

Fortschritt-Berichte VDI

VDI

Reihe 12

Verkehrstechnik/
Fahrzeugtechnik

Nr. 812

Dipl.-Ing. (FH) Oliver Lehmann,
Halver

Neuartiger Ansatz zur Untersuchung des tribologischen Systems Ventilspindel/Sitzring für Großgasmotoren



Neuartiger Ansatz zur Untersuchung des tribologischen Systems Ventilspindel/Sitzring für Großgasmotoren

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau und

Verfahrenstechnik

der

Universität Duisburg-Essen

zur Erlangung des akademischen Grades

eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

von

Oliver Lehmann

aus

Frankfurt (Oder)

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Alfons Fischer

2. Gutacher: Prof. Dr.-Ing. habil. Matthias Scherge

Tag der mündlichen Prüfung: 24.10.2018

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 12

Verkehrstechnik/
Fahrzeugtechnik

Dipl.-Ing. (FH) Oliver Lehmann,
Halver

Nr. 812

Neuartiger Ansatz zur
Untersuchung des
tribologischen Systems
Ventilspindel/Sitzring
für Großgasmotoren

VDI verlag

Lehmann, Oliver

Neuartiger Ansatz zur Untersuchung des tribologischen Systems Ventilspindel/Sitzring für Großgasmotoren

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 12 Nr. 812. Düsseldorf: VDI Verlag 2019.

156 Seiten, 83 Bilder, 12 Tabellen.

ISBN 978-3-18-381212-7, ISSN 0178-9449,

€ 57,00/VDI-Mitgliederpreis € 51,30.

Für die Dokumentation: Tribologie – Verschleißmechanismen – Hochtemperatur – Unge-
schmierter Kontakt – Ventilverschleiß – Stellite – Neuartiger Prüfstand – Großgasmotoren

Die vorliegende Arbeit wendet sich an Ingenieure und Wissenschaftler im Bereich der Tribolo-
gie von Zylinderkopfkomponenten. Es ist zu beobachten, dass durch die technische Entwicklung
von Großgasmotoren das tribologische System Ventilspindel/Sitzring an den Grenzen seiner
Funktionsfähigkeit eingesetzt wird. Der resultierende Verschleiß wirft die Frage nach neuen lö-
sungsansätzen auf. Zu diesem Zweck behandelt diese Arbeit nach Aufklärung der dominieren-
den Verschleißmechanismen die Entwicklung, Konstruktion und den Aufbau eines neuartigen
Ventilverschleißprüfstands. Durch den neuen Lösungsansatz einer getrennten Simulation der Ven-
tilphasen Schließen und Verbrennungsdruck können die dominierenden Verschleißmechanismen
phasenspezifisch zugeordnet werden. Aus der erstmaligen, kombinierten Übereinstimmung von
Verschleißerscheinungsformen und Verschleißraten konnten neue Erkenntnisse über die Einflussfak-
toren Ventilschließen und Verbrennungsdruck gewonnen werden.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie;
detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie
(German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at
www.dnb.de.

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften,
Abteilung Maschinenbau
der Universität Duisburg-Essen
genehmigte Dissertation
Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Alfons Fischer
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Matthias Scherge
Datum der mündlichen Prüfung: 24.10.2018

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2019

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe
(Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung,
vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9449

ISBN 978-3-18-381212-7

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand anfangs während meiner Tätigkeit als Projekt ingenieur und später zum Großteil neben meiner Arbeit als Leiter der Abteilung Forschung und Entwicklung bei der Märkisches Werk GmbH.

