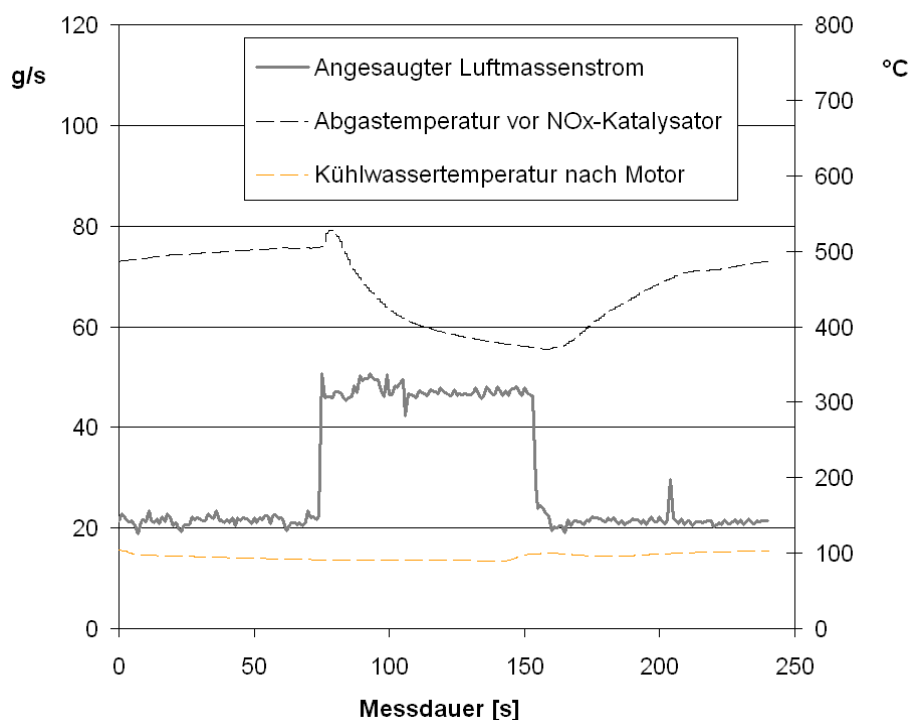


Bild 5: Instationäres Verhalten des angesaugten Luftmassenstroms und daraus folgend der Abgastemperatur im Bereich der NO_x-Speicherkatalysatoren bei 100 km/h-Konstantfahrt im 5. Gang

Das häufig hoch magere Verbrennungsluftverhältnis kann auf das in [6] vorgestellte, strahlgeführte Schichtbrennverfahren des Motors zurückgeführt werden. Schichtbrennverfahren versprechen durch verringerte Drosselverluste, Reduktion der Wandwärmeverluste und ein höheres effektives sowie geometrisches Verdichtungsverhältnis Verbrauchspotenziale von 15 bis 20 % [9]. Dabei wird der Kraftstoff so aufbereitet, dass im Bereich der Zündkerze ein zündfähiges Gemisch entsteht, während sich im übrigen Brennraum ein sehr mageres, schwer zündfähiges Gemisch befindet. Erst durch Zündung des fetten Anteils im Bereich der Zündkerze ergeben sich Verhältnisse, die auch den restlichen mageren Teil entzünden. Allerdings entstehen beim Magerbetrieb in erhöhtem Umfang Stickoxide NO_x, weshalb Motoren dieser Art mit einem NO_x-Speicherkatalysator ausgerüstet werden. Zur Regeneration werden die Stickoxide durch kurzzeitig fetten Betrieb des Motors desorbiert und im Weiteren an der Beschichtung des Katalysators reduziert. Anschließend kann der Motor wieder in den Magerbetrieb umschalten. Durch die beschriebene Betriebsstrategie ergibt sich für Motoren mit Schichtladung ein zeitweises Wechseln zwischen Mager- und Fettbetrieb.

Dieses Verhalten bei konstanten Fahrzuständen führt zu stark schwankenden thermodynamischen Abgaszuständen. So treten bspw. bei 135 km/h (6. Gang) im vorderen Bereich der Abgasanlage um bis zu 150 °C höhere Abgastemperaturen im stöchiometrischen Betrieb auf. Mit zunehmender Entfernung vom Motor wird der Temperaturunterschied zwischen stöchiometrischem Betrieb und Magerbetrieb geringer. Die Abgastemperatur fällt im Magerbetrieb infolge des deutlich höheren Abgasmassenstroms und dem dadurch konstanteren Wärmeübergangskoeffizienten zum Ende hin weniger steil ab.

Das beschriebene Verhalten lässt die Bestimmung definierter, stationärer thermodynamischer Zustände im Teillastbereich nur in Form von Bereichsangaben zu. Während dies für die Bestimmung der thermodynamischen Abgas- und Kühlwasserzustände einigermaßen akzeptabel wäre, so sind doch Verbrauchsmessungen bei solch instationärem Betriebsverhalten in keiner Weise reproduzierbar darstellbar, da das Wechseln zwischen Mager- und Fettbetrieb völlig unregelmäßig und dann auch mit unterschiedlichen Verweildauern stattfindet. Aus diesen Gründen wurde entschieden, den Motor dauerhaft im stöchiometrischen Betrieb ($\lambda=1$) zu halten. Dies kann durch Deaktivieren des NO_x-Sensors geschehen. Da hierdurch die Steuergeräte die Beladung des NO_x-Speicherkatalysators nicht mehr überwachen können, geht der Motor in den stöchiometrischen Betriebszustand, da hier am wenigsten Stickoxide entstehen. Darauf folgende Tests zeigten, dass sich hierüber auch bei Konstantfahrten im Teillastbereich ein stationäres Fahrzeugverhalten einstellen ließ.

An dieser Stelle soll darauf eingegangen werden, warum die NO_x-Speicherkatalysatoren für die unten erläuterten experimentellen Untersuchungen entnommen wurden. Dies geschah aus zwei Gründen. Zum einen wurden sie infolge der Deaktivierung des NO_x-Sensors und dem daraus folgenden stöchiometrischen Betrieb überflüssig. Zum anderen zeigte sich bei der parallelen Entwicklung des TEG-Funktionsmusters, dass die zu verbauende Messtechnik den Bauraumbedarf der Komponente in hohem Maße beeinflusst, so dass die Integration in die definierten Bauräume A, B, und C wenig zielführend erschien. Als Lösung hierfür wurde entschieden, den Bauraum C durch Entnahme der NO_x-Speicherkatalysatoren zu ver-

größern und somit genügend Einbauvolumen für die Integration des Funktionsmusters bereitzustellen. Dies auch vor dem Hintergrund, als die hohen exergetischen Potentiale der Einbauräume A und B infolge der hohen Abgastemperaturen mit den bis dato erhältlichen Thermoelektrischen Modulen auf Basis von Wismuttellurid und ihrem beschränkten Einsatztemperaturbereich ohnehin nicht nutzbar gewesen wären. Für die folgenden Untersuchungen sollen aber die oben definierten Bauräume A, B und C weiter betrachtet werden. Dies auch deshalb, weil industrialisierte Generatoren infolge des Wegfalls der Messtechnik deutlich kleiner bauen werden, als dies bei prototypischen Funktionsmustern der Fall ist. Aus Gründen der Reproduzierbarkeit wurden die NO_x-Speicherkatalysatoren bereits bei der Vermessung des Grundzustands des Versuchsfahrzeugs entnommen.

5.3. Instationäres Verhalten des Kühlsystems und Gegenmaßnahmen

Bild 6 zeigt die Kühlwassertemperatur am Motorausstritt sowie die elektrischen Ströme an der Kühlwasserpumpe und am Kühlerlüfter über der Zeit bei ca. einer Stunde mit 135 km/h-Konstantfahrt im 6. Gang. Es sind dabei deutlich der periodische Betrieb von Wasserpumpe und Kühlerlüfter und das damit einhergehende Schwanken der Kühlwassertemperatur zu erkennen. Übersteigt die Kühlwassertemperatur ein Niveau von 107 °C, so springen Wasserpumpe und Lüfter an und laufen solange, bis die Temperatur auf unter 85 °C gefallen ist. Anschließend werden Pumpe und Lüfter in Ihrer Leistung reduziert, wodurch die Kühlwassertemperatur wieder ansteigt. Ab Erreichen einer Temperatur von ca. 105 °C sorgt der Lüfter durch sporadischen Betrieb, dass die Geschwindigkeit des Temperaturanstiegs etwas abgebremst wird, wodurch die Kühlwassertemperatur für ca. zwei bis drei Minuten zwischen 105 und 107 °C gehalten wird. Sobald das obere Temperaturniveau von 107 °C erreicht ist, wiederholt sich der Vorgang.

