

**Untersuchungen zur Kraftanregung durch die Verbrennung beim
direkteinspritzenden Common-Rail Dieselmotor unter Berücksichtigung des
Körperschallübertragungsverhaltens**

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Karsten Finger

aus Frankenberg/Eder

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. F.G. Kollmann

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. R. Nordmann

Tag der Einreichung: 30.11.2000

Tag der mündlichen Prüfung: 13.3.2001

Darmstadt 2001

D 17

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand bei der DaimlerChrysler AG in Stuttgart unter Betreuung des Fachgebietes für Maschinenelemente und Maschinenakustik der Technischen Universität Darmstadt.

Herrn Professor Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. F.G. Kollmann, dem Leiter des Fachgebietes, danke ich herzlich für die auch über die Entfernung gute Betreuung und wissenschaftliche Diskussion während der Durchführung der Arbeit. Herrn Professor Dr.-Ing. R. Nordmann danke ich für die Übernahme des Korreferates.

Mein Dank gilt weiterhin allen Kollegen der Abteilung Versuch Dieselmotoren der Motoren-Vorentwicklung der DaimlerChrysler AG unter Leitung von Herrn Dr. Duvinage für die stets gute Zusammenarbeit, Diskussionen und Hilfen, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Besonderer Dank gilt den Mitarbeitern des Teams Akustik unter Leitung von Herrn Krechberger für die immer kollegiale Zusammenarbeit und fachliche Diskussion bei der Durchführung der Arbeiten sowie der Unterstützung durch ihre langjährige Erfahrung auf dem Gebiet der Motorenakustik. Weiterhin gilt Dank Herrn Dr. Welte, der mich während der gesamten Durchführung der Arbeit durch seine fachliche und auch kritische Diskussion unterstützt hat.

Den Mitarbeitern der Abteilung Integration Antrieb unter Leitung von Herrn Pütz, sowie den Abteilungen der Serienentwicklung Verbrennung und Akustik danke ich für die Unterstützung bei der Durchführung der Meßreihen auf den Prüfständen und der freundlichen Unterstützung durch deren Mitarbeiter.

Auch möchte ich mich bei den studentischen Mitarbeitern bedanken, die mich im Rahmen ihrer Diplomarbeiten bei der Durchführung der notwendigen Arbeiten unterstützt haben.

Schließlich bedanke ich mich bei meinen Eltern, die mir das Studium ermöglichten, sowie bei meinen Freunden, die mit ihrer Unterstützung zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Frankenberg, im November 2000

Karsten Finger

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen	III
1 Einführung.....	1
2 Motorakustik und Möglichkeiten der Lärminderung	5
2.1 Geräuschenstehung bei Verbrennungsmotoren	5
2.2 Der Zylinderdruckverlauf als Kraftanregung.....	7
2.3 Das Körperschallübertragungsverhalten.....	10
2.4 Signal- und Systemanalyse	12
2.5 Untersuchungsmethodik	14
3 Untersuchungsverfahren und Analysemethoden der Motorakustik	15
3.1 Meßverfahren im Motorbetrieb.....	15
3.2 Verfahren zur Strukturidentifikation.....	16
3.3 Analyseverfahren des Zylinderdruckverlaufs	18
3.4 Signalanalyse – Definitionen und Anwendung.....	23
3.5 Abschätzverfahren und Anwendbarkeit.....	28
3.6 Experimentelle Schallintensitätsuntersuchung	31
3.7 Psychoakustik im Motorenbau.....	32
4 Versuchsträger und Meßaufbau.....	34
4.1 Versuchsträger	34
4.2 Prüfstands Aufbau.....	35
4.3 Meßtechnik und Durchführung.....	35
5 Untersuchungen zur Optimierung des Zylinderdruckverlaufs	39
5.1 Common-Rail Einspritzsystem	40
5.2 Optimierung durch systematische Parametervariation	42
5.3 Analyse von Zylinderdruckverläufen bei Variation der Einspritzung	48
5.3.1 Druckverläufe und Druckspektren	48
5.3.2 Beeinflussung der Druckspektren durch Variation der Einspritzung.....	51
5.3.3 Abstimmung der Abgasemissionen und Auswirkung auf Zylinderdruckspektren	55
5.4 Analyse von Zylinderdruckverläufen - theoretische Betrachtung	61
5.4.1 Analyse durch Abschätzverfahren	61
5.4.2 Analyse durch Interpolation von Zylinderdruckverläufen.....	63
5.4.3 Untersuchungen zur Parametersensitivität.....	68

