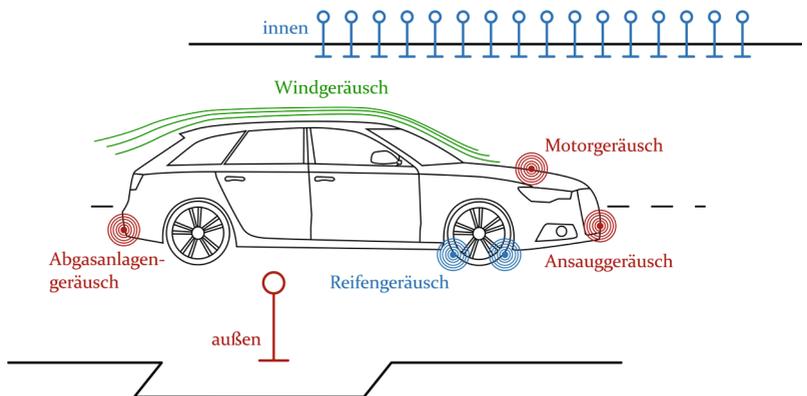


Florian Bock

# Multiphysikalisches Simulationsmodell zur Außengeräuschprognose in der frühen Entwicklungsphase eines Automobils



# **Multiphysikalisches Simulationsmodell zur Außengeräuschprognose in der frühen Entwicklungsphase eines Automobils**

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

zur  
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Florian Manfred Ramon Bock  
aus Fürth

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

Tag der mündlichen Prüfung: 19.09.2019

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

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Becker

Prof. Dr.-Ing. Andreas Wagner

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Prozessmaschinen und  
Anlagentechnik

Band 39

**Florian Bock**

**Multiphysikalisches Simulationsmodell  
zur Außengeräuschprognose in der frühen  
Entwicklungsphase eines Automobils**

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag  
Düren 2019

**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., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7004-0

ISSN 1614-3906

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

*„Ein Problem zu lösen heißt, sich vom  
Problem lösen.“ - J. W. von Goethe*



# Vorwort und Danksagung

Das vorangegangene Zitat hat wie kein anderes mein Promotionsvorhaben geprägt und begleitet. Wie von Goethe angedeutet, bedarf es bei der Lösung von Problemen, ob im Alltag oder aber auch in der Forschung, oft einfach eines Schrittes zurück, um wieder das große Ganze erblicken zu können. Um dann mit geschärftem Blick und neuem Fokus sich wieder dem Kern des vorliegenden Problems zu stellen.

Ich bin sehr dankbar, dass ich Teil eines Promotionsprojekts aus einem synergetischen Zusammenspiel aus Universitäts- und Industriewelt sein durfte. Einerseits betreut durch den Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik (iPAT) der Universität Erlangen-Nürnberg und andererseits unterstützt und geprägt durch die Abteilung „Gesamtfahrzeug Akustik“ der AUDI AG in Ingolstadt. Hierbei möchte ich mich nochmal herzlich bei der AUDI AG, im Speziellen bei den Herren Andreas Geelink, Dr. Stephan Bohlen und Claus Freytag für die Generierung des äußerst vielseitigen und spannenden Forschungsthemas und dem entgegengebrachten Vertrauen bedanken.

Die wissenschaftlich tiefgreifende und fundierte Betreuung durch Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Becker ist hierbei besonders herauszustellen und von meiner Seite zu wertschätzen. Ich bedanke mich für die fortwährende fachliche und überfachliche Unterstützung bei den vielseitigsten Belangen und Anliegen während des Promotionsprojekts, sowie auch für die Diskussionen und Ratschläge abseits des Fachlichen.

Vielen Dank an Prof. Dr.-Ing. Andreas Wagner vom Lehrstuhl für Kraftfahrwesen der Universität Stuttgart für die Übernahme des Mandats des Zweitgutachters. Ein weiterer Dank gebührt Prof. Dr. Sannakaisa Virtanen vom Lehrstuhl für Korrosion und Oberflächentechnik für die Übernahme des Drittgutachtermandats. Zudem bedanke ich mich auch herzlich bei Prof. Dr.-Ing. Michael Wensing vom Lehrstuhl für Technische Thermodynamik für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Seitens der AUDI AG möchte ich mich herzlich bei Frau Kerstin Meißner, Leiterin der Außengeräuschakustik, für die Betreuung und für das stetig andauernde Interesse an den Ergebnissen und dem Fortgang der Arbeit, sowie für jegliche Unterstützung auch abseits des Promotionsprojekts bedanken.

