

VERFASST VON



**Katja Fröhlingendorf,
M. Sc.**

ist Wissenschaftliche Mitarbeiterin des Lehrstuhls für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme (TME) der RWTH Aachen University.



**Florian Doleschal,
M. Sc.**

ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung für Experimentelle Audiologie (EXA) der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (OVGU).



**Prof. Dr.-Ing.
Stefan Pischinger**

ist Leiter des Lehrstuhls für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme (TME) der RWTH Aachen University.



Prof. Dr. Jesko L. Verhey

ist Leiter der Abteilung für Experimentelle Audiologie (EXA) der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (OVGU).

Effiziente Analyse des Innengeräuschs von Elektrofahrzeugen

Da die hochfrequenten Geräuschanteile des elektrischen Antriebsstrangs im Innenraum häufig als unangenehm empfunden werden, ist eine Methode zur effizienten Analyse unabdingbar. Im Projekt „eMSI – Störgeräusche im Fahrzeuginnenraum mit elektrifizierten Antrieben“ (FVV-Nr. 1369) wurde an der RWTH Aachen University eine Methode zur automatisierten Trennung des Innengeräuschs von Elektrofahrzeugen sowie zur Zuordnung der Geräuschanteile zu den verursachenden Komponenten entwickelt. Und Forschende an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg schufen ein Modell zur Beurteilung der psychoakustischen Angenehmheit.



© TME

1	GERÄUSCHMESSUNGEN
2	AUTOMATISIERTE GERÄUSCHTRENNUNG UND -ZUORDNUNG
3	VORHERSAGE DER HÖRBARKEIT EINZELNER GERÄUSCHKOMPONENTEN
4	VORHERSAGE DER ANGENEHMHEIT
5	MASSNAHMEN ZUR VERBESSERUNG DER ANGENEHMHEIT
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

1 GERÄUSCHMESSUNGEN

Mit zunehmender Elektrifizierung des Antriebsstrangs und Wegfall des Verbrennungsmotors als maskierende Komponente entstehen neue Herausforderungen in der Fahrzeugakustik. Hochfrequente tonale Geräuschanteile des elektrischen Antriebsstrangs werden hörbar. Diese beeinflussen die empfundene Angenehmheit des Gesamtgeräuschs im Innenraum oft negativ. Zudem sind Reifen- und Windgeräusche prominent. Die akustische Optimierung ist ein komplexer und zeitintensiver Prozess, der auf einer genauen Identifikation der Verursacher der Geräuschanteile basiert. Daher muss das Fahrzeuginnengeräusch bereits im Entwicklungsprozess auf effiziente Weise analysiert werden können. Die am Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme (TME) der RWTH Aachen University durchgeführten Messungen zur automatisierten Geräuschtrennung und -zuordnung erfolgten mittels

Mikrofonen und Beschleunigungsaufnehmern während verschiedener Beschleunigungs- und Ausrollmanöver. Sie wurden an elf Elektro- und Hybridfahrzeugen mit unterschiedlichen Motor-typen ausgeführt. Die Beurteilung der Angenehmheit erfolgte in der Abteilung für experimentelle Audiologie (EXA) der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (OVGU).

2 AUTOMATISIERTE GERÄUSCHTRENNUNG UND -ZUORDNUNG

Die automatisierte Trennung des Innengeräuschs erfolgt komponentenindividuell und basiert auf einer Geräuschdetektion mittels Bildverarbeitung. Die tonalen Anteile des Elektromotors entstehen vornehmlich durch die elektromagnetischen Kräfte im Luftspalt und die des Getriebes durch die Zahneingriffsfrequenzen.

