

Betrieb eines Rankine-Prozesses zur Abgaswärmenutzung im PKW

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Dipl.-Ing. Tilmann Abbe Horst
aus (Geburtsort): Detmold

eingereicht am: 4. August 2014

mündliche Prüfung am: 6. Mai 2015

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Köhler
Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2015

Umschlaggestaltung unter Verwendung eines Bilds der BMW Group.

Copyright Shaker Verlag 2015

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3923-8

ISSN 0945-0742

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand zwischen Januar 2010 und Juli 2015 im Rahmen des Projekts „Turbosteamer“ bei der BMW Group Forschung und Technik in München und unter der wissenschaftlichen Betreuung der Institute für Thermodynamik und Verbrennungskraftmaschinen der Technischen Universität Braunschweig. An dieser Stelle möchte ich mich bei den Personen bedanken, die mich während dieser Zeit unterstützt haben.

Ich danke Herrn Prof. Köhler und Herrn Prof. Eilts für ihren Einsatz als Erst- und Zweitgutachter und das mir durch die Übernahme der Betreuung entgegengebrachte Vertrauen. Herrn Prof. Küçükay danke ich für sein Engagement als Vorsitzender der Promotionskommission. Mein besonderer Dank gilt Willi Tegethoff, der meine wissenschaftliche Arbeit bereits im Studium gefördert hat und auch während meiner Doktorandenzeit jederzeit für den fachlichen und persönlichen Austausch da war.

Neben der wissenschaftlichen Betreuung war die Zusammenarbeit mit den Kollegen der BMW Antriebsforschung, den Partnern in der Vor- und Serienentwicklung und den Zulieferern maßgeblich verantwortlich für das Gelingen dieser Arbeit. Ihnen allen danke ich für zahlreiche Diskussionen, die mir wichtige Impulse gegeben haben. Besonders hervorheben möchte ich Marco Seifert und Jürgen Ringler, die mir das Thema mit der Einstellung als Diplomand anvertraut und schließlich die Weiterführung in Form dieser Arbeit ermöglicht haben. Außerdem Claus Polap, der viele der in der Arbeit präsentierten Ergebnisse durch seinen Einsatz für den Prüfstandsaufbau erst möglich gemacht hat, sowie Bernhard Zuck, der mich bei der Auslegung der Wärmemanagementintegration unterstützt hat. Jens Berner, Hermann Rottengruber und Christian Schmidt bin ich aufgrund ihres Engagements für meine Doktorandentätigkeit zu besonderem Dank verpflichtet. Mein Dank gilt außerdem den Studenten, die das Projekt mit ihren Arbeiten vorangebracht haben.

Auch ohne die Unterstützung meiner Familie und meiner Freunde wäre der erfolgreiche Abschluss der Arbeit nicht möglich gewesen. Den größten Anteil daran hat Stefanie, die mich durch alle Höhen und Tiefen der letzten Jahre begleitet hat. Der Gedankenaustausch mit Andreas hat mir oft geholfen, die richtige Lösung zu finden. Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern dafür, dass sie mir diesen Weg ermöglicht haben.

Kurzfassung

Die weitere Steigerung der Energieeffizienz ist ein wesentliches Ziel der heutigen PKW-Entwicklung. Eine vielversprechende Maßnahme ist der Einsatz eines Rankine-Prozesses zur Wandlung der Abwärme des Verbrennungsmotors in Energie zum Antrieb des Fahrzeugs oder der elektrischen Nebenverbraucher. Dafür werden in der Literatur Potenziale zur Verbrauchssenkung im Bereich von 5 bis 15 % ausgewiesen. Diese Arbeit untersucht die dabei bisher vernachlässigten Einflüsse der Fahrzeugintegration und des dynamischen Betriebs. Dies geschieht auf Basis eines Systems zur Nutzung der Abgaswärme, das elektrische Energie an das Bordnetz abgibt und die Kondensationswärme über das Motorkühlsystem an die Umgebung abführt.

Der Abgaswärmeverlust in Abhängigkeit von der Position des Verdampfers, die Begrenzung der elektrischen Leistungsabgabe durch die Aufnahmefähigkeit des Bordnetzes und der zur Bereitstellung der zusätzlichen Kühlleistung erforderliche Energiebedarf werden als die wichtigsten Integrationseffekte identifiziert. Das mittlere Potenzial zur Verbrauchssenkung des zugrunde gelegten Systems, das unter idealen Rahmenbedingungen ungefähr 4 % beträgt, verringert sich dadurch um 75 % auf nur noch etwa 1 %.

Für den dynamischen Betrieb wird ein Regelsystem entworfen, anhand von Simulationsmodellen ausgelegt und erfolgreich am Prüfstand erprobt. Die gewonnenen Erkenntnisse über das dynamische Betriebsverhalten des Systems erlauben die Bewertung des Potenzials zur Verbrauchssenkung in kundennahen Fahrprofilen. Dort kommt die Aufheizzeit als weitere Wechselwirkung hinzu und führt dazu, dass der Kraftstoffverbrauch bei kurzen Fahrstrecken um bis zu 1 % ansteigt.

