



Technische
Universität
Braunschweig



INSTITUT
FÜR AKUSTIK

Design and placement of passive acoustic measures in early design phases

Sebastian Rothe

Schriften des Instituts für Akustik

Band 2, 2022

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Sabine C. Langer

Schriften des Instituts für Akustik

Band 2, 2022

Sebastian Rothe

**Design and placement of passive acoustic measures
in early design phases**

Shaker Verlag
Düren 2022

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8704-8

ISSN 2699-5336

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Design and placement of passive acoustic measures in early design phases

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

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von:
geboren in (Geburtsort):

Sebastian Rothe
Lutherstadt Wittenberg

eingereicht am:
mündliche Prüfung am:

02.12.2021
01.04.2022

Vorsitz:
Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Römer
Prof. Dr.-Ing. Sabine Christine Langer
Prof. Dr.-Ing. Joachim Bös

Abstract

The design and placement of passive measures for the improvement as well as the targeted adjustment of the vibroacoustic behaviour of technical products is often based on empirically determined rules or guidelines. Due to their general validity, potential for improvement often remains unused. Simulative optimisation procedures, on the other hand, are often very time-consuming due to the frequency dependence of acoustic phenomena and many iterations.

This dissertation is dedicated to the development of identification criteria for passive measures in early design phases, which already provide a placement and design proposal after one or a few calculation steps. Essential adjusting screws for influencing the vibroacoustic behaviour of technical products are changes in mass, stiffness and damping. Therefore, beads, damping layers and point masses are used as representative examples of these adjusting screws.

At the beginning of the thesis, a general classification of acoustic principles and measures in the methodological terminology of product development (*Design to Acoustics*) is given and a suitable acoustic assessment of design variants is discussed. The core of the thesis are numerical position and design studies of the exemplary measures on a rectangular plate, based on direct solutions using the finite element method. A suitable assessment quantity for the variants is the structure-borne sound level. The aim is to minimise this quantity in a defined critical frequency range. An application-oriented focus is set and a manufacturing-oriented design is taken into account. Correlations between distributions of physical quantities of the structure and suitable positions of the measure form the basis for deriving identification criteria.

The studies show that identification criteria can be obtained for all three measures with different robustness regarding changing boundary conditions and critical frequency ranges. The procedure and the most suitable criteria are successfully applied on a realistic car body structure (splash wall) at the end of the thesis. The identification criteria developed thus support the process towards an acoustic-oriented design and development in the early design phases.

Kurzfassung

Das Design und die Platzierung passiver Maßnahmen zur Verbesserung sowie der gezielten Einstellung des vibroakustischen Verhaltens von technischen Produkten basiert häufig auf empirisch ermittelten Regeln oder Leitlinien. Aufgrund ihrer Allgemeingültigkeit bleibt Verbesserungspotential häufig ungenutzt. Simulative Optimierungsprozeduren sind dagegen aufgrund der Frequenzabhängigkeit akustischer Phänomene und vieler Iterationen oft sehr zeit- und kostenintensiv.

Die vorliegende Dissertation widmet sich der Erarbeitung von Identifikationskriterien für passive Maßnahmen in frühen Entwicklungsphasen, die bereits nach einem oder wenigen Berechnungsschritten einen Platzierungs- und Designvorschlag liefern. Wesentliche Stellschrauben bei der Beeinflussung des vibroakustischen Verhaltens von technischen Produkten sind Änderungen der Masse, Steifigkeit und Dämpfung. Als repräsentative Beispiele für diese Stellschrauben werden daher Sicken, Dämpfungslagen und Punktmassen als Maßnahmen herangezogen.

Zu Beginn der Arbeit wird eine übergeordnete Einordnung akustischer Prinzipien und Maßnahmen in die methodische Terminologie der Produktentwicklung (*Design to Acoustics*) unternommen sowie eine geeignete akustische Bewertung von Designvarianten diskutiert. Kern der Thesis sind numerische Positions- und Designstudien der exemplarischen Maßnahmen anhand einer Rechteckplatte, auf Basis direkter Lösungen mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode. Als eine geeignete Bewertungsgröße der Varianten ergibt sich das Körperschallmaß. Das Ziel ist es, diese Größe in einem definierten kritischen Frequenzbereich zu minimieren. Hierbei wird ein anwendungsnaher Fokus gesetzt und die fertigungsgerechte Gestaltung mitberücksichtigt. Korrelationen zwischen Verteilungen physikalischer Größen der Struktur und geeigneten Positionen der Maßnahme bilden die Grundlage zur Ableitung von Identifikationskriterien.

Die Studien zeigen, dass sich Identifikationskriterien für alle drei Maßnahmen mit unterschiedlicher Robustheit gegenüber sich ändernden Randbedingungen und kritischen Frequenzbereichen ableiten lassen. Das Vorgehen und die Kriterien die sich am besten eignen werden am Ende der Arbeit an einer realistischen Karosseriestruktur (Spritzwand) erfolgreich angewendet. Die erarbeiteten Identifikationskriterien unterstützen somit den Prozess hin zum akustikgerechten Entwickeln und Konstruieren in frühen Phasen der Produktentwicklung.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation ist in meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe Vibroakustik am Institut für Konstruktionstechnik (2015–2018) und dem Institut für Akustik (2019–2021) der Technische Universität Braunschweig entstanden. Ich möchte an dieser Stelle gerne ein paar Menschen danken, die mich während dieser Zeit begleitet haben.

