

René Richter

Optimierung von Eigenspannungszuständen an Zylinderköpfen von PKW-Dieselmotoren mit Hilfe der Simulation

AutoUni – Schriftenreihe

Band 97

Herausgegeben von/Edited by
Volkswagen Aktiengesellschaft
AutoUni

Die Volkswagen AutoUni bietet Wissenschaftlern und Promovierenden des Volkswagen Konzerns die Möglichkeit, ihre Forschungsergebnisse in Form von Monographien und Dissertationen im Rahmen der „AutoUni Schriftenreihe“ kostenfrei zu veröffentlichen. Die AutoUni ist eine international tätige wissenschaftliche Einrichtung des Konzerns, die durch Forschung und Lehre aktuelles mobilitätsbezogenes Wissen auf Hochschulniveau erzeugt und vermittelt.

Die neun Institute der AutoUni decken das Fachwissen der unterschiedlichen Geschäftsbereiche ab, welches für den Erfolg des Volkswagen Konzerns unabdingbar ist. Im Fokus steht dabei die Schaffung und Verankerung von neuem Wissen und die Förderung des Wissensaustausches. Zusätzlich zu der fachlichen Weiterbildung und Vertiefung von Kompetenzen der Konzernangehörigen, fördert und unterstützt die AutoUni als Partner die Doktorandinnen und Doktoranden von Volkswagen auf ihrem Weg zu einer erfolgreichen Promotion durch vielfältige Angebote – die Veröffentlichung der Dissertationen ist eines davon. Über die Veröffentlichung in der AutoUni Schriftenreihe werden die Resultate nicht nur für alle Konzernangehörigen, sondern auch für die Öffentlichkeit zugänglich.

The Volkswagen AutoUni offers scientists and PhD students of the Volkswagen Group the opportunity to publish their scientific results as monographs or doctor's theses within the "AutoUni Schriftenreihe" free of cost. The AutoUni is an international scientific educational institution of the Volkswagen Group Academy, which produces and disseminates current mobility-related knowledge through its research and tailor-made further education courses. The AutoUni's nine institutes cover the expertise of the different business units, which is indispensable for the success of the Volkswagen Group. The focus lies on the creation, anchorage and transfer of new knowledge.

In addition to the professional expert training and the development of specialized skills and knowledge of the Volkswagen Group members, the AutoUni supports and accompanies the PhD students on their way to successful graduation through a variety of offerings. The publication of the doctor's theses is one of such offers. The publication within the AutoUni Schriftenreihe makes the results accessible to all Volkswagen Group members as well as to the public.

Herausgegeben von/Edited by

Volkswagen Aktiengesellschaft

AutoUni

Brieffach 1231

D-38436 Wolfsburg

<http://www.autouni.de>

René Richter

Optimierung von Eigenspannungszu- ständen an Zylinderköpfen von PKW-Dieselmotoren mit Hilfe der Simulation

René Richter
Wolfsburg, Deutschland

Zugl.: Dissertation, Technische Universität Dresden, 2016

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse der im Rahmen der AutoUni – Schriftenreihe veröffentlichten Doktorarbeiten sind allein die der Doktorandinnen und Doktoranden.

AutoUni – Schriftenreihe
ISBN 978-3-658-17110-0 ISBN 978-3-658-17111-7 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-658-17111-7

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

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer ist Teil von Springer Nature
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Danksagung

Nach langer und intensiver Arbeit mit Höhen und Tiefen habe ich die vorliegende Dissertation angefertigt. Auf dem Weg zum Ziel haben mich eine Vielzahl von Menschen begleitet, denen ich hiermit meinen besonderen Dank zum Ausdruck bringen möchte.

Ich danke meinem Doktorvater, Herrn Professor Christoph Leyens, für seine Anregungen und sein Fachwissen, das zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Ebenso danke ich allen Kollegen der Volkswagen AG, die mir die Anfertigung der Dissertation ermöglicht und mich in allen Belangen unterstützt haben. Speziell möchte ich hierbei Herrn Thomas Müller danken, der mir durch seine jahrelange Erfahrung in der Motorenentwicklung stets mit einem wertvollen Rat zur Seite stand.

