

Hybride Akustiksynthese
–
Evaluierung von Fahrzeuggetrieben auf Basis von Prüfstandsmessungen
und Transferpfadanalysen

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von:	Mirko Reising
aus (Geburtsort):	Rostock
eingereicht am:	25.02.2016
mündliche Prüfung am:	11.01.2017
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. F. Küçükay Prof. Dr.-Ing. E. Reithmeier

2017

Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik
TU Braunschweig

Band 51

Mirko Reising

Hybride Akustiksynthese

Evaluierung von Fahrzeuggetrieben auf Basis von
Prüfstandsmessungen und Transferpfadanalysen

Shaker Verlag
Aachen 2017

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.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5095-0

ISSN 1619-6325

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 entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand und Entwicklungsingenieur im Bereich der Komponentenentwicklung bei der Volkswagen Aktiengesellschaft im Werk Kassel in Zusammenarbeit mit dem Institut für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Braunschweig.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay, dem Direktor des Instituts für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Braunschweig und Herrn Dr.-Ing. Georg-Friedrich Lührs, dem Leiter der Abteilung Vorentwicklung und Berechnung im Volkswagen Werk Kassel. Ohne den Themenvorschlag und die ununterbrochene Unterstützung durch Herrn Dr.-Ing. Georg-Friedrich Lührs und die intensive Betreuung durch meinen Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay wäre die vorliegende Arbeit nicht umsetzbar gewesen.

Darüber hinaus möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts für die Übernahme des Vorsitzes bei der Prüfung danken. Herrn Prof. Dr.-Ing. Eduard Reithmeier danke ich für die wahrgenommenen Aufgaben als Zweitgutachter meiner Arbeit.

Seitens der Volkswagen Aktiengesellschaft möchte ich insbesondere Herrn Dipl.-Ing., Dipl.-Wirtsch.-Ing. Sebastian Eulert sowie Herrn Dr.-Ing. Harald Decker für die kompetente Betreuung und die intensiven Denkanstöße danken. Ich danke außerdem Herrn M.Sc. Carsten Schmitt für seine Hilfe bei zahlreichen Versuchen. Weiterhin danke ich allen hier nicht namentlich genannten Volkswagen Mitarbeitern, die in irgendeiner Form an dieser Arbeit mitgewirkt haben. Die produktive und kollegiale Zusammenarbeit hat mir stets Freude bereitet.

Vor allem möchte ich meinen Eltern und meinem Bruder, sowie der Familie meiner Verlobten dafür danken, dass sie mich stets motiviert und in jeder Hinsicht unterstützt haben.

Abschließend danke ich meiner Verlobten Sabine und meinem Sohn Theo für den Rückhalt und die Unterstützung gerade in der letzten und entscheidenden Phase meiner Arbeit.

Gudensberg, Februar, 2017

Mirko Reising

Disclaimer

Veröffentlichungen über den Inhalt der Arbeit sind nur mit schriftlicher Genehmigung der Volkswagen Aktiengesellschaft zugelassen.

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen Aktiengesellschaft.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	III
Abstract	V
Abbildungsverzeichnis.....	VII
Tabellenverzeichnis.....	XII
Formelzeichen, Einheiten und Abkürzungen.....	XIII
1 Einführung.....	1
1.1 Fahrzeug-Geräuschverhalten	1
1.2 Motivation und Ziele.....	2
1.3 Anforderungen	4
2 Theoretischer Hintergrund	6
2.1 Akustische Grundlagen.....	6
2.1.1 Schwingungen.....	6
2.1.2 Schall	14
2.1.3 Schwingungsanalyse	20
2.1.4 Übertragung von Schwingungen	28
2.2 Messtechnik	34
2.2.1 Mittel zur künstlichen Anregung der Fahrzeugstruktur.....	34
2.2.2 Körper- und Luftschallsensorik.....	38
2.3 Getriebeheulen	40
3 Kenntnisstand	41
3.1 Akustische Bewertungsmethoden in der Serienfertigung	41
3.2 Akustische Bewertungsmethoden in der Entwicklung	42
3.3 Transferpfadanalysen	43
3.3.1 Klassische Verfahren	44
3.3.2 Operationelle Verfahren	50
3.3.3 Kombinierte Verfahren	51
3.3.4 Gegenüberstellung der Verfahren.....	53
4 Methodenentwicklung	55
4.1 Potenzial der akustischen Getriebebewertung in der Entwicklung	55
4.2 Verknüpfung von Fahrzeug- und Prüfstandsmessungen.....	55
4.3 Konzept zur virtuellen Integration von Getrieben.....	56
5 Hybride Akustiksynthese – Umsetzung und Anwendung.....	59
5.1 Bestimmung von Übertragungsfunktionen.....	62
5.1.1 Vibroakustische Transferfunktionen.....	73
5.1.2 Lagerübertragungsfunktionen	80
5.2 Abgleich Fahrzeug - Prüfstand	93
5.2.1 Fahrzeugnaher Prüfstands Aufbau.....	93
5.2.2 Analyse der aggregat- und karosserieseitigen Inertanzen	94

5.2.3	Schwingungsverhalten im Betrieb	97
5.2.4	Lagerübertragungsfunktionen im Fahrzeug und am Prüfstand	108
5.3	Syntheseergebnisse	111
6	Konzeptionelle Datenbank für Transferfunktionen	125
6.1	Getriebetypen und Fahrzeugklassen	125
6.2	Relevante Transferpfade	126
6.3	Funktionsweise	127
7	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse, Ausblick.....	130
8	Literatur	133
9	Anhang.....	143
A.1	Versuchsfahrzeuge für Transferpfadanalysen.....	143
A.2	Berücksichtigte Luft- und Körperschallpfade Hinterachsgetriebe	144
A.3	Gang-, Temperatur- und Lastabhängigkeit Motorlager.....	152