



Technische
Universität
Braunschweig



Dipl.-Ing. Manuel Bax

Untersuchung zum thermodynamischen Einfluss der Muldengeometrie beim Pkw-Dieselmotor

Berichte aus dem ivb | Band 28 | Braunschweig 2020

Untersuchung zum thermodynamischen Einfluss der Muldengeometrie beim Pkw-Dieselmotor

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

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Manuel Bax, M. Sc.
aus (Geburtsort): Hannover

eingereicht am: 16. März 2020
mündliche Prüfung am: 30. Juli 2020

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts
Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende

2020

Berichte aus dem ivb

Band 28

Manuel Bax

**Untersuchung zum thermodynamischen Einfluss
der Muldengeometrie beim Pkw-Dieselmotor**

Shaker Verlag
Düren 2020

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., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7688-2

ISSN 2364-3862

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Disclaimer

Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen Aktiengesellschaft.

Untersuchung zum thermodynamischen Einfluss der Muldengeometrie beim Pkw-Dieselmotor

von Manuel Bax

Kurzfassung Wenngleich die Schadstoffemissionen zuletzt die öffentliche Diskussion um den Dieselmotor dominiert haben, besteht auch hinsichtlich der CO_2 -Emissionen – also der Effizienz – noch Optimierungspotenzial. Mit diesem Fokus wird in der vorliegenden Arbeit der Einfluss der Kolbenmuldengeometrie auf das dieselmotorische Brennverfahren an einem Pkw-Motor untersucht.

Zunächst wird eine umfassende virtuelle Studie in Form einer 3D-CFD-Simulation durchgeführt. Dafür wird die Muldengeometrie parametrisch beschrieben und ein mittels *Design of Experiments* erzeugter Satz aus 80 Muldengeometrien mit konstantem Muldenvolumen in drei Betriebspunkten simuliert. Auf dieser Grundlage wird für jeden der drei Betriebspunkte ein Ersatzmodell gebildet, das die Abhängigkeit des indizierten Wirkungsgrades von den Geometrieparametern der Kolbenmulde beschreibt. Die Ersatzmodelle werden zum einen genutzt, um Einzelparametereinflüsse zu analysieren, zum anderen dienen sie der Optimierung der Muldengeometrie hinsichtlich der Maximierung der Wirkungsgrade in allen Betriebspunkten. Es zeigt sich, dass der Kragendurchmesser und die Stufenhöhe die einflussreichsten Geometrieparameter sind. In allen untersuchten Betriebspunkten sind ein großer Kragendurchmesser und eine vergleichsweise breite und stark gekrümmte Stufe vorteilhaft bezüglich des Wirkungsgrades. Aus der Analyse der innerzylindrischen Wirkmechanismen geht hervor, dass der Bereich des (gestuften) Muldenrandes und der Übergangsbereich von der Mulde ins Quetschvolumen von großer Bedeutung für die Effizienz des Brennverfahrens sind. Hier werden die Erfassung des Sauerstoffs im Quetschvolumen und die Umlenkung der Verbrennung ins Muldenzentrum zur Erfassung des dortigen Sauerstoffs entscheidend geprägt.

Ein Kandidat aus der Ersatzmodell-basierten Optimierung der Muldengeometrie wird am Motorprüfstand weiterführend untersucht und der Referenzgeometrie des Forschungsmotors gegenübergestellt. Unter Verwendung einer Mulden-individuell optimierten Applikation (Ladedruck, Raildruck, Verbrennungsschwerpunktlage, Timings der Vor- und der Nachspritzung) wird in allen sechs am Motorprüfstand untersuchten Betriebspunkten ein Wirkungsgradvorteil mit der optimierten Mulde realisiert. Die Verlustteilung ergibt, dass die gesteigerte Effizienz maßgeblich durch eine höhere Verbrennungsgeschwindigkeit erreicht wird.

Investigation on the Thermodynamic Influence of the Piston Bowl Geometry on a Passenger Car Diesel Engine

by Manuel Bax

Abstract Even though the public discussion on Diesel engines has been focused on pollutant emission issues recently, there is still some potential to also reduce the CO_2 emissions – hence increase the engine’s efficiency. This piece of work examines the influence of the piston bowl geometry on the combustion and the efficiency of a passenger car Diesel engine.

