

Berechnungsmethodik zur Berücksichtigung poröser und Entdröhnmaterialien bei der Finite- Elemente-Akustikmodellierung

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg-Harburg
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von
T. S. Semerak

aus
Krappitz, Schlesien

2015

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Otto von Estorff
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Sabine Christine Langer

Tag der mündlichen Prüfung: 29. Juni 2015

Schriftenreihe des Instituts für
Modellierung und Berechnung der
Technischen Universität Hamburg-Harburg

Band 16

T. S. Semerak

**Berechnungsmethodik zur Berücksichtigung
poröser und Entdröhnmaterialien bei der
Finite-Elemente-Akustikmodellierung**

Shaker Verlag
Aachen 2015

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-Harburg, Techn. Univ., Diss., 2015

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Otto von Estorff

Technische Universität Hamburg-Harburg
Institut für Modellierung und Berechnung
Denickestraße 17
21073 Hamburg

Telefon: 040/42878-3032
Fax: 040/42878-4353
E-Mail: estorff@tu-harburg.de
Internet: <http://www.mub.tu-harburg.de>

Copyright Shaker Verlag 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3801-9
ISSN 1860-8221

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 bei der Volkswagen Aktiengesellschaft und wurde von dem Institut für Modellierung und Berechnung der Technischen Universität Hamburg-Harburg (TUHH) extern betreut.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Otto von Estorff, dem Leiter des Instituts für Modellierung und Berechnung der TUHH, gilt mein besonderer Dank für die wissenschaftliche Unterstützung meiner Arbeit.

Weiterhin danke ich Frau Prof. Dr.-Ing. Sabine Christine Langer für die aufmerksame Begutachtung der Arbeit, Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Weltin für das Zusatzgutachten und Herrn Prof. Dr. Norbert Hoffmann für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Darüber hinaus möchte ich dem Leiter der NVH-Berechnungsabteilung der Volkswagen Aktiengesellschaft, Herrn Dr.-Ing. Bernd Hagerodt für die Bereitstellung der strukturellen Rahmenbedingungen und die Förderung meines Promotionsvorhabens sowie allen aktuellen und ehemaligen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern dieser Unterabteilung für das kreative und stets gesellige Arbeitsklima ganz herzlich danken.

Mein ausdrücklicher Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Heinz Detlef für die fachliche Unterstützung meiner Arbeit sowie Herrn Dipl.-Ing. Andreas Mohr für seine Hilfe bei den zahlreichen Messungen. Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Lars Bischoff von der Fa. Faurecia Innenraum Systeme GmbH für den praktischen Input und die nützlichen Hinweise bedanken.

Meinem Vorgesetzten in der Unterabteilung Dämmung/Dämpfung, Herrn Dipl.-Ing. Thomas Preller sowie dem gesamten D/D-Team danke ich für das Wohlwollen und die wahre Kollegialität insbesondere in der letzten Phase meiner Dissertation.

Meiner Freundin Monika Krempa danke ich für ihre Geduld.

Mein größter Dank gilt meiner Familie für die ununterbrochene Hilfsbereitschaft über alle Jahre hinweg.

Diese Arbeit widme ich meinen Eltern, Waldemar und Brygida.