Auf Basis dieser Ergebnisse werden Maßnahmen zur Verbesserung der Fahrzeugintegration aufgezeigt. Die Isolierung der Abgasanlage, die Nutzung der Bordnetzbatteie als Zwischenspeicher und die Reduzierung des Systemgewichts bewirken eine Steigerung des mittleren Potenzials zur Verbrauchssenkung auf 1,8 % im Kundenbetrieb auf der Autobahn. Die Anhebung des Prozesswirkungsgrads und die Optimierung der Betriebsstrategie bewirken weitere Steigerungen bis auf 2,7 %, nur noch begrenzt durch den Bordnetzbedarf. Bei höherem Bordnetzbedarf könnte schließlich eine maximale Senkung des Kraftstoffverbrauchs um 6 % im Langstreckenbetrieb erzielt werden.

Abstract

One essential goal of today's passenger car development is to further increase the energy efficiency. A promising approach is the adoption of a Rankine Cycle for the conversion of combustion engine waste heat into energy for additional propulsion or for supplying the on-board electric consumers. In recent research, the fuel saving potential is estimated to be in the range of 5 to 15 %. This work investigates the influences of vehicle integration and dynamic operation that have so far been neglected. The considerations are based on a system for the recuperation of exhaust gas waste heat which delivers energy to the on-board electric system and uses the engine cooling system to reject the heat from condensation to the ambient.

Heat loss from the exhaust gas depending on the position of the evaporator, limited power demand of the on-board electric system and the energy required for meeting the additional cooling demand are identified as the most important integration effects. The average fuel saving potential of the system under investigation, which is approximately 4 % under optimum boundary conditions, is thereby reduced by 75 % to only about 1 %.

For dynamic operation, a control system is designed based on simulation models and successfully implemented at the test bench. The insights gained regarding the dynamic operating characteristics of the system allow the evaluation of fuel saving potential in customer-like driving profiles. In these scenarios, the heat-up time causes fuel consumption to increase by up to 1 % for short driving distances.

Measures for improving vehicle integration are analysed based on these results. Insulation of the exhaust system, temporary energy storage in the battery of the on-board electric system and reduction of system weight lead to an increased average fuel saving potential of 1,8 % in a customer-oriented motorway driving scenario. Raising the process efficiency and optimising the operating strategy allow further increases to up to 2,7 %. In this case, the complete power demand of the reference vehicle's on-board electric system is provided by the exhaust heat recovery system. Assuming an increasing power demand of the electric consumers, a maximum reduction in fuel consumption of 6 % could be achieved when driving long distances.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Kurzfassung	V
Abstract	VII
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XVII
1 Einleitung	1
1.1 Stand der Wissenschaft und Technik	3
1.2 Ziele und Aufbau der Arbeit	10
2 Grundlagen der PKW-Abgaswärmenutzung mit dem Rankine-Prozess	13
2.1 Energiebilanz des Referenzfahrzeugs	13
2.1.1 Fahrzeug und Antriebsstrang	14
2.1.2 Energiebilanz des Verbrennungsmotors	15
2.2 Der Rankine-Prozess zur Abgaswärmenutzung	20
2.2.1 Arbeitsmedium	23
2.2.2 Wärmezufuhr	26
2.2.3 Wirkungsgrad	29
2.3 Der BMW Turbosteamer	33
2.3.1 Systemaufbau	33
2.3.2 Prüfstands Aufbau	34
2.3.3 Hauptkomponenten	38
2.3.4 Grenzpotenzial zur Verbrauchssenkung	43
3 Fahrzeugintegration	47
3.1 Integration des Wärmeübertragers in die Abgasanlage	48
3.1.1 Wärmeverluste	49
3.1.2 Anströmung des Wärmeübertragers	51
3.1.3 Abgasgedrueck	52
3.2 Einspeisung der elektrischen Leistung in das Bordnetz	54
3.3 Integration des Kondensators in das Kühlsystem	55
3.3.1 Kondensator und Integrationskonzept	56

3.3.2	Quasistationäre Simulation des Kühlsystems	59
3.3.3	Einfluss auf das Potenzial zur Verbrauchssenkung	66
3.4	Betriebsstrategie des integrierten Systems	68
3.5	Fazit	70
4	Dynamischer Betrieb	73
4.1	Aufbau und Funktionen des Regelsystems	75
4.2	Entwurf der Regelfunktionen	77
4.2.1	Regelung der Dampftemperatur	77
4.2.2	Begrenzung des zugeführten Wärmestroms	85
4.2.3	Regelung des Verdampfungsdrucks im Turbinenbetrieb	86
4.3	Erprobung der Regelfunktionen	89
4.3.1	Anfahren aus dem kalten Zustand	89
4.3.2	Druck-Temperatur-Entkopplung	91
4.3.3	Druck- und Temperaturregelung im Fahrprofil	92
4.3.4	Begrenzung des zugeführten Wärmestroms	94
4.4	Fazit	96
5	Potenzial zur Verbrauchssenkung im Kundenbetrieb	99
5.1	Analyse des Basissystems	99
5.2	Maßnahmen zur Steigerung des Potenzials zur Verbrauchssenkung	102
5.3	Fazit	107
6	Zusammenfassung und Ausblick	109
A	Dynamisches Simulationsmodell des Abgaswärmeübertragers	115
A.1	Geometrie und Wärmeübergang	117
A.2	Erhaltungsgleichungen	120
A.3	Bestimmung der Zonengrenzen	123
A.4	Validierung	126
A.4.1	Stationäre Validierung	126
A.4.2	Dynamische Validierung	128
B	Vereinfachte dynamische Simulation des Gesamtsystems	131
B.1	Abgaswärmeübertrager	131
B.2	Kondensationswärmeabfuhr	135
	Literaturverzeichnis	137
	Symbolverzeichnis	155