

Wirkungsgradsteigerung von Otto- motoren mittels Abgasenergienutzung für PKW-Anwendungen

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

zur

Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Daniel Knapp
aus Berlin

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Tag der mündlichen Prüfung: 30.09.2016

Vorsitzender des Promotionsorgans: Prof. Dr. Peter Greil

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Michael Wensing
Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schlücker

Berichte zur Thermodynamik und Verfahrenstechnik

Band 5/2016

Daniel Knapp

**Wirkungsgradsteigerung von Ottomotoren mittels
Abgasenergienutzung für PKW-Anwendungen**

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Aachen 2016

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.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4861-2

ISSN 2365-3957

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 im Rahmen eines Forschungsprojektes bei der Audi AG (Ingolstadt) und wurde hochschuleitig von der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg betreut.

Ich möchte mich zunächst bei Dr.-Ing. Rainer Wurts, Leiter der Vorentwicklung Ottomotoren, für die Möglichkeit zur Promotion und das damit entgegengebrachte Vertrauen bedanken. Durch seine stetige Forderung nach dem Nachweis des technisch Machbaren und die dafür zur Verfügung gestellten Ressourcen konnten die vorliegenden Ergebnisse erst erzielt werden.

Des Weiteren gilt mein Dank meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Michael Wensing, Extraordinarius am Lehrstuhl für Technische Thermodynamik. Er hat mich innerhalb des Industrieprojektes stets auf dem erforderlichen Pfad der Wissenschaft begleitet und durch den regelmäßigen Austausch das Gelingen dieser Arbeit gefördert. Ebenso danke ich Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schlücker für die Übernahme des Koreferats.

Besonderer Dank muss auch an meine Kollegen der Audi AG und die beteiligten Projektpartner gerichtet werden. Zu erwähnen sind dabei die direkten Kollegen von I/EA-172, Ladungswechsel und Thermodynamik, die mir durch ihre Fachkompetenz und das positive Arbeitsklima immer weiterhelfen konnten. Außerdem danke ich allen Mitarbeitern von I/EA-171, Konstruktion und Mechanik, durch die eine erfolgreiche Umsetzung des Versuchsträgers möglich war. Ebenso bedanke ich mich bei der IAV GmbH für die ausdauernde Betreuung während der experimentellen Untersuchungen.

Insbesondere möchte ich mich bei Dr.-Ing. Ralf Budack und Dipl.-Ing. Michael Kuhn für die intensive und kritische Begleitung dieses Promotionsvorhabens bedanken. Sie haben mich in jeder Situation fachlich unterstützt und auch in schwierigen Phasen stets für den nötigen Antrieb gesorgt.

Zuletzt gilt mein Dank vor allem meiner Frau, die mir stets den erforderlichen Rückhalt bei der Verfassung dieser Arbeit gegeben hat. Meinen Eltern und Schwiegereltern danke ich für die auch über diese Arbeit hinausreichende Unterstützung.

Kurzfassung

Aufgrund zukünftiger Marktanforderungen sowie der Gesetzgebung nimmt die Verbrauchsreduzierung von Verbrennungsmotoren einen immer größeren Stellenwert in der Fahrzeugentwicklung ein. Da die konventionellen Optimierungsmaßnahmen schon weit fortgeschritten sind und die Erschließung weiterer Potenziale immer aufwendiger wird, befasst sich die vorliegende Dissertation mit der Frage, welche Wirkungsgradverbesserung durch die Nutzung der anfallenden Abgasenergie möglich ist.

Unter Berücksichtigung der fahrzeugspezifischen Randbedingungen bietet der Rankine-Prozess das größte thermodynamische Potenzial zur Abgasenergienutzung. In einer Prozessanalyse zeigt sich, dass die Steigerung des Systemdruckes entscheidend für die Erreichung eines hohen Prozesswirkungsgrades ist. Darüber hinaus stellt sich die Expansionsmaschine zur Umsetzung der hohen Systemdrücke als Schlüsselkomponente des Kreisprozesses heraus.

Für die experimentellen Untersuchungen wurde ein Hubkolbenexpander mit einem Systemdruck von bis zu 100bar zur Nutzung einer Abgasleistung von bis zu 20kW ausgelegt. Für die Realisierung maximaler indizierter Potenziale sind sehr hohe Druck- und Expansionsverhältnisse erforderlich. Diese ließen sich durch eine kürzestmögliche Einlasssteuerbreite von 26° darstellen. Damit konnte mit dem Versuchsträger ein Bestwirkungsgrad von 23% erreicht werden. Dies entspricht einer indizierten Leistung von 2,4kW. Im Auslegungspunkt betrug die Leistung 3,2kW.

Bei der Betrachtung des Gesamtsystems zeigt sich jedoch, dass das Potenzial der Drucksteigerung begrenzt ist, da sich vor allem die Reibung bei höheren Drücken und Drehzahlen negativ auf die Potenziale auswirkt. Der maximale Wirkungsgrad beträgt unter Berücksichtigung der gesamten Wirkungsgradkette 11,5%, was einer elektrischen Leistung von 1,15kW entspricht. Dieses Niveau stellt im Vergleich zu bislang veröffentlichten Systemen im Abgasleistungsbereich unter 20kW einen neuen Spitzenwert dar.

