

# Entwicklung eines Analysewerkzeugs zur Erkennung und Bewertung von störenden Geräuschanteilen im Fahrzeuginnenraum

Christian Schumann<sup>1</sup>, Florian Doleschal<sup>2</sup>, Stefan Pischinger<sup>1</sup> und Jesko Verhey<sup>2</sup>

<sup>1</sup> VKA der RWTH Aachen, 52074 Aachen, E-Mail: schumann\_c@vka.rwth-aachen.de

<sup>2</sup> Otto-von-Guericke-Univ. Magdeburg, Abt. f. Experim. Audiologie, 39106 Magdeburg, E-Mail: florian.doleschal@med.ovgu.de

## Einleitung

Der Qualitätseindruck von Kraftfahrzeugen wird maßgeblich von den verbrennungsmotorischen Geräuschen beeinflusst. Moderne Motoren sind zwar durch eine gezielte Akustikentwicklung meistens recht leise, dadurch treten jedoch einzelne Störgeräusche stärker in den Vordergrund [1]. Das Fahrzeuginnengeräusch ist dabei die für den Nutzer relevante Beurteilungsgröße. Um die Relevanz motorischer Störgeräusche im Fahrzeuginnenraum zu bewerten, wurde das vom BMWi geförderte Forschungsvorhaben „Motorstörgeräusche im Innenraum“ (Nr. 1274) von den beiden oben genannten Forschungseinrichtungen durchgeführt. Das Ergebnis des Forschungsvorhabens ist ein Berechnungswerkzeug, welches die Angenehmheit einzelner Störgeräuschkomponenten im Innenraum quantifiziert, den Störgeräuschcharakter (impulshaltig, tonhaltig, rauschartig) ermittelt und der verursachenden Komponente (Verbrennung, Injektortickern, Turboladerpfeifen und Getriebeheulen) zuordnet. Im Folgenden wird die Methode grundlegend dargelegt und anhand von Beispielen vorgestellt.

## Methode

Um den akustischen Einfluss einer Komponente des Verbrennungsmotors bestimmen zu können, muss das Motorkomponentengeräusch von Quereinflüssen befreit, d. h. aus dem Gesamtgeräusch herausgefiltert werden. Das Verfahren zur Extraktion und Zuordnung von Motorgeräuschkomponenten ist in der zweiten Ebene von oben in Abbildung 1 beschrieben. Die dritte Ebene in Abbildung 1 enthält die psychoakustische Bewertung der Teil- sowie des Gesamtgeräusches.

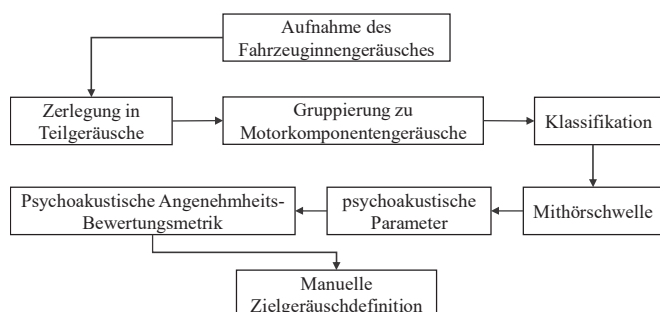


Abbildung 1: Übersicht der gesamten Methode

Der Lösungsansatz wird im Folgenden erläutert.

Zuerst muss der Benutzer die Daten eingeben. Die einzigen erforderlichen Eingabedaten sind das erfasste Fahrzeuginnengeräusch, die Anzahl der Zylinder und, falls verfügbar, die Motordrehzahl. Der nächste Schritt ist die

Trennung des gesamten Fahrzeuginnengeräusches in einzelne Geräuschfragmente. In einem Spektrogramm (mit hoher Frequenzauflösung) sind tonhaltige Geräuschkomponenten typischerweise als Linien sichtbar. Somit ist die Aufgabe der Erkennung von tonhaltigen Geräuschkomponenten gleichbedeutend mit der Aufgabe, geschlossene Liniensegmente im Spektrogramm zu erkennen. Daher ist es naheliegend, das Spektrogramm als Bild zu betrachten und Bildverarbeitungsmethoden, insbesondere die Linienerkennung, anzuwenden. Die Tonhaltigkeit wird mittels des Ton-Rausch-Verhältnisses (engl. Tone-Noise-Ratio, TNR) abgeschätzt.