At first a virtual study using 3D CFD simulation is carried out. For this the piston bowl geometry is described by geometrical parameters and a set of 80 different piston bowl geometries with constant bowl volume generated using *Design of Experiments* is simulated in three operating points. On this basis a surrogate model is built for each operating point in order to represent the relation between the combustion efficiency and the geometrical parameters. With these surrogate models the influence of each parameter is analyzed and, additionally, an optimization is carried out in order to maximize the efficiency in all operating points. The analysis reveals that the throat diameter and the step height are the most influential parameters with regard to the efficiency. A wide throat and a rather wide and curved step are found to be beneficial in all examined operating points. The analysis of the physical mechanisms in the combustion chamber reveals that the region of the (stepped) edge of the bowl and the transitional area from the bowl to the squish area are of great importance for the combustion efficiency. This zone is crucial for capturing the oxygen in the squish area as well as redirecting the flame towards the piston bowl centre.

Out of the optimization results one candidate is chosen for the further investigation on the engine test bench in comparison to the reference bowl of the research engine. Using an optimized parameterization (*i.e.* inlet pressure, rail pressure, centre of combustion, timings of pilot and post injections) for each piston bowl an increase of the efficiency could be realized in all of the six examined operating points on the test bench. The split of losses shows that the higher overall efficiency results primarily from a higher combustion speed with the optimized bowl geometry.

Vorwort

Diese Dissertation entstand in großen Teilen zwischen 2014 und 2017 während meiner Zeit als Doktorand im Team „Brennverfahren Diesel“ in der Konzernforschung der Volkswagen AG in Zusammenarbeit mit dem Institut für Verbrennungskraftmaschinen der Technischen Universität Braunschweig.

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts für die hervorragende Betreuung dieser Arbeit, für die fachlichen Diskussionen und die fruchtbaren Anregungen. Zudem danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende für das Interesse am Thema und die Übernahme des Koreferats sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay für die Übernahme der Prüfungsvorsitzes.

Ich hatte das große Glück, die Arbeit an meiner Dissertation in einem Umfeld wunderbarer Kollegen durchzuführen und stets auf deren freundschaftlichen Rat und ihre enorme fachliche Expertise zurückgreifen zu dürfen. Für die fachliche und persönliche Unterstützung, die ich von euch allen erhalten habe, bin ich euch sehr dankbar!

Ich danke außerdem meiner Familie und meinen Freundinnen und Freunden für die stetige Unterstützung, für euer Verständnis und eure Geduld. Auf eure wohlmeinenden Nachfragen habe ich bestimmt gelegentlich etwas allergisch reagiert, aber ihr seid nicht müde geworden, mir euren Rückhalt zu geben.

Ganz besonders danke ich meiner langjährigen Freundin Polly. Du hast mich stets unterstützt und mir Kraft gegeben, hast meine Launen ertragen und deine eigenen Wünsche und Interessen in dieser Zeit teilweise weit zurückgestellt. Danke!

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	XIII
Verzeichnis der Formelzeichen und Symbole	XV
1 Einleitung	1
2 Theoretische Grundlagen und Stand der Technik	3
2.1 Grundlagen des dieselmotorischen Brennverfahrens	3
2.1.1 Gemischbildung und Verbrennung	4
2.1.2 Wirkungsgrade und Verlustteilung	9
2.1.3 Entstehung von Emissionen	13
2.2 Bedeutung der Muldengeometrie für das dieselmotorische Brennverfahren	16
2.2.1 Untersuchungsmethodiken in der Literatur	17
2.2.2 Gestaltungskriterien der Muldengeometrie	25
2.3 Optimierungsmethoden	27
3 Zielsetzung und Durchführung der Arbeit	31
4 Untersuchungswerkzeuge und -methodik	35
4.1 Versuchsmotor	35
4.2 Simulationstechnik	35
4.2.1 Software / Solver / Simulationsmodelle	36
4.2.2 Parametrisches Geometriemodell	40
4.2.3 DoE-Versuchsplanung	42
4.3 Versuchstechnik und Messdatenanalyse	43
5 Simulative Muldenuntersuchung	45
5.1 Betriebspunkte und Randbedingungen	45
5.2 Validierung	46
5.2.1 Kritische Bewertung des Umsetzungsgrades	47
5.3 DoE-Studie	48
5.3.1 Ersatzmodell	48
5.3.2 Einzelparametereinfluss	50
5.4 Optimierung	52
5.5 Detail-Analyse der thermodynamischen Zusammenhänge	54
5.5.1 Detail-Analyse der Teillast-Betriebspunkte	56
5.5.2 Detail-Analyse des Nennleistungspunktes	72
5.6 Wirkung eines gestuften Muldenrandes	78
5.6.1 Wechselwirkung zwischen der Stufenhöhe und der Strahlwurzellage	79
5.7 Zusammenfassung der Erkenntnisse aus der simulativen Muldenuntersuchung	81

