

Jörg Brüer

**Modulare Modellierung und Synthese
virtueller Fahrzeuginnengeräusche**

Berichte aus dem IDS

Wissenschaftliche Schriftenreihe des
Instituts für Dynamik und Schwingungen
der Leibniz Universität Hannover

Herausgeber:
Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek

Zugleich: Dissertation,
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 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.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch das
des Nachdruckes, der Wiedergabe, der Speicherung in
Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung des vollständigen
Werkes oder von Teilen davon, sind vorbehalten.

© TEWISS – Technik und Wissen GmbH, 2015
An der Universität 2 • 30823 Garbsen
Tel: 0511-762-19434 • Fax: 0511-762-18037
www.pzh-verlag.de • mail: info@pzh-verlag.de

ISBN 978-3-95900-013-0
ISSN 1868-1999

Verlag: TEWISS – Technik und Wissen GmbH

Herstellung: Digital Print, Garbsen
Printed in Germany

Modulare Modellierung und Synthese virtueller Fahrzeuginnengeräusche

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte

Dissertation

von
Dipl.-Ing. Jörg Bräuer
geb. am 05. November 1982 in Berlin

2015

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek
2. Referent: Prof. Dr.-Ing. Eduard Reithmeier
Tag der Promotion: 4. März 2015

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Forschungsmitarbeiter der Volkswagen AG. Sie wurde jedoch erst durch die Unterstützung des Instituts für Dynamik und Schwingungen der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover möglich. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek für die Betreuung dieser Arbeit und die fachlichen Diskussionen. Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Eduard Reithmeier für seine Bereitschaft zur Begutachtung meiner Arbeit und bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Lutz Rissing für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes bedanken.

Mein ausdrücklicher Dank gilt meinem fachlichen Betreuer seitens der Volkswagen AG, Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunnar Simon Gäbel, der mich zu dieser Arbeit motiviert und sie von Anfang an begleitet hat. Der enge fachliche Austausch in vielen konstruktiven und kreativen Gesprächen haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen und meine berufliche und persönliche Entwicklung maßgeblich geprägt. Weiterhin danke ich ganz herzlich dem von mir betreuten, ehemaligen Studenten und Kollegen Herrn Dipl.-Ing. Philipp Terfloth für die freundschaftliche und intensive Zusammenarbeit. Ohne seine Mithilfe wären Teile dieser Arbeit nicht in diesem Umfang bearbeitet worden. Ich bedanke mich außerdem bei Herrn Dipl.-Ing. Andreas Mohr für die vielen fachlichen Anregungen, sowie bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernhard U. Seeber der TU München für den interessierten Austausch bei Fragen zu Hörversuchen und subjektiver Geräuschwahrnehmung.

Meinen Vorgesetzten innerhalb der Konzernforschung, Herrn Dr.-Ing. Jens Meschke, Herrn Dr.-Ing. Henry-Paul Bensler und Herrn Dr.-Ing. Bernd Hagerodt, danke ich für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die mir eingeräumten Freiräume. Meine Zeit als Doktorand wurde durch eine angenehme und kollegiale Arbeitsatmosphäre geprägt, wofür ich mich bei allen Mitarbeitern bedanke, die mich in dieser Zeit begleitet haben. Besonderer Dank gilt jedoch Herrn Dr.-Ing. Marcus Kern, Herrn Dr. rer. nat. Michael Hartmann, Herrn Dr. rer. nat. Carsten Othmer, Herrn Dr. rer. nat. Michael Andres, Herrn Dipl.-Ing. Michal Kovařík und Herrn Dipl.-Ing. Christoph Janz für ihre Unterstützung und nützlichen Hinweise.

Ich möchte mich herzlich bei meinem Freund und Kollegen Herrn Dr.-Ing. Markus Neubauer für die zahlreichen fachlichen und überfachlichen Gespräche in allen Lebenslagen bedanken. Sein großes Interesse an meiner Arbeit, der rege Erfahrungsaustausch und die motivierenden Worte haben sehr zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit beigetragen.

Mein abschließender Dank gilt meiner Freundin Anja für ihre Geduld, ihr grenzenloses Verständnis und ihre mentale Unterstützung. Besonders in schwierigen Phasen dieser Arbeit konnte ich mir ihres Rückhalts zu jeder Zeit sicher sein.

Ich widme diese Arbeit meinen Eltern, Joachim und Rosemarie, die mir diesen Schritt überhaupt erst ermöglicht und stets an mich geglaubt haben.

