



Technische
Universität
Braunschweig



Methode zur systematischen Entwicklung von akustisch effizienten Leichtbau-Fahrzeugstrukturen

Meike Kollmannthaler

Schriften des Instituts für Akustik

Band 1, 2024

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

Schriften des Instituts für Akustik

Band 1, 2024

Meike Kollmannthaler

**Methode zur systematischen Entwicklung von
akustisch effizienten Leichtbau-Fahrzeugstrukturen**

Shaker Verlag
Düren 2024

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.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2024

Copyright Shaker Verlag 2024

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9520-3

ISSN 2699-5336

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

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Methode zur systematischen Entwicklung von akustisch effizienten Leichtbau-Fahrzeugstrukturen

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

zur Erlangung der Würde

einer Doktor-Ingenieurin (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Meike Tone Kollmannthaler
geboren in: Malsch (Kreis Karlsruhe)

eingereicht am: 23.10.2023
mündliche Prüfung am: 26.03.2024

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Sabine Christine Langer
Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor

Danksagung

Herzlichen Dank möchte ich meiner Doktormutter Prof. Dr.-Ing. Sabine C. Langer für ihre herausragende wissenschaftliche und persönliche Betreuung aussprechen. Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens und Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder für die Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission. Darüber hinaus möchte ich den Kollegen des Instituts für Akustik für die Unterstützung danken.

Die vorliegende Arbeit entstand während und aufbauend auf meiner Tätigkeit als Doktorandin in der Karosserie Vorentwicklung der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG. Meinen ehemaligen Vorgesetzten Dr.-Ing. Werner Tietz, Frank Sautter und Mathias Fröschle danke ich für die Initiative, dieses Projekt zu realisieren. Besonders bedanken möchte ich mich bei allen Kollegen für den fachlichen Austausch. Ich danke Dr.-Ing. Philipp Kellner für die firmeninterne Betreuung meiner Arbeit und das mir entgegengebrachte Vertrauen. Jürgen Ochs danke ich für die Übernahme der firmeninternen Zweitbetreuung und dafür, dass dieses Promotionsprojekt in enger Kooperation zwischen Akustik- und Karosserieentwicklung stattfinden konnte. Ein besonderer Dank gilt der gesamten Fachgruppe Karosserieakustik, insbesondere Klaus Wagner, Rick Dunkel und Martin Kemmer. Mein besonderer Dank gilt den wenigen Mitstreiterinnen und den Mitstreitern des Porsche-Doktorandennetzwerks, insbesondere Dr.-Ing. Dominik Klaiber. Ein ganz besonderer Dank gilt Dr.-Ing. Lea Schwarz, Maike Gerz und Carolin Geitner für unseren gemeinsamen Weg und unsere Freundschaft. Zudem gilt mein Dank allen Korrekturlesern für die aufgebrachte Zeit.

Felix Sperber, Daniel Jansen, Baghdad Ahzaoui, Sergej Schröder, Daniel Schindelmann, Clemens Schwöbel und Christian Roos danke ich für ihre wertvolle Vorarbeiten im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten. Mein herzlicher Dank gilt weiterhin dem Werkstudenten Tobias Baum sowie den Werkstudentinnen Wala Fayala und insbesondere Marjella Schotte für ihre tatkräftige Unterstützung während der Prüfstandsphasen und unsere Freundschaft.

Bedanken möchte ich mich abschließend bei meiner Familie, bei meinen Eltern Ute und Anton, die mich immer unterstützt und mir meinen akademischen Werdegang erst möglich gemacht haben, und meinem Bruder Felix, dessen Anerkennung, Liebe und unbeschwerter Art mich immer motivieren. Mein größter Dank gilt meinem Ehemann Max, der auf viel gemeinsame Zeit zugunsten dieser Arbeit verzichten musste und der für den Schlussspurt viele zusätzliche Betreuungsstunden unseres Sohnes übernommen hat. Danke für deine unbegrenzte Unterstützung, deinen abfärbenden Optimismus, danke für unser Leben abseits von Arbeit und Dissertation und dafür, dass du mein Fels in der Brandung bist.