Erklärung

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

Kurzfassung

Heutzutage wird das tieffrequente, vibroakustische Verhalten eines sich in der Entwicklungsphase befindenden Fahrzeugs dank der Finite-Elemente-Berechnung wesentlich früher bekannt, als es eine direkte Messung ermöglichen würde. Dennoch besteht in der tieffrequenten Modellierung (meist von 30 bis 200Hz) mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) Verbesserungspotential hinsichtlich der oberen Frequenzgrenze. Einen möglichen Weg, um eine Erweiterung des Frequenzbereichs zu erreichen, stellt die Einbeziehung des akustischen Trims (eines dämmenden und dämpfenden, häufig porösen Materials) in das gekoppelte vibroakustische FE-Modell eines Fahrzeugs dar. Die klassische Methode zur Berücksichtigung des Trims, die poroelastische FE-Modellierung, ist eine rechentechnisch aufwändige, aber genaue Lösung und wird in der vorliegenden Arbeit als Referenz herangezogen. Da im Fahrzeugentwicklungsprozess die für die Aufstellung und die Berechnung eines FE-Modells benötigte Zeit möglichst kurz gehalten werden muss, ist eine Methode gesucht, die die Modellierung der porösen Materialien vereinfacht und trotzdem, hinsichtlich des an den Ohrpositionen der Insassen entstehenden Schalldrucks, zu guten Übereinstimmungen mit der Referenz führt. Neben der Abbildung des porösen Materials steht in der vorliegenden Arbeit auch die Qualität der - für die Modellierung einer Entdröhnung verwendeten elastischen - Materialdaten im Mittelpunkt.

Mit Blick auf die obengenannten Schwerpunkte dieser Arbeit werden zwei neue Vorgehensweisen anhand von Beispielen vorgestellt und validiert sowie anschließend im Fahrzeugmodell umgesetzt. Als Erstes wird eine neue, auf der Power Injection Method (PIM) sowie auf der Transfermatrix-Methode (TMM) basierende Modellierungstechnik zur Berücksichtigung poröser Materialien in gekoppelten, mittels FE abgebildeten, vibroakustischen Systemen vorgestellt, rechentechnisch verifiziert und validiert. Daraufhin folgt eine auf der PIM basierende Optimierung des komplexen E-Moduls eines Entdröhnmaterials. Als Designvariablen gelten hier der Speicher- und der Verlustmodul des entdröhnenden Belags. Die Optimierung wird dabei solange durchgeführt, bis eine bestmögliche Übereinstimmung des berechneten Verlustfaktors mit dem gemessenen, gemittelten Verlustfaktor erreicht ist. Analog muss eine bestmögliche Übereinstimmung der Resonanzlagen der berechneten Übertragungsfunktion mit den Resonanzlagen der gemessenen Übertragungsfunktion erzielt werden.

Abschließend werden die erarbeiteten Methoden hinsichtlich der rechen- und messtechnisch ermittelten Übertragungsfunktionen erfolgreich auf ein getrimmtes Fahrzeugmodell angewendet. Aus den in dieser Arbeit vorgestellten neuen Erkenntnissen geht hervor, dass sowohl die porösen Materialien als auch die strukturdämpfenden Bitumenschichten auf annähernd genaue und - im Vergleich zur poroelastischen Referenzmodellierung - schnelle Weise abgebildet werden können.

Abstrakt

Berechnungsmethodik zur Berücksichtigung poröser und Entdröhnmaterialien bei der Finite-Elemente -Akustikmodellierung

In der vorliegenden Arbeit wird eine neue, auf der Power Injection Methode (PIM) sowie auf der Transfermatrix-Methode (TMM) basierende Modellierungstechnik vorgestellt, rechentechnisch verifiziert und validiert. Die neue Technik berücksichtigt poröse Materialien in gekoppelten, mittels FE modellierten, vibroakustischen Systemen. Darüber hinaus wird eine auf der PIM basierende Optimierung der elastischen Materialdaten eines Entdröhnmaterials vorgeschlagen. Die erarbeiteten Modellierungstechniken konnten bei der vibroakustischen Berechnung eines getrimmten Fahrzeugmodells bis 400Hz erfolgreich eingesetzt werden.