Zu allererst möchte ich mich bei meiner Doktormutter Prof. Dr.-Ing. Sabine Christine Langer bedanken. Dies gilt nicht nur für die fachliche Betreuung, sondern insbesondere für das stets offene Ohr und die vielen schönen und prägenden Momente auf Konferenzen, während der Institutsgründung und im Institutsalltag. Ein großer Dank geht auch an Prof. Dr.-Ing. Joachim Bös für die Zweitbetreuung der Arbeit sowie an Prof. Dr.-Ing. Ulrich Römer für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Ich danke hiermit allen Mitarbeitenden am Institut, die stets ein freundliches und kollegiales Umfeld geschaffen haben. Besonders hervorheben möchte ich meine Kollegen und Freunde Christopher Blech, Steffen Hoffmann und Aidin Nojavan, die im erheblichen Maße zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Die vielen fachlichen und außerfachlichen Gespräche sowie Erlebnisse im Büro, im Labor und auf Konferenzen werden mir immer in Erinnerung bleiben. Ein ganz besonderer Dank gilt Christopher. Du warst stets ein kritischer Diskussionspartner, toller Freund und verlässlicher Rückhalt... don't stop believin.

Von ganzem Herzen danke ich meinen Freunden und Familie, die mich zu jeder Zeit unterstützt haben. Ein tiefer Dank gebührt meinen lieben Eltern Ilona Seibicke und Thomas Rothe, sowie Geschwistern Griti Goblirsch und Jonas Auch. Zudem möchte ich meinen Großeltern Sigrid † und Horst Seibicke sowie in besonderem Maße Rosemarie und Günter Rothe für ihre bedingungslose Unterstützung danken. Einen weiteren besonderen Dank möchte ich Reinhard Ulrich aussprechen, der jahrelange meine fachliche und persönliche Entwicklung entscheidend mitgeprägt hat.

Braunschweig, 2021

Table of contents

Nomenclature	V
Abbreviations	X
1 Introduction	1
2 Classification of the work and literature review	3
2.1 Design to Acoustics	5
2.2 Measures for vibroacoustic improvement of technical structures .	12
2.3 Approaches for suitable placement of primary, passive measures .	15
2.3.1 Beads	16
2.3.2 Damping layers	23
2.3.3 Point masses	27
2.4 Assessment criteria for vibroacoustic systems	32
3 Motivation and aims of the work	39
3.1 Research questions and theses	41
3.2 Scientific approach	43
4 Fundamentals	45
4.1 Sound propagation	46
4.2 Sound intensities	48
4.3 Stress in mechanical structures	50
4.4 Finite element method	52
5 Assessment of vibroacoustic systems	55
5.1 Assessment of variants	56
5.2 Correlation assessment	59
6 Studies on placement and design of passive acoustic measures	63
6.1 Consideration of simple dynamic systems	65
6.1.1 Damped spring-mass oscillator	66
6.1.2 Effect of beads	69
6.1.3 Suitable conditions for damping layers	72

6.1.4	Point masses on beams	75
6.2	Modelling of reference structure	77
6.2.1	System description	78
6.2.2	System modelling	79
6.2.3	Convergence studies	81
6.2.4	Validation with analytical solution	91
6.3	Acoustic-oriented placement of beads	92
6.3.1	Manufacturing-oriented bead modelling	93
6.3.2	Bead placement to maximise 1st eigenfrequency	98
6.3.3	Distributed bead design to maximise 1st eigenfrequency	104
6.3.4	Bead placement acc. to critical frequency range	109
6.4	Acoustic-oriented placement of damping layers	111
6.4.1	Placement of rectangular damping patch	111
6.4.2	Distributed placement of damping layers	115
6.4.3	Bandwidth robustness of correlation quantity W_r	116
6.5	Acoustic-oriented placement of point masses	118
6.5.1	Placement of 1 point mass	119
6.5.2	Bandwidth robustness of correlation quantity v^2	124
6.5.3	Placement of 2 point masses	125
6.5.4	Distributed placement of point masses	127
6.5.5	Iterative point mass placement	128
6.6	Influence of boundary conditions	132
6.6.1	Correlation of suitable positions	133
6.6.2	BC robustness of correlation quantities	137
6.7	Combination of basic measures	142
7	Identification criteria for passive acoustic measures	151
7.1	Criteria for bead placement	151
7.2	Criteria for damping layer placement	154
7.3	Criteria for point mass placement	155
8	Application of methodology to realistic structure	159
8.1	Model description of splash wall	160
8.2	Beading of splash wall	162
8.3	Damping treatment of splash wall	165
8.4	Point mass placement on splash wall	167
9	Summary, conclusions and outlook	171
	References	190
	List of figures	196
	List of tables	197
	Appendix	i

A	Radiation behaviour of reference plate	ii
B	Regression equations	v