Für die hierfür geleistete wertvolle Mitarbeit möchte ich allen Beteiligten danken. Besonderen Dank gebührt der Märkisches Werk GmbH für die großzügige finanzielle Förderung. Herrn Dr.-Ing. Holger Fellmann, ehemaliger Leiter der Abteilung Forschung und Entwicklung bei der Märkisches Werk GmbH, danke ich herzlich für die Förderung und Unterstützung des Projekts.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Alfons Fischer, Lehrstuhl für Werkstofftechnik des Instituts für Technologien der Metalle an der Universität Duisburg-Essen, möchte ich mich für die thematische Herangehensweise und seine stete Gesprächsbereitschaft, die im Ergebnis erst die Behandlung des Themas in dieser Art und Weise ermöglichte, sowie für die Übernahme des Hauptreferats bedanken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Matthias Scherge, Leiter Geschäftsfeld Tribologie am Fraunhofer IWM und Leiter MikroTribologie Centrum µTC, danke ich für die wohlwollende Unterstützung bei der Entstehung und Umsetzung dieser Arbeit sowie für die Übernahme des Korreferats.

Allen Institutsmitgliedern am Fraunhofer IWM, die mir bei der Entwicklung, Aufbau und Inbetriebnahme des Ventilverschleißprüfstands sowie bei der Durchführung der Experimente unterstützt haben, sei an dieser Stelle gedankt. Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Alexander Renz für seine stete Diskussionsbereitschaft in vielen Gesprächen, Herrn Jan Klipfel, Herrn Jan Speck und Herrn Dr.-Ing. Dominik Kürten.

Großen Dank möchte ich an meine Eltern, Roland und Gerlinde, richten, die mir bereits zu früher Zeit die Möglichkeit einräumten und darin bestärkten, den für mich richtigen Weg zu gehen. Nicht vergessen möchte ich Dr. Tilmann Johannes Heinisch (†), der mich ermutigte und zum Studium Maschinenbau lenkte.

Dank schulde ich meiner Ehefrau Simone, meiner Tochter Helena und meinem Sohn Arthur-Oliver, die sich vermutlich oft gefragt haben, was ihr Ehemann bzw. Papa eigentlich die ganze Zeit am späten Abend bis in die Nacht und an den Wochenenden so macht. Vielen Dank für Eure Unterstützung und den Freiraum während meiner Promotion, ohne den diese Arbeit nicht so möglich gewesen wäre.

Halver im Oktober 2018

Ich schreibe dies, wie es mir wahr zu sein scheint.

Hekataios von Milet
(um 550 bis 476 v. Chr.)

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	VIII
Abkürzungsverzeichnis.....	X
Kurzfassung	XII
Abstract.....	XIII
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation des neuartigen Ventilverschleißprüfstands.....	1
1.2 Tribologische Grundlagen.....	3
1.2.1 Gleitreibung	4
1.2.2 Verschleiß.....	8
1.2.3 Gleitverschleiß	11
1.2.4 Gleitverschleiß bei Hochtemperatur	14
1.2.5 Stoßverschleiß.....	17
1.2.6 Milder Verschleiß.....	18
1.2.7 Dritter Körper.....	19
1.3 Ventilsystem in 4-Takt-Großgasmotoren	20
1.3.1 Ventilspindel und Sitzring	21
1.3.2 Werkstoffe	26
1.3.3 Ventilverschleiß.....	27
1.4 Ventilverschleißprüfstände.....	34
1.5 Zukünftige Trends in der Großgasmotorenentwicklung	39
1.6 Ziel und Ansatz der Arbeit	40
2 Untersuchung der Verschleißmechanismen zur Prüfstandsentwicklung	42
2.1 Probenmaterial	42
2.2 Mikrostrukturanalyse	44
2.2.1 Durchführung und Mikroskopie.....	44
2.2.2 Spektroskopie	45