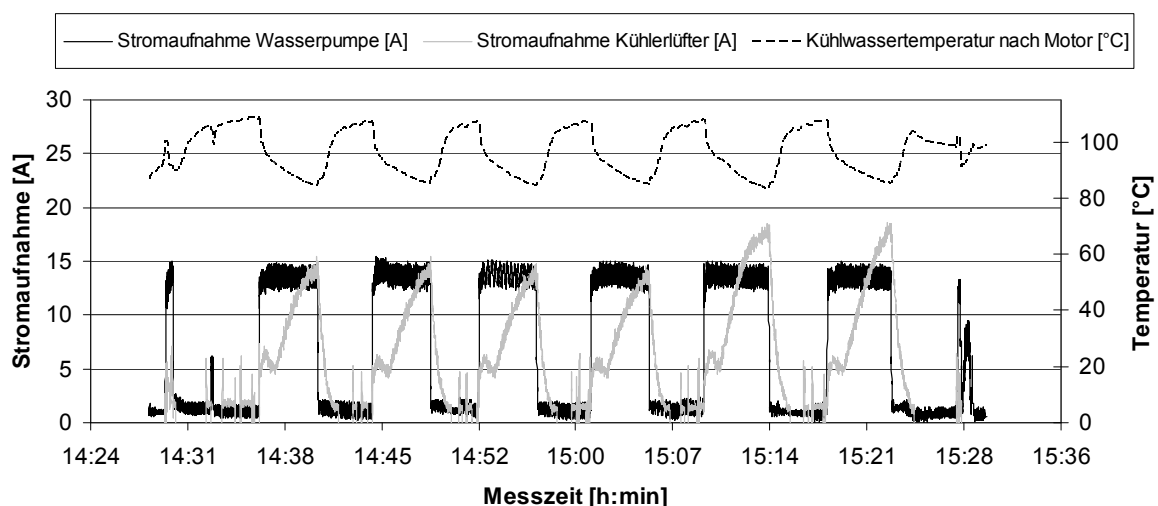


Bild 6: Instationäres Verhalten des Fahrzeugkühlsystems (Stromaufnahme der Wasserpumpe (pink), Stromaufnahme des Kühlerlüfters (gelb), Kühlwassertemperatur am Motorausstritt (blau))

Die Kühlwassertemperatur beeinflusst die Temperatur von Motorblock und Motoröl und wirkt sich damit auf die Reibung der beweglichen Motorteile aus. Da diese wiederum den Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs beeinflusst, wurde beschlossen, die

Verbrauchsmessungen in dem oben beschriebenen Zeitfenster durchzuführen, in dem sich die Kühlwassertemperatur relativ konstant zwischen 105 und 107 °C bewegt.

5.4. Instationäre Leistungsaufnahme der elektrischen Verbraucher und Gegenmaßnahmen

Das in *Bild Bild 6* dargestellte Verhalten von Kühlwasserpumpe und Kühlerlüfter sorgt aber nicht nur für Temperaturschwankungen im Kühlsystem, sondern auch für eine instationäre elektrische Belastung der Lichtmaschine. Da sich diese wiederum durch die Riementriekopplung auf den Kraftstoffverbrauch des Motors auswirkt, muss eine unregelmäßige Belastung des Generators unbedingt vermieden werden. Andernfalls sind keine reproduzierbaren Verbrauchsmessungen möglich.

Als Gegenmaßnahme wurde als zusätzlicher Verbraucher eine externe elektrische Last ins Bordnetz eingebracht, deren Widerstand über eine separate, programmierte Stelleinheit immer so nachgestellt wurde, dass dem Generator eine konstante Leistung entnommen wurde. Um sicherzustellen, dass bei den späteren Verbrauchsmessungen mit elektrischer Leistungseinspeisung die zu untersuchende maximale Einspeiseleistung von 800 W nicht unterschritten wird, wurde die Einheit so programmiert, dass am Generator immer eine konstante elektrische Last von 1000 W anlag. In *Bild Bild 4* ist die Einbindung der elektrischen Last ins bestehende Fahrzeugbordnetz schematisch dargestellt.

6. Experimentelle Untersuchung des DLR–Versuchsfahrzeugs

6.1. Untersuchung der Abgasthermodynamik

Um die unterschiedlichen Einbauorte hinsichtlich Ihrer exergetischen Randbedingungen bewerten zu können, wurden die thermodynamischen Zustände von Abgas und Kühlwasser bei unterschiedlichen Lastzuständen und Fahrzyklen untersucht.

In *Bild Bild 7* sind die ermittelten Temperaturverläufe entlang der Abgasanlage für unterschiedliche Fahrzustände zusammengestellt. Die Abgastemperaturen fallen in Folge der Wärmeabgabe an die Umgebung zwischen Motorauslass und Endtopf um 270 bis 300 °C ab. Über dem Oxidationskatalysator wurde bei allen Messungen ein Anstieg der Abgastemperatur festgestellt. Dieser kann auf die im Katalysator ablaufenden exothermen Reaktionen zurückgeführt werden, bei denen Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoff oxidiert werden [13]. Dieser Effekt führt zu dem positiven Umstand, dass die Einbauposition A als exergetisch vielversprechendster Bereich in der Abgasanlage genutzt werden kann, ohne den Oxidationskatalysator thermisch zu beeinträchtigen. Bei 135 km/h–Autobahnfahrt und einem Abgasmassenstrom von 39 g/s beträgt die Abgastemperatur an dieser Stelle 721 °C. Bei Vollast wird ein Massenstrom von 126 g/s und eine Temperatur von 860 °C erreicht. Auf dem weiteren Weg zur Einbauposition B fallen die Temperaturen bereits um 80 °C bzw. 69 °C ab. Am Einbauort C werden bei Autobahnfahrt (135 km/h) noch 519 °C erreicht, die Maximaltemperatur bei Vollast beträgt 677 °C. Deutlich niedriger sind die energetischen Potentiale bei 50 km/h–Stadtfahrt im 5. Gang. Der Massenstrom reduziert sich

hierbei auf 9 g/s. An den Einbaupositionen A, B, und C werden nur noch 470, 345 bzw. 210 °C erreicht.

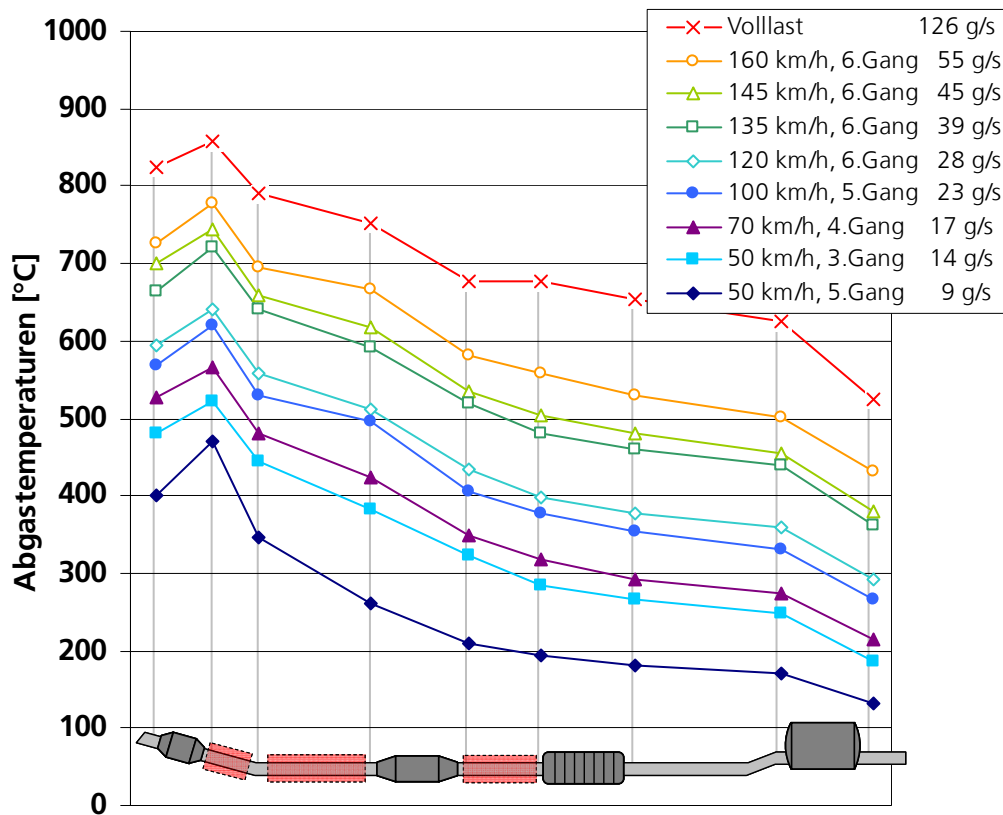


Bild 7: Abgastemperaturverläufe entlang der Abgasanlage für unterschiedliche, stationäre Fahrzustände bei entnommener Wabenstruktur des NO_x -Speicherkatalysators. Die aus den gemessenen, angesaugten Luftmassenströmen und λ -Werten errechneten Abgasmasseströme sind in der Legende mit angegeben.

Um auch das dynamische Verhalten der Abgas- und Kühlwasserthermodynamik analysieren zu können, wurden neben den oben beschriebenen Konstantfahrten auch zwei Fahrzyklen untersucht. Dabei wurden die Gangstufen nicht mehr manuell eingestellt, sondern in den Automatikbetrieb umgeschaltet.

Zunächst sollten die Temperaturverläufe im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) [10] untersucht werden. In der zugehörigen Prüfvorschrift ist vorgeschrieben, auf eine Temperatur von 20–30 °C vorzukonditionieren. Allerdings konnte diese Vorschrift aufgrund der beschränkten Testzeit am Rollenprüfstand nicht streng eingehalten werden. Zwar wurde die Klimakammer des Prüfstands auf die geforderten Werte vor-konditioniert, doch hätte die vollständige Durchtemperierung des Fahrzeugs zu lange gedauert. Da die anschließenden Versuche aber lediglich dazu dienen sollten, einen ersten Eindruck über das Temperaturverhalten im Zyklus zu gewinnen und im Hinblick auf die zu konkretisierende Anforderungsliste gegebenenfalls Anhaltswerte für mögliche transiente Temperatursprünge zu erhalten, ist die vollständige definierte

Vorkonditionierung des Fahrzeugs nicht entscheidend. Diese wird erst bei Verbrauchsmessungen bzw. vergleichenden Messungen relevant.