Erklärung

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

Kurzfassung

Für die Prognose des Fahrzeuginnengeräusches existieren verschiedene simulative Methoden. Aufgrund von ansatzbedingten Beschränkungen und Recheneffizienzforderungen bildet jede Methode für sich jedoch nur einen eingeschränkten Frequenzbereich des Hörbereichs ab. Die Ergebnisse dieser Berechnungsmethoden liegen oft in Form von Spektraldaten vor, aus denen sich der subjektive Höreindruck nicht direkt ableiten lässt. Allerdings ist genau dieser subjektive Höreindruck für die Potenzialabschätzung akustischer Maßnahmen im Hinblick auf die Geräuschqualität hilfreich und für eine Gesamtbeurteilung häufig auch erforderlich. Aus diesem Grund ist es wünschenswert, die Ergebnisse dieser Berechnungsmodelle erlebbar zu machen.

In der vorliegenden Arbeit wird ein allgemeines, modulares Modell zur Verknüpfung und Synthese von Ergebnissen verschiedener Berechnungsverfahren vorgestellt. Die modulare Modellierung ermöglicht die geeignete Kombination verschiedener Berechnungsergebnisse und ist beliebig erweiterbar. Die Grundlage des vorgestellten Modells ist die Annahme, dass das gesamte Fahrzeuginnengeräusch entsprechend der Geräuschregungsmechanismen in kohärente und inkohärente Geräuschanteile separierbar und als Summe von Geräuschkomponenten synthetisierbar ist. Hierfür werden die Anforderungen an den Informationsgehalt der jeweiligen Berechnungsergebnisse anhand von Aufnahmen eines dieselmotorisch betriebenen Referenzfahrzeuges in Hörversuchen diskutiert und geeignete Synthesemethoden für die verschiedenen Geräuschkomponenten beschrieben.

Um die Synthesegüte des modularen Modells zu bewerten, wird ein Ähnlichkeitsmodell zur objektivierten Prognose der subjektiven Geräuschähnlichkeit zweier Signale entwickelt. Das Ähnlichkeitsmodell basiert auf der Kopplung experimentell bestimmter Schwellenwerte psychoakustischer Parameter und zeigt im Vergleich zu Hörversuchsdaten ein korrelierendes Prognoseverhalten. Es wird angewendet, um eine abschließende exemplarische Gesamtgeräuschsynthese mit gemessenen und entsprechend analysierten Fahrzeuginnengeräuschen zu vergleichen. Hierbei wird aufgezeigt, dass sich das Syntheseergebnis des modularen Modells als hinreichende Beschreibung des Fahrzeuginnengeräusches mit einer hohen Geräuschähnlichkeit darstellt.

Schlagwörter: Fahrzeugakustik, Synthese, Geräuschähnlichkeit, Psychoakustik

Abstract

Numerous calculation methods exist for the prediction of vehicle interior noise. Each of these methods on its own though is only valid in a limited frequency bandwidth of the range of human hearing due to limitations of the respective model approach and the demand for calculation efficiency. Furthermore, the results of these methods often are frequency domain data from which the subjective auditory impression cannot be derived directly. However, the subjective auditory impression helps to evaluate the potential of acoustic measures with regard to the sound quality and often is necessary for the overall evaluation. Therefore, it is desirable to make the results of these calculation models perceptible.

In this thesis a general modular model for the combination and sound synthesis of multiple calculation results is presented. The modular design offers the possibility for a suitable combination of results from different calculation methods and is expandable arbitrarily. The model is based on the assumption that the complete vehicle interior noise is separable into coherent and incoherent acoustic components according to its excitation mechanism and can be synthesized as a sum of noise components. For this purpose, requirements on the information content of each calculation result are considered on the basis of recordings of a diesel engine vehicle in hearing tests and suitable synthesis methods for the different noise components are described.

To evaluate the synthesis quality of the modular model, a similarity model for estimating the subjective sound similarity of two signals is developed. The sound similarity model is based on the coupling of experimentally determined psychoacoustic thresholds and shows a correlating prediction behaviour in comparison to hearing test data. The similarity model is used in the final exemplary application of the modular model for the synthesis of the complete vehicle interior noise to evaluate the synthesis result in comparison to measured and appropriately analyzed recordings of real vehicle interior noise. It is shown that the synthesis result of the modular model is a sufficient characterization of the vehicle interior noise with a high sound synthesis quality.

Key words: vehicle acoustics, sound synthesis, sound similarity, psychoacoustics

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	VI
Abstract	VII
Inhaltsverzeichnis	IX
Formelverzeichnis	X
1 Einleitung	1
1.1 Rahmen der Arbeit	1
1.2 Gliederung der Arbeit	3
2 Stand des Wissens	5
2.1 Das Fahrzeuginnenraumgeräusch	7
2.1.1 Kohärenz und Inkohärenz von Teilschallquellen	9
2.1.2 Motorgeräusche	10
2.1.3 Rollgeräusche	12
2.1.4 Windgeräusche	13
2.2 Akustikprognosewerkzeuge	13
2.2.1 Finite-Elemente-Methode	14
2.2.2 Statistische Energieanalyse	17
2.2.3 Neue Ansätze und Methoden für den mittleren Frequenzbereich . .	18
2.3 Geräuschsyntheseverfahren	20
2.3.1 Aufnahmeverarbeitung	20
2.3.2 Spektrale Modellierung	22
2.3.3 Abstrakte Algorithmen	24
2.3.4 Physikalische Modellierung	26
2.3.5 Zusammenfassung der Syntheseverfahren	28
2.3.6 Automotive Geräuschsyntheseprogramme	29
2.3.7 Phasenextraktionsverfahren	30
2.4 Kenngrößen für die akustische Objektivierung	33
2.4.1 Psychoakustische Parameter	34
2.4.2 Monauralität und Binauralität	37
2.4.3 Maskierung	38
2.4.4 Definition der subjektiven Geräuschähnlichkeit	40