Die Detektion von impulshaltigen Geräuschen wird durch die nichtnegative Matrixfaktorisierung (NNMF) in Kombination mit einer Bewertung der Impulshaltigkeit erreicht. Die NNMF erkennt sich zeitlich wiederholende Muster im Spektrogramm und speichert diese in einzelnen Geräuschfragmenten [2]. Mittels der Bewertung der Korrelation im Zeit- und Frequenzbereich werden die Geräuschfragmente zu Störgeräuschen gruppiert. Anschließend ermöglichen ausgewählte Attribute die Klassifizierung der gruppierten Störgeräusche zu Motorkomponenten bzw. -prozessen (z. B. Verbrennung). Die Datenbank zur Ermittlung der charakteristischen Attribute ausgewählter Motorgeräuschkomponenten wurde im Rahmen des Forschungsprojektes erstellt.

Die Hörbarkeit der einzelnen Komponenten wird anschließend mit Hilfe eines auditorischen Verdeckungsmodells bestimmt. Dieses Modell bestimmt die Mithörschwelle jeder zuvor detektierten Komponente vor ihrem jeweiligen Hintergrundgeräusch. Liegt der tatsächliche Pegel der betreffenden Komponente über ihrer Mithörschwelle, so ist diese im Gesamtgeräusch hörbar und somit für den akustischen Optimierungsprozess relevant. Liegt der tatsächliche Pegel unter der jeweiligen Mithörschwelle, ist die entsprechende Komponente durch das Hintergrundgeräusch verdeckt und kann in der folgenden akustischen Optimierung vernachlässigt werden. Der Abschnitt „Bestimmung der auditorischen Verdeckung“ beschreibt die Struktur des Modells sowie dessen Anwendung im Kontext von Fahrzeuginnengeräuschen. Anschließend werden die durch das Modell bestimmten Mithörschwellen mit experimentell bestimmten Werten verglichen und diskutiert.

Nach der Bestimmung der Hörbarkeit wird die Angenehmheit des Gesamtgeräusches sowie einzelner Geräuschkomponenten mit Hilfe von Bewertungsmetriken bestimmt. Diese basieren auf einer log-linearen Regressionsanalyse zwischen objektiv bestimmten psychoakustischen Parametern (z.B. Lautheit und

Schärfe) sowie der zuvor experimentell bestimmten Angenehmheit. Auf die zugehörigen Hörversuche sowie die Bestimmung der jeweiligen Bewertungsmetriken wird ausführlich im Beitrag „Trennung, Zuordnung und psychoakustische Bewertung von Fahrzeuginnengeräuschen“ eingegangen.

### Detektion der Geräuschkomponenten

Die Detektion tonhaltiger Geräusche erfolgt mittels des TNR. Zur Berechnung des TNR wird die Gesamtenergie eines schmalbandigen Frequenzbereichs jedes Frequenzblocks im Spektrogramm durch die Gesamtenergie der entsprechenden Terz dividiert, was nahezu der kritischen Bandbreite entspricht [3]. Der Benutzer kann sich die ergebende TNR-Map über die Benutzeroberfläche anzeigen lassen. Abbildung 2 zeigt diese exemplarisch für die Mikrofonaufnahme eines Hochlaufs.