In *Bild 8* sind die transienten Abgastemperaturverläufe an den unterschiedlichen Positionen der Abgasanlage im NEFZ dargestellt. Die Temperaturen zeigen den erwarteten Verlauf, nämlich einen grundsätzlichen Zusammenhang mit dem Lastzustand des Fahrzeugs. Allerdings ist das Abgastemperaturniveau allgemein relativ gering. An Einbauposition A wird erst nach ca. 5 min eine Abgastemperatur von 400 °C überschritten. Auch im weiteren Stadtzyklus mit seinen vielen Start- und Stopphasen und einer maximalen Fahrzeuggeschwindigkeit von 50 km/h steigt die Temperatur nur auf höchstens 492 °C an. Erst gegen Ende des Zyklus nehmen die Abgastemperaturen mit dem kurzen Überlandanteil von 70 km/h merklich zu und erreichen schließlich bei der anschließenden Beschleunigung auf 120 km/h–Autobahnfahrt im Maximum 650 °C. In der Warmlaufphase ist deutlich das verzögerte Anspringen des Oxidationskatalysators zu erkennen. Erst nach 67 Sekunden übersteigt die Temperatur am Auslass des Katalysators zum ersten Mal die Einlasstemperatur, was auf die ablaufende exotherme Reaktion schließen lässt. Dauerhaft oberhalb der Einlasstemperatur liegt die Auslasstemperatur erst nach ca. zwei Minuten. Es kann erwartet werden, dass dieser Effekt bei vollständiger vorheriger Durchtemperierung des Fahrzeugs auf Umgebungstemperatur noch ausgeprägter sein wird. Die bei Zyklusstart gemessene Temperatur vor dem Katalysator von 190 °C lässt darauf schließen, dass der Motor noch deutliche Restwärme hatte. Auch der Abgasmassenstrom ist infolge der geringen Fahrzeuglasten im NEFZ recht niedrig. In der Stadtphase werden im Maximum 22 g/s erreicht, bei der kurzen Autobahnfahrt verdoppelt sich der maximale Massenstrom auf 43 g/s.

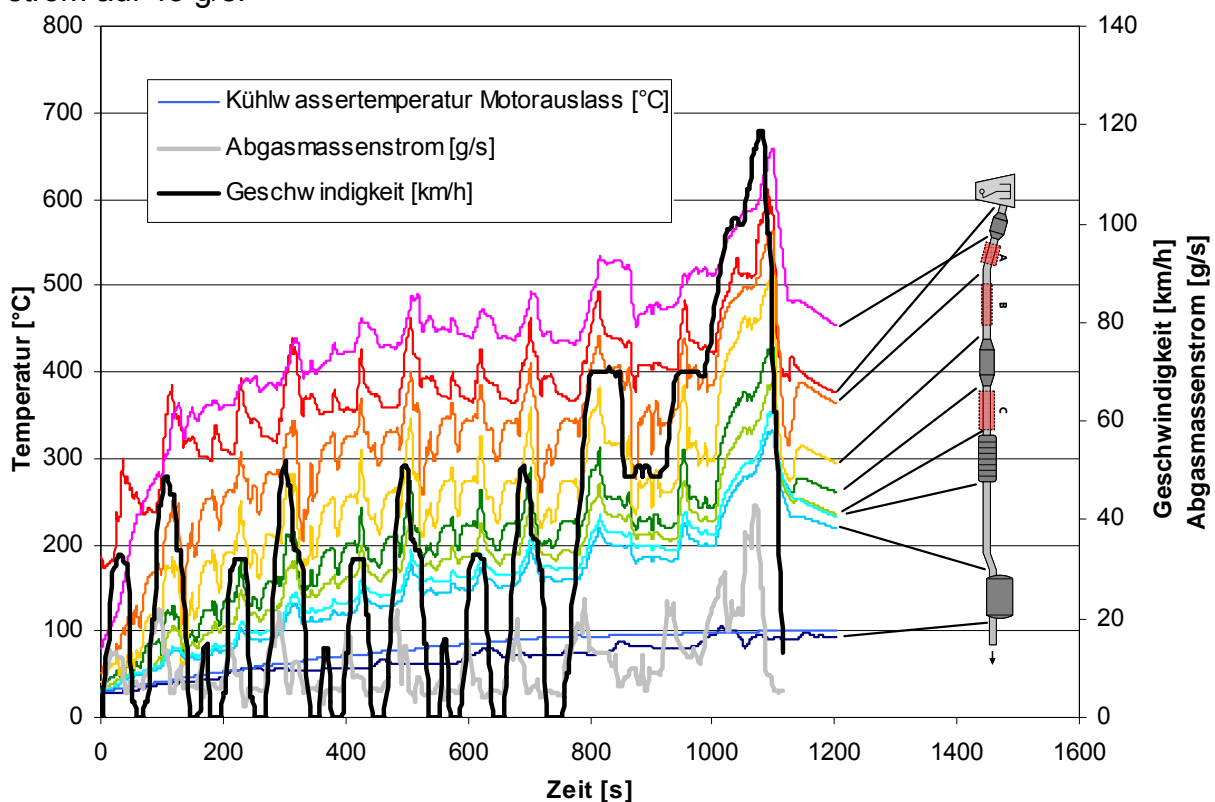


Bild 8: Abgasmassenstrom und Abgastemperaturen entlang der Abgasanlage im Neuen Europäischen Fahrzyklus NEFZ bei entnommener Wabenstruktur des NO_x-Speicherkatalysators.

Deutlich höhere Abgastemperaturen werden infolge der höheren Lastzustände des Fahrzeugs im ARTEMIS–Autobahnzyklus [11] erreicht (*Bild 9*). Hier übersteigt die Temperatur nach Katalysator an der Einbauposition A bereits nach etwas mehr als zwei Minuten 600 °C. Anschließend pendelt die Temperatur zwischen 600 °C und maximal 720 °C, bis die Temperaturen gegen Ende des Zyklus infolge der reduzierten Fahrzeuglast wieder sinken. Die übrigen Abgastemperaturen verhalten sich äquivalent, allerdings auf niedrigerem Temperaturniveau. An Einbauposition B pendelt die Abgastemperatur im mittleren Bereich des Zyklus im Mittel zwischen 550 °C und 600 °C, an Einbauposition C zwischen 450 °C und 500 °C.

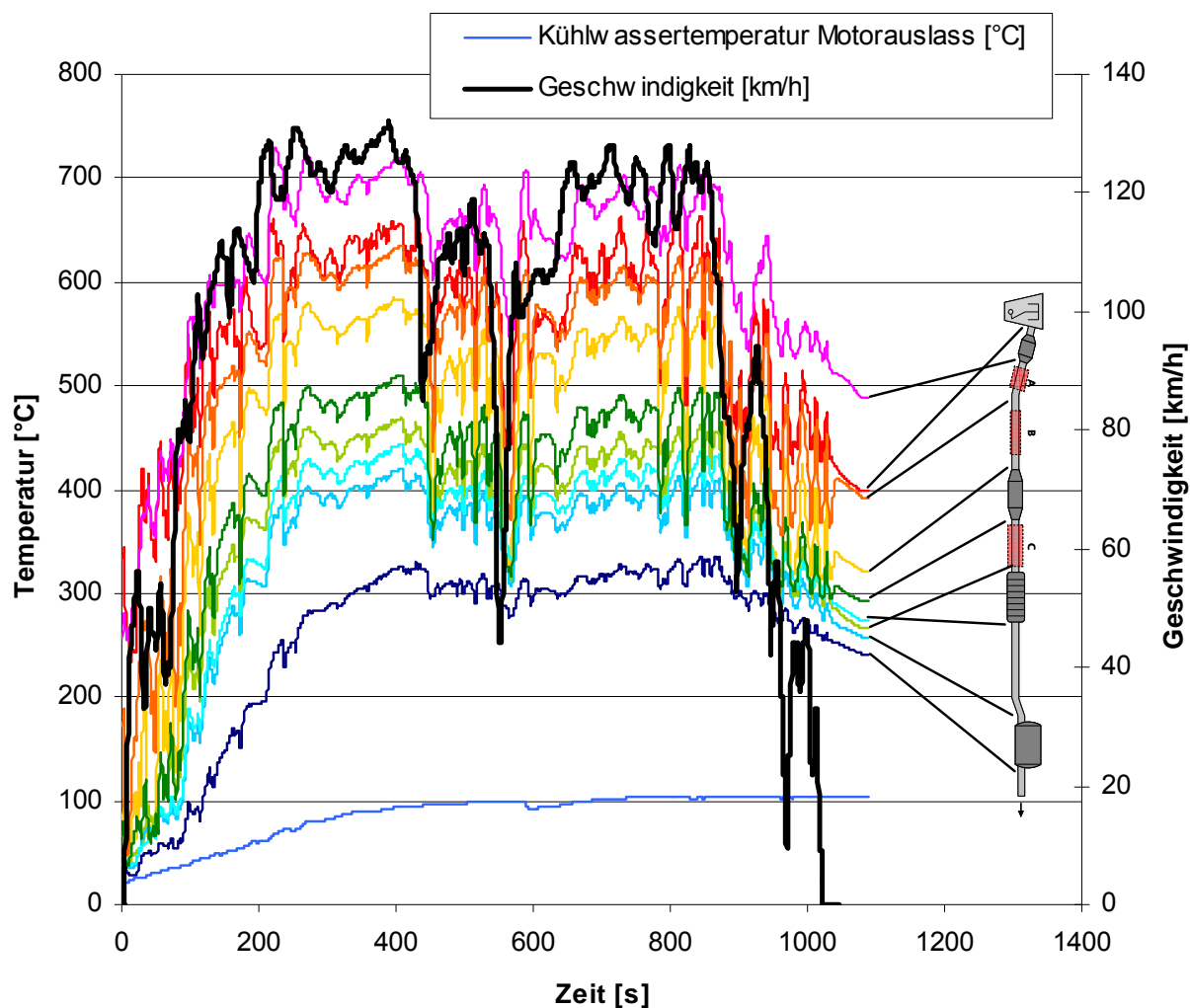


Bild 9: Abgasmassenstrom und Abgastemperaturen entlang der Abgasanlage im ARTEMIS–MOTORWAY–Zyklus bei entnommener Wabenstruktur des NO_x–Speicherkatalysators.