6	Auswirkungen auf Körperschall und Luftschall bei Modifikation der Struktur	74
6.1	Strukturmodifikation.....	74
6.2	Einfluß der Strukturmodifikation auf Körper- und Luftschall.....	75
6.2.1	Einfluß der Strukturmodifikation auf den Körperschall	76
6.2.2	Einfluß der Strukturmodifikation auf den Luftschall.....	80
6.2.3	Einfluß der Strukturmodifikation auf das Abstrahlverhalten.....	85
6.3	Einfluß der Verbrennung auf Körper- und Luftschall	86
7	Untersuchung des Körperschallübertragungsverhaltens.....	88
7.1	Ermittlung von Übertragungsfunktionen zur Charakterisierung der Struktur	89
7.2	Bewertung der Körperschallübertragung	90
7.3	Bewertung einer Strukturmodifikation mittels Übertragungsfunktionen	95
8	Berechnung des Körperschallanteils der Kraftanregung durch die Verbrennung.	98
9	Zusammenfassung	102
10	Literaturverzeichnis	104

Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

c_L	Schallgeschwindigkeit der Luft
f	Frequenz
$F_i(f, \underline{x}_i)$	Einzelkräfte
$G_{XX}(f), G_{YY}(f)$	einseitiges Autoleistungsspektrum
$G_{XY}(f)$	Kreuzleistungsspektrum
$h(t)$	Sprungantwort (Gewichtsfunktion)
$H(t)$	Übertragungsfunktion
$H_{vi}(f, \underline{x}, \underline{x}_i)$	Schnelleadmittanzfunktion
i	Zylinderzahl (-nummer)
$\underline{j}(t)$	momentaner Schallintensitätsvektor
k	Korrelationskoeffizient
L_{pZyl}	Anregungsspektrum Zylinderdruck
$L_{\ddot{u}}$	Struktur-Übertragungsmaß
L_{VG}	direktes Verbrennungsgeräusch
M_d	Motormoment
n	Motordrehzahl
$n(t)$	Nutzsignal
$N(f)$	Fouriertransformierte des Nutzsignals
$p(t)$	Schalldruck
p_i	Zylinderdruckverlauf
p_{mi}	indizierter Mitteldruck
p_{me}	effektiver Mitteldruck
$P(f)$	Schalleistung
$r(t)$	Störsignal
$R(f)$	Fouriertransformierte des Störsignals
S	abstrahlfähige Oberfläche der Struktur
$S_{XX}(f), S_{YY}(f)$	Autoleistungsspektrum von Eingangs- bzw. Ausgangssignal

t	Zeit
$\underline{u}(t, \underline{x})$	Geschwindigkeitsvektor der Luft
$v(f, \underline{x})$	Schnelle
V_H	Hubvolumen
\underline{x}	Ortsvektor
\underline{x}_i	Ortsvektor einer Einzelkraft
$x(t)$	Eingangssignal
$X(f)$	Fouriertransformierte des Eingangssignals
$y(t)$	Ausgangssignal
$Y(f)$	Fouriertransformierte des Ausgangssignals
\mathfrak{S}	Fouriertransformation
\mathfrak{S}^{-1}	inverse Fouriertransformation
\mathbf{a}	Kurbelwinkel
$\mathbf{g}^2(f)$	Kohärenz
$\mathbf{s}(f)$	Abstrahlgrad
\mathbf{r}_0	Ruhedichte der Luft

Nicht aufgeführte Formelzeichen treten im Text nur einmalig auf und sind an der entsprechenden Stelle definiert.

Sonstige Symbole

Im	Imaginärteil
Re	Realteil
*	konjugiert komplex
~	Effektivwert

Abkürzungen

AGR	Abgasrückführung
ASP	Arbeitsspiel
DFT	Diskrete Fourier Transformation
EKAS	Einlaßkanalabschaltung
FEM	Finite-Element-Methode
FFT	Fast Fourier Transformation
HE	Haupteinspritzung
KW	Kurbelwinkel
KW v. OT	Kurbelwinkel angegeben relativ vor oberem Totpunkt
KW n. OT	Kurbelwinkel angegeben relativ nach oberem Totpunkt
SZ	Schwärzungszahl nach Bosch
VE	Voreinspritzung
ZOT	Kolbenstellung im oberen Totpunkt des Zündtaktes

Referenzwerte der Pegelbestimmung

Schalldruckpegel	$p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$
Zylinderdruckpegel	$p_{z0} = 2 \cdot 10^{-10} \text{ bar}$
Schnellepegel	$v_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$
Beschleunigungspegel	$a_0 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ g}$
Schallintensitätspegel	$I_0 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ W/m}^2$