

Zur Klangoptimierung von Idiophonen mittels Schallsynthetisierung

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und
Fahrzeugtechnik der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

von
Pascal Dieter Bestle
aus Herrenberg

Hauptberichter: apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Hanss
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Otto von Estorff

Tag der mündlichen Prüfung: 16. August 2017

Institut für Technische und Numerische Mechanik
der Universität Stuttgart

2017

Schriften aus dem Institut für Technische und Numerische
Mechanik der Universität Stuttgart

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Peter Eberhard

Band 52/2017

Pascal Bestle

**Zur Klangoptimierung von Idiophonen
mittels Schallsynthesierung**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

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.: Stuttgart, 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 978-3-8440-5524-5

ISSN 1861-1651

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 Dissertationsschrift entstand während meiner fünfjährigen Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Technische und Numerische Mechanik (ITM) der Universität Stuttgart.

Zuallererst danke ich meinem Doktorvater Prof. Michael Hanss für die Übernahme des Hauptberichtes und vor allem für die intensive Betreuung während der Entstehung dieser Arbeit. Er gewährte mir größtmögliche Freiheiten bei der inhaltlichen Ausrichtung der Arbeit und stand mir mit seiner stets offenen Tür immer mit Rat und Tat zur Seite. Die vielen fachlichen Diskussionen zu auftretenden Fragestellungen und den zur Beantwortung notwendigen Methodiken trugen maßgeblich zum Gelingen dieser Forschungsarbeit bei.

Mein ganz besonderer Dank gilt auch dem Leiter des Instituts Prof. Peter Eberhard, der bereits während meines Studiums in mir das Potential für eine erfolgreiche Promotion sah und mich nach meiner Diplomarbeit an das ITM holte. Bedanken möchte ich mich vor allem für sein fachliches und persönliches Interesse und Engagement an meiner Forschung. Außerdem ist es seinem Geschick zu verdanken, dass am Institut stets eine harmonische, freundschaftliche und auf fachlicher Basis nicht zuletzt höchst wissenschaftliche Atmosphäre herrscht. In diesem Zusammenhang möchte ich auch all meinen Kollegen danken, die zum einen durch fachliche Diskussionen, aber auch ausreichend persönlichen Austausch weit abseits der Wissenschaft maßgeblich zum Erfolg meiner Promotion beigetragen haben.

Ebenfalls gilt mein Dank allen Studierenden, die im Rahmen ihrer studentischen Arbeiten einen wertvollen Beitrag geleistet haben.

Der größte Dank gebührt jedoch meiner Familie, die mich immer bestmöglich unterstützte. Vielen Dank an meine Eltern, die mir zunächst das Maschinenbaustudium ermöglichten und mir dann während meiner Promotion immer mit Rat und Tat zur Seite standen. Am meisten möchte ich mich bei meiner Frau Julia bedanken, mit der ich seit dem ersten Tag meines Studiums einen gemeinsamen Weg beschreite. Insbesondere in der stressigsten Abschlussphase meiner Promotion hielt sie mir stets den Rücken frei und tröstete unsere Tochter Charlotte, wenn Papa wieder später nach Hause kam.

Bedanken möchte ich mich schließlich noch bei Prof. Dr.-Ing. Otto von Estorff für die freundliche Übernahme des Mitberichtes und die wertvollen Anmerkungen zu dieser Arbeit.

Pascal Bestle

Steinenbronn, September 2017

Inhalt

Kurzfassung	IX
Abstract	XI
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangspunkt und Motivation	2
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	3
2 Einführung in die Psychoakustik und ausgewählte musiktheoretische Grundlagen	7
2.1 Musiktheoretische Grundlagen	8
2.1.1 Klang	8
2.1.2 Obertonverhalten	9
2.1.3 Töne und Intervalle	10
2.1.4 Tonhöhenwahrnehmung und Residualeffekt	12
2.1.5 Klassifikation von Musikinstrumenten	12
2.2 Das Vibraphon	14
2.2.1 Aufbau	14
2.2.2 Stimmen der Klangplatten	15
2.3 Das menschliche Hörorgan	16
2.3.1 Hörfeld	18
2.3.2 Tonotopie	19
2.4 Psychoakustische Kriterien	20
2.4.1 Maskierung	20
2.4.2 Schwebung	22

2.4.3	Kritische Bandbreite	23
2.4.4	Harmonizität und Inharmonizität	25
3	Modellierung von Idiophonen als reduzierte elastische Körper	27
3.1	Lineare Finite-Elemente-Methode	28
3.1.1	FE-Modell der Yamaha-Klangplatte	29
3.2	Modellordnungsreduktion auf Basis modaler Ansatzfunktionen	32
3.3	Berücksichtigung dissipativer Effekte durch Dämpfung	35
3.4	Numerische Zeitintegration	37
4	Experimentelle Analyse von Idiophonen	41
4.1	Grundlagen der experimentellen Modalanalyse	41
4.1.1	Anregung	43
4.1.2	Messaufnehmer	44
4.1.3	Bestimmung der Übertragungsfunktion	46
4.2	Messeinrichtung für die experimentelle Analyse	49
4.2.1	Lagerung der Klangplatten	50
4.2.2	Der Anregungsmechanismus	51
4.2.3	Klangmessung in einer schallarmen Umgebung	55
4.2.4	Messablauf	56
4.3	Messdatenerfassung und Auswertung	58
4.3.1	Messhardware	58
4.3.2	Modalanalyse-Software ModAna	59
4.4	Ergebnisse der experimentellen Analyse	59
4.4.1	Einfluss der Einspannung auf die Schwingungseigenschaften der Klangplatten	60
4.4.2	Messung des Klangs der Vibraphon-Platten dreier Hersteller	63
5	Schallsynthese aus der Oberflächenbewegung schwingender elastischer Strukturen	67
5.1	Numerische Methoden zur Berechnung von Schallfeldern	67
5.2	Grundlagen der Akustik	69

5.2.1	Physikalische Zustandsgrößen	69
5.2.2	Das eindimensionale Schallfeld	70
5.2.3	Das dreidimensionale Schallfeld	74
5.2.4	Eigenschaften einer Punktschallquelle	75
5.3	Schallabstrahlung komplexer Geometrien	76
5.3.1	Das finite Oberflächenelement als Punktschallquelle	78
5.3.2	Berücksichtigung der Laufzeit von Schallwellen	81
5.3.3	Numerische Berechnung des Schalldrucks	83
5.4	Validierung der Schallsynthese	85
5.4.1	Balkenmodelle	86
5.4.2	Vergleich mit der Boundary-Elemente-Methode	92
5.4.3	Vergleich mit der Messung	94
5.4.4	Aussagekraft der Klangvorhersage	99
6	Optimierung einer Vibraphon-Klangplatte	103
6.1	Numerische Optimierung des Klangs der Yamaha-Klangplatte	103
6.1.1	Materialparameterstudie der Yamaha-Klangplatte	104
6.1.2	Formulierung des Optimierungsproblems	105
6.1.3	Diskussion der Optimierungsergebnisse	108
6.2	Optimierung und Fertigung eigener Klangplatten	113
7	Zusammenfassung	121
	Formelzeichen und Notation	125
	Literatur	127