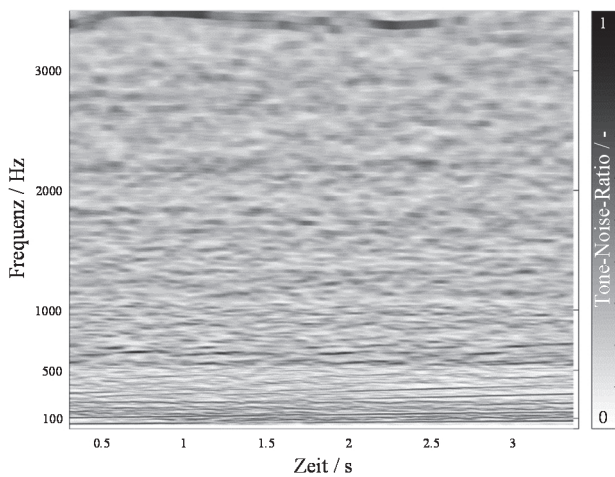


Abbildung 2: Tone-Noise-Map

In dem gezeigten Beispiel ist die Unwuchtordnung des Turboladers deutlich zu erkennen und ist ebenfalls hörbar. Parallel zur TNR-Map werden die Linienelemente im Ausgangsspektrum mittels Schwellwertanwendung identifiziert. Eine Kombination der beiden Spektrogramme ermöglicht eine detaillierte Gruppierung der tonhaltigen Geräusche. Anschließend erfolgt eine erste Zuordnung der Geräuschkomponenten. Zunächst bestimmt ein Verfahren, ob der zeitliche Verlauf der Mittenfrequenz der Komponente proportional zur Kurbelwellendrehzahl ist. Dementsprechend werden die tonalen Geräusche in Geräusche mit drehzahlabhängiger Mittenfrequenz (z. B. Getriebeheulen) und drehzahlunabhängiger Mittenfrequenz (z. B. Turbolader oder Rauschen) unterteilt. Abbildung 3 zeigt ein solches Ergebnis.

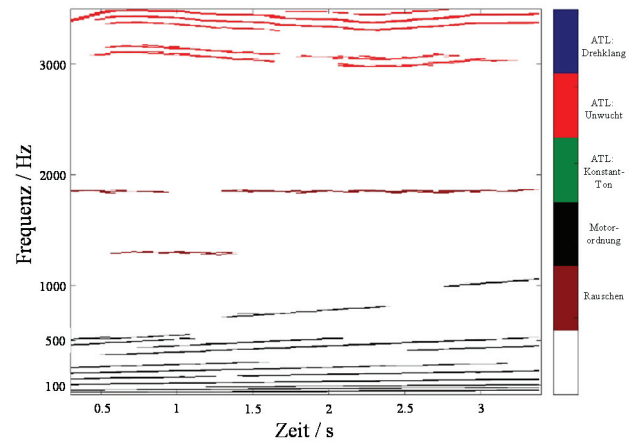


Abbildung 3: Detektierte Motorgeräuschkomponenten

Als Eingangssignal wird das gemessene Körperschallsignal des Turboladers aus demselben Hochlauf wie zuvor angewendet. Das Spektrum mit identifizierten Liniensegment kann ebenfalls über die Benutzeroberfläche abgefragt werden. Anschließend evaluiert ein Klassifikator, ob es sich bei dem drehzahlabhängigen Komponentengeräusch um Getriebeheulen handelt. Die Einzelgeräusche werden dann für die Erzeugung eines eigenen Zielgeräusches im Mischpult abgelegt. Nachdem die tonhaltigen Geräusche, welche hörbar sind, aus dem Gesamtgeräusch separiert wurden, werden aus dem Restgeräusch impulshaltige Geräusche extrahiert.

Dies erfolgt mittels der nichtnegative Matrixfaktorisierung (NNMF). Das Grundprinzip der NNMF ist es, zeitlich wiederkehrende Anteile im Spektrum zu finden. Dabei wird das Ausgangsspektrum  $V$  durch die Summe von Teilspektren approximiert. Die Teilspektren  $V_i$  werden durch den Frequenzbasisvektor  $W_i$  und dem Aktivierungsvektor  $H_i$  beschrieben [2].

$$V \approx \sum V_i = \sum W_i H_i \quad (1)$$

Dieses Prinzip ausnutzend, ermöglicht die NNMF intermittierende Geräusche wie Verbrennungsnageln oder Injektortickern zu extrahieren. Die Teilspektren können mittels des Phasenspektrums invertiert bzw. auralisiert werden. Da die Anzahl der Komponenten zu Anfang nicht bekannt ist, wird das Ausgangsspektrum in mehr Komponenten als erwartet zerlegt und anschließend mittels des k-Mean-Algorithmus gruppiert. Die Gruppenanzahl wird durch eine Optimierung der Gruppierungsqualität erreicht. Die Gruppierungsqualität wird mittels des Silhouettenkoeffizienten quantifiziert. Ein Ergebnis zeigt Abbildung 4.

