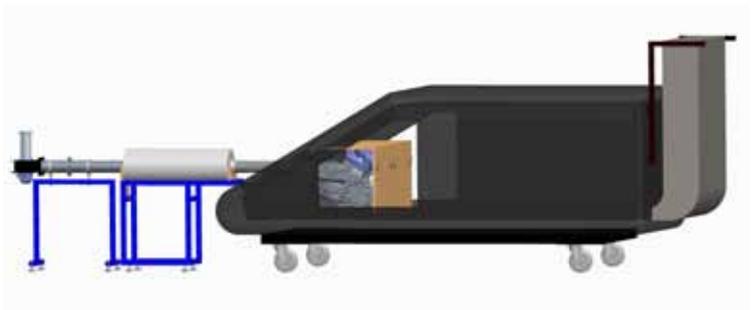


Silke Hohls

## Akustik des Fahrzeugklimatisierungssystems und deren Modellierung bei definierten Randbedingungen



# Akustik des Fahrzeugklimatisierungssystems und deren Modellierung bei definierten Randbedingungen

Der Technischen Fakultät  
der Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg

zur  
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Silke Hohls  
aus Rotenburg (Wümme)

Als Dissertation genehmigt  
von der Technischen Fakultät  
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung: 26.10.2017

Vorsitzender des Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Becker  
Prof. Dr.-Ing. Klaus Genuit

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Prozessmaschinen und  
Anlagentechnik

Band 33

**Silke Hohls**

**Akustik des Fahrzeugklimatisierungssystems und  
deren Modellierung bei definierten Randbedingungen**

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag  
Aachen 2018

**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.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5766-9

ISSN 1614-3906

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik (iPAT) der Universität Erlangen-Nürnberg im Rahmen einer INI.FAU-Kooperation mit der Audi AG. Für die Unterstützung vieler Personen in dieser Zeit möchte ich mich an dieser Stelle recht herzlich bedanken.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Stefan Becker. Vielen Dank für das Schaffen einer sehr angenehmen Arbeitsatmosphäre, in der Du durch Dein Fachwissen und Deine Begeisterung stets konstruktive Vorschläge für meine Arbeit eingebracht hast, aber gleichzeitig viel Freiraum für eigene Ideen und Entscheidungen vorhanden war.

Für die Zweitbegutachtung dieser Arbeit möchte ich Prof. Dr.-Ing. Klaus Genuit danken.

Neben den Gutachtern danke ich dem Prüfungsvorsitzenden Prof. Dr. rer. nat. Nicolas Vogel sowie dem weiteren Prüfer Prof. Dr.-Ing. Kai Willner für die Abnahme der mündlichen Prüfung.

Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schlücker als Lehrstuhlinhaber des iPAT möchte ich für die persönlichen und räumlichen Freiheiten danken, durch die das Arbeiten am Lehrstuhl sehr angenehm war und der Aufbau von raumeinnehmenden Prüfständen ermöglicht wurde.

Im Rahmen der Kooperation möchte ich der Firma Audi für die Bereitstellung von Fahrzeugen, Komponenten sowie von Messeinrichtungen danken. Persönliche Unterstützung habe ich in meiner betreuenden Abteilung I/EK-431 insbesondere durch Dr. Ralf Blaschke und Dr. Thomas Biermeier in Form von konstruktiven fachlichen Diskussionen und Ideen erhalten. Auch Hans Miehling (I/EK-44) hatte immer ein offenes Ohr für fachliche Fragen und Diskussionen. Besten Dank hierfür.

Die technische Umsetzung meiner Ideen und den Aufbau meiner Prüfstände habe ich den Kollegen der Werkstatt (Oliver Weisert, Florian Holler, Alexander Zipprath, Katharina Paul und Bao Dinh Nguyen) sowie den Technikern (Claus Bakeberg, Piotr Reichel-Lesnianski, Werner Sippl, Stefan Grünwald und Werner Polster) zu verdanken. Ihr habt mir nicht nur meine Teile immer sehr schnell gefertigt, sondern auch stets mitgedacht und Verbesserungsvorschläge eingebracht.

Für die Zusammenarbeit mit den Studenten Benedikt Ach, Krista Hertel, Andrea Köhler, Andreas Logdesser und Anna-Lena Treutlein möchte ich mich ebenso bedanken.

Im Rahmen eurer Hiwi-Tätigkeiten sowie Bachelor-, Projekt- und Masterarbeiten habt ihr einen guten Beitrag zu meiner Arbeit geleistet.

Unter den Doktoranden des iPAT möchte ich mich insbesondere bei meinen Bürokollegen Till Heinemann, Sven Münsterjohann, Stefan Riedelmeier und Matthias Springer sowie unserem Ruhepol Cindy - der Büro-Hündin - bedanken. Wir haben in den letzten Jahren sehr viel Zeit in unserem gemeinsamen Büro verbracht und neben einer produktiven Arbeitsatmosphäre mit konstruktiven fachlichen Diskussionen und einer großen Hilfsbereitschaft eine Menge Spaß gehabt und viel gelacht.

Florian Krömer (geb. Zenger) danke ich für die fantastische Zusammenarbeit in unseren gemeinsam betreuten Lehrveranstaltungen und die große Hilfsbereitschaft insbesondere bei messtechnischen Fragen.

