

Massenspektrometrische Untersuchung des Ölemissionsverhaltens von
Verbrennungsmotoren bei stationärem und transientem Betrieb

Der Fakultät für Maschinenbau
der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs

genehmigte
DISSERTATION
von

Armin Frommer
aus Balingen
Hamburg 2016

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Thiemann

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Matz

Tag der mündlichen Prüfung: 22.06.2015

Schriftenreihe des MAHLE Doktorandenprogramms

Band 4

Armin Frommer

**Massenspektrometrische Untersuchung des
Ölemissionsverhaltens von Verbrennungsmotoren
bei stationärem und transientem Betrieb**

Shaker Verlag
Aachen 2016

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.: Hamburg, Helmut-Schmidt-Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3977-1

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

Die vorliegende Arbeit ist das Ergebnis meiner Tätigkeit im Motorenversuch der MAHLE International GmbH im Rahmen des MAHLE Doktorandenprogramms. Die Promotion erfolgte an der Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg.

Ganz besonders danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Thiemann für seine persönliche Unterstützung und Anleitung, seinen wertvollen fachlichen Beitrag bei der Durchführung dieser Arbeit sowie für die Übernahme des Hauptreferats. Mein weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerhard Matz für seine persönliche und fachliche Begleitung der Arbeit sowie für seine Bereitschaft zur Übernahme des Koreferats.

Ich bedanke mich bei der MAHLE International GmbH für das entgegengebrachte Vertrauen und die Bereitstellung der erforderlichen Ressourcen für die Durchführung dieser Arbeit. Allen voran gilt mein besonderer Dank Herrn Dr. Reiner Künzel für die zahlreichen Anregungen und Diskussionen während der zumeist abendlichen Gesprächsrunden sowie für die gewährten Freiräume bei der Erstellung dieser Arbeit. Auch Herrn Rudolf Freier danke ich für sein Interesse am Thema und seine praktischen Hinweise. Darüber hinaus gilt mein Dank Frau Annette Beeckmann, Herrn Vjatcheslav Volkov und Herrn Simon Becker für ihre Unterstützung und die angenehme und konstruktive Arbeitsatmosphäre im „Ölemissionsteam“. Den Herren Holger Ehnis und Dr. Thomas Deuß danke ich für den fachlichen Austausch zum Thema Reibleistung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Heinz Junker danke ich für seine motivierenden Worte und die notwendigen Freiräume, um diese Arbeit erfolgreich fertigstellen zu können.

Diese Arbeit wäre jedoch nicht ohne die hervorragenden Vorarbeiten und die außerordentliche persönliche und fachliche Unterstützung durch Herrn Dr. Sven Krause der Lubrisense GmbH möglich gewesen. Dankend seien hierbei auch die Herren Andreas Behn, Nils Röbbken und Dr. Lars Schomann erwähnt.

Abschließend möchte ich mich ganz herzlich bei meiner Frau Melanie für ihre Unterstützung, Liebe und Geduld während des Projekts Doktorarbeit sowie bei meinen Eltern und Geschwistern für den fortwährenden Rückhalt während meiner Schul-, Studien- und Promotionszeit bedanken.

Abstract

Further reduction of emissions from internal combustion engines requires further reduction of their oil emission behavior as unburned oil emitted through the exhaust contributes to hydrocarbon raw emissions as well as CO₂ emissions. As lube oil consumption behavior is different for steady-state and transient engine operation, both aspects need to be analyzed in order to identify remaining potential for oil emission reduction while maintaining sufficient lubrication in all engine operating conditions. The results of oil emission measurements on different passenger car engines disclose oil emission characteristics for the whole load-speed range of these engines at steady-state operation. The development of a transient test cycle for standardized dynamic oil emission analysis and the introduction of methods for quantification and evaluation of dynamic oil emission effects allow identification of the mechanisms involved and thus their optimization.

