

## Reihe 20

Rechnerunter-  
stützte Verfahren

Nr. 467

Dipl.-Ing. Fabian Duvigneau,  
Magdeburg

## Ganzheitliche simulationsbasierte Bewertung der Akustik von automobilen Antrieben



# Ganzheitliche simulationsbasierte Bewertung der Akustik von automobilen Antrieben

**Dissertation**  
zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur  
(Dr.-Ing.)**

von Dipl.-Ing. Fabian Duvigneau  
geb. am 29.04.1987 in Magdeburg  
genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau  
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Ulrich Gabbert  
Prof. Dr.-Ing. Hermann Rottengruber

Promotionskolloquium am 08.06.2017



# Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 20

Rechnerunterstützte  
Verfahren

Dipl.-Ing. Fabian Duvigneau,  
Magdeburg

Nr. 467

Ganzheitliche  
simulationsbasierte  
Bewertung der Akustik  
von automobilen  
Antrieben

VDI verlag

Duvigneau, Fabian

## **Ganzheitliche simulationsbasierte Bewertung der Akustik von automobilen Antrieben**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 20 Nr. 467. Düsseldorf: VDI Verlag 2017.  
142 Seiten, 74 Bilder, 1 Tabelle.

ISBN 978-3-18-346720-4, ISSN 0178-9473,  
€ 52,00/VDI-Mitgliederpreis € 46,80.

**Für die Dokumentation:** Motorakustik, Virtuelle Produktentwicklung, numerische Simulation, Finite-Elemente-Methode, elastische Mehrkörpersimulation, Elasto-Hydrodynamik, Psychoakustik, Motorkapselung, passive Schallreduktion

Ziel dieser Dissertation ist die Entwicklung eines Vorhersagemodells der empfundenen Geräuschqualität von Motorgeräuschen auf Basis auralisierter Simulationsergebnisse. Dazu wird eine ganzheitliche Methodik präsentiert, die sowohl für elektrische als auch verbrennungsmotrische Antriebe anwendbar ist. Die Besonderheit des hier verfolgten Ansatzes ist, dass für die Hörversuche und die Signalanalyse keine experimentell ermittelten Geräusche verwendet werden müssen, sondern Simulationsergebnisse zum Einsatz kommen. Diese Vorgehensweise ist schon in einer sehr frühen Phase des Entwicklungsprozesses möglich. Sie hat den immensen Vorteil, dass keinerlei Hardware in Form von Prototypen vorhanden sein muss, um Modifikationen am Motor hinsichtlich akustischer Auswirkungen auf den Menschen bewerten zu können. Somit eignet sich das vorgestellte Konzept für eine rein virtuelle akustische Optimierung hinsichtlich der auditiven Wahrnehmung des Menschen. In dieser Arbeit wird die vorgestellte ganzheitliche Methodik exemplarisch auf die akustische Bewertung von motornahen Kapselungen angewendet.

### **Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

### **Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek**

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9473

ISBN 978-3-18-346720-4

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für numerische Mechanik der Fakultät für Maschinenbau der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Für die finanzielle Unterstützung der Forschungstätigkeit im Rahmen des Projektes „COmpetence in MObility“ gilt mein Dank dem Land Sachsen-Anhalt und dem Europäischen Fond für regionale Entwicklung.

Ich möchte mich bei allen noch aktiven und ehemaligen Mitarbeitern des Institutes für Mechanik und des Lehrstuhls „Energiewandlungssysteme für mobile Anwendungen“ bedanken, die ich während meiner Zeit an der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg kennenlernen durfte und die stets für eine angenehme Arbeitsatmosphäre sorgten. Dazu zählen selbstverständlich auch die Neuzugänge, die mich als jüngstes Institutsmitglied abgelöst haben. Insbesondere möchte ich mich natürlich bei denjenigen bedanken, mit denen ich besonders eng und viel zusammengearbeitet habe, wie zum Beispiel Steffen L., Sebastian K., Tommy, Peter, Steffen N. und Elmar. Nicht zuletzt gilt mein besonderer Dank Ryan, der mich während seines zweijährigen Aufenthalts als Humboldt-Stipendiat sehr unterstützt hat und eine wahre Bereicherung für unser gesamtes Team war.

Ganz besonderer Dank gilt natürlich auch den Kollegen, die sogar ein bisschen mehr als Kollegen wurden und mir auch die ein oder andere Stunde meiner Freizeit versüßt haben, wobei man als Doktorand natürlich so etwas wie Freizeit weder hat - noch kennt, aber so ein bis zwei Stunden pro Jahr kann man sich ja ruhigen Gewissens mal gönnen. Stellvertretend möchte ich hier natürlich meinen Büronachbarn Sascha hervorheben, aber auch Steffen, Ryan, Sebastian, Matze, Stefan Go., Christian, Lars und Harald nicht unerwähnt lassen.