Die Kühlwassertemperatur am Motorauslass steigt beim Autobahnzyklus deutlich schneller an. Während im NEFZ–Zyklus 100 °C erst nach ca. 17 min überschritten werden, wird diese Marke im ARTEMIS–Motorway–Zyklus bereits nach etwas mehr als 5 min erreicht.

Anhand der bei Konstantfahrt ermittelten Abgasmassenströme und Abgastemperaturen wurden die energetischen und exergetischen Potentiale der Einbaupositionen A, B, und C bestimmt. Dabei wurde über

$$\dot{Q}_{Exh} = \dot{m}_{Exh} \cdot c_p \cdot (T_{Exh} - T_{cool}) \quad (6-1)$$

zunächst der im Abgas enthaltene Wärmestrom berechnet, wenn dieser auf das zugehörige Kühlwassertemperaturniveau abgekühlt würde.

Anschließend können die Exergieströme \dot{E}_Q der Wärmeströme durch Multiplikation des jeweiligen Wärmestroms mit dem Carnot-Wirkungsgrad ermittelt werden:

$$\dot{E}_Q = \dot{Q} \cdot \left(1 - \frac{T_{cool}}{T_m}\right) \quad (6-2)$$

Da bei der Wärmeübertragung von Fluidströmen berücksichtigt werden muss, dass sich das Fluid beim Entzug von Wärme abkühlt, wird als oberes Temperaturniveau für die Berechnung des Carnot-Wirkungsgrades die thermodynamische Mitteltemperatur T_m verwendet:

$$T_m = \frac{T_{Exh} - T_{cool}}{\ln(T_{Exh} / T_{cool})} \quad (6-3)$$

Als untere Temperatur wurde die jeweilige Kühlwassertemperatur angesetzt.

Bild 10 zeigt eine Übersicht der errechneten Exergieströme bei unterschiedlichen Fahrzuständen an den Einbauorten A, B und C sowie der zugehörigen Bauraumvolumina.

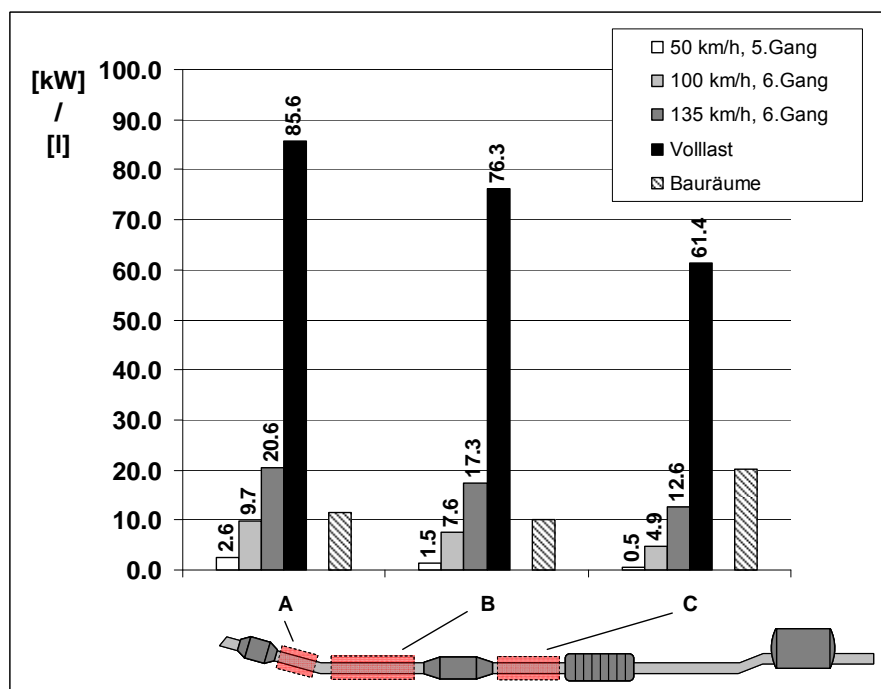


Bild 10: Exergiepotentiale der Einbaupositionen A, B und C bei unterschiedlichen Fahrzuständen, errechnet auf Basis der gemessenen Abgas und Kühlwassertemperaturen, sowie Gegenüberstellung der zugehörigen Bauraumgrößen

Einbauort A zeigt im Vergleich das höchste exergetische Potential und darüber hinaus im Vergleich mit Einbauort B einen größeren Bauraum. Einbauort C hat zwar im Vergleich zu den anderen beiden Einbauorten ein deutlich niedrigeres Exergiepotential, besitzt aber dafür einen beinahe doppelt so großen Bauraum wie die Einbaupositionen A und B. Damit sind die potentiellen Einbauorte A und C zunächst recht vielversprechend. Eine abschließende Bewertung der Einbaupositionen bei unterschiedlichen Fahrzuständen können aber nur wärmetechnische Simulationen bringen.

6.2. Untersuchung des Kraftstoffverbrauchs bei erhöhtem Abgasgegendruck

Wie bereits in Kap.3.4 erläutert, verursacht die wärmeübertragende Struktur in der Abgasanlage einen erhöhten Abgasgegendruck und wirkt sich durch Veränderung der internen Abgasrückführungsrate, der Ausschiebearbeit und der Drosselverluste auf den Kraftstoffverbrauch des Motors aus. Die im Folgenden durchgeführten Untersuchungen sollten diese Zusammenhänge quantifizierbar machen.

Um die Auswirkung eines erhöhten Abgasgegendrucks bei unterschiedlichen Fahrzuständen untersuchen zu können, sollten im Bereich hinter dem Endschalldämpfer zusätzliche Klappen in die zweiflutige Abgasanlage eingebaut werden. Deren Anstellwinkel im Abgasmassenstrom und somit der von ihnen verursachte Gegendruck sollte dann mittels eines elektrischen Servomotors verändert und eingestellt werden können. Dabei zeigten vorhergehende Untersuchungen, dass die Bestückung mit lediglich einer Abgasklappe ausreichend ist, da die serienmäßig verbaute „Soundklappe“ bei den anzufahrenden Fahrzuständen ohnehin stets geschlossen war und somit der gesamte Abgasmassenstrom aus einem Rohrende austrat. Um im Versuch definierte Abgasgegendrücke einstellen zu können, wurde der über der eingebauten Klappe abfallende Abgasgegendruck mittels eines Differenzdrucksensors gemessen und kontrolliert.

Zur Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs wurden eine Kraftstoffwaage sowie ein Fahrpedalsteller eingesetzt. Die Versuche zur Untersuchung des Kraftstoffverbrauchs sollten lediglich bei Konstantfahrtpunkten durchgeführt werden. Die Untersuchung im Zyklus ist nicht möglich, weil das Fassungsvermögen der Kraftstoffwaage mit 2 l zu gering ist. Darüber hinaus war das Abfahren von Zyklen mit dem vorhandenen Fahrpedalsteller nicht möglich. Als repräsentative Lastzustände für die Verbrauchsmessungen wurden drei Konstantfahrtpunkte gewählt:

- 50 km/h, Gangstufe 5 (Stadtfahrt)
- 100 km/h, Gangstufe 6 (Überlandfahrt)
- 135 km/h, Gangstufe 6 (Autobahnfahrt)

Bei ersten Versuchen zeigte sich, dass bei geringen Gegendrücken bis ca. 125 mbar kein tendenzieller Zusammenhang zwischen eingestelltem Abgasgegendruck und dem Kraftstoffverbrauch messbar ist. *Bild Bild 11* zeigt die prozentuale Änderung der Verbrauchsmittelwerte bei unterschiedlichen Fahrzuständen und unterschiedlichen Abgasgegendrücken mit der zugehörigen Standardabweichung. Die Messwerte streuen bei den niedrigen Gegendrücken bei allen Fahrzeuggeschwindigkeiten sehr stark um Null. Die zugehörigen Standardabweichungen nehmen mit bis zu +/- 4 % sehr große Werte an. Es wurde daher entschieden, im Weiteren deutlich höhere Ge-

gedrücke einzustellen, um somit eventuell einen Einfluss sichtbar machen zu können. Allerdings gelang dies nur bei der 135 km/h-Fahrt im 6. Gang. Hier konnte bei einem eingestellten Gegendruck von 300 mbar eine Zunahme des mittleren Kraftstoffverbrauchs um 4 % gemessen werden. Die Standardabweichung nimmt mit $\pm 0,5$ % einen deutlich niedrigeren Wert an. Bei 500 mbar beträgt die Zunahme des mittleren Kraftstoffverbrauchs bereits knapp 9 %. Die Standardabweichung nimmt zwar im Vergleich zur 300 mbar Messung leicht zu, zeigt aber mit $\pm 1,1$ % vergleichsweise noch recht niedrige Werte. Bei den 50 km/h- und 100 km/h-Messungen konnte infolge der Undichtigkeiten an der Klappe und des dadurch verursachten hohen blow by lediglich ein maximaler Gegendruck von 85 mbar bzw. 125 mbar eingestellt werden.