Zudem danke ich den Kollegen der AVL Deutschland GmbH für die softwareseitige Unterstützung. Ein sehr großer Dank ist an meine Frau Kristin und meine Eltern gerichtet, die mich jederzeit unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis

XVII

1	Einleitung	1
2	Theoretische Vorbetrachtungen	5
2.1	Downsizing von Verbrennungsmotoren	5
2.2	Strömungslehre	7
2.2.1	Strömung ohne Reibung	8
2.2.2	Strömung mit Reibung	10
2.3	Berechnungsmethoden für den Wärmetransport	15
2.3.1	Wärmeleitung	16
2.3.2	Konvektiver Wärmeübergang	18
2.3.3	Wärmeübergang beim Sieden	22
2.3.4	Wärmestrahlung	24
2.4	Zylinderkopf-Legierung AlSi10Mg(Cu)	24
2.5	Wärmebehandlung von Aluminiumlegierungen	27
2.5.1	Allgemeines zur Wärmebehandlung	27
2.5.2	Ausscheidungshärten	28
2.6	Abschreckverfahren	31
2.6.1	Übersicht von Abschreckverfahren	31
2.6.2	Wasserabschrecken	31
2.6.3	Luftabschrecken	33
2.6.4	Sprayabschrecken	34
2.6.5	Rotationsabschrecken	35
2.7	Eigenspannungen	36
2.7.1	Klassifizierung von Eigenspannungen	36
2.7.2	Entstehung von Eigenspannungen	38
2.7.3	Messen von Eigenspannungen	40
3	Eingangsversuche	45
3.1	Temperaturmessung von Zylinderköpfen in einer Großserien-Wärmebehandlung (Ist-Stand)	45
3.1.1	Vorbereitung	46
3.1.2	Durchführung	49

3.1.3	Auswertung	51
3.2	Werkstofftechnische Untersuchungen	54
3.2.1	Allgemeine Eigenschaften	55
3.2.2	Eigenschaften	55
3.2.3	Zusammenhang von Größen	59
3.3	Eigenspannungsermittlung am Zylinderkopf	63
3.3.1	Messunsicherheit der Bohrlochmethode	63
3.3.2	Eigenspannungszustand am Zylinderkopf	69
4	Simulation des Temperaturfeldes im Abschreckprozess	75
4.1	Ziel der Simulation	75
4.2	Berechnungssoftware Temperaturberechnung	75
4.3	Erstellen und Validieren des Berechnungsmodells „Wasserabschrecken“	76
4.3.1	Geometrischer Aufbau des Temperaturberechnungsmodells	76
4.3.2	Vernetzung	78
4.3.3	Definition der Randbedingungen	80
4.3.4	Validieren des Berechnungsergebnisses mit Temperaturmessungen	82
4.4	Design of Experiments (DoE) für das Abschrecken	84
4.4.1	DoE Wasserabschrecken	84
4.4.2	DoE Luftabschrecken	86
4.5	Lagevariation	86
4.5.1	Positionierung der Zylinderköpfe im Abschreckbecken	86
4.5.2	Variation der Eintauchlage	89
5	Simulation der Eigenspannung im Zylinderkopf	91
5.1	Berechnen der Eigenspannungen im Abschreckprozess	91
5.1.1	Mappen des Temperaturfeldes auf FEM-Netz	92
5.1.2	Definition der Randbedingungen	92
5.2	Berechnen der Eigenspannungen nach dem Warmauslagern	93
5.3	Validieren des Berechnungsergebnisses mit Eigenspannungsmessungen	94
5.4	Berechnen der Eigenspannungen des Fertigteils	97
6	Simulation der Beanspruchung des Zylinderkopfes	101
6.1	Mechanische Beanspruchung	101
6.1.1	Fertigung ZSB-mechanisch	101

6.1.2	Montage des Zylinderkopfes als ZSB-mechanisch und Peripheriebauteilen an das Zylinderkurbelgehäuse	103
6.2	Thermomechanische Beanspruchung	104
6.3	Beanspruchung durch den Verbrennungsdruck	106
6.4	Zusammenfassung der Berechnungen	108
7	Optimierung des Eigenspannungszustandes	111
7.1	Definieren von Referenzpunkten am Zylinderkopf	111
7.2	Definieren von Wichtungsfaktoren der Referenzpunkte	112
7.3	Bestimmen der optimalen Wärmebehandlungsparameter	114
7.3.1	Auswertung des DoE zum Wasserabschrecken	116
7.3.2	Auswertung der Lagevariation beim Wasserabschrecken	127
7.3.3	Auswertung des DoE zum Luftabschrecken	130
7.3.4	Gegenüberstellung der günstigsten Parameter der einzelnen Variationsrechnungen	136
8	Zusammenfassung und Ausblick	139