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird das Ölemissionsverhalten von Verbrennungsmotoren bei stationärem und transientem Betrieb untersucht. Zur Messung der Ölemission, also des unverbrannten Motorenöls im Abgas, wird ein Massenspektrometer unter Anwendung der sogenannten Hochpassmassenfilter-Methode eingesetzt. Diese Methode ermöglicht eine zeitlich hochaufgelöste Messung der Ölemission im gesamten Betriebskennfeld des Motors.

Im Rahmen der stationären Untersuchungen werden sowohl Ölemissionsmessungen an einem Benzinmotor als auch an einem PKW-Dieselmotor durchgeführt. Die daraus resultierenden Ölemissionskennfelder zeigen das charakteristische Ölemissionsverhalten unter stationären Betriebsbedingungen für diese Motoren. Der Einfluss konstruktiver Merkmale innermotorischer Komponenten auf die stationäre Ölemission wird beispielhaft durch eine Variation der Tangentialkraft des Ölabstreifrings an den beiden Motoren gezeigt. Basierend auf zusätzlichen Erkenntnissen aus Reibleistungsmessungen wird anhand dieses Parameters der Zielkonflikt zwischen Ölemission und Reibung und die zugehörigen Auswirkungen auf die CO₂-Bilanz im Neuen Europäischen Fahrzyklus aufgezeigt.

Da die Ölemission bei realem, beziehungsweise transientem Motorbetrieb deutliche Abweichungen von den stationären Ölemissionskennfeldern zeigen kann, liegt ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit auf der Analyse des dynamischen Ölemissionsverhaltens. Dies umfasst zum einen die Einführung von Methoden zur Quantifizierung und Bewertung dynamischer Ölemissionsvorgänge und zum anderen die Erarbeitung eines standardisierten transienten Prüflaufprogramms zur gezielten Reproduzierung dynamischer Ölemissionseffekte sowie zur systematischen Untersuchung der verursachenden Öltransportmechanismen.

Die vorgestellten Werkzeuge werden beispielhaft angewandt, sowohl um das dynamische Ölemissionsverhalten verschiedener Motoren gegenüberzustellen als auch um den Einfluss ausgewählter konstruktiver Merkmale der Kolbengruppe auf das dynamische Ölemissionsverhalten zu bestimmen.

Inhalt

Formelzeichen und Abkürzungen	IV
1 Einleitung und Zielsetzung	1
2 Grundlagen Ölverbrauch und Ölverbrauchsmessung	4
2.1 Schmieröl – Zusammensetzung und Funktion	4
2.2 Ölverbrauchswege des Verbrennungsmotors	4
2.3 Öltransport- und Ölverbrauchsmechanismen der Kolbengruppe	8
2.4 Abgasemissionen aus dem Schmieröl	14
2.5 Angewandte Messmethoden zur Ölverbrauchsmessung	16
2.6 Konventionelle Messmethoden	16
2.7 Analytisch-chemische Messmethoden	17
2.8 Ölemissionsverhalten bei stationärem Motorbetrieb	23
2.9 Ölemissionsverhalten bei transientem Motorbetrieb	25
3 Grundlagen der massenspektrometrischen Messtechnik	28
3.1 Einlasssystem	28
3.2 Ionisierung	29
3.3 Massentrennung im Analysator	31
3.4 Detektion	34
4 Versuchsaufbau und Messverfahren	36
4.1 Massenspektrometrische Anwendung zur Ölemissionsmessung	36
4.2 Versuchsträger und Messaufbau	38
4.3 Applikation des Einlasssystems	40
4.4 Parametrierung des Massenspektrometers	41
4.5 Rohsignalverarbeitung zur Ölemissionsbestimmung	44
4.5.1 Kalibriertechnik	44
4.5.2 Numerische Bestimmung der Ölemission im Abgas	45
4.6 Reproduziergenauigkeit	48
5 Stationäres Ölemissionsmessprogramm und Auswerteverfahren	50
5.1 Messprogramm (Laufprogramm, Kennfeldgrenzen)	50
5.2 Darstellung und Bewertung des stationären Ölemissionsverhaltens	51
6 Studie zum stationären Ölemissions- und Reibverhalten in Abhängigkeit der Tangentialkraft des Ölabstreifings	52
6.1 Untersuchungen am PKW-Dieselmotor	55
6.1.1 Einfluss der Ölabstreifringtangentialkraft auf das Ölemissionsverhalten	55
6.1.2 Einfluss der Ölabstreifringtangentialkraft auf das Reibverhalten	59
6.1.3 Zielkonflikt zwischen Ölemission und Reibung	62