BILD 1 zeigt die detektierten Geräusche einer Mikrofonmessung an der linken Fahrerohrposition während eines Beschleunigungsmanövers als Wandlung eines Ordnungsspektrogramms in ein Intensitäts- und Binärbild. Die Ordnungen sind drehzahlabhängig und damit im Ordnungsspektrogramm als Horizontale zu erkennen, **BILD 1** (links). Durch lokale Normalisierung des Spektrogramms wird ein Intensitätsbild, **BILD 1** (Mitte), abgeleitet und dieses durch Binarisierung mittels eines fixen Schwellwerts in ein Binärbild gewandelt, **BILD 1** (rechts). Die Detektion der Horizontalen erfolgt im Binärbild durch die Hough-Transformation: Linien werden in Punkte transformiert, sodass die Komplexität auf die Bestimmung der Punktmaxima reduziert wird. Je deutlicher eine Linie ist, desto eindeutiger ist das Maximum im Hough-Raum [1]. Im Binärbild ist zu erkennen, dass sämtliche im Spektrogramm sichtbaren Ordnungen mithilfe der Hough-Transformation zuverlässig detektiert werden können. Die Detektionsgenauigkeit liegt bei 94 %. Die automatisierte Zuordnung der detektierten Ordnungen zu den verursachenden Komponenten Elektromotor und Getriebe erfolgt durch einen Entscheidungsbaum mit vorangehender Parameterauswahl mittels der Methode der Sequential Feature Selection. Durch diese optimierte Auswahl der beschreibenden statistischen Parameter ergibt sich eine finale Klassifikationsgenauigkeit von 86 %. Für Fahrzeuge mit Asynchronmotor muss

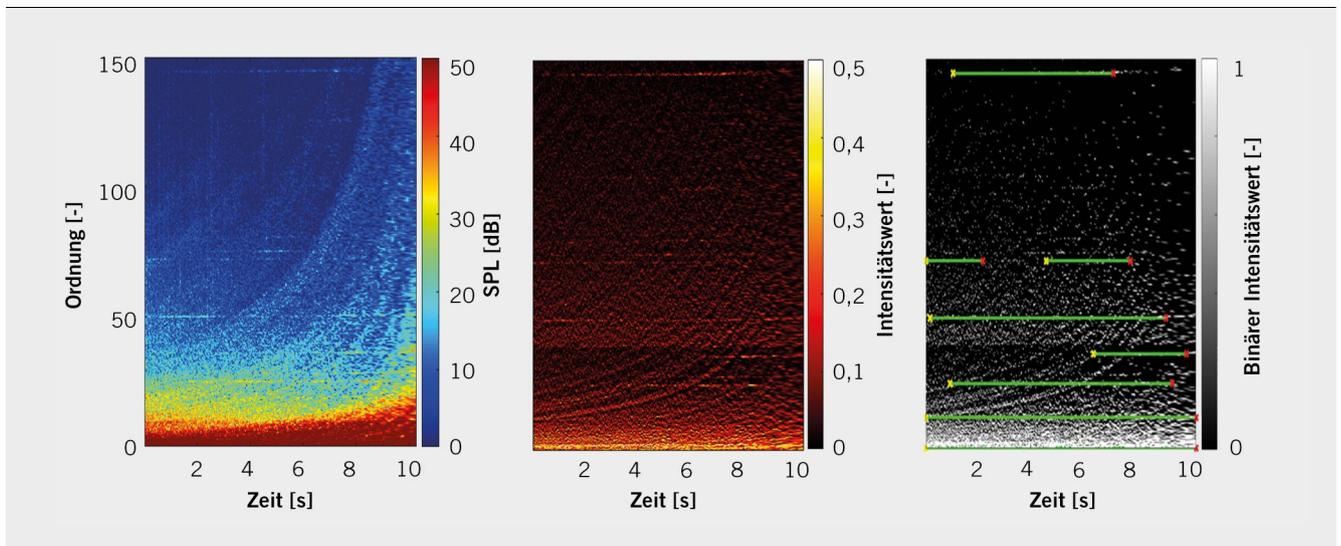


BILD 1 Ordnungsspektrogramm mit Skala des Schalldruckpegels (Sound Pressure Level, SPL) (links), Intensitätsbild (Mitte) und Binärbild (rechts) © TME

