

8 Berechnung des Körperschallanteils der Kraftanregung durch die Verbrennung

Neben der Beurteilung und Charakterisierung von Übertragungseigenschaften von Strukturen können die ermittelten Übertragungsfunktionen auch für eine Berechnung des durch den Verbrennungsprozeß hervorgerufenen Körperschallanteils verwendet werden. Diese Möglichkeit der Vorhersage des Körperschalls kann dann für die Beurteilung von Verbrennungsvarianten dienen. Des weiteren kann bei der Entwicklung neuer Brennverfahren der Einfluß der Verbrennung auf den zu erwartenden Körperschall an vorhandenen Motorstrukturen bewertet werden, ohne daß das Brennverfahren an einem Vollmotor angewendet wird. Eine Simulation des Körperschalls bei nur aus der Simulation einer Verbrennung berechneten Druckverläufen ist ebenfalls möglich. Eine grafische Darstellung der Methodik wird in Abb. 8.1 gezeigt.

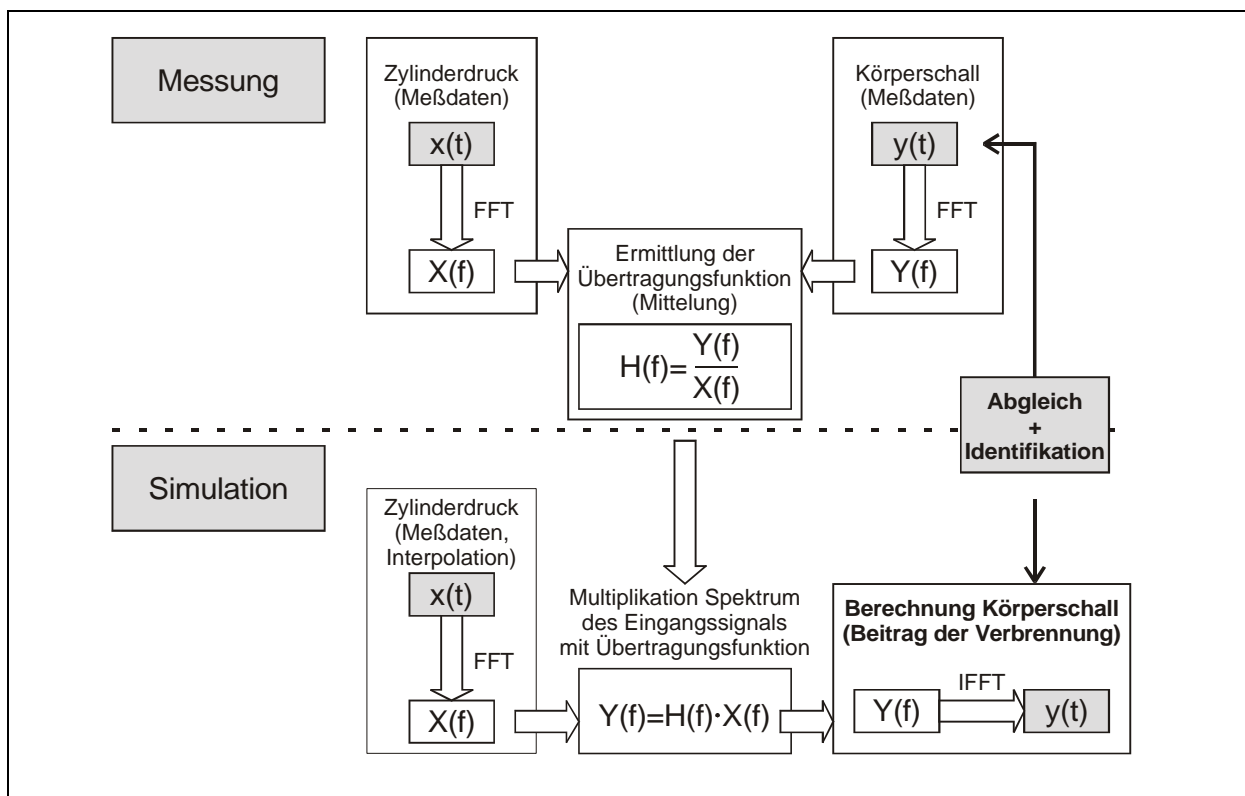


Abb. 8.1: Systembetrachtung zur Berechnung des Körperschallanteils

Für die Simulation des Körperschalls müssen zunächst die Übertragungseigenschaften eines bestehenden Motors im Betrieb ermittelt werden. Dabei sollte die Ermittlung eine Vielzahl von Meßpunkten und Betriebspunkten beinhalten, damit eine hohe Güte der Übertragungsfunktionen erzielt werden kann. Für die Simulation des durch die Verbrennung hervorgerufenen Körperschalls muß nun ein Zylinderdrucksignal aus einer Messung bzw. Simulationsrechnung aufbereitet und mit