6.1.4	Auswirkungen auf die CO ₂ -Bilanz am Beispiel des NEFZ.....	64
6.2	Untersuchungen am turboaufgeladenen Benzinmotor	67
6.2.1	Einfluss der Ölabstreifringtangentialkraft auf das Ölemissionsverhalten	67
6.2.2	Einfluss der Ölabstreifringtangentialkraft auf das Reibverhalten	70
6.2.3	Zielkonflikt zwischen Ölemission und Reibung	72
6.2.4	Auswirkungen auf die CO ₂ -Bilanz am Beispiel des NEFZ.....	73
6.3	Vergleich der Ergebnisse für beide Motoren	76
7	Messtechnische Anforderungen zur hochdynamischen Ölemissionsmessung	78
7.1	Dynamisches Verhalten der Messkette (Messsystem).....	78
7.1.1	Berechnung der Messgastransferzeiten	78
7.1.2	Verfahren zur Überprüfung des dynamischen Auflösungsvermögens	80
7.1.3	Stabilität des dynamischen Übertragungsverhaltens	84
8	Transientes Ölemissionslaufprogramm und Auswerteverfahren	87
8.1	Einfluss von Betriebspunktwechseln auf das Ölemissionsverhalten.....	87
8.2	Definitionen und Kenngrößen zur quantitativen Auswertung.....	91
8.3	Laufprogrammentwicklung	94
8.3.1	Einfluss der sequentiellen Anordnung der Betriebspunktwechsel	94
8.3.2	Einfluss der Rampenzeit der Betriebspunktwechsel	96
8.3.3	Einfluss der Haltezeit vor dem Betriebspunktwechsel.....	98
8.3.4	Definition des transienten Ölemissionslaufprogramms (25-BPW-Lauf).....	102
8.4	Darstellung und Bewertung des dynamischen Ölemissionsverhaltens.....	104
9	Dynamisches Ölemissionsverhalten verschiedener Benzinmotoren	107
10	Einfluss der Gasdynamik in der Kolbenringzone auf das dynamische Ölemissionsverhalten am Benzinmotor	111
11	Zusammenfassung und Ausblick.....	119
12	Literaturverzeichnis	122

Formelzeichen und Abkürzungen

Griechische Formelzeichen

Φ	elektrisches Spannungspotential [V]
Φ_0	elektrisches Spannungspotential an den Quadrupolstäben [V]
ω	Frequenz der Wechselspannung [Hz]
$\vec{\nabla}$	Nabla-Operator [-]
ξ	Substitutionsvariable der Mathieu-Gleichung / des Terms $\frac{\omega \cdot t}{2}$
$\rho_{x,y}$	Korrelationskoeffizient für die Zufallsvariablen X und Y
ρ_{Luft}	Dichte der Luft [kg/m ³]
σ_{Z_1}	Standardabweichung der Zufallsvariable Z_1
σ_{Z_2}	Standardabweichung der Zufallsvariable Z_2
$\sigma_{\ddot{O}mission}$	Standardabweichung der gemessenen Ölemission [-]
$v_{\ddot{O}mission}$	Variationskoeffizient der gemessenen Ölemission [-]
$\delta(t)$	Impulsfunktion (Dirac-Impuls)