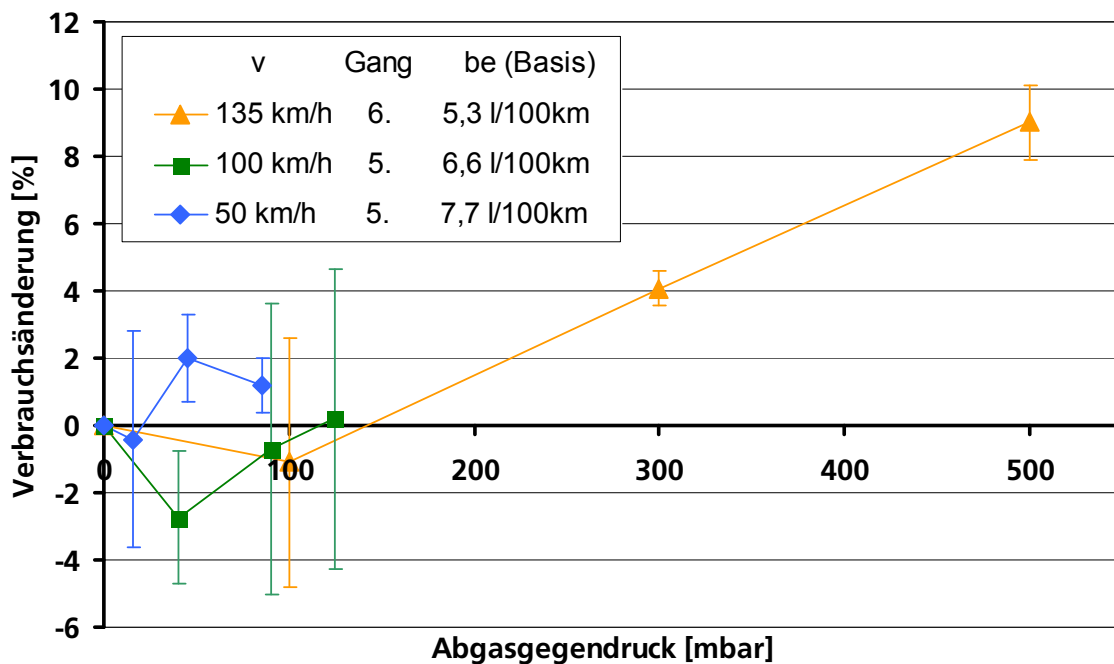


Bild 11: Prozentuale Änderung des Kraftstoffverbrauchs bei erhöhten Abgasgegendrücken für unterschiedliche Konstantfahrten. Dargestellt sind die Mittelwerte der Verbrauchsmessungen und die zugehörige Standardabweichung

Wie oben erläutert konnte bei kleinen Gegendrücken bis etwa 100 mbar bei keiner der drei Geschwindigkeiten ein signifikanter Verbrauchseinfluss festgestellt werden. Betrachtet man den relevanten Bereich aber auf rein theoretischer Basis, so wäre hier sogar eine Verbrauchseinsparung möglich, denn wie in Kap.3.4 erläutert, führt ein etwas erhöhter Abgasgegendruck zu einer erhöhten internen Abgasrückführungsrate, wodurch gerade im Teillastbereich Verbrauchseinsparungen möglich sind. Auch die Tatsache, dass die serienmäßig verbauten Wabenstrukturen der NO_x -Speicherkatalysatoren vor den Untersuchungen entnommen wurden, würde für diese Hypothese sprechen, denn durch ihre Entnahme wurde das Gegendruckverhalten der Abgasanlage, auf welches ja die Motorsteuerung optimiert wurde, verändert. Folgt man dieser Argumentation, so würde durch leichtes Erhöhen des Abgasgegendrucks mittels der Abgasklappe quasi wieder das optimierte Verhalten der Serienanlage hergestellt werden. Bei höheren Gegendrücken hingegen zeigt sich bei der 135 km/h-Messung der erwartete tendenzielle Verlauf, nämlich ein Ansteigen des Kraftstoffverbrauchs mit steigenden Gegendrücken. Dieses Verhalten ist auf die erhöhte Ausschleifarbeit am Zylinder zurückzuführen. An dieser Stelle muss aber

betont werden, dass die hohen Abgasgegendrücke von 300 mbar und 500 mbar, bei denen eine signifikante Zunahme des Verbrauchs festgestellt wurde, in etwa um den Faktor 10 höher liegen als die von den bisherigen TEG-Funktionsmustern verursachten Gegendrücke. Diese lagen bei gleicher Fahrzeuggeschwindigkeit im Bereich 20 mbar bis maximal 50 mbar.

6.3. Untersuchung des Kraftstoffverbrauchs bei elektrischer Leistungseinspeisung

Im Weiteren sollten experimentelle Untersuchungen durchgeführt werden, um den Hauptnutzen eines TEG, nämlich die Senkung des Kraftstoffverbrauchs durch Entlastung der Lichtmaschine, quantifizierbar zu machen.

Stellvertretend für den TEG wurde bei den folgenden Versuchen ein Netzteil als elektrische Energiequelle verwendet. Dieses wurde, wie in *Bild Bild 4* schematisch dargestellt, ins Fahrzeugbordnetz eingebunden. Mit Hilfe des Netzteils konnten somit je nach Bedarf unterschiedlich hohe elektrische Leistungen eingespeist und der Generator unterschiedlich stark entlastet werden.

Bei der elektrischen Verkabelung des Netzteils muss darauf geachtet werden, dass hierfür die für die Batterieladung vorgesehenen Anschlussklemmen im Motorraum verwendet werden, da bei einer direkten Anbindung an die Fahrzeugbatterie im Kofferraum das elektrische Energiemanagement umgangen würde. In diesem Fall würde der gesamte Ladestrom des Netzteils in die Batterie fließen, ohne den Generator zu entlasten, was ja bei den anstehenden Versuchen nicht gewollt war.

Bild Bild 12 zeigt die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung für die drei definierten Fahrzustände bei Einspeisung unterschiedlich hoher elektrischer Leistung. Bei 135 km/h wurde bei 200 W Einspeisung eine sehr geringe mittlere Verbrauchsreduktion von 0,5 % ermittelt. Diese nimmt bei 400 W Rückspeisung jedoch mit 4 % deutlich zu. Bei 800 W Rückspeisung zeigt sich im Vergleich zu 400 W keine weitere Verbrauchsreduktion. Die Standardabweichung nimmt mit Werten von +/- 0,7 und +/- 0,8 % recht geringe Werte an.

Eine höhere relative Kraftstoffeinsparung wurde bei 100 km/h Konstantfahrt gemessen. Hier zeigt sich auch über alle drei Einspeisungspunkte ein kontinuierlich fallender Verlauf. Bei 800 W elektrischer Einspeisung wurde eine Verbrauchsreduktion von 6,8 % gemessen. Die Standardabweichung zeigt mit Werten um +/- 1,5 % deutlich höhere Werte als bei 135 km/h.

Am deutlichsten konnte eine relative Kraftstoffersparnis bei 50 km/h Stadtfahrt im 5. Gang nachgewiesen werden. Auch hier ist der Verlauf der Verbrauchsmittelwerte mit steigender elektrischer Leistungseinspeisung tendenziell fallend, wenngleich die Effekte unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Denn während bei der 200 W-Messung eine mittlere Verbrauchsminderung von 7,4 % ermittelt wurde, fällt sie bei nochmaliger Erhöhung der Einspeiseleistung um 200 W auf insgesamt 400 W nur noch um 1,3 Prozentpunkte mehr auf 8,7 % ab. Allerdings zeigt die Messung bei 200 W auch eine recht große Standardabweichung. Bei weiterer Erhöhung der elektrischen Leistung auf 800 W nimmt die mittlere Verbrauchsreduktion wieder deutlicher zu. Hier wurde im Mittel eine relative Kraftstoffeinsparung von 13,3 % gemessen.