2.2.3 Profilometrie	46
2.3 Stellite™ 12-Ventilspindeln mit Verschleißraten von bis zu 11,81 mm ³ /h	48
2.3.1 Mikroskopie	48
2.3.2 Profilometrie	54
2.3.3 Röntgenphotoelektronenspektroskopie.....	56
2.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	59
3 Entwicklung, Konstruktion und Aufbau eines neuartigen Ventilverschleißprüfstands 63	
3.1 Prüfstandskonzept	63
3.1.1 Maschinengestell und Aktuatorik.....	64
3.1.2 Prüfmodus I und II.....	68
3.2 Aufbau des Ventilverschleißprüfstands.....	70
3.2.1 Prüfgestell	70
3.2.2 Tastversuche zur Induktionsheizung	72
3.2.3 Gasdichte Klimakammer	73
3.2.4 Prüfmodus I – Simulation des Ventilschließens.....	74
3.2.5 Ölschmierung und Kühlung.....	76
3.2.6 Vorversuche zum Kühlsystem.....	77
3.2.7 Prüfmodus II – Simulation des Verbrennungsdrucks	79
3.2.8 Messtechnik und Peripherie	83
3.2.9 Ausrichtung des Prüfaufbaus.....	85
3.3 Versuchsablaufplan	86
3.4 Validierung des Ventilverschleißprüfstands.....	87
3.4.1 Ventilrotation.....	87
3.4.2 Kühlsystem.....	88
3.4.3 Verschleißerscheinungsformen	90
3.4.4 Verschleißrate	94
4 Erste Ergebnisse aus den Prüfstandsversuchen 95	
4.1 Ventilschließen an Luft bei 380 °C.....	96
4.1.1 Quantitative Verschleißanalyse	96
4.1.2 Mikrostrukturanalyse.....	99
4.2 Verbrennungsdruck an Luft bei 380 °C.....	103
4.2.1 Quantitative Verschleißanalyse	103
4.2.2 Mikrostrukturanalyse.....	107

5 Diskussion.....	112
5.1 Validierung des VVPs	112
5.2 Einfluss der Mikrostruktur	116
5.3 Neue Erkenntnisse zum Einfluss des Ventilschließens	117
5.4 Neue Erkenntnisse zum Einfluss des Verbrennungsdrucks.....	119
5.5 Schlussfolgerungen für zukünftige Großgasmotoren.....	122
6 Zusammenfassung und Ausblick	123
6.1 Prüfstandsvalidierung	123
6.2 Prüfstandsversuche	125
6.3 Ausblick.....	126
7 Anhang	128
8 Literaturverzeichnis.....	131

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
A	[mm ²]	nominelle Kontaktfläche
A _{I,0h}	[mm ²]	nichtverschlissene Fläche
A _{I,xh}	[mm ²]	verschlissene Fläche nach x-Stunden
A _R	[mm ²]	reale Kontaktfläche
A _T	[mm ²]	Tellerplanfläche
A _V	[mm ²]	Ventilquerschnitt
A _{W,xh}	[mm ²]	Verschleißfläche
c _m	[m/s]	mittlere Kolbengeschwindigkeit
d _T	[mm]	Ventiltellerdurchmesser
d _S	[mm]	Ventilschaftdurchmesser
D	[mm]	Zylinderdurchmesser
e	[1]	Stoßzahl
E	[GPa]	Elastizitätsmodul
E'	[GPa]	angepasster Elastizitätsmodul
F _N	[N]	Normalkraft
F _P	[N]	Prüfkraft
F _R	[N]	Reibkraft
F _{Schlag}	[N]	Aufschlagskraft
F _T	[N]	Tangentialkraft
h	[mm]	Ventilhub
h _{CR}	[mm]	kritische Eindringtiefe
h _{max}	[mm]	max. Ventilhub
H	[HV]	Härte
k _{ad}	[1]	Wahrscheinlichkeitsfaktor von Verschleißpartikeln
m	[kg]	Masse
n	[1]	Anzahl
p	[N s]	Impuls
p _m	[MPa]	mittlerer Kontaktdruck
p _z	[bar]	Zünddruck
r	[mm]	Radius
r _a	[mm]	äußerer Radius
r _i	[mm]	innerer Radius
s	[mm]	Gleitweg
t _{Stoß}	[ms]	Stoßzeit
T	[°C]	Temperatur
U	[mm]	Umfang

v_R	[mm/s]	Reibgeschwindigkeit
V_W	[mm ³]	volumetrischer Verschleiß
$V_{W,xh}$	[mm ³]	Verschleißvolumen nach x-Stunden
w_m	[m/s]	Strömungsgeschwindigkeit am Ventilsitz
W	[mm ³ /h]	Verschleißrate
α	[°]	Ventilsitzwinkel
β	[µm]	angenommener Radius für alle Rauheitsspitzen
δ	[µm]	Oberflächenabstand
μ	[1]	Reibkoeffizient
ν	[1]	Querdehnungszahl (Poissonzahl)
σ	[µm]	Standardabweichung
τ_s	[N/mm ²]	Scherfestigkeit
ψ	[1]	Plastizitätsindex
ψ^*	[1]	allgemeiner Plastizitätsindex