der Übertragungsfunktion im Frequenzbereich multipliziert werden. Man erhält dann das Körperschallsignal im Frequenzbereich, welches durch eine inverse Fouriertransformation wieder in den Zeitbereich transformiert werden muß. Durch die Multiplikation des Eingangssignals mit einer aus vielen Betriebspunkten ermittelten Übertragungsfunktion kann sichergestellt werden, daß in der Übertragungsfunktion evtl. vorhandene Störsignale oder Signale anderer Anregungsmechanismen (Körperschallanteil anderer Anregungsmechanismen) durch die Mittelung eine untergeordnete Rolle spielen. Die Anwendung der Körperschallsimulation ist jedoch nur sinnvoll, wenn der zu betrachtende Meßpunkt einen hohen durch den Verbrennungsprozeß hervorgerufenen Körperschallanteil besitzt (gute Kohärenz).

Es werden zwei Anwendungsfälle der Körperschallsimulation vorgestellt. Dabei wird zunächst die Berechnungsqualität überprüft, bevor ein Beispiel für die Trennung von durch die Verbrennung hervorgerufenen Körperschallanteilen und Anteilen anderer Anregungsmechanismen vorgestellt wird.

Abgleich von Messung und Körperschallberechnung

Für die Beurteilung der Qualität der Berechnungsmethodik wird das gemessene Körperschallsignal von zwei Meßstellen mit der Simulationsrechnung verglichen. Bei den betrachteten Meßstellen (A, C) handelt es sich um zwei Punkte am Zylinderkopf (vgl. Abb. 7.4). Die für die Berechnung verwendeten Übertragungsfunktionen werden aus verschiedenen Betriebspunkten (Drehzahl, Last) sowie mit Hilfe einer Variation der Verbrennungsparameter ermittelt. Für die Simulation des durch die Verbrennung hervorgerufenen Körperschallanteils wird die Berechnung bei einer Drehzahl von 1200 1/min und einem Drehmoment von 30 Nm durchgeführt. Das Ergebnis der Berechnung ist in Abb. 8.2 dargestellt. Zum Vergleich wird das bei diesem Betriebspunkt gemessene Körperschallsignal ebenfalls dargestellt. Die Überprüfung der Reproduzierbarkeit erfolgt durch die Berechnung und Messung mehrerer Arbeitsspiele. Der Vergleich zwischen Berechnung und Simulation zeigt im angegebenen Beispiel eine hohe Übereinstimmung der Signalverläufe der beiden betrachteten Meßstellen. Damit kann die prinzipielle Anwendbarkeit der Methodik nachgewiesen werden. Eine Berechnung des Körperschalls auf Basis experimentell im Betrieb ermittelter Übertragungsfunktionen ist damit möglich und kann zur Vorhersage angewendet werden. Zur Erzielung einer hohen Güte der Vorhersage muß jedoch bei der Ermittlung der Übertragungsfunktion auf eine gute Kohärenz und eine geringe Streubreite der einzelnen Übertragungsfunktionen geachtet werden.