2.5	Offene Fragen in der Gesamtgeräuschbeschreibung	40
3	Problemstellung	42
3.1	Aufgabenstellung	43
3.2	Erfolgskriterien	43
4	Anforderungsanalyse	45
4.1	Das Messobjekt	46
4.2	Inkohärente Geräuschanteile	47
4.3	Kohärente Geräuschanteile	48
4.3.1	Vorbetrachtungen zum Drehzahlsignal	49
4.3.2	Filterung einzelner Motorordnungen	52
4.3.3	Untersuchung zur Maskierung von Geräuschanteilen	53
4.3.4	Bildung von Äquivalentsignalen	56
4.3.5	Untersuchung zum Einfluss relativer Phasenlagen	59
4.4	Resultierende Anforderungen an das Gesamtmodell	62
5	Modulare Modellierung und Synthese virtueller Fahrzeuginnengeräusche	64
5.1	Erzeugung von Führungsgrößen	64
5.2	Synthese kohärenter Geräuschanteile	65
5.3	Synthese inkohärenter Geräuschanteile	70
5.4	Bildung des Gesamtgeräusches	73
6	Objektivierung subjektiver Geräuschähnlichkeit	77
6.1	Erster Hörversuch zur Geräuschähnlichkeit	78
6.2	Zweiter Hörversuch zur Geräuschähnlichkeit	82
6.3	Ableitung der Ähnlichkeitsbeziehung	85
7	Exemplarische Anwendung der Modellierung und Synthese	90
7.1	Anwendung der Synthese für kohärente Geräuschanteile	91
7.2	Anwendung der Synthese für inkohärente Geräuschanteile	93
7.2.1	Synthese von Windgeräuschen aus gemessenen Daten	93
7.2.2	Synthese von Geräuschen aus SEA-Berechnungsergebnissen	97
7.3	Synthese des Gesamtgeräusches	104
7.4	Diskussion der Lösung	108
8	Zusammenfassung	113
	Anhang	119
A	Hörbeispiele der Hörversuche zur Geräuschähnlichkeit	119
B	Messpositionen der Anregungssignale der SEA-Berechnung	124
	Literaturverzeichnis	125

Formelverzeichnis

Selten benutzte Formelzeichen und Begriffe sowie abweichende Bedeutungen werden ausschließlich im Text erläutert.

Lateinische Notation

A	Amplitude sinusförmiger Signale
c	Weißes Rauschen
f	Frequenz
f_m	Bandmittenfrequenz
f_o	Obere Bandgrenzfrequenz
f_u	Untere Bandgrenzfrequenz
f_s	Abtastrate
H	Übertragungsfunktion
i	Getriebeübersetzungsverhältnis
L	Lautheit
L'	Spezifische Lautheit
L_N	Lautstärkepegel
L_p	Schalldruckpegel
M	Zeitsignal eines kohärenten Geräuschanteils
N	Blocklänge segmentierter Prozesse
n	Motordrehzahl
p	Schalldruck
p_0	Schalldruckbezugswert für Luftschall (20 μ Pa)
Q	Quartil
R	Rauhigkeit
S	Schärfe
S_L	Empfindungsschwelle der Lautheit
S_R	Empfindungsschwelle der Rauhigkeit
S_S	Empfindungsschwelle der Schärfe
S_T	Empfindungsschwelle der Tonalität
t	Zeit
Δt_L	Systemlatenz
T	Tonalität
v	Fahrzeuggeschwindigkeit

z Tonheit

Griechische Notation

\mathcal{H} Hilberttransformation
 ω Kreisfrequenz
 φ_0 Startphasenwinkel
 φ_{inst} Instantaner Phasenwinkel
 $\Delta\varphi$ Phasenfrequenzgang kohärenter Geräuschanteile
 φ Resultierender Phasengesamtwinkel

Vektoren und Matrizen

${}^{12}A$ Transformationsmatrix zwischen den Koordinatensystemen 1 und 2
 A Systemmatrix

Indices und weitere Formelzeichen

$()_{i,j,m,r}$ Laufindizes
 $()_k$ Ordnungsindex kohärenter Geräuschanteile
 $()_{1/n}$ $1/n$ -Oktavauflösung
 $(\hat{\quad})$ komplexe Größe
 $(\hat{\quad})$ konjugierte, komplexe Größe