Abkürzungsverzeichnis

at.-%	Atomprozent
AVS	Auslassventilspindel
ASR	Auslasssitzring
BMEP	Brake Mean Effective Pressure
bspw.	beispielsweise
C	Kohlenstoff
CHx	Kohlenwasserstoffe
ca.	circa
Ca	Kalzium
Co	Kobalt
Cr	Chrom
CTQ	Critical to Quality
EDS	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
et al.	et alii/ et aliae (und andere)
EVS	Einlassventilspindel
ESR	Einlasssitzring
Fe	Eisen
Gew.-%	Gewichtsprozent
°KW	Grad Kurbelwinkel
HT	Hochtemperatur
LPG	Liquified Petroleum Gas (Flüssiggas)
Mo	Molybdän
Ni	Nickel
O	Sauerstoff
o. g.	oben genannt
P	Phosphor
PFP	Peak Firing Pressure
PTA	Plasma Transferred Arc (Plasma-Pulver-Auftragschweißen)
REM	Rasterelektronenmikroskop
Rt	maximale Rautiefe
RT	Raumtemperatur
SAD	Sitzaußendurchmesser
Si	Silizium
SID	Sitzinnendurchmesser
SM	Sitzmitte
SR	Sitzring
TD	Tellerdurchmesser
vgl.	vergleiche

VS	Ventilspindel
VSR	Ventilsitzring
VV	Ventilverschleiß
VVP	Ventilverschleißprüfstand
W	Wolfram
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil

Kurzfassung

Die technische Entwicklung von Großgasmotoren in den Bereichen Marine, Lokomotive und insbesondere Kraftwerk hat zu mechanischen Wirkungsgraden von über 50 % geführt, wodurch das tribologische System Ventilspindel/Sitzring an den Grenzen seiner Funktionsfähigkeit eingesetzt wird. Problemverschärfend wirkt eine zunehmend strengere Abgasgesetzgebung. Hocheffiziente Großgasmotoren werden im Systemverbund mit neuen Technologiekonzepten als potenzieller Ansatz für einen emissions- und kostenreduzierten Betrieb gesehen. Die steigenden Zünddrücke, höheren Temperaturen und reduzierten Verbrennungsrückstände bewirken aufgrund neuartiger Betriebsbedingungen einen hohen Ventilverschleiß mit vorzeitigem Funktionsausfall.

Das tribologische Verhalten der Paarung Ventilspindel/Sitzring ist nach Quellenlage aus den Bereichen Automotive und Heavy-Duty bekannt. Als wichtigste Einflussfaktoren auf den Ventilverschleiß wurden die beiden Phasen Ventilschließen und Verbrennungsdruck bestimmt. Hingegen sind für den Bereich Großgasmotor, außer vom Autor selbst, bislang keine wissenschaftlichen Arbeiten dokumentiert. Darüber hinaus fehlt eine Zuordnung der eigenschaftsbestimmenden Verschleißmechanismen sowie der Verschleißanteile am Gesamtventilverschleiß für die beiden Phasen Ventilschließen und Verbrennungsdruck.