Natürlich wäre die schönste Aufgabe nichts ohne entsprechende Mitstreiter, daher möchte ich besonders meinen langjährigen direkten Arbeitskollegen bei EG-4, Tino Teske und Matthias Lenz für ihre fachliche aber auch persönliche Unterstützung danken. Darüber hinaus danke ich für die meist fachliche Unterstützung und überfachliche Zerstreung meinen Mitstreitern der Wissenschaft Tino Müller, Kilian Dettlaff und Dr. Michael Grabowski. An dieser Stelle sei auch nochmal allen Kollegen des iPAT gedankt.

Darüber hinaus durfte ich auch viel im Bereich der Messtechnik lernen und möchte mich deshalb auch bei den Herren Matthias Pohl, Dr. Dennis de Klerk, Michael Gräfe und Dr. Dejan Arsić der Fa. Müller-BBM VibroAkustik Systeme GmbH für angeregte Diskussionen, ausgeliehene Messtechnik und bedingungslose Hilfsbereitschaft bedanken.

Einen sehr großen Dank möchte ich den sehr guten Abschlussarbeitern Verena Dobmeier und Thomas Neumayer aussprechen, deren Engagement auch dem Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen hat. Ein hohes Maß an Dank gilt auch den übrigen beteiligten Mitarbeitern der AUDI AG welche großen Anteil an der experimentellen Ausgestaltung im Projekt und somit auch am Gesamterfolg der Arbeit hatten.

Zu guter Letzt möchte ich noch meiner Mutter Petra und meinem Vater Walter danken, denn ohne euch gäbe es mich nicht und ohne eure bedingungslose Liebe und Unterstützung wäre mir diese anspruchsvolle Aufgabe deutlich schwerer gefallen. Für die andauernde Bestärkung, das unendliche Verständnis und die nötige Zerstreung danke ich meinen Freunden und meiner Familie.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>v</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>xiii</b>
<b>Abstract</b>	<b>xv</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung und Motivation . . . . .	1
1.2 Stand der Forschung . . . . .	4
1.3 Beitrag der Arbeit . . . . .	10
1.4 Aufbau der Arbeit . . . . .	12
<b>2 Grundlagen der Maschinenakustik</b>	<b>13</b>
2.1 Relevante strömungsmechanisch-induzierte Geräusentstehung . . . . .	14
2.2 Relevante mechanisch-induzierte Geräusentstehung . . . . .	17
<b>3 Transferpfadanalyse</b>	<b>19</b>
3.1 Rechnerische Bestimmung von Übertragungsfunktionen . . . . .	20
3.2 Experimentelle Transferpfadanalyse . . . . .	23
<b>4 Fahrzeugakustik</b>	<b>29</b>
4.1 Außengeräuschrelevante Schallquellen an einem KFZ . . . . .	29
4.1.1 Akustische Phänomene des Reifens . . . . .	31
4.1.2 Akustische Phänomene des Motors . . . . .	35
4.1.3 Akustische Phänomene der Ansauganlage . . . . .	36
4.1.4 Akustische Phänomene der Abgasanlage . . . . .	37
4.1.5 Aeroakustische Phänomene . . . . .	39
4.2 Außengeräuschrelevante Messverfahren . . . . .	40
4.2.1 Messverfahren der gesetzlichen Vorbeifahrt auf Basis von ISO 362-1	42