6 Prüfstandsversuche	85
6.1 Versuchsprogramm	85
6.2 Einzelparametervariation in der Teillast	86
6.3 Muldenvergleich bei Optimalkonfiguration in der Teillast	87
6.3.1 Wirkungsgrade und Verlustteilung	88
6.3.2 Emissionen	91
6.4 Muldenvergleich im Nennleistungspunkt	92
6.5 Zusammenfassung der Prüfstandsversuche	94
7 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse	95
7.1 Vergleich der Ergebnisse und Erkenntnisse zwischen Simulation und Versuch	95
7.2 Diskussion methodischer und verfahrenstechnischer Umstände	97
8 Zusammenfassung und Ausblick	99
A Werkzeuge zur Messdatenanalyse	101
A.1 Verlustteilung	101
B Simulation: Parametermodell und DoE-Versuchsplan	107
C Simulation: Ausgewählte Geometrien für die Detailuntersuchungen	111
D Simulation: Weiterführende Auswertungen	113
E Prüfstandsversuche: Weiterführende Auswertungen	115
E.1 Einzelparametervariation	115
Literaturverzeichnis	121
Abbildungsverzeichnis	129
Tabellenverzeichnis	135

Abkürzungsverzeichnis

Kurzzeichen	Bedeutung
Abb.	Abbildung
AGR	Abgasrückführung
AÖ	Auslassventil öffnet
BP	Betriebspunkt
bspw.	beispielsweise
bzgl.	bezüglich
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
DI	<i>Direct Injection</i> (Direkteinspritzung)
DoE	Design of Experiments (statistische Versuchsplanung)
DOC	<i>Diesel Oxidation Catalyst</i> (Diesel-Oxidationskatalysator)
DPF	Dieselpartikelfilter
engl.	englisch
ESB	Einspritzbeginn
ESE	Einspritzende
ES	Einlass schließt
Fa.	Firma
GA	genetischer Algorithmus
ggü.	gegenüber
HC	<i>Hydrocarbons</i> (Kohlenwasserstoffe)
HD	Hochdruck
i.d.R.	in der Regel
insbes.	insbesondere
LOT	oberer Totpunkt des Ladungswechsels
MI	<i>main injection</i> (Haupteinspritzung)
MOGA	<i>multi-objective genetic algorithm</i> (multi-kriterieller genetischer Algorithmus)
n	nach
Nfz	Nutzfahrzeug
ND	Niederdruck

Kurzzeichen	Bedeutung
NO _x	Stickoxide
OFAT	<i>one factor at a time</i>
OT	oberer Totpunkt
OVV	Oberflächen-Volumen-Verhältnis
PiI	<i>pilot injection</i> (Voreinspritzung)
Pkw	Personenkraftwagen
PM	<i>Particulate Matter</i> (Partikel)
PoI	<i>post injection</i> (Nacheinspritzung)
sog.	sogenannt
SOGA	<i>single-objective genetic algorithm</i> (mono-kriterieller genetischer Algorithmus)
Tab.	Tabelle
u. a.	unter anderem
usw.	und so weiter
u. U.	unter Umständen
v	vor
VTG	variable Turbinengeometrie
ZOT	oberer Totpunkt des Hochdruckteils