Ich danke ganz herzlich Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Ulrich Gabbert für die fachliche Betreuung, die jahrelange gute Zusammenarbeit und seine stets hilfreiche Unterstützung. Außerdem möchte Prof. Dr. Hermann Rottengruber dafür danken, dass er sich ohne zu zögern dazu bereit erklärt, meine Dissertation zu begutachten.

Natürlich haben auch unsere externen BMW-Doktoranden Maria und Marius meine Promotionszeit geprägt. Jeder Besuch war ein freudiges Ereignis und nicht selten sind auch sehr produktive Resultate dabei entstanden.

Ganz besonders herzlich möchte ich natürlich meiner lieben Frau danken, die die hohe zeitliche Belastung eisern ertragen und mich immer bestmöglich unterstützt hat. Vielen Dank dafür!

Magdeburg, Juni 2017

Fabian Duvigneau



# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzzusammenfassung</b>	<b>VII</b>
<b>Abstract</b>	<b>VIII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung . . . . .	1
1.2 Zielstellung . . . . .	4
1.3 Aufbau der Arbeit . . . . .	5
<b>2 Ganzheitliche Methodik zur Akustiksimulation</b>	<b>6</b>
2.1 Simulationsbasierte Bewertung von Elektromotoren . . . . .	6
2.2 Simulationsbasierte Bewertung von Verbrennungsmotoren . . . . .	8
<b>3 Elastische Mehrkörpersimulation unter Berücksichtigung der Hydrodynamik</b>	<b>14</b>
3.1 Elastische Mehrkörpersimulation . . . . .	14
3.2 Elasto-Hydrodynamik . . . . .	17
3.3 Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung der elastischen MKS . . . . .	21
<b>4 Schwingungs- und Akustiksimulation</b>	<b>25</b>
4.1 Schwingungsanalyse . . . . .	25
4.2 Akustiksimulation . . . . .	28
<b>5 Psychoakustische Bewertung</b>	<b>38</b>
5.1 Entwicklung eines psychoakustischen Modells . . . . .	39
5.2 Erzeugung der Zeitsignale . . . . .	41
5.3 Das Gehör des Menschen . . . . .	43
5.4 Berechnung der psychoakustischen Parameter . . . . .	46
5.5 Vorgehensweise im Hörversuch . . . . .	50
5.6 Psychoakustisches Modell als Ergebnis einer Regressionsanalyse . . . . .	53
<b>6 Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung des ganzheitlichen Ansatzes</b>	<b>56</b>
<b>7 Auslegung und Modellierung von Kapselsystemen</b>	<b>60</b>
7.1 Exp. Bestimmung der makroskopischen Materialeigenschaften . . . . .	60
7.2 Numerische Bestimmung der makroskopischen Materialeigenschaften . . . . .	67
7.3 Einfluss von Kompression und Feuchtigkeit . . . . .	71
7.4 Vorauswahl geeigneter Kapselmaterialien . . . . .	73
7.5 Verbesserungspotentiale von Motorkapselungen . . . . .	81
<b>8 Anwendung und Validierung des ganzheitlichen Ansatzes am Beispiel eines Verbrennungsmotors</b>	<b>89</b>
8.1 Ergebnisse der ganzheitlichen Simulationskette . . . . .	89

8.2	Validierung der ganzheitlichen Simulationsmethodik . . . . .	93
8.3	Berücksichtigung des Motoröls . . . . .	95
8.4	Psychoakustische Analyse . . . . .	104
8.5	Validierung der psychoakustischen Modellierung . . . . .	108
8.6	Richtungsabhängigkeit der Geräuschqualität . . . . .	110
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>116</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>120</b>

