



Simon Gregor Schneider

Mechanische und thermische Beanspruchungen in Großdieselmotoren bei extrem hohen Mitteldrücken

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen

Mechanische und thermische Beanspruchungen in Großdieselmotoren bei extrem hohen Mitteldrücken

Simon Gregor Schneider

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

(Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Spliethoff

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Horst Rulfs, Technische Universität Hamburg-Harburg

Die Dissertation wurde am 30.04.2012 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 14.11.2012 angenommen.

Herausgegeben von:
Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister
LVK - Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen
Technische Universität München

Zugleich:

Dissertation, München, Technische Universität München, 2012

Die Informationen in diesem Buch wurden mit großer Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht völlig ausgeschlossen werden. Verlag und Autor übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für eventuell verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben - auch bei nur auszugsweiser Verwendung - vorbehalten.

Layout und Satz: Simon Schneider
Copyright © Simon Schneider 2012
ISBN: 978-3-943813-04-3

„Inmitten der Schwierigkeiten liegt die Möglichkeit.“

Albert Einstein

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Stand der Technik und Entwicklung bei Großdieselmotoren	1
1.1.1	Emissionsregeln für Großdieselmotoren	1
1.1.2	Aktueller Stand der Technik bei Serienmotoren (Mittelschnellläufer)	2
1.1.3	Motorische Maßnahmen zur NO _x -Reduzierung bei mittelschnell laufenden Großdieselmotoren	3
1.1.4	Zweistufige Aufladung bei mittelschnell laufenden Großdieselmotoren	5
1.1.5	Common-Rail-Systeme für Schwerölbetrieb	6
1.2	Vorangegangene Untersuchungen in FVV-Projekten an der TUHH (IET)	6
1.3	Ziele des Projekts „Zylinderspitzenrücke“ (FVV 911)	8
1.4	Wissenschaftliche Aufgabenstellung und Forschungsbedarf	10
1.5	Der Forschungsmotor 1L26/40 (Versuchsträger)	10
1.5.1	Konstruktive Anpassungen für extreme Zylinderdrücke	12
1.5.2	Ladeluft- und Abgassystem	12
1.5.3	Einspritzsystem	13
1.6	Nichtlineare Finite-Elemente-Analyse	13
1.6.1	Methode der finiten Elemente	13
1.6.2	Simulation nichtlinearer Effekte am Forschungsmotor 1L26/40	15
1.6.3	Einsatz der FEM in der Motorentwicklung	19
2	Entwurf und Bau von Messbauteilen für die Motormessungen	20
2.1	Konzept der DMS-Messung für Motorbauteile	21
2.1.1	Besonderheiten der Applikation von DMS an Motorbauteilen	22
2.1.2	Versiegelung der DMS	23
2.1.3	Konfiguration und Verschaltung	25
2.1.4	Aufbau der Messkette	26
2.1.5	Auswahl des Sensors	27
2.1.6	Messtechnik und Messverstärker	28
2.1.7	Datenerfassung innerhalb der LabView-Softwareumgebung	30
2.2	Auswertung, Korrektur und Umrechnung der Dehnungsmessungen	30
2.2.1	Sensorzustand und Plausibilitätsprüfung	31
2.2.2	Rechenweg und Fehlerursachen	32
2.2.3	Korrekturverfahren: Eichkurvenkorrektur	33
2.2.4	Korrekturverfahren: lineare Driftkorrektur	35
2.2.5	Vergleich der gemessenen Dehnungen mit der FEM-Simulation	35
2.2.6	Ermittlung von Spannungen aus den DMS-Messwerten	35
2.3	Messbauteile für DMS-Messungen	36
2.3.1	Zylinderkopf für Dehnungsmessungen	36
2.3.2	Zylinderbuchse für Dehnungsmessungen	37

2.3.3	Kolben für Dehnungsmessungen	39
2.4	Messbauteile für Temperaturmessungen	41
2.4.1	Zylinderkopf für Temperaturmessungen	42
2.4.2	Zylinderbuchse für Temperaturmessungen.....	44
2.4.3	Kolben für Temperaturmessungen.....	45
2.4.4	Schwinge zur Kabelführung	47
3	Bauteilmessungen.....	50
3.1	Versuchsplan für die Motorversuche	50
3.2	Messungsergebnisse der Bauteiltemperaturen	51
3.2.1	Temperatur des Zylinderkopfes.....	52
3.2.2	Temperatur der Zylinderbuchse	55
3.2.3	Temperatur des Kolbens	57
3.2.4	Fazit der Bauteiltemperaturmessungen	60
3.3	Messergebnisse der Bauteildehnungen	61
3.3.1	Bauteildehnungen der Zylinderbuchse.....	61
3.3.2	Bauteildehnungen des Zylinderkopfes	69
3.3.3	Bauteildehnungen des Kolbens.....	76
3.3.4	Einfluss von Maximaldruck und Motorlast auf die Bauteildehnungen	80
3.3.5	Fazit der Dehnungsmessungen	83
4	FEM-Nachrechnung des Forschungsmotors.....	84
4.1	FEM-Nachrechnung der thermischen Ergebnisse.....	85
4.1.1	Modellaufbau des FEM-Modells für die Nachrechnung	86
4.1.2	Randbedingungen für die Kühlgeometrien der thermischen FEM (aus CFD)....	87
4.1.3	Wärmeübergang an die Umgebung	89
4.1.4	Randbedingungen für die Wärmeleitfähigkeit der Kontakte	89
4.1.5	Werkstoffe und Wärmeleitfähigkeit der Bauteile	90
4.1.6	Arbeitsprozessrechnung für die Betriebspunkte der thermischen FEM	91
4.1.7	Randbedingungen in den Gaswechselkanälen nach Zapf.....	92
4.1.8	Brennraumseitige Randbedingungen für die FEM-Simulation aus APR.....	93
4.1.9	Bauteil Zylinderkopf: Thermische FEM und Vergleich zur Messung.....	97
4.1.10	Bauteil Zylinderbuchse: Thermische FEM und Vergleich zur Messung	101
4.1.11	Energiebilanz aus FEM-Simulation für Zylinderkopf und –buchse.....	105
4.1.12	Vergleich mit der Energiebilanz aus Prüfstandsmessdaten	106
4.1.13	Fazit der thermischen FEM	108
4.2	FEM-Nachrechnung der mechanischen Ergebnisse	109
4.2.1	Kontaktbedingungen der mechanischen FEM-Rechnung.....	110
4.2.2	Nichtlineare Materialgesetze für die Gusswerkstoffe der FEM	111
4.2.3	Ergebnisse der mechanischen FEM	112
4.3	Messung-Rechnung-Vergleich	118
4.3.1	Messung-Rechnung-Vergleich für die Dehnungen des Zylinderkopfes	118

4.3.2	Messung-Rechnung-Vergleich für die Dehnungen der Zylinderbuchse.....	121
4.3.3	Fazit des Messung-Rechnung-Vergleiches	123
4.4	Festigkeitsnachweis der Bauteile anhand des FEM-Ergebnisses.....	124
4.4.1	Festigkeitsnachweis für die Zylinderbuchse.....	125
4.4.2	Festigkeitsnachweis für den Zylinderkopf	131
4.4.3	Fazit der mechanischen FEM	139
5	Gesamtfazit	141
6	Zusammenfassung.....	142
7	Ausblick.....	146
8	Literaturverzeichnis	147
9	Anhang	153