

Experimentelle Untersuchung zur Wirkung von Kühlkanälen in Kolben von
Pkw-Dieselmotoren

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieurin / Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)**

von Dipl.-Ing. Eike Rainer Ernst Stitterich

geb. am 13. April 1982 in Aschersleben

genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Helmut Tschöke

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schmidt

Promotionskolloquium am 5. Juni 2012

Schriftenreihe des MAHLE Doktorandenprogramms

Band 2

Eike Stitterich

**Experimentelle Untersuchung zur Wirkung von
Kühlkanälen in Kolben von Pkw-Dieselmotoren**

Shaker Verlag
Aachen 2012

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.: Magdeburg, Univ., Diss., 2012

Copyright Shaker Verlag 2012

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1447-1

ISSN 2195-4402

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 während meiner Tätigkeit im Motorenversuch der Firma MAHLE International GmbH im Rahmen eines 2006 ins Leben gerufenen Doktorandenprogramms. Mein besonderer Dank diesbezüglich gilt Herrn Dr. Reiner Künzel und Herrn Matthias Geisselbrecht für die fachliche Betreuung und konstruktive Unterstützung.

Des Weiteren danke ich meinen Eltern, meiner Schwester Uta und meinem Schwager Klaus für die immerwährende Motivation während meiner Promotionszeit. Besonderer Dank gilt meiner Freundin Susi, die mich während der letzten 7 Jahre auch in schwierigen Situationen vorbehaltlos unterstützt hat.

Danke auch an meine Mitdoktoranden Eva, Pia und Thomas – ohne euch wäre die Zeit der Promotion nur halb so aufschlussreich gewesen.

Letztlich danke ich Herrn Prof. Tschöke für die Betreuung des gesamten Promotionsvorhabens sowie den Herren Professoren Schmidt und Deters für die wohlwollende Bewertung meiner Arbeit.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Analyse der Kolbenkühlung von gegossenen Aluminiumkolben mittels Salzkernkühlkanal für den Anwendungsfall hochaufgeladener Pkw-Dieselmotoren. Anhand von Kolbentemperaturmessungen im realen Motor und außermotorischen Untersuchungen werden die Wirkungen einzelner geometrischer Parameter auf die Kolbenkühlung untersucht. Die Ermittlung der maßgeblichen Parameter erfolgt durch Analyse der Wärmestromwege im Kolben und der zugehörigen thermodynamischen und strömungsdynamischen Gesetzmäßigkeiten. Neben geometrischen Einflüssen auf die Kolbenkühlung werden betriebsbedingte Faktoren wie Öl- und Kühlwassertemperatur bzw. Kühllölvolumenstrom untersucht. Die Betrachtung von Systemeigenschaften bzw. deren Einfluss auf das Kolbentemperaturfeld ergänzt die grundsätzlichen Betrachtungen. Hierzu zählen die Lage der Kühllöhdüse, die Ausführung der Zylinderkühlung und die Lage von Einlass- und Auslassventilen. Die Bewertung der Ergebnisse nach verschiedenen Szenarien schließt den Basisteil der Arbeit ab und ermöglicht den Aufbau eines optimierten Kolbenkühlungskonzepts. Dieses Kolbenkühlungskonzept wird im Folgenden hinsichtlich der auftretenden Kolbentemperaturen untersucht und eine Anpassung der Betriebsweise mit Hinblick auf geringe Kolbentemperaturschwankungen bei Betriebspunktwechsel und geringen Kühlungsaufwand durchgeführt.

abstract

The following work describes the analysis of the piston cooling of casted aluminium pistons with incorporated salt core cooling channels for highly charged passenger car diesel engines. This analysis includes piston temperature measurements at the real engine as well as examinations on auxiliary test equipment to clarify the impact of singular geometric parameters on piston cooling. The definition of these relevant parameters is done by an analysis of heat paths and fluid dynamics within the piston. Beside this analysis of geometric factors an examination of operation conditions such as oil and coolant temperature, cooling oil flow is done. An analysis of the impact of system conditions (position of the cooling oil nozzle, cylinder cooling and position of inlet and outlet valves) on piston temperature supplements the basic work. The evaluation of the basic results following different scenarios enables the build-up of an optimized cooling concept. This cooling concept is furthermore investigated for its piston temperatures and an adaption of the operation mode taking into account low piston temperature differences while engine working point changes and low piston cooling effort is made.