# Kurzzusammenfassung

Neben der Leistungs- und Verbrauchsoptimierung stellt die Reduktion der Schallemission einen wesentlichen Aspekt bei der Entwicklung von Motoren dar. Ziel dieser Dissertation ist die Entwicklung eines Vorhersagemodells der empfundenen Geräuschqualität von Motorgeräuschen auf Basis auralisierter Simulationsergebnisse. Dazu wird eine ganzheitliche Methodik präsentiert, die aus numerischen und psychoakustischen Analysen besteht und sowohl für elektrische als auch verbrennungsmotorische Antriebe anwendbar ist. Die numerischen Analysen beinhalten die Berechnung der Anregungskräfte, eine nachfolgende Schwingungsanalyse sowie eine abschließende Akustiksimulation, deren Ergebnisse anschließend hörbar und somit bewertbar gemacht werden. Die resultierenden Zeitsignale werden dazu einem Signalverarbeitungsprozess unterzogen und bilden die Grundlage für die Berechnung der psychoakustischen Grundparameter. Die simulierten Motorgeräusche werden nach der Auralisierung durch Probanden in Hörversuchen individuell bewertet. Schließlich werden die Ergebnisse der Signalanalyse und der Hörversuche anhand von Regressions- und Korrelationsanalysen miteinander verglichen. Für das Prognosemodell werden die objektiven Parameter verwendet, die die beste Korrelation mit der subjektiven Empfindung der Geräuschqualität aufweisen. Die entwickelten Prognosemodelle sowie die Ergebnisse der numerischen Simulationen werden mit Hilfe von experimentellen Untersuchungen validiert.

Die Besonderheit des hier verfolgten Ansatzes ist, dass für die Hörversuche und die Signalanalyse keine experimentell ermittelten Geräusche bzw. Zeitsignale verwendet werden müssen, sondern auralisierte Simulationsergebnisse zum Einsatz kommen. Diese Vorgehensweise ist schon in einer sehr frühen Phase des Entwicklungsprozesses möglich. Sie hat den immensen Vorteil, dass keinerlei Hardware in Form von Prototypen vorhanden sein muss, um Modifikationen am Motor hinsichtlich akustischer Auswirkungen auf den Menschen bewerten zu können. Somit eignet sich das vorgestellte Konzept für eine rein virtuelle akustische Optimierung hinsichtlich der auditiven Wahrnehmung des Menschen. In dieser Arbeit wird die vorgestellte ganzheitliche Methodik exemplarisch auf die akustische Bewertung von motornahen Kapselungen angewendet, da mit Hilfe von Motorkapseln eine deutliche Reduktion der Schallemission erreicht werden kann. Mit Hilfe des entwickelten Ansatzes können rechnergestützt unterschiedliche Typen von Dämmmaterialien, deren Materialaufbau, Dicke und die geometrische Form der Kapsel im Hinblick auf die qualitative Wahrnehmung bewertet werden. Zusätzlich wird die Bestimmung der für die Simulation erforderlichen Materialparameter der Kapselmaterialien erörtert. Außerdem werden wichtige Fragestellungen hinsichtlich der Genauigkeit und Effizienz des präsentierten ganzheitlichen Ansatzes, sowie Optimierungspotentiale von Motorkapselungen diskutiert.

# Abstract

In the development process of engines, the reduction of the sound emission is a major goal alongside the optimization of both the power and the fuel efficiency. Hence, in this dissertation the aim is to develop a prediction model that can evaluate the sound quality of engines based on auralized simulation results. Therefore, a holistic methodology is presented that consists of numerical and psychoacoustic analyses. This methodology is applicable to electric as well as combustion engines. The numerical analysis begins with the calculation of the excitation forces. Then, the determined excitation forces are used to calculate the vibrations of the engine with the finite element method. Subsequently, the resulting acoustical behavior is calculated and rendered audible. At this point, the psychoacoustic part of the analysis begins, where signal processing of the resulting time signals from the numerical simulations is performed in order to calculate the psychoacoustic parameters. The numerically calculated engine sounds are also used to carry out a hearing test with human participants, who evaluate the different engine sounds with regards to their perceived sound quality. Finally, the results of the signal analysis and the hearing test are compared by regression and correlation analyses. The objective parameters with the best correlation between the results of the signal analysis and the hearing test are used to generate the psychoacoustic prediction model of the perceived sound quality. The generated psychoacoustic prediction model and the numerical results are validated by experimental investigations.

The remarkable feature of the presented approach is that the auralized simulation results are used within the hearing tests instead of the sounds of real engines or prototypes. This makes it possible to execute the presented workflow early in the product development process. This means that no hardware or real prototypes are required in order to evaluate the result of engine modifications on the acoustic behavior and its corresponding human perception. Hence, the presented concept is suitable for computer based optimization of the engine with respect to the perceived sound quality.

To demonstrate the developed workflow, in this dissertation the holistic approach is applied to the evaluation of engine encapsulations. Such encapsulations can be used to significantly reduce the sound emission of engines. With the help of the developed approach it is possible to develop a material design, its layup and thickness, as well as an optimal shape of the engine encapsulation, with consideration for the human perception of the resulting sound. Additionally, the determination of the material parameters of the encapsulation materials is discussed in this thesis, as these parameters are essential for the numerical simulations. Further, important issues with respect to the computational accuracy and efficiency as well as the potential for further optimization of engine encapsulations are discussed.