Verzeichnis der Formelzeichen und Symbole

Kurzzeichen	Dimension	Beschreibung
AI_{xx}	$^{\circ}\text{KW}$	xx -%-Umsetzungslage des Brennverlaufs
b_e	g/kWh	spezifischer Kraftstoffverbrauch
BD_{xx-yy}	$^{\circ}\text{KW}$	Brenndauer zwischen xx - und yy -%-Umsetzungslage des Brennverlaufs
C	–	chemisches Zeichen für Kohlenstoff
c_K	m/s	mittlere Kolbengeschwindigkeit
c_p	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	isobare Wärmekapazität
c_v	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	isochore Wärmekapazität
D	mm	Durchmesser
DK	mm	Kragendurchmesser (<i>Parametermodell Muldengeometrie</i>)
dQ_B	$\text{W}; \text{J}^{\circ}\text{KW}$	differentielle Energiefreisetzung
DT	mm	Torusdurchmesser (<i>Parametermodell Muldengeometrie</i>)
H	–	chemisches Zeichen für Wasserstoff
H	J	Enthalpie
HD	mm	Höhe Dom (<i>Parametermodell Muldengeometrie</i>)
$H_{u(m)}$	J/kg	unterer (molarer) Heizwert
k -Faktor	1	Verhältnis des totalen Muldenvolumens zum Brennraumvolumen in OT
L_{St}	$\frac{\text{kg Luft}}{\text{kg Kraftstoff}}$	stöchiometrisches Luft-Kraftstoff-Verhältnis
m	kg	Masse
M	kg/mol	molare Masse
n	–	Polytropenexponent
n_{LI}	–	Düsenlochanzahl beim Kraftstoffinjektor
O	–	chemisches Zeichen für Sauerstoff
p	bar	Druck
p_0	bar	Umgebungsdruck
p_{me}	bar	effektiver Mitteldruck
p_{mi}	bar	indizierter Mitteldruck
q	J/kg	spezifische Wärmeenergie
Q	J	Wärmeenergie
Q_B	J	integrale Energiefreisetzung/Brennverlauf
Q_{hyd}	cm^3/min	hydraulischer Düsendurchfluss (Injektor)

Kurzzeichen	Dimension	Beschreibung
r	mm	Radius
R^2	–	Bestimmtheitsmaß
RI	–	Relevance Index (Analysegröße aus <i>ASCMO</i>)
RL	mm	Lippenradius (<i>Parametermodell Muldengeometrie</i>)
R_s	–	Drallzahl (<i>swirl ratio</i>)
$SplD1$	mm	Dom-Spline 1 (<i>Parametermodell Muldengeometrie</i>)
$SplD2$	mm	Dom-Spline 2 (<i>Parametermodell Muldengeometrie</i>)
$SplS1$	mm	Stufen-Spline 1 (<i>Parametermodell Muldengeometrie</i>)
$SplS2$	mm	Stufen-Spline 2 (<i>Parametermodell Muldengeometrie</i>)
SR	mm	Radienabstand (<i>Parametermodell Muldengeometrie</i>)
SSR	–	<i>Sum of Squared Residuals</i>
SST	–	<i>Total Sum of Squares</i>
StB	mm	Stufenbreite (<i>Parametermodell Muldengeometrie</i>)
StH	mm	Stufenhöhe (<i>Parametermodell Muldengeometrie</i>)
T	K	Temperatur
u	J	spezifische innere Energie
V	m ³	Volumen
V_h	m ³	Hubvolumen eines Zylinders
ΔW_{rel}	%	relativer (Q_{zu} -bezogener) Arbeitsverlust
W	J	Energie/Arbeit
WL	° (Winkel)	Lippenwinkel (<i>Parametermodell Muldengeometrie</i>)
WS	° (Winkel)	Stufenwinkel (<i>Parametermodell Muldengeometrie</i>)
x	kg/kg	gravimetrischer Anteil
ZV	°KW	Zündverzug (Dauer zwischen dem Beginn der Haupteinspritzung und der 10%-Umsatzlage <i>AI10</i>)

Griechische Zeichen

Kurzzeichen	Dimension	Beschreibung
α_{Strahl}	° (Winkel)	Strahlschirmwinkel
$\epsilon_{\text{(eff)}}$	–	(effektives) Verdichtungsverhältnis
η	%	Wirkungsgrad
η_u	%	Umsetzungsgrad
κ	–	Isentropenexponent ($\kappa = c_p/c_v$)
λ	–	Luftverhältnis
ν	–	molare Konzentration
φ	°KW	Kurbelwinkel

Indizes

Kurzzeichen	Beschreibung
Abg	Abgas
BV	Brennverlauf
η_u	den Umsetzungsgrad betreffend
Exp	Expansion
eff	effektiv
GR	den Gleichraumprozess betreffend
HD	Hochdruck / den Hochdruckteil des Arbeitsspiels betreffend
i	indiziert
κ	die Kalorik betreffend
Komp	Kompression
Krst	Kraftstoff
max	maximal / Maximum
opt.	optimal / optimiert
rBV	realer Brennverlauf
Sgr	Saugrohr
thVerl	thermodynamische Verluste
uv	unverbrannt
WW	Wandwärme
zu	zugeführt
Zyl	Zylinder