Lateinische Formelzeichen

a	Substitutionsvariable der Mathieu-Gleichung / des Terms $\frac{8 \cdot e \cdot U}{m \cdot r_0^2 \cdot \omega^2}$
a_{Kal}	Steigung der Kalibriergeraden [counts]
b_{Kal}	Ordinatenabschnitt der Kalibriergeraden [counts]
$Cov(Z_1, Z_2)$	Kovarianz von Z_1 und Z_2
A^+	positiv geladenes Ion [-]
AB	ladungsneutrale Molekülverbindung [-]
AB^+	positiv geladene Molekülverbindung [-]
AB^{++}	mehrfach positiv geladene Molekülverbindung [-]
B^-	negativ geladenes Ion [-]
$c_{\ddot{O}l}$	Massen-Schmierölkonzentration [-]
$c_{\ddot{O}l, Kal}$	Massen-Ölkonzentrationen der Kalibriersequenz [-]
c_C	Massen-Kohlenstoffkonzentration im Kraftstoff oder Öl [-]
$\dot{d}(t)$	Ölemission als Gesamtölmassenstrom im Abgas [g/h]
d_1	nominaler Durchmesser der Zylinderlaufbuchse [mm]
e^-	Elektron [-]
e	elektrische Ladung [C]
\vec{E}	Vektor der elektrischen Feldstärke [V/m]
E_{Ion}	Ionisierungs-/Elektronenenergie in der Ionenquelle des MS [eV]

E	Elastizitätsmodul des Kolbenringwerkstoffs [N]
\vec{F}	Kraftvektor [N]
F_t	Tangentialkraft des Kolbenrings [N]
ΔF_{SS}	Änderung des Feuerstegspiels [μm]
$f_{Tropfen}$	Dosierfrequenz des Piezoventils des Kalibrators [Hz]
$G(s)$	Übertragungsfunktion [-]
$g(t)$	Gewichtsfunktion [-]
h_1	Höhe des Kolbenrings [mm]
I	axiales Trägheitsmoment des Kolbenringquerschnitts [kgm^3]
$K_{dyn, relativ}$	Kennzahl für die Relative Relevanz der dynamischen Ölemission [-]
$K_{dyn, zeit}$	Kennzahl für die Zeitliche Relevanz der dynamischen Ölemission [-]
k	Koeffizient der Formfüllung [-]
M	Messgaskomponenten / zu analysierende Moleküle [-]
M_{CO_2}	molare Masse von Kohlendioxid [kg/mol]
M_C	molare Masse von Kohlenstoff [kg/mol]
$[M + H]^+$	Quasi-Molekülonen [-]
m	Masse [kg]
$m_{CO_2}(s)$	spezifische emittierte Kohlendioxidmasse [g/s]
$m_{Kraftst/öl}$	verbrauchte Kraftstoff- oder emittierte Ölmasse [g]
$m_{\dot{O}E, dyn}$	Masse des dynamischen Ölemissionsanteils [kg]
$m_{\dot{O}E, ges}$	Gesamtmasse der Ölemission [kg]
$m_{\dot{O}E, stat}$	Masse des stationären Ölemissionsanteils [kg]
$m_{Tropfen}$	Masse eines Tropfens des Kalibriergemischs [kg]
m/z	Masse-zu-Ladungsverhältnis [-]
\dot{m}_{Abgas}	Abgasmassenstrom [kg/h]
\dot{m}_{ges}	Gesamtmassenstrom im Kalibrator [kg/s]
\dot{m}_{Hexan}	Hexanmassenstrom [kg/s]
$\dot{m}_{Kraftstoff}$	Kraftstoffmassenstrom [kg/h]
\dot{m}_{Luft}	Luftmassenstrom [kg/h]
$\dot{m}_{öl}$	Ölmassenstrom [kg/s]
p_0	Flächenpressung [N/m^2]
q	Substitutionsvariable der Mathieu-Gleichung / des Terms $\frac{4 \cdot e \cdot V}{m \cdot r_0^2 \cdot \omega^2}$
R	Reaktandgas [-]
ΔRSS	Änderung des Ringstoßspiels [mm]
r_0	effektiver Radius zwischen den Elektroden eines MS [mm]