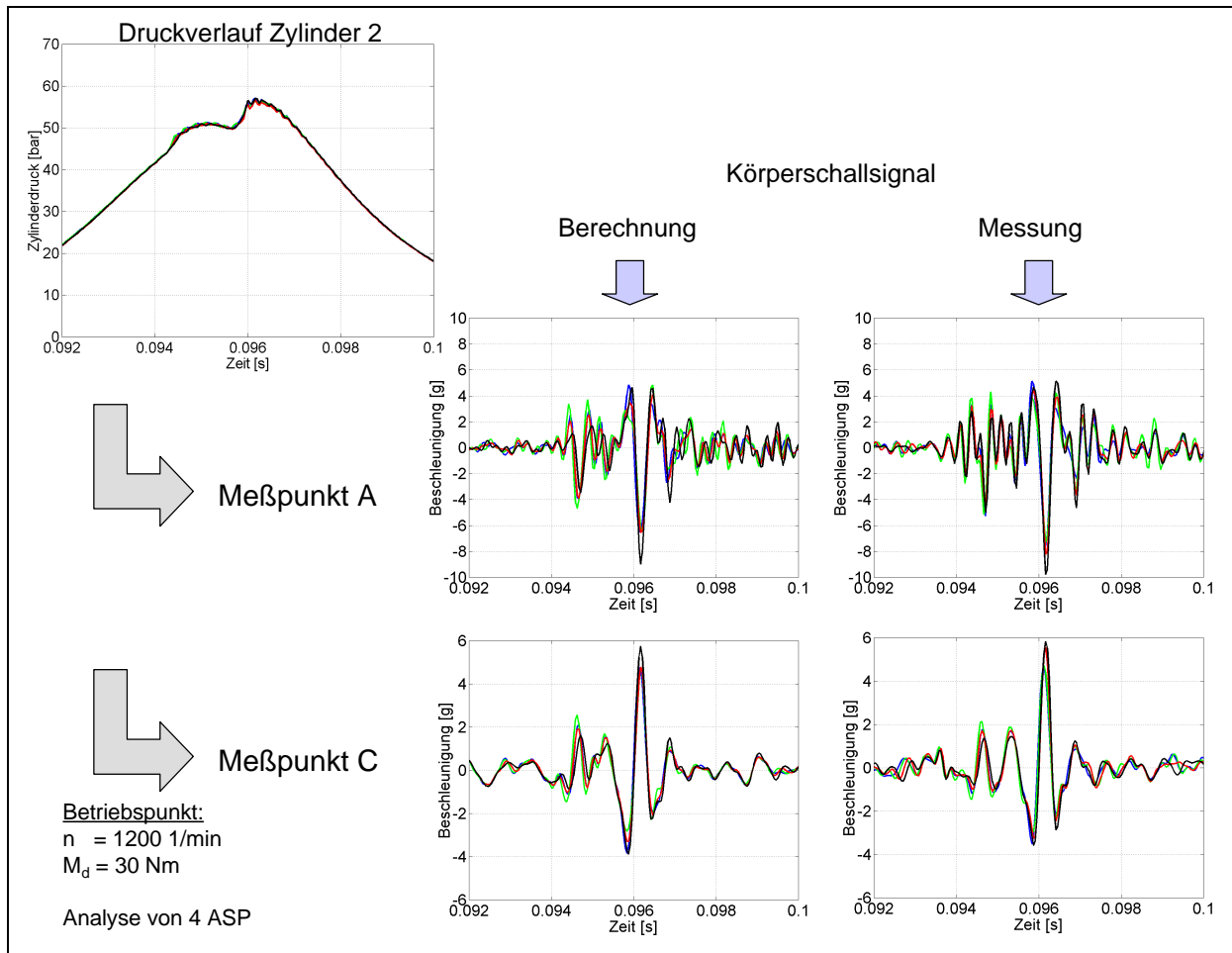


Abb. 8.2: Simulation des durch die Verbrennung hervorgerufenen Anteils des Körperschalls

Identifikation des durch die Verbrennung hervorgerufenen Körperschallanteils

Im Motorbetrieb besteht die Kraftanregung der Motorstruktur nicht allein aus der Anregung durch den Verbrennungsprozeß. Infolge der hohen Belastungen und der gesamten Triebwerksdynamik können eine Vielzahl von weiteren Quellen zu einer Anregung der Motorstruktur führen. Eine Trennung der verschiedenen Quellen ist durch eine reine Signalanalyse nicht möglich. Mit Hilfe einer Kombination von Meßdaten und dem durch die Bestimmung der Übertragungsfunktionen ermittelten Systemverhalten kann eine Trennung der verschiedenen Anteile gelingen. Nachfolgend wird ein Beispiel für die Identifikation weiterer Quellen und einer Trennung der Signalanteile aufgezeigt.

Anhand des zuvor betrachteten Meßpunktes C wird in einem Betriebspunkt ($n=800 \text{ 1/min}$; $M_d=100 \text{ Nm}$) der berechnete Körperschallanteil der Verbrennungsanregung mit dem gemessenen Verlauf verglichen (Abb. 8.3). Bei der Betrachtung des berechneten Körperschallsignals (rechts) ist festzustellen, daß zur Zeit der Zündung der Voreinspritzmenge (I) und der Haupteinspritzmenge (II) jeweils eine hohe Beschleunigung im Körperschallsignal zu beobachten ist. Im gemessenen Signalverlauf (links) kann der zeitliche Verlauf dieser beiden Beschleunigungsspitzen ebenfalls identifiziert werden. Neben dieser offensichtlich durch die Verbrennung hervorgerufenen

Körperschallanregung sind jedoch noch zwei weitere Spitzen im Signalverlauf zu erkennen, die zeitlich nicht der Verbrennungsanregung zugeordnet werden können und somit von einem anderen Anregungsmechanismus hervorgerufen worden sein müssen.

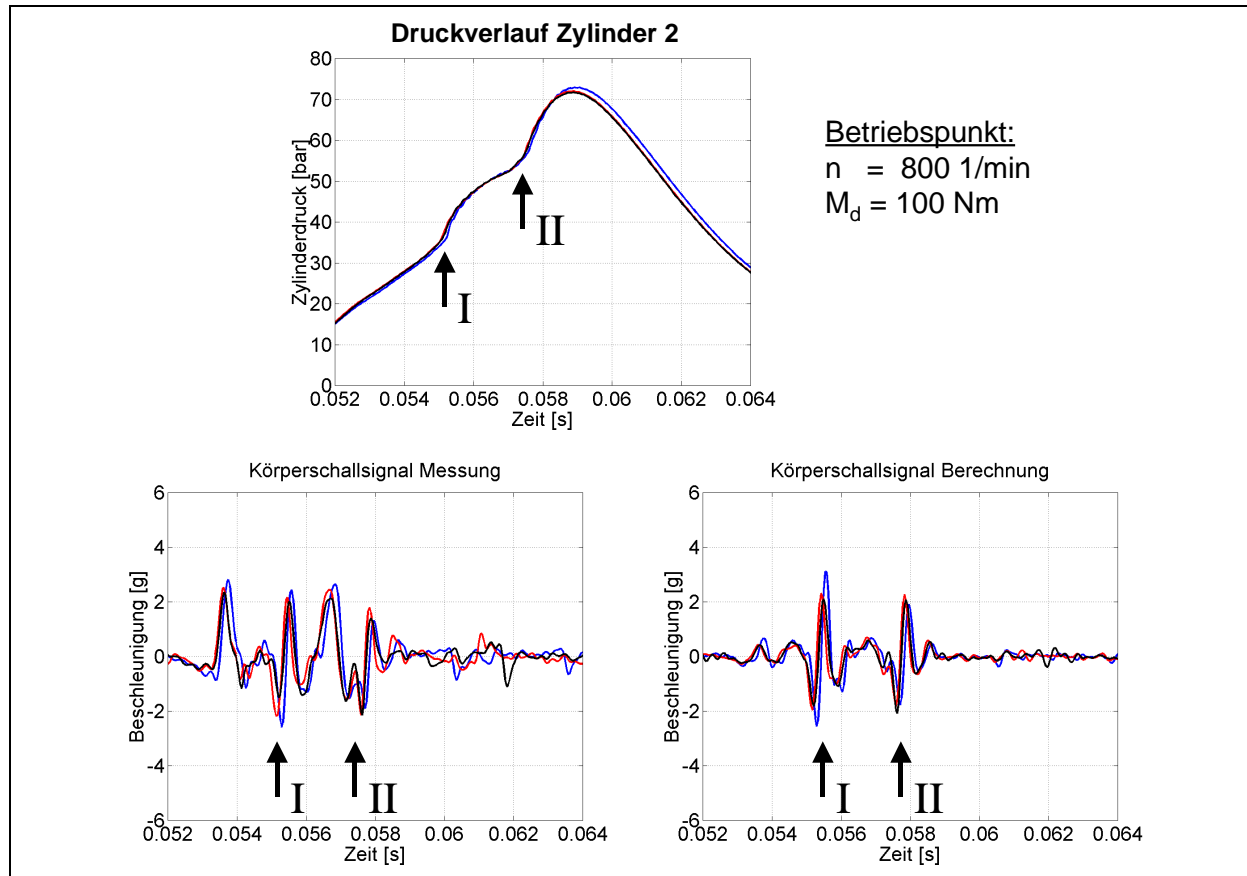


Abb. 8.3: Identifikation des Körperschallanteils verschiedener Anregungsquellen

Die in diesem Beispiel deutliche Identifikation ist nicht in allen Fällen so eindeutig möglich, da z.B. ein Meßpunkt mit geringer Steifigkeit eine lange Nachschwingzeit hat und eine zeitliche Trennung von Einzelereignissen unter Umständen nicht möglich ist. In diesem Fall kann durch eine Beschränkung der Simulation auf einen zu betrachtenden Frequenzbereich Abhilfe geschaffen werden. Für die Identifikation von Körperschallsignalen ist es zudem sinnvoll, die ermittelte Übertragungsfunktion im zu untersuchenden Betriebspunkt zu berücksichtigen. Anhand der Betrachtung des Verlaufs der Kohärenz können vor der eigentlichen Simulation bereits Frequenzbereiche identifiziert werden, in denen Signalanteile vermutet werden, die nicht durch die Verbrennung hervorgerufen werden. Auf diese Weise ist es möglich, Körperschallanteile weiteren Anregungsquellen zuzuordnen und Maßnahmen zu deren Reduktion zu erarbeiten.

9 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit der Untersuchung der Kraftanregung durch den Verbrennungsprozeß bei Common-Rail Dieselmotoren unter Berücksichtigung des Körperschallübertragungsverhaltens. Zielsetzung der Arbeit ist dabei die Untersuchung, wie der durch die Verbrennung hervorgerufene Zylinderdruckverlauf unter dem Gesichtspunkt einer Geräuschreduktion betrachtet werden muß und welches Potential zur primären Geräuschreduktion damit erschlossen werden kann. Weiterhin werden die Auswirkungen einer Strukturmodifikation im Hinblick auf eine Reduktion des Körper- und Luftschalls sowie eine Methodik zur Charakterisierung der Struktureigenschaften mit Hilfe von experimentell ermittelten Übertragungsfunktionen vorgestellt.

Bei der Betrachtung der Möglichkeiten zur Geräuschreduktion durch eine Optimierung des Verbrennungsprozesses wird untersucht, wie durch eine Variation der Einspritzparameter die Pegel des Zylinderdruckspektrums und des daraus resultierenden Luftschalls beeinflusst werden können. Es zeigt sich, daß sich durch die Kombination verschiedener Parameteränderungen der Summenpegel sowie die spektrale Zusammensetzung beeinflussen läßt und sich so Potential zur Geräuschreduktion erschließen läßt. Allgemeingültige Regeln zum Einfluß einzelner Parameter der Einspritzung auf die Geräuschemission ohne Nachteile bei den Abgasemissionen zu bekommen, lassen sich nicht ohne weiteres ableiten. Durch die parallele Analyse der Zylinderdruckspektren und Abgasemissionen kann eine Reduktion der Verbrennungsanregung erzielt werden, ohne daß dies zu einer Verschlechterung der Abgasemissionen führt. Es kann weiterhin aufgezeigt werden, daß der Verlauf und die Höhe des Zylinderdruckspektrums weitgehend durch die Höhe und Lage der durch Vor- und Hauptverbrennung hervorgerufenen Druckgradienten bestimmt wird.

Zur systematischen Optimierung der Anregung und zur weiteren Identifikation des Anregungsspektrums wird ein Verfahren entwickelt, das es ermöglicht, den Zylinderdruckverlauf auf Basis von Meßdaten zu interpolieren. Dabei kann eine hohe Übereinstimmung der Druckspektren der Interpolation des Druckverlaufs mit gemessenen Verläufen erzielt werden. Auf Basis dieser Interpolation werden Parametervariationen durchgeführt, mit denen sich die Auswirkungen von Änderungen des Druckverlaufs auf die Pegel des Anregungsspektrums detailliert analysieren lassen. Mit Hilfe dieses Verfahrens kann eine systematische Auslegung des Zylinderdruckverlaufes mit dem Ziel einer Reduktion des Anregungsspektrums durchgeführt werden.

Zur Abschätzung des Potentials einer Strukturmodifikation mit dem Ziel der Reduktion von Körper- und Luftschall werden zwei Zylinderkopfvarianten mit unterschiedlichem Konstruktionskonzept untersucht. Dabei kann auf Basis von Körperschalluntersuchungen aufgezeigt werden, daß durch eine Versteifung der Zylinderkopfstruktur und der Integration der Nockenwellenlagerung in die Struktur

eine Reduktion des Körperschalls von bis zu 10 dB(A) zu erzielen ist. Das im Körperschall aufgezeigte Potential im Frequenzbereich von 1 kHz bis 4,5 kHz wird durch Luftschallmessungen am Vollmotor bestätigt. Im Teillastbereich läßt sich eine Reduktion des Luftschallpegels von bis zu 4 dB(A) nachweisen. Eine Untersuchung der Abstrahlcharakteristik der beiden verglichenen Zylinderköpfe zeigt, daß die höheren Luftschallpegel der Variante mit konventioneller Zylinderkopfhabe im angegebenen Frequenzbereich auf Eigenformen der Struktur mit lokal hoher Abstrahlung zurückzuführen sind.

Zur Beurteilung von Körperschallsignalen wird gezeigt, daß die Ermittlung des Übertragungsverhaltens der Struktur im Motorbetrieb möglich ist und damit eine Charakterisierung des Übertragungsverhaltens von Teilstrukturen des Motors durchgeführt werden kann. Bei der Ermittlung der Übertragungsfunktionen werden die Eingangs- und Ausgangssignale mit einem Zeitfenster bewertet. Dies ermöglicht die Bewertung der Auswirkungen des Verbrennungsprozesses einzelner Zylinder im Körperschall der Motorstruktur. Es können Frequenzbereiche identifiziert werden, in denen das Körperschallsignal auf der Motoroberfläche vom Zylinderdruck hervorgerufen wird. Mit Hilfe der ermittelten Übertragungsfunktionen kann die Empfindlichkeit von Motorstrukturen bei Anregung durch die Verbrennung bewertet werden. Eine Bewertung einzelner Teilstrukturen des Motors bzw. ein Vergleich verschiedener Konstruktionskonzepte ist möglich.

Unter Verwendung der im Betrieb ermittelten Übertragungsfunktionen kann der Körperschallanteil, der durch die Verbrennung hervorgerufen wird, bestimmt werden. Das durch die Berechnung ermittelte Körperschallsignal zeigt eine gute Übereinstimmung mit dem gemessenen Körperschall. Mit Hilfe dieser Berechnungsmethodik können Körperschallsignale identifiziert werden, die unmittelbar durch den Verbrennungsprozeß hervorgerufen werden. Durch einen Vergleich zwischen Berechnung und Messung ist es möglich Körperschallanteile zu identifizieren, die durch bei der Ermittlung der Übertragungsfunktionen nicht erfaßte Anregungsmechanismen hervorgerufen werden. Bei der Anwendung dieses Verfahrens ist die Güte der ermittelten Übertragungsfunktionen von großer Bedeutung. Bei ausreichender Genauigkeit der Übertragungsfunktionen kann bei der Entwicklung neuer Brennverfahren der zu erwartende Körperschall auf Basis vorhandenen Übertragungsfunktionen bereits bestehender Motoren abgeschätzt werden.

10 Literaturverzeichnis

- [1] Affenzeller, J.; Thien, Gerhard E.: Evaluating Engine Design for Low Noise Using Dynamic Structural Modeling, SAE 820435, 1982
- [2] Alpini, A.; Busso, M.; Ruspa, G.; Turino, G.: Analysis Techniques of Combustion Noise and Vibrations in Diesel Engines, SAE 800406, 1980
- [3] Anderton, D.; Chan, C.M.P.; Andrews, S.: The Effect of Structure Design on High Speed automotive Diesel Engine Noise, SAE 790444, 1979
- [4] Aoyama, F.; Tanaka, S.; Miura, Y.: Vibration Mode Analysis for Controlling Noise Emission from Automotive Diesel Engine, SAE 790361, 1979
- [5] Arcoumanis, C.; Bae, C.; Nagwaney, A.; Whitelaw, J. H.: Effect of EGR on Combustion Development in a 1.9L DI Diesel Optical Engine, SAE 950850, 1995
- [6] Aures, W.: Berechnungsverfahren für den Wohlklang beliebiger Schallsignale - Ein Beitrag zur gehörbezogenen Schallanalyse, Dissertation TU München, 1984
- [7] Bendat, J.S.; Piersol, A.G.: Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis (Second Edition), Wiley-Interscience, 1986
- [8] Bendat, J.S.; Piersol, A.G.: Random Data, Analysis and Measurement Procedures (Second Edition), Wiley-Interscience, 1986
- [9] Brigham, E.O.: FFT - schnelle Fourier-Transformation, Oldenbourg, 1985
- [10] Challen, B.J.: The Effect of Combustion System on Engine Noise, SAE 750798; 1975
- [11] Challen, B.J.; Croker, M.D.: A review of recent progress in diesel engine noise reduction, SAE 820517; 1982
- [12] Chemla, F.; Werlberger, P.: Eine Methode zur zeitaufgelösten Erfassung der NO_x- und Russbildung im Zylinder eines direkteinspritzenden Dieselmotors, 4. Symposium TU-Graz - Der Arbeitsprozeß des Verbrennungsmotors, 1993
- [13] Chung, J. Y.; Pope, J.; Feldmaier, D. A.: Application of Acoustic Intensity Measurement to Engine Noise Evaluation, SAE 790502, 1979
- [14] Cordier, O.; Reyl, G.: The Noise Problem of Air Cooled Diesel Engines - Measures towards Ist Reduction with General Observations and Specific Results, SAE 680405, 1968
- [15] Crocker, M. J.; Zockel, M.; McGary, M.; Reinhart, T.: Noise Source Identification Under Steady and Accelerating Conditions on a Turbocharged Diesel Engine, SAE 800275, 1980

- [16] Eichseder, H.; Rechberger, E.; Staub, P.: Der Einfluß des Einspritzsystems auf den Verbrennungsablauf bei DI-Dieselmotoren für PKW, 5. Symposium TU-Graz - Der Arbeitsprozeß des Verbrennungsmotors; 1995
- [17] Essers, U.; Gutzmer, P.; Philipp, U.: Körperschallanregung in den Kurbelwellengrundlagern eines Verbrennungsmotors I, FVV-Bericht 369, Vorhaben 291, Abschlußbericht, 1985
- [18] Flotho, A.: Mechanisches Geräusch des Ventiltriebs von Fahrzeugmotoren, Dissertation RWTH Aachen, 1981
- [19] Flotho, A.; Spessert, B.: Development Methods for Low Noise Diesel Engines, SAE 872249, 1987
- [20] Flotho, A.; Spessert, B.: Geräuschminderung an direkteinspritzenden Dieselmotoren Teil 1, Automobil-Industrie Nr. 3, 1988
- [21] Flotho, A.; Spessert, B.: Geräuschminderung an direkteinspritzenden Dieselmotoren Teil 2, Automobil-Industrie Nr. 5, 1988
- [22] Föllner, D., Müller, H. W.: Geräuscharme Maschinenteile, Forschungskuratorium Maschinenbau e.V., Heft Nr. 26, 1974
- [23] Föllner, D.: Untersuchung der Anregung von Körperschall in Maschinen und der Möglichkeiten für eine primäre Lärmbekämpfung, Dissertation TH Darmstadt, 1972
- [24] Fukutani, I.; Watanabe, E.: Reduction of Idle Knock by EGR in a Passenger Car Diesel Engine, SAE 840421; 1984
- [25] Genuit, K.: Von der Geräuschreduzierung zur Gestaltung von Maschinenakustik, VDI Berichte Nr. 1491, 1999
- [26] Genuit, K.; Gierlich, H.: Investigation of the Correlation between Objective Noise Measurement and Subjective Classification, SAE 891154, 1989
- [27] Haake, B.; Hanses, G.; Rebbert, M.: Verbrennungsgeräusch, FVV Heft Nr. 670, 1998
- [28] Hauser, G.: Schmalbandige Frequenzanalyse einmaliger und impulshaltiger Schwingungsvorgänge am Beispiel von Dieselmotorengeräuschen, Dissertation TU Hannover, 1975
- [29] Havenith, C.; Höcker, M.; Haller, H.; Spessert, B.: Development of an Air-Cooled Low Noise Heavy-Duty Diesel Engine, SAE 892496, 1989
- [30] Heiduk, T.; Wagner, T.; Ecker, H. J.: Der Vierventil-DI-Zylinderkopf - Eine Herausforderung für die Strukturauslegung, MTZ Jahresband, 1998
- [31] Herrmann, R.: Entstehung und Zusammensetzung des Motorgeräusches, Automobil-Industrie 32 Nr. 3, 1987
- [32] Kalser, H.-J.; Deges, R.; Schwarz, D.; Meyer, J.: Investigations on Valve Train Noise in Multi-Valve Engines, SAE 911062, 1991

- [33] Kanda, H.; Okubo, M.; Yonezawa, T.: Analysis of Noise Sources and their Transfer Paths in Diesel Engines, SAE 900014; 1990
- [34] Kollmann, F. G.: Maschinenakustik, Springer, 1993
- [35] Königs, M.: Voreinspritzung bei schnelllaufenden direkteinspritzenden PKW-Dieselmotoren mit überwiegend luftverteiler Gemischbildung, Dissertation RWTH Aachen, 1988
- [36] Krieger, K.: Diesel-Einspritztechnik für PKW-Motoren - Überblick über Verfahren und Ergebnisse, MTZ 60/5, 1999
- [37] Leipold, F.W.: Das Verbrennungsgeräusch des Dieselmotors bei stationärem und instationärem Betrieb, VDI-Fortschrittsberichte Nr.6/178, 1983
- [38] Leipold, F.W.; Hardenberg, H.O.: Noise, Emissions and Performance of the Diesel Engine - a Comparison between DI and IDI Combustion Systems, SAE 750796, 1975
- [39] Mahr, B.: Lastabhängigkeit des Dieselgeräusches I; FVV , Vorhaben Nr.408; 1990
- [40] Mahr, B.: Zur Abhängigkeit des Verbrennungsgeräusches direkteinspritzender Dieselmotoren vom effektiven Mitteldruck, Dissertation Universität Stuttgart, 1991
- [41] Mollenhauer, K.: Handbuch Dieselmotoren, Springer, 1997
- [42] Peters, A.; Pütz, W.: Der neue Vierzylinder-Dieselmotor OM611 mit Common-Rail-Einspritzung - Verbrennung und Motormanagement, MTZ 58, Nr.12, 1997
- [43] Pflaum, W.; Hempel, W.: Geräuschverteilung bei Dieselmotoren ohne Aufladung, MTZ 27, 1966
- [44] Pischinger, F.; Schmillen, Karl; Leipold, F.W.: New Measuring Method for Direct Determination of Diesel Engine Combustion Noise, SAE 790267, 1979
- [45] Priede, T.: In Search of Engine Noise - AN Historical Review, SAE 800534, 1980
- [46] Priede, T.: Problems and Developments in Automotive Engine Noise Research, Diesel Engine Noise Conference, 1979
- [47] Priede, T.; Baker, J.M.; Grover, E.C.; Ghazy, R.: Characteristics of Exciting Forces and Structural Response of Turbocharged Diesel Engines, SAE 850972, 1985
- [48] Querengässer, J.; Meyer, J.; Wolschendorf, J.; Nehl, J.: NVH Optimaziation of an In-Line 4-Cylinder Powertrain, SAE 951294, 1995
- [49] Rimmels, W.; Velji, A.; Schmidt, R-M.; Rauscher, M.: An experimental and theoretical study of exhaust gas recirculation in diesel engines, CIMAC, 1995
- [50] Röpke, P.; u. a.: Geräuschoptimierte Auslegung von Zylinderköpfen, MTZ 55, 1994
- [51] Russel, M. F.: Diesel Engine Noise: Control at Source, SAE 820238, 1982
- [52] Russel, M.F.; Harworth, R.: Combustion Noise from High Speed Direct Injection Diesel Engines, SAE 850973, 1985

- [53] Rust, A.; Thien, G. E.: Effect of Transient Conditions on Combustion Noise of NA-DI Diesel Engines, SAE 870989, 1987
- [54] Schiffbänker, H.: Psycho-Akustik – Methoden zur Erfassung des subjektiven Geräuscheindrucks, Tagung Motor und Umwelt, Graz, 1990
- [55] Schlünder, W.: Untersuchung des direkten Verbrennungsgeräusches an einem Einzylinder-Dieselmotor, Dissertation RWTH Aachen, 1986
- [56] Schmillen, K.; Flotho, A.; Schlünder, W.: Determination of the Sound transmission Rate of Diesel Engines by Means of Cyclic Fluctuations, SAE 831331; 1983
- [57] Schmillen, K.: Geräuschanalyse und Rechentechniken im Motorenbau II, Vorlesungsumdruck RWTH Aachen, 1994
- [58] Schmillen, K.: Geräuschverhalten von Verbrennungsmotoren, Seminarvortrag Wolfsburg, 1984
- [59] Schneider, M.H.: Resonanzschwingungen der Zylinderladung von Dieselmotoren und ihre Bedeutung für das Verbrennungsgeräusch, Dissertation RWTH Aachen, 1987
- [60] Schösser, T. F.: Untersuchungen des Körperschall- und Abstrahlverhaltens von Getrieben mit der Zielsetzung einer aktiven Lärminderung, Dissertation TH Darmstadt, 1996
- [61] Schulze, H.: Geräuschreduzierung im Motorenbau: Auswirkungen von Modifikationen an der Motorstruktur und deren meßtechnische Behandlung, 3. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 1991
- [62] Schwaderlapp, M.; u. a.: Eine zukunftsweisende Konstruktionslösung für den direkt-einspritzenden Vierventil-Pkw-Dieselmotor, Wiener Motorensymposium, 1995
- [63] Spessert, B.: Geräuschreduktion von Viertakt Diesel- und Ottomotoren – Rückblick und Stand der Technik (Teil I), MTZ 60, 1999
- [64] Spessert, B.: Geräuschreduktion von Viertakt Diesel- und Ottomotoren – Rückblick und Stand der Technik (Teil II), MTZ 60, 1999
- [65] Spessert, B.: Untersuchung des akustischen Verhaltens von Kurbelgehäusen und Zylinderblöcken unter besonderer Berücksichtigung des inneren Körperschalleitweges, Dissertation RWTH Aachen, 1987
- [66] Spessert, B.; Haller, H.; Thiesen, U.: Auswirkungen verschärfter Abgasemissionsvorschriften auf die Geräuschemission von DI-Dieselmotoren, 3. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 1991
- [67] Steven, H.: Geräuschemissionen von Kraftfahrzeugen im realen Verkehr, VDI Berichte Nr. 499, 1983
- [68] Thien, G. E.: A Review of Basic Design Principles for Low-Noise Diesel Engines, SAE 790506; 1979

- [69] Thien, G. E.: Möglichkeiten zur Senkung des Geräuschpegels von Dieselmotoren, ATZ 74, 1972
- [70] van der Linden, P.J.G.; Raff, J.; Schnur, J.: Determination of machinery component noise contributions by means of surface impact excitation, VDI Berichte Nr. 1491, 1999
- [71] van der Linden, P.J.G.; Schnur, J.; Schomburg, T.: Quantifying the noise emission of engine oilsumps, valve covers, etc. using artificial excitation, IMechE, Conference Paper C521, 1998
- [72] Welte, L.: Einfluß des Systems Kurbelwelle – Kurbelwellenhauptlager - Kurbelgehäuse auf die Geräuschemission eines Ottomotors, Dissertation Universität Stuttgart, 1996
- [73] Wolschendorf, J.: Zyklische Schwankungen im Verbrennungsgeräusch von Dieselmotoren und ihre Ursachen, Dissertation RWTH Aachen, 1990
- [74] Zollner, M.: Gehörrechtliche Analyse von Motorgeräuschen, Druckschrift der Firma CORTEX, Regensburg 1991
- [75] Zwicker, E.; Fastl, H.: Psychoacoustics - Facts and Models, Springer, 1990