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungen und Formelzeichen	III
1 Einführung	1
1.1 Notwendigkeit der Kolbenkühlung	1
1.2 Kolbenkühlungsarten	3
1.3 Entwicklungsstand von Kühlkanalkolben für Pkw-Dieselmotoren	5
1.4 Ziele und Aufgabenstellung	8
2 Physikalische Grundlagen zur Wärmeübertragung am Kolben	11
2.1 Wärmestromwege am Kolben	12
2.1.1 Wärmeeintrag in den Kolben	13
2.1.2 Wärmeleitung im Kolben	17
2.1.3 Wärmeabfuhr vom Kolben an die Zylinderwand	17
2.1.4 Wärmeabfuhr vom Kolben an die Kurbelgehäuseatmosphäre	19
2.1.5 Wärmeabfuhr vom Kolben an das Kühlöl	19
2.2 Wärmeübertragung zwischen Kolbenwerkstoff und Öl	20
2.2.1 Strömungsformen	20
2.2.2 Grenzschichttheorie	29
2.3 Darstellung besonderer Kenngrößen	30
2.3.1 Spezifische Kühlölmenge	31
2.3.2 Fanggrad	31
2.3.3 Füllungsgrad	32
3 Versuchsparameter	34
3.1 Analyse von Gleichungen zur Wärmeübertragung	34
3.2 Übertragung der Erkenntnisse auf den realen Motor	35
3.2.1 Mittlere Brennraumtemperatur	35
3.2.2 Brennraumseitiger Wärmeübergangskoeffizient	35
3.2.3 Wanddicke zwischen Brennraum und Kühlkanal	36
3.2.4 Kühlkanaloberfläche	36
3.2.5 Wärmeübergangskoeffizient am Kühlkanal	37
3.2.6 Öltemperatur im Kühlkanal	38
3.3 Zur Untersuchung notwendige Bauteilvarianten	38
3.3.1 Kolben mit unterschiedlichen Kühlkanallagen	39
3.3.2 Versuchsteile für die Variation der Kühlkanaloberfläche	40
3.3.3 Kühlöldüsen mit unterschiedlichen Mündungsdurchmessern	42
4 Versuchsdurchführung	43
4.1 Kolbentemperaturmessung	43
4.1.1 Versuchsmotor	43
4.1.2 Motorprüfstand	44
4.1.3 Messtechnik und Messtechnikapplikation	46

Inhaltsverzeichnis

4.1.4	Versuchsprogramm am Motorprüfstand	50
4.2	Shakeruntersuchung	52
4.2.1	Shakerprüfstand	52
4.2.2	Kolbenmodelle	53
4.2.3	Versuchsprogramm am Shakerprüfstand	54
4.3	Messungen an Kühldüsenprüfständen	55
4.3.1	Volumenstromermittlung	55
4.3.2	Rauheitsuntersuchung	56
5	Ergebnisse.....	58
5.1	Einfluss der Kühlkanallage auf die Kolbentemperatur	58
5.2	Einfluss der Kühlkanaloberfläche auf die Kolbentemperatur	65
5.2.1	Form des Kühlkanals	65
5.2.2	Kolben mit stark vergrößerter Kühlkanaloberfläche	70
5.2.3	Oberflächenrauheit des Kühlkanals	72
5.3	Beeinflussung des Wärmeübergangskoeffizienten am Kühlkanal.....	73
5.3.1	Kühlkanalgeometrie	73
5.3.2	Kühlölstrahlgeschwindigkeit	76
5.3.3	Kühlölviskosität	79
5.4	Einfluss der Motorkühlung auf die Kolbentemperatur	81
5.4.1	Kühlwassertemperatur	81
5.4.2	Kühlöltemperatur	83
5.4.3	Kühlölmenge.....	85
5.5	Einflüsse auf die Kolbentemperaturverteilung	89
5.5.1	Kühlwasserräume im Zylinderkurbelgehäuse	89
5.5.2	Lage der Einspritzstrahlen	92
5.5.3	Kolbenkühlung.....	93
5.6	Einordnung der Ergebnisse	94
5.6.1	Kolbenkonstruktion.....	94
5.6.2	Betriebsbedingungen.....	96
5.6.3	Motorauslegung	98
5.6.4	Bewertungsmatrix	98
6	Konzepte	101
6.1	Kolbenkonzept	101
6.1.1	Überlagerung wirksamer Maßnahmen	101
6.1.2	Ausarbeitung des Kolbenkonzepts.....	102
6.1.3	Validierung mittels Versuch	103
6.2	Bedarfsgerechte Kolbenkühlung.....	107
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	110
	Literaturverzeichnis.....	VII

Abkürzungen und Formelzeichen

Lateinische Zeichen:

Zeichen	Einheit	Beschreibung
a	-	Taktzahl (1 für 2-Takt-Motor; 2 für 4-Takt-Motor)
A	m^2	Fläche
b	m	Breite
c, v	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeit
C, m	-	Konstanten
c_p	$\frac{W}{kg \cdot K}$	spezifische Wärmekapazität
d	m	Durchmesser
g	$\frac{m}{s^2}$	Erdbeschleunigung $\left(g = 9,81 \frac{m}{s^2} \right)$
h	m	Höhe
H	m	Hub
l	m	Länge
\dot{m}	$\frac{kg}{s}$	Massenstrom
n	$\frac{1}{min}$	(Motor-)Drehzahl
Nu	-	Nußelt-Zahl ($Nu = f(Re, Pr)$)
p	bar	Druck
P	W	Leistung
Pr	-	Prandtl-Zahl $\left(Pr = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} \right)$
\dot{q}	$\frac{W}{m^2}$	Wärmestromdichte
Q	J	Wärme
\dot{Q}	W	Wärmestrom
r	m	Kurbelradius

Abkürzungen und Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Beschreibung
R_a	μm	mittlere Rauheit
Re	-	Reynolds-Zahl $\left(Re = \frac{c \cdot l_{char}}{\nu} \right)$
R_{sm}	μm	mittlere Rillenbreite
R_t	μm	Gesamthöhe des Rauheitsprofils
R_z	μm	mittlere Rautiefe
s	m	Weg
t	s	Zeit
T, ϑ	$K; ^\circ C$	Temperatur
V	m^3	Volumen
\dot{V}	$\frac{m^3}{s}$	Volumenstrom
W	J	Arbeit
x	m	Koordinate, Abstand
z	-	Zylinderanzahl

Griechische Zeichen:

Zeichen	Einheit	Beschreibung
α	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	Wärmeübergangskoeffizient
β	$\frac{W}{K}$	Wärmeübertragungsfaktor
α_{FP}	%	Fahrpedalstellung (Last)
δ	m	Wanddicke, Materialstärke
ϕ	$^\circ KW$	Kurbelwinkel
ϕ^*	$^\circ KW$	Kurbelwinkel für maximale Kolbengeschwindigkeit
η	$\frac{kg}{m \cdot s}$	dynamische Viskosität
λ	$\frac{W}{m \cdot K}$	Wärmeleitfähigkeit
λ_c	%	Fanggrad

Abkürzungen und Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Beschreibung
λ_f	%	Füllungsgrad
λ_{pl}	-	Pleuelstangenverhältnis
ν	$\frac{m^2}{s}$	kinematische Viskosität
ρ	$\frac{kg}{m^3}$	Dichte
ω	$\frac{rad}{s}$	Winkelgeschwindigkeit

Indizes:

Index	Beschreibung	Index	Beschreibung
<i>1,2...i</i>	Variablen	<i>KWA</i>	Kühlwasser am Motorausstritt
<i>1D</i>	1 Köhldüse	<i>IP</i>	längsüberströmte Platte
<i>4D</i>	4 Köhldüsen (gesamter Motor)	<i>m</i>	mittlere
<i>A</i>	Fläche	<i>M</i>	(Kolben-)Muldenhals
<i>ab</i>	ablaufend	<i>max</i>	maximal
<i>BR</i>	Brennraum	<i>mess</i>	Mess-
<i>char</i>	charakteristisch	<i>Öl</i>	Öl
<i>D</i>	Düse	<i>ÖWWT</i>	Öl-Wasser-Wärmetauscher
<i>e, eff</i>	effektiv	<i>P</i>	Prall-
<i>ges</i>	Gesamt-	<i>SD</i>	Schlitzdüse
<i>H</i>	Hub	<i>Si</i>	Schnittpunkte 1,2...i
<i>K</i>	Kolben	<i>spez</i>	spezifisch
<i>krit</i>	kritisch	<i>W</i>	Wand
<i>KK</i>	Kühlkanal	<i>z</i>	Zylinder-
<i>KW</i>	Kühlwasser	<i>zu</i>	zulaufend

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen:

Abkürzung	Beschreibung	Abkürzung	Beschreibung
4V	4 Ventile je Zylinder	MW	Messwert
AGR	Abgasrückführung	Nkw	Nutzkraftwagen
AV	Auslassventil	NTC	Negative Temperature Coefficient
BR	Brennraum	OT	Oberer Totpunkt
BS	Brennstrahl(en)	PD	Pumpe-Düse-Einspritzung
CR	Common Rail (Einspritzung)	Pkw	Personenkraftwagen
DS	Druckseite	PI	Pleuel
EV	Einlassventil	RT	Ringträger
GDS	Gegendruckseite	RTM	Real-time Telemetry Temperature Measurement
gek.	gekühlt(er)	SEW	Skalenendwert
K, Ko	Kolben	SRS	Schwungradseite
k. A.	keine Angabe	TL	Teillast
KoB	Kolbenbolzen	UT	Unterer Totpunkt
KoR	Kolbenring	VL	Vollast
LED	Light Emitting Diode	ZK	Zylinderkopf
LS	Lüfterseite	ZKG	Zylinderkurbelgehäuse