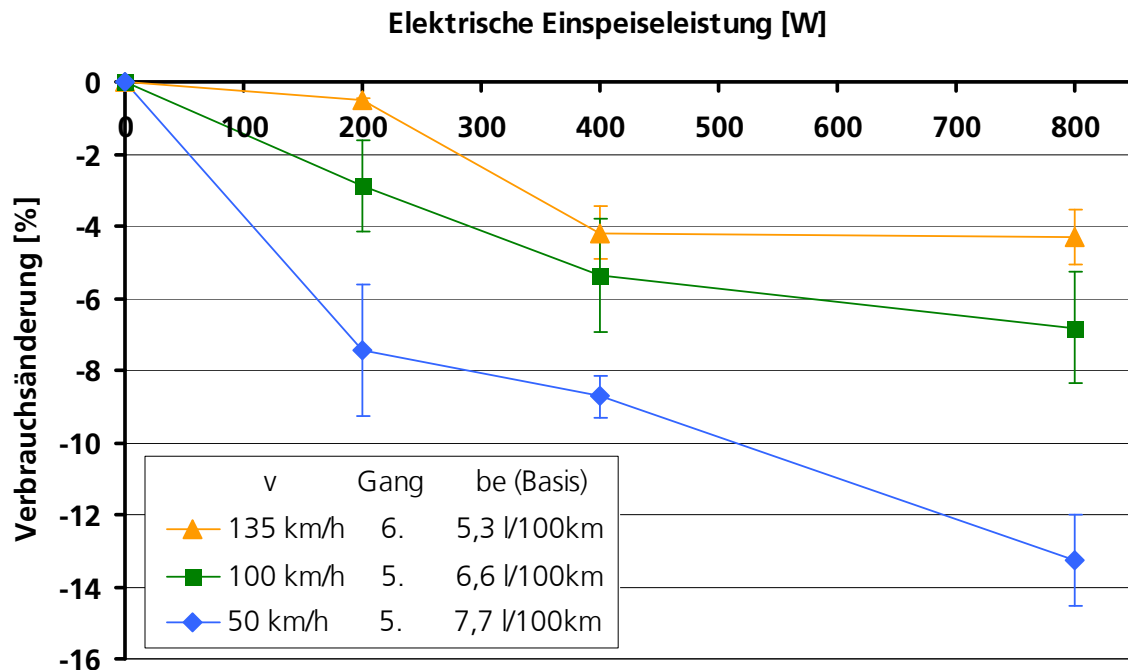


Bild 12: Prozentuale Verbrauchsänderung in Abhängigkeit der ins Bordnetz eingespeisten elektrischen Leistung für unterschiedliche Konstantfahrten. Dargestellt sind die Mittelwerte der Verbrauchsmessungen sowie die zugehörige Standardabweichung

Die in *Bild 12* dargestellten prozentualen Verbrauchsänderungen bei elektrischer Stromspeisung zeigen prinzipiell den erwarteten Verlauf, nämlich ein Absinken des Kraftstoffverbrauchs mit zunehmender Leistungseinspeisung. Darüber hinaus wird aber auch deutlich, dass dieser Verlauf nicht linear ist. So zeigen beispielsweise die 100 km/h– sowie die 135 km/h–Messungen eine Verminderung des Effekts hin zu höheren eingespeisten Leistungen. Auch bei den 50 km/h–Messungen ist der Verlauf nicht linear. Allerdings fällt der Effekt hier weniger ausgeprägt aus.

Eine Erklärung für die beobachteten Phänomene ist die durch die Entlastung des Motors hervorgerufene Verschiebung des Motorbetriebspunkts und damit seines Wirkungsgrades. Da Verbrennungsmotoren bei annähernd Vollastbetrieb am effizientesten arbeiten, führt ein Entlasten des Motors immer auch zu einer Verschlechterung seines Wirkungsgrades. So ist es theoretisch denkbar, dass diese Verminderung der Effizienz des Motors den Benefit seiner Entlastung reduziert oder sogar kompensiert. Die Folge wäre dann ein Abflachen der Verbrauchsreduktion mit zunehmender Motorentlastung, wie er bei der 100 km/h–Messung und der 135 km/h–Messung beobachtet wurde.

Um die obige Theorie zu überprüfen, wurde eine überschlägige analytische Verbrauchsberechnung durchgeführt. Dafür wird zunächst die gesamte an der Motorwelle anliegende Leistung vor und nach der Entlastung der Lichtmaschine bestimmt. Diese ergibt sich zu:

$$P_{Welle} = P_{Reib} + P_{Gen} + P_{NA} + P_{Trieb} \quad (6-4)$$

Darin ist P_{Reib} die Reibleistung des Motors, P_{Gen} die Generatorleistung, P_{NA} die Leistungsaufnahme der sonstigen Nebenaggregate (z.B. Öl- und Kraftstoffpumpe) und P_{Trieb} die Leistung die an den Triebstrang zur Überwindung der Fahrwiderstände abgegeben wird.

Die Reibleistung P_{Reib} kann nach [12] aus dem Reibmitteldruck p_{mr} dem Hubvolumen V_H und der Drehzahl n berechnet werden:

$$P_{Reib} = \frac{p_{mr} \cdot V_H}{4\pi} \cdot n \quad (6-5)$$

Die Triebstrangleistung P_{Trieb} kann mit Hilfe der am Rollenprüfstand bestimmten Radleistung errechnet werden zu

$$P_{Trieb} = \frac{P_{Rad}}{\eta_{Trieb}} \quad (6-6)$$

wobei für den Triebstrangwirkungsgrad η_{Trieb} als Richtwert 90 % angenommen werden kann.

Die Generatorleistung P_{Gen} ergibt sich aus der Differenz aus der elektrischen Gesamtverbraucherleistung P_{el_Ver} , die wie oben erläutert auf einen konstanten Wert von 1000 W geregelt wurde, und der jeweiligen elektrischen Leistungseinspeisung P_{el_Ein} unter Berücksichtigung des Generatorwirkungsgrads η_{Gen} :

$$P_{Gen} = \frac{P_{el_Ver} - P_{el_Ein}}{\eta_{Gen}} \quad (6-7)$$

Letzterer liegt bei modernen Generatoren im betreffenden Laststrombereich und der betreffenden Drehzahl lt. [13] oberhalb von 60 %.

Vernachlässigt man die Leistungsaufnahme der Nebenaggregate wie Öl- und Kraftstoffpumpe, die ohnehin verhältnismäßig gering ausfällt, so ergibt sich:

$$P_{Welle} = \frac{p_{mr} \cdot V_H}{4\pi} \cdot n + \frac{P_{el_Ver} - P_{el_Ein}}{\eta_{Gen}} + \frac{P_{Rad}}{\eta_{Trieb}} \quad (6-8)$$

Nach Berechnung der Wellenleistung vor und nach der elektrischen Einspeisung kann dann die prozentuale Leistungsentlastung des Motors bestimmt werden, welche einen ersten Anhaltswert für die Größenordnung des Benefits geben kann. Sie ist in *Bild Bild 13* für 100 km/h und 135 km/h als punktgestrichelte Linie dargestellt.

Stellt man nun Gleichung (6-8) um, so wird deutlich, dass die vorderen beiden Terme unabhängig von der Entlastung des Generators immer gleich groß bleiben:

$$P_{Welle} = P_{Reib} + \frac{P_{el_Ver}}{\eta_{Gen}} + \frac{P_{Rad}}{\eta_{Trieb}} - \frac{P_{el_Ein}}{\eta_{Gen}} = P_{Reib} + \frac{P_{el_Ver}}{\eta_{Gen}} + \frac{P_{Rad}}{\eta_{Trieb}} + P_{Nutz} \quad (6-9)$$

Da sich die Fahrzeuggeschwindigkeit und damit die Drehzahl nicht ändern, bleibt die Reibleistung immer gleich. Auch die Verbraucherleistung wurde auf einen konstanten Wert eingestellt. Der Generatorwirkungsgrad ändert sich lt. [13] über dem fließenden Laststrom nur sehr gering, weshalb hier ein konstanter Wert angenommen wurde. Die Entlastung der Welle durch die elektrische Einspeisung hat also den gleichen Effekt wie eine äquivalente Reduktion der Triebstrangleistung, also der Nutzleistung des Motors P_{Nutz} . Durch deren Berechnung wäre es somit möglich, den entsprechenden spezifischen Kraftstoffverbrauchswert bei elektrischer Einspeisung aus dem spezifischen Verbrauchsdiagramm abzulesen. Da das spezifische Verbrauchsdiagramm des betreffenden Fahrzeugmotors aber nicht zur Verfügung stand, wurden die spezifischen Verbräuche aus einem alternativen Muscheldiagramm eines Saugmotors ermittelt. Die so ermittelten Verbrauchsänderungen bei den jeweiligen Einspeiseleistungen sind in *Bild Bild 13* für 100 km/h (6. Gang) und 135 km/h (6. Gang) als gestrichelte Linien hinterlegt.