Den übrigen Kollegen aus der Arbeitsgruppe und vom iPAT danke ich für eine hilfsbereite und aufgeschlossene Atmosphäre, die das Arbeiten am Lehrstuhl immer sehr angenehm gemacht hat.

Bei meiner Familie möchte ich mich für die jahrelange Unterstützung und Motivation während der Schulzeit, Studium und Promotion bedanken.

Silke Hohls, im Januar 2018

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation und Zielsetzung . . . . .	1
1.2	Stand der Technik . . . . .	2
1.3	Einordnung und Aufbau der Arbeit . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>13</b>
2.1	Strömungsakustische Grundlagen . . . . .	13
2.2	Akustische Grundlagen . . . . .	16
2.2.1	Schallausbreitung im Freifeld . . . . .	16
2.2.2	Schallausbreitung im Raum . . . . .	17
2.2.3	Nachhallzeit . . . . .	24
2.3	Signalverarbeitung in der Akustik . . . . .	26
2.3.1	Fourier Transformation . . . . .	26
2.3.2	Logarithmierte Darstellung . . . . .	30
2.3.3	Frequenzbewertung . . . . .	31
2.3.4	Schallquellenlokalisierung mittels Beamforming . . . . .	32
2.3.5	Psychoakustische Parameter . . . . .	35
2.4	Grundlagen Hörversuche . . . . .	40
2.4.1	Hörversuchdesign . . . . .	40
2.4.2	Versuchsmethodik . . . . .	41
2.5	Versuchsplanung und Auswertung . . . . .	43
<b>3</b>	<b>Fahrzeugklimatisierung und Schallquellen</b>	<b>47</b>
<b>4</b>	<b>Geräuschqualität von Klimatisierungssystemen</b>	<b>53</b>
4.1	Probandenstudie . . . . .	54
4.2	Konsistenz und Konkordanz . . . . .	56
4.3	Präferenzreihenfolge . . . . .	59
4.4	Korrelationsanalyse . . . . .	60
4.5	Quantifizierung Modulationen . . . . .	65
<b>5</b>	<b>Versuchsaufbau und Messtechnik</b>	<b>75</b>
5.1	Versuchsanlagen . . . . .	75
5.1.1	Reflexionsarmer Halbraum . . . . .	75

5.1.2	Funktionsgeräuschepfstand . . . . .	75
5.1.3	Fahrzeugmodell . . . . .	76
5.2	Versuchsaufbau . . . . .	79
5.3	Messaufbau . . . . .	82
5.3.1	Umgebungsparameter und Betriebspunkt . . . . .	82
5.3.2	Mikrofonmessungen . . . . .	83
5.3.3	Nachhallzeitmessungen . . . . .	85
5.3.4	Mikrofonarraymessungen . . . . .	86
5.3.5	Messdatenerfassung . . . . .	87
<b>6</b>	<b>Raumakustik der Messumgebungen</b>	<b>89</b>
6.1	Nachhallzeiten . . . . .	89
6.2	Modalanalyse . . . . .	91
6.2.1	SAE Körper . . . . .	91
6.2.2	Serienfahrzeug 1 . . . . .	99
6.2.3	Serienfahrzeug 2 . . . . .	102
<b>7</b>	<b>Klimageräteakustik bei verschiedenen Betriebs- und Umgebungsrandbedingungen</b>	<b>105</b>
7.1	Betriebspunkte . . . . .	105
7.2	Referenztestfall - Serienfahrzeug 1 . . . . .	106
7.3	Akustikraum . . . . .	114
7.3.1	Auswertung akustischer Parameter . . . . .	114
7.3.2	Schallquellenlokalisation . . . . .	117
7.4	Fahrzeugmodell . . . . .	123
7.5	Vergleich der Schallfelder in verschiedenen Messumgebungen . . . . .	126
7.6	Nachbildung von Serienbedingungen im Fahrzeugmodell . . . . .	130
<b>8</b>	<b>Schallanalyse in Abhängigkeit der Fahrzeuginnenraumparameter</b>	<b>137</b>
8.1	Raumlänge / Raumvolumen . . . . .	137
8.2	Scheibenneigungswinkel . . . . .	142
8.3	Heckform . . . . .	145
8.4	Sitze . . . . .	147
8.5	Zwischenfazit . . . . .	153
<b>9</b>	<b>Validierung der Ergebnisse</b>	<b>155</b>
9.1	Vergleich der Schallfelder in verschiedenen Umgebungen . . . . .	155
9.2	Identifikation der Einflussparameter mit Hilfe eines Versuchsplans . . . . .	160
<b>10</b>	<b>Designentwurf eines Prüfstandes für die akustische Bewertung von Fahrzeugklimatisierungssystemen</b>	<b>175</b>
<b>11</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>179</b>

<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>184</b>
<b>Anhang</b>	<b>196</b>
A Klimageräteakustik bei verschiedenen Betriebs- und Umgebungsrandbedingungen . . . . .	198
A.1 Akustikraum . . . . .	198
A.2 Fahrzeugmodell . . . . .	201
B Schallanalyse in Abhängigkeit von Fahrzeuginnenraumparametern . . .	204
B.1 Scheibenneigungswinkel . . . . .	204
B.2 Heckform . . . . .	206
C Validierung der Ergebnisse . . . . .	210
C.1 Versuchsaufbauten . . . . .	210
C.2 Lautheit . . . . .	211