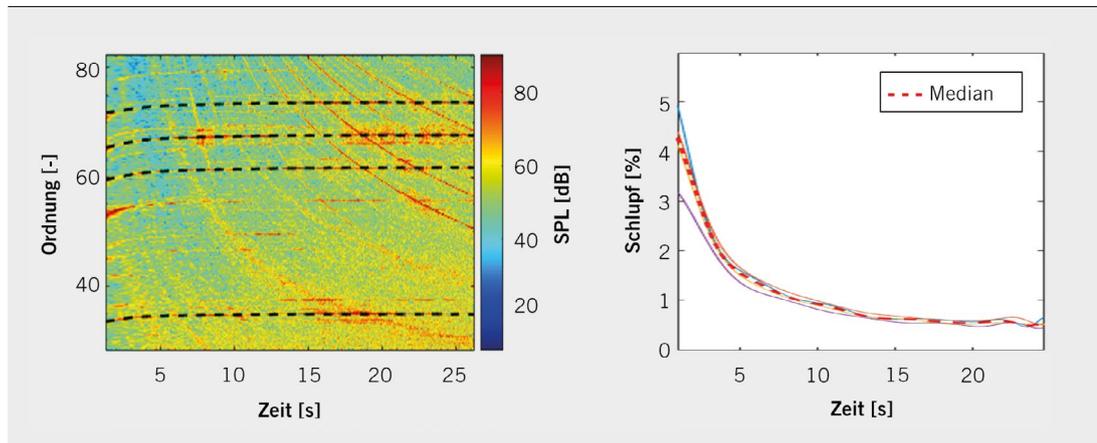


BILD 2 Ordnungs-
spektrogramm für
einen Asynchronmotor
(links) und daraus
abgeleiteter Schlupf-
verlauf (rechts)
(© TME)

zusätzlich der Schlupf berücksichtigt werden. In einem Ordnungs-
spektrogramm basierend auf der Drehzahl vor Schlupf verlaufen
die tonalen Anteile nicht horizontal, sondern mit konkaver Krü-
mung abhängig vom Schlupf, **BILD 2** (links). Mittels einer entwik-
kelten iterativen Methode kann der Schlupf auf Basis einer
Geräuschmessung und darin gefundenen tonalen Ordnungen

bestimmt werden. **BILD 2** (rechts) stellt den Schlupfverlauf dar.
Nach Korrektur des Ordnungsspektrogramms mittels des Schlupfs
ist der zuvor beschriebene Prozess zur automatisierten Trennung
und Zuordnung der Elektromotor- und Getriebeordnungen anwend-
bar und resultiert in einer Detektionsgenauigkeit von 93 % sowie
einer Klassifikationsgenauigkeit von 88 %. Die automatisierte




**Die digitale
Unternehmenslizenz**



NEU!
Direkt online
bestellen
und bis zu
60 % Rabatt
sichern.

Fundiertes Fachwissen für Ihr Team!

Wir beraten Sie gern:
Ramona Wendler
Tel. 0611 7878-126 | magazinlizenzen@springernature.com



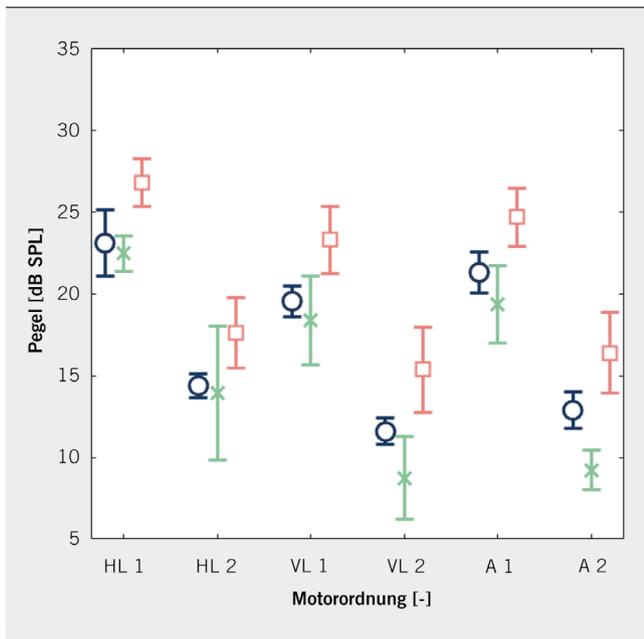


BILD 3 Mittelwerte und Standardabweichungen der Mithörschwelle des Perzeptionsmodells (blau), der Critical Masking Ratio (rot) und des Experiments (grün) [7] für jeweils zwei synthetische Motorordnungen in den Fahrzuständen Hochlauf (HL), Volllasthochlauf (VL) und Ausrollen (A) (© EXA)