Die vorliegende Dissertation betrachtet die Entwicklung, Konstruktion und den Aufbau eines neuartigen Ventilverschleißprüfstands zur getrennten experimentellen Simulation der Phasen Ventilschließen und Verbrennungsdruck für Großgasmotoren. Zu diesem Zweck wurden im ersten Schritt Ventilspindeln mit unterschiedlicher Laufzeit aus demselben Typ Großgasmotor mikrostrukturell und chemisch untersucht. Die Untersuchung der tribologisch beanspruchten Randschichten diente zur Analyse der Verschleißmechanismen und der Validierung des Prüfstands in Bezug auf die eigenschaftsbestimmenden Verschleißmechanismen. So konnten aus den ersten Versuchsreihen zum Einfluss von Ventilschließen und Verbrennungsdruck bei 380 °C an Luft gleich neue Erkenntnisse gewonnen werden. Die Versuche bestätigen den signifikanten Einfluss von Schließgeschwindigkeit und Verbrennungsdruck auf den Ventilverschleiß. Als neue Erkenntnisse konnten eine größere Zunahme des Sitzringverschleißes im Vergleich zur Ventilspindel unter Ventilschießen und eine Abnahme des Ventilspindelverschleißes um ca. 30 % trotz einer Steigerung des Verbrennungsdrucks von 140 auf 180 bar gewonnen werden. Dieser Verschleißrückgang mit steigender Last bedeutet, dass die mechanisch-dominierten Verschleißmechanismen unter Ventilschließen durch chemisch-dominierte unter Verbrennungsdruck überlagert werden. Ferner konnten die beiden Verschleißmechanismen Adhäsion mit Werkstoffübergang und Oberflächenzerstörung mit dem Untermechanismus Delamination beider Belastungsphasen zugeordnet werden. Die Verschleißraten beider Phasen waren ähnlich groß. Als vierte, wichtige und neue Erkenntnis folgt, dass das Ventilschließen zur Bewertung des Systemverhaltens wichtiger ist als der Verbrennungsdruck. Diese neuen Erkenntnisse, die beispielhaft mit den Werkstoffen Stellite™ 12 bei der Ventilspindel und Pleuco 12 MW beim Sitzring untersucht wurden, können jetzt als belastbare Ansatzpunkte für weitere Parameterstudien und Werkstoffentwicklungen genutzt werden.

Abstract

The technical development of large bore gas engines for marine, locomotive and power plant in particular leads to mechanical efficiencies of more than 50 %, whereas the tribological system valve spindle/seat ring is applied at its functional limits. Stringent emission regulations has an additional effect. Highly efficient large bore gas engines combined with new technology concepts are a promising approach in order to reach lower emissions and operating costs. Because of novel operating conditions caused by increasing peak firing pressures, higher temperatures and reduced combustion residues valve wear effects premature failure.

Based on findings from literature the tribological behavior of the pair valve spindle/seat ring is known from automotive and heavy-duty applications. Valve closure and peak firing pressures have been identified as main factors influencing valve wear. However, so far scientific investigations regarding valve wear in large bore gas engines have not been published, apart from the author's papers. Furthermore, an allocation of determining wear mechanisms and a partition of wear on the entire valve wear concerning valve closure and peak firing pressure are missing.

This dissertation deals with the development, design and construction of a novel valve wear test rig for separate simulating of valve closure and peak firing pressure. For this purpose, the microstructure and chemistry of valve spindles with different operating hours from engine tests of the same type of engine were analyzed. Objectives of the investigations were to identify the wear mechanisms and to validate the test rig regarding the determining wear mechanisms. From the first test series on the impact of valve closure and peak firing pressure at 380 °C on air new findings could be gained. Tests verify the main influence of valve closure and peak firing pressure on valve wear. As new findings an increase of seat ring wear compared to valve spindle for valve closure and a decrease of valve spindle wear from 140 to 180 bar of about 30 % could be found. This decrease by increasing load means that mechanically-dominated wear mechanisms for valve closure are superimposed by chemically-dominated ones. Furthermore, both wear mechanisms adhesion by material transfer and surface fatigue by delamination can be allocated to both phases valve closure and peak firing pressure, while the wear rates of both phases are equal. The fourth new and important outcome is, that valve closure is more important than peak firing pressure in order to evaluate the tribological behavior of valve spindle/seat ring.

This new findings, exemplary examined for materials Stellite™ 12 for valve spindle and Pleuco 12 MW for seat ring, will now provide a better understanding and sustainable propositions for further parameter studies and material development.