4.2.2	Neues Messverfahren mittels simulierter Vorbeifahrt nach ISO 362-3	48
<b>5</b>	<b>Versuchsaufbau, Messmethoden und Prüfumgebungen</b>	<b>53</b>
5.1	Technische Anforderungen an die relevanten Prüfumgebungen . . . . .	53
5.1.1	Technische Anforderungen an eine Außengeräusch-Messstrecke . . . . .	53
5.1.2	Technische Anforderungen an einen Außengeräusch-Prüfstand . . . . .	60
5.2	Relevante Komponenten-Messverfahren . . . . .	71
5.2.1	Messung von Reifengeräuschen . . . . .	71
5.2.2	Messung der Motorabstrahlung . . . . .	75
5.2.3	Messung der Abgasanlagenmündung . . . . .	79
5.3	Relevante Gesamtfahrzeug-Messverfahren zur Teilschallquellenanalyse . . . . .	85
5.3.1	Der Stand der Technik – „Die Fenstermethode“ . . . . .	85
5.3.2	Die Transferpfadanalyse im Vergleich zur Fenstermethode . . . . .	88
5.3.3	Rechnerische Erhöhung der Ortsauflösung der OTPA . . . . .	92
<b>6</b>	<b>Gesamtfahrzeugsimulationsmodell und Teilmodelle</b>	<b>97</b>
6.1	Anforderungen an ein Gesamtsimulationsmodell zur Außengeräuschprognose von PKWs . . . . .	97
6.2	Längsdynamik . . . . .	101
6.2.1	Anforderungen an ein Längsdynamik-Modell . . . . .	101
6.2.2	Aufbau des Längsdynamik-Modells . . . . .	102
6.2.2.1	Sauger-Motor-Modell . . . . .	107
6.2.2.2	Kompressor-Motor-Modell . . . . .	111
6.2.2.3	Abgasturbolader-Motor-Modell . . . . .	116
6.2.2.4	Elektro-Motor-Modell . . . . .	123
6.2.3	Integration des Längsdynamik-Modells in die Gesamtsimulation . . . . .	123
6.3	Reifen-Fahrbahn-Akustik . . . . .	126
6.3.1	Anforderungen an ein Reifen-Fahrbahn-Modell . . . . .	126
6.3.2	Aufbau des Reifen-Fahrbahn-Modells . . . . .	130
6.3.3	Integration des Reifen-Modells in die Gesamtsimulation . . . . .	133
6.4	Motor-Akustik . . . . .	133
6.4.1	Anforderung an ein Motor-Modell . . . . .	133
6.4.2	Aufbau des Motor-Modell . . . . .	138
6.4.3	Integration des Motor-Modells in die Gesamtsimulation . . . . .	143

---

6.5	Abgasanlagen-Akustik . . . . .	146
6.5.1	Anforderung an ein Abgasanlagen-Modell . . . . .	146
6.5.2	Aufbau des Abgasanlagen-Modells . . . . .	149
6.5.2.1	Einfluss des Erreichens des Betriebszustands . . . . .	151
6.5.2.2	Einfluss der Temperatur . . . . .	154
6.5.2.3	Einfluss auf das Lastverhalten . . . . .	155
6.5.2.4	Erstellung des Referenzkennfelds . . . . .	157
6.5.2.5	Ableitung des parametrisierten Kennfelds aus dem Referenzkennfeld . . . . .	158
6.5.2.6	Bestimmung des simulierten Nahfeld-Mündungspegel . . . . .	161
6.5.3	Integration des Abgasanlagen-Modells in die Gesamtsimulation . . . . .	162
<b>7</b>	<b>Validierung des Simulationsmodells</b>	<b>165</b>
7.1	Versuchsfahrzeug und reale Messungen für Validierung des Gesamtsimulationsmodells . . . . .	165
7.2	Längsdynamik-Modell . . . . .	168
7.3	Reifen-Akustik-Modell . . . . .	172
7.4	Motor-Akustik-Modell . . . . .	172
7.5	Abgasanlagen-Akustik-Modell . . . . .	174
7.6	Prognosegüte vs. Zeitersparnis des Gesamtsimulationsmodells . . . . .	176
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Schlussfolgerung</b>	<b>183</b>
8.1	Zusammenfassung . . . . .	183
8.2	Ausblick . . . . .	185
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>187</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>203</b>
A.1	Herleitung der homogenen und inhomogenen Wellengleichung . . . . .	203