Detektion der tonalen Anteile des Inverters erfolgt ebenfalls mit der Hough-Transformation. Aufgrund der eindeutigen geometrischen Zusammenhänge eines Invertergeräuschs im Spektrum können die gefundenen Anteile ohne zusätzlichen Zuordnungsschritt separiert werden. Im ersten Schritt wird das Intensitätsbild aufgrund des geringen Signal-zu-Rausch-Verhältnisses zur Kontrastverbesserung mithilfe des Kirsch-Kompass-Filters bearbeitet. Anschließend wird mit der Methode nach Otsu binarisiert [2], um die Schaltfrequenzen und deren Vielfache im Spektrum zu identifizieren. Mögliche nichtdetektierte Vielfache werden mit einer arithmetischen Methodik bestimmt. Auf Basis der Schalt-

frequenzen und deren Vielfache können die Harmonischen des Inverters detektiert werden, die sich abhängig von der Elektromotordrehzahl um die jeweilige Horizontale aufspannen. Die Detektionsgenauigkeit für die Schaltfrequenzen und deren Vielfache liegen bei 94 %, für die Harmonischen bei 87 % [3]. Des Weiteren erfolgt eine automatisierte Detektion der Reifenkavität. Da diese abhängig von der Raddrehzahl ist, kann sie ebenfalls mit der Hough-Transformation auf Basis eines binarisierten Spektrogramms mit einer Genauigkeit von 92 % gefunden werden.

Alle Methoden zur Detektion der tonalen Anteile der Komponentengeräusche benötigen keine zusätzlichen komponentenspezifischen Parameter (wie die Polpaarzahl des Elektromotors, die Zahnzahlen der Getriebestufen oder die Reifendimensionen). Sämtliche detektierten tonalen Geräuschanteile werden mittels des Vold-Kalman-Filters separiert. Die Trennung des verbleibenden Rauschens in die Anteile des Reifens und der Aeroakustik kann auf Basis der mit einer Operational Transfer Path Analysis erstellten Datenbank präzisiert werden. Um die Unabhängigkeit von einer gemessenen Drehzahl für die Trennungsmethoden zu erreichen, wurde die Drehzahlberechnung aus einem Geräuschsignal entwickelt [4].

3 VORHERSAGE DER HÖRBARKEIT EINZELNER GERÄUSCHKOMPONENTEN

Einzelne Geräuschkomponenten beeinflussen die Angenehmheit des Gesamtgeräuschs nur dann, wenn sie hörbar sind, das heißt, wenn der jeweilige Pegel über der Mithörschwelle liegt. Die Hörbarkeit wird üblicherweise mit realen Versuchspersonen bestimmt. Der hohe Zeitaufwand solcher Messungen kann durch den Einsatz von Modellen vermieden werden. Mit einer modifizierten Version des Perzeptionsmodells nach Dau et al. [5] können zum Beispiel wesentliche Aspekte des menschlichen Gehörs berücksichtigt werden: Es werden Schwellen vorhergesagt, indem das im Experiment genutzte Verfahren simuliert wird und das Modell als virtuelle Versuchsperson agiert. Hierdurch können Mithörschwellen für sämtliche tonalen und rauschhaften Komponenten mit einer hohen Genauigkeit bestimmt werden. Nachteilig ist der hohe Rechenaufwand, insbesondere bei der Ermittlung der Mithörschwelle breitbandiger Rauschkomponenten. Die tonalen Komponenten können aber für eine erste grobe Einschätzung mit der Critical Masking Ratio [6] bestimmt werden, bei der der Komponentenpegel und der Rauschhintergrund der umgebenden Frequenzgruppe berücksichtigt werden. Die Daten hierzu sind in **BILD 3** denen des Experiments und des Perzeptionsmodells gegenübergestellt.