Die mit dem Hubkolbenexpander erzielbare stationäre Verbrauchseinsparung beträgt im Auslegungspunkt 8,2%. Im dynamischen Betrieb variieren die Potenziale je nach Fahrzyklus zwischen 0,8% und 4,6%. Allerdings reduziert sich die Verbrauchersparnis für zukünftige Motorkonzepte aufgrund verringerter Abgasenergien auf 0% bis 3,2%.

Abstract

Due to future market requirements and legislation, reducing fuel consumption of internal combustion engines is becoming increasingly important in vehicle development. Since the conventional optimization measures are already well advanced and the development of additional potential is becoming more complex, the present doctoral thesis deals with the question of which improved efficiency is possible by use of waste exhaust energy.

Considering the vehicle-specific conditions the Rankine-process offers the greatest thermodynamic potential for recovering exhaust gas energy. A process analysis shows that the increase of the system pressure is crucial for achieving a high process efficiency. Moreover, for handling the high system pressures the expansion machine has been revealed as a key component of the cycle.

For the experimental tests, a piston expander has been designed with a system pressure of up to 100bar for use of an exhaust energy flow of up to 20kW. For realizing maximum indicated potentials, very high pressure and expansion ratios are required. Those can be achieved by a shortest possible intake spread angle of 26° . Thereby a maximum indicated efficiency of 23% was reached at the test bench. This corresponds to an indicated power of 2.4kW. In the design point, the performance increased to 3.2kW.

Consideration of the complete waste heat recovery system shows that the potential of the pressure increase is limited, particularly as the friction has a negative impact on the system performance at higher pressures and speeds. Taking into account the deficiencies on the entire way from heat to electrical energy a maximum efficiency of 11.5% has been determined, which corresponds to an electrical power of 1,15kW. Compared to previously published and executed systems this level represents a new record in the exhaust power range below 20kW.

Thus, the achievable stationary fuel saving is 8.2% at the design point. In dynamic mode, the potentials vary depending on the driving cycle between 0.8% and 4.6%. However, the consumption saving for future engine concepts will decrease to 0% to 3.2% due to reduced exhaust gas energy.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Kurzfassung	III
Abstract	V
1 Motivation	1
2 Aufgabenstellung	5
3 Abwärmenutzung - Stand der Technik	7
3.1 Möglichkeiten zur Nutzung von Abwärme	7
3.2 Abgasenergienutzung mittels Dampfkraftprozess	11
4 Grundlagen der thermisch-mechanischen Energiewandlung	13
4.1 Der Rankine-Prozess	13
4.2 Auslegungsrandbedingungen eines Abgasenergienutzungssystems	15
4.3 Auswahl eines geeigneten Arbeitsmediums	20
4.4 Analyse der Einflussgrößen auf den Prozesswirkungsgrad	25
4.5 Schlüsselkomponenten der Energiewandlungskette	28
5 Auslegung einer Expansionsmaschine	31
5.1 Auswahl eines geeigneten Expandertyps	31
5.2 Simulationsmodell zur Berechnung eines Hubkolbenexpanders	34
5.3 Grundlegende Wirkungsgradzusammenhänge	37
5.4 Geometrische Grundauflegung	42
6 Experimentelle Untersuchung eines Hubkolbenexpanders	53
6.1 Messaufbau und Versuchsmethodik	53
6.2 Aufbau des Versuchsträgers	55
6.3 Betriebseigenschaften des Expanders	57
6.4 Diskussion der Untersuchungsergebnisse	62
6.4.1 Einfluss von Druck und Drehzahl im Betriebskennfeld	62

6.4.2	Einfluss des einlassseitigen Ventiltriebs	68
6.4.3	Einfluss des Hubvolumens	73
6.5	Wirkungsgradoptimale Betriebsstrategie	76
7	Parameterstudie zur Optimierung des Systemwirkungsgrades	79
7.1	Abgleich von Simulation und Messung	79
7.2	Effektive Leistungsausbeute des Gesamtsystems	84
7.2.1	Verlustmechanismen entlang der Wirkungsgradkette	85
7.2.2	Auswirkungen der Systemverluste auf die Wirkungsgradcharakteristik	88
7.3	Ergebnisse der Parametervariation	90
7.3.1	Einfluss des Hubvolumens auf den nutzbaren Betriebsbereich	92
7.3.2	Auswirkungen einer variablen Einlasssteuerbreite	94
7.3.3	Auswirkungen einer variablen Einlasssteuerzeit	97
7.4	Definition einer wirkungsgradoptimalen Expanderkonfiguration	100
8	Verbrauchspotenziale des Abgasenergiesnutzungssystems	105
8.1	Stationäre Verbrauchspotenziale	105
8.2	CO ₂ -Potenziale in dynamischen Fahrzyklen	107
9	Zusammenfassung und Ausblick	115
	Literaturverzeichnis	XIV
	Formelzeichen und Abkürzungen	XXV
	Abbildungsverzeichnis	XXIV
	Tabellenverzeichnis	XXV
	Gleichungsverzeichnis	XXVII
A	Anhang	XXIX
A.1	Parameterkennfelder des Referenzmotors Audi EA888 1.8 TFSI Gen.3	XXIX
A.2	Stoffdaten von Ethanol im p,h-Diagramm	XXXII
A.3	Vergleich verschiedener Arbeitsmedien	XXXIV
A.4	Bewertung von Expandertypen nach VDI2225	XXXVI
A.5	Referenzmotor Audi EA888 1.8 TFSI Gen.3	XL
	Eidesstattliche Erklärung	XLI
	Lebenslauf	XLIII