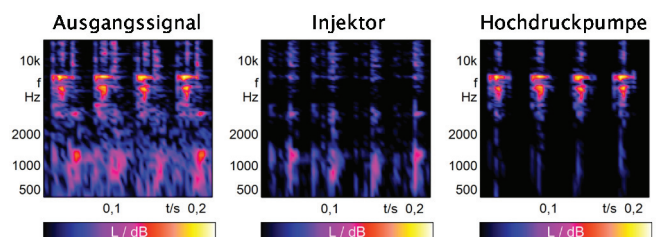


Abbildung 4: Detektierte Motorgeräuschkomponenten

In dem gezeigten Beispiel wurde das Injektorgeräusch mit einem dominanten Frequenzanteil bei 1200 Hz sehr gut von dem Tickern der Hochdruckpumpe (8 kHz) getrennt. Im Vergleich zu herkömmlichen Bandpassfilter wird auch die Überlappung bei 3 kHz auf die Komponenten korrekt aufgeteilt. Eine Klassifizierung der Teilgeräusche erfolgt anschließend unter anderem mittels des Frequenzschwerpunktes, Schalldruckpegels und der Korrelation aufeinanderfolgender Impulse. Die Einzelgeräusche werden ebenfalls im Mischpult bereitgestellt.

## Experimentelle Mithörschwellenbestimmung

Ein wesentlicher Teil des Projektes ist die Bestimmung der Hörbarkeit der zuvor extrahierten Geräuschkomponenten im Gesamtgeräusch. Zur Verifizierung der Ergebnisse des auditorischen Verdeckungsmodells wurden die jeweiligen Mithörschwellen zusätzlich experimentell bestimmt.

Die experimentelle Bestimmung erfolgte mit Hilfe eines adaptiven 3AFC-Verfahrens in Verbindung mit einer 1-Up/2-Down-Regel: Hierbei wurden der Versuchsperson nacheinander drei Schalle dargeboten, wobei einer der Schalle das zu untersuchende Zielgeräusch und den jeweiligen Verdecker und die anderen nur den Verdecker enthalten. Die Abschätzung der Mithörschwelle des Zielgeräuschs erfolgte durch Mittelung der letzten sechs Umkehrpunkte.

Im Rahmen des Projekts „Motorstörgeräusche im Innenraum“ wurde dieses Verfahren zur Bestimmung der Mithörschwellen der tonhaltigen Zielgeräusche Getriebeheulen und Turbolader sowie der impulshaltigen Zielgeräusche Verbrennungsgeräusch und Injektortickern verwendet, die im Rahmen der zuvor beschriebenen Geräuschtrennung aus dem Gesamtgeräusch extrahiert wurden. Als Verdecker fungiert hierbei das Restgeräusch nach Subtraktion des entsprechenden Zielgeräuschs.

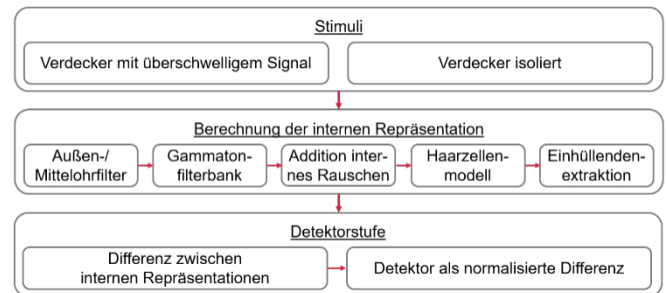
Die Stimuli wurden mit Hilfe der Soundkarte RME Fireface UC D/A-konvertiert und mittels des Lautsprechers LOUD Technologies HR824 MK2 wiedergegeben. Die Bestimmung der Mithörschwellen erfolgte durch Mittelung der Ergebnisse von jeweils fünf normalhörenden Probanden (Hörverlust max. 20 dB HL im Frequenzbereich von 125 Hz bis 8 kHz), deren Schwellen für jedes Geräusch je dreimal bestimmt und anschließend gemittelt wurden.

## Auditorisches Verdeckungsmodell

Die Hörbarkeit der einzelnen Geräuschkomponenten wird mit Hilfe eines auditorischen Verdeckungsmodells bestimmt [4]. Das Modell schätzt die Mithörschwelle jeder einzelnen Komponente mit Hilfe des zuvor beschriebenen 3AFC-Verfahrens ab.