Abbildungsverzeichnis

1.1	Zylinderkopfriss vom Wasserraum zum Injektorschacht [1]	2
1.2	Aufbau eines Zylinderkopfes, Zylinderzählung von Steuertriebseite (Zylinder 1) zur Getriebeseite Zylinder 4)	4
2.1	Hauptziele des Downsizings [2]	5
2.2	Modellvorstellung zur Bestimmung der dynamischen Viskosität .	10
2.3	Hierarchie der strömungsmechanischen Grundgleichungen [3] . .	14
2.4	Nukijama-Kurve für Behältersieden (Wasser bei 1 bar) mit den Siedebereichen: A - stilles Sieden, B - Blasensieden, C - instabiler Bereich, D - Filmsieden [4]	23
2.5	schematischer Temperaturverlauf einer T6-Wärmebehandlung . .	28
2.6	Möglichkeiten für den Zusammenhang von Grundgitter α und Teilchen β [5]	29
2.7	Leidenfrost-Effekt am Beispiel eines Wassertropfens auf einer heißen Herdplatte	33
2.8	Eigenspannungen I., II. und III.Art [6], [7] u.a.	38
2.9	spezielle Dehnmessstreifenrosette vom Typ RY61K der Firma HBM mit Hauptabmessungen und Einzelmessgitter (Das Bohrzentrum befindet sich im Fluchtpunkt der einzelnen Messgitter) [8]	42
2.10	Bohrlochmesssystem zur Eigenspannungsermittlung [Fa. SINT] .	43
2.11	Zuordnung der DMS-Gitter auf DMS-Rosette [9]	44
3.1	Messstellenübersicht zur Temperaturmessung, Thermoelemente in rot, Beschriftung siehe Tabelle 3.2	48
3.2	Versuchsanordnung in der WBH-Anlage	50
3.3	Zylinderkopf mit Bemaßung der Hochachse bei Position Iststand .	51
3.4	Temperaturverlauf und -gradient eines Zylinderkopfes in der Wärmebehandlung	52
3.5	Temperaturverlauf und -gradient eines Zylinderkopfes während des Abschreckprozesses	53
3.6	Temperaturverlauf exemplarisch an 6 Messstellen für die Zylinderkopfpositionen "links in Durchlaufrichtung" und Mittellage während des Abschreckprozesses	54
3.7	thermophysikalische Eigenschaften von AlSi10Mg(Cu) - F-Zustand	56

3.8	Schliffbilder von Zylinderkopffproben im F-Zustand	57
3.9	Temperaturleitfähigkeit über WBH-Zustand an Proben aus AlSi10Mg(Cu) [10]	58
3.10	Positionen zur Metallografie-Probenentnahme am Zylinderkopf, Schnitt durch Achse der Injektorbohrung	60
3.11	Härteabhängigkeit	60
3.12	Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit	61
3.13	Abhängigkeit zwischen Korngröße und SDAS	62
3.14	thermophysikalische Bemessungszahl - Quotient aus Wärmeleitfähigkeit und Wärmedehnung	63
3.15	Aufbau der speziellen DMS-Rosette	64
3.16	Zugprobe mit spezieller DMS-Rosette	65
3.17	Kurvenschar von Zugversuchen einer speziell präparierten Probe .	65
3.18	Tiefenabhängige Kalibrierfaktoren zur Eigenspannungsbestimmung	66
3.19	Zylinderkopf mit installierten speziellen DMS-Rosetten an drei Messpositionen	67
3.20	Varianzanalyse der zweifachen hierarchischen Klassifikation [11] .	67
3.21	ANOVA der einzelnen Messgitter, Mittelwert der 8 Einzelgitter (5 Zylinderköpfe mit jeweils 3 Messpositionen)	68
3.22	Messunsicherheit der Bohrlochmethode für die Vergleichsdehnung (5 Zylinderköpfe mit jeweils 3 Messpositionen)	69
3.23	Messunsicherheit der Bohrlochmethode für die Eigenspannungen (5 Zylinderköpfe mit jeweils 3 Messpositionen)	70
3.24	Messstellenübersicht zur Eigenspannungsmessung	70
3.25	Eigenspannungsverlauf über Bohrtiefe am Messpunkt BR3 (Messwerte und Ausgleichsspline)	72
3.26	Eigenspannungen am Zylinderkopf zu drei Fertigungszeitpunkten	74
4.1	Transparenter Zylinderkopf mit den "Selections" Ein- und Auslasskanälen, AGR-Kanal und Wassermantel	77
4.2	CFD-Netzaufbau eines Zylinderkopfes in einem Wasserbecken . .	78
4.3	Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten Temperaturverläufen	83
4.4	Versuchsanordnung von 5 Zylinderköpfen nebeneinander im Abschreckbecken	87
4.5	Berechneter Temperaturverlauf verschiedener Positionen der Zylinderköpfe im Abschreckbecken (Zeitbereich des Blasensiedens)	88
4.6	Berechneter Temperaturverlauf verschiedener Eintauchlagen . . .	89