Meike Kollmannthaler

Zusammenfassung

Leichtbau ist ein wichtiger Trend in der Automobilindustrie, um die CO_2 -Emissionen zu reduzieren. Allerdings kann Karosserieleichtbau zu einer Verschlechterung der Fahrzeugakustik im Innenraum führen. Besonders kritisch sind flächige Strukturbauteile, die die Fahrgastzelle von äußeren Geräuschquellen trennen. Um den Geräuschpegel im Fahrzeug zu reduzieren, sind häufig zusätzliche Maßnahmen in der späten Phase der Fahrzeugentwicklung erforderlich. Diese Aspekte führen jedoch zu höherem Fahrzeuggewicht und damit verbundenen Kosten.

In der vorliegenden Arbeit wird eine Methode zur systematischen Auswahl akustisch effizienter Leichtbau-Fahrzeugstrukturen für die frühe Phase des Fahrzeugentwicklungsprozesses entwickelt. Die Methode basiert auf einem Kennwert, dem Leichtbau-Akustik-Index und einer Vorhersagemethode zur akustischen Wirksamkeit von flächigen Karosseriebauteilen. Die Methode erlaubt eine gezielte Bewertung aller in Frage kommenden Flächenstrukturen hinsichtlich Masse, Bauraum und Akustik. Sie leistet einen wichtigen Beitrag, um bereits in einer frühen Phase des automobilen Produktentstehungsprozesses akustische Aspekte bei der Entwicklung von Leichtbaukonstruktionen systematisch zu berücksichtigen. Die neue Methode ermöglicht eine frühzeitige und ganzheitliche Abschätzung von Leichtbau und Akustik im Fahrzeuginnenraum. So kann die Ausgangslage für Optimierungen in späteren Phasen verbessert und Kosten gespart werden.

Abstract

Lightweight design is a major trend in the automotive industry to reduce CO_2 emissions. Nevertheless, lightweight design can lead to a deterioration of vehicle acoustics in the interior. Particularly critical are two-dimensional structural components that separate the passenger compartment from external noise sources. In order to reduce the noise level in the vehicle, additional modifications are often required late in the vehicle development process. However, these modifications lead to higher vehicle weight and costs.

In this thesis, a method for systematic selection of acoustically efficient lightweight body structures for the early phase of the vehicle development process is elaborated. The method is based on a key figure, the lightweight acoustic index, and a prediction method for the acoustic efficiency of planar body components. It enables a targeted evaluation of all surface structures in consideration with regard to mass, installation space and acoustics. Furthermore, it makes an important contribution to the systematic consideration of acoustic aspects in the development of lightweight structures at an early stage of the automotive product development process. The new method enables an early and holistic assessment of lightweight design and acoustics in the vehicle interior. This can improve the starting position for optimization in later phases and save costs.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| 1. Einführung | 1 |
| 1.1. Problemstellung und Zieldefinition | 2 |
| 1.2. Abgrenzung zum Stand der Technik | 6 |
| 1.3. Vorgehen und Aufbau der Arbeit | 9 |
| 2. Grundlagen und Stand der Technik | 11 |
| 2.1. Geräuschquellen in PKW | 12 |
| 2.2. Innenraumakustik in PKW | 13 |
| 2.3. Akustische Größen zur quantitativen Erfassung von Schall | 18 |
| 2.4. Schalldämm-Maß und Einfügedämmung | 21 |
| 3. Variantenvergleichende Untersuchungen | 27 |
| 3.1. Variantenvergleichende Luftschalluntersuchungen ebener Karosseriebleche | 28 |
| 3.1.1. Experimentelle Luftschalluntersuchungen der Karosserieschicht . | 30 |
| 3.1.2. Einfluss von Öffnungen in Blechen | 33 |
| 3.2. Variantenvergleichende Luftschalluntersuchungen an Gesamtsystemen aus Karosseriekomponente und Sekundärbehandlung | 37 |
| 3.2.1. Grundlagenversuche zu Feder-Masse-Systemen | 38 |
| 3.2.2. Absorber und Feder-Masse-Systeme im Vergleich | 41 |
| 3.3. Variantenvergleichende Körperschalluntersuchungen | 46 |
| 3.3.1. Versuchsaufbau der Körperschall-Experimente an Platten | 46 |
| 3.3.2. Berechnung der abgestrahlten Schalleistung isotroper Platten . . . | 49 |
| 3.3.3. Parameterstudie zur abgestrahlten Schalleistung | 53 |
| 4. Entwicklung einer Kennzahl zur kombinierten Leichtbau-Akustik-Bewertung | 59 |
| 4.1. Herleitung von Anforderungen und Bewertungskriterien | 60 |
| 4.2. Entwicklung der Kennzahl | 61 |
| 4.3. Beispielhafte Anwendung und Eigenschaften der Kennzahl | 64 |
| 4.4. Vorteile und Grenzen der Anwendung der Kennzahl | 66 |
| 5. Vorhersagemethode der Akustischen Wirksamkeit flächiger Karosseriebauteile | 67 |
| 5.1. Berechnung des Schalldämm-Maßes unendlich ausgedehnter Platten . . . | 68 |
| 5.2. Vergleich zwischen analytischer Berechnung und Plattenversuchen | 71 |
| 5.3. Versuchsaufbau und Randbedingungen der Gesamtfahrzeugversuche . . . | 73 |
| 5.4. Vergleich zwischen Vorhersage der Akustischen Wirksamkeit unbehandel- ter flächiger Karosseriebauteile und Gesamtfahrzeugmessungen | 78 |