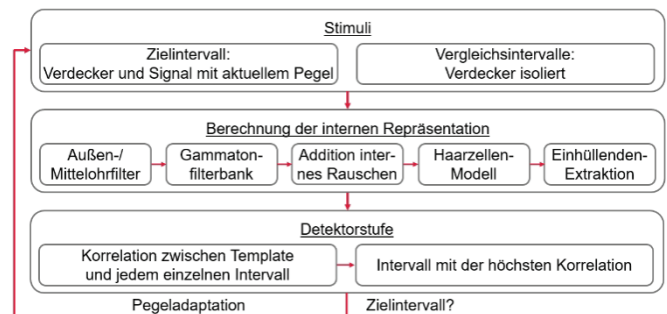
Zunächst wird ein Template erstellt (Abbildung 5), das im späteren Adaptationsprozess als Vergleichsvorlage dient. Hierzu wird eine interne Repräsentation sowohl vom isolierten Verdecker, als auch vom Verdecker mit überschwelligem Zielsignal (z.B. Getriebeheulen) berechnet: Nach der Außen- und Mittelohrfilterung wird das Signal mittels einer Gammatonfilterbank gefiltert. Die Addition eines internen Rauschens vermeidet, dass beliebig kleine

Unterschiede zwischen den Intervallen vom Modell detektiert werden können.



**Abbildung 5:** Erstellung des Templates als normalisierte Differenz der internen Repräsentationen von Verdecker mit überschwelligem Signal und isoliertem Verdecker

Anschließend simuliert ein Haarzellenmodell die Verarbeitung innerhalb der Cochlea durch eine Halbwellengleichrichtung sowie eine Tiefpassfilterung. Die normalisierte Differenz zwischen beiden internen Repräsentationen dient als Vorlage für den in Abbildung 6 dargestellten Adaptationsprozess.



**Abbildung 6:** Adaptive Prozedur zur Bestimmung der Mithörschwelle.

Für jeden Adaptationsschritt wird hierbei zweimal eine interne Repräsentation des isolierten Verdeckers sowie einmal des Verdeckers und dem jeweiligen Zielgeräusch mit dem aktuellen Pegel berechnet.

Die anschließende Detektorstufe vergleicht die drei Intervalle mit dem zuvor berechneten Template und wählt das Intervall mit der höchsten Korrelation aus. Die Adaptation des Pegels sowie die Bestimmung der Mithörschwelle erfolgt analog zum zuvor durchgeführten Hörversuch.

Im Folgenden wird die Prozedur auf die tonhaltige Geräuschkomponente Getriebeheulen (Abbildung 7) angewandt, die aus einer oder mehreren schmalbandigen Komponenten besteht und häufig bei Beschleunigungsvorgängen sowie im Schubetrieb auftritt. Diese Komponente wird meist durch einen breitbandigen rauschhaften Verdecker maskiert, der in manchen Fällen andere tonhaltige Komponenten (z.B. Turbolader) enthält.

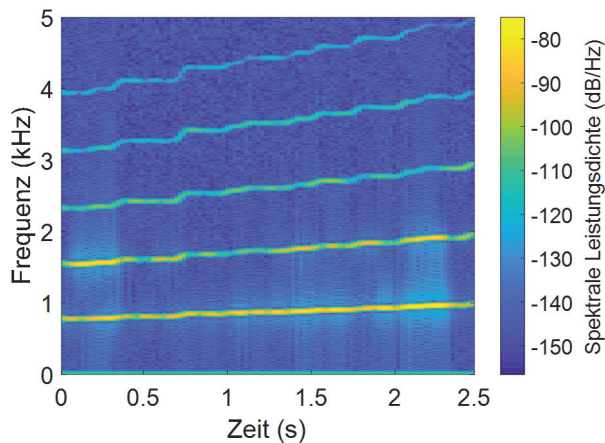


Abbildung 7. Spektrogramm eines typischen extrahierten Getriebeheulens mit mehreren Ordnungen.

Abbildung 8 zeigt die Vorhersagen des auditorischen Verdeckungsmodells sowie die Mittelwerte fünf normalhörender Probanden (siehe Abschnitt Experimentelle Mithörschwellenbestimmung) am Beispiel der tonhaltigen Geräuschkomponente Getriebeheulen.

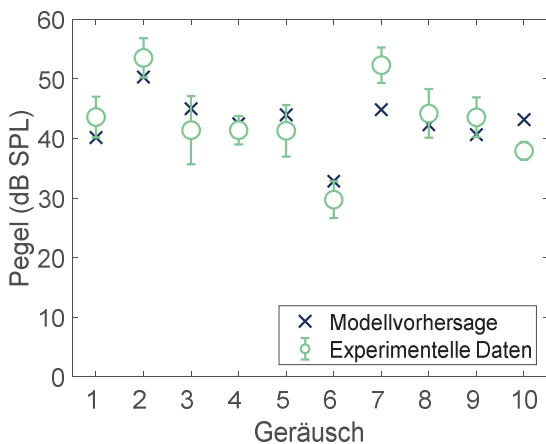


Abbildung 8: Vorhersage der Mithörschwellen der Komponente Getriebeheulen durch das Verdeckungsmodell und Mittelwerte fünf normalhörender Probanden.