4 VORHERSAGE DER ANGENEHMHEIT

Aufgrund des hohen Zeitaufwands für die Geräuschbewertung durch Juryversuche bestand ein Ziel des Projekts darin, die Bewertung der Angenehmheit modellieren zu können. Die Basis für das Modell bilden Hörversuche: Zur Erfassung der Angenehmheit wurden binaurale Geräuschaufnahmen mit einem Schieberegler bewertet, wobei dessen Positionen in einen Zahlenwert von 0 bis 100 konvertiert wurden. **BILD 4** stellt die Benutzerschnittstelle dar. Durch spektrotemporale Manipulationen konnte die Datenmenge zur Modellanpassung erhöht werden, indem einzelne Komponenten basierend auf der automatisierten Geräuschtrennung in ihrem Pegel variiert und künstliche Komponenten als Subharmonische [8] hinzugefügt wurden. Die Auswirkungen einzelner Komponentengeräusche können dadurch ebenfalls analysiert werden. Als

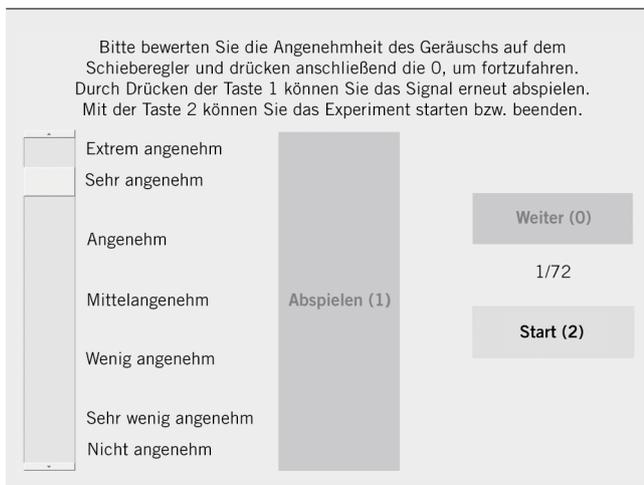


BILD 4 Benutzerschnittstelle zur experimentellen Erfassung der Angenehmheit (© EXA)

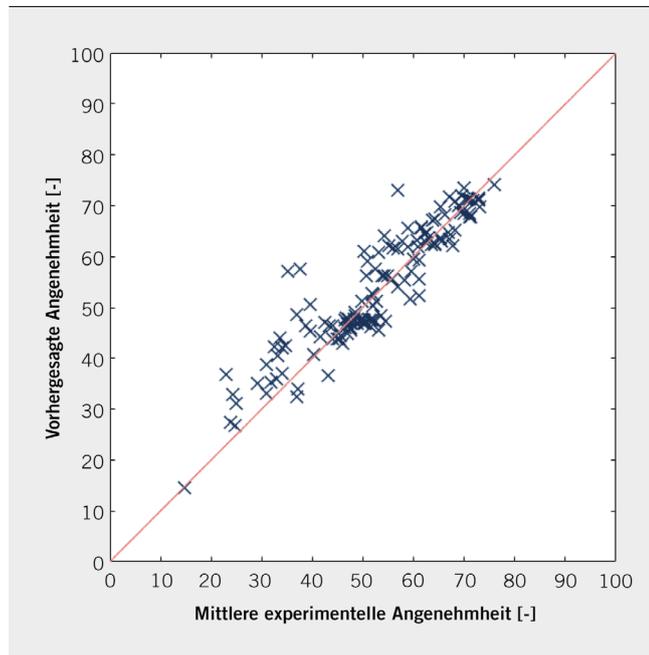


BILD 5 Vorhersage der Angenehmheit gegenüber den experimentellen Mittelwerten (© EXA)

Modellstruktur wurde ein Long Short-term Memory [9] gewählt, da so zeitabhängige Eingangsparameter wie Lautheit, Tonhaltigkeit und Schärfe bei der Vorhersage der Angenehmheit berücksichtigt werden können. Die Daten wurden in ein Trainings-, ein Test- und ein Validierungsset aufgeteilt, wobei die Vorhersageabweichung der Testdaten nach Abschluss des Trainingsprozesses zur Evaluation verwendet wurden und die Abweichungen der Validierungsdaten als deren Gütekriterium. Mit einem mittleren quadratischen Fehler von 6,7 für das Trainingsset sowie 5,2 für das Testset erreicht das Modell eine hohe Vorhersagegüte, **BILD 5**.