| | |
|--|------------|
| 5.5. Vorhersage der Akustischen Wirksamkeit der Sekundärbehandlungen Absorber und Feder-Masse-Systeme | 80 |
| 5.6. Vergleich zwischen Vorhersage und Gesamtfahrzeugmessungen an flächigen Karosseriebauteilen mit Sekundärbehandlung | 93 |
| 5.6.1. Feder-Masse-Systeme | 95 |
| 5.6.2. Absorber | 99 |
| 5.7. Kombination von Sekundärmaterialien und Einfluss von Sicken | 102 |
| 6. Entwicklung des Gesamtmethodenansatzes | 107 |
| 6.1. Konzeptanalyse und -verbesserung mittels Luftschallpfadanalyse | 107 |
| 6.1.1. Akustische Knotendiagramme zur Luftschallpfadanalyse von Fahrzeugkonzepten | 109 |
| 6.1.2. Einfache Bewertungsmethode für Luftschallpfade | 112 |
| 6.1.3. Beispielbewertung und konstruktive Maßnahmen | 115 |
| 6.1.4. Anwendung und Grenzen des Methodenansatzes | 118 |
| 6.2. Auswahl des bestgeeigneten Aufbaus von Karosseriemembranflächen | 119 |
| 6.2.1. Vorgehensweise zur Vorauswahl möglicher Flächenaufbauten | 120 |
| 6.2.2. Vorgehensweise zur anforderungsgerechten Auswahl der Flächenaufbauten mit Hilfe des LAI | 121 |
| 6.2.3. Einfluss der Referenzvariante, Auswahl und Sensitivität der Gewichtungsfaktoren im LAI | 124 |
| 6.3. Zusammenfassung des Gesamtmethodenansatzes | 127 |
| 7. Übertragbarkeit der Methode zur Vorhersage der Akustischen Wirksamkeit auf reale Anregungsfälle | 131 |
| 7.1. Versuchsaufbau Rollenprüfstand | 132 |
| 7.2. Analyse der Luft- und Körperschallanteile | 133 |
| 7.3. Anwendung der Methode zur Vorhersage der Akustischen Wirksamkeit | 135 |
| 7.4. Vergleich zwischen Vorhersage und Messergebnissen im Fahrzeug | 137 |
| 7.5. Anwendung der Methode zur Auswahl des bestgeeigneten Flächenaufbaus | 139 |
| 8. Diskussion und Schlussfolgerung | 143 |
| 8.1. Kritische Diskussion der Methode | 143 |
| 8.2. Schlussfolgerung und Ausblick | 147 |
| Literatur | 149 |
| A. Anhang | 155 |