Vergleich von Dieselmotoren unterschiedlicher Größe

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

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von:	René Wolf
aus:	Braunschweig

eingereicht am:	16. August 2016
mündliche Prüfung am:	01. Februar 2017
Gutachter :	Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts
	Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende

2017

Berichte aus dem ivb

Band 16

René Wolf

Vergleich von Dieselmotoren unterschiedlicher Größe

Shaker Verlag
Aachen 2017

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., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5136-0
ISSN 2364-3862

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

Diese Arbeit entstand größtenteils während meiner Anstellung als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verbrennungskraftmaschinen der Technischen Universität Braunschweig im Rahmen des Forschungsvorhabens „Motorenvergleich“ (IGF-Vorhaben 16237 N / 1) der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV, Frankfurt).

Mein großer persönlicher Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts für die Betreuung dieser Arbeit, für das mir entgegengebrachte Vertrauen sowie die stets interessanten und weiterbringenden Anregungen und Diskussionen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende danke ich für die Übernahme des Koreferats und Herrn Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay für den Vorsitz des Prüfungsausschusses.

Des Weiteren sei der FVV sowie den Mitgliedern des Arbeitskreis „Motorenvergleich“ für die fachlichen Diskussionen, die Informationsbereitschaft sowie die zur Verfügung gestellten Daten gedankt, ohne die das Vorhaben und diese Arbeit in der vorliegenden Form sicher nicht möglich gewesen wären. Mein besonderer Dank gilt hier dem Obmann des Vorhabens, Herrn Dipl.-Ing. Andreas Rundkowski sowie der Volkswagen AG für die großzügige Bereitstellung diverser Versuchsteile.

Weiterhin möchte ich mich beim technischen Personal des Institutes für die Unterstützung bedanken.
Meinen Kollegen danke ich für die schöne Zeit, den Spaß und die Unterstützung in vielerlei Hinsicht.

Zu guter Letzt möchte ich mich sehr bei meiner Familie bedanken. Sie hat mich immer in meiner Ausbildung gefördert und unterstützt und so die Möglichkeit zu dieser Arbeit eröffnet. Meiner Lebensgefährtin Sunray danke ich von Herzen für ihre stetige Motivation und ihre Geduld.

Braunschweig, im August 2016

Kurzfassung

Die Minderung des Kraftstoffverbrauchs ist stets eine zentrale Aufgabe bei der Entwicklung von Verbrennungsmotoren. Im direkten Vergleich zwischen Fahrzeug- und Großmotoren weisen letztere niedrigere spezifische Kraftstoffverbrauchswerte auf. Dem gegenüber stehen jedoch die deutlich strengeren Emissionsgrenzwerte bei den Fahrzeugmotoren.

In dieser Arbeit wird ein umfassender thermodynamischer Vergleich zwischen verschiedenen Motoren durchgeführt. Es zeigt sich, dass moderne Pkw- und Nfz-Motoren bei niedrigen Lasten durchaus Vorteile in Bezug auf den Kraftstoffverbrauch im Vergleich mit Großmotoren besitzen, letztere jedoch bei hohen Lasten deutlich geringere Werte aufweisen. Das verdeutlicht, dass Großmotoren vorwiegend für hohe bis sehr hohe Lasten ausgelegt sind, während Fahrzeugmotoren häufiger im unteren und mittleren Teillastbereich betrieben werden. Die Untersuchungen zeigen, dass die Großmotoren deutliche Vorteile in den Teilwirkungsgraden des Ladungswechsels, des Wandwärmeübergangs aber auch der Wärmefreisetzung aufweisen. Die Stoffeigenschaften des Arbeitsgases der Großmotoren fallen vor allem bei hohen Lasten aufgrund des hohen Verbrennungsluftverhältnisses ins Gewicht. Anderseits jedoch sind der Vergleichsprozesswirkungsgrad durch das niedrigere Verdichtungsverhältnis sowie der mechanische Wirkungsgrad niedriger als bei den Fahrzeugmotoren. Durch 1D-Arbeitsprozessrechnungen wird gezeigt, welcher Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeugmotors theoretisch erreicht werden kann, wird dieser so weit wie möglich dem Großmotor angenähert. Mithilfe von Versuchen an einem fremdaufgeladenen Motor werden die Auswirkungen auf die Emissionen herausgearbeitet. Die Versuche belegen, dass sich die Kraftstoffverbrauchswerte des Großmotors erreichen lassen und auch die Emissionen bewegen sich dann in nachvollziehbaren Größenordnungen. Entscheidend sind auch hierbei der Luftüberschuss und der Turboladerwirkungsgrad. Wird letzterer auf das Niveau des Pkw-Motors reduziert, kommt es zu einem Kraftstoffverbrauchsanstieg, von dem der durch das skalierte Brennverfahren gewonnene Vorteil überkompensiert wird. Eine modifizierte Kolbenmuldengeometrie bewirkt eine weitere Verbesserung des Stickoxid-Kraftstoffverbrauchs- sowie des Stickoxid-Rauch-Zielkonflikts gegenüber Ergebnissen mit einer rein geometrisch skalierten Kolbenmuldenform. Diese lassen sich jedoch wegen Erreichens der Zünddruckgrenze nicht in niedrigere Absolutwerte für Kraftstoffverbrauch und Rauch umsetzen.