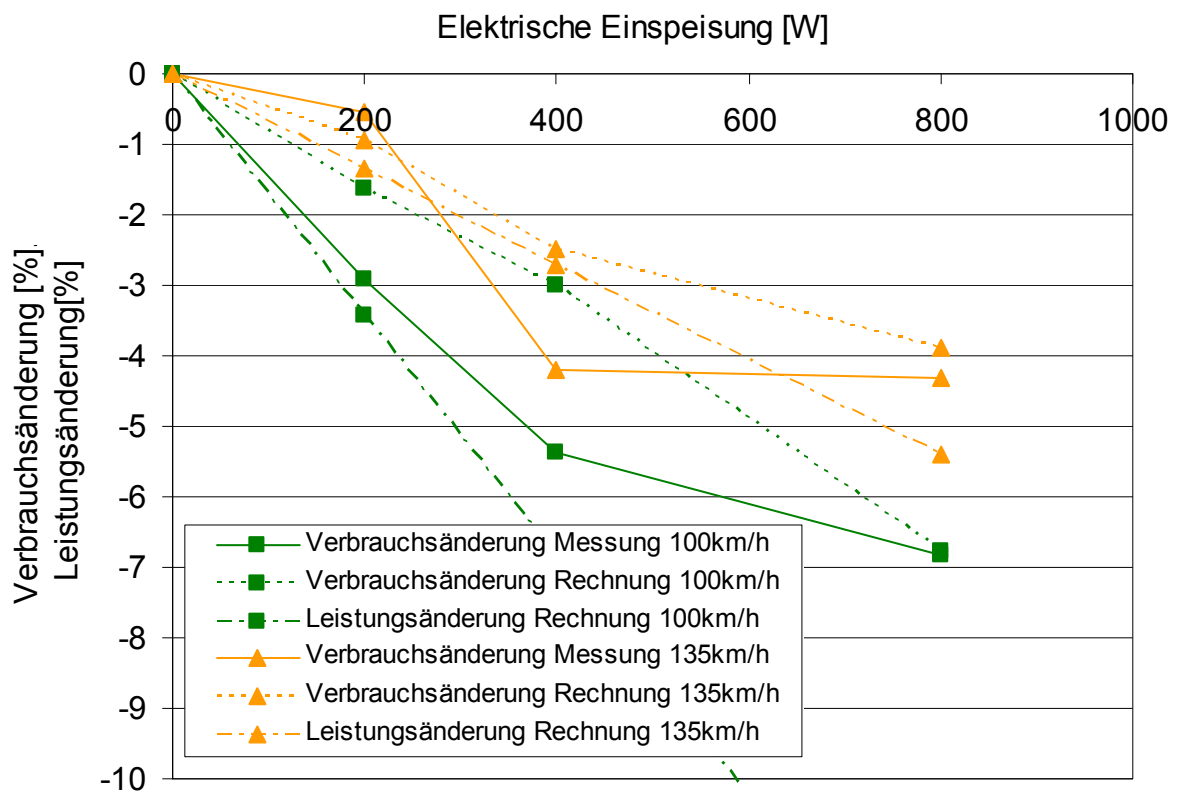


Bild 13: Vergleich der gemessenen und berechneten prozentualen Verbrauchsänderung über der elektrischen Einspeisleistung, sowie Darstellung der berechneten prozentualen Leistungsänderung an der Motorwelle über der elektrischen Einspeisleistung

Die berechneten prozentualen Verbrauchsänderungen weichen zum Teil deutlich von den Gemessenen ab. So zeigt sich tendenziell bei den Messungen eine größere

Verbrauchsreduktion als bei den Berechnungen. Allerdings zeigt der Vergleich der gemessenen prozentualen Verbrauchseinsparung mit der berechneten prozentualen Leistungsreduktion an der Welle, dass die rein mechanische Entlastung der Welle durchaus auch noch höhere Potentiale bieten würde. Diese können aber vermutlich aufgrund der spezifischen Verbrauchscharakteristik des Motors nicht ausgeschöpft werden. Auch in den Verläufen sind Unterschiede zu erkennen. Während die berechneten Werte einen recht linearen Abfall mit höheren Einspeisewerten zeigen, ist der Kurvenverlauf der gemessenen Werte nicht linear. Dies wiederum wird auf die spezifische Verbrauchscharakteristik des Motors zurückgeführt, die aber mangels entsprechender Daten nicht analysiert werden konnte.

7. Bau und Fahrzeugintegration innovativer TEG–Funktionsmuster

Aktuelle TEG–Funktionsmuster sind meist kraftschlüssig verspannte Stacks aus Wärmeübertragern und thermoelektrischen Modulen. Aufgrund der hohen Anpressdrücke sind die Muster massiv gebaut und damit schwer. Die Verspannungselemente erhöhen die Anzahl der Einzelteile und damit die Komplexität. U.a. aus diesem Grund eignen sich bisherige Aufbautechnologien nicht für eine Industrialisierung der TEG. Am Institut für Fahrzeugkonzepte werden daher innovative Aufbautechnologien entwickelt, dargestellt und getestet. In einem Forschungsverbund mit dem Institut für Werkstoff–Forschung in Köln und dem Institut für Technische Thermodynamik in Stuttgart werden dabei unterschiedliche Beschichtungsverfahren wie Plasmaspritzen, PVD aber auch Fügeverfahren wie Metalllöten und Glaslöten untersucht.

Ein weiteres Fügeverfahren, das dabei zur Anwendung kommen kann und welches am Institut für Fahrzeugkonzepte untersucht wird, ist Kleben. Moderne Polymerkleber haben Einsatztemperaturen bis 300 °C und kommen damit für die heißseitige Verbindung bei Verwendung von Bi_2Te_3 –Modulen in Frage, in jedem Fall aber für die kaltseitige Verbindung, wo die Temperaturen auch beim Einsatz von Hochtemperaturmaterial erfahrungsgemäß 150 °C nicht übersteigen. Darüber hinaus sind Polymerkleber kostengünstig, elastisch, so dass thermomechanische Spannungen z. T. gar nicht erst entstehen können und gleichzeitig elektrisch isolierend, wodurch die meist keramische elektrische Isolationsschicht zwischen Modul und Wärmeübertrager entfallen könnte.

Zunächst wurden unterschiedliche Klebstoffsysteme ausgewählt und anhand von Musterproben bei unterschiedlichen Prüftemperaturen und nach unterschiedlichen thermischen Konditionierungen untersucht. Dabei lag das Hauptaugenmerk auf der mechanischen Belastbarkeit sowie der Bruchdehnung der Proben. Die Wahl für den Aufbau eines TEG–Funktionsmusters fiel dabei auf ein silikonbasiertes Klebstoffsystem, das bis 350 °C einsetzbar ist. Der Kleber zeigt sehr hohe Bruchdehnungen, was das Entstehen thermomechanischer Spannungen minimiert.

Für die Fahrzeugintegration des aufgebauten Funktionsmusters wurden die Fahrzeugteilsysteme Abgasanlage, Kühlsystem und elektrisches Bordnetz modifiziert und erweitert. Die Abgasanlage wurde mit einem Bypasssystem und elektrisch verstellbaren Klappen ausgerüstet (*Bild 14*). Der Bypass schützt den TEG vor zu hohen Temperaturen und verhindert zu hohe Abgasgedrücke der wärmeübertragenden Struktur. Kühlwasserseitig wurde der TEG ins Hauptkühlsystem des Motors integriert. Dabei sorgt eine zusätzliche kleine Wasserpumpe mit geringer Leistungsaufnahme dafür, dass der TEG immer ausreichend mit Kühlwasser versorgt wird. Die Einspei-

sung der elektrischen TEG–Leistung ins Fahrzeugbordnetz geschieht mittels eines modifizierten Solarladereglers, auch Maximum Power Point Tracker (MPPT) genannt.

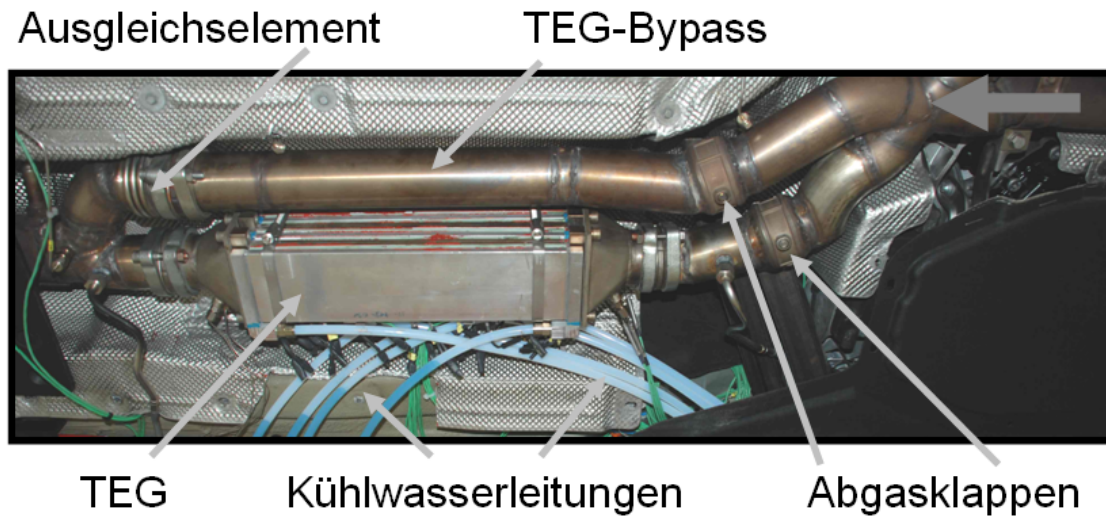


Bild 14: Stoffschlüssig aufgebauter TEG, integriert in die Abgasanlage des instituts-eigenen Versuchsfahrzeugs

Darüber hinaus wurde am Institut für Fahrzeugkonzepte eine weitere Aufbautechnologie entwickelt, welche intern als Kapselrohrbauweise¹ bezeichnet wird. Diese wurde entwickelt, um die Vorteile einer stoffschlüssigen Bauweise, nämlich geringe Komplexität, niedriges Gewicht und gute Industrialisierbarkeit mit dem Vorteil geringer thermomechanischer Spannungen bei der kraftschlüssigen Bauweise zu verbinden. Erste Untersuchungen mit einem einfachen, nicht leistungsoptimierten Funktionsmuster (siehe *Bild Bild 15*) lassen auf eine sehr gute thermische Ankopplung der Module an die Wärmeübertrager schließen, auch zeigen die Strömungsräume der Fluide bislang keinerlei Undichtigkeiten.