Die Vorhersagen des auditorischen Verdeckungsmodells liegen meist innerhalb einer interindividuellen Standardabweichung der Probanden. Daraus folgt, dass das auditorische Verdeckungsmodell in der Lage ist, auch für komplexe Signale die jeweilige Mithörschwelle zu bestimmen.

Die Hörbarkeit der einzelnen Komponenten wird im nachfolgend beschriebenen Berechnungswerkzeug dargestellt. In Verbindung mit der ebenfalls dargestellten Abschätzung der Angenehmheit der jeweiligen Geräuschkomponente (siehe Beitrag „Trennung, Zuordnung und psychoakustische Bewertung von Fahrzeuginnengeräuschen“) können im nachfolgenden akustischen Optimierungsprozess gezielt Komponenten ausgewählt werden, deren Optimierung zu einer angenehmeren Wahrnehmung des Fahrzeuginnengeräuschs beiträgt.

## Das Berechnungswerkzeug

Das Berechnungswerkzeug ermöglicht es dem Benutzer, ein gemessenes Luftschallsignal als Wave-Datei, MATLAB- oder AFX-Datei zu laden. Wahlweise kann aber auch das

Fahrzeuginnengeräusch mit einem kalibrierten USB-Mikrofon gemessen werden. So können die Methoden direkt angewendet werden. Die Abbildung 9 zeigt die grafische Benutzeroberfläche (GUI).

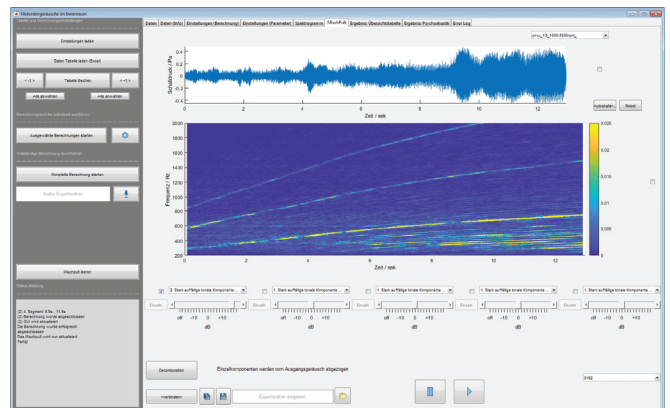


Abbildung 9: Oberfläche des Berechnungswerkzeuges

Die Kernfunktion des Berechnungswerkzeuges ist das hier abgebildete Mischpult. Damit können Motorgeräuschkomponenten individuell gewichtet und zu einem Zielgeräusch kombiniert werden. Sowohl die Teilgeräusche als auch das neu gewichtete Zielgeräusch können als Wave- und mat-Dateien exportiert werden.

## References

- [1] Genuit, K. and Fiebig, A., “Die Relevanz der Psychoakustik für die E-Mobility,”
- [2] Févotte, C., Bertin, N., and Durrieu, J.-L., “Nonnegative Matrix Factorization with the Itakura-Saito Divergence: With Application to Music Analysis,” *Neural Computation* 21(3):793–830, 2009, doi:10.1162/neco.2008.04-08-771.
- [3] Fastl, H. and Zwicker, E., “Psychoacoustics: Facts and models,” Springer Series in Information Sciences, vol. 22, Springer, Berlin, ISBN 978-3-540-68888-4, 2007.
- [4] Dau, T., Püschel, D., and Kohlrausch, A., “A quantitative model of the “effective” signal processing in the auditory system. I. Model structure,” *The Journal of the Acoustical Society of America* 99(6):3615–3622, 1996, doi:10.1121/1.414959.

## Danksagung

Das Forschungsvorhaben (Nr. 1274) wurde am Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen der RWTH Aachen University unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger und am Abteilung für Experimentelle Audiologie der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg unter der Leitung von Prof. Dr. Jesko Verhey durchgeführt. Es wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e. V. (IGF-Fördernr. 19426 BG) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages finanziell gefördert. Die Autoren bedanken sich bei den Fördergebern, der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e. V. und allen Projektbeteiligten für die Unterstützung des Vorhabens.