5 MASSNAHMEN ZUR VERBESSERUNG DER ANGENEHMHEIT

Im Projektverlauf wurde durch Versuche mit synthetischen und realen Geräuschen gezeigt, dass hochfrequente tonale Komponenten die Angenehmheit reduzieren: Im Fall einer hohen Störwirkung können künstliche Subharmonische dem Geräusch hinzugefügt werden, wobei die relative Frequenz der Komponenten in einem fixen Verhältnis zur Frequenz der störenden Komponente steht. Hierdurch kann die empfundene Tonhöhe der Komponente gesenkt werden, was zu einer Erhöhung der Angenehmheit führen kann [10].

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Mit der automatisierten Trennung von Geräuschanteilen und ihrer Zuordnung zu den verursachenden Komponenten sowie der Bewertung der psychoakustischen Angenehmheit wurde eine Methode geschaffen, um die Innengeräusche von Elektrofahrzeugen effizient zu analysieren. Aufgrund der hohen Detektions- und Zuordnungsraten bei der Vielfalt der herangezogenen Messfahrzeuge zeigt sich die Methode robust und trägt in der Entwicklung zukünftiger Elektrofahrzeuge zur akustischen Optimierung bei.

LITERATURHINWEISE

[1] Hough, P.: Method and Means for Recognizing Complex Patterns. Patent: US3069654A, United States Patent Office, 1962
 [2] Gonzales, R.; Woods, R.: Digital Image Processing. 4. Aufl., Harlow: Pearson Education Limited, 2018
 [3] Frühlingsdorf, K.; Pischinger, S.; Günther, M.; Steffens, C.; Heuer, S.: Automated inverter noise separation in the interior of electric vehicles using adapted Kirsch-Compass kernel and Hough-Transformation. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering (2022), Artikel 2022-02-112022
 [4] Frühlingsdorf, K.; Pischinger, S.: Motordrehzahlbestimmung aus dem Innengeräusch von Elektrofahrzeugen. Jahrestagung für Akustik (Deutsche Gesellschaft für Akustik, DEGA), Stuttgart, 2022
 [5] Dau, T.; Püschel, D.; Kohlrausch, A.: A quantitative model of the “effective” signal processing in the auditory system. I. Model structure. In: The Journal of the Acoustical Society of America 99 (1996), Nr. 6, S. 3615-3622
 [6] Kinsler, L.; Frey, A.: Fundamentals of Acoustics. Hoboken: John Wiley & Sons, 1962
 [7] Doleschal, F.; Rottengruber, H.; Verhey, J. L.: Influence parameters on the perceived magnitude of tonal content of electric vehicle interior sounds. In: Applied Acoustics 181 (2021), Artikel 108155
 [8] Gwak, D. Y.; Kiseop, Y.; Seong, Y.; Lee, S.: Application of subharmonics for active sound design of electric vehicles. In: The Journal of the Acoustical Society of America 136 (2014), Nr. EL391, S. EL391-EL397
 [9] Hochreiter, S.; Schmidhuber, J.: Long Short-Term Memory. In: Neural Computation 9 (1997), Nr. 8, S. 1735-1780
 [10] Doleschal, F.; Verhey, J. L.: Pleasantness and magnitude of tonal content of electric vehicle interior sounds containing subharmonics. In: Applied Acoustics 185 (2022), Artikel 108442

DANKE

Das Forschungsprojekt (FVV-Projekt-Nr. 1369) wurde am Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme (TME) der RWTH Aachen University unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger und der Abteilung für experimentelle Audiologie (EXA) der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (OVGU) unter der Leitung von Prof. Dr. Jesko L. Verhey durchgeführt. Es wurde mit Eigenmitteln des FVV e. V. finanziell gefördert und von einem Arbeitskreis unter der Leitung von Dr.-Ing. Stefan Heuer (MAN Truck & Bus SE) begleitet. Die Autoren bedanken sich bei dem Fördergeber FVV und allen Projektbeteiligten.



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge: www.atz-worldwide.com