s	Wegstrecke [km]
$\dot{s}(t)$	Betriebspunktspezifisches Stationärölemissionsniveau [g/h]
$TIC_{\dot{\omega}l}$	Zählrate des Massenspektrometers bei der Ölkonzentrationsmessung [counts]
t	Zeit [s]
t_{10-90}	Signalanstiegszeit / Systemantwortzeit
t_y	radialer Abstand der neutralen Faser zur Kolbenringlauffläche [mm]
$t_{dyn, 50 \%}$	Zeitpunkt zu dem 50 % des dynamischen Ölemissionsanteils emittiert ist [s]
$t_{dyn, 100 \%}$	Zeitpunkt zu dem der dynamische Ölemissionsvorgang abgeschlossen ist [s]
t_s	Startzeitpunkt des Auswertzeitraum [s]
t_A	Endzeitpunkt des Auswertzeitraum [s]
$t_{\text{äquistat}}$	Dynamisches Ölemissionsoptimierungspotential [s]
$t_{\text{äquistat, kum}}$	Summe der Einzelergebnisse für $t_{\text{äquistat}}$ während eines Laufprogramms [s]
Δt_R	Dauer einer Betriebszustands- oder Signalniveauänderung [s]
Δt_H	Haltezeit / Verweildauer in einem Betriebszustand [s]
Δt_A	Dauer der für die Analyse relevanten Betriebsphase [s]
U	Gleichspannung [V]
U_B	Betriebsspannung [V]
$U(s)$	Systemeingangssignal im Bildbereich [-]
$u(t)$	Systemeingangssignal [-]
V	Amplitude der Wechselspannung [V]
V_{VT}	Volumen des Unterdruckbehälters (Vakuumtank) [l]
v_0	mittlere Molekülgeschwindigkeit am Probeneintritt [m/s]
\dot{V}_{SG}	Spülgasvolumenstrom durch den Kalibrator [m ³ /s]
$\bar{X}_{\text{ölemission}}$	mittlere Ölemission [g/h]
x, y, z	Wegkoordinaten [mm]
$Y(s)$	Systemausgangssignal im Bildbereich [-]
$y(t)$	Systemausgangssignal [-]
Z_1	Zufallsvariable [-]
Z_2	Zufallsvariable [-]

Abkürzungen

ATL	Abgasturbolader
BPW	Betriebspunktwechsel
CFD	Computational Fluid Dynamics – Numerische Strömungsmechanik
COMSOL	Software-Hersteller
CI	chemische Ionisierung
DSF	Dachfasenschlauchfeder
EI	Elektronenstoß-Ionisierung
GC	Gaschromatograph
HC	Hydrocarbons – Kohlenwasserstoff(e)
HFF	Hochfrequenzfeld
HPM	Hochpassmassenfilter
IQ	Ionenquelle
μC	Microcontroller
MS	Massenspektrometer
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
OT	oberer Totpunkt
PKW	Personenkraftwagen
ppm	parts per million
ppb	parts per billion
RF	Radio-Frequency – Hochfrequenz
SIM	Selected Ion Monitoring

Chemische Formeln und Elementsymbole

Ar	Argon
⁸² Br	radioaktives Bromisotop
C	Kohlenstoff
¹⁴ C	radioaktives Kohlenstoffisotop
C ₁₆ H ₁₀	Pyren
Cl	Chlor
CO ₂	Kohlenstoffdioxid / Kohlendioxid
H	Wasserstoff
³ H	Tritium
⁶⁹ Ge	radioaktives Germaniumisotop
H _x C _y	Kohlenwasserstoffverbindungen
H ₂ O	Wasser
N ₂	Stickstoff
O ₂	Sauerstoff
S	Schwefel
SO ₂	Schwefeldioxid