Abschließend lässt sich festhalten, dass es möglich ist, das Brennverfahren eines mittelschnelllaufenden Großmotors mit 430 mm Bohrung auf Pkw-typische Dimensionen von 81 mm Bohrung zu skalieren. Die Ergebnisse bezüglich Emissionen, Kraftstoffverbrauch und Wärmefreisetzung bewegen sich dann in Bereichen der Großmotoren.

Abstract

The reduction in fuel consumption is always a key task in the development of the combustion engines. In a direct comparison between vehicle and large-bore engines latter have lower specific fuel consumption values. In contrast to that significantly more stringent emission legislations are applied to the vehicle engines.
Here a comprehensive thermodynamic comparison between different-sized diesel engines is carried out that shows the main differences between them. It turns out that modern passenger car and commercial vehicle engines certainly have advantages in terms of fuel consumption in comparison with large-bore engines at low loads. At high loads, however, the large-bore engines have a significantly lower fuel consumption. This illustrates that large-bore engines are primarily designed for high to very high loads, while car engines are often operated in the lower and middle partial load range. These investigations show that on the one hand the large-bore engines have distinct advantages in the efficiency sections of the gas exchange, the wall heat transfer and the heat release. The gas properties of the working gas of large-bore engines carry more weight especially at high loads due to their high combustion air-fuel ratio. On the other hand, however, the standard cycle efficiency, due to their lower compression ratio, as well as the mechanical efficiency are lower than those of the vehicle engines. By 1D simulation it is shown which fuel consumption of a passenger car engine can be achieved in theory, when it gets as close as possible to the large-bore engine. Tests on an external supercharged engine are worked out, to show the effect on emissions. The experiments demonstrate that the fuel consumption of the large-bore engine can be achieved and also the emissions then move into comprehensible magnitudes. Decisive are here the air-fuel ratio and the turbocharger efficiency. If latter is reduced to the level of the passenger car engine there is an increase in fuel consumption, which overcompensates the advantage obtained by the scaled combustion process. A modified piston bowl geometry causes a further improvement of the trade-offs between nitrogen oxide and fuel consumption and between nitrogen oxide and smoke towards the results with the entirely geometrically scaled-down bowl design. However, these cannot be implemented in lower absolute values for fuel consumption and smoke upon reaching the maximum pressure range.

In conclusion it can be said that it is possible to scale-down the combustion process of a medium-speed large-bore engine with 430 mm bore diameter to car-typical dimensions of 81 mm. The results regarding emissions, fuel consumption and heat release then are in the regions of large-bore engines.

Inhalt

Formelzeichen und Abkürzungen xi

1 Einleitung 1
1.1 Motivation 1
1.2 Methodik und Zielsetzung 2

2 Stand der Forschung und der Technik 5
2.1 Wirkungsgradsteigerung an Dieselmotoren 5
2.2 Dieselmotorische Verbrennung 7
2.3 Schadstoffentstehung bei der dieselmotorischen Verbrennung 8
2.3.1 Stickoxide 8
2.3.2 Partikel 9
2.3.3 Unverbrannte Kohlenwasserstoffe 10
2.3.4 Kohlenmonoxid und Kohlendioxid 11
2.4 Entwicklung des Dieselmotors 11
2.4.1 Pkw-Motoren 12
2.4.2 Nfz-Motoren 12
2.4.3 Großmotoren 13
2.4.4 Gemeinsame Entwicklungsrichtungen 14
2.5 Vergleichende Untersuchungen zwischen verschiedenen Motoren 14

3 Gegenüberstellung verschiedener Dieselmotoren 17
3.1 Betriebswerte 18
3.2 Energiebilanz 25
3.3 Verlustteilung 28

4 Aufteilung und Quantifizierung der Kraftstoffverbrauchsunterschiede 39
4.1 Pkw- und Großmotor 40
4.2 Nfz- und Großmotor 48
4.3 Verschiedene Großmotoren 52

5 Prüfstand und Messtechnik 57
5.1 Prüfstand 57

5.2 Versuchsträger 59
5.3 Messdatenerfassung und Auswertung 59
5.4 Gestaltung der Versuchsteile 59
5.4.1 Einlasskanäle 60
5.4.2 Nockenwellen 61
5.4.3 Kolbenmulde 62
5.4.4 Einspritzdüsen 63

6 Experimentelle Untersuchungen 65
6.1 Variation der Höhenlage der Strahlwurzel 66
6.2 Variation der Einspritzdüsengeometrie 70
6.3 Vergleich von Großmotor- mit Pkw-Brennverfahren 74
6.4 Einfluss des Spüldruckgefälles 80
6.5 Skaliertes Großmotorbrennverfahren 83
6.6 Modifikationen für den Fahrzeugeinsatz 94

7 Zusammenfassung und Ausblick 99
7.1 Zusammenfassung 99
7.2 Ausblick 100

Literatur 102

Tabellen 110

Abbildungen 111

A Anhang 115
A.1 Tabellen 115
A.2 Umrechnung der Wirkungsgrade aus der Verlustteilung in Gütegrade 116