Bild 15: TEG–Funktionsmuster in Kapselrohrbauweise¹

¹ beschreibt eine hochintegrierte Mischbauweise aus stoffschlüssigem und kraftschlüssigen Aufbau. Patent in Anmeldung.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Am Institut für Fahrzeugkonzepte steht die ganzheitliche Betrachtung der TEG-Systeme im Vordergrund. Voraussetzung hierbei ist jedoch das Verständnis der Teilkomponenten Modul und Wärmeübertrager sowie der TEG-Komponente an sich. Mehrere Funktionsmuster wurden in der Vergangenheit entwickelt und demonstriert. Dabei wurde gerade mit den neueren Generationen ein Fortschritt in Richtung der Industrialisierung der Komponente aufgezeigt. Aber auch das Fahrzeug und im Speziellen seine Wechselwirkungen mit dem TEG sind von entscheidender Bedeutung beim systemtechnischen Verständnis. Im vorliegenden Beitrag wurde gerade letzterer Punkt eingehender betrachtet.

Als verbrauchssteigernde Effekte sind hierbei die Erhöhung von Fahrzeugmasse, Kühllast und Abgasgegendruck zu nennen. Die Verkürzung des Motorwarmlaufs sowie als Haupteffekt die Entlastung der Lichtmaschine durch die elektrische Leistungseinspeisung sind als verbrauchsreduzierend zu betrachten. Je nach Einbauposition werden darüber hinaus die Abgasnachbehandlungskomponenten beeinträchtigt.

Im Weiteren wurden das institutseigene Versuchsfahrzeug und die von einer TEG-Integration betroffenen Fahrzeugteilsysteme Abgasanlage, Kühlsystem und Bordnetz analysiert und mit Messtechnik ausgestattet, so dass danach experimentelle Untersuchungen durchgeführt werden konnten. Dabei wurde zunächst das thermodynamische Verhalten von Abgas und Kühlwasser bei unterschiedlichen Fahrzuständen betrachtet und darauf aufbauend die exergetischen Potentiale unterschiedlicher Einbaupositionen in der Abgasanlage berechnet. Dabei zeigte sich, dass der mögliche Exergiestrom bei einer Einbauposition kurz nach den Oxidationskatalysatoren (Einbauposition A) gerade im unteren Teillastbereich deutlich höher liegt als im Bereich des Bodentunnels am Fahrzeugunterboden (Einbauposition C). Für 100 km/h-Konstantfahrt im 5. Gang lag der potentielle Exergiestrom mit 9,7 kW beinahe doppelt so hoch. Damit wäre bei gleichen Wirkungsgraden des thermoelektrischen Materials die Erzeugung einer doppelt so hohen elektrischen Leistung möglich. Um die theoretisch betrachteten Verbrauchseinflüsse auch quantifizieren zu können, wurden darüber hinaus Verbrauchsmessungen bei erhöhtem Abgasgegendruck sowie bei Entlastung der Lichtmaschine durch elektrische Leistungseinspeisung durchgeführt. Dabei wurden die verbrauchsbeeinflussenden Maßnahmen aber nicht mit Hilfe eines installierten TEG durchgeführt. Um die Verbrauchseinflüsse getrennt voneinander und in unterschiedlicher Ausprägung analysieren zu können, wurden hierbei Hilfsmittel verwendet, nämlich eine verstellbare Abgasklappe zur Erzeugung unterschiedlich hoher Abgasgegendrucke sowie ein externes elektrisches Netzteil zur Einspeisung einer konstanten elektrischen Leistung ins Bordnetz. Die durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass Kraftstoffverbrauch bei 135 km/h-Konstantfahrt (6. Gang) grundsätzlich zunimmt. So konnte bei 300 mbar Gegendruck ein Mehrverbrauch von 4 %, bei 500 mbar Gegendruck gar ein Mehrverbrauch von 9 % bei akzeptabler Standardabweichung gemessen werden. Allerdings konnte bei kleinen Gegendrücken kleiner 125 mbar weder bei 135 km/h (6. Gang) noch bei den anderen Konstantfahrtpunkten 50 km/h (5. Gang) und 100 km/h (5. Gang) ein signifikanter Verbrauchseinfluss festgestellt werden. Hier war die Streuung der Messwerte aus noch nicht abschließend geklärter Ursache zu groß. Allerdings muss an dieser Stelle erneut betont werden, dass die hohen Abgasgegendrucke von 300 mbar und

500 mbar, bei denen eine signifikante Zunahme des Verbrauchs festgestellt wurde, in etwa um den Faktor 10 höher liegen als die von den bisherigen TEG-Funktionsmustern verursachten Gegendrücke. Diese lagen bei gleicher Fahrzeuggeschwindigkeit im Bereich 20 mbar bis maximal 50 mbar.

Eine deutliche Reduktion des Kraftstoffverbrauchs konnte bei elektrischer Leistungseinspeisung ermittelt werden. So reduzierte sich der mittlere Kraftstoffverbrauch bei 400 W Einspeisung bei 135 km/h (6. Gang) um 4,2 %, bei 50 km/h bereits um mehr als 8 %. Auffallend bei diesen Untersuchungen war die nichtlineare Abnahme des Kraftstoffverbrauchs über der Höhe der eingespeisten Leistung. Beispielsweise war bei der 135 km/h trotz Verdopplung der Leistung von 400 W auf 800 W praktisch keine weitere Verbrauchsreduktion festzustellen. Die Annahme, dies sei in der Verschlechterung des Wirkungsgrads infolge der Lastreduktion des Motors begründet, wurde anhand analytischer Berechnungen bestätigt.

Anhand der Untersuchungen konnte somit nachgewiesen werden, dass mittels elektrischer Leistungseinspeisung erhebliche Verbrauchsminderungen erreicht werden können. Der negative Einfluss eines erhöhten Abgasgedrucks konnte aufgrund zu großer Messabweichungen in den für einen TEG relevanten Bereichen nicht nachgewiesen werden.

Im Weiteren kann nun das bereits ins Fahrzeug integrierte, stoffschlüssig aufgebaute TEG-Funktionsmuster untersucht werden. Da der TEG in den Hauptkühlkreislauf des Fahrzeugs integriert ist, wäre hierbei u.a. die Untersuchung des transienten Aufheizverhaltens des Kühlsystems von Interesse, sowie die dadurch erzielte Verbrauchsverbesserung bei Kaltstart des Fahrzeugs.

Im Fokus der weiteren Entwicklung am Institut für Fahrzeugkonzepte steht zum einen die weitere Untersuchung des Gesamtsystems, zum anderen die Weiterentwicklung der Aufbautechnologie der Thermoelektrischen Generatoren im Hinblick auf die Industrialisierung der Komponente. Dabei ist ein Ziel der Entwicklung die Leistungsdichte der Komponente von derzeit 25 W/kg auf 50 W/kg zu verdoppeln.

Literatur

- [1] R. C. Mallik, C. Stiewe, G. Karpinski, R. Hassdorf, E. Müller, Thermoelectric Properties of $\text{Co}_4\text{Sb}_{12}$ Skutterudite Materials with Partial In Filling and Excess In Addition, *Journal of Electronic Materials*, 38 (7), pp. 1337-1343, July 2009. DOI: 10.1007/s11664-009-0663-0
- [2] Geskes, P. ; Strauss, T. : Das Abgaswärme-Management. In: *MTZ* 10 (2006)
- [3] Basshuysen, R. v. ; Schäfer, F. : *Handbuch Verbrennungsmotor*. 3. Aufl. Wiesbaden: Vieweg & Sohn, 2005
- [4] Merker, G. P. : *Technische Verbrennung. Motorische Verbrennung*. Stuttgart: Teubner, 1999
- [5] Klüting, M. , Landerl, C. : Der neue Sechszylinder-Ottomotor von BMW: Teil 1: Konzept und konstruktiver Aufbau. In: *MTZ* 65 (2004)
- [6] Schwarz, C ; Missy, S. ; Steyer, H ; Durst, B. ; Schünemann, E ; Kern, W ; Witt, A. : Die neuen Vier- und Sechszylinder-Ottomotoren von BMW mit Schichtbrennverfahren. In: *MTZ* 05 (2007)
- [7] URL: <http://projekt-sbk.com/de/upload/2%20Generatorregelung%20BMW%20deutsch.ppt%20%5BKompatibilitatsmodus%5D.pdf>

- [8] URL: <http://www.imc-berlin.de/messtechnik/index.phtml?a=ob&bid=5&tid=1475&m=0:1708:1475:1475&zISID=663b2c9f7667bf5a701cd1fcb70bc99d>
- [9] URL: <http://www.motorlexikon.de/?l=6960>
- [10] 91/441/EWG Richtlinie des Rates der Europäischen Gemeinschaften. 1991
- [11] André, M. : Real-world driving cycles for measuring cars pollutant emissions – Part A: The ARTEMIS European driving cycles. Institute National de Recherche sur les transports et leur sécurité. Report INRETS-LTE 0411. 2004
- [12] URL: <http://www.motorlexikon.de/?l=5647>
- [13] Braess, H. ; Seiffert, U. (Hrsg.) : *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. 5. Aufl. Wiesbaden: Vieweg & Sohn, 2007
- [14] Koch-Gröber, H. : Vorlesungsskript Antriebsstrang; Hochschule Heilbronn. 2009

Autoren:

Dipl.–Ing. Christian Häfele, Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, Stuttgart

Dr.–Ing. Michael Schier, Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, Stuttgart

Steffen Hahn, Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, Stuttgart

Dipl.–Ing. Tobias Weiler, Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, Stuttgart

Prof. Dr.–Ing. Horst Friedrich, Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, Stuttgart