5.1	Gegenüberstellung von berechneten zu gemessenen Eigenspannungen am Zylinderkopf	96
5.2	Gegenüberstellung der Zylinderkopf-Bearbeitungsstände	98
5.3	Spannungs-Zeit-Verlauf während der Fertigung an einem Punkt im Wasserraum (Zeit nicht maßstabsgerecht durch Berechnungsschritte abgebildet)	99
6.1	exemplarischer Zylinderdruckverlauf über ein Arbeitsspiel	106
6.2	Zusammenfassung der Einzelspannungen am Beispiel von Zylinder 1	109
7.1	Messpunkte für die Eigenspannungsermittlung aus den Berechnungsdaten	112
7.2	Einfluss der variierten Parameter bei Wasserabschreckung auf die Eigenspannung im Zylinderkopf	118
7.3	Strömung durch einen Spalt [12]	120
7.4	Parameterbalken der gewichteten DoE-Auswertung des Eigenspannungszustandes bei Wasserabschreckung mit Haupteinflüssen und Wechselwirkungen	122
7.5	Einfluss der variierten Parameter bei Wasserabschreckung auf die resultierende Spannung aus Eigenspannung und Montagebeanspruchung im Zylinderkopf	122
7.6	Parameterbalken der gewichteten DoE-Auswertung aus Eigenspannung und mechanischen Beanspruchungen bei Wasserabschreckung	123
7.7	Schematische Darstellung des Versatzfehlers bei unterschätzter Eigenspannung	124
7.8	Einfluss der variierten Parameter bei Wasserabschreckung auf die resultierende Spannung aus Eigenspannung und (thermo-) mechanischen Beanspruchungen im Zylinderkopf	125
7.9	Parameterbalken der gewichteten DoE-Auswertung aus Eigenspannung und (thermo-) mechanischen Beanspruchungen bei Wasserabschreckung mit Haupteinflüssen und Wechselwirkungen	126
7.10	Gegenüberstellung der Bewertungszahlen der einzelnen Spannungszustände und überlagerten Zünddrücke am Beispiel des Basis-Serienstandes der Wärmebehandlung	127
7.11	Gegenüberstellung der Bewertungszahlen aus der Lagevariation	128
7.12	Einfluss der variierten Parameter bei Luftabschreckung auf die Eigenspannung im Zylinderkopf	132

7.13	Parameterbalken der DoE-Auswertung des Eigenspannungszustandes bei Luftabschreckung	133
7.14	Einfluss der variierten Parameter bei Luftabschreckung auf die resultierende Spannung aus Eigenspannung und Montagebeanspruchung im Zylinderkopf	134
7.15	Parameterbalken der DoE-Auswertung aus Eigenspannung und mechanischen Beanspruchungen bei Luftabschreckung	134
7.16	Einfluss der variierten Parameter bei Luftabschreckung auf die resultierende Spannung aus Eigenspannung und (thermo-) mechanischen Beanspruchungen im Zylinderkopf	135
7.17	Parameterbalken der gewichteten DoE-Auswertung aus Eigenspannung und (thermo-) mechanischen Beanspruchungen bei Luftabschreckung mit Haupteinflüssen und Wechselwirkungen . .	136
7.18	Gegenüberstellen der berechneten Varianten	137

Tabellenverzeichnis

2.1	Wärmebehandlungszustände [13]	29
2.2	Rand-Kern-Modell, Eigenspannungsentstehung während des Abschreckens	39
2.3	Übersicht von Methoden zur Eigenspannungermittlung [14]	40
3.1	Toleranzübersicht von Typ K Thermoelementen nach EN 60584-2:1996	47
3.2	Messstellenplan der Thermoelemente	49
3.3	Übersicht der Wärmebehandlungsparameter	50
3.4	Chemische Zusammensetzung der Aluminiumlegierung EN AC-43200 - AlSi10Mg(Cu)	55
3.5	Statische Festigkeit von luft- und wasserabgeschreckten Zylinderköpfen, Probenentnahme aus der Brennraumplatte	58
3.6	Eigenspannungen am Zylinderkopf zu drei Fertigungszeitpunkten	73
4.1	Zeitdiskretisierung beim Wasserbadabschrecken	80
4.2	DoE-Parameter für die Wasserabschreckung	84
4.3	DoE-Versuchsplan für die Wasserabschreckung	85
4.4	DoE-Versuchsplan für die Luftabschreckung	87
5.1	Übersicht der berechneten Eigenspannungen an den Messpunkten aus Abbildung 3.24	94
5.2	Validierung der Eigenspannungsberechnung	95
5.3	Übersicht der Eigenspannungen an ausgewählten Punkten des Zylinderkopfes	99
6.1	Übersicht der mechanischen Beanspruchung an ausgewählten Punkten des Zylinderkopfes (ZSB-mechanisch)	102
6.2	Übersicht der mechanischen Beanspruchung an ausgewählten Punkten des Zylinderkopfes nach kompletter Montage	103
6.3	Übersicht der thermomechanischen Beanspruchung an ausgewählten Punkten des Zylinderkopfes bei Nennleistung	105

6.4	Übersicht der Beanspruchung infolge des Zünddruckes an Zylinder 1 an ausgewählten Punkten des Zylinderkopfes bei Nennleistung	107
6.5	Zusammenfassung der Berechnungen	108
7.1	Zuordnung von Wichtungsfaktoren auf die einzelnen Messbereiche	113
7.2	Exemplarische Überlagerung und Wichtung der Beanspruchungskomponenten am Messpunkt "Zyl1_BR" (Wichtungsfaktor: 2)	116
7.3	Exemplarische Berechnung der Bewertungszahl bei der Überlagerung der Eigenspannungen bei Basis-Serien-Parametern, Montagespannung und thermomechanischer Beanspruchung . . .	117
7.4	Berechnete optimale Parameter der statistischen Auswertungen (DoE) für Wasser- und Luftabschreckung	137

Symbolverzeichnis

Formelzeichen

Lateinische Symbole

<u>Zeichen</u>	<u>Einheit</u>	<u>Erklärung</u>
A	m^2	Fläche
A	%	Bruchdehnung
a	$m^2 s^{-1}$	Temperaturleitfähigkeit
a	m	Länge des Dehmessgitters
$\bar{A}$	-	Kalibrierfaktor für Bohrlochmethode
b	m	Breite des Dehnmessgitters
$\bar{B}$	-	Kalibrierfaktor für Bohrlochmethode
c	$J kg^{-1} K^{-1}$	spezifische Wärmekapazität
c	m	Breite der Dehmessrosette
c_p	$kJ kg^{-1} K^{-1}$	isobare spezifische Wärmekapazität
c_W	-	Widerstandbeiwert
d	m	Länge der Dehnmessrosette
E	J	Energie
F	N	Kraft
Gr	-	Grashof-Zahl
h	m	Höhe
H_u	$kJ kg^{-1}$	Unterer Heizwert
HBW	-	Härtewert nach Brinell (W für Material der Prüfkugel: Wolframkarbithartmetall)
i	-	Anzahl Umdrehungen pro Arbeitsspiel: 1 bei Zweitaktmotoren, 2 bei Viertaktmotoren
L	m	charakteristische Länge, Abstand
L_{min}	-	Mindestluftbedarf (Diesel: $L_{min} = 14,5$)
m	kg	Masse

<u>Zeichen</u>	<u>Einheit</u>	<u>Erklärung</u>
m	-	Anstieg einer Geradengleichung
$\dot{m}$	kg s^{-1}	Massestrom
n	-	Konstantwert einer Geradengleichung
Nu	-	Nusselt-Zahl
n_{Mot}	min^{-1}	Motor- /Kurbelwellendrehzahl
OVV	m^{-1}	Oberflächen-Volumen-Verhältnis
P	W	Leistung
p	N m^{-2}	Druck
p_{me}		Effektiver Mitteldruck
Pr	-	Prandtl-Zahl
R, r	m	Radius
R^2	-	Bestimmtheitsmaß
R_m	n mm^{-2}	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	N mm^{-2}	Dehngrenze (0,2% zulässige plastische Dehnung)
Ra		Rayleigh-Zahl
r_m	m	Teilkreisradius der Dehnmessgitter auf einer Rosette
Re	-	Reynolds-Zahl
s	m	Wegstrecke
T	$K, ^\circ C$	Temperatur
t	s	Zeit
$\dot{V}$	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	Volumenstrom
V_H	m^3	Hubvolumen
$\underline{Q}$	J	Wärmeenergie
$\dot{Q}$	W	Wärmestrom
$\dot{q}$	Ws^{-2}	Wärmestromdichte
$\dot{q}_s$	W m^{-3}	volumetrischer Quellterm für thermische innere Energie
V	m^3	Volumen
$\dot{V}$	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	Volumenstrom
v	ms^{-1}	Geschwindigkeit
W	J	Arbeit
x, y, z	m	Raumrichtungen
Z	%	Brucheinschnürung