Abstract

Computational Method allowing for Porous and Structural Damping Layers in the Finite Element Acoustic Modeling

A new modeling technique based on the Power Input Method (PIM) and the Transfer Matrix Method (TMM), allowing for porous materials in coupled finite element vibroacoustic systems has been introduced, verified and validated. Moreover, a PIM based optimization of the elastic material parameters of a structural damping layer has been presented. The proposed methodologies have been applied to model a trimmed car body. Good results up to 400Hz could be obtained.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Einführung	1
1.2	Stand der Forschung	3
1.3	Aufbau dieser Arbeit	10
2	Theoretische Grundlagen	15
2.1	Finite-Elemente-Methode	15
2.1.1	Akustisches Fluid	15
2.1.2	Festkörperstrukturen	18
2.2	Dämpfung	22
2.2.1	Viskose Dämpfung	22
2.2.2	Strukturdämpfung	24
2.2.3	Komplexer Elastizitätsmodul	25
2.3	Ermittlung von Dämpfungsparametern	26
3	Lösungsalgorithmen für akustische Trimmodelle	31
3.1	Repräsentation eines Trims	32
3.1.1	Semiphänomenologische und phänomenologische Trimmodelle	32
3.1.2	Nicht-akustische Materialparameter	36
3.1.3	Finite-Elemente-Methode für poröse Materialien	39
3.1.4	Transfermatrix-Methode für poröse Materialien	43
3.1.5	Green'sche Funktionen	46
3.1.6	Andere Methoden für die Trimrepräsentation	47
3.2	Trimberücksichtigung in FE Gesamtmodellen	48
3.2.1	Einbindung eines FE Trims in das FE Gleichungssystem	48
3.2.2	Einbindung eines TMM-Trims in das FE Gleichungssystem	52
4	Alternative Vorgehensweise zur Trimmodellierung	55
4.1	Konzeption	55
4.2	Beschreibung des globalen Gleichungssystems	60

4.2.1	Modifizierte komplexe Steifigkeitsmatrix	60
4.2.2	Admittanzrandbedingung	62
4.3	Berechnung äquivalenter Strukturdämpfung	63
4.3.1	Theoretische Grundlagen der PIM	64
4.3.2	Herleitung eines Dämpfungskennwerts für die Trimsimulation	66
4.3.3	Berechnungsergebnisse des Dämpfungskennwerts für die Trimsimulation	68
4.4	Berechnung einer äquivalenten akustischen Impedanz	73
4.4.1	Einfluss des gewählten Modells auf die Absorption	75
4.4.2	Einfluss unterschiedlicher Abschlüsse (schallhart vs. elastisch) auf die Absorption	77
4.4.3	Einfluss der Materialparameter auf die Absorption	80
5	Verifizierung und Validierung der Trimmodellierungstechnik	83
5.1	Verifizierung unterschiedlicher Trimmodellierungsmethoden	83
5.1.1	Ausgangsmodell und Lastfall	83
5.1.2	Referenzmodell	87
5.1.3	Trimmodelle	88
5.1.4	Modellierungsergebnisse	89
5.1.5	Einfluss der Trimmasse im alternativen Modell	95
5.2	Validierung der alternativen Trimmodellierungstechnik	97
5.2.1	Gesamtmodell und Messprüfstand	97
5.2.2	Mess- und Berechnungsergebnisse	99
5.3	Diskussion	102
6	Modellierung einer Entdröhnung	105
6.1	Typisches Materialverhalten	105
6.2	FE Modell einer belegten Basisstruktur	106
6.3	Materialcharakterisierung und Validierung der Materialparameter	108
6.3.1	Verlustfaktor eines Materialverbunds	108
6.3.2	Elastische Materialparameter und der Verlustmodul	110
6.3.3	Numerische Vorhersage des Verlustfaktors für einen Materialverbund mittels PIM	111
6.4	Validierung des Verbundmodells	119
7	Trimmodellierung im Gesamtfahrzeug	125
7.1	Konzeption	125
7.2	Definition eines Lastfalls	127

7.3	Identifikation der Trimbereiche im Gesamtfahrzeugmodell	128
7.4	Mess- und Modellierungsergebnisse	135
7.5	Vergleich der Modellierungsergebnisse mit der Referenzmodellierung	141
7.6	Integrierbarkeit der Trimmodellierung in den virtuellen Pkw-Entwicklungsprozess	144
8	Zusammenfassung und Ausblick	147
8.1	Zusammenfassung	147
8.2	Ausblick	